

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ÇELİK KÖPRÜLERDE DİYAGONAL ELEMANLARIN
DİNAMİK PARAMETRELERE ETKİSİNİN OPERASYONEL
MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Doktora Tezi

Hakan AYDIN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA

SAMSUN
2021

ÖZET

ÇELİK KÖPRÜLERDE DİYAGONAL ELEMANLARIN DİNAMİK PARAMETRELERE ETKİSİNİN OPERASYONEL MODAL ANALİZİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Hakan AYDIN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Şubat/2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA

Bu tez çalışmasında, laboratuvar koşullarında oluşturulmuş model çelik bir köprü de diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisini diyagonal ve diyagonal bağlantısız olmak üzere iki ayrı deney model yapısı oluşturularak ve deneysel yöntemler kullanılarak model çelik köprünün yapı dinamik davranışına etkileri ortaya çıkarılmıştır. Bu dinamik parametreler ise doğal frekans, periyot, sönüm oranları ve mod şekillerinden oluşmaktadır.

Model çelik köprüde hem pratikliği hemde ölçüm avantajları olması sebebiyle güncel ve yenilikçi bir deneysel yöntem olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (OMA) gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Deneysel ölçümler güvenilirlik ve dış etkenlerin etkisini en aza indirmek amacıyla OMÜ İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı ortamında gerçekleştirilmiştir. Model çelik köprüde modelin dinamik parametrelerini belirlemek için aynı yöntem ve koşullar kullanılarak deneylerdeki tek değişenin diyagonal elemanlar olması dolayısıyla değişen dinamik etkilerin diyagonal elemanlara bağlı olması sağlanmıştır. Model köprünün çevresel etkilere göstermiş olduğu tepkileri ölçmek için modele ivmeölçerler yerleştirilmiş ve ölçümlerden alınan titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayara aktarılmış toplanan veriler ARTEMİS yazılımı kullanılarak yazılım bünyesinde yer alan Stokastik Alt Alan Belirleme (SSI-PC) yöntemleri kullanılarak çelik modelin deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile birlikte diyagonal elemanların çelik deney yapısının dinamik parametrelere etkisi hâkim frekansta % 38.9 artış sağladığı, hakim periyotta ise % 63.21 azalış sağladığı görülmektedir. Diyagonal elemanlı durumda sönüm oranının azaldığı görülmektedir. Bu durumda yapı rijitliğinin arttığını göstermektedir.

Model çelik köprüde diyagonal elemanların kullanılması ile model çelik köprünün dinamik etkilere karşı daha güvenli kılındığı sonucuna yapılan bu çalışma ile ulaşılmıştır.

Şubat 2021, 135 sayfa

Anahtar Sözcükler: Diyagonal elemanlar, Operasyonel modal analiz, Çelik köprü, Periyot, frekans, Sönüm oranı, Mod şekli, Stokastik Alt Alan Belirleme (SSI-PC)

ABSTRACT

DETERMINING THE EFFECT OF DIAGONAL ELEMENTS ON DYNAMIC PARAMETERS IN STEEL BRIDGES BY USING OPERATIONAL MODAL ANALYSIS

Hakan AYDIN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Ph.D., February /2021

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sertaç TUHTA

In this thesis study, the effect of diagonal elements on dynamic parameters in a steel model bridge created under laboratory conditions, two different experimental model structures, diagonal and non-diagonal, were created and the effects on the structural dynamic behavior of the steel model bridge were revealed by using experimental methods. These dynamic parameters consist of natural frequency, period, damping ratios and mode shapes.

The Operational Modal Analysis Method (OMA) has been implemented as an up-to-date and innovative experimental method in the steel model bridge due to its practicality and measurement advantages. In this method, it is accepted that the structure is vibrated by an environmental effect and the reaction of the structure to this vibration is measured. Experimental measurements were carried out in the OMU Civil Engineering Laboratory environment in order to minimize the impact of external factors and reliability. By using the same methods and conditions to determine the dynamic parameters of the model in the steel model bridge, the only variable in the experiments was the diagonal elements so that the changing dynamic effects were dependent on the diagonal elements. In order to measure the responses of the model bridge to environmental effects, accelerometers were placed in the model and the vibration signals obtained from the measurements were transferred to the computer through the data collection unit, and the collected data were obtained using the Stochastic Subspace Identification (SSI-PC). Methods included in the software, using the ARTEMIS software, to obtain the experimental dynamic characteristics of the steel model. When the results are compared, it is seen that the effect of the steel test structure of the diagonal elements on the dynamic parameters has increased by 38.9 % in the dominant frequency, and 63.21 % in the dominant period. It is seen that the damping ratio decreases in the case with diagonal elements. This shows that the stiffness of the structure increases

With this study, it was concluded that the use of diagonal elements in the steel model bridge made the steel model bridge more secure against dynamic effects.

February 2021, 135 pages

Keywords: Diagonal elements, Operational modal analysis, Steel bridge, Period, frequency, Damping ratio, Mode shape, Stochastic Subspace Identification (SSI-PC).

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora öğrenimim boyunca yardımlarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam sayın Dr.Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme süreci boyunca bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren ve tez sürecinin ilerlemesinde katkılarından dolayı sayın Prof. Dr. Azer A. KASIMZADE hocama ve sayın Doç.Dr. Mevlüt GÜRBÜZ hocama,

Tez savunma sınavında tezime katkı ve değerli görüşlerinden ötürü sayın Doç.Dr. İsa ÇÖMEZ hocama ve sayın Doç.Dr. Mustafa Özgür YAYLI hocama,

Doktora eğitimim süresince göstermiş oldukları ilgi, yardım ve bilgi paylaşımlarından ötürü Arş. Gör. Furkan GÜNDAY ve Dr.Gencay ATMACA'ya,

Yetişmemde emeği geçen öğrenim hayatım boyunca burada adlarını sayamadığım çok değerli emektar öğretmen ve hocalarıma, OMÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki değerli hocalarıma,

Doktora öğrenimim boyunca desteklerini esirgemeyen Samsun İlkadım Belediyesindeki tüm mesai arkadaşlarıma ve idarecilerine,

Doktora çalışmalarım boyunca benimle ilgili her türlü fedakârlığa katlanan sevgili eşim Aslıhan ERTOY AYDIN'a ve sevgili oğullarım Çınar ve Çağan'ıma ve çok kıymetli değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hakan AYDIN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	6
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETİ	7
2.1. Sistem Tanımlama Gelişimi.....	7
2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi.....	9
2.3. Konuya İlişkin Yapılan Literatür Çalışmaları.....	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1. Materyal ve Yöntem.....	25
3.1.1. Model çelik köprü hakkında genel bilgiler.....	25
3.1.2. Model çelik köprü Mesnet Kurulum.....	30
3.1.3. Model çelik köprü Tork Anahtarı İle Bulon Sıkım Ve Ölçüm İşlemi.....	32
3.1.4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Cihazlar Ve Deneysel Aletleri.....	35
3.2. Yöntem.....	45
3.2.1. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler Ve Hareket Denklemleri.....	46
3.2.2. Sistem tanımlama Yaklaşımı.....	48
3.2.3. Operasyonel Modal Analiz.....	60
3.2.4. Modal Parametrelerin Elde Edilme Yöntemleri.....	61
3.2.5. Stokastik Altalan Belirleme (Subspace System Identification-SSI-PC) Yöntemi.....	62
3.2.6. Dinamik Parametrelerin karşılaştırılması.....	66
3.2.7. Analitik ve Deneysel Dinamik Parametrelerin Modal Güvence Kriterine Modal Assurance Criterion , MAC) Göre Değerlendirilmesi.....	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	68
4.1. Dinamik parametreler	68
4.2. Diyagonal bağlantılı model çelik köprüde deneysel dinamik parametrelerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar.....	69
4.3. Diyagonal durum için model çelik köprüde OMA ile elde edilen frekans,sönüm oranları ve mod şekilleri.....	71

4.3.1. Deneysel Yöntem Deneyleri (OMA).....	73
4.4. Diyagonal Model çelik köprüde (Modal Assurance Criterion , (MAC) Modal Güvence Kriterine Göre Değerlendirme.....	80
4.5. Diyagonal Bağlantılar Sökülmüş Model çelik köprüde Deneysel Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar.....	84
4.6. Model çelik köprüde Diyagonal Elemanlar Sökülmüş Hali İçin Deneysel Metolla Elde Edilen Analiz Sonuçları.....	90
4.7. Diyagonalsız Durum İçin MAC Matrisi	93
4.8. Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması.....	96
4.8.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	97
4.8.2. Periyot Değerlerinin Karşılaştırılması.....	98
4.8.3. Sönüm Değerlerinin Karşılaştırılması.....	99
4.8.4. Mod Şekillerinin Karşılaştırılması.....	101
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	102
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ.....	117

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

%	Yüzde
m	Metre
gr	Gram
kg	Kilogram
mm	Milimetre
N	Kayıt toplam nokta sayısı
Δ_t	Kayıt örnekleme aralığı
Δ_f	Frekans çözünürlüğü
f_N	Nyquist frekansı
f	Frekans
$x(t)$	Yatay ivmeölçer kaydı
$\{u\}$	Düğüm yer değiştirmesi
$[k]$	Rijitlik matrisi
$[c]$	Sönüm matrisi
$[m]$	Kütle matrisi
ω_{oi}	Sönümsüz sistemin serbest titreşim frekansı
$\{a_i\}$	Sönümsüz sistemin doğal titreşim mod şekli
$\{F_e\}$	Sisteme etkiyen elastik kuvvet
$\{F_c\}$	Sisteme etkiyen sönüm kuvveti
$\{F_I\}$	Sisteme etkiyen atalet kuvveti
k_{ij}	Birim yer değiştirmeden oluşmuş kuvvet
c_{ij}	Birim yer değiştirmeden oluşmuş kuvvet
m_{ij}	Birim yer değiştirmeden oluşmuş kuvvet
e_0	Tesir vektörü
e_*	Tesir vektörü
A	Durum matrisi
B	Giriş etki matrisi
C	Çıkış etki matrisi
D	Doğrudan iletme matrisi
$\underline{x}(t)$	Durum vektörü
$\underline{u}(t)$	Sistem girdi vektörü
$\underline{y}(t)$	Sistem çıktı vektörü
$\underline{\hat{x}}_k$	Gözlemsel durum vektörü
(\underline{X}_k)	Gözlenemeyen rasgele vektörler dizisi
(\underline{Y}_k)	Gözlenebilen rasgele vektörler dizisi
(\underline{W}_k)	Gözlenemeyen rasgele hata vektörleri dizisi
$K(k)$	Kalman kazanç matrisi
P_0	Başlangıç kovaryans matrisi
$\overline{[A]}$	Sistem matrisi
$\overline{[B]}$	Sistem matrisi
$\overline{[C]}$	Sistem matrisi

$\{u_k\}$	Ayrık zaman durgunlaşmış yer değışme vektörü
$[A]$	Ayrık-zamanda sistem matrisi
$[B]$	Ayrık-zamanda giriş matrisi
$[I]$	Birim matrisi
$\{w_k\}$	Sistem oluşum gürültüsü
$\{v_k\}$	Sistem oluşum gürültüsü
$\{y_k\}$	Sistem oluşum gürültüsü
ψ	Öz vektör
λ	Kompleks özdeğer
ξ	Sönüm oranı
T	Periyot
sn	Saniye
cm	Santimetre
t	Zaman
Hz	Hertz
kN	Kilonewton
ω	Frekans

KISALTMALAR

OMA	Operasyonel modal analiz
DM	DeneySEL modal analiz
MAC	Modal güvenlik kriteri
GFTAA	Geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma
EFDD	Frekans tanım alanında ayrıştırma
MGK	Modal güvenlik kriteri
GSY	Güç spektral yoğunluk
SSI	Stokastik altalan belirleme
FEA	Sonlu elemanlar modeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne Göre Model çelik köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi Aşaması.....	25
Şekil 3.2. Model çelik köprü öngörünüş.....	26
Şekil 3.3. Model çelik köprü tabliye üst görünüş	26
Şekil 3.4. Model çelik köprü tabliye yan görünüş	27
Şekil 3.5. Model çelik köprü mesnetsiz hali.....	27
Şekil 3.6. 3 Boyutlu model çelik köprü eleman detayları.....	29
Şekil 3.7. Model çelik köprü tabliye Üstten Görünüş Birleşim Detayları.....	30
Şekil 3.8. Model çelik köprü cephe görünüş eleman birleşim detayları.....	30
Şekil 3.9. Model çelik köprü betonarme mesnet yapılması kalıp-demir-beton	31
Şekil 3.10. Model çelik köprü ayak montajı.....	31
Şekil 3.11. Model çelik köprü mesnet montajlı hali.....	32
Şekil 3.12. Tez çalışmasında kullanılan tork anahtarı ve başlıkları	33
Şekil 3.13. Model çelik köprünün taşıyıcı elemanlar ve bağlantı elemanlarının tork anahtarı ile sıkılması ve kontrolü.....	34
Şekil 3.14. Model çelik köprünün taşıyıcı elemanlar ve bağlantı elemanlarının tork anahtarı ile sıkılması ve kontrolü.....	34
Şekil 3.15. Tek eksenli ivmeölçer.....	38
Şekil 3.16. Üç eksenli ivmeölçer	38
Şekil 3.17. 4 Kanallı dinamik veri toplama cihazı ve ivme kayıt sistemi	40
Şekil 3.18. GPS anteni.....	42
Şekil 3.19. Veri toplama ünitesinin ölçüm uyarıcıları.....	43
Şekil 3.20. Artemis modal pro yazılım arayüzü model çelik köprü analizi.....	44
Şekil 3.21. Sistem tanımlama genel şeması.....	49
Şekil 4.1. Ölçüm öncesi ivmeölçerlerden veri alınması takibi	71
Şekil 4.2. Artemis Modal Pro model çelik köprü modeli	72
Şekil 4.3. Diyagonal Durum İçin İvmeölçerlerin Yerleştirilmesi.....	73

Şekil 4.4.	Diyagonalı durum için ivmeölçerler ve sismometre Veri Alınması İşlemi.....	73
Şekil 4.5.	İvmeölçer yerleşim planı-Artemis	74
Şekil 4.6.	Artemis Modal Pro yazılımında ivmeölçerlerin yerleşim planı	74
Şekil 4.7.	Referans ivmeölçerlerin belirlenmesi.....	74
Şekil 4.8.	Üst başlıktan elde edilen ivme değerleri	75
Şekil 4.9.	Alt başlıktan elde edilen ivme değerleri	75
Şekil 4.10.	SSI-PC Spektral Yoğunluk Grafiği	76
Şekil 4.11.	OMA SSI-PC 1.Mod	77
Şekil 4.12.	OMA SSI-PC 2.Mod	78
Şekil 4.13.	OMA SSI-PC 3.Mod	78
Şekil 4.14.	OMA SSI-PC 4.Mod	79
Şekil 4.15.	OMA SSI-PC 5.Mod	80
Şekil 4.16.	OMA-SSI-PC ve Sonlu Eleman (FEA) arasındaki MAC matrisi	81
Şekil 4.17.	FEA 1.Mod - SSI-PC 1.Mod	82
Şekil 4.18.	FEA 2.Mod - SSI-PC 2.Mod	83
Şekil 4.19.	FEA 3.Mod - SSI-PC 3.Mod	83
Şekil 4.20.	FEA 4.Mod - SSI-PC 4.Mod	83
Şekil 4.21.	FEA 5.Mod - SSI-PC 5.Mod	84
Şekil 4.22.	Model çelik köprüde Diyagonellerin Sökülme İşlemi.....	85
Şekil 4.23.	Model çelik köprüde diyagonal sökülmüş hali	85
Şekil 4.24.	Diyagonalsız durum için ivmeölçer yerleşim planı.....	86
Şekil 4.25.	Üç eksenli ivmeölçerlerin düğüm noktasına yerleştirilmesi.....	86
Şekil 4.26.	Tek eksenli ivmeölçerlerin düğüm noktasına yerleştirilmesi	87
Şekil 4.27.	Diyagonalsız durum için model çelik köprü Artemis modeli.....	87
Şekil 4.28.	Diyagonalsız durum için Referans ivmeölçer belirlenmesi.....	88
Şekil 4.29.	Diyagonalsız durum Üst başlıktan elde edilen İvme değerleri.....	89
Şekil 4.30.	Diyagonalsız durum Alt başlıktan elde edilen İvme değerleri	89
Şekil 4.31.	SSI-PC Spektral Yoğunluk Grafiği	90

Şekil 4.32. OMA SSI-PC 1.Mod	91
Şekil 4.33. OMA SSI-PC 2.Mod	92
Şekil 4.34. OMA SSI-PC 3.Mod	92
Şekil 4.35. OMA SSI-PC 4.Mod	93
Şekil 4.36. OMA SSI-PC 5.Mod	93
Şekil 4.37. OMA-SSI-PC ve Sonlu Eleman (FEA) arasındaki MAC matrisi	94
Şekil 4.38. FEA 1.Mod - SSI-PC 1.Mod	95
Şekil 4.39. FEA 2.Mod - SSI-PC 2.Mod	95
Şekil 4.40. FEA 3.Mod - SSI-PC 3.Mod	95
Şekil 4.41. FEA 4.Mod - SSI-PC 4.Mod	96
Şekil 4.42. FEA 5.Mod - SSI-PC 5.Mod	96

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1.	Model çelik köprü kesit ve malzeme özellikleri.....	28
Tablo 3.2.	Çubuk eleman malzeme özellikleri.....	28
Tablo 3.3.	(50 x 20 mm)Kutu kesit kiriş eleman malzeme özellikleri.....	28
Tablo 3.4.	(42.4 mm x 3mm)Dairesel eleman malzeme özellikleri	29
Tablo 3.5.	Çalışmada kullanılan tork anahtarının teknik özellikleri	33
Tablo 3.6.	Metrik civataların gerilme yükü ve sıkma torku değerleri.....	35
Tablo 3.7.	İvme ölçerlerin Teknik Özellikleri.....	39
Tablo 3.8.	Textbox Veri Toplama Cihazı Teknik Özellikleri	41
Tablo 4.1.	Minimum ölçüm süresi	71
Tablo 4.2.	Diyagonalı OMA SSI-PC ile edilen dinamik parametreler	77
Tablo 4.3.	Diyagonalsız OMA SSI-PC ile edilen dinamik parametreler	91
Tablo 4.4.	Frekans değerlerinin karşılaştırılması	97
Tablo 4.5.	Periyot değerlerinin karşılaştırılması	98
Tablo 4.6.	Sönüm değerlerinin karşılaştırılması	100

1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşımın önemi her geçen gün artmaktadır. Köprüler de ulaşımın en temel parçalarından biridir. Çelik yapılar, köprü tasarımında sık kullanılan malzemelerdendir. Köprünün geçişini temin eden esas kısımları çelik olarak inşa edilmiş köprülere çelik köprü denir. 18. yüzyıldan günümüze kadar kullanılan çelik yapı köprüler, günümüzde oldukça fazla tercih edilen yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Depreme daha dayanıklı olması, çevre dostu olması ve daha ekonomik olmasıyla çelik köprülerin sayısı her geçen gün artmaktadır (Tören, 2011).

Köprü yapımında kullanılan diğer yapı malzemelerine göre çeliğin esas avantajı dayanımından ve sünekliğinden ileri gelmektedir. Çelik betonla kıyaslandığında yüksek çekme ve basınç dayanımına sahiptir. Rijitliklerinin ağırlıklarına oranı olarak bir kıyaslama yapılırsa çelik betondan çok daha yüksek bir değere sahiptir. Bu sebeple yapısal çelik köprü inşaatında verimli ve ekonomik bir malzemedir. Değişik açıklık ölçülerinde çelik köprü inşa edilebilmesine rağmen büyük açıklıklar için çelik köprü yapımı daha uygun bir çözümdür.

Son yıllarda yapılan çalışmalar içinde elektronik ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yapı mühendisliğinde de önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Bu değişikliklerin en çarpıcı örneklerinden birisi yapıların dinamik davranışlarının incelenmesi konusunda izlenen yöntemlerdir. Eskiden laboratuvar testleri veya analitik yöntemlerle çözülmekte olan birçok problem bugün gerçek yapılara kurulan izleme sistemleri sayesinde çok daha doğru olarak çözülebilmektedir (Şafak, 2007).

İnşaat mühendisliği yapıları ekonomik ömürleri boyunca, yapının dinamik özelliklerini değiştiren etkilere maruz kalırlar. Titreşim tabanlı yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) yöntemlerinin temelinde hasarın yapının rijitlik, kütle veya enerji yutma özelliklerini değiştirdiği ve bunun da yapının ölçülebilir dinamik tepkisinde değişikliklere yol açtığı gerçeği yatmaktadır. YSI sürecinin önemli bir basamağı dinamik sistemin modal parametrelerinin tahminidir (Gündoğan, 2012). Ülkemizde mevcut olan önemli yapılardan köprü, tarihi yapılar ve barajlara ait seçilecek birer yapının yapı sağlığı izlenmesi ile deprem, su, rüzgâr, korozyon, insan ve trafik yüklerine karşı gösterdikleri davranışın zamanla değişiminin incelenip yapının kalan ömrünün tahmini yapılmaktadır. Bu doğrultuda, kablolu ve kablosuz sistemli

çevresel titreşim testleri uygulanıp dinamik karakteristikleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenmiş olan köprü, tarihi yapılar ve baraj örneklerinin son yıllarda popüler bir konu haline gelen yapısal sağlık izlemesi yöntemiyle zamana bağlı değişimleri incelenmektedir.

Yapıların belirli periyotlarla izlenmesiyle yapıların yapısal davranışlarının zamana bağlı değişiminin nasıl olduğu irdelenerek yapının gelecekteki yapısal davranışlarının belirlenmesi sağlanabilmektedir. Yapılacak bu tahminlerle yapının kullanım ömrü belirlenecektir. Ayrıca yapının sürekli izlenmesi yapıda sel, rüzgar, deprem, aşırı yük gibi çeşitli nedenlerle oluşabilecek hasarların belirlenip, yapıya gerekli müdahalenin yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Yapılacak çalışmalar sonucunda; projelendirme aşamasında kabul edilen kriterlerin ne kadar gerçekçi olduğu, seçilen yapılarda hasar olup olmadığı, yapıların işletme sırasında maruz kalabileceği dış etkiler karşısında beklenen davranışı hangi ölçüde yansıtabileceği, olası büyük bir depremde ve aşırı yükler altında nasıl bir davranış sergileyeceği, alınacak önlemler ve yapıların kalan ömürlerinin belirlenmesine yönelik sonuçlar elde edilecektir.

Dünyada yapıların birçok çeşidi vardır(betonarme yapılar, çelik bina ve köprüler vb.) bu yapıların ortak özellikleri, statik ve dinamik yükler altında ayakta kalmayı başarabilmeleridir. Dinamik yükler altında yapılarda meydana gelen etkilerden titreşimler meydana gelmekte ve bu durum erken müdahale edilemeyen yapılarda birçok hasarlar meydana getirmektedir.

Son yıllarda dünyada birçok depremler meydana gelmiştir ve bunun sonucunda ağır kayıplar verilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlara bakarak ağır kayıp alan ülkeler için bu durumun çeşitli sorunlar yarattığı, yapıların mevcut durumlarının bilgisinin önceden alınmasının yapı için ne kadar önem arz ettiği anlaşılmıştır. Bu durumda, yapıların titreşimlere karşı gösterdikleri davranışın deneysel olarak belirlenmesi ve teorik olarak elde edilen ve deneysel değeri karşılaştırarak gerçek yapıyı temsil etmek için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ortaya çıkan gereksinimlerdir.

Bilindiği gibi yapıların titreşim testi için zorlanmış (sarsma, darbe çekici vb. testleri) ve çevresel titreşim teknikleri mevcuttur (Kasımzade ve Tuhta, 2012; Kasımzade vd, 2019k).

Günümüzde deprem mühendisliği alanındaki çalışmalarda hızlı gelişmeler sağlanmaktadır. Yapıların, köprülerin ve diğer yapısal sistemlerin depreme maruz kaldıklarında gösterecekleri dinamik davranışlar genellikle analitik modeller veya titreşim masalarındaki model tasarımlar yoluyla araştırılmaktaydı. Son zamanlarda üzerlerine ivmeölçerler yerleştirilmiş yapılardan alınan datalarla yapıların dinamik davranışları konusunda çok daha gerçekçi bilgilere ulaşılmaktadır. Tuhta vd, 2019).

Yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesinde esas amaç, var olan yapılarda gerekli inceleme ve hesapların olası bir depremden önce yapılarak ve yetersiz görülen yapıların depremde hedeflenen performans seviyesine yükseltilmesi için uygulanacak iyileştirme işlemlerine karar verilmesidir. Deprem tehlikesi altında olan kentsel yerleşimlerde yeterli deprem güvenliğine sahip olmayan pek çok yapı olduğu bilinmektedir (Tuhta, 2010).

1 Ocak 2019 tarihinden itibaren yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) de önemli bir değişiklik olarak performansa dayalı tasarıma geçilmiş olması ve deprem yer hareketi spektrum hesabının, yapının bulunduğu konuma ve zemin değerlerine göre yapılacak olmasıdır (TBDY2018). Bu yönetmelik değişikliği ile birlikte birçok yapıda (köprü, yüksek yapılar vb.) emniyet ve güvenlik şartlarını sağlamamaktadır. Yönetmelikteki bu değişiklikle beraber Türkiye'nin deprem tehlike haritasında yenilenmiş ve deprem bölgeleri hakkındaki sınıflandırmada kaldırılmıştır. Yapılan bu değişiklikle birlikte zemin cinsinden kaynaklanan ivme katsayıları değişmiştir. Yapıların teorik analizlerinde çoğunlukla deprem, rüzgâr ve kar yükü dikkate alınmakta ve yapılar bu yüklere karşı dayanıklı olarak projelendirilmektedir. Proje aşamasından sonra yapıların dış etkiler altında çok fazla zarar görmemesi öngörülmektedir. Bu öngörüde yatan neden uygulama sırasında yapılan hatalar olmakla birlikte, genellikle yapıların projelendirme aşamasında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanmamasıdır. Bu nedenle yapılması gereken, inşa edilmiş veya kullanılmakta olan yapıların mevcut durumlarının dikkate alınarak dinamik davranışlarında etkili olan parametrelerin belirlenmesidir.

Herhangi bir yapının dinamik davranışının araştırılması, teorik olarak sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ile ve deneysel olarak ise modal analiz yöntemleri kullanılarak incelenebilmektedir. Her iki şekilde gerçekleştirilen incelemeler

neticesinde yapıya ait teorik ve deneysel dinamik karakteristikler (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilebilmektedir.

Teorik analizde yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken birçok kabul yapılmakta ve oluşturulan sonlu eleman modelinin mevcut yapıyı temsil ettiği varsayılmaktadır. Fakat yapılan kabullerden dolayı oluşturulan sonlu elemanlar modelinin mevcut yapıyı tam olarak temsil etmesi gerçekten uzak bir yaklaşımdır.

Deneysel inceleme ile yapıya ait dinamik karakteristikler mevcut durum için belirlenmekte ve belirlenen doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri yardımıyla yapının mevcut durumu tam olarak anlaşılabilir. Böylelikle teorik incelemeye nazaran yapının gerçek durumuna çok daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir (Kasımzade vd,2019a; Kasımzade vd,2019b; Kasımzade vd,2019c; Kasımzade vd,2019d; Tuhta vd,2020a; Tuhta vd,2020b; Tuhta vd,2019).

Binaların dinamik özelliklerinin belirlenmesi bina deprem performansının tayini için gereklidir. Sistem binanın dinamik yük tepkilerinin inceleme sonuçlarına dayanarak, deprem esnasında performansını belirlemeyi ve kritik bölgelerindeki elemanlarının davranışının değerlendirilmesini hedeflemektedir. Sistemin tam bir uyum içinde çalışması sonucunda alınacak sonuçlar binalar hakkında çok detaylı bilgiler edinmemizi sağlayacaktır. (Kasımzade ve Tuhta 2007). Yapıların dinamik davranışlarının deneysel olarak araştırılmasında en önemli yöntemlerden birisi modal test yöntemidir. Zorlanmış titreşim yöntemi olarak da adlandırılan deneysel modal analiz yöntemi yapıya zarar verebildiğinden dolayı özellikle yapılarda kullanılması uygun olmamaktadır. Bundan dolayı yapıların modal parametrelerinin belirlenip dinamik özelliklerinin elde edilmesinde operasyonel modal analiz yöntemini (OMA) kullanmak daha doğru olmaktadır.

Yapılarda uygulanabilen modal analiz tekniklerinden elde edilen parametreler kullanılarak yapıda var olan bir hasarın varlığı, yeri ve büyüklüğü tespit edilebilmektedir. Bu yaklaşım yapıda oluşan bir hasarın yapının tüm davranışını (kütle, rijitlik veya sönüm) etkilediği dolayısıyla da yapının dinamik karakteristiği üzerinde (doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekli) değişiklik yaptığı gerçeğine dayanmaktadır. Bundan dolayı, periyodik olarak elde edilebilecek olan herhangi bir yapının dinamik özellikleri o anki durumunu belirlemede önemli rol oynamaktadır.

Çelik model bir köprü kullanılarak yapılan bu çalışma laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesinin en önemli sebebi sonuçların daha güvenilir elde edilmesini sağlamak ve olası dış etkenlere müdahale etmenin kolaylığıdır. Her ne kadar ülkemizde yapı stokunun çok önemli bir kısmını oluşturan betonarme yapılar için akla gelse de ülkemizde son yıllarda çelik yapı sistemleri de giderek artmaktadır.

Ayrıca çelik yapının betonarme yapılara göre daha az değişkeninin olması diğer bir deyişle homojen ve profiller fabrikalarda daha kontrollü ve güvenilir bir şekilde üretilmiş olması tüm bunlara bağlı olarak deprem performansının betonarme yapılara göre üstün olması ve uygulama kolaylıkları gibi sebeplerle ülkemizde ve dünyada çelik yapılara yönelim gitgide artmaktadır. Tüm bu nedenlerden ötürü günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte, köprü, tarihi yapılar ve barajlar gibi önemli mühendislik yapılarının tasarımları bilgisayar destekli yöntemler kullanılarak kolayca yapılabilmektedir. Özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak hazırlanan çeşitli programlarla bu yapıların depremlere veya diğer dinamik etkilere karşı güvenlikleri belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, hasar gören ya da yıkılan bu yapılar incelendiğinde, bilgisayar programlarıyla tasarlanan yapıların mevcut yapılarla arasında birçok farklılığın oluşabildiği görülmektedir. Bunların sebepleri arasında, tasarımlar sırasında bazı kabullerin yapılması ve çeşitli işçilik hataları yer almaktadır. Dolayısıyla, mevcut yapıların deprem ve daimi yükler altında güvenliklerinin deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi ve zamanla yapıda meydana gelen değişimlerin yapının kalan ömrünü nasıl etkilediğinin izlenmesi gerekmektedir. (Dynamic Academy,2017)

Günümüzde inşaat mühendisliği yapıları dinamik etkilerden etkilenmektedir. Dünya üzerindeki yapılar depremden ağır hasar görmektedirler. Böylece, can ve mal kaybı yaşanmaktadır. Bu durum özellikle aktif fay hatlarında bulunan ülkeleri etkilemiştir. Dünyada deprem öncesi ve sonrası önlemler geliştirilmiştir. Bu nedenlerden dolayı, dünyadaki yapıların dinamik performansını belirlemek gerekir. Dinamik performansı belirlemek için çeşitli yöntemler vardır. Sistem tanımlama bu yöntemlerden biridir. Yapısal sistemin matematik modeli, sistem tanımlama yöntemi ile elde edilir (Aydın H.,2020;Kasımzade ve Tuhta,2012;Kasımzade vd,2019;Tuhta vd,2019a;Tuhta vd,2019b;Tuhta vd,2019c;Tuhta vd,2019d;Tuhta ve Günday,2019).

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Yukarıda yapılan anlatımlar ışığında laboratuvarda yapılabilecek kısa süreli bir ölçüm ile model çelik köprünün davranışının gerçekçi bir şekilde bulunması sağlanmış olacaktır. Çelik köprülerin gerçek dinamik davranışının analizi taşıyıcı sistemlerinin üretiminde kullanılan malzeme türlerinin dayanımlarının belirlenmesinin çok zor olması, imal edilirken yeterli düzeyde mühendislik hizmeti almadan üretilmeleri nedeniyle çok değişik geometriye, taşıyıcı sistem boyutlarına, temel türüne ve taşıyıcı sistem özelliklerine sahip olmaları nedeniyle oldukça zor bir mühendislik problemidir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında önerilen metodun çelik köprülerde diyagonal elemanların dayanım kriterlerinin ve yerleşim düzenlerinin deprem performans düzeyleri ve risk düzeylerinin belirlenmesinde kullanılabilen standart bir metod haline gelebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı Laboratuvar koşullarında oluşturulan çelik bir köprü modelinde diyagonal elemanlarının kullanılmasının yapının dinamik davranış üzerindeki etkisi doğal frekanslar, modal sönüm oranları ve mod şekillerinde meydana gelen değişimler dikkate alınarak değerlendirilmeye çalışılacak olmasıdır.

Bu amaçla, laboratuvar ortamında oluşturulan 6,10m açıklığında bulon birleşim elemanlı model çelik bir köprü üzerinde incelemeler yapılacaktır. Çelik yapılarda yatay yükler altında önem taşıyan diyagonal elemanların etkisini belirleyebilmek amacıyla model çelik köprünün dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenecektir. Deneysel yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda çelik köprülerin dinamik davranışlarının bilgisayar yazılımları ile doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve bundan sonra yapılacak çalışmalarda bir referans teşkil etmesi amaçlanmıştır. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ARTEMİS Pro yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden Stokastik Altalan Belirleme (SSI-PC) yöntemi kullanılacaktır.

Model çelik köprüde diyagonal elemanların kullanılmasının yapının dinamik davranış üzerindeki etkileri model çelik köprüde diyagonal ve diyagonal elemanlar sökülmüş durumunda köprüde doğal frekanslar, periyotlar, sönüm oranları ve mod şekilleri ayrı ayrı karşılaştırılarak diyagonal elemanların yapının dinamik parametrelerine olan etkileri ortaya çıkarılacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan yöntemlerin kısa açıklamaları, gelişimleri ve bu yöntemlerin uygulamaları hakkında kaynak bilgi ve özetleri açıklanmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan yöntem olması açısından öncelikle bu bölümde operasyonel modal analiz yönteminden bahsedilmiş ve sistem tanımlama hakkında bilgi verilmiştir. Konu hakkında yapılan literatür çalışmaları incelenerek yapılan bu çalışmaya yol göstermesi sağlanmıştır.

2.1. Sistem Tanımlama Gelişimi

Parametrik sistem tanımlama yöntemlerinin temeline inildiğinde karşımıza iyi bilinen istatistiksel yöntemlerden “en küçük kareler” ve “en büyük benzerlik” prensipleri çıkmaktadır. “En küçük kareler” yöntemi, doğrusal ve basit çoklu regresyon modellerinin çözümlenmesinde kullanılan temel aracı birim olarak çıkar. Bunun yanında çok denklemlerli ekonometrik çözümlerinde de kullanılan tekniklerin ilkidir. “En büyük benzerlik” yöntemi de sistem tanımlama hususuyla bağlantılı olarak veri gruplarına ait olasılık dağılımlarına temel teşkil eden parametrelerden çıkarımlarda bulunmaya yardım eden bir yöntemdir.

Bu yöntemlerin dinamik sistemlere uygulanabilir hale getirilmesi “modern kontrol teorisi”nin K.J. Aström ve I. Bohlin tarafından yayımlanan makaleleriyle (“Numerical Identification of Linear Dynamic Systems From Normal Operating Records”, 1965) 1960'lara rastlar. Sistem tanımlama için geliştirilen bu tekniklerin endüstriyel süreçler için uygulanması ise Lennart Ljung ile başlamıştır (“The System Identification Toolbox”, 1986). Günümüzde her ne kadar yeni bir alan olarak görülebilir olsa da sistem tanımlama ve dallarına ait edebiyat çok geniştir. Eykhoff (1974); Goodwin & Payne (1977); Söderström & Stocia (1989); Lennart Ljung'un (1987) eserleri bu konuya temel teşkil eden kaynaklardır. Bu konu hakkında elde bulunan Box & Jenkins (1970), Eykhoff (1974), Spriet & Vansteenkiste (1982), Johansson (1993) ve Ljung & Glad (1994)'ın yazmış olduğu kitaplar birçok uygulama sorununa dair yazılmış kitaplar konumundadır. Goodwin & Payne (1977), Davis & Vinter (1985), Hannan & Deistler (1988), Caines (1988), Chen & Guo (1991) ve Söderström & Stocia (1989) kitapları ise daha çok teorik konular hakkında çözüm getirmek amacıyla yazılmış eserlerdir.

Burada IFAC (*International Federation of Automatic Control*) (Uluslararası Otomatik Kontrol Federasyonu)'nun hayata geçirdiği süreçlerden de bahsetmek gerekmektedir. Bu kuruluş, sistem tanılama adına birçok makale sunulmasına ve üretilmiş veya keşfedilmiş bilgilerin yaygınlaşmasına imkân veren “Tanılama ve Sistemlerin Parametre Yöntemleri Sempozyumu (*Symposia on Identification and System Parameter Estimation*)” düzenlemektedir. Bu sempozyumlar, ilki 1967 yılında Prag’da gerçekleştirildiğinden beri, her üç sene bir hazırlanmaya devam etmektedir.

Gerçek yaşama dair nesnelerin matematiksel modellerini yapmanın felsefi sorgulamaları ilk defa 1934’te Popper tarafından tartışılmaya açılmıştır. Fiziksel yasaların mühendislik uygulamalarındaki modellenmesi ise Wellstead (1979), Ljung & Glad (1994), Cellier (1991) ve buna benzer birçok bilim insanınca tartışılmaya sunulmuştur. Sistem tanılama konusunun yazımlarının ve kitaplarının temelini oluşturmuş ve geliştirmiş bu çabalar, aynı zamanda günümüzde de ilerlemesini sürdüren sistem tanılamasının destek birimlerini oluşturmaktadır. Bu bilimsel eserler, sistem tanılamasının başka unsurlarla harmanlanmasına olanak sağlamıştır. Bunlardan birkaçına burada atıfta bulunmak gerekli gözükmektedir:

Bilim alanı olarak sistem tanımlama kavramı ve terimi 1962 yılında Zadeh tarafından sunulmuştur (Zadeh, 1962) ve şu şekilde tanımlanmıştır. Sistemden gözlenen veya toplanan veriler kullanarak o sistemin dinamik yapısı hakkında (genellikle matematiksel) model oluşturulması ya da yapılandırılmasına sistem tanımlama denilmektedir.

Sistem tanımlama üç temel adımdan oluşmaktadır:

1- Model seçimi ve denenmesi-sistem modellenerek ve deney planlanarak sistem tepkileri ölçülür.

2- Parametre tahmini-seçilmiş model ve ölçülmüş tepkileri kullanarak sistem parametreleri tahmin edilir. Yapı mekaniğinde parametre tahmini yapısal modal parametrelerin (modal frekanslar, mod şekilleri, modal sönüm, vs.) teşhis edilmesinde kullanılır, bunlarda yapı sisteminin davranışını belirlemektedir.

3- Modal doğrulama veya model güncelleştirme

Fagin (1964), Fitzgerald (1971), filtreleme problemi üzerinde birçok çalışma yapmışlardır. Kalman filtresinin ıraksaması durumunu incelemişlerdir.

Juang ve vd. (1985), zaman tanım alanında, çevresel titreşim kayıtları-giriş (zemin) ve yapısal noktaların tepkileri-çıkış olarak alınıp, yapısal sistemdeki giriş-çıkış ilişkilerinin TSDS (Tek Giriş Tek Çıkış-TGTÇ) ve ÇSDS (Çok Giriş Çok Çıkış-ÇGÇÇ) olarak tasarlanan otomatik regresyonlu ekstra girdi (ARX) ve durum-uzay (SS) matematik modelleri üzerinde değişik filtre tekniklerinin optimizasyon uyarlamaları kullanılarak aranan parametrelerin giriş-çıkış ilişkisi ağını en güvenilir mertebeye kurmaya çalışmışlardır. ÇSDS için girişler ve çıkışlar arasındaki ÇGÇÇ çapraz ilişki ağını şekillendirecek parametrelerin hesaplanması aşamasında Eigen Realizasyon Algoritması (ERA) kullanarak değişken Kalman filtresi yardımıyla parametrik değişkenleri hesaplamışlardır.

(Kasınozade ve Tuhta, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009), sistemin mevcut doğal ve yapay tepkilerine dayalı olarak herhangi sistemin modal parametrelerinin, hem de sistemin fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesini sağlayacak bir şekilde tanımlama yöntemlerinin sistemli bir şekilde inceleme çalışmalarını yapmışlardır. İster yapının modal, isterse de fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesinin kesinliği, sistemin durum-A, giriş etki-B, çıkış etki-C, doğrudan iletme-D matrislerinin mümkün olabilen en az hata ile belirlenmiş olmasıdır. Bu hedefe ulaşmak için rasgele etkilerden tahmin edilmiş durum vektörünün gerçek durum vektöründen farkının mümkün olabildiğince minimum olabilmesi için, bu farkın kovaryansı Riccati denkleminin çözümü olarak bulunarak, Kalman kazancı (bu mümkün olmadığında doğrudan giriş-çıkışa dayalı gözlemsel kazanç) elde edilerek, sistem karakteristik durum matrislerinin optimal (en verimli) olarak belirlenmesi için yeni bir hesaplama algoritması geliştirilmişlerdir.

2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi Gelişimi

Operasyonel modal analiz (OMA) 1990'lardan itibaren dikkatleri üzerine çekmeyi başaran bir analiz şeklidir. OMA yapının modal karakteristiklerinin operasyonel pozisyonda çıkarılması işlemidir. OMA sırasında dinamik harekete sebep olan yüklemeler yaya hareketleri, araç hareketleri, rüzgâr ve mikro tremorlardır. OMA ölçümlerindeki en önemli farklılık titreşime sebep olan kuvvetler ve büyüklükleri bilinmemektedir. OMA esnasında oluşan tepkiler çok küçük olduğundan yapı her durumda lineer bir hareket içindedir. Yapıda tepkilerden oluşan verilerin analizi ve dinamik parametrelerin hesaplanması dinamik analiz için bir başlangıç oluşturmaktadır. (Koçak, vd.,2015)

Operasyonel Modal Analiz ölçümlerinin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için hem Operasyonel Modal Analiz yöntemi hem de ölçülecek yapı davranışı hakkında genel mühendislik bilgisine sahip olunması gerekmektedir. Bu bakımdan yapıya uygulanacak olan test planının doğru bir şekilde yapılması önemlidir. İyi bir test planı aşağıdaki gibi hazırlanmalıdır:

Ölçülecek yapı belirlenmelidir (Baraj, köprü, bina, vs.).Belirlenmesi gereken mod sayısı, modları içeren frekans aralığı ve mod şekilleri gibi yapının dinamik parametreleri hakkında ön bilgilere sahip olunmalıdır. Bu özelliklere deneysel ölçümden önce yapılacak sonlu eleman analizi ile yaklaşık olarak ulaşılabilmektedir. Ölçümlerde kullanılacak ivmeölçerlerin seçimi ve kaç noktadan ölçüm alınacağı noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel mod şekilleri ivmeölçer noktalarının modal yerdeğiştirmelerin birleştirilmesinden meydana geldiklerinden dolayı, yerleşimleri yapının mod şekillerini doğru bir şekilde elde edecek şekilde uygun sıklıkta olmalıdır. Bununla birlikte ölçümler esnasında ivmeölçerleri yapıya tam bağlayarak yapı ile ivmeölçer arasında gevşeklik olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. İvmeölçerlerin yağmurdan, manyetik alandan ve dış darbelerden korunması gerektiği de diğer önemli bir husustur.

Yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması gerekmektedir. Frekans aralığı ve ölçüm hızı istenmeyen ortam sinyallerin ve gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak için gerekli olduğundan sinyaller toplanmaya başlamadan önce frekans aralığı ve ölçüm hızı belirlenmelidir.

Ölçümlere başlanmadan önce, yapıya yerleştirilen ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine sinyal aktarıp aktaramadığı kontrol edilmelidir. Yapılan testlerde yeterli miktarda kaliteli sinyalin elde edilebilmesi için ölçüm süresinin doğru belirlenmesi önemlidir. Ölçümler tamamlandıktan sonra, veri toplama sistemine ait yazılım kullanılarak ham sinyaller koşullama işleme tabi tutulduktan sonra işlenmek üzere bilgisayara dayalı sinyal işleme ve dinamik karakteristikleri belirleme programına aktarılmaktadır. Bu kısımda sinyaller işlenerek, frekans ortamında ve zaman ortamında yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilebilmektedir.

Deneysel modal analiz yöntemi yapısal dinamik araştırmalarda, model güncellemesinde, dinamik tasarımların incelenmesinde, yapıların titreşimlerini

inceleyerek yapı sağlık gözlemlerinde kullanılmaktadır. Zaman, frekans ve boyutsal tanım aralıklarında tek girdi/tek çıktı (SISO), tek girdi/çok çıktı (SIMO) ve çok girdi/çok çıktı (MIMO) olarak modal tanımlama algoritmaları son otuz yılda geliştirilmiştir. (Zhang, 2013).

Operasyonel Modal Analiz yönteminde; yapıya uygulanan etkinin bilinmesine gerek olmadan yapının rüzgâr, taşıt yükü, insan hareketi gibi rastgele çevresel etkiler altında titreştirildiği varsayılarak, yapı dinamik karakteristikleri tepki sinyallerinin spektral yoğunluk fonksiyonlarının gerek zaman gerekse frekans tanım alanında değerlendirilmesiyle belirlenebilmektedir. Rastgele çevresel titreşimlerden yararlanıldığı için Çevresel Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır.(Yetkin, 2016)

Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi son zamanlarda farklı mühendislik alanlarında önemli bir yer tutmaktadır. Bir yapının dinamik parametrelerini araştırmak için kullanılan tekniklerden biri olduğu için İnşaat Mühendisliği alanında hızlı bir şekilde gelişmeler yaşanmaktadır. OMA gerçek durumda dünyadaki mevcut yük koşulları altında gerçekleştirilmekte ve inşaat mühendisliği alanlarında da uygulanmasında önemli avantajlara sahip olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır.

OMA yapmanın avantajlar şu şekilde sıralanabilmektedir;

1. OMA yönteminin kullanılmasının hızlı ve ekonomik olmasıdır. Titreşim sağlayıcı cihazların ve sınır koşullarının temsil edilebilmesi için ayrıntılı bir hazırlık yapılmasının gerekmemesi ve bu sebepten ötürü diğer modal test yönteminin yapıların davranışlarının incelenmesinde ki kullanımının yerini OMA'ya bırakmaya başlaması,
2. İncelemesi yapılacak yapıların belli yerlerinden ziyade bütün yapısal dinamik davranışlarının mevcut durumu altında inceleme imkânı sağlaması,
3. Dinamik parametrelerin (doğal frekans. periyot vb.) değişmesi yapıda meydana gelen yapısal değişikliklerin bir işareti olabilir. OMA kullanılarak bir yapı izlendiğinde yapıyı hizmetten çıkarmadan veya yapının işlemlerini kesintiye uğratmadan yapısal sağlığı değerlendirilebilir. Bu özellikle deprem gibi doğa olaylarına maruz kalındıktan sonra köprüler, binalar, barajlar vb. gibi çok büyük yapılar için kullanışlı olması olarak sayılabilir.

2.3. Konuya İlişkin Yapılan Literatür Çalışmaları

Yapılan literatür araştırmalarında Operasyonel Modal Analiz (OMA) yönteminin kullanıldığı birçok çalışmaya ulaşılmıştır.(Natke ve Cempel 1997,Yamaguchi 2010;Kvale vd.,2017; Cantieni, 2005; C.Gentile, 2007) vb yazarlar köprüler üzerine, (Güneş S., ve Anıl Ö.,2017;Brownjohn, 2005; Türek ve Ventura, 2005; Tamura, 2005) binalar üzerine, (Gentile, 2005; Ramos vd, 2007) tarihi yapılar üzerine , denizyapılarında (Kvale vd.,2017;Brincker vd, 1995), rüzgâr türbinlerinde (Ibsen ve Liingaard, 2005), su yapıları ve barajlar konusunda (Baptista vd, 2005) büyük açıklıklar ve stadyumlar(Reynolds vd, 2005) gibi çeşitli yapılarda operasyonel modal analiz yöntemini başarılı bir şekilde kullanmışlardır.

Köprüler üzerine dinamik testler kullanarak çalışmalar yapan Salawu ve Williams (1995) bu çalışmalarında yapıların tam ölçekli dinamik testi, yapıların hizmet davranışı ve performansı hakkında önemli bilgiler sağlayabildiği vurgusuna atıf yaparak köprülerin yapısal durumu hakkında dinamik testler uygulanması köprülerin bütünlüğünü değerlendirmede bir araç olarak kullanılabilceğini söylemişler. Çevresel titreşim veya zorlanmış titreşim ile ölçülen ve dinamik parametreleri (doğal frekanslar, mod şekilleri ve mod sönüm değerleri) ve sistem parametrelerinin (sertlik, kütle ve sönüm matrisleri) elde edebilmişler. Tanımlanan bu parametreleri daha sonra köprünün performansını karakterize etmek ve izlemek için kullanılabilceğini bildirmişler. Yapının analitik modelleri de bu parametreler kullanılarak doğrulanabilir. Köprü yapıları üzerinde yapılan yayınlanmış tam ölçekli dinamik testlerin ayrıntılı bir incelemesini de vermişlerdir. Dinamik davranışlarını için veri kaynağını arttırmak, aşırı yükleme sonucunda yapısal bütünlüğü araştırmak ya da iyileştirme çalışmalarının etkisini incelemek, yapıların teorik modellerinin geçerliliğini sağlamak, yapının bütün dinamik davranışsal durumunu gözlemlemek gibi köprülerin dinamik davranışlarının incelemesindeki tipik bazı amaçları belirtmişlerdir. Zorlanmış titreşim testinde uygulanan farklı yöntemleri araştırmışlar ve çevresel titreşim testi uygulamasının bazı avantajları ve kısıtlamalarından bahsetmişlerdir.

(Zenunovic, vd., 2015) köprüler üzerine yaptıkları bu çalışmalarında çevresel titreşim testleri ve sayısal analizlere genel bir bakış sunmuşlardır. Araştırmalarının amacı, köprülerin dinamik özelliklerinin örnekler üzerinde tanımlanmasıdır. Bu sebeple üç köprü üzerinde inceleme yapmışlar: mevcut iki eski köprü ve bir yeni inşa

edilmiş köprü Ortam titreşim ölçümleri ve matematiksel modeller ile elde edilen doğal frekansların ve mod şekillerinin karşılaştırmalı bir analizi, test edilen köprü yapısının modal parametrelerinin tanımlanması için ortam titreşim testlerinin kullanılabilirliğini göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan ve ölçülen frekanslar arasında bazı farklılıklara ulaşımlar, rastgele köprülerde uygulanacak titreşim testlerinin köprülerin modal parametrelerinin tahmin edilmesinde uygun bir yaklaşım olup olmadığını göstermek amacıyla iki adet eski yapılmış ve bir adet yeni inşa edilmiş üç tane köprü üzerinde çevresel titreşim testleri gerçekleştirmişler ve köprünün doğal frekans ve mod şekillerini bulmuşlardır. Deneysel olarak elde ettikleri sonuçlar ile köprülerin matematiksel modellerinden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucundaki deneysel ve matematiksel modelden varılan sonuçların uyumlu olduklarını tespit etmişlerdir. Deneysel olarak ve teorik olarak elde edilen bazı frekans değerlerinde biraz farklılıklar olduğunu tespit etmişler tespiti yapılan malzeme özelliklerindeki ve sınır koşullarındaki belirsizliklerden ve matematik modellemedeki yapılan varsayımlardan kaynaklandığı sonucuna ulaşmışlardır.

(Kvale, vd.2017) bu çalışmalarında kapsamlı bir yapı izleme sistemleri kurmuşlar ve Norveç'in kuzeybatı kıyısında Aspøya ve Bergsøya arasında uzanan 931 m uzunluğunda, çelik kavisli bir yüzer köprü Bergsoysund köprüsünün dinamik parametrelerini incelemek amacıyla rüzgar ve dalga etkisi altındaki çevresel etkiler altında ivmeölçer ve deplasman kayıtları almışlardır. Kovaryans dayalı stokastik altuzay tanımlama (Cov-SSI), veriye dayalı stokastik altuzay tanımlama ve frekans alanı ayrışması kullanılarak yapının dinamik davranışını anlayabilmek amacıyla yapının modal parametrelerini hesaplamışlardır. Kovaryansa dayalı stokastik alt uzay belirleme (SAB) yöntemi için uygun parametrelerin seçilmesi ile ilgili yönler vurgulanmakta ve stabilizasyon kriterinin uygulanmasının birden fazla çıktı üzerindeki etkilerini açıklığa kavuşturmaya çalışmışlardır.

(Damjanovic, vd., 2018) birbirlerine benzer iki tek açıklıklı karayolu köprüsü üzerinde gerçekleştirdikleri titreşim testlerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanarak köprülerin modal parametrelerini araştırmışlardır.Çevresel titreşim testleri kullanılarak elde edilen titreşimler köprüden geçen ağır kamyonlar vasıtasıyla elde edilmiştir. OMA yöntemine ilaveten ayrıca karayolu köprülerinin üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlar ve analitik olarak elde ettikleri modal parametreler

ile deneysel olarak elde ettikleri modal parametreler ile karşılaştırmışlardır. Deneysel olarak elde edilen modal parametrelerin yapılarda hasar tespitinin varlığına ve hasarın yapı sağlığı üzerinde etkilerini göstermesi bakımından önemli bilgiler gösterdiği sonucuna varmışlardır. Yaptıkları bu çalışma sonucunda modal parametrelerin elde edilmesi yönteminin hızlı ve ekonomik olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Yapıların doğal ve yapay etkilere karşı tepkilerinin aygıtlar yardımı ile ölçülerek, yapı gerçek durumunun hasarsız (non-destructive) olarak belirlenmesinde (Kasımzade, A.A., S. Tuhta (2005-2006-2007-2008-2009), Giraldo D. F. 2006, Ventura C.E., Turek M. 2005, M. Nakashima, T. Matsumiya, D. Liu, K. Suita 2004, Peeters B., 2000, Dascotte E, Strobbe J, Hua H. 1995, Jung H. 1992) son yıllarda büyük gelişmeler yaşanmaktadır.

(Tuhta, 2010), çalışmasında yapı parametrelerinin tahribatsız olarak belirlenmesi, bununla ilgili olarak sistem tanımlama, model güncelleme ve hasar belirleme yöntemlerini ayrıntılı olarak incelemiş, yeni bir hesaplama algoritması ve beraberinde bilgisayar yazılımı geliştirmiştir.

(Kasımzade ve Tuhta, 2017) Çelik model bir yapının analitik ve sayısal modal analizlerini yapmışlardır. Yapının 3 boyutlu sonlu eleman modelini Sap2000 programında modellemişlerdir. Ortam uyarımını kaydedilen mikro tremor titreşimlerinden zemin seviyesinde bulunan sarsma masası ile sağlamışlardır. Çalışmanın sonucunda mod şekilleri arasında en iyi ilişkiyi bulmuşlar ve doğal frekanslar ve sayısal frekanslar arasında ortalama olarak % 2.8 yakınlığa ulaşmışlardır.

(Tuhta, 2018), Bu çalışmasında model çelik yapının GFRP ile güçlendirilmesinin yapının dinamik davranışına etkisini operasyonel modal analiz yöntemi ile incelemiştir. Yöntemin içerisinde output only modal analiz ve parametre tahmininde frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemlerinden olan EFDD yöntemini kullanmıştır. GFRP ile güçlendirilmiş modelin dinamik davranışlarını incelemiş ve elde ettiği dinamik parametreleri karşılaştırarak model çelik yapının GFRP ile güçlendirilmesinin frekanslarda önemli bir farkla dinamik davranışa etkisini ortaya çıkarmıştır.

(Güneş ve Anıl, 2017) yığma bir binanın dinamik karakteristiklerini sayısal analiz ve deneysel yöntemlerle belirlemişler. OMA sonucunda bulunan deneysel dinamik karakteristikler ile sayısal modal analiz sonucu bulunan dinamik karakteristikleri karşılaştırdıklarında aralarında farklılıklar olduğunu görmüşlerdir. Model oluşum aşamasında yapılan kabullerin bu farklılığa sebep olduğu düşüncesiyle nümerik modelde yığma birimin elastisite modülünü değiştirerek yapının sonlu eleman modelini iyileştirmişlerdir.

(Natke ve Cempel, 1997), frekans ve mod şekillerindeki değişimlerden yararlanarak çelik bir köprüde hasar belirleme çalışmaları yapmışlardır.

(Matsumoto ve Yamaguchi, 2010), Çelik makaslı bir köprünün diyagonal elemanlarında titreşime dayalı yapısal sağlık izleme saha araştırması yapmışlar ve işlem sonunda çatlak ve çentik içeren diyagonal elemanlarda iyileştirmede bulunmuşlardır.

(E.Osman, 2017) 4 açıklıklı çelik demiryolu köprüsünün dinamik karakteristikleri olarak bilinen doğal frekans ve mod şekillerinin Operasyonel Modal Analiz (OMA) ve sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi ve elde edilen deneysel veriler yardımıyla köprüye ait başlangıç sonlu eleman modelinin iyileştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmanın sonunda Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak tarihi çelik köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ile sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabilceği sonucuna varmıştır.

(Kömür, vd., 2015) çalışmalarında tek katlı-tek açıklıklı ve üç katlı-tek açıklıklı olmak üzere laboratuvarda inşa edilmiş küçük ölçekli çelik çerçevelerin dinamik karakteristikleri nümerik ve operasyonel modal analiz yöntemleri ile belirlemişlerdir.

(Özçelik, vd., 2013), Çelik model bir köprüye laboratuvar şartlarında ortamsal titreşim ve ani darbe testleri uygulayıp ERA, NExT-ERA sistem tanımlama yöntemleri kullanarak köprünün modal parametrelerini tahmin etmişlerdir. Deneysel veriler kullanılarak tahmin edilen modal parametreler kullanılarak köprünün kalibre edilmiş sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlar. Hasar tespitinin doğru yapılabilmesi için modal parametrelerin doğru tahmini son derece önemlidir sonucuna ulaşmışlardır.

(E.O.Boru vd., 2015) Çevresel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi konulu bu çalışmalarında 1975 Deprem Yönetmeliğine göre tasarlanmış bir binanın dinamik parametrelerini Teorik ve Deneysel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak belirlemişlerdir. Deneysel modal analiz ile yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesinde binadan alınan çevrel titreşim kayıtları ve Geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemini kullanılmışlardır. Analitik modal analiz ile yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesinde ise sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan analitik model kullanılmıştır. İki yöntem kullanılarak elde edilen yapı dinamik parametreleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan Sonlu Eleman Modeli Güncelleme çalışması ile yapının gerçek durumdaki rijitliği belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile Çevrel Titreşim Kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin gerçekçi olarak elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

(C. Gentile, 2006) İtalya'da 447m uzunluğundaki Cairate viyadüğü üzerinde yaptığı çalışmada sadece çıktı verileri dikkate alınarak yapılan çevresel titreşim deney sonuçlarında frekans tanım alanında operasyonel modal analiz yöntemlerinden EFDD uygulanarak elde edilen dinamik karakteristikler neticesinde hizmet yükleri altında test edilen köprünün genel güvenliğini değerlendiren bir model sağlamıştır.

(El-Borgi, vd., 2004) Tunus'ta bulunan sekiz açıklıklı Betonarme Köprünün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel yöntemlerle belirlemişlerdir. Köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 programı yardımıyla oluşturulmuşlar ve dinamik parametrelerini elde etmişlerdir.

(Koçak, vd., 2015) Tek açıklıklı Ankara-Sivas yüksek hızlı demiryolu hattındaki DGK175 isimli 10 adet öngermeli kirişten oluşmuş bir demiryolu köprüsündeki incelemeler neticesinde Larsa 4D paket programını kullanarak sayısal analiz yapmışlar ve köprü üzerinden ivmeölçerler yardımı ile toplanan veri ışığında Artemis programı yardımı ile sayısal verilere ulaşmışlardır. Sayısal model sonucu elde edilen sonuçlar ile operasyonel modal analiz sonucu elde edilen modal periyotların birbirlerine çok yakın olduğunu bulmuşlar ve hesaplanan modal periyotlar arasında %0,12 - %2,69'luk bir fark yakalamışlardır.

(Ventura, 2015), Operasyonel modal analize giriş kitabında operasyonel modal analiz yöntemini geniş perspektifte ele alarak bu yöntemin uygulanma amacını ve niçin kullanılması gerektiği hakkında temel ve geniş bilgiler vermektedir. Kitabında

sadece günümüzden ziyade operasyonel modal analizin tarihinden ve geliştirilme sürecinden de bahsetmektedir. Ayrıca kitabında operasyonel modal analizin uygulama esaslarına ve yöntemlerine örnekler vererek bilinmeyen bazı gerçeklerin açığa çıkmasına öncülük ettiği, bu kitabın OMA 'nın uygulama esaslarının belirlenmesinde önemli bir kılavuz olduğu açıkça görülmektedir.

(Dönmez ve Karakan, 2009) yaptıkları çalışmalarında deneysel modal analiz tekniklerinin köprülerin durum tespiti ve hasar tanılmasında ne şekilde uygulanabileceği konusunda laboratuvarında imal edilmiş basitleştirilmiş bir köprü maketi üzerinde modal analiz teknikleri kullanmışlardır. Maket köprünün sonlu elemanlar modelini kurarak analiz ve deney sonuçlarını karşılaştırmışlar ve modal analiz ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının yüksek frekanslarda sapmalar gösterdiğini buna rağmen sistemin modal şekillerinin her iki analiz sonucunda benzer olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

(Wei-Xin Ren, vd., 2005) yaptıkları çalışmalarında çelik kirişli bir kemer köprüsünün deneysel ve analitik modal analizini yapmışlardır. Deneysel çalışmada çevresel titreşim verilerini kullanmışlardır. (Trafik yükleri, rüzgar kaynaklı uyarımlar vb.) Hem frekans alanındaki pik toplama yöntemi hem de zaman alanındaki stokastik altuzay tanımlama yöntemlerini analizlerde kullanarak çalışmanın sonucunda iki yöntem arasında belirlenen frekanslarda iyi bir uyum yakalamışlar ve ayrıca stokastik altuzay tanımlama yönteminin daha iyi mod şekilleri sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

(Cıtak, vd., 2012) 1972 yılında yapılan çelik bir köprü üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Urado Köprüsü olarak bilinen bu çelik köprüde doğal titreşim deneyleri kullanarak köprüde yaptıkları iki günlük titreşim deneylerinden yapının dinamik parametrelerini araştırmaya çalışmışlardır. Beş açıklıklı ve kutu kirişli bir üst yapıya sahip olan köprüde orta açıklık 230 metre uzunluğundadır ve merkeze kayar menteşelerle bağlanan 115 metre uzunluğundaki konsol kirişlerden oluşturulmuştur. Mikrotremor ölçümlerinden elde edilen verilerin analizleri neticesinde köprünün mod şekillerini ve baskın frekansları karşılamak için bir doğrulama analizi yapmışlar ve köprünün dinamik parametrelerini elde etmişlerdir.

(Costa, vd., 2014) Luiz I köprüsünde performans değerlendirilmesi için modal analiz yapmışlar ve köprüye ait dinamik parametrelere ve rijitlik koşullarıyla beraber

köprü rijitliğindeki değişiklik, mod parametrelerindeki değişiklikler ve köprü dinamik özelliklerindeki koşullarının etkisi ile ilgili önemli bulgulara ulaşmışlardır.

(Drygala ve Dulinska, 2019) tek açıklıklı çelik bir köprünün modal özellikleri üzerine bir inceleme yapmışlardır. Çelik yaya köprüsü Jawornik'te (Lesser Poland) yer almaktadır. Çalışmalarını hem analitik hem de deneysel araştırmalar temelinde tamamlamışlardır. Sonlu elemanlar (FE) analizi için, tek açıklıklı çelik çerçeve yaya köprüsünün 3 boyutlu modelini oluşturmuşlardır. Deneysel çalışma içinse yerinde testlerin uygulandığı bir araştırma planı geliştirmişlerdir. Doğal frekansları tahmin eden iki farklı yöntem yani güç spektral yoğunluk fonksiyonu (PSD) ve frekans tepki fonksiyonu (FRF) kullanmışlardır. Modal güvence ölçütünü (MAC), deneysel ve sayısal yollarla elde edilen doğal titreşimlerin mod şekillerinin doğrulanması için matematiksel bir yöntem olarak kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal analizler sonunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda hem doğal frekans hem de titreşim modu açısından tam bir korelasyon sağlamışlardır.

(Whelan, vd., 2009) kablosuz ölçüm sistemi ile köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalarında, 17 m uzunluğunda çelik kirişli bir köprüyü uygulama olarak seçmişler. Deneysel ölçümlerde Çevresel Titreşim Yöntemini kullanmışlar. Farklı 20 noktadan toplanan ölçüm verilerinde frekans ve zaman tanım alanındaki yöntemleri kullanarak analiz yapmışlar ve dinamik karakteristiklere deneysel olarak ulaşmışlardır. Deneysel verilerin işlenmesinde EFDD ve SSI yöntemlerini kullanılmışlardır.

(Sanayei ve DiCarlo, 2009), bu çalışmalarında sonlu eleman modellerinin deneysel ölçüm verileriyle iyileştirilmesini amaçlamışlar ve laboratuvar ortamında iki açıklıklı bir çelik köprü modeli oluşturmuşlardır. Çelik köprü modeli 5.5 m uzunluğunda, 1.83 m genişlikte ve 1.07 m' yüksekliktedir. Köprünün sonlu eleman modelini SAP2000 programıyla oluşturmuşlar ve yapılan analizler neticesinde ilk 17 frekans değeri ve mod şekli analitik olarak belirlenmişlerdir. Ölçümlerde köprü üzerinde 12 nokta belirlenmiş, bunlardan 4 noktada yapıya titreşim verilmiş, 8 noktadan ise yapısal tepkileri toplamışlardır. Elde edilen veriler zaman tanım alanında işlenerek köprünün dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumun belirlenebilmesi için Modal Güvence Kriteri (MAC) oluşturmuşlardır. MAC sonrası model güncelleme yaparak kesit alanındaki

değişimleri dikkate alarak modelde uyumu minimuma indirmişler ve köprünün gerçek davranışını yansıtan sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Prof.Azer Kasımlı ve Dr.Öğr. Üyesi Sertaç Tuhta öncülüğünde OMA hakkında birçok çalışmalar yapılmış ve güncellenerek yapılmaya devam edilmektedir. Tez konumuza yakınlığı ve OMA ile ilgili yapılan çalışmalara katkısı olması açısından OMÜ de yapılan çalışmaların literatür özetleri aşağıda sunulmuştur.

(Tuhta, 2018), Bu çalışmada, ortam titreşimi kullanılarak, modal titreşimde sistem karakteristik matrisinin geliştirilmesi ve düzeltilmesine dayanan yeni bir yaklaşımı önermiştir. Gerçek sistem karakteristik matrislerinin hatanın büyük ölçüde asgariye indirilebileceği şekilde doğru bir şekilde oluşturulması gerektiği sonucuna ulaşmakla birlikte ikinci olarak, kara kutu modelleme yaklaşımı ile sistem karakteristik matrislerini iyileştirmek için Kalman teorisiyle sistemin giriş-çıkış ilişkisi oluşturulur sonucuna varmıştır. Ayrıca, Hankel matrisinin çarpanlarını önceki iterasyonda elde edilen sistem durum matrisinin özdeğer çözümünden ifade ederek ölçülebilir olmayan işlem gürültüsünün kovaryansını ve Riccati denkleminde bulunan ölçüm gürültü matrislerini belirlemek mümkündür. Elde edilen sistem karakteristik matrislerinden sistem modal parametreleri çıkarılmıştır.

(Günday, 2018), Bu çalışmasında GFRP ile güçlendirmenin model çelik yapıya dinamik etkileri deprem simülatörü (quanser shake table) kullanılarak incelemiştir. Mikro tremor verilerinin ortam titreşim girişi uyarma verileri olarak yer seviyesinde kullanılması ile çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Model çelik yapının güçlendirilmemiş durumunun dinamik parametreleri ile GFRP ile güçlendirilmiş durumdaki dinamik parametreler elde edilerek karşılaştırılmıştır. Parametre tahmin yöntemi olarak ise SSI metodundan yararlanılmıştır. İki yöntemle de bulunan frekanslar arasındaki farkın 33.916% olduğu görülmüştür.

(Tuhta vd., 2019), Bu çalışmalarında model çelik yapının CFRP ile güçlendirilmesinin yapının dinamik davranışına etkisini operasyonel modal analiz yöntemi ile deprem simülatöründe incelemiştir. Yöntemin içerisinde output only modal analiz ve parametre tahmininde EFDD metodlarından yararlanılmıştır. Çalışma da önce mevcut modelin dinamik davranışlarını belirlemiş ve ardında CFRP ile güçlendirilmiş modelin dinamik davranışlarını incelemiştir. Daha sonra elde ettiği

dinamik parametreleri karşılaştırarak model çelik yapının CFRP ile güçlendirilmesinin dinamik davranışa etkisini ortaya çıkarmıştır.

(Tuhta vd., 2019), Bu çalışmada GFRP ile güçlendirmenin model çelik yapıya ivme ve yer değiştirme verileri deprem simülatörü (quanser shake table) kullanılarak incelenmiştir. Mikro tremor verilerinin ortam titreşim girişi uyarma verileri olarak yer seviyesinde kullanılması ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Model çelik yapının güçlendirilmemiş durumunun ivme ve yer değiştirme değerleri ile GFRP ile güçlendirilmiş durumdaki ivme ve yer değiştirme değerlerini elde ederek karşılaştırılmışlardır.

(Tuhta vd.,2019) Bu çalışmalarında N4SID yöntemi ile model çelik yapı sisteminin sistem matematik modelinin tanımlamasını yapmışlar ve sistemin A, B, C, D, K matrislerini elde etmişlerdir. Tahmin doğruluk oranı ise 96.44% olarak bulmuşlardır.

(Tuhta vd., 2019) yaptıkları bu çalışmalarında N4SID multi input – multi output yöntemi ile temel kazık sisteminin sistem matematik modelinin tanımlaması yapmışlar ve sistem A, B, C, D, K matrislerini elde etmişlerdir. Tahmin doğruluk oranı ise 99.01% olarak bulmuşlardır.

(Tuhta, 2019) yaptığı çalışmasında model alüminyum köprü üzerinde modal parametreleri belirlemek için analitik ve deneysel ölçümler yapmıştır. Analitik yöntemde sonlu elemanlar metodunu kullanmış, deneysel yöntemde ise output only modal analiz ve EFDD metodlarından yararlanmıştır. İki yöntemle de bulunan frekanslar arasındaki farkın 2.438% olduğu sonucuna ulaşmıştır.

(Tuhta, 2019), Bu çalışmada, model baca için tezgah ölçülü deprem simülatörü (Quanser Shake Table) üzerinde araştırma ve uygulama Operasyonel Modal Analizi (OMA) için ortam titreşim girişi uyarma verileri olarak zemin seviyesinde kaydedilen mikro tremor verilerinin zemin seviyesinde kullanılması olasılığını araştırmış ve analitik yöntemde sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Deneysel yöntemde ise output only modal analiz ve frekans tanım ortamında EFDD metodlarından yararlanmıştır. İki yöntemle de bulunan sonuçlarda frekanslar arasındaki farkın 1.996% olduğu sonucuna ulaşmıştır.

(Kasımzade vd., 2019), Yapılan bu çalışmalarında dinamik parametrelerin ortam titreşiminden yararlanılarak çıkartılması üzerine çalışmışlardır. Sistem

tanımlamada hataların minimize edilmesi amaçlanmış ve Ortam karakteristiğinden modal tanımlamada sistem karakteristik matrisinin düzeltilmesinde yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımın sonucu olarak, asıl hata ile gerçek sistem karakteristik matrisleri daha doğru bir şekilde belirlenmiştir.

(Kasımzade vd., 2019), Bu çalışmalarında mikrotremor kullanarak model çelik yapının analitik ve deneysel modal analizlerini yapmışlardır. Her iki yöntemle de model çelik yapının dinamik parametrelerini çıkartarak elde edilen parametrelerin karşılaştırılmasını sağlamışlardır. Analitik yöntemde sonlu elemanlar metodu kullanılmış, deneysel yöntemde ise output only modal analiz ve EFDD metodlarından yararlanmışlardır. Mod şekilleri arasında en iyi korelasyon sağlayıp İki yöntemle de bulunan frekanslar arasındaki farkın 2.99 % olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

(Aydın H., 2020) bu çalışmasında model çelik bir köprünün matematiksel modelini sistem tanımlama yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Çalışmasında yöntem olarak bir sistem tanımlama yöntemi olan Yapay Sinir Ağları (*Artificial Neural Networks* (ANN) kullanmıştır. Model çelik köprünün %90 oranında ANN yöntemi ile sistem tanımlamasını bu çalışmasında başarıyla yapmıştır. Sonuç olarak ANN yaklaşımı ile modal tanımlama çalışmalarında bir problemi çözmek için çok yararlı ve doğru bir araç sağlayabileceğini açıklayarak yapay sinir ağları kullanılarak sistem tanımlaması ile model çelik köprüde modal parametrelerin elde edilebileceğini ifade etmiştir.

(Tuhta vd., 2019) yaptıkları bu çalışmalarında GFRP ile güçlendirdikleri model çelik yapıda ivme ve yer değiştirme verilerini deprem simülatörü (quanser shake table) kullanarak incelemişlerdir. Mikro tremor verilerinin ortam titreşim girişi uyarma verileri olarak yer seviyesinde kullanılması ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Model çelik yapının güçlendirilmemiş durumunun ivme ve yer değiştirme değerleri ile GFRP ile güçlendirilmiş durumdaki ivme ve yer değiştirme değerleri elde edilerek karşılaştırmışlardır.

(Tuhta vd., 2019d) yaptıkları çalışmalarında temel ve temel kazıklarının modal özelliklerini tanımlamak için yeni bir yapısal tanımlama aracı önermişler ve çalışmanın sonucunda tahmin verilerine dayalı uyumun % 99,01 olduğunu ve N4SID

çoklu giriş - çoklu çıkış (MIMO) sistem tanımlama yönteminin, makine temelinin modal verilerinin belirlenmesinde etkili ve doğru olduğu sonucuna varabilmişlerdir.

(Tuhta vd., 2020e) çelik model bir köprü üzerinde çalıştıkları bu çalışmalarında sistem tanımlama yöntemlerinden sistem tanımlama yöntemlerinden genetik algoritmalar (ANN) yöntemini kullanmışlardır. Genetik algoritmalar yapay zekânın bir parçasıdır. MATLAB yazılımını kullanırlar. Bu çalışmalarında da genetik modellerle model çelik köprünün çıktısının tahmin edilmesi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda yaklaşık % 99'luk bir uyumun sağlandığını gözlemlemişlerdir. Tüm sonuçlar ışığında genetik algoritma yönteminin (ANN) inşaat mühendisliği alanındaki sistem tanımlama yönteminde faydalı olacağı görüşünü sunmuşlardır.

(Tuhta vd., 2020n) laboratuvar ortamında kablo elemanlar ile güçlendirilmiş çelik deney yapısı üzerinde modal analizi yaparak analiz için yöntem olarak sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmışlardır. Analiz sonucunda yapıya ait ilk 5 mod şekli ve periyot değerlerini elde etmişler ve kablo elemanlar ile güçlendirilmiş çelik deney yapısının hâkim periyodu 0,28652 saniye olarak belirlemişlerdir.

(Tuhta vd., 2020m) laboratuvar ortamında mevcut bir köprünün sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek ve modal analizinin yapılarak periyot ve mod şekillerinin elde edilmesi üzerine yaptıkları analiz sonucunda yapıya ait ilk 5 mod şekli ve periyot değerlerini bulmuşlardır. Çelik model köprünün hâkim periyodu 0,17409 saniye olarak belirlemişlerdir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, birçok gerçek yapının dinamik davranışlarının incelenmesi amacıyla laboratuvar ortamında küçük ölçekli modelleri yapılmış ve üzerlerinde statik ve dinamik analizleri içeren çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, çelik köprülerin laboratuvar ortamında oluşturulması hususunda oldukça az bilimsel çalışma bulunmaktadır. Çelik köprülerin gerçek dinamik davranışının analizi taşıyıcı sistemlerinin üretiminde kullanılan malzeme türlerinin dayanımlarının belirlenmesinin zorluğundandır. Çünkü bu tür sistemler imal edilirken yeterli düzeyde mühendislik hizmeti almadan üretilmeleri nedeniyle çok değişik geometriye, taşıyıcı sistem boyutlarına, temel türüne ve taşıyıcı sistem özelliklerine sahip olmaları nedeniyle oldukça zor bir mühendislik problemidir.

Çevresel etkilerin yapıda oluşturduğu tepkilerin ölçülmesi prensibine dayanan Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak laboratuvar koşullarında yapılacak

bu çalışma ile kısa süreli bir ölçüm alınarak model elik köprünün davranışının gerçekçi bir şekilde bulunması sağlanmış olacaktır. Bu alışma kapsamında model elik köprünün dinamik karakteristikleri deneysel yöntemlerle belirlenmiş olacaktır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde yapılan tez çalışmasının amacı kapsamında yapılan deneysel çalışmaların planı özet şeklinde verilmiştir.

1-Model çelik köprüde betonarme mesnet kurulumu, tork anahtarı ile bağlantı elemanlarının kontrolü, deney yapısının ve çalışmada kullanılacak araç ve gereçlerin ön bilgi şeklinde incelenmesi ve kontrollerinin yapımı,

2-Kullanılacak olan araç ve gereçlerin ve yazılımların detaylı olarak kontrol edilerek deneye uygun hale getirilmesi

3-İvmeölçerlerin kurulumu ve çevresel titreşimlerin ölçülmesi ve kayıtlanması

4-Ön hazırlıklar sonrası yapının diyagonal elemanlarında ölçümlerin yapılarak kayıt altına alınması.

5-Yapılan kayıtların Artemis modal yazılımı aracılığıyla SSI-PC yöntemi kullanılarak analiz sonrası dinamik parametrelerinin elde edilmesi

6-Elde edilen dinamik parametrelerin femtools yazılımına aktarılarak Modal Güvence Kriteri (*Modal Assurance Criteria - MAC*) ile güncellenerek sayısal ve deneysel elde edilen modlar arasındaki koralasyona bakılması

7-Model çelik köprüde diyagonal elemanların çıkarılarak oluşacak yeni modelde diyagonal elemansız durumun ölçümlerinin yapılarak kayıt altına alınması

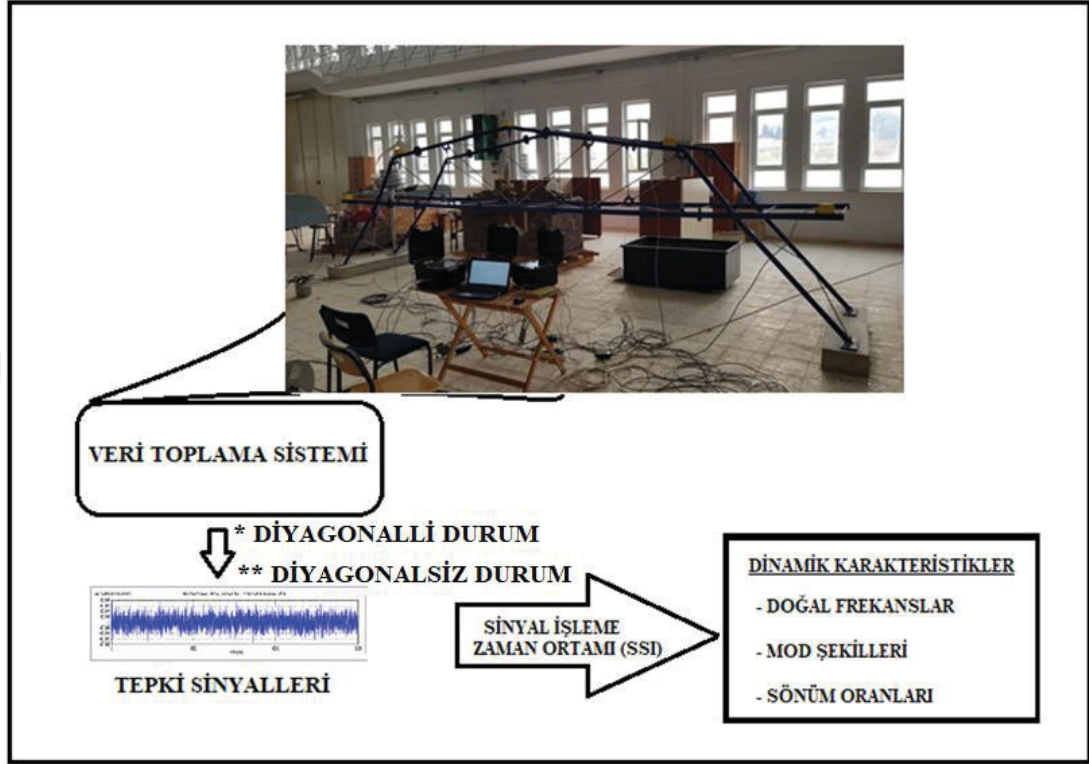
8-Yapılan kayıtların Artemis modal yazılımı aracılığıyla SSI-PC yöntemi kullanılarak analiz sonrası dinamik parametrelerinin elde edilmesi

9-Elde edilen dinamik parametrelerin femtools yazılımına aktarılarak Modal Güvence Kriteri (*Modal Assurance Criteria - MAC*) ile güncellenerek sayısal ve deneysel elde edilen modlar arasındaki koralasyona bakılması

10-Elde edilen dinamik parametrelerin karşılaştırılması; her bir dinamik parametreye (mod şekilleri, periyotlar, sönüm oranları) ayrı ayrı karşılaştırılarak irdelenmesi-karşılaştırılma sonucunda diyagonal elemanların yapıya olumlu - olumsuz sonuçlarının ortaya konulması

11-Tüm bu sonuçlar ışığında diyagonal elemanların yapının dinamik davranışına etkilerinin Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle ortaya çıkarılarak gelecek çalışmalara ışık tutulması ve öneriler oluşturulması olarak sıralanmaktadır.

Bahsedilen bu aşamaların yapılmasında uyulacak çalışma planı şeması Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. Model çelik köprü üzerinde yapılacak deneysel çalışmalarda kullanılan deney aletleri, yazılımlar, kullanılacak yöntem hakkında açıklamalı bilgilere bu bölümde yer verilecektir.



Şekil 3.1. Çevresel titreşim yöntemi'ne göre model çelik köprünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi aşaması

3.1. Materyal ve Yöntem

Bu kısımda model çelik köprünün geometrik özelliklerinden bahsedilerek kullanılan temel materyaller hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonraki bölümde deneysel olarak yapılacak çalışmalarda uygulanan aşamalar ve kullanılan diğer bazı özel materyaller ve bulonların kontrol edilmesinde kullanılan test aletlerinden tork anahtarı ve analizlerde kullanılacak sayısal ve deneysel yöntemler hakkında bilgiler sunulmaktadır.

3.1.1. Model çelik köprü Yapısı Hakkında Genel Bilgiler

Bu tez çalışmasında, 6,10 m uzunluğunda, 0,83m açıklığında ve 1,88 m yüksekliğinde Şekil 3.5. model çelik köprü kullanılacaktır. Köprünün plan görünüm



Şekil 3.4. Köprü yan görünüşü



Şekil 3.5. Model çelik köprü mesnetsiz hali

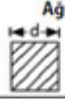





Köprü modeli deforme edilmiş bir kemer geometrisine sahiptir. Tabliyenin uzun eksenine doğrultusunda içeriye doğru eğilen ayaklar, tabliyenin uç kesimlerinin konsol çalışmasını sağlamıştır. Ayaklarda 45 derecelik eğilme sağlanmıştır. Tabliye eksenine boyunca devam eden profiller kalınlığı 2mm olan 20x50 mm kutu kiriş profilden imal edilmiştir. Kafes kirişlerde ise kalınlığı 3mm olan 4cm çaplı dairesel kesitli profil elemanlar kullanılmıştır. Dikme ve Çapraz bağlantı (Diyagonaller) elemanlarında ise çapları 10mm lik çelik çubuk elemanlar kullanılmıştır. Çelik köprü modeli ağırlığı yaklaşık 110 Kg'dır.

Model çelik köprü yapısı modellenirken elastisite modülü $E=2.0 \times 10^5 \text{MPa}$, malzeme yoğunluğu $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$, poisson oranı $\nu=0.3$ alınmıştır. Modelde toplam 40 düğüm noktası ve 71 çubuk eleman (kemer-diyagonal-kiriş) kullanılmıştır.

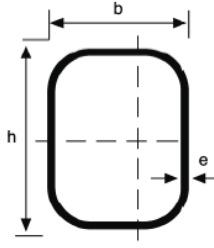
Tablo 3.1. Model çelik köprü kesit ve malzeme özellikleri

YAPISAL ELEMAN	KESİT ÖZELLİKLERİ				MALZEME ÖZELLİKLERİ			
	TİP	ÇAP (mm)	KESİT ALANI (mm x mm)		KALINLIK (mm)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (N/m ²)	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (kg/m ³)	POISSON ORANI (μ)
DİYAGONAL	ÇUBUK ELEMAN	10	-	-	-	2.0E10	7850	0.3
KEMER	DAİRESEL	42.4	-	-	3.0	2.0E10	7850	0.3
KİRİŞ	KUTU KESİT	-	20	50	2.0	2.0E10	7850	0.3

Tablo 3.2. Diyagonal eleman malzeme özellikleri

Kalınlık d mm	Ağırlık kg /m		Kalınlık d mm	Ağırlık kg /m		Kalınlık d mm	Ağırlık kg /m	
								
5	0.196	0.154	50	19.625	15.414	180	254.340	199.759
6	0.283	0.222	52	21.226	16.671	185	268.666	211.011
7	0.385	0.302	54	22.891	17.978	190	283.385	222.571
8	0.502	0.395	56	24.618	19.335	195	298.496	234.439
9	0.636	0.499	58	26.407	20.740	200	314.000	246.616
10	0.785	0.617	60	28.260	22.195	205	329.896	259.101

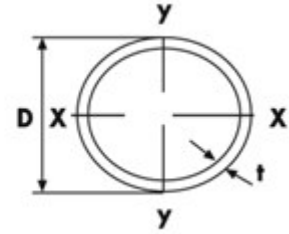
Tablo 3.3 (50 x 20 mm) Kutu kesit kiriş eleman malzeme özellikleri



Dikdörtgen Profilleri (TS 6475)

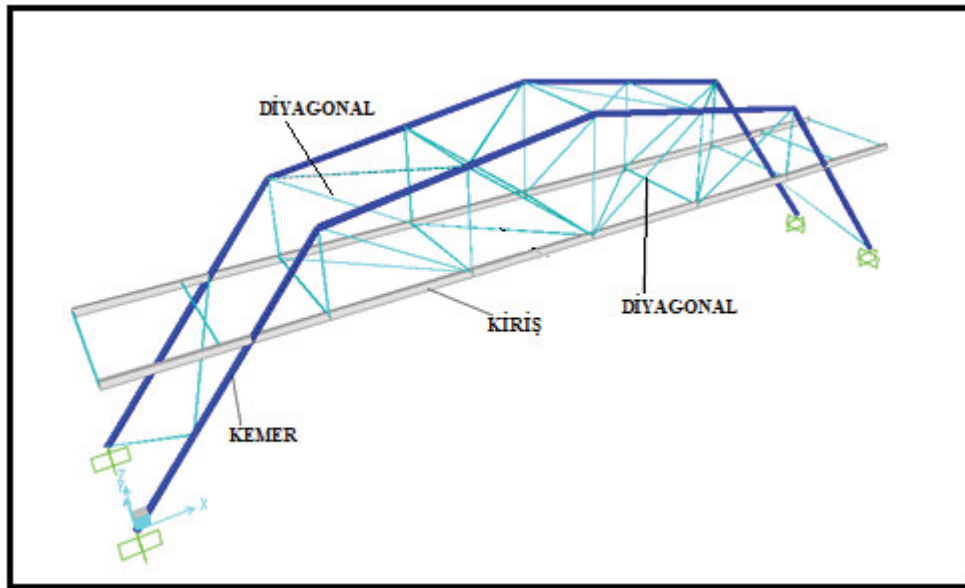
Kenar Uzunluğu			Birim Ağırlıkları (kg/m)							
H Anma Boyutu	B Anma Boyutu	h ve b için toleranslar	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	
50	20	±0.30			1.57	2.07	2.54	2.86	-	
	25				1.69	2.22	2.74	3.10	-	
	30				1.81	2.38	2.93	3.33	4.25	
	34				1.90	2.51	3.09	3.52	4.50	
	40				2.05	2.69	3.33	3.80	4.88	
	50				2.28	3.01	3.72	4.28	5.51	

Tablo 3.4 (42,4 mm x 3mm) Dairesel kemer eleman malzeme özellikleri

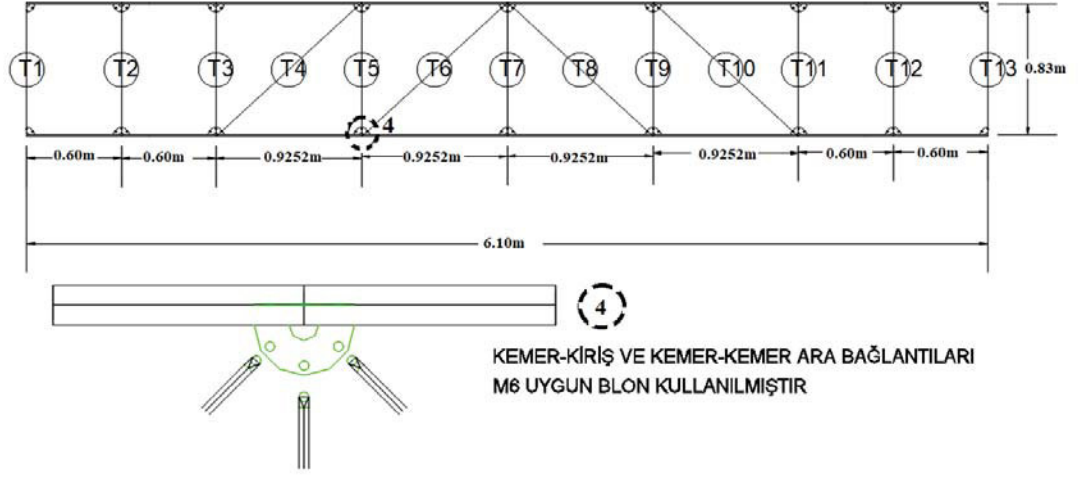


DAİRESEL ELEMAN

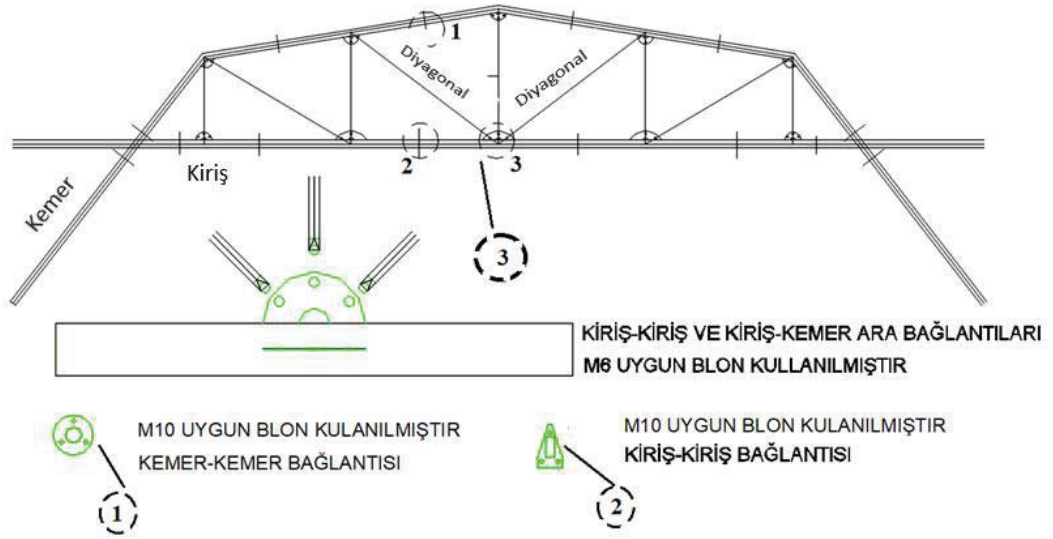
Dış Çap	Et Kalınlığı	Birim Ağırlık	Kesit Alanı	Yüzey Alanı	Atalet Momenti	Atalet Yarı Çapı	Mukavemet Momenti	Plastik Momenti	Burulma Katsayıları	
D mm	t mm	M kg/m	A cm ²	AS m ² /m	I cm ⁴	I cm	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³
42,4	±3,0	2,91	3,71	0,133	7,25	1,40	3,42	4,67	14,5	6,84



Şekil. 3.6. 3 Boyutlu model çelik köprü eleman detayları



Şekil 3.7.Tabliye üstten görünüş birleşim detayları



Şekil 3.8. Model çelik köprü cephe görünüş eleman birleşim detayları

3.1.2. Model Çelik Köprü Mesnet Kurulum

Çelik Köprü modeli kurulum ve denetleme çalışmaları sonrası Şekil 3.5. deki gibi askıda olan köprünün ayakları için mesnet çalışması yapılmıştır. Model çelik köprü ayakları için 120x30x15cm ebatlarında kalıp hazırlanmış ve içerisinde Ø14 lük boyuna donatı ve Ø8 lik etriyelerle sarılmış ve C25 standardında beton malzeme kullanılarak ayak yapılmıştır. Şekil 3.9.

Çelik köprü modelimiz bulon kullanılarak bu ayaklara sabitlenmiştir. Şekil 3.10 ve 3.11.



Şekil 3.9. Model çelik köprü betonarme mesnet yapılması kalıp-demir-beton



Şekil 3.10. Model çelik köprü ayak montajı



Şekil 3.11. Model çelik köprü mesnet montajlı hali

3.1.3. Model Çelik Köprüde Tork Anahtarı İle Bulon Sıkım Ve Ölçüm İşlemi

Çelik köprü modelde birleşim detayları tek tek kontrol edildikten sonra bağlantı noktaları, birleşim detayları ve bulonların metrik civataların gerilme yükü ve sıkma torku değerleri tork anahtarı ile vida sıkım ve ölçüm işlemi yapılmıştır. Bulon çapları, ebatları ve sıkım değerleri Tork anahtarı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.12. Tork anahtarı üzerindeki ayar mekanizması sayesinde vida ve civataların doğru kuvvetle sıkılmaya yarayan bir alettir. Hangi vidanın hangi tork değerinde sıkılması gerektiği ayrıntılı olarak tablolarda verilmektedir.

Bu tez çalışmamızda Şekil 3.7 ve 3.8’de kullanılan civataların gerilme yükü alınıp tork anahtarı üzerindeki ayar skalasında değer ayarlandıktan sonra sıkma işlemine başlanılmış ve ayarlanmış olduğumuz değere ulaşıncaya sıkma işlemi her bir bağlantı elemanı için tek tek yapılmıştır. Tablo 3.6’da dayanım sınıfı “8.8” olan bir vida için sıkma torku altıköşe çaplı M10 luk bulon için: 40.22Nm olarak; M6 bulon için: 8.47Nm olarak alınmıştır. Şekil 3.13-3.14’de model çelik köprünün taşıyıcı elemanlar ve bağlantı elemanlarının tork anahtarı ile sıkılması ve kontrolü verilmiştir.



Şekil 3.12. Tez çalışmasında kullanılan tork anahtarı ve başlıklar



Tablo 3.5. Çalışmada kullanılan tork anahtarının teknik özellikleri

TORK ANAHTARI
INCH= 1/2"
TORK= 0-335 N.m
ÇALIŞMA KAPASİTESİ= 3-14 KG
IBF. FT= 20-100 lbf. ft



Şekil 3.13-3.14: Model çelik köprünün taşıyıcı elemanlar ve bağlantı elemanlarının tork anahtarı ile sıkılması ve kontrolü

Tablo 3.6. Metrik civataların gerilme yükü ve sıkma torku değerleri

METRİK CİVATALARIN GERİLME YÜKÜ VE SIKMA TORKU DEĞERLERİ												
ANMA ÇAPı	ALLEN ANAHTAR ÇAPı  mm	ALTIKOŞE ÇAPı  mm	DIŞ ADIMI mm	4.8		5.8		6.8		8.8		
				Gerilme Yükü	Sıkma Torku	Gerilme Yükü	Sıkma Torku	Gerilme Yükü	Sıkma Torku	Gerilme Yükü	Sıkma Torku	
				kgf-m	Nm	kgf-m	Nm	kgf-m	Nm	kgf-m	Nm	
M 2	1,50	4,00	0,40	488,0 449,5	0,15 0,19	610,6 561,9	0,19 0,23	732,7 674,3	0,23 0,28	976,9 899,0	0,31 0,37	
M 2,5	2,00	5,00	0,45	813,5 749,9	0,31 0,38	1016,9 937,4	0,39 0,48	1220,2 1124,9	0,47 0,58	1627,0 1499,8	0,63 0,77	
M 3	2,50	5,50	0,50	1219,9 1125,9	0,54 0,60	1524,9 1407,4	0,68 0,83	1829,9 1686,9	0,82 1,00	2439,9 2251,9	1,09 1,34	
M 3,5	-	6,00	0,60	1838,2 1511,3	0,84 1,03	2047,8 1889,2	1,05 1,28	2457,3 2267,0	1,26 1,54	3276,4 3022,6	1,68 2,05	
M 4	3,00	7,00	0,70	2115,4 1950,9	1,25 1,53	2644,3 2438,7	1,56 1,91	3173,1 2926,4	1,88 2,29	4230,8 3901,9	2,50 3,36	
M 5	4,00	8,00	0,80	3461,6 3196,8	2,46 3,02	4327,0 3996,0	3,08 3,78	5192,3 4795,2	3,70 4,53	6923,1 6393,7	4,93 6,04	
M 6	5,00	10,00	1	4874,7 4499,1	4,24 5,19	6093,4 5623,9	5,30 6,48	7312,1 6748,6	6,35 7,78	9749,4 8998,2	8,47 10,37	
M 7	-	11,00	1	7134,5 6599,6	6,97 8,60	8918,2 8249,5	8,71 10,76	10701,8 9899,4	10,45 12,90	14269,1 13199,2	13,94 17,21	
M 8	6,00	13,00	1,25	8947,1 8265,6	10,20 12,64	11183,9 10332,0	12,75 15,67	13420,7 12398,4	15,30 18,80	17894,2 16531,2	20,41 25,07	
M 10	8,00	16,00	1,50	14244,5 13167,4	20,11 24,76	17805,6 16459,2	25,14 30,95	21366,8 19751,1	30,16 37,14	28489,0 26334,8	40,22 49,52	
M 12	10,00	18,00	1,75	20788,8 19204,0	34,43 42,42	25958,3 24005,0	43,03 53,03	31149,9 28806,0	51,64 63,83	41533,2 38408,0	68,86 84,84	

3.1.4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Cihazlar Ve Deney Aletleri

Farklı tip mühendislik yapılarında ortam titreşimleri olarak bilinen sadece output (çıkıtı) tepkisinin alındığı deneysel çalışmalarda kalitesi yüksek ölçümler elde edebilmek için deneysel uygulamaların doğru ve kararlı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Yapıya etki eden titreşimler ve yapıdan çıkan tepkiler genel manasıyla tam olarak bilinmemektedir. Her ne kadar çeşitli yöntemlerde çeşitli varsayımlar yapılsa da bunların gerçek değerini yerini alması imkânsızdır. Bu titreşimler çevresel etkilerden oluşmakta; titreşimlere verilen tepkiler zaman ve frekans ortamında işlenerek yapılara ait dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenebilmektedir. Bu deneysel yöntemin adına ise Operasyonel Modal Analiz (OMA) denilmektedir.

Titreşimlerin çevresel kaynaklı olmasından dolayı birçok değişkene bağlıdır. Doğal titreşim kaynakları bazen trafik ya da yaya yükü olurken bazen yer sarsıntılar bazen ise rüzgâr kaynaklı olabilmektedirler. Titreşimler ise yapılarda olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu durumda titreşimlerden oluşan tepkilerin işleme yönteminin doğru seçilmesi ve bu olumsuzluğun seçilen yöntemle giderilmesi önem arz

etmektedir. Oluşan çevresel veya zorlanmış titreşimlerin deneysel olarak ölçülmesi cihazlarla mümkündür. Örnek verilecek olursa sismometreler zemin seviyesinde titreşimleri ölçebilirler ve bir veri işleme ünitesi (datalogger) ile bu titreşimler zamana bağlı olarak kayıt altına alınabilir. Ya da risk faktörüne göre 24 saat izleme yapılması da günümüzde mümkün ve hatta birçok yönetmelikte ve ülkede bu uygulama yapılmaktadır. Deprem erken uyarı sisteminin temelini oluşturdukları bilinir. Ayrıca bu izlemelerle bölgelerin sismik haritaları da çıkartılmaktadır. Bu cihazlar çeşitli farklı hassasiyet derecelerine sahiptirler. Veri işleme üniteleri (datalogger) ise veri işleme ve örnekleme derecelerine göre temel olarak birbirlerinden farklıdır.

Yapıların tepkisini ölçmek amacıyla ise en yaygını olan ivmeölçerler bulunmaktadır. Tepki dönüştürücüler adıyla da mühendislik alanında kullanılırlar. Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde kullanılan başlıca ekipmanlar yukarıda da belirtildiği gibi titreşim kaynakları, ivmeölçerler, veri toplama üniteleri ve sinyal işleme programlarından oluşmaktadır.

Bu bölümde deneysel modal analiz testlerinin başlıca bileşenleri olan ve tez kapsamında deneysel çalışmalarda kullanılan ivmeölçerler ve veri toplama sistemi hakkında bilgiler verilmektedir. Çalışmada uygulanan Operasyonel Modal Analiz ölçümlerinin doğru bir şekilde uygulanabilmesi ilgili modelde gerçekleştirilecek test sürecinin doğru bir şekilde planlanmasına bağlı olmaktadır.

- Mod sayısı, şekilleri ve frekans aralığı gibi modele ait dinamik parametrelerin ön bilgilerin bilinmesi deneyden önce yapılacak Sonlu Elemanlar analizi ile yaklaşık olarak elde edilebilmektedir.
- Ölçümlerde modelde kullanılacak ivmeölçerlerin seçimi ve hangi noktalardan veri alınacağını belirlemek gerekmektedir. Veri alımı esnasında ivmeölçerlerin modele sabitlenmesi ve modelle aralarında temasızlık olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Model üzerine sabitlenen ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması gerekmektedir. Gereksiz ortam sinyallerinin ve gürültü tepkilerinin etkisini azaltmak için veriler toplanmaya başlamadan önce frekans aralığı ve ölçüm hızının belirlenmesi gerekmektedir.

- Deneysel ölçümlere başlamadan önce modele sabitlenen ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine sinyal gelip gelmediği kontrol edilmelidir.
- Gelen sinyallerden kaliteli veri alınabilmesi için ölçüm sürelerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir.
- Doğru sürede alınan sinyaller daha sonra ölçümler tamamlandıktan sonra veri toplama sistemine aktarılırlar. Veri toplama sisteminde yazılım kullanılarak ham sinyaller işlenmek üzere Analiz programına aktarılarak modele ait dinamik karakteristikler belirlenebilmektedir. Bu kısımda veriler frekans ortamında ve zaman ortamında işlenerek yapının frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışmamızda çıkış verisi almak ve bu verileri kaydetmek amacıyla temel olarak aşağıdaki aletler kullanılacaktır.

- 1) İvmeölçerler (Tepki dönüştürücüler)
- 2) Veri toplama ünitesi (Datalogger)
- 3) Bilgisayar ve gerekli yazılımlar (Testlab network, Artemis modal, Excel vb.)
- 4) Cihazlar arası bağlantı ve veri aktarımı için gerekli özel kablolar

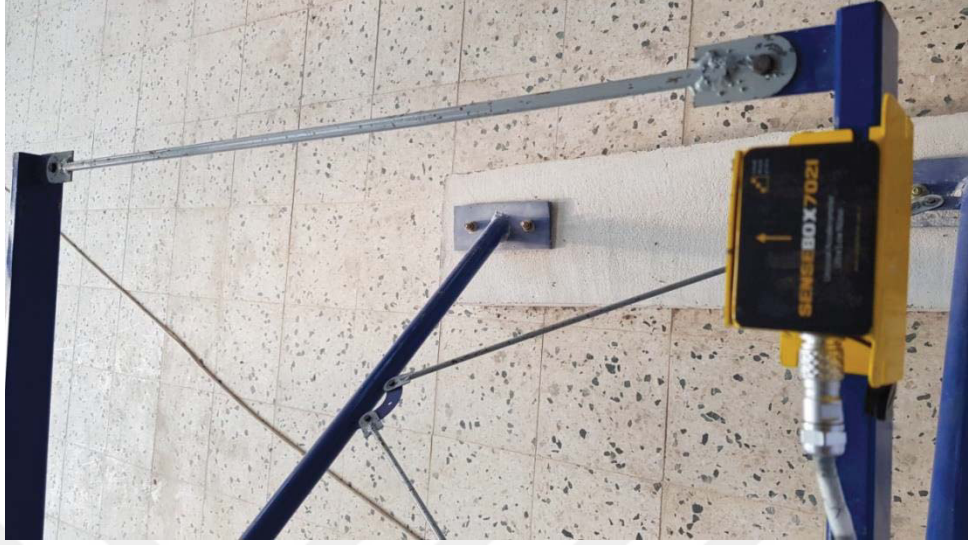
İvmeölçerler (tepki dönüştürücüler)

Sadece tepki çıktıları kullanılarak modal parametrelerin elde edilmesinde kullanılan araçlardan biride ivmeölçerlerdir. Yapı sisteminde meydana gelen yer değiştirme, hız, ivme gibi tepkileri sinyal işlemeye hazır bulunan bir veri alma ünitesine orantılı bir elektrik sinyali biçiminde aktaran aletlere dönüştürücü denmektedir.

Mühendislik yapı sistemlerinde yer değiştirme ölçümleri tüm algılayıcıların harici bir referans noktası ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir ve bu da çoğu kez maliyetli bir işlemdir. Bundan dolayı, doğru sonuçlar elde edilmesine imkân veren ve maliyeti nispeten daha düşük olan ivmeölçerler test ekipmanları olarak tercih edilirler. İvmeölçerlerden elde edilen değerler sayısal entegrasyon yoluyla hız ve yer değiştirme değerlerine dönüştürülebilir.

Geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmaları ve nispeten küçük ve hafif olmaları gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen dönüştürücü çeşidi ivmeölçerlerdir. Kullanılacakları yapı veya sisteme uygun olarak tek veya üç eksenli

ivmeölçerler mevcuttur. Şekil 3.15’ de tek eksenli ve Şekil 3.16’ da üç eksenli ivmeölçer örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Tek eksenli ivmeölçer

Eksen sayısına göre SENSEBOX 7021/7022/70x3+ ve 7031/7032/7033 şeklinde isimlendirilen bu ivmeölçerler, kuvvet/elektro-dinamik geri beslemeli, ultra düşük gürültülü sensörlerdir. Sismik Ölçümler, Kuvvetli Yer Hareketi Ölçümleri, Ortam Titreşimi ve Yapısal Sağlık Takibi uygulamaları için hem düşük maliyeti hem de yüksek performans açılarından ideal bir çözümdür. Şekil 3.15’de görülen ivmeölçer SENSEBOX 7021 dir. Eksen sayısına göre isminden sonra gelen numaranın son hanesi değişmektedir.



Şekil 3.16. Üç eksenli ivmeölçer

Şekil 3.16’da görülen ivmeölçer SENSEBOX 7021x3 dür. Bu ivmeölçerler, kuvvet/elektro-dinamik geri beslemeli, ultra düşük gürültülü sensörlerdir. Tek eksenli ve üç eksenli ivme ölçerlerin teknik özellikleri Tablo 3.7’de verilmektedir.

Tablo 3.7. İvme Ölçerlerin Teknik Özellikleri

TEKNİK ÖZELLİKLER	SENSEBOX 7021/22/x3+
Eksen Sayısı	1/2/3
Tipi	Kuvvet/elektro-dinamik geri besleme (FBA-Force Feedback)
Maksimum İvme Ölçüm Aralığı	±3 g
Çıkış Gürültü Performansı	130 ng/√Hz
Frekans Aralığı	0,1-120 Hz
Hassasiyet	2400 mV/g
Şok Dayanımı	2000 g
Besleme Voltajı	+6 ±15VDC
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ~ +65°C

Veri Toplama Ünitesi (Datalogger) Ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi, bilgisayardan ve bu sistem çözümleri için geliştirilen özel yazılımlardan oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi, ivmeölçerlerden iletilen titreşim sinyallerini kaydedip ilgili bilgisayar programına aktarmak için kullanılmaktadır. Sinyallerin toplanmasında ve işlenmesinde gerekli ara yüzü sağlayan eleman olarak da bilgisayar programı kullanılmaktadır.

İvmeölçerler yapıdan gelen titreşimleri elektrik sinyalleri olarak doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçirdikten sonra veri toplama sistemine

aktarmaktadırlar. Bu kısımda sinyaller dinamik yapılarına uygun bir hızda ve çözünürlükte örneklendirilirler (sayısal forma dönüştürüldükten) ve daha sonra bilgisayar programında işlenirler veya saklanırlar. Bilgisayar ortamında depolanan sinyallerin işlenmesinde gerekli ara yüzü sağlayan işlemciler olarak özel yazılımlar kullanılmaktadır.

DeneySEL ölçümlerde kullanılan bir veri toplama ünitesi örneği Şekil 3.17' de teknik özellikleri ise Tablo 3,8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. 4 Kanallı dinamik veri toplama cihazı ve ivme kayıt sistemi

Tablo 3.8 .TEXTBOX 2010 Veri Toplama Cihazı Teknik Özellikleri

Ölçüm Çözünürlüğü	24 Bit
İletişim Ara yüzü	Ethernet
Kanal Sayısı	4(GPS opsiyonu ile senkronizasyon)
Kanal Ölçümü	Diferansiyel
Senkronizasyon	Gerçek eş zamanlı
Veri Toplama Hızı	4 KHz(4000 örnek/sn)/kanal-kanal sayısından bağımsızdır
Filtreleme	Anti-Aliasing/Alçak Geçirgen
Dinamik Giriş Aralığı	140dB
Ölçüm Aralığı	±5.5V(standart),±12V(PGA opsiyonu)
Kanal Kazançları	1/8,1/4,1/2,1,2,4,8,16,32,64,128 kat-her kanal bağımsız ayarlanabilir (PGA opsiyonu)
Sensör İkaz Gerilimi	+5V,+12V,-12V
Güç Gereksinimi	12V DC, maksimum 40W
Çalışma Sıcaklığı	10°C-35°C-önerilen 25°C
Saklama Sıcaklığı	0°C-50°C
Dijital Altyapı	ARM Cortex mikro denetleyici, gömülü Linux işletim sistemi(Opsiyonel)

Model çelik köprü çalışmamızda 24 bit 4 Kanallı dinamik veri toplama ünitesi kullanılacaktır. Veri toplama ünitesi 4 Kanallı olup tüm kanalları eş zamanlı örnekleme yapabilmektedir.

Veri toplama ünitesinin bir diğer birleşeni ise GPS antenleridir. Cihazın kalibrasyon yapabilmesi ve uzay düzleminde yerini belirleyebilmesi için

gereklidirler. Şekil 3.18’de GPS anteni görülmektedir. Veri toplama üniteleri GPS anteninden sinyal almak zorundadır. Aksi takdirde ölçüm yapmazlar. Her veri toplama ünitesinin GPS anteni ayrı ve birer adettir.



Şekil 3.18. GPS anteni

Model çelik köprü Çalışmamızda kullanılan GPS anteninin özellikleri ise;

- 1 Mikro Saniyelik Doğrudan ADC Senkronizasyon
- Real-Time Clock Calender
- Kapalı Alanlarda Bile Çekimi Kolaylaştıran Hot-Start Modu
- 4 cm’lik Mini Anten/ Çatı Tipi Anten

Şeklindedir.

Veri toplama ünitesi ve bilgisayar arası bağlantı ise Ethernet ile sağlanmaktadır. CAT 6 kablo vasıtası ile veri toplama ünitesi bilgisayara bağlanır. Veri toplama ünitesinin üzerinde ise şekil 3.19 daki gibi ışıklar vardır. Bu ışıklar GPS anteni, güç, ready (ölçüme hazır) ve Record ışıklarıdır. Kayıt yapılmadan önce GPS anteni, güç ve ready (ölçüme hazır) ışıklarının yanmış durumda olmaları sağlatılmalıdır.



Şekil 3.19. Veri toplama ünitesinin ölçüm uyarıcıları

Veri toplama ünitesi şekil 3.19. daki gibi kayıt yapmaya hazır hale getirilmiştir. Kayıt sırasında ise record ışığının yanması gerekmektedir. Cihazın daha önceden Testlab yazılımı ile her bir kanala bağlı olan ivmeölçerlerin kalibrasyonunun yapılmış olması gerekmektedir ve bunun yanında ölçüm süresi de ölçümü yapan kişi tarafından ayarlanmalıdır.

Bilgisayar ve Gerekli Yazılımlar

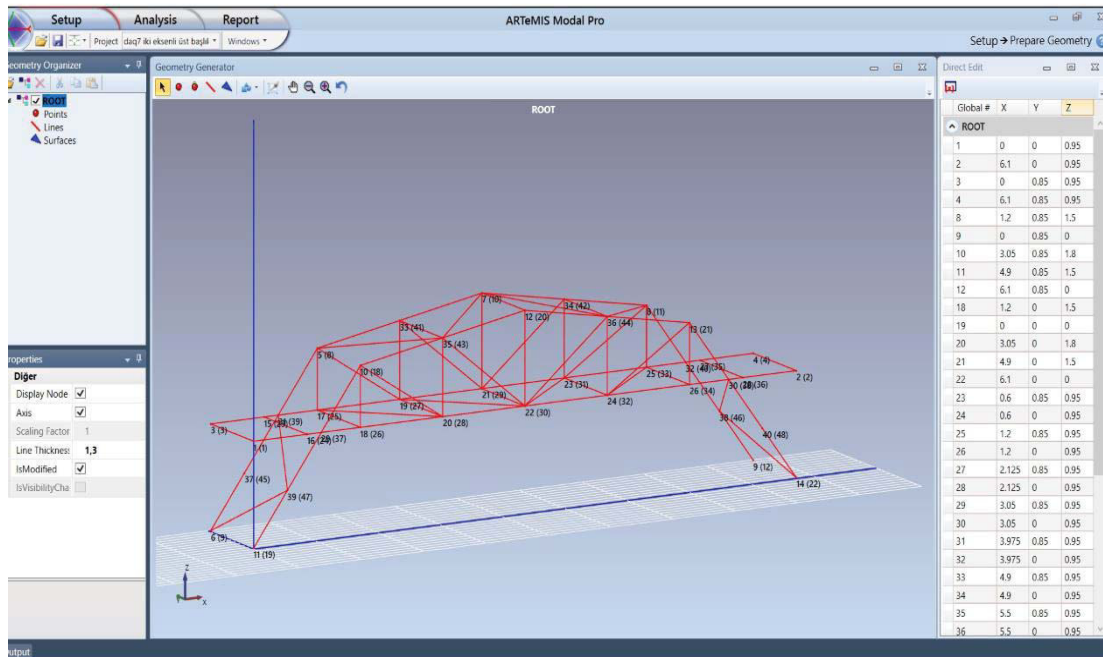
Tez konumuzun deneysel çalışmalarında ivmeölçerlerin veri toplama ünitesi(datalogger)'ne tanıtılmasında, sinyal verilerinin toplama ünitesinde toplanmasında ve bilgisayara dayalı sinyal işleme programına aktarılmasında bilgisayarlar kullanılacak olup, veri toplama ünitesinin Testlab network yazılımı ile ilgili ayarlamaların yapılabilmesi için ve elde edilen verilen Artemis modal yazılımı ile işlenmesi için gerekmektedir. Veri toplama ünitesi kayıt ettiği ölçüm verilerini. tdms uzantılı halde veya. txt uzantılarıyla vermektedir. Tdms dosyaları bir excel eklentisi ile excel dosyasına dönüştürülebilirler

Teknik Destek Grubu firmasından temin edilen ve deneysel çalışmamızda kullanılan dinamik veri toplama sistemi ile uyumlu çalışan Testlab network yazılımı, veri toplama ünitesinin programlanmasını sağlayan labview ortamında geliştirilmiş bir yazılımdır. Bu yazılım sayesinde veri toplama ünitesine komutlar verilir. Bu komutlar sayesinde ölçüm süresi, örnekleme aralığı, sensörlerin tipi ve kalibrasyonları, ölçüm zamanının belirlenebilmesi verinin kaydedileceği dosya

tipinin belirlenmesi ve daha birçok ayarın yapılması sağlanır. Veri toplama ünitesi verileri değerlendirirken fast fourier transform yöntemini kullanır.

Tez çalışmasında bu kısım her bir kanal için ivmeölçer (accelometer) seçilmiştir. Ayrıca kullanılan ivmeölçerin teknik özelliklerine göre doldurulması gereken kısımlara ivmeölçer teknik özellikleri yazılarak doldurulmuştur. Tüm işlemler gerçekleştirildikten ve deney ölçüme hazır olduğunda arayüzden kayıt butonuna basılarak ölçüm süresi, dosyalanma tipi, sayısı ve dosyanın kaydedileceği yer ve ölçüm örnekleme adımı seçilerek kayda başlanılır

Danimarka'daki Aalborg Üniversitesi'nde geliştirilen Artemis modal yazılımı ile dinamik veri toplama ünitesinden elde edilen veriler işlenerek dinamik parametrelerin elde edilmesini sağlar. Output only modal analiz yöntemini kullanıldığı bir yazılımdır. Tez çalışması kapsamında model çelik köprümüzden alınan çevresel titreşim sinyalleri Artemis modal yazılım aracılığıyla zaman tanım alanı yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.20 de artemis modal pro yazılımının arayüzü verilmiştir.



Şekil 3.20. Artemis Modal Pro Yazılımı Arayüzü Model çelik köprü Analizi

Şekil 3.20 de görüldüğü gibi 3 ana sekmesi bulunmaktadır. Bunlar Setup, Analysis ve Report sekmeleridir.

Setup sekmesinde

-“prepare geometry” seçeneği bulunmaktadır. Ölçüm yapılan yapının geometrisi girilir.

-“manage measurements” seçeneği bulunmaktadır. Bu kısımda dinamik veri toplama ünitesinden alınan veri dosyası tanıtılması sağlanır. Birçok formatta kayıt edilen verileri tanımlayabilmektedir. (Txt dosyası, excel dosyası, matlab dosyası vb.). Sol tarafta açılacak olan menüden yapılan ölçümle ilgili örnekleme adımı seçilir.

-“assign dof information” seçeneği. İvmeölçerlerin konumu ve yönleri atanır. Referans ivmeölçer belirlenir.

Analysis sekmesinde

-“prepare data” seçeneği bulunmaktadır. Ölçüm verileri setup sekmesinde bulunan veriler ile birlikte işlenirler. Signal processing penceresinde sinyalin nasıl işleneceğine dair seçenekler bulunur. (Detrending, Filtering, Projection Channel,harmonic detection vb.). Tüm veriler işlenerek spektral yoğunluk matrisleri oluşturulur.

- “estimation” seçeneği bulunmaktadır. Bu kısımda modal parametrelerin çeşitli yöntemlere göre (FDD, EFDD, CFDD, **SSI-PC**, SSI-UPC, SSI-CVA) elde edilmesi sağlanmaktadır. Frekans ve sönüm tablo halinde, mod şekilleri ise arayüzün sağ tarafında geometry penceresi altında şekilsel olarak verilir.

-“validation” seçeneğidir. Burada elde edilen dinamik geçerliliği modal güvence kriterine göre bir kez daha kontrol edilir.

Report sekmesinde

-“Word” seçeneği bulunmaktadır. Word dosyasını halinde rapor düzenlenmesini sağlar.

-“Power point” seçeneği bulunmaktadır. Power point sunum dosyası halinde rapor düzenlenmesini sağlar.

3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında yöntem olarak deneysel yöntemle yapılan analizlerde sadece çıktı verilerinin kullanılacağı operasyonel modal analiz (*output only*

operational modal analysis) OMA yöntemi kullanılacaktır. Modal parametrelerin tahmininde ise zaman tanım alanında SSI-PC (*Stochastic Subspace Identification – Principal Component*) yöntemi kullanılacaktır.

3.2.1. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler Ve Hareket Denklemleri

Gerçek sistemler çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde (ÇSDS) serbestlik derecesi, bir hareket denklemi ve doğal frekansa karşılık gelmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alırlar.

Sistemin dinamik dengesine bakılarak hareket denklemi aşağıdaki düzenle oluşturulur;(Kasımzade, 2002).

$$\{F_e\} + \{F_c\} + \{F_l\} = \{F(t)\} \quad (3.1) \text{ no'lu denklem}$$

Burada $\{F_e\}$ sisteme etkiyen elastik kuvvetler olup i . elemanı (yani k.s.d. doğrultusundaki u_i yer değişmesine sistemin tepkisi) süper pozisyonla 3.2 no'lu denklemdeki gibi bulunur;

$$\{F_{ei}\} = k_{i1}u_1 + k_{i2}u_2 + \dots + k_{ij}u_j + k_{in}u_n \quad (3.2) \text{ no'lu denklem}$$

k_{ij} j . kinematik serbestlik derecesi (k.s.d.) doğrultusunda birim yer değiştirmeden ($u_j = 1$) i . k.s.d.'si doğrultusunda oluşmuş kuvvettir. $i=1, n$ k.s.d.'si için sisteme etkiyen elastik kuvvet 3.3 no'lu denklemdeki şekilde ifade edilebilir;

$$\{F_e\} = [k]\{u\} \quad (3.3) \text{ no'lu denklem}$$

Burada $[k]$ sistemin rijitlik matrisidir, simetrik matristir. Basit sistemler için yapı mekaniğinden belli direk dengeler (yer değiştirmeler yöntemi temelinde) yöntemi ile karmaşık sistemler için Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile kurulmaktadır.

$\{F_c\}$ Sisteme etkiyen sönüm kuvvetleridir. Titreşim sırasında sistemdeki enerji itkisi eşdeğer viskoz sönüm teorisine dayalı kabul edilerek, i . elemanı süperpozisyonla 3.4 no'lu denklemdeki gibi bulunur;

$$\{F_{ci}\} = c_{i1}\dot{u}_1 + c_{i2}\dot{u}_2 + \dots + c_{ij}\dot{u}_j + c_{in}\dot{u}_n \quad (3.4) \text{ no'lu denklem}$$

c_{ij} j. k.s.d.' si doğrultusunda birim hızdan $\dot{u}_j = 1$ i. k.s.d.' si doğrultusunda oluşmuş kuvvettir.

$i =$ k.s.d.' si için sisteme etkiyen sönüm kuvveti 3.5 no'lu denklemdeki gibi bulunur;

$$\{F_c\} = [c]\{\dot{u}\} \quad (3.5) \text{ no'lu denklem}$$

Burada $[c]$ sistemin sönüm matrisidir. Uygulamalarda daha önce de gösterildiği gibi sönüm matrisinin elemanları yani sönüm katsayıları c_{ij} , sonlu serbestlik dereceli sistemin sönüm oranlarına bağlı oluşturulur. Dolayısı ile sönüm (katsayıları) matrisi belli sönüm oranlarına dayanılarak bulunur. Sönüm oranları tek d.s.d. sistemlerde görüldüğü gibi deneylerle bulunur.

$\{F_I\}$ Sisteme etkiyen atalet kuvvetleridir ve elemanı (yani i. k.s.d. doğrultusunda \ddot{u}_i ivmesine sistemin tepkisi) süperpozisyonla 3.6 no'lu denklemdeki gibi bulunur;

$$\{F_{Ii}\} = m_{i1}\ddot{u}_1 + m_{i2}\ddot{u}_2 + \dots + m_{ij}\ddot{u}_j + m_{in}\ddot{u}_n \quad (3.6) \text{ no'lu denklem}$$

m_{ij} Kütle tesir katsayısı olup, j. k.s.d.' si doğrultusunda birim ivmeden ($\ddot{u}_j = 1$) i. k.s.d.' si doğrultusunda oluşmuş kuvvettir.

$i = 1, n$ k.s.d.' si için sisteme etkiyen atalet kuvveti 3.7 no'lu denklemdeki gibi bulunur;

$$\{F_I\} = [m]\{\ddot{u}\} \quad (3.7) \text{ no'lu denklem}$$

$[m]$ Kütle matrisidir (simetriktir $m_{ij} = m_{ji}$). Kütleler tekil kütleler halinde düğümlere dağıtılsa ve düğüm ağırlık merkezi etrafında burulma ataletinin sistem dinamiğine etkisi ihmal edilirse, kütle matrisi köşegen olur (yani $i=j$ için $m_{ij} = 0$).

Dış dinamik kuvvetler sisteme sadece k.s.d.' si doğrultusunda uygulanmış dinamik yükler ise, 3.8 no'lu denklemde şöyle ifade edilir;

$$\{F(t)\} = \{e_o\}^T \{f(t)\} \quad (3.8) \text{ no'lu denklem}$$

Burada e_o tesir vektörü olup, k.s.d. doğrultusunda dinamik kuvvet varsa 1, yoksa 0 değerini içeren vektördür.

Dış dinamik kuvvetler sistem mesnedinin kinematik uyarılmasından oluşmuş yer ivmesi ($\ddot{\Delta}$) ise, dış kuvvet vektörü 3.9 no'lu denklemde şekilde oluşturulur;

$$\{F(t)\} = \{F(t)\}_{etk} = -[m]\{e_*\}\ddot{\Delta}(t) \quad (3.9) \text{ no'lu denklem}$$

Burada $\{e_*\}$ tesir vektörü olup, sistemin tabanının statik $\Delta=1$ yer değişmesinden kütlelerin k.s.d.' si doğrultusundaki yer değişmesidir. Sistem tabanının kinematik uyarılmasından sistemin k.s.d.' si doğrultusunda oluşmuş kuvvetlere etkin kuvvet denir.

Yer hareketinin burulma bileşenine ($\varphi(t)$) bakılacak olursa 3.10 no'lu denklemdeki şekilde ifade edilir;

$$\{F(t)\} = \{F(t)\}_{etk} = -[m]\{e_{**}\}\ddot{\varphi}(t) \quad (3.10) \text{ no'lu denklem}$$

Burada $\{e_{**}\}$ tesir vektörü elemanları sistem tabanının $I=\phi$ dönmesinden k.s.d.' si doğrultusundaki yer değişmeleridir.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.11) \text{ no'lu denklem}$$

Genel ifadesi elde edilir.

3.2.2. Sistem Tanımlama Amacı

Sistem tanımlama, dinamik bir sistemin modelinin gerçek sistemden alınan giriş-çıkış ölçümleriyle bulunması anlamına gelir. Sistem tanımlamanın amacı, belirli bir sisteme veri giriş-çıkışı ilişkisinden, daha sonra sistem üzerinde tekrar yapılacak çalışmalarda kullanılabilir bir matematiksel model kurmaktır. Bu model;

- Sistem davranışlarının öngörülebilmesini
- Sistem davranışının istenilen yönde kontrol edilmesi ve yönlendirilebilmesini hedef edinir.

Bu çalışmanın ön koşulu gerçeği yansıtmaktır. Sistem tanımlama yöntemleriyle elde edilen bir model, bir giriş ve bir çıkış arasındaki matematiksel ilişkiyi ortaya koymak amacıyla oluşturulabileceği gibi, birçok çıkış (veya ölçüm) ile birçok giriş arasındaki ilişkiyi de inceleyebilir.

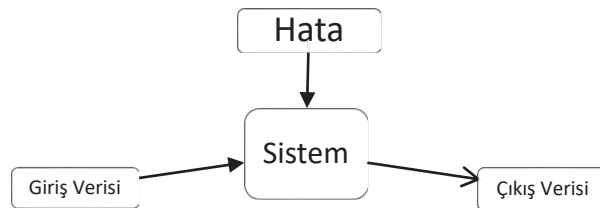
Sistem tek giriş-tek çıkışlı ise SISO (single input-single output), çok giriş bir çıkışlı ise MISO (multi input- single output), çok girişli-çok çıkışlı ise MIMO (multi input-multi output) sistem olarak adlandırılır.

Sadece-çıkıtı sistem tanımlama yönteminde yapıya uygulanan girişlerin ölçülmesine gerek yoktur. Kısacası şekil 3.45 deki şemada ele alınırsa sadece çıktı diğer bir değişle sistem tepkilerinden sistemin tanımlanması ve dinamik verilerin elde edilmesi amaçlanır. Sistemin geçerli bir matematik modelinin elde edilmesi başından sonuna kadar dikkat ve titizlik gerektiren bir işlemdir. Sistem tanımlama işlemi, sistemi uyaracak uygun giriş sinyalinin seçimi ile başlar. Sistemden elde edilen tanımlamaya uygun veri ile bir model belirlenir ve belirlenen bir yöntemle parametreler kestirilir (Kasımzade ve Tuhta, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, Peeters, 2000, Ljung, 1998).

Sistem tanımlama süreci, deneysel planlama ve veri toplama, modellerin kurulması, deney verilerinden bilinmeyen sistem parametrelerinin tahmin edilmesini ve bulunan modelin geçerliliğinin test edilmesini içerir. Yukarıda bahsedildiği gibi sistem modelinin bilinmesi, sistem karakteristiklerinin formülize edilmesi ve buna dayanarak yüksek performanslı kontrol sistemlerinin tasarımı ve oluşturulması için önemlidir. Sistemler gerek birimleri arasındaki ilişkiler gerekse çevre ile ilişkileri bakımından genellikle çok karmaşık yapıdadırlar. Bunlar, bazı basitleştirmeler (ihmalller) ve kabuller altında modellenmektedir. (Tuhta; 2010).

Bir sistemi incelemedeki amaç, sistemin davranışını öğrenmek, sistemi denetlemek, sistemi yenilemek veya korumak olabilir. Bazı durumlarda bilinen girdiler için sisteme bağlı olarak çıktıların ne olacağı hakkında veya girdi ve çıktılar gözlenerek (bilindiğinde) sistemin kendisi (sistem parametreleri) hakkında bilgi çıkarılması istenebilir.

Bir ölçme sonucu elde edilen değer, ölçülen özelliğin modeldeki karşılığı olan değişkenin aldığı değer olarak ele alınmaktadır. Ölçülen özellik rasgelelik içerdiğinde modelde karşılık gelen değişken de doğal olarak rasgele değişken olarak ele alınacaktır. Şekil 3.21' de sistem tanımlama genel şeması verilmektedir.



Şekil 3.21. Sistem tanımlama genel şeması

Sistem tanımlamada iki temel yaklaşım bulunmaktadır.

Gri Kutu: İncelenen sistemin yapısı hakkında bir önbilginin mevcut olması neticesinde kullanılan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda içeriği hakkında bir önbilgiye sahip olduğumuz bir sisteme bilinçli girişler yapılarak ve bunun sonucunda çıkan çıkışları izleyerek bir model oluşturulur.

Kara Kutu: İncelenen sistemin yapısı hakkında hiçbir bilgiye sahip olunmadığında kullanılan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, içeriğinden haberdar olmadığımız bir sisteme çeşitli girişler yapılarak ve bunun sonunda çıkan çıkışları da izleyerek bir model oluşturulur.

Sistem tanımlama yöntemleri, sistemin modal parametrelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Yapı mühendisliğinde bu dinamik parametreler, köprü, bina vb. diğer yapıların dinamik davranışını anlamaya yardımcı olmaktadır. Modal sistem tanımlama, yapısal tasarımın düzgün çalışıp çalışmadığının denetlenmesi, deprem, fırtına, patlama gibi ani ve dinamik yükler altında bulunan yapının güvenilirliğinin ölçülmesinde kullanılmaktadır.

Sistem tanımlama izleği 4 ana aşamadan oluşur:

1. Deneysel planlama
2. Model yapısının seçimi
3. Parametre kestirimi
4. Kurulan modelin geçerliliğinin test edilmesi.

Sistemin geçerli bir matematik modelinin elde edilmesi başından sonuna kadar dikkat ve titizlik gerektiren bir işlemdir. Sistem tanımlama işlemi, sistemi uyaracak uygun giriş sinyalinin seçimi ile başlar. Sistemden elde edilen tanılamaya uygun veri ile bir model belirlenir ve belirlenen bir yöntemle parametreler kestirilir. Bu yolla elde edilen model geçerlilik testlerini geçemezse algoritmada yukarıdan aşağıya doğru hareket edilir. Önce parametre kestirim yöntemi değiştirilir. Eğer model çeşitli denemelere rağmen yine geçersizse model yapısı değiştirilir ve algoritmada aşağıya doğru hareket edilir. Model yapısını da değiştirmenin bir sonuca varmadığı durumlarda sistemin deneysel planlamasına geri dönülür. Sistemin lineer bir modelle temsil edilemediği veya tanımlamanın (hata ölçülerine göre) yeteri kadar başarılı

bulunmadığı sonucuna varılırsa akıllı sistemlerin de içinde bulunduğu lineer olmayan modelleme yapılarına başvurulur (Wikipedia,2020)

Sistem tanımlamadaki matematiksel modeller aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Lineer ve lineer olmayan modeller
- Sürekli-zaman ve kesikli-zaman modeller
- Stokastik ve deterministik matematiksel modeller
- Dinamik ve statik modeller

Sürekli Zaman lineer durum uzay modelleri

$A:_{n \times n}$, $B:_{n \times m}$, $C:_{r \times n}$, $D:_{r \times m}$, reel sayı elemanlı matrisler olmak üzere sürekli zaman deterministik lineer durum-uzay modeli;

(3.12) no'lu denklem,

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t)$$

Durum denklemidir.

(3.13) no'lu denklem,

$$\underline{y}(t) = C\underline{x}(t) + D\underline{u}(t)$$

Uzay, çıktı denklemidir.

(3.14) no'lu denklem,

$$\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0$$

Şeklinde. Burada $\underline{x}(t)$ durum vektörünü, $\underline{u}(t)$ sistem girdi vektörünü, $\underline{y}(t)$ sistem çıktı ya da gözlem vektörünü göstermektedir. t_0 Anındaki $\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0$ değerine bağlı olarak

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t)$$

Denkleminin çözümü 3.15 no'lu denklemde verilmiştir.

(3.14) no'lu denklem,

$$\underline{x}(t) = e^{A(t-t_0)}\underline{x}_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau$$

Şekildedir. Burada (3.15)

(3.15) no'lu denklem

$$e^{As} = I + \frac{s}{1!}A + \frac{s^2}{2!}A^2 + \frac{s^3}{3!}A^3 + \dots$$

Ve A matrisinin spektral ayrışımı

(3.16) no'lu denklem,

$$A = P\Lambda P^{-1} = P \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & d_n \end{bmatrix} P^{-1}$$

Olmak üzere

(3.17) no'lu denklem,

$$e^{As} = P e^{\Lambda s} P^{-1} = P \begin{bmatrix} e^{d_1 s} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{d_2 s} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & e^{d_n s} \end{bmatrix} P^{-1}$$

Şeklinde. Λ ile P matrisleri A 'nın özdeğer ve özvektörlerinin oluşturduğu matrislerdir.

Kesikli zaman lineer durum uzay modeli

(3.18) no'lu denklem,

$$\underline{x}(k+1) = A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k)$$

(3.19) no'lu denklem,

$$\underline{y}(k) = C\underline{x}(k) + D\underline{u}(k)$$

(3.20) no'lu denklem,

$$\underline{x}(k_0) = \underline{x}_0$$

Olmak üzere, $\underline{x}(k_0) = \underline{x}_0$ başlangıç değerine bağlı olarak

$\underline{x}(k+1) = A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k)$ indirgeme bağıntısının çözümü;

(3.20) no'lu denklem,

$$\underline{x}(k_0 + k) = A^k \underline{x}(k_0) + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B \underline{u}(k_0 + j - 1)$$

Ve $k_0 = 0$ için

(3.21) no'lu denklem,

$$\underline{x}(k) = A^k \underline{x}_0 + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B \underline{u}(j - 1)$$

Şeklindedir.

Verilen ardışıklıkta A, B, C, D matrisleri zaman parametresine bağlı olarak değiştiklerinde dinamik modeller söz konusudur. Bu durumda A, B, C, D matrisleri yerine sürekli-zaman modellerinde $A(t), B(t), C(t), D(t)$ ve kesikli zaman modellerinde $A(k), B(k), C(k), D(k)$ matrisleri gelecektir.

Bazı sistemlerde istenilen çıktılar elde etmek için çıktılar üzerindeki gözlemlere bağlı olarak sisteme girdiler verilmektedir. Bu tür kontrole geri bildirim denmektedir. Kesikli zaman durum uzay modeli;

(3.22) no'lu denklem,

$$\underline{x}_{k+1} = A \underline{x}_k + B \underline{u}_k$$

$$\underline{y}_k = H \underline{x}_k$$

$$\underline{x}_{k_0} = \underline{x}_0$$

Olmak üzere 3.23 nolu denklemde

(3.23) no'lu denklem,

$$\underline{x}(k_0 + k) = A^k \underline{x}(k_0) + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B \underline{u}(k_0 + j - 1)$$

Ve $k_0 = 0$ için

(3.24) no'lu denklem

$$\underline{x}(k) = A^k \underline{x}_0 + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B \underline{u}(j - 1)$$

Şeklindedir. $\underline{x}(k)$ ile \underline{x}_k gösterimleri bir arada kullanılmıştır.

Başlangıçta $\underline{x}_0 = \underline{x}_a$ durumunda olan sistemi uygun girdiler girilerek j adım sonunda \underline{x}_b durumuna getirmek istenmektedir.

Kontrol edilebilirlik kavramı

Herhangi $\underline{x}_a, \underline{x}_b$ vektörleri için bir i pozitif tamsayısı ve $\underline{u}_0, \underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots, \underline{u}_{i-1}$ girdileri için durum denklemi, $\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k$, $\underline{x}_0 = \underline{x}_a$ olan sistem i . adımda $\underline{x}_i = \underline{x}_b$ durumuna gelebiliyorsa sisteme kontrol edilebilir denir.

Sistemin kontrol edilebilir olması sadece A, B matrislerine bağlıdır. Bu sebepten dolayı “sistem kontrol edilebilir” yerine “ A, B kontrol edilebilir” denir.

Kalman rank koşuluna göre;

$$A, B \text{ kontrol edilebilir} \Leftrightarrow \text{rank}[B : AB : A^2B : \dots : A^{n-1}B]_{n \times mn} = n$$

Şeklindedir.

Gözlemlenebilirlik kavramı

(3.25) no’lu denklem,

$$\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k$$

$$\underline{y}_k = H\underline{x}_k$$

$$\underline{x}_{k_0} = \underline{x}_0$$

$$\underline{y}_k = H \left(A^k \underline{x}_0 + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B \underline{u}_{j-1} \right)$$

Olmak üzere \underline{y}_k değeri \underline{x}_0 ile $\underline{u}_0, \underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots, \underline{u}_{i-1}$ lerin bir fonksiyonu olma özelliği taşır. Girdiler (kontrol) sıfır olursa veya alınrsa, \underline{y}_k sadece \underline{x}_0 ’ın, $\underline{y}_k(\underline{x}_0)$ şeklinde bir fonksiyonu olur.

$\underline{y}_k(\underline{x}_0), \underline{x}_0$ başlangıç değeri ve sıfır kontrol için sistem denklemlerinin bir çözümü kabul edilirse,

İsteksel \underline{x}_0 vektörü için bir k adımı vardır. Tam olarak $\underline{y}_1(\underline{x}_0), \underline{y}_2(\underline{x}_0), \dots, \underline{y}_k(\underline{x}_0)$ çıktı değerlerinde \underline{x}_0 belirlenebiliyorsa sisteme gözlemlenebilir denir.

Sistemin gözlemlenebilir olması sadece A, H matrislerine bağlıdır. Bu sebepten dolayı “sistem gözlemlenebilir” yerine “ A, H gözlemlenebilir” denir.

Kalman rank koşuluna göre;

$$A, H \text{ gözlemlenebilir} \Leftrightarrow \text{rank} \begin{bmatrix} H \\ HA \\ HA^2 \\ \vdots \\ HA^{n-1} \end{bmatrix} = n$$

Şeklinde dir.

Kararlı olabilme

Eğer $\underline{u}_k = f(\underline{x}_k)$ gibi \underline{x}_k 'nin bir fonksiyonu ise durum geri-beslemesi söz konusudur. Durum geri beslemesi $\underline{u}_k = K\underline{x}_k$ biçiminde ise durum denklemi, $\underline{x}_{k+1} = (A + BK)\underline{x}_k$ şeklindedir. Durum değerlerinin $\underline{x}_0, \underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_k, \dots$, Dizisinin birçok özelliği $A + BK$ matrisinin öz değerleri ile ifade edilir. Buradaki sorun K geri besleme matrisinin uygun bir seçimiyle matrisinin $A + BK$ öz değerlerinin isteksel değerlere getirilebilir olup olmamasıdır. Bu özelliğe sahip sistemlere veya (A, B) matrislerine öz değer atanabilir denir. (A, B) öz değer atanabilir olması demek, her reel katsayılı $p(\lambda) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + a_{n-2}\lambda^{n-2} + \dots + a_1\lambda^1 + a_0$ polinomu için, karakteristik polinomu $p(\lambda)$ olacak şekilde $A + BK$, yani K matrisi vardır demektir.

Birçok modelde, \underline{x} durum vektöründeki bileşenler, sistemin arzu edilen durum değerlerinden sapmalarını ifade etmektedir. Bu sistem modellerinde, $\underline{x}_0, \underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots$, sapmalarının uygun kontrol seçerek zaman içinde azalması amaçlanmaktadır. Böyle sistemlere veya (A, B) matrislerine kararlı olabilen denir. Bu durum $A + BK$ matrisinin kararlı matris olması durumunda söz konusudur. Bu durumda,

$$\underline{x}_k = (A + BK)^k \underline{x}_0 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

Şeklinde dir. $A + BK$ matrisi kararlı olacak şekilde K matrisi varsa (A, B) 'ye kararlı olabilen (veya sisteme kararlı olabilen) denir.

Ortaya Çıkarılabilme, Teşhis Edilebilme

Sistem girişi bulunmayan durum için

(3.26) no'lu denklem,

$$\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k$$

$$\underline{y}_k = H\underline{x}_k$$

Sistemi için \underline{x}_0 başlangıç değeri bilinmediği durumlarda, “Uygun seçilen” bir matrisi için durum vektörünün tahminleri olan,

(3.27) no’lu denklem

$$\hat{\underline{x}}_{k+1} = A\hat{\underline{x}}_k + K(\underline{y}_k - H\hat{\underline{x}}_k) \quad (3.27)$$

$$\hat{\underline{x}}_0 = 0$$

Şeklinde kabul edilir. \underline{x}_k Durum vektörlerinin tahminleri olan $\hat{\underline{x}}_k$ ‘lara gözlemci denir. Gerçek \underline{x}_k durumu yerine $\hat{\underline{x}}_k$ durumu alındığında ortaya çıkan hata $\hat{\underline{e}}_k = \underline{x}_k - \hat{\underline{x}}_k$ ve $\hat{\underline{e}}_{k+1} = \underline{x}_{k+1} - \hat{\underline{x}}_{k+1}$

$$\begin{aligned} &= A\underline{x}_k - A\hat{\underline{x}}_k - K(\underline{y}_k - H\hat{\underline{x}}_k) \\ &= A\underline{x}_k - A\hat{\underline{x}}_k - K(H\underline{x}_k - H\hat{\underline{x}}_k) \end{aligned}$$

Olmak üzere

(3.28) no’lu denklem,

$$\hat{\underline{e}}_{k+1} = (A - KH)\hat{\underline{e}}_k \quad (3.28)$$

$$\hat{\underline{e}}_0 = \underline{x}_0, (\hat{\underline{x}} = 0)$$

İndirgeme bağıntısı yazılabilir. İsteksiz \underline{x}_0 başlangıç değeri için hatanın sıfıra gitmesi, $A-KH$ matrisi kararlı olacak şekilde K matrisinin seçilmesi demektir. Bu ise (H, A) ’nın ortaya çıkarılabilir olması demektir. Ortaya çıkarılabilme, durum vektörünün (\underline{x}_0) hatası sıfıra giden uygun düzenlenmiş bir gözlemcinin çıktısı olarak ortaya çıkarılabilmesidir.

Kalman Filtresi

Bir sistemin durumu ile ilgili rasgele değişkenler bir \underline{X} rasgele vektörünün bileşenleri ve \underline{Y} sistem çıktısı olmak üzere k zaman indisine bağlı olarak,

(3.29) no’lu denklem

$$\underline{X}_{k+1} = A(k)\underline{X}_k + C(k)\underline{W}_k \quad (3.29)$$

$$\underline{Y}_k = H(k)\underline{X}_k + G(k)\underline{W}_k$$

Şeklindedir.

Kesikli zaman lineer durum uzay modelinde, birinci denkleme durum denklemi ve ikinci denkleme çıktı veya konum denklemi denir. Bu durum uzay modelinde:

(\underline{X}_k) Dizisi nxl boyutlu gözlenemeyen rasgele vektörlerin dizisi,

(\underline{Y}_k) Dizisi rxl boyutlu gözlenebilen rasgele vektörlerin dizisi,

(\underline{W}_k) Dizisi lxl boyutlu gözlenemeyen rasgele hata vektörlerinin dizisi

Ve $A(k):n \times n$, $H(k):r \times n$, $C(k):n \times l$, $G(k):r \times l$ ($l \geq r$) model parametrelerin matrisleri olmak üzere, bu matrisler zamana bağlı olduğunda modele dinamik model, aksi halde statik model denir.

Sistem girdisi bulunmayan, (3.29) durum uzay modelini göz önüne alarak, amacımız sistemin çıkış verisinin, $\underline{Y}_0, \underline{Y}_1, \dots, \underline{Y}_{k-1}$ gözlemlerine dayalı olarak \underline{X}_k durumunu tahmin etmektir. Belirli bir zamana kadar ki, gözlemlere dayalı olarak bir adım ilerisi için durum vektörünün alacağı değerin tahmini denklem 3.30 da gösterilmektedir.

(3.30) no'lu denklem

$$\underline{Y}^{k-1} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 \\ \underline{Y}_2 \\ \vdots \\ \underline{Y}_1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Gözlemlerinin $\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) = a' \underline{Y}^{k-1}$ lineer birleşimi olarak yapılır. Bu tahmin, $E[(\underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/(k-1)})'(\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} - \hat{\underline{X}}_{k/(k-1)})]$ nın minimum olması anlamında en iyi tahmindir. Kalman filtresi $\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)}$ 'nin tahmini için geliştirilmiş indirgemeli bir algoritmadır.

(3.31) no'lu denklem

$$\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) \quad (3.31)$$

$$\tilde{\underline{X}}_{k/(k-1)} = \underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/(k-1)}$$

(3.32) no'lu denklem

$$\hat{\underline{Y}}_{k/(k-1)} = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{Y}_k) = H \hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} \quad (3.32)$$

$$\tilde{\underline{Y}}_{k/(k-1)} = \underline{Y}_k - \hat{\underline{Y}}_{k/(k-1)} = \underline{Y}_k - H \hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} + G \underline{W}_k$$

(3.33) no'lu denklem

$$P_{L(\underline{Y}^{k-1})} = (H\underline{X}_k + G\underline{W}_k) = HP_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) \quad (3.33)$$

Olduğu göz önünde tutularak

$$(3.34) \text{ no'lu denklem} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \hat{\underline{X}}_{k/k} &= P_{L(\underline{Y}^k)}(\underline{X}_k) = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) + P_{L(\underline{Y}_{k/(k-1)})}(\underline{X}_k) \\ &= \hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} + E(\underline{X}_k(\tilde{\underline{Y}}_{k/(k-1)})')(Cov(\tilde{\underline{Y}}_{k/(k-1)}))^{-1}\tilde{\underline{Y}}_{k/(k-1)} \end{aligned}$$

Şeklinde ifade edilir.

$$(3.35) \text{ no'lu denklem}$$

$$\begin{aligned} \hat{\underline{X}}_{k+1/k} &= A \left[\hat{\underline{X}}_{k/k} + P(k)H'(HP(k)H' + GG')^{-1}\tilde{\underline{Y}}_{k/k} \right] \\ &\quad + CG'[HP(k)H' + GG']^{-1}\tilde{\underline{Y}}_{k/k} \\ &= A\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} + (AP(k)H' + CG')(HP(k)H' + GG')^{-1}(\underline{Y}_k - H\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)}) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Elde edilir.

$$K(k) = (AP(k)H' + CG')(HP(k)H' + GG')^{-1} \text{ ifadesi yerine konularak, } (3.35) \text{ denklemini } \hat{\underline{X}}_{k+1/k} = A\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)} + K(k)(\underline{Y}_k - H\hat{\underline{X}}_{k/(k-1)}) \text{ şeklinde yazılabilir.}$$

Buradaki, $K(k)$ matrisi, Kalman kazanç matrisi olarak adlandırılır.

$$(3.36) \text{ no'lu denklem,}$$

$$P(k+1) = AP(k)A' + CC' - [AP(k)H' + CG'] [HP(k)H' + GG']^{-1} [AP(k)H' + CG']$$

indirgeme bağıntısına Riccati denklemi denir.

Durum uzay modeli 3.37 nolu denklemdeki gibi olmak şartıyla

$$(3.37) \text{ no'lu denklem}$$

$$\underline{X}_{k+1} = A\underline{X}_k + \underline{W}_k$$

$$\underline{Y}_k = H\underline{X}_k + \underline{W}_k$$

Şartıyla Kalman filtresi şu şekilde ifade edilir;

$$(3.38) \text{ no'lu denklem}$$

$$P_{L\underline{Y}^k}(\underline{X}_{k+1}) = AP_{L\underline{Y}^k}(\underline{X}_k)\underline{W}_k = A \left[P_{L\underline{Y}^{k-1}}(\underline{X}_k) + P_{L\underline{Y}_{k/k-1}}(\underline{X}_k) \right] + 0 \quad (3.38)$$

$$\hat{\underline{X}}_{k+1/k} = A[\hat{\underline{X}}_{k/k-1} + E(\underline{X}_k \tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}) \text{cov}(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1})^{-1} \tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}]$$

(3.39) no'lu denklem

$$\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1} = \underline{Y}_k - \hat{\underline{Y}}_{k/k-1} = \underline{Y}_k - P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(H\underline{X}_k + \underline{V}_k) = H(\underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/k-1}) + \underline{V}_k \quad (3.39)$$

$$\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1} = H\tilde{\underline{X}}_k + \underline{V}_k$$

(3.40) no'lu denklem

$$\text{Cov}(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}) = \text{Cov}(H\tilde{\underline{X}}_k + \underline{V}_k) = H\text{Cov}(\tilde{\underline{X}}_k)H' + \text{Cov}(\underline{V}_k) \quad (3.40)$$

$$\text{Cov}(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}) = HP(k)H' + R_k$$

(3.41) no'lu denklem

$$E(\underline{X}_k \tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}') = E(\underline{X}_k (H\underline{X}_k + \underline{V}_k)') = \text{Cov}(\tilde{\underline{X}}_k)H' \quad (3.41)$$

$$E(\underline{X}_k \tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}') = P(k)H'$$

İfadeleri yerine konulursa,

(3.42) no'lu denklem

$$\begin{aligned} \hat{\underline{X}}_{k+1/k} &= A[\hat{\underline{X}}_{k/k-1} + P(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1} \tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}] \\ &= A\hat{\underline{X}}_{k/k-1} + AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}[H\tilde{\underline{X}}_k + \underline{V}_k] \end{aligned} \quad (3.42)$$

$AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1} = K(k)$ matrisi olmak üzere

Elde edilir.

$AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1} = K(k)$ matrisinde bulunan $P(k)$ ' ları elde edebilmek için denklem 3.43 deki eşitlikleri taraf tarafa toplayarak,

(3.43) no'lu denklem

$$\underline{X} = A\underline{X}_k + \underline{W}_k$$

$$-\hat{\underline{X}}_{k+1/k} = A\hat{\underline{X}}_{k/k-1} - K(k)[H\tilde{\underline{X}}_k + \underline{V}_k]$$

$$\begin{aligned} \tilde{\underline{X}}_{k+1/k} &= A(\underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/k-1}) + \underline{W}_k - K(k)H\tilde{\underline{X}}_k - K(k)\underline{V}_k \\ &= (A - K(k)H)\hat{\underline{X}}_{k/k-1} + \underline{W}_k - K(k)\underline{V}_k \end{aligned} \quad (3.43)$$

Elde edilir. Her iki tarafa kovaryans operatörünün uygulanması ile,

$P(k+1) = (A - K(k)H)P(k)(A - K(k)H)' + Q_k + K(k)R_kK(k)'$ Olarak elde edilir. Bu indirgemeli denklemde $K(k)$ matrisi yerine $AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}$ konarak, $P(k+1) = AP(k)A' + Q_k - AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}HP(k)A'$ elde edilir. (P_k ve M simetrik matrislerdir) tüm bu denklemlere göre Kalman filtresi denklem 3.44 de verilmiştir.

(3.44) no'lu denklem

$$\hat{\underline{X}}_0 = m_0$$

$$P(0) = P_0$$

$$\hat{\underline{X}}_{k+1/k} = A\hat{\underline{X}}_{k/k-1} - K(k)[Y_k - H\hat{\underline{X}}_{k/k-1}]$$

$$K(k) = AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}$$

$$P(k+1) = AP(k)A' + Q_k - AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}HP(k)A' \quad (3.44)$$

Şeklinde ifade edilmektedir.

3.2.3. Operasyonel Modal Analiz

Yapıların dinamik karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla geçmişten günümüze birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu sistem tanımlama yöntemleri ihtiyaçlara göre şekillenmiştir. Yapı tepkilerini kullanarak dinamik karakteristiklerin belirlenebileceği bir yöntem üzerinde çalışmışlar son zamanlarda yoğun olarak devam etmektedir. Dinamik karakteristiklerin yalnızca ölçülen yapı tepkilerinden elde edilebildiği bu tekniği geleneksel deneysel modal analizlerden ayırmak için araştırmacıların verdikleri isim Operasyonel Modal Analiz Yöntemidir.

Araştırmacıların yaygın olarak kullanılan deneysel modal analiz yöntemi yerine Operasyonel Modal Analiz Yöntemini geliştirmelerinin temel nedenlerinden biri köprüler, barajlar, stadyumlar ve kamu binaları gibi karmaşık sistemli ve büyük yapıları titreştirmede karşılaşılan zorluklardır.

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi hizmet durumundaki bir yapıdan gerçek zamanlı veri toplanarak yapılan özel bir modal analiz yöntemidir. OMA gerçek zamanlı yapısal izleme sistemi olarak kabul edilir. Bu yöntemde gerekli uyarıcı etkiler taşıt yükü, rüzgâr, makine titreşimi gibi çevresel faktörlerdir. OMA Yönteminde yapının çevresel bir etki ile (rüzgâr, taşıt yükü, yaya hareketi ve darbe çekici gibi) titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu

tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin matematik tabanları hemen hemen benzer olup denklem indirgeme teknikleri ve matris oluşturma biçimleri gibi bazı noktalarda farklılıklar bulunmaktadır (E.Hökelekli, 2015).Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde kullanılan süreçler, Frekans Ortamında Ayrışma (EFFD) ve Zaman Ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SSI) Yöntemleri örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmada, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak elde edilen veriler zaman ortamında, Stokastik Alt Alan Belirleme (SSI-PC) yöntemleri kullanılarak işlenmiş ve Model Çelik köprüünün deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir.

Çalışmada Uygulanan Operasyonel Modal Analiz Adımları

Yapısal Sağlık Takibi'nin en önemli bileşenlerinden biri Operasyonel Modal Analiz'dir. Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde ölçümler sırasında sıcaklık değişimi ve nem gibi etkiler altında yapının malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının değişmediği, yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu yani yapının lineer davranış sergilemeye devam ettiği, yapının bir bütün ve sürekli olduğu yani yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir. Bu uygulama notunun hazırlanmasının en önemli nedenlerinden bir operasyonel modal analiz çalışmasında yer alması gereken tüm adımların bu çalışmada A'dan Z'ye yer almış olması, bu nedenle çok başarılı bir örnek oluşturuyor olmasıdır. Çalışmada yer alan Operasyonel Modal Analiz (OMA) aşamaları şu şekilde sıralanabilir

3.2.4. Modal Parametrelerin Elde Edilme Yöntemleri

Çevresel titreşimlerden faydalanarak gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz yönteminde tepki bilinmemekte olup ölçüm de belirli noktalarda gerçekleşmektedir. Bu durumda, belirli noktalardan alınan titreşimlerin frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerde kullanılması ile dinamik parametreler bulunur. Bu iki yöntem birbirine karşı kesin üstünlüğe sahip değildir. Ancak bazı farklılıklar olabilmektedir. Mesela, gürültü zaman tanım alanına dayalı yöntem çözümünde daha kolay fark edilmekte ve kolaylıkla filtreleneme işlemi gerçekleştirilmektedir. Buna ilaveten sinyal işleme sırasında oluşan bazı kusurlarda

kontrol edilebilmektedir. Ayrıca birbirine yakın frekans değerlerinin tespiti zaman tanım alanı yönteminin kullanılmasıyla daha kolay olmaktadır. Her iki yöntemde kullanım amacına göre sık sık kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için uygun ve kullanışlı bir yöntem olan SSI-PC yöntemi tercih edilmiştir.

3.2.5 Stokastik Altalan Belirleme (*Subspace System Identification-SSI-PC*) Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SSI-PC) yöntemi zaman tanım alanında doğrudan çalışıp veri veren ve bu durumda spektral dönüşüme veya korelasyona ihtiyaç duyulmayan bir yöntemdir. Bu yöntemde gürültüden oluşan olumsuz etkilere müdahale yapılabilir ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için uygun ve kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntemde dikkate alınan formülasyon ve bağıntılar hareket denklemlerine bağlı olarak aşağıda verilmekte; yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak görülmektedir.

Zaman tanım alanına dayalı Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemi korelasyon veya spektrum dönüşümüne ihtiyaç duymadan doğrudan zaman tanım alanındaki verilerle sonuç vermektedir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için çok uygundur (Kasımzade A.,ve Tuhta S.,2012,Overschee ve Moor, 1996; B.Peeters ve G.D.Roeck, 1999,W-Xin Ren ve diğerleri,2004). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel bir denklem olarak,

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) = df(t) \quad (3.45)$$

Burada; [m], [c], [k] sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, F(t) titreşim kuvvetini, $\{u(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$, $\{\ddot{u}(t)\}$ ise zamana bağlı yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini belirtmektedir.

Burada, $\{F(t)\}$ kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen [d] matrisi ve $\{f(t)\}$ vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (3.45)'de, titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu yapısıyla SSI yöntemine uygun değildir. Bu nedenle, denklem (3.45) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir. Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte olup, ancak bu model inşaat mühendisliğinde

viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Ewins (1984)

Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak hareket denklemi (3.45) birinci dereceden denklemlerin ilki olan uzay-uzaya dönüştürülür, yani sistem sürekli zaman durum-uzay modeli olarak kabul edilir.

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -m^{-1}k & -m^{-1}c \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ m^{-1} & d \end{bmatrix}$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\dot{z}(t) = A_c z(t) + B_c f(t) \quad (3.47)$$

Şeklinde gösterilmektedir. Burada, A_c durum matrisini, B_c veri matrisini ve $z(t)$ durum vektörünü ifade etmektedir. Durum uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlamak için gereken argümanların sayısıdır. Ölçümlerin sadece bir sensör konumunda değerlendirildiğini ve bu sensörlerin hızölçerler, hız veya yer değiştirme transdüserleri (ivmeölçerler) olduğunu varsayarak, gözlem denklemi:

Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün serbestliklerini ölçmek pek mümkün değildir. Bu nedenle, durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve gözlem denklemi,

$$y(t) = C_a \ddot{u}(t) + C_v \dot{u}(t) + C_d u(t) = Cz(t) + Du(t) \quad (3.48)$$

şeklinde gösterilmektedir. (Kasımzade A.,ve Tuhta S.,2012).Burada, $[C]$ sistem davranış matrisini, $[D]$ doğrudan iletim matrisini ifade etmektedir.

Burada $y(t)$ çıkışlar, C_a, C_v, C_d ise ivme, hız, yer değiştirme için çıkış matrisleridir. Bu tanımlarla;

$$C = [C_d - C_a m^{-1}, kC_v - C_a m^{-1} c] \quad (3.49)$$

$$D = C_a m^{-1} d \quad (3.50)$$

Denklem (3.48) şu biçime dönüştürülebilir:

$$y(t) = Cz(t) + Du(t) \quad (3.51)$$

Burada C , çıkış matrisidir ve D , doğrudan iletim matrisidir. Denklemler (3.47) ve (3.51) sürekli-zaman bir belirli durum-uzayı modelini oluşturmaktadır. Burada, “Sürekli Zaman” ile ifadelerin herhangi bir $t \in \mathbb{N}$ anında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Fakat ölçümler $k\Delta t$ ($k \in \mathbb{N}$) gibi ayrık zamanlarda yapılmaktadır. Sinyal verilerini, örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$z_{k+1} = Az_k + Bu_k \quad (3.52)$$

$$y_k = Cz_k + Du_k$$

şeklinde belirtilmektedir. Burada, $z_k = z(k\Delta t)$ ayrık-zaman durum vektörünü, v_k belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Bu nedenle denklem (3.49)’da stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzayı modeli,

$$z_{k+1} = Az_k + Bu_k + w_k$$

$$y_k = Cz_k + Du_k + v_k \quad (3.53)$$

şeklinde belirtilmektedir. Burada, w_k , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini, v_k ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü

sinyalini ifade etmektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden meydana gelmektedir. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$E \begin{bmatrix} W_p \\ v_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_q^T & v_q^T \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (3.54)$$

şeklinde belirtilmektedir. Burada; E beklenen değer operatörünü, δ_{pq} ise Kronecker deltası göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{\textit{şayet}} \quad p = q \\ 0, & \text{\textit{şayet}} \quad p \neq q \end{cases} \quad (3.55)$$

Yapısal sağlık izlemede (SHM) bulunan titreşim bilgileri genellikle, bazıları ölçülmemiş girdiler olan operasyonel girdiler tarafından indüklenen bir yapının reaksiyonudur. Girdi bilgisi eksikliği nedeniyle, belirli girdi u_k 'yi Bendat ve Piersol (1984)'deki w_k, v_k gürültü terimlerinden ayırt etmek mümkün değildir.

SSI yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında belirlenmektedir. Bu durumda, denklem (3.50)'de gösterilen belirgin sinyal verisi

u_k 'yi, gürültü terimleri olan w_k ve v_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bunun için, u_k gürültü terimleri w_k ve v_k cinsinden yazılıp yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= Az_k + w_k \\ y_k &= Cz_k + v_k \end{aligned} \quad (3.56)$$

şeklinde belirtilmektedir. Denklem (3.56), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman tanım alanının temelini meydana getirmektedir. Operasyonel titreşim ölçümleri, zaman alan sistemi tanımlamak için temel oluşturur. Stokastik altuzay yöntemi, yalnızca çıktı ölçümlerine ve sağlam dijital tekniklere dayanarak durum uzay matrislerini tanımlar. Sadece çıktı modal analizi bir tür operasyonel modal analizdir. Bu yöntem, yapının ortam titreşimleri altındaki reaksiyonlarını belirlemeyi amaçlar. Son zamanlarda yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, sonuçlarının güvenilirliği de önemli bir artıdır. Bu çalışmada sadece çıktı modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde bilindiği gibi, ortam titreşimleri altında, model çelik köprünün çeşitli bağlantılarından yanıtlar alınmıştır.

SSI yönteminin kullanılmasında farklı algoritmalar bulunmaktadır. ARTEMİS modal yazılım programının da kapsamında olan ağırlıksız temel bileşen (UPC),temel bileşen (PC) ve standart varyasyon analiz (CVA) algoritmaları uygulanmaktadır. Bu algoritmalar W_1 ve W_2 olmak üzere iki adet ağırlık matrisinin gözlemlenebilirlik matrisine uygulanması ile oluşmaktadır. Bu yöntemlerde ağırlık matrisleri arasında farklılıklar olmasına rağmen sonuçta elde edilen algoritmalar benzerlik taşıyabilmektedir. Yapılan bu tez çalışmamızda zaman tanım alanında uygulanan SSI yönteminde PC algoritması kullanılması uygun bulunmuş ve model çelik köprünün modal parametreleri ARTEMİS modal yazılım aracılığı ile elde edilmiştir.

Bu yöntemin çok daha detaylı matematiksel açıklamalarına yapılan literatür taramalarında Kasımpzade A.,ve Tuhta S., (2012),Overschee ve Moor, (1996), B.Peeters ve G.D.Roeck, (1999),W-Xin Ren ve et al., (2004),Katayama, (2009),R. Brincker ve C.Ventura, (2005) kaynaklarında ulaşılabilmektedir.

3.2.6 Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması

DeneySEL ölçümler sonucunda elde edilen dinamik parametrelerin karşılaştırılmasında model çelik köprüde diyagonal ve diyagonal elemanlar sökülmüş hali için elde edilen parametreler arasında periyot, frekans ve sönüm verileri arasında ki değişimler ve ulaşılan %'lik farklar tablolar halinde sunulacak ve diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisi bu veriler ışığında irdelenecektir.

3.2.7 Analitik ve DeneySEL Dinamik Parametrelerin Modal Güvence Kriterine (*Modal Assurance Criterion, MAC*) Göre Değerlendirilmesi

Bir sistemin analitik ve deneySEL yöntemlerle elde edilen modlarının doğruluğuna sadece frekans değerlerinin yakınlığına bakılarak karar verilmemektedir. Bunun için modların karşılaştırılması daha doğru bir çözümdür. Modal Güvence Kriteri (MAC), analitik ve deneySEL olarak hesaplanan farklı mod şekil vektörlerinin karşılaştırılmasında ya da bir yöntem kullanılarak hesaplanan mod şekil grubunun doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. İki mod şekli arasındaki Modal Güvence Kriteri (MAC) ;

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)} \quad (3.57)$$

$\{\varphi_X\}_q$ = analitik modal vektör, mod q

$\{\varphi_A\}_r$ = deneysel modal vektör, mod r

$\{\varphi_X\}_q^T$ = $\{\varphi_X\}_q$ nin transpozu

$\{\varphi_A\}_r^T$ = $\{\varphi_A\}_r$ nin transpozu

şeklinde ifade edilmektedir (Pastor vd.2012,Allemang, 2003; Heylen vd., 2007); Burada; φ_X analitik ve φ_A deneysel mod şekil vektörlerini göstermektedir. Eğer; φ_X ve φ_A aynı mod şekil vektörleri iseler, MGK birim matris olmalıdır. Eğer φ_X ve φ_A farklı mod şekil vektörleri iseler, MGK değeri sıfıra yakın olmalıdır.

Modal Güvence Kriteri (MAC), büyük farklılıklara en duyarlı ve mod şekillerindeki küçük farklılıklara nispeten duyarsız olan istatistiksel bir göstergedir. (Pastor vd., 2012) Bu, iyi bir istatistik göstergesi ve mod şekilleri arasında bir tutarlılık derecesi verir. MAC sadece modal şekilleri dikkate alır, bu da ilişkili mod çiftlerini belirlemek için MAC değerleri ile birlikte ayrı bir frekans karşılaştırması kullanılması gerektiği anlamına gelir. MAC genellikle analitik modellerden türetilen şekilleri deneysel olarak elde edilen şekillerle eşleştirmek için kullanılır. Uygulaması kolaydır ve sistem matrislerinin tahmin edilmesini gerektirmez. 0 ile 1 arasında sınırlıdır, 1'i tamamen tutarlı mod şekillerini gösterir. 0'a yakın bir değer, modların tutarlı olmadığını gösterir. MAC hesabı hızlıdır ve kütle yada rijitlik matrislerine ihtiyaç duyulmaz. MAC matrisindeki köşegen dışı elemanlar modlar arasındaki lineer bağımsızlığın kontrolü anlamına gelir. 1'e esit degerdeki iki mod sekli aynı modları (veya tam korelasyonu) gösterir. Analitik yoldan elde edilen mod şekilleri ile deneysel yoldan elde edilen mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olup olmadığı ise modal güvence kriteri (modal assurance criteria - MAC) ile belirlenebilmektedir; MAC değeri 0 ve 1 arasında değişen değerler alabilmektedir. (Allemang ve Brown, 1982). İki mod arasında hesaplanan yüksek MAC değeri bu iki modun birbirine benzer olduğu anlamına gelir.

Formülasyon;

Modal güvence kriteri (MAC) iki modal vektör arasındaki uyumun bir ölçümüdür ve denklem (3.57) de tanımlanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde model çelik köprüde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda Diyagonal ve Diyagonal bağlantılar sökülmüş haliyle çelik köprülerde diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisinin operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi ile elde edilmesi ve ulaşılan sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Model çelik köprü çalışmasında elde edilecek dinamik parametreler (doğal frekans, yapı periyot, sönüm ve mod şekilleri) hakkında kısa bilgilere 4.1 deki dinamik parametreler alt başlığında kısaca değinilmiştir. Çalışma süresince elde edilen dinamik parametreler her bir deney yapısı için değerlendirilmiş ve sonrasında ise diyagonal ve diyagonelsiz bağlantılar için model çelik köprüde elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Çelik köprülerde diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisinin araştırıldığı bu tez çalışmasında diyagonal ve diyagonelsiz durum için model çelik köprü modelinde değişken olarak sadece diyagonal elemanlar seçilmiştir. Deney çalışmaları süresince farklı zamanlarda ve ortam koşullarında çalışmalar tekrarlanmış ve ortam sıcaklığının çelik yapılarda önem arz ettiği bilindiği için deney aşamalarında yakın sıcaklık derecelerinde çalışmalar yapılmasına özen gösterilmiştir.

4.1. Dinamik Parametreler

Modal analiz: Titreşen bir sistemin dinamik davranışını gösteren matematik modeli oluşturmak için ihtiyaç duyulan parametrelerin (doğal frekans, titreşim biçimi, iç sönüm gibi) belirlenmesi işlemidir.

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (Operational Modal Analysis Method): 90'lı yılların başından itibaren Operasyonel Modal Analiz (OMA) İnşaat mühendisliği alanında, bina, gökdelen, köprü vb. yapılarda uygulanmaya başlanmıştır. Büyük mühendislik yapıları deprem, rüzgar, taşıt ve insan hareketleri, makine titreşimleri gibi genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinmeyen titreştiriciler tarafından tetiklenmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve elektronik imkanlar, titreşimlere maruz mühendislik yapılarının ölçümlerinde bir titreştirici kullanmak yerine yapıdaki mevcut titreşimleri dikkate alarak ölçüm yapılabilme mümkün kılmaktadır

Doğal frekans: Bir yapıya statik denge konumunda iken geçici bir hareket girdisi verilirse, yapı doğal frekans adı verilen, kendi kütle ve direngenliğine bağlı

olan belirli bir frekansla titreşmeye başlar. Yapının bu titreşimleri “serbest titreşimler” olarak adlandırılır. Her yapının serbestlik derecesi kadar doğal frekansı vardır. Buna göre, tek serbestlik dereceli olarak kabul edilen bir yapının tek bir doğal frekansı varken, çubuk gibi yayılı kütle ve sonsuz sayıda serbestliğe sahip yapıların sonsuz sayıda doğal frekansı vardır. Ancak, basit uygulamalar için bu doğal frekansların ilk birkaç tanesi önem taşır.

Sönüm: Hareket sırasında enerji kaybına neden olan malzeme özelliğidir. Sönüm, sistemin doğal frekansı üzerinde de etkilidir. Küçük sönüm değerleri için, “sönümlü doğal frekans” “doğal frekansa” eşit kabul edilebilir.

Yapı periyodu: Bir tam dalganın oluşması için geçen süreye periyot denir. Yapının bir tam titreşiminin gerçekleşmesi için oluşan süreye ise yapı periyodu denir. Frekans ile arasında $periyot = 1/frekans$ şeklinde bir bağıntı vardır. Yapı periyodu arttıkça yapının rijitliği azalmaktadır. Yapılarda bu istenmeyen bir durumdur. Yapı periyodunu azaltmak için çeşitli inşaat mühendisliği uygulamaları ve tasarımları vardır.

Titreşim biçimi (Mod şekli): Bir yapının doğal frekansında titreşirken aldığı şekildir.

Rezonans: Dinamik bir kuvvet etkisinde zorlanmış titreşimler yapan bir yapının doğal frekansı ile zorlamanın frekansının eşit olması durumudur. Bu durumda yapının titreşim genliği artma eğilimine girer. Bu genlik artışı sistemin düzgün çalışmasını engellediği gibi, onun hasara uğramasına da neden olur.

4.2. Diyagonal Bağlantılı Model çelik köprüde Deneysel Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilgili çalışmalara başlamadan önce gerekli olan sistem ekipmanlarının kurulumu, ihtiyaç olan cihazların çalışma durumları ve kalibrasyon yapılması ve sonrasında deneysel çalışmanın yapılmasını kapsamaktadır. Ölçümlerde kullanılacak ivme ölçerlerin seçimi, veri toplama ünitesi aracılığı ile ivme ölçerlerden kayıtların alınması ve hangi noktalardan ölçüm alınacağına tespiti, ivme ölçerlerden veri toplama ünitesine sinyal gelip gelmediği ve yapılan deney çalışmalarında sinyal kayıt ölçüm süresinin doğru belirlenmesi gibi hususlar Operasyonel modal analiz öncesi yapılan başlıca hazırlık aşamalarıdır.

Bu hazırlık aşamalarında cihazların, veri toplama ünitesi ve ona bağlı gps anteninden sinyal alınması, ivmeölçerlerin kablo bağlantılarının çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Deney öncesi kontrollerde sinyal alınamayan ivmeölçerler tespit edilmiş hatalı ve yanlış sinyaller veren cihazlar tespit edilmiş ara bağlantı olan kablolarında iletim düzeyleri incelenmiş ve deneye sorunsuz bir şekilde sinyal alınabilecek koşullar oluşturulduktan sonra başlanılmıştır. Bazı veri toplama ünitelerinde deney aşamasında Lan bağlantısı sorunu ve Lan bağlantı kabloları olan CAT6 kablolar elden geçirilmiş ve çalışır hale getirilmiştir. Sinyallerin alındığı veri toplama üniteleri stabil kılındıktan sonra verilerin aktarılacağı yazılım programı Testlab Network yazılımı incelenmiş olup yaşanan IP çakışma sorunları sebebiyle veri alınma ve aktarılmama problemleri ilgili firma yöneticileriyle görüşülerek çözülmüştür.

Model çelik köprüde 3 adet veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Ayrıca zeminde bulunan sismometre içinde ayrıca 1 adet veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Deneyde 3 adet Sensebox 7021 üç eksenli ve 2 adet Sensebox 7001 tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerler ve veri toplama ünitesi ile ilgili ayrıntılı bilgilere daha önce materyal ve yöntem bölümünde değinilmiştir. Modelde belirlenen düğüm noktalarına yerleştirilen İvmeölçerler model üzerinde silikon yapıştırıcı ile sabitlenerek esneme ve oynamalara karşı yerine sabitlenmiştir.

Şekil 4.1. Yapılan bu işlemlerin ardından veri toplama üniteleri çalıştırılır duruma getirilir ve GPS lerden sinyal alıp almadığına bakılır. GPS ışığı aktif hale geldiğinde sinyal gelmesi ile birlikte veri toplama üniteleri kayıta hazır hale gelmeye başlamış olmaktadır. Kayıt işlemine geçmeden önce bilgisayar ortamında Testlab Network programı üzerinde gelen sinyaller bir kez daha kontrol edilir, her kanal için tek tek kalibrasyon ayarları yapılarak yeni sinyal verileri kontrol edilerek doğruluğu teyit edilir. Son olarak kayıt süresi ve adımı belirlenir. İstenilirse kaydın başlama ve bitiş süreleri saat olarak hesaplanarak belirtilebilir. Böylece deney yapılacak ortamdan uzaklaşmak için ölçüm yapanlara ek bir süre tanınmış olur. Kayıt süresi tamamlandıktan sonrası bilgisayar ortamında kayıt öncesi seçime göre excel dosyası veya txt dosyası şeklinde kayıt edilmiş olur. Kaydedilen bu veriler Artemis Modal Pro programında işlenerek dinamik parametreler elde edilir. İşlenecek veriler bir kez de Artemis Modal Pro programında gözden geçirilir. İvme zaman grafiklerinde beyaz gürültü (White noise) tespit edilirse ölçümler tekrarlanmalıdır. Dinamik

parametrelerin tespiti içinse tek bir ölçümden yararlanılmasında ziyade birçok kez ölçüm yapılarak benzer sonuçlar elde edildiğinde gerçek sonuca ulaşıldığı varsayılmalıdır.

4.3. Diyagonalı Durum İçin Model çelik köprüde OMA İle Elde Edilen Frekans, Sönüm Oranları Ve Mod Şekilleri

İvmeölçerlerden ve sismometreden alınan veriler Testlab Network yazılımına aktarılmaktadır. Veriler ekranda izlenilerek herhangi bir sorun yok ise kayıt işlemine geçilir. Kayıt işleminde ölçüm adımı ve ölçüm süresi belirlenmektedir. Ölçüm adımı olarak literatürdeki yapılmış çalışmalar referans alınarak 200 Hz seçilmiştir. Adım sayısı bu orandan fazla seçildiğinde örnekleme sayısı artmaktadır buda satır sayısını ve kayıt verisi boyutunu artırarak veri işlenmesini çok daha zor hale sokmaktadır. Ölçüm süresinin hesaplanmasında Prof. Dr. Carlos Ventura'nın "Operasyonel Modal Analize Giriş" kitabından yararlanılmıştır. Ölçüm süresi tablosu 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Ölçüm öncesi İvmeölçerlerden veri alınması takibi

Tablo 4.1. Minimum ölçüm süresi (Ventura 2015)

Damping (%)	Relative time series length $T_{tot} f_{min} = 10/\xi S_n$
0.2	5000
0.5	2000
1	1000
2	500
5	200

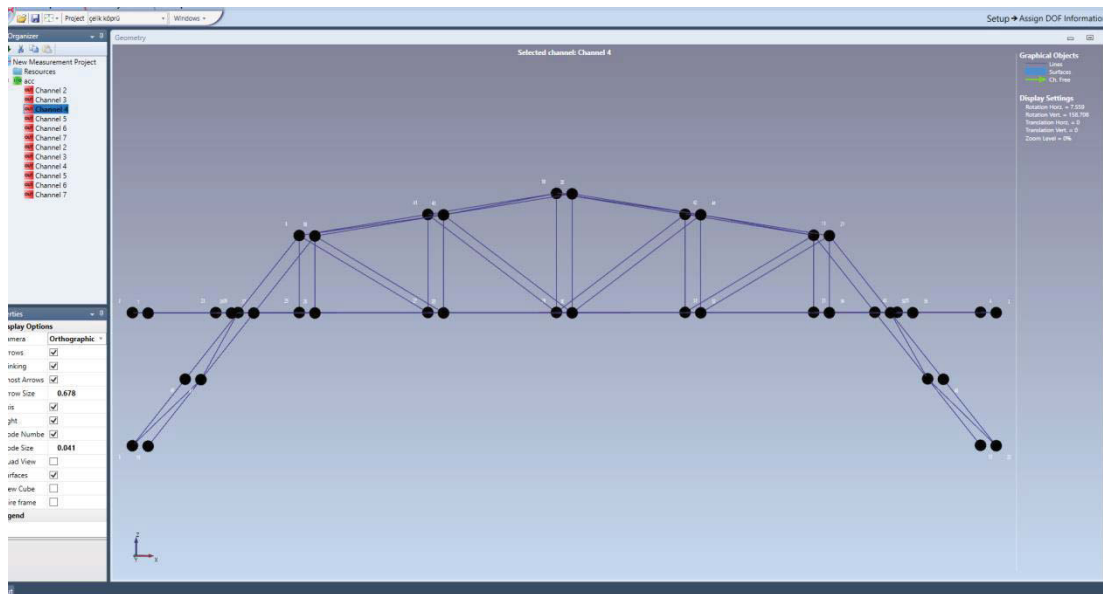
$$T_{ölçüm} = 10/\xi \quad (4.1)$$

Minimum ölçüm süresi için gerekli güncel tablo ve formül (4.1) verilmiştir. Verilen bu verilere göre minimum ölçüm süresi;

Minimum ölçüm süresi = $10/0.02= 500$ saniye olarak bulunmuştur. Çelik yapılar için sönüm oranı 0.02 alınmıştır. Bu çalışmada ise ölçüm süresi 600 saniye alınarak daha emniyetli bir ölçüm alınabilmesi hedeflenmiştir.

İvmeölçer yerleşim planında ivmeölçerlerin doğrultuları verilmiştir. Bu doğrultularda ve ölçüm süresinde elde edilen veriler belirlenen düğüm noktalarında ve her kanalda ayrı olarak şekillerde sunulmuştur. Yerdeğiştirmenin max olduğu üst noktada bir adet referans ivmeölçer konulmuştur. Ölçümler yapılırken beyaz gürültü oluşmamasına dikkat edilmiş ve ölçüm esnasında ölçüm yapılan alanda hiçbir olumsuz etkenin olmamasına dikkat edilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce alanı terk etme süresi belirlenerek ölçüme başlanma komutu verilip ölçüm esnasında model çelik köprünün yanında bulunulmaması ve gürültü oluşturulmaması sağlanmıştır. Deney düzeneği şekillerde de görüldüğü gibi laboratuvar ortamındadır. Bu durum sayesinde daha ideal bir ölçüm sağlanması çabalanmıştır. Sadece ölçüm esnasında değil ölçüm sonrası elde edilen verilerde gözden geçirilerek herhangi bir olumsuz durumda ölçümler yeniden tekrarlanarak güvenilir veriler elde edilmiştir. Veriler Artemis Modal Pro programında işlenmiştir.

Artemis Modal Pro paket programında model çelik köprü deney yapısının modellenmiş şekil 4.2 'de, ivmeölçerlerin yerleşim bilgisi şekil 4.3, şekil4.4, şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Artemis Modal Pro paket programında model çelik köprü modelleme



Şekil 4.3. Diyagonalı durum için İvmeölçerlerin Yerleştirilmesi

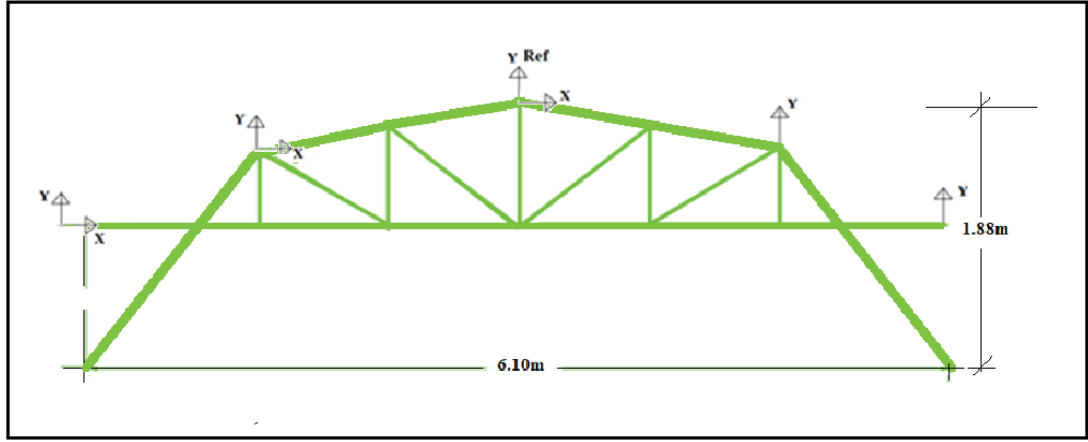


Şekil 4.4. Diyagonalı durum için ivmeölçerler ve sismometre Veri Alınması İşlemi

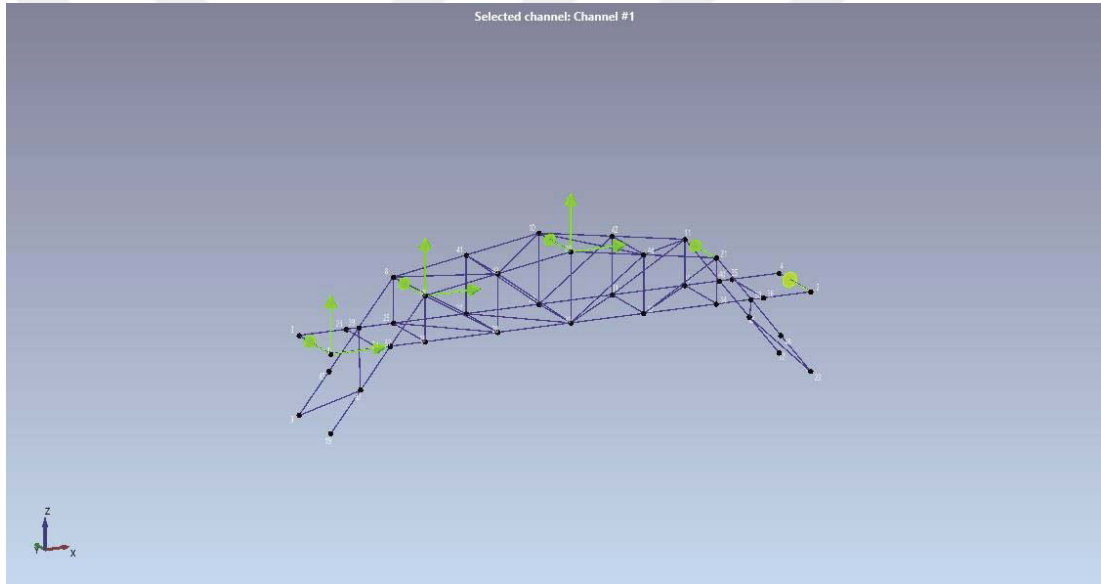
4.3.1. Deneysel Yöntem Deneyleri (OMA)

Model çelik köprünün alt ve üst başlıklarına 3'ü üç eksenli diğer 2'si tek eksenli olmak üzere 5 adet ivmeölçer gereken düğümlere sabitlenerek yerleştirilmiştir. İvmeölçerler yerleştirilirken su terazisi kullanılarak düğüm noktalarına milimetrik olarak doğrultularının yerleştirilmesi sağlanmıştır. Yerleştirilen ivmeölçerler silikon yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. İvmeölçerlerin

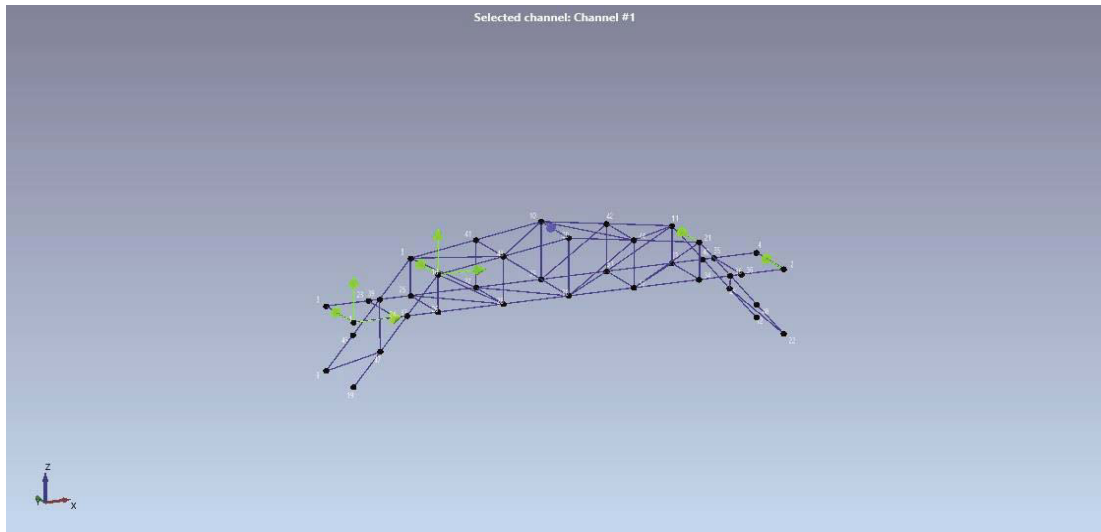
yerleşim planı ve referans ivmeölçer şekillerde açıkça görülmektedir. Şekil 4.5,Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de ivmeölçerler yerleşim planları



Şekil 4.5. İvmeölçer yerleşim planı-ARTEMİS

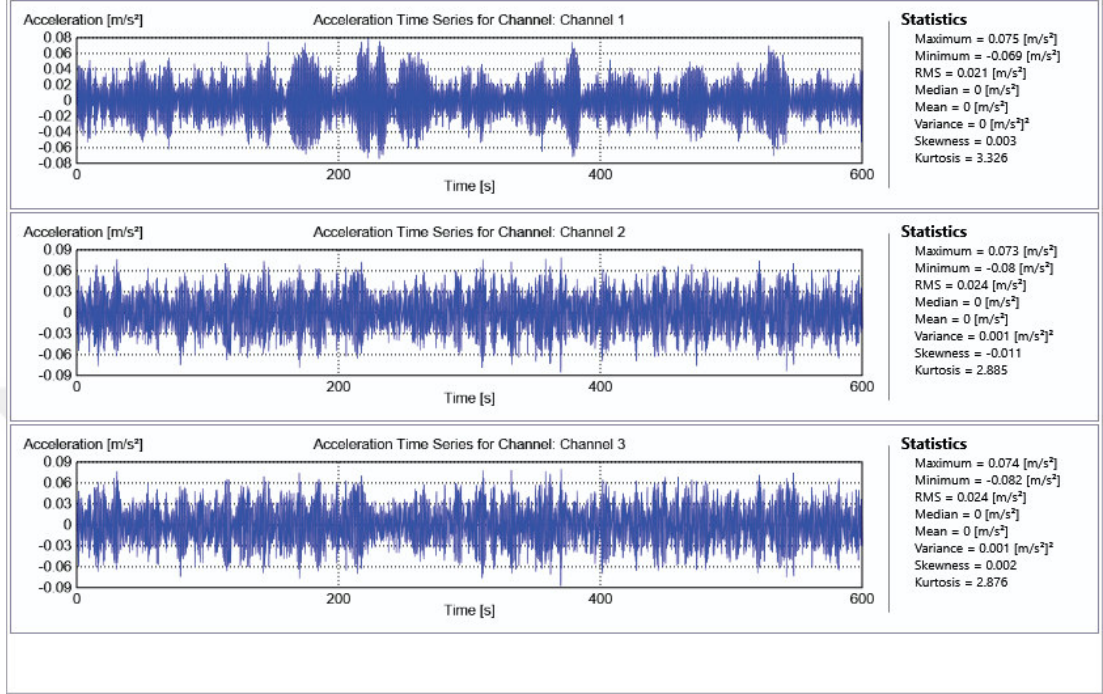


Şekil 4.6. Artemis yazılımında ivmeölçerlerin yerleşim planı

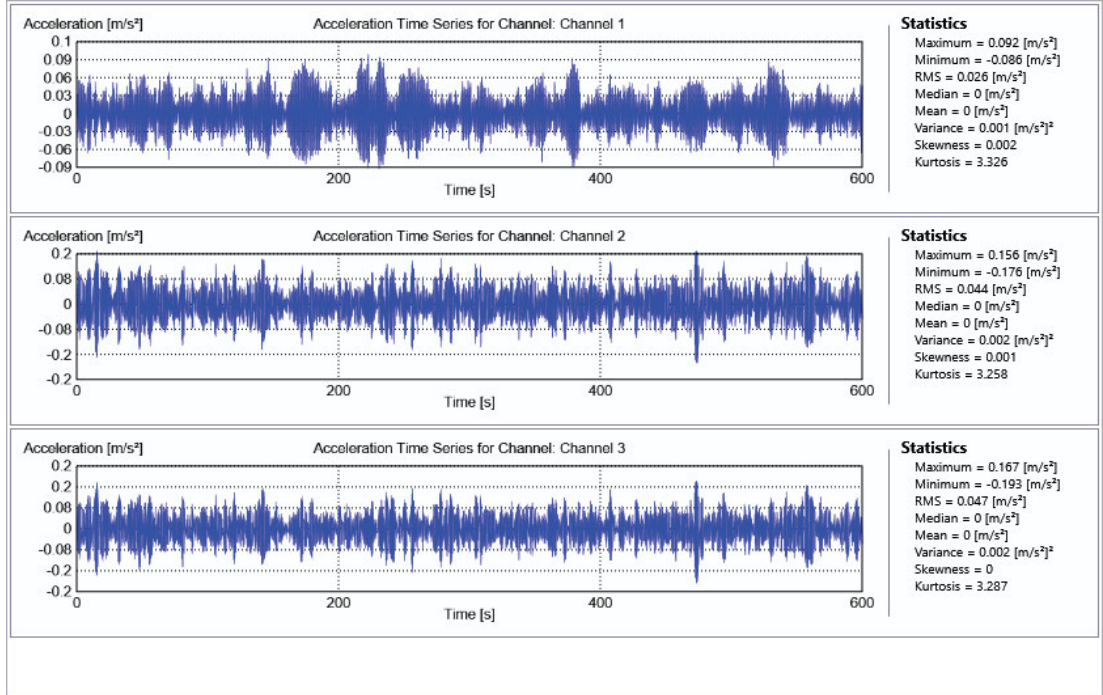


Şekil 4.7. Referans İvmeölçerin Belirlenmesi

Model çelik köprüde alt ve üst başlıklardan alınan ivme değerleri Şekil 4.8, 4.9'da verilmiştir.

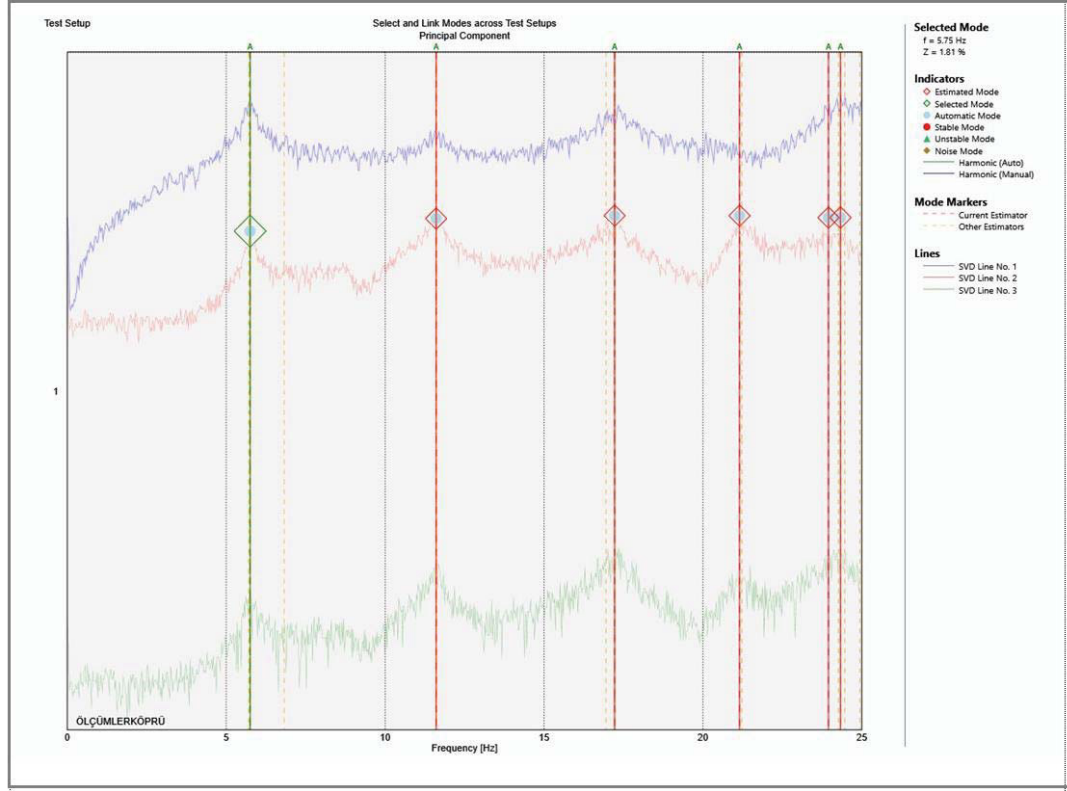


Şekil 4.8. Üst başlıktan elde edilen ivme değerleri



Şekil 4.9 . Alt başlıktan elde edilen ivme değerleri

Veri toplam cihazında toplanan titreşim verileri ARTEMIS Modal Pro yazılımına aktarılmıştır. Burada yazılım bünyesinde bulunan zaman tanım alanında bir yöntem SSI-PC yöntemi kullanılmış ve ilk 5 mod dikkate alınmıştır. Detrend ve filtering işlemlerinden sonra verilerin toplanmasında ve işlenmesinde filtreleme olarak lowpass seçilmiştir. Kullanılan yönteme ait Spektral yoğunluk grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

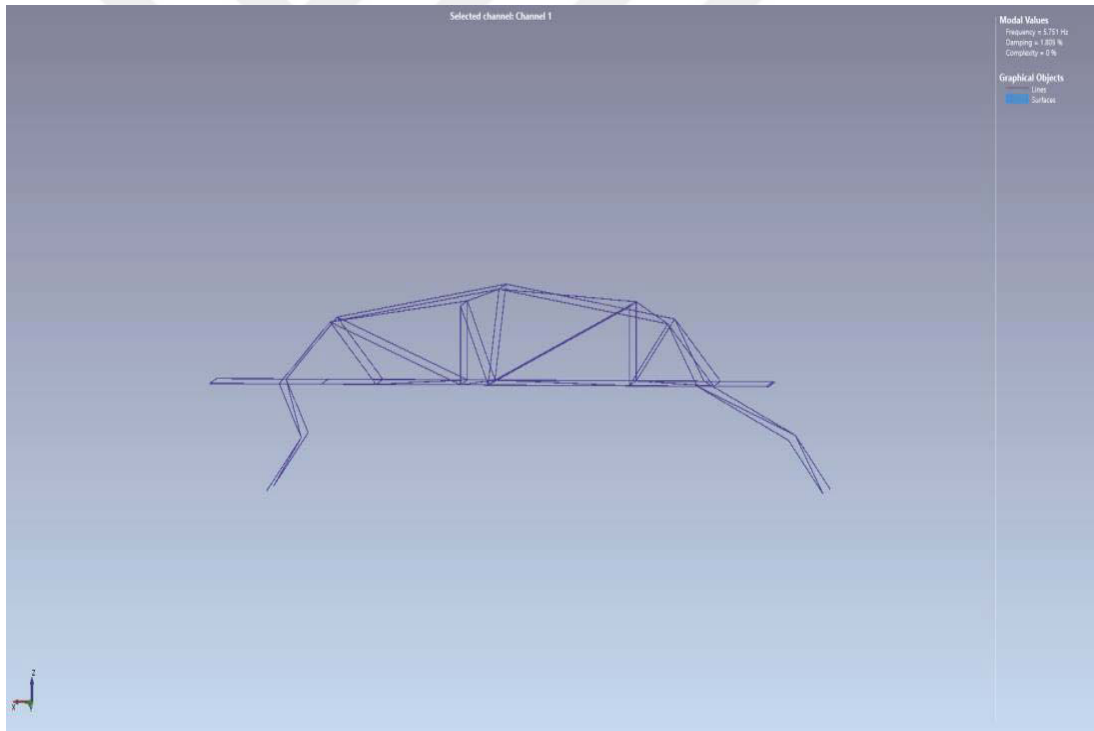


Şekil 4.10. SSI-PC Spektral Yoğunluk Grafiği

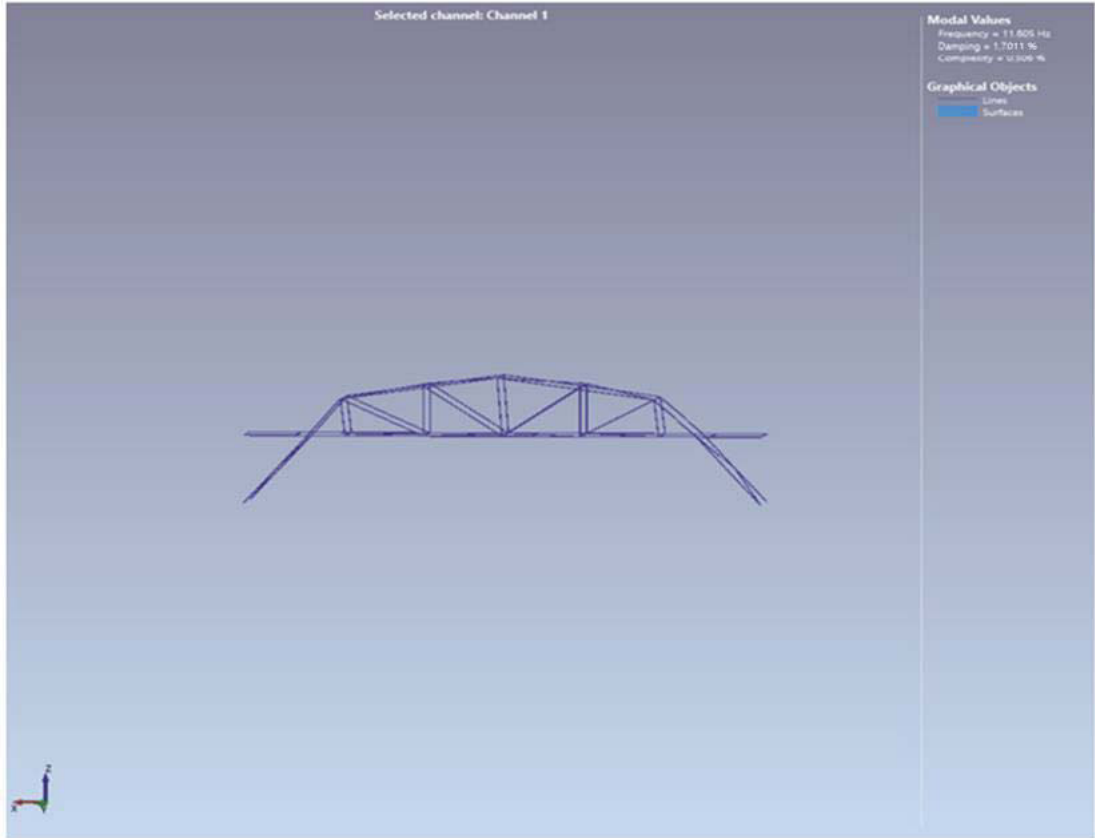
Artemis paket programı aracılığıyla elde edilen ilk 5 moddaki frekans ve periyot değerleri Tablo 4.2 de verilmiştir. Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'de ilk 5 mod şekilleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2 OMA SSI-PC ile elde edilen veriler

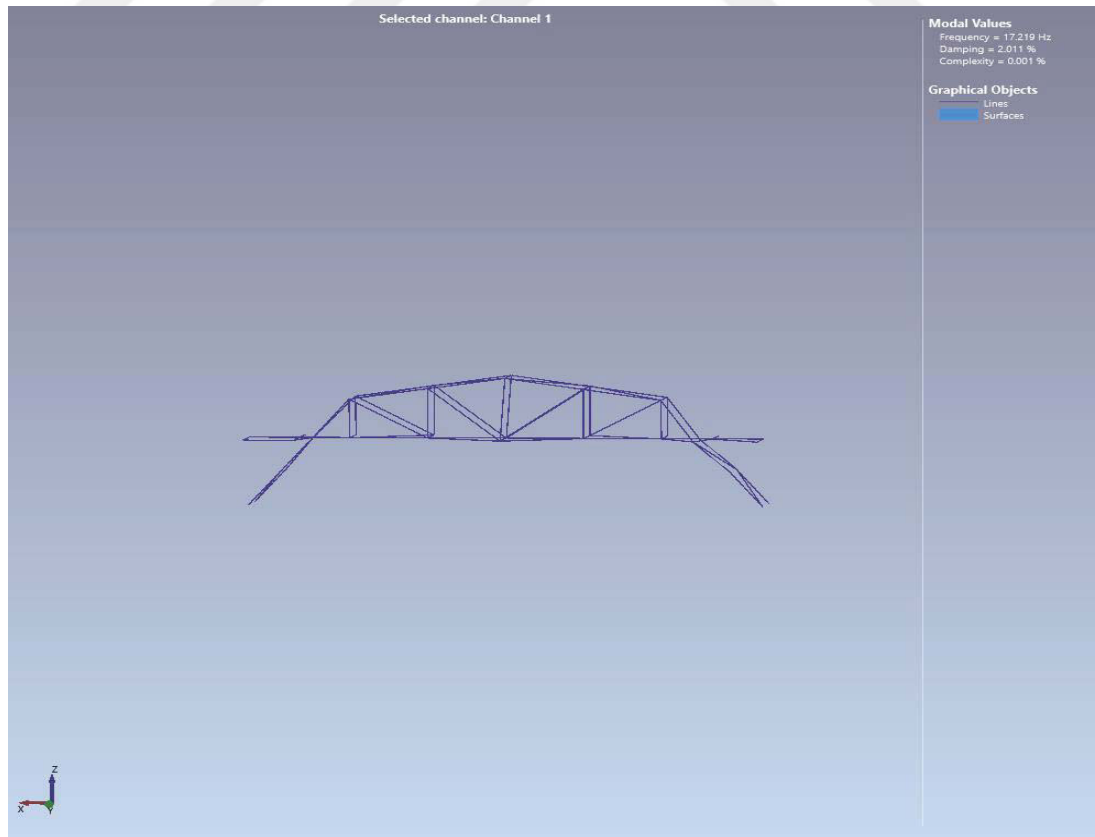
MOD	Frekans [Hz]	Sönüm [ζ]	Periyot [s]
1	5.751	0.0180	0,174
2	11.605	0.0170	0.086
3	17.219	0.0201	0.058
4	21.151	0.0258	0.047
5	23.949	0.0172	0.042



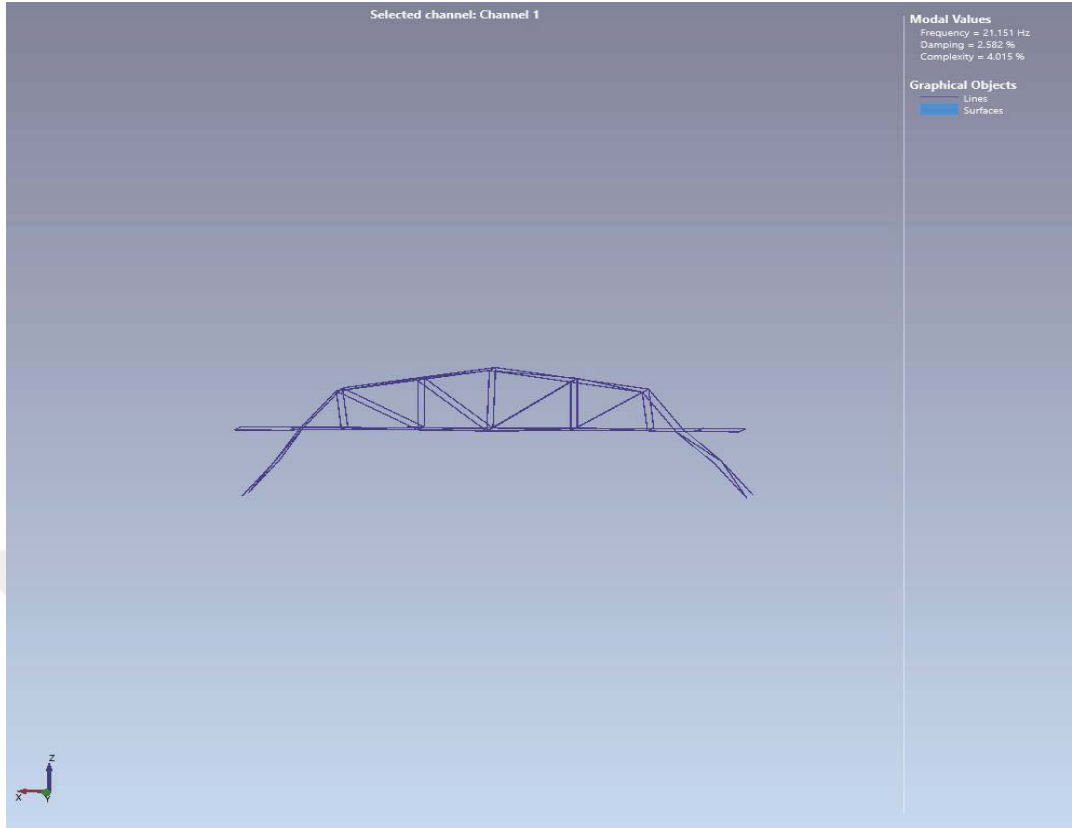
Şekil 4.11. SSI-PC 1.Mod ($f=5.751$ Hz, $T=0.173$ s , $\zeta=0.0180$)



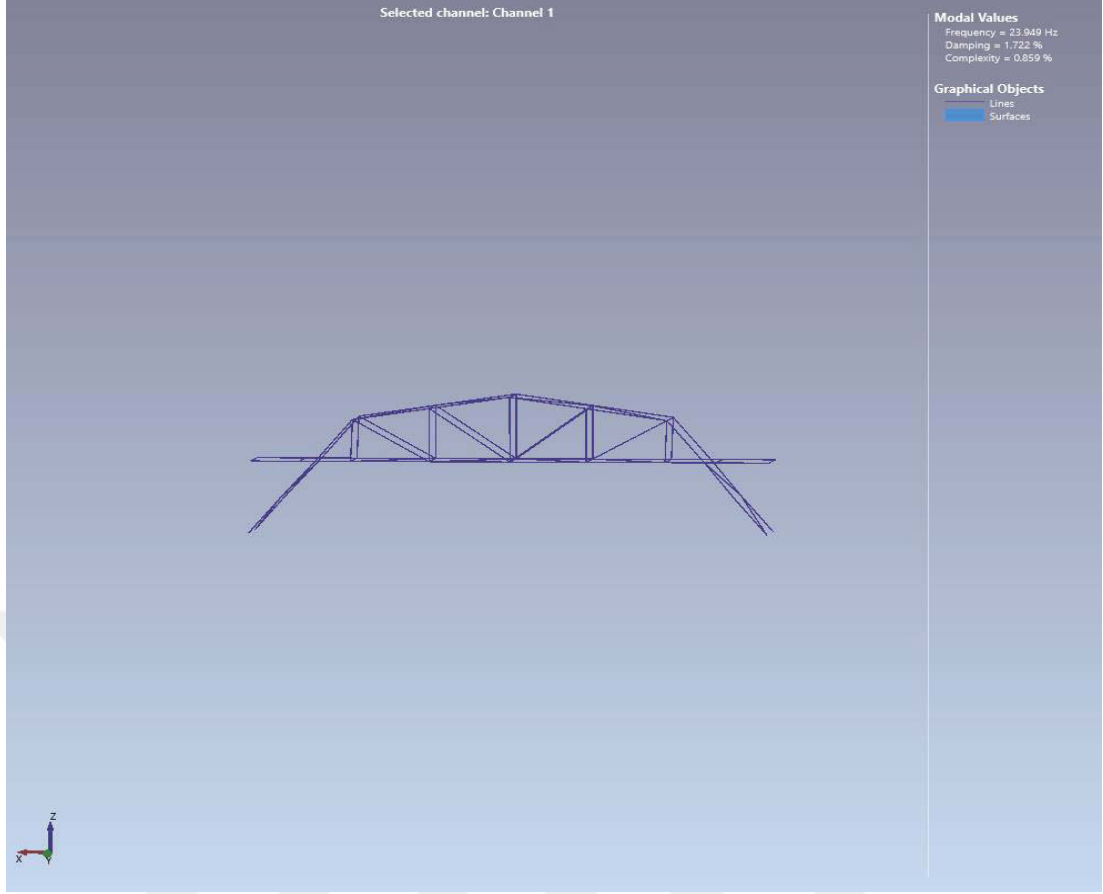
Şekil 4.12. SSI-PC 2.Mod ($f=11.605$ Hz, $T=0.086$ s, $\zeta=0.0170$)



Şekil. 4.13 SSI-PC 3.Mod ($f=17.219$ Hz, $T=0.058$ s, $\zeta=0.0201$)



Şekil 4.14 SSI-PC 4.Mod ($f=21.151$ Hz, $T=0.047$ s, $\zeta=0.0258$)



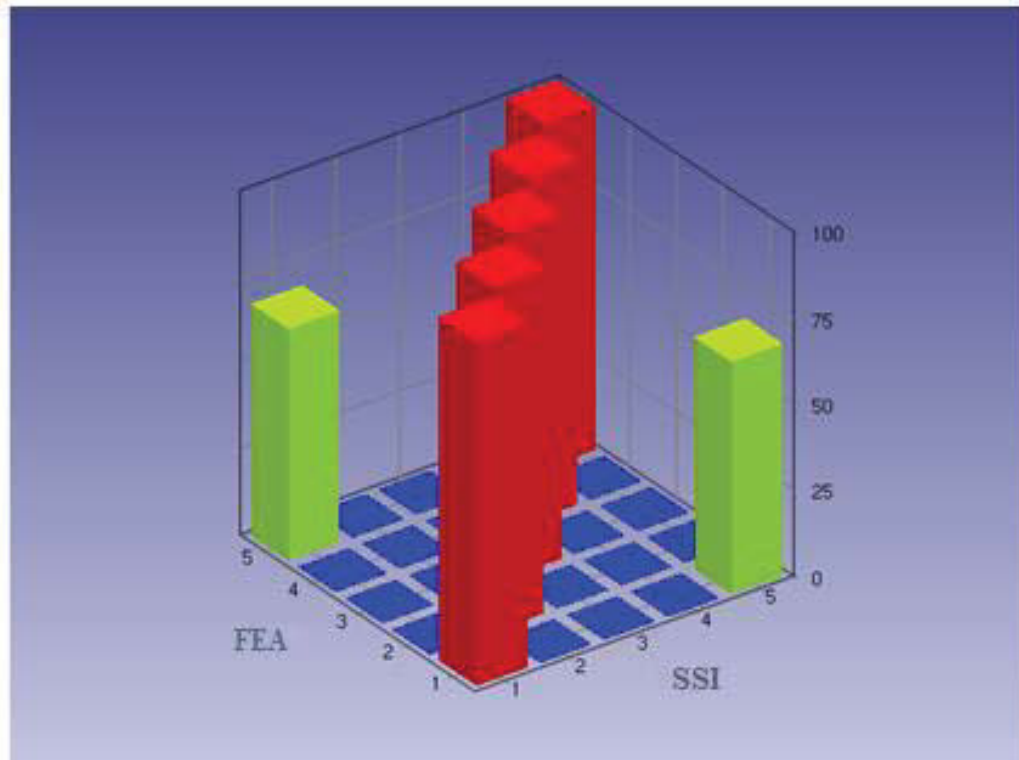
Şekil 4.15. SSI-PC 5.Mod ($f=23.949$ Hz, $T=0.042$ s, $\zeta=0.0172$)

4.4. Diyagonalı Model çelik köprüde (Modal Assurance Criterion , (MAC) Modal Güvence Kriteri Göre Değerlendirilmesi

Analitik ve deneysel olarak elde edilen modal parametrelerin Femtools yazılımı ile MAC matrisi bulunarak modal güvence kriterine bakılmasıdır. MAC da esas olan deneysel elde edilen verilerin geçerliliğinin yalnızca analitik frekans değerleriyle kıyaslanmaması, analitik ve deneysel mod şekillerinin eşleşmesini ve aralarındaki korelasyonu göstermektir. Materyal ve Yöntem bölümünde MAC matrisi hakkında daha önce değinildiği gibi MAC matrisindeki köşegen dışı elemanlar modlar arasındaki lineer bağımsızlığın kontrolü anlamına gelir. 1'e eşit değerdeki iki mod şekli aynı modları (veya tam korelasyonu) gösterir. Analitik yoldan elde edilen mod şekilleri ile deneysel yoldan elde edilen mod şekillerinin birbiriyle uyumlu olup olmadığı modal güvence kriteri (modal assurance criteria - MAC) ile belirlenebilmektedir; MAC değeri 0 ve 1 arasında değişen değerler alabilmektedir. İki mod arasında hesaplanan MAC değeri bu iki modun birbirine benzer olduğu anlamına gelir. MAC değeri 0'a yaklaştıkça elde edilen verilerin

güvenilirliğinden ve doğruluğundan şüphe edilmelidir. MAC değeri 1'e yakın değilse sonlu elemanlar modeli tekrar kontrol edilmeli, sonlu elemanlar modelinde bir sorun yok ise deneysel ölçümler ve verilerin işlenmesi MAC değeri 1 veya 1'e yaklaşıncaya kadar tekrar edilmesi gerekmektedir.

MAC matrisi Şekil 4.16'da verilmiştir Deneysel ve sonlu elemanlar mod şekilleri arasındaki hesaplanmış korelasyon MAC matrisi grafiksel olarak şekil 4.16 da verilmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar mod şekillerinin eşleştirilmesi ve MAC matrisinin elde edilmesinde (Femtools, 2008) programından yararlanılmıştır. Diyagonal elemanlı model çelik köprü'ye ait MAC köşegen matrisi şekil 4.16'da verilmiştir.



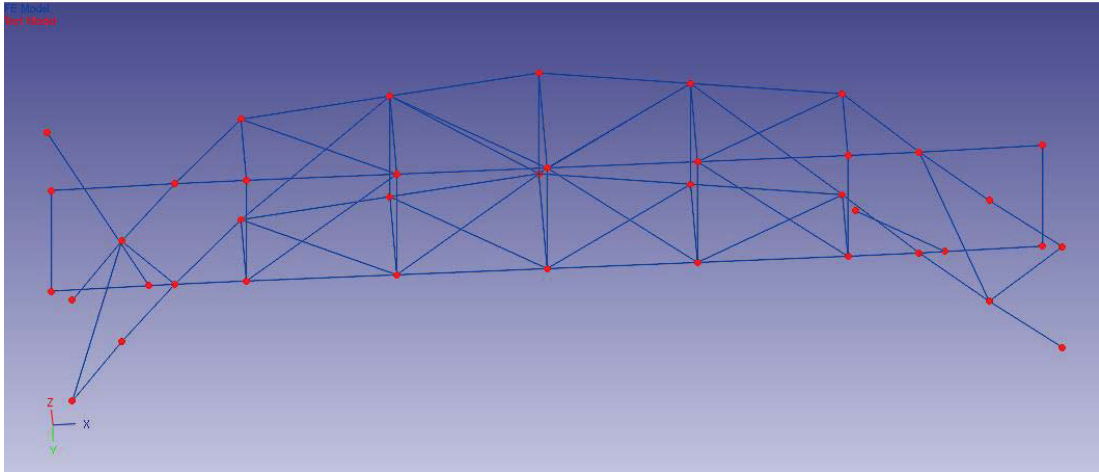
Şekil 4.16. Deneysel (SSI-OMA) ve Analitik (FEA) modlar arasındaki hesaplanmış MAC matrisi

MAC matrisinin sayısal veriler şeklinde gösterilmesi ;

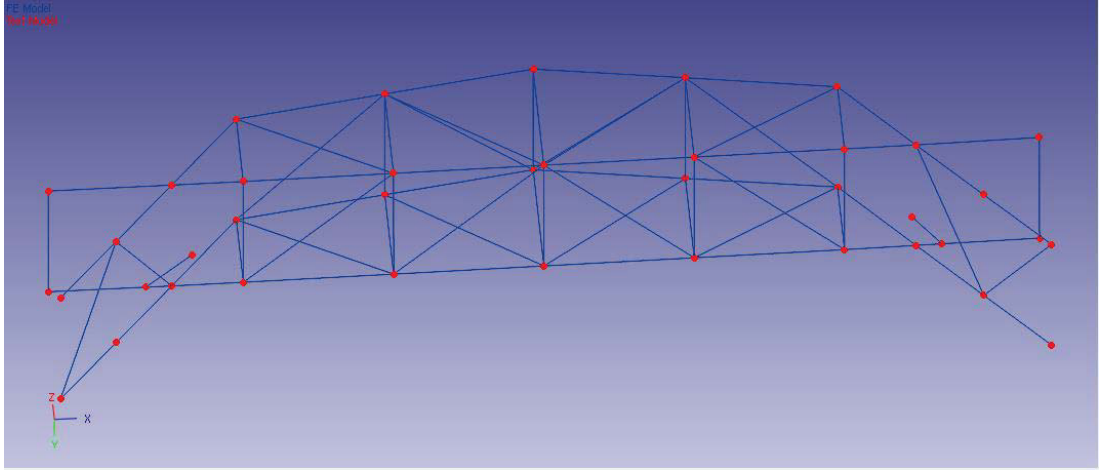
MAC matrisi ;

$$\begin{bmatrix} 100 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 67.2 \\ 0.0 & 100 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 100 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 100 & 0.0 \\ 67.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 100 \end{bmatrix} \text{ Şeklindedir.}$$

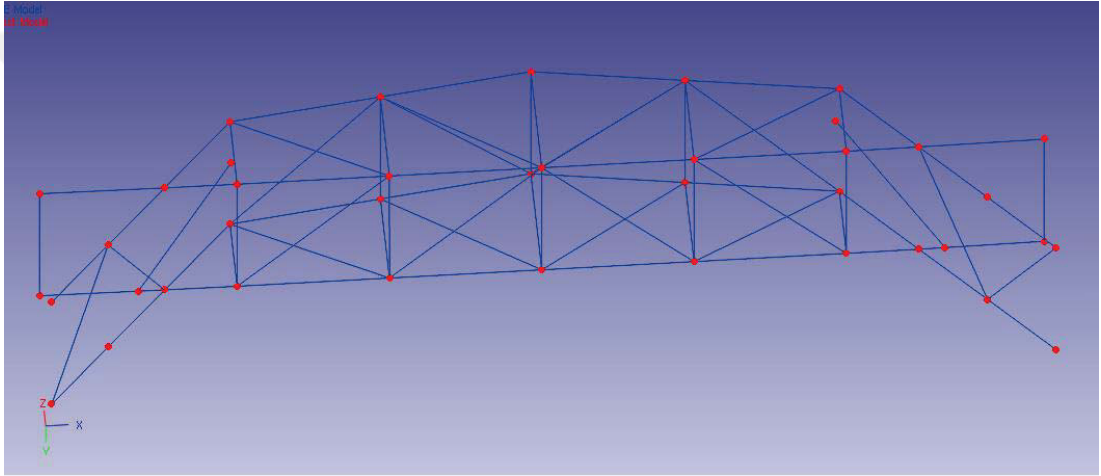
Şekiller incelendiğinde deneysel mod şekilleri ile sonlu elemanlar mod şekillerinin 1'e 1 çakıştığı şekil 4.16' da ve MAC matrisinde köşegenlerin 1 olması dolayısıyla açıkça görülmektedir. MAC matrisinin bu şekilde oluşmasında alınan ölçümlerin laboratuvar ortamında olmasının ve model çelik köprü deney yapısının projesine uygun olarak yapılmış olmasının ve tekrar tekrar kontrol edilmesinin etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak Diagonal elemanlarla bağlı model çelik köprüde operasyonel modal analizinin güvenilir bir biçimde gerçekleştirildiği ve sonuçların geçerliliğinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca ilk 5 moda ait deneysel ve sonlu elemanlar mod şekillerinin eşleştirilmesi frekans, periyot ve sönüm oranları ile birlikte şekil 4.17, 4.18, 4.19, 4.20,4.21'de açık bir şekilde görülmektedir.



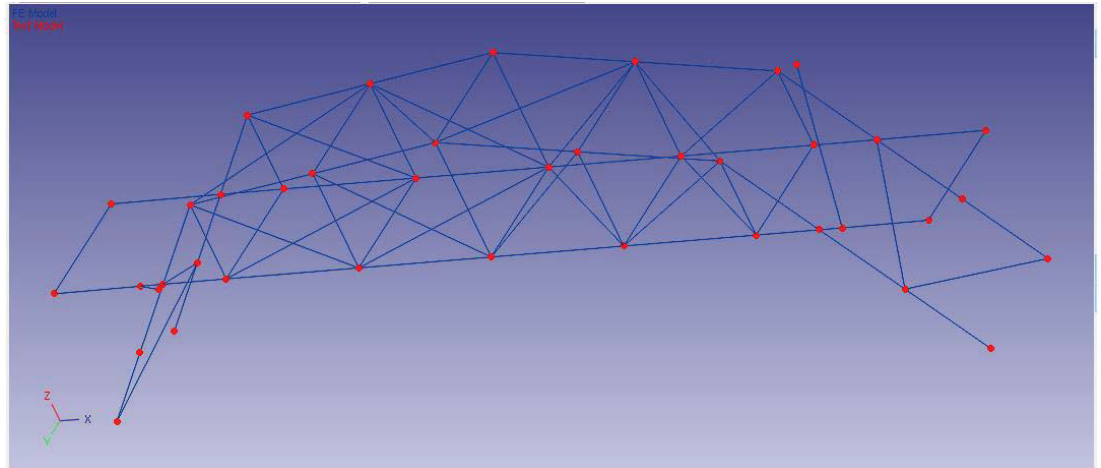
Şekil 4.17. FEA 1.Mod ($f=5.743$ Hz, $T=0.1740$ s) - SSI-PC 1.Mod ($f=5.751$ Hz, $T=0.1738$ s, $\zeta =0.0180$)



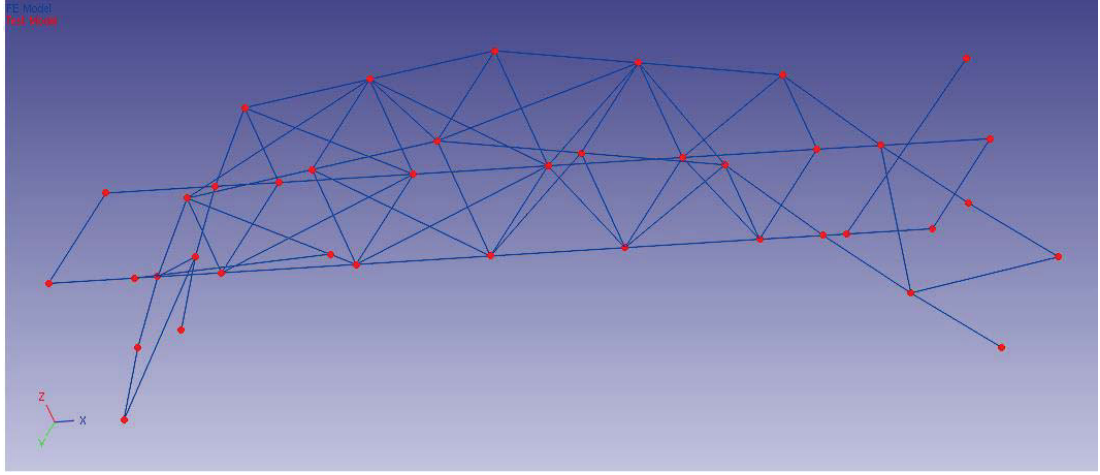
Şekil 4.18. FEA 2.Mod ($f=11.539$ Hz, $T=0.0866$ s) - SSI-PC 2.Mod ($f=11.605$ Hz, $T=0.0861$ s, $\zeta =0.0170$)



Şekil 4.19. FEA 3.Mod ($f=17.180$ Hz, $T= 0.0582$ s) - SSI-PC 3.Mod ($f=17,219$ Hz, $T=0.0581$ s, $\zeta =0.0201$)



Şekil 4.20. FEA 4.Mod ($f= 21.097$ Hz, $T= 0.0473$ s) - SSI-PC 4.Mod ($f=21.151$ Hz, $T=0.0472$ s, $\zeta =0.0258$)



Şekil 4.21. FEA 5.Mod ($f=25.799$ Hz, $T= 0,0387$ s) – SSI-PC 5.Mod ($f=23.949$ Hz, $T=0.0417$ s, $\zeta =0.0172$)

Analitik ve Operasyonel modal analiz sonuçları birbiri ile uyumludur. Tüm sonuçlar ile beraber laboratuvar ortamında bulunan model çelik köprünün deney yapısının projesine uygun olduğu ve yapılan analizler sonucunda istenilen performansta olduğu görülmektedir.

4.5 Diyagonal Bağlantılar Sökülmüş Model çelik köprüde Deneysel Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Model çelik köprü yapısında alt ve üst köprü elemanları arasında stabiliteyi sağlayan 8 adet diyagonal bağlantı elemanlarının sökülmesi işlemiyle deneye başlanılmıştır. Şekil 4.22 ve 4.23 'de diyagonal elemanların sökülmesi verilmiştir. Diyagonal elemanların sökülmesi sonrasında model köprü diğer bağlantı elemanları tork anahtarı ile kontrol edilerek köprüde bulonlarda bir gevşeme olup olmadığının kontrolü sağlanmıştır.

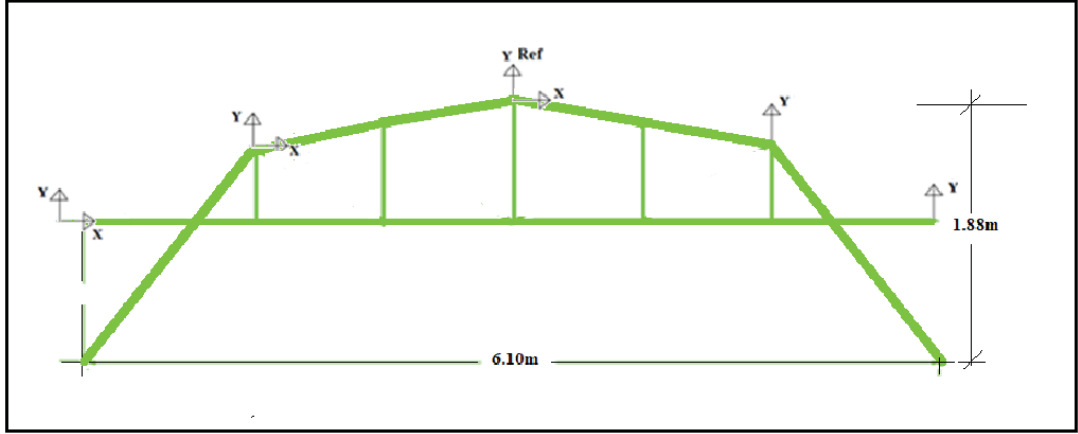
Model çelik köprünün alt ve üst başlıklarına 3'ü üç eksenli diğeri 2'si tek eksenli olmak üzere 5 adet ivmeölçer gereken düğümlere sabitlenerek yerleştirilmiştir. İvmeölçerler yerleştirilirken su terazisi kullanılarak düğüm noktalarına milimetrik olarak doğrultularının yerleştirilmesi sağlanmıştır. Böylelikle oluşabilecek hataların minimize edilmesi sağlanmıştır. Yerleştirilen ivmeölçerler silikon yapıştırıcı ile sabitlenmiştir. İvmeölçerlerin yerleşim planı ve referans ivmeölçer şekillerde açıkça görülmektedir. Şekil 4.24 Şekil 4.25-26'da İvmeölçerler yerleştirilmiş ve deneysel analiz için (OMA) hazırlıkları yapılmış çelik köprü modeli sunulmuştur.



Şekil 4.22. Model çelik köprüde diyagonallerin sökölme işlemleri



Şekil 4.23. Model çelik köprüde diyagonal sökülmiş hali



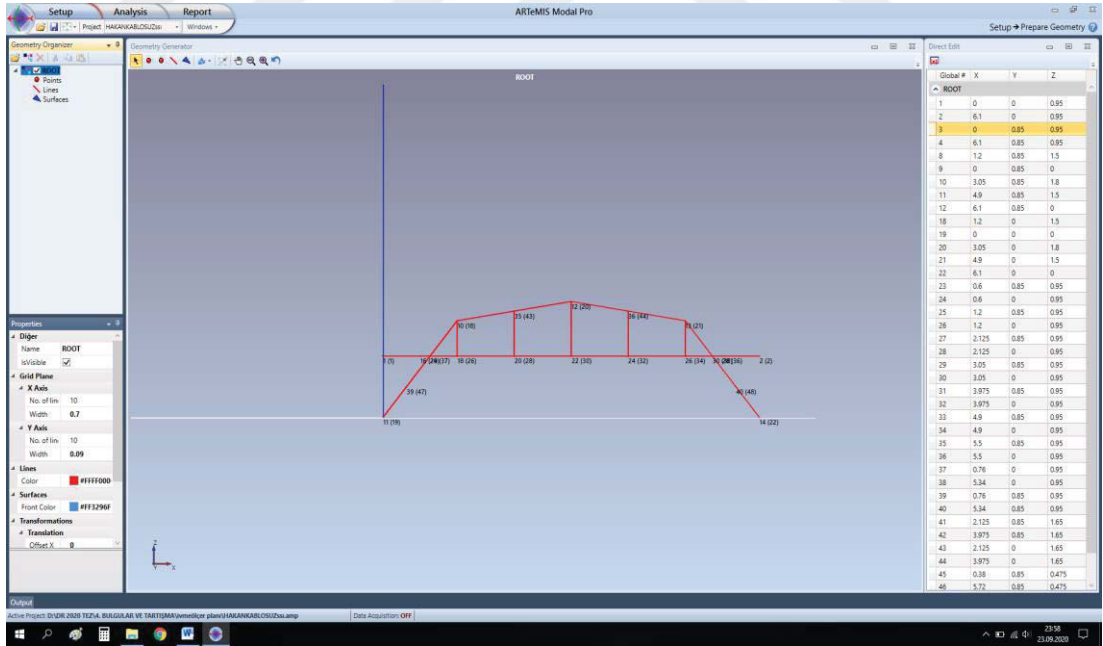
Şekil 4.24 Diyagonalsız durum için ivmeölçer yerleşim planı



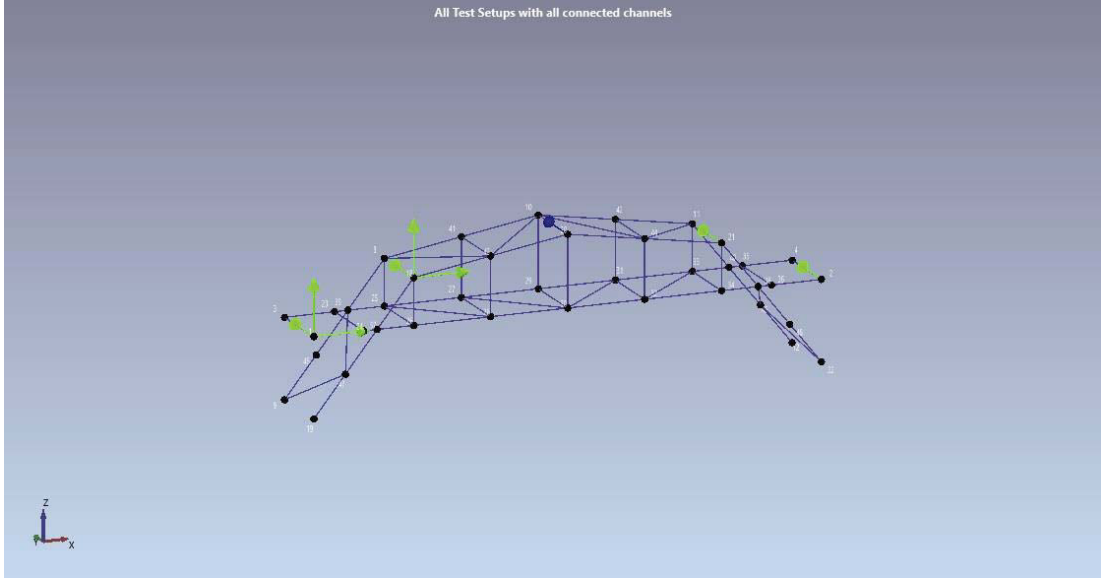
Şekil 4.25. Üç eksenli ivmeölçerin düğüm noktasına yerleştirilmesi



Şekil 4.26 Tek eksenli ivmeölçerin düğüm noktasına yerleştirilmesi



Şekil 4.27 Diyagonalsız durum için model çelik köprü deney yapısının Artemis modeli

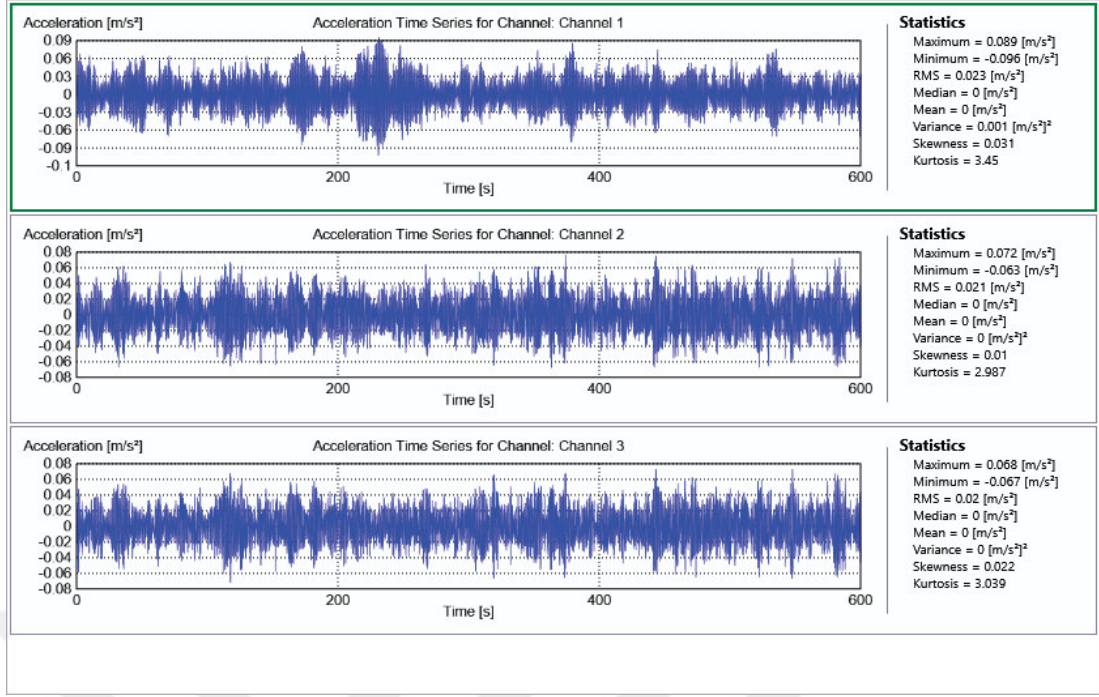


Şekil 4.28 Diyagonalsız durum için referans ivmeölçerin belirlenmesi

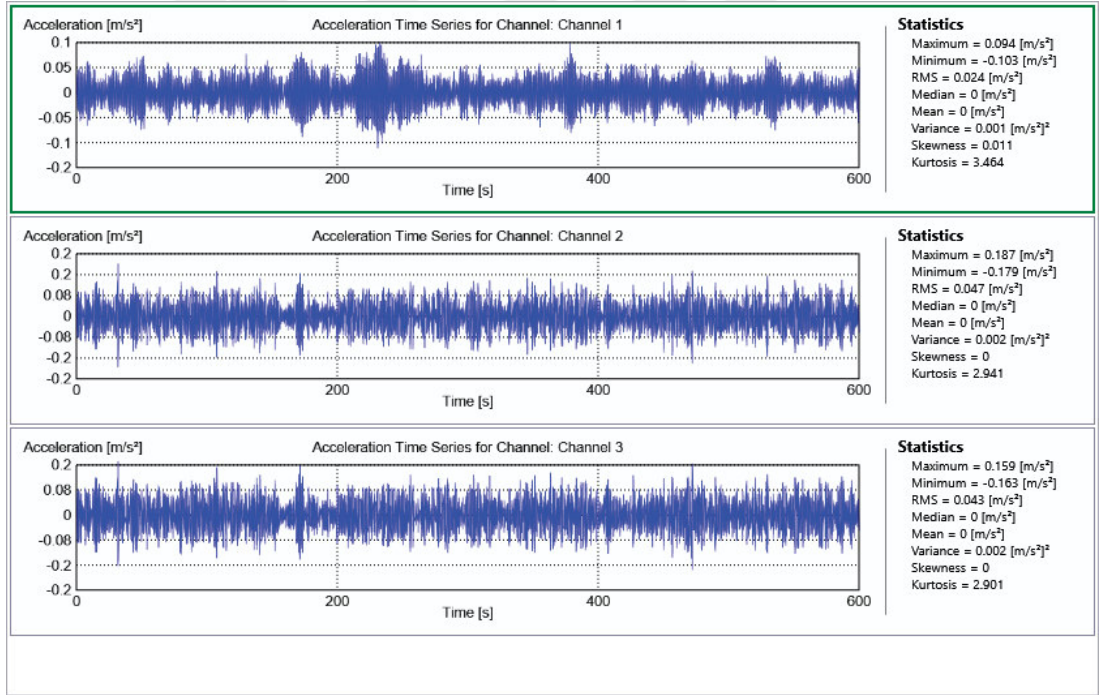
Model çelik köprüde ölçüm süresi ve ölçüm adımı belirlenirken diyagonal elemanlar ile güçlendirilmiş durumdaki ölçüm süresi ve ölçüm adımı aynı şekilde olmak üzere ölçüm süresi 600 saniye ve ölçüm adımı 200 Hz kabul edilmiştir.

İvmeölçer yerleşim planında ivmeölçerlerin doğrultuları verilmiştir. Bu doğrultularda ve ölçüm süresinde elde edilen veriler alt ve üst başlıklarda ayrı olarak şekillerde sunulmuştur. Ölçümler yapılırken beyaz gürültü oluşmamasına dikkat edilmiş ve ölçüm esnasında ölçüm yapılan alanda hiçbir olumsuz etkenin olmamasına dikkat edilmiştir. Ölçüm başlamadan önce alanı terk etme süresi belirlenerek ölçüme başlanma komutu verilip ölçüm esnasında deney düzeneğinin etrafında bulunulmaması ve gürültü oluşturulmaması sağlanmıştır. Deney düzeneği şekillerde de görüldüğü gibi laboratuvar ortamındadır. Bu durum sayesinde daha ideal bir ölçüm sağlanması amaçlanmıştır. Sadece ölçüm esnasında değil ölçüm sonrası elde edilen verilerde gözden geçirilerek herhangi bir olumsuz durumda ölçümler yeniden tekrarlanarak güvenilir veriler elde edilmiştir. Veriler Artemis Modal Pro programında işlenmiştir.

Artemis Modal Pro paket programında diyagonal bağlantı elemanlar sökülmüş model çelik köprü deney yapısının modellenmiş şekli şekil 4.27 'de, ivmeölçerlerin yerleşim bilgisi şekil 4.28'de verilmiştir. Model çelik köprü Alt ve üst başlıklardan elde edilen ivme değerleri Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.29 Üst başlıktan elde edilen ivme değerleri

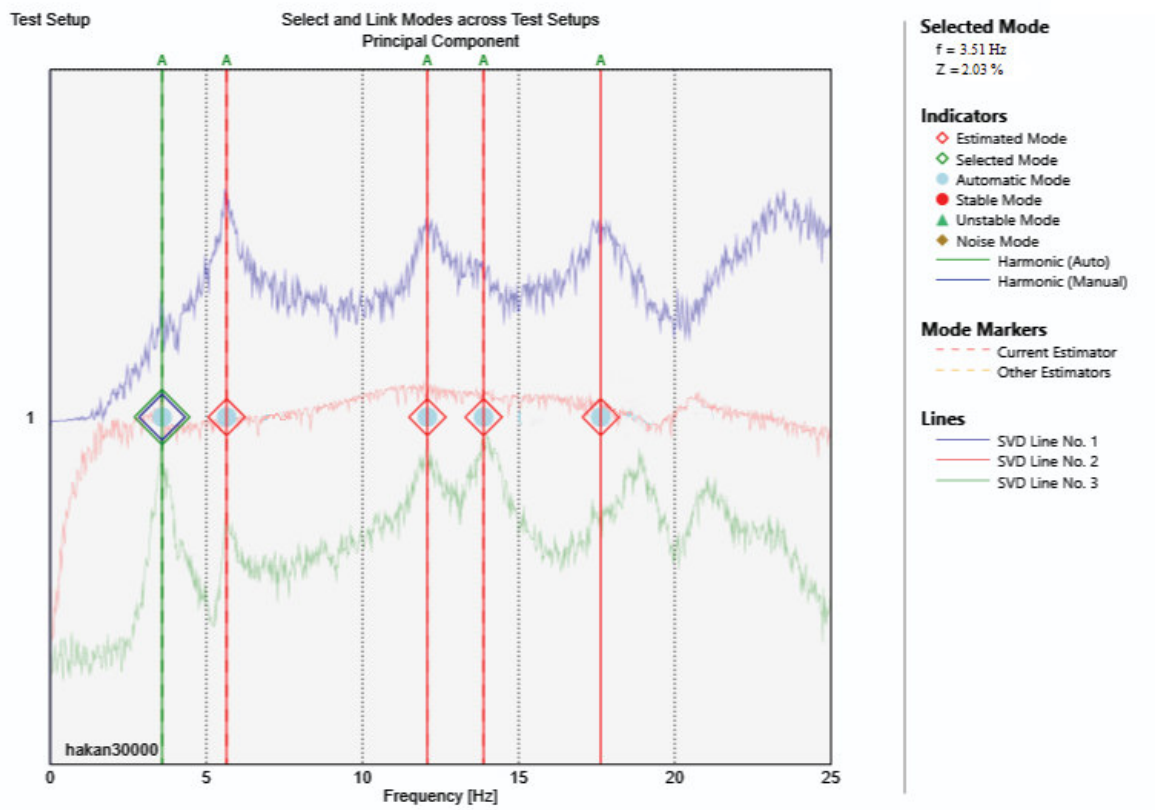


Şekil 4.30 Alt başlıktan elde edilen ivme değerleri

4.6. Model çelik köprüde Diyagonal Elemanlar Sökülmüş Hali İçin Deneysel Metodla Elde Edilen Analiz Sonuçları

Veriler Artemis Modal Pro paket programında işlenmiştir. Parametrelerin elde edilmesinde zaman tanım alanında bir yöntem olan SSI-PC yöntemi kullanılmıştır. Parametrelerde ilk 5 mod dikkate alınmıştır. Veri işlenmesinde Artemis Modal Pro default ayarları kullanılmıştır. Detrend ve filtering işlemi yapılmıştır. Verilerin toplanmasında ve işlenmesinde filtreleme olarak lowpass seçilmiştir.

Spektral yoğunluk grafiği şekil 4.31’de verilmiştir.

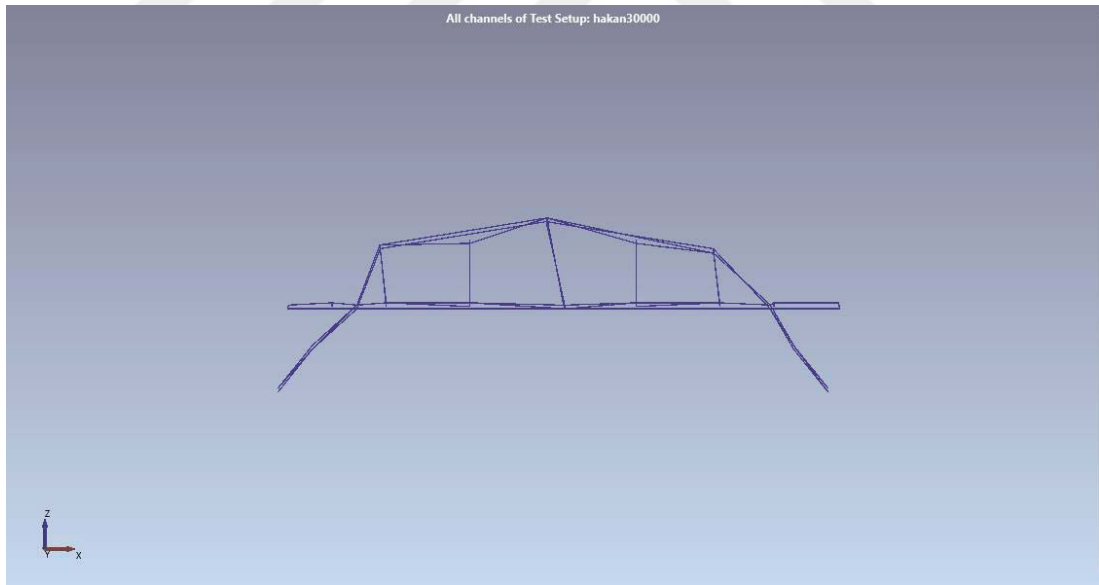


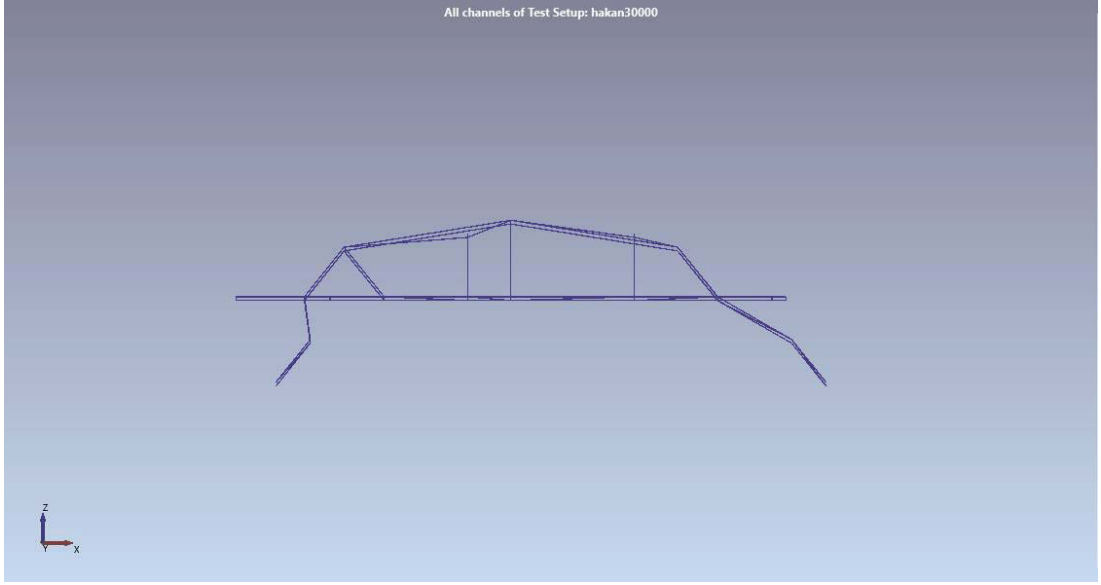
Şekil 4.31. SSI-PC Spektral Yoğunluk Grafiği

Artemis Modal Pro paket programı aracılığıyla elde edilen ilk 5 moddaki frekans,periyot ve sönüm değerleri Tablo 4.3 de verilmiştir. Şekil 4.32,4.33,4.34,4.35,4.36’da elde edilen ilk 5 mod şekli gösterilmiştir.

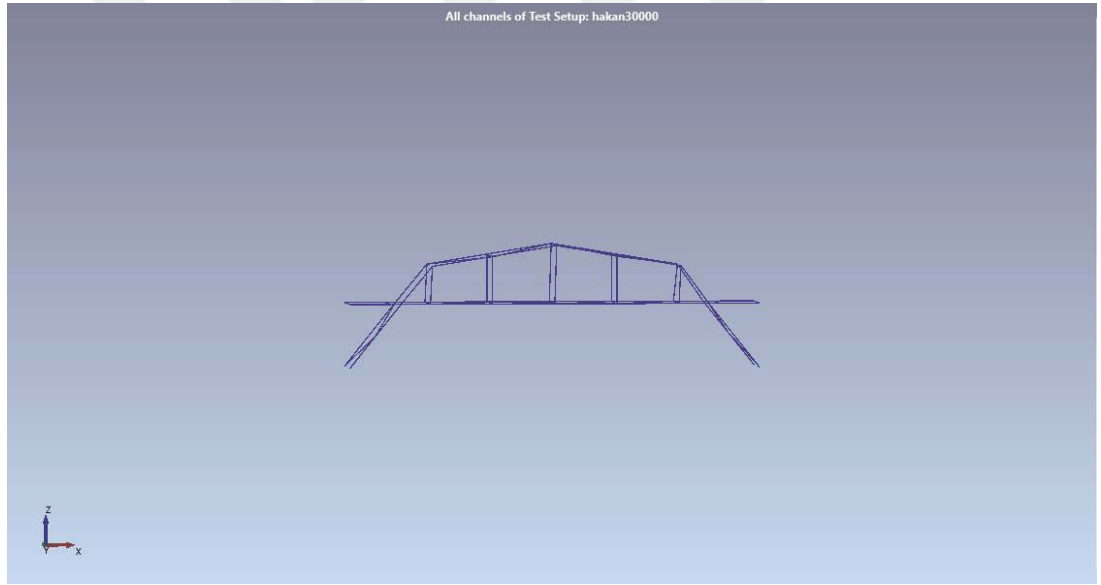
Tablo 4.3 Operasyonel modal analizi (OMA) ile elde edilen dinamik parametreler

MOD	Frekans [Hz]	Sönüm [ζ]	Periyot [s]
1	3.513	0.0208	0,284
2	5.646	0.0187	0.177
3	12.098	0.0213	0.082
4	13.887	0.0211	0.072
5	17.620	0.0189	0.056

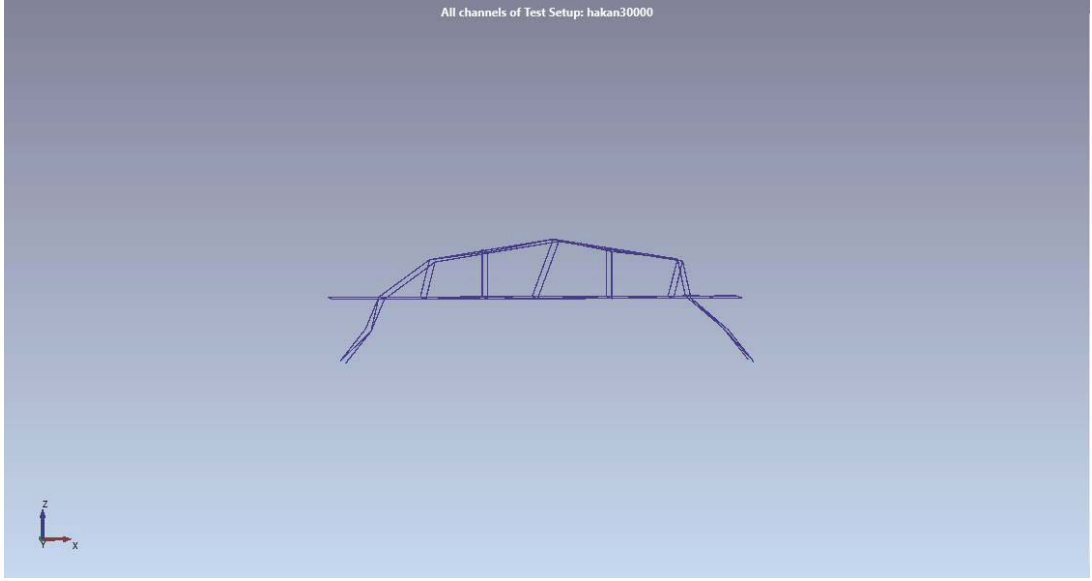




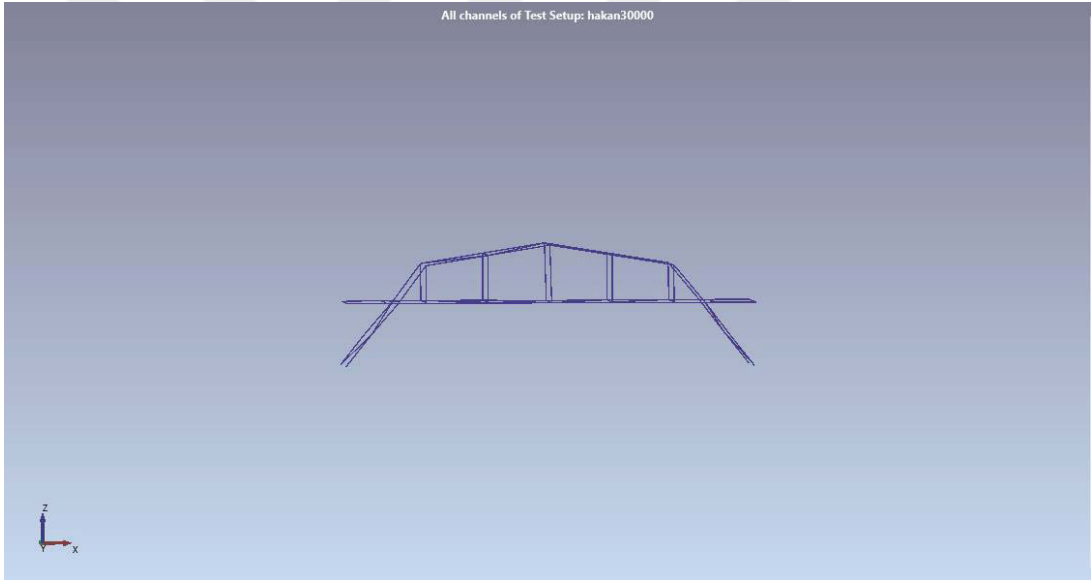
Şekil 4.33. OMA SSI-PC 2.Mod ($f=5.646$ Hz, $T=0.177$ s, $\zeta=0.0187$)



Şekil 4.34. OMA SSI-PC 3.Mod ($f= 12.098$ Hz, $T=0.082$ s, $\zeta=0.0213$)



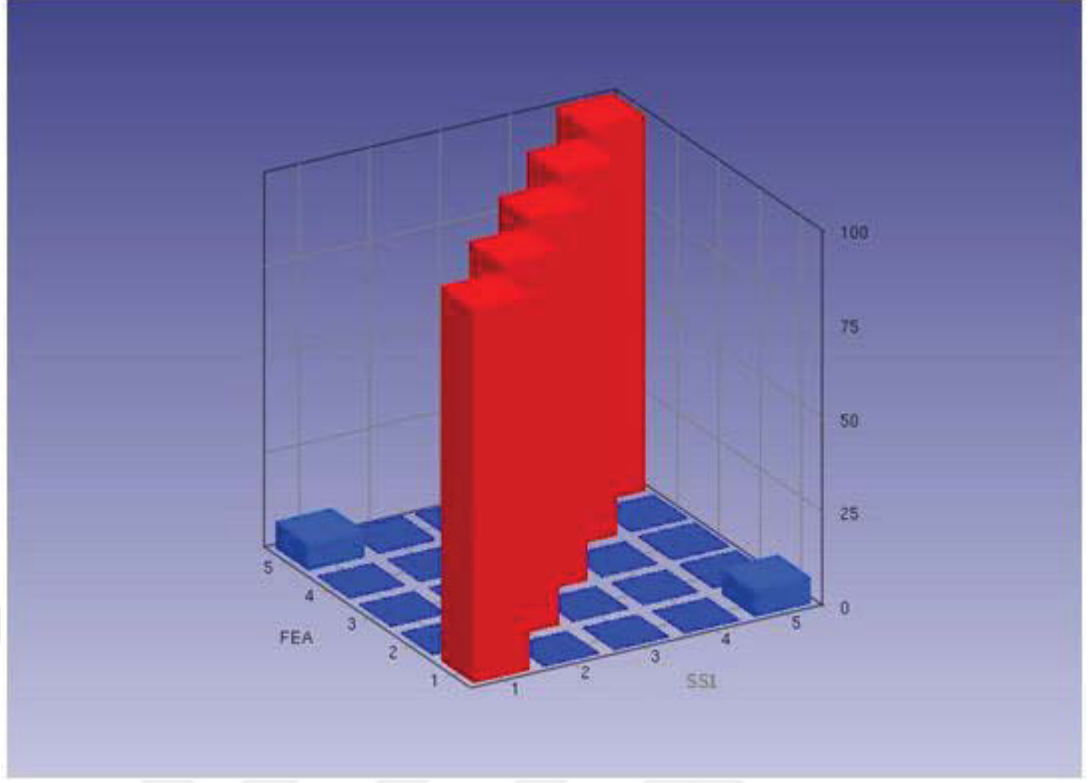
Şekil 4.35. OMA SSI-PC 4.Mod ($f= 13.887\text{Hz}$, $T=0.072\text{ s}$, $\zeta=0.0211$)



Şekil 4.36. OMA SSI-PC 5.Mod ($f=17.620\text{ Hz}$, $T=0.056\text{ s}$, $\zeta=0.0189$)

4.7. Diyagonalsiz Durum İçin MAC Matrisi

Bu bölümde analitik ve deneysel olarak elde edilen modal parametrelerin Diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde Femtools yazılımı ile MAC matrisi verilmiştir. MAC matrisi Şekil 4.37’de ve MAC matrisinin sayısal verileri ise verilmiştir.

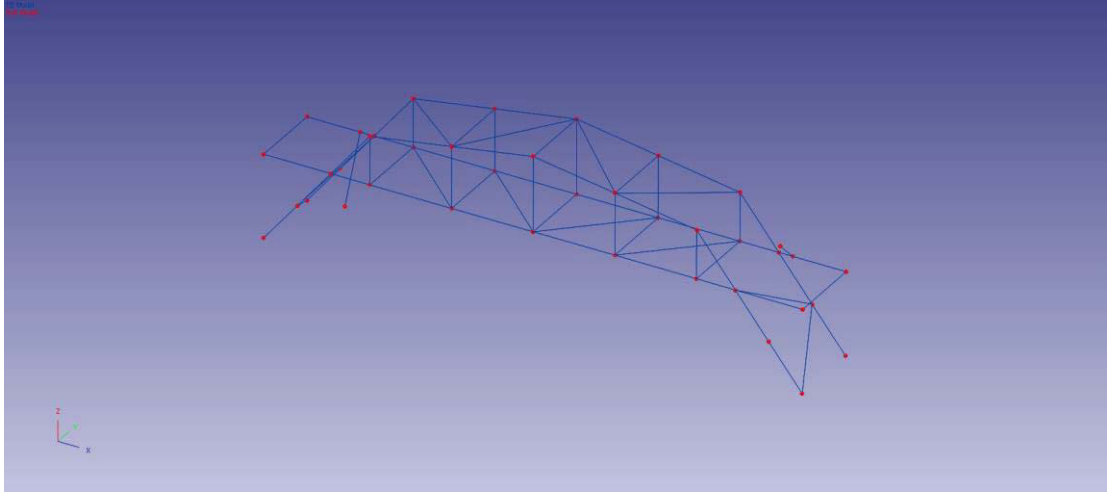


Şekil 4.37. Diyagonal elemanlar sökülmiş model çelik köprünün Deneysel (SSI-OMA) ve Analitik (FEA) modlar arasındaki hesaplanmış MAC matrisi

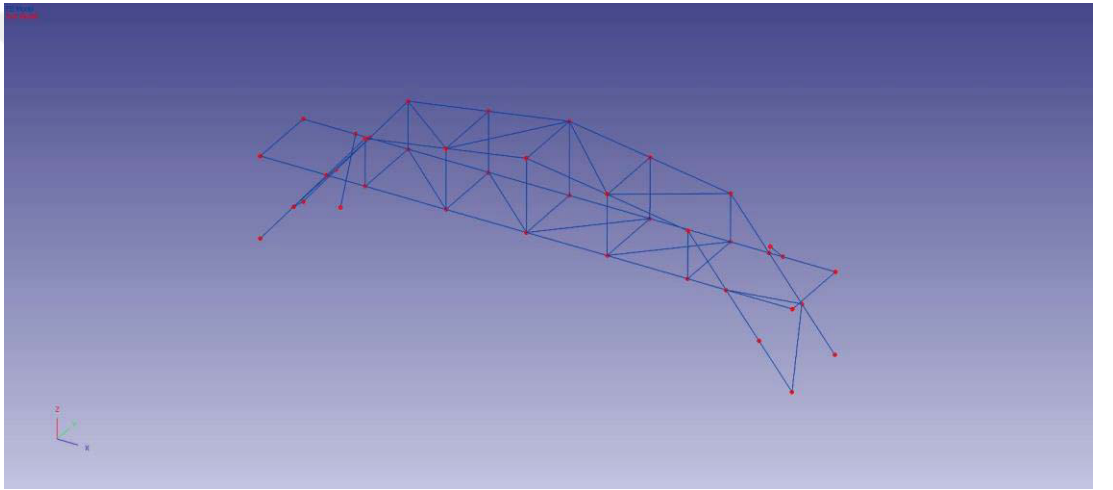
MAC matrisi sayısal veriler;

$$\begin{bmatrix} 100 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 7.0 \\ 0.0 & 100 & 0.0 & 0.0 & 0.7 \\ 0.0 & 0.0 & 100 & 0.0 & 0.6 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 100 & 0.5 \\ 7 & 0.7 & 0.6 & 0.5 & 100 \end{bmatrix} \text{şeklindedir.}$$

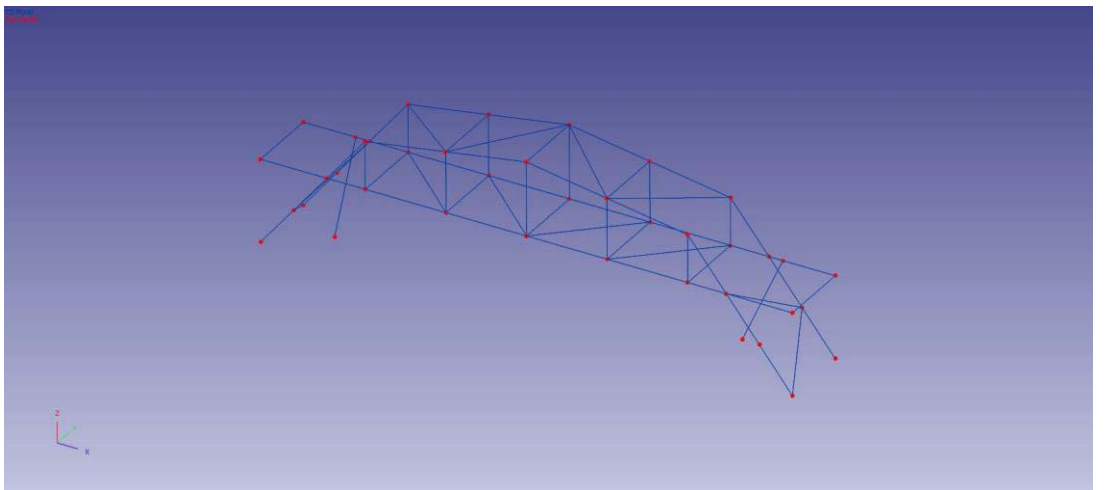
Deneysel mod şekilleri ile sonlu elemanlar mod şekillerinin 1' e 1 çakıştığı şekil 4.37' de ve MAC matrisinde köşegenlerin 1 olması dolayısıyla görülmektedir. MAC matrisinin bu şekilde çıkmasında ölçümlerin laboratuvar ortamında olmasının ve Diyagonal elemanlar sökülmiş model çelik köprü deney yapısının tasarımına uygun olarak sökülmesi ve tekrar tekrar kontrol edilmesinin etkisinin olduğu anlaşılmıştır. Buradan sonuçla Diyagonal elemanlar sökülmiş model çelik köprü deney yapısının operasyonel modal analizinin güvenilir bir biçimde gerçekleştirildiği ve sonuçların geçerliliğinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca ilk 5 moda ait deneysel ve sonlu elemanlar mod şekillerinin eşleştirilmesi frekans, periyot ve sönüm oranları ile birlikte Şekil 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42'de açık bir şekilde görülmektedir.



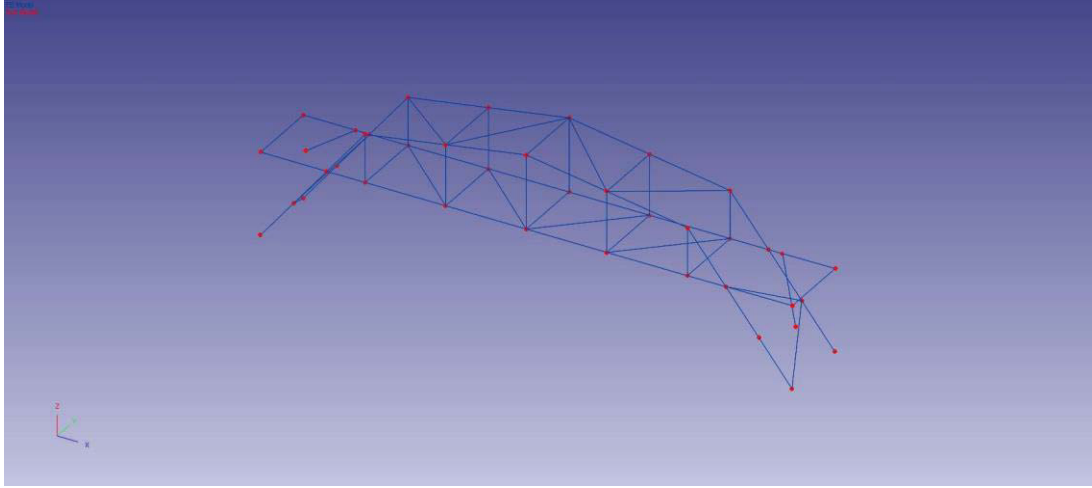
Şekil 4.38. FEA 1.Mod ($f=3.541$ Hz, $T=0.2823$ s) - SSI-PC 1.Mod ($f=3.513$ Hz, $T=0.2846$ s, $\zeta =0.0208$)



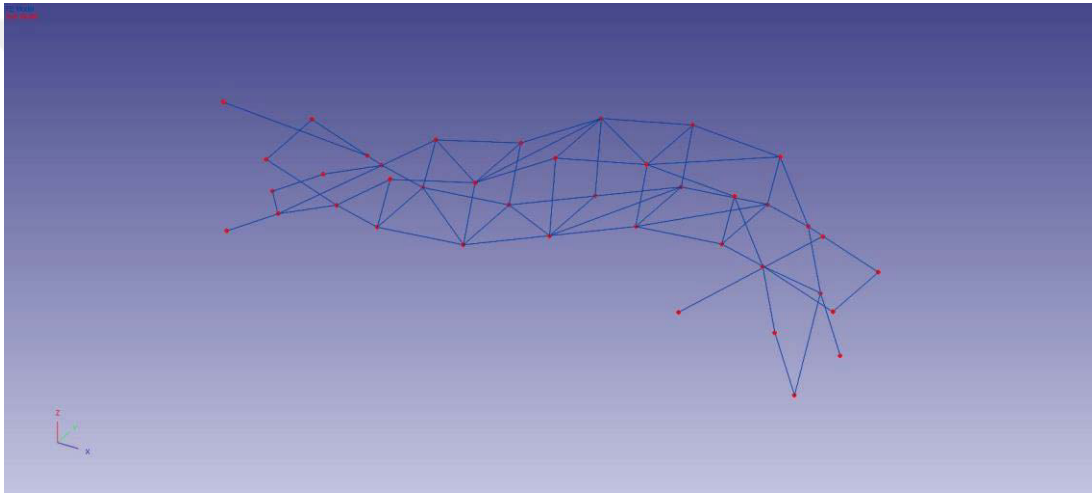
Şekil 4.39. FEA 2.Mod ($f=5.642$ Hz, $T=0.1772$ s) - SSI-PC 2.Mod ($f=5.646$ Hz, $T=0.1771$ s, $\zeta =0.0187$)



Şekil 4.40. FEA 3.Mod ($f=12.072$ Hz, $T= 0.0828$ s) - SSI-PC 3.Mod ($f=12.098$ Hz, $T=0.0826$ s, $\zeta =0.0213$)



Şekil 4.41. FEA 4.Mod ($f= 13.906$ Hz, $T= 0.0719$ s) - SSI-PC 4.Mod ($f=13.887$ Hz, $T=0.0720$ s, $\zeta =0.0211$)



Şekil 4.42 FEA 5.Mod ($f=17.598$ Hz, $T= 0,0568$ s) – SSI-PC 5.Mod ($f=17.62$ Hz, $T=0.0567$ s, $\zeta =0.0189$)

4.8. Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması

Yapılan bu tez çalışmasında elde edilen bulgulardan bir sonuca ulaşmak için Diyagonal elemanlı model çelik köprü deney yapısının operasyonel modal analiz ile elde edilen dinamik parametreleri ve diyagonal elemanlar çıkarılmış model çelik köprü deney yapısının operasyonel modal analiz ile elde edilen dinamik parametreleriyle karşılaştırılacaktır. Her iki durum için ilk 5 moda ait frekans, periyot, sönüm değerleri ve mod şekilleri ile model çelik köprü alt ve üst başlık ivme zaman grafikleri elde edilmiştir. Her iki durum için elde edilen bu parametreler ayrı ayrı tartışılarak bir sonuca varılmak amaçlanmaktadır. Böylelikle yapılan çalışmalar sonucunda laboratuvar ortamında Diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisi ön plana çıkarılmak amaçlanmaktadır. Sırasıyla;

- Frekans değerlerinin karşılaştırılması
- Periyot değerlerinin karşılaştırılması
- Sönüm değerlerinin karşılaştırılması
- Mod şekillerinin karşılaştırılması

4 ana başlık halinde elde edilen veriler ile birlikte detaylı olarak karşılaştırmalar yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca karşılaştırılan parametrelerin birbiri ile olan etkileşimlerine dikkat edilmiştir.

4.8.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Diyagonal elemanlar ile yapılmış model çelik köprü ve diyagoneller sökülerek elde edilmiş model çelik köprü için ayrı ayrı frekans değerleri ilk 5 mod için elde edilmiştir. Tablo 4.4' de frekans değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.4. Frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	1	2	3	4	5
DİYAGONALLİ-Frekans [Hz]	5.751	11.605	17.219	21.151	23.949
DİYAGONALSİZ-Frekans [Hz]	3.513	5.646	12.098	13.887	17.620
Fark [Hz]	2.238	5.959	5.121	7.264	6.329
Fark [%]	38.9	51.35	29.74	34.34	26.42

1. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 2.238 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %38,9 azalış olarak tespit edilmiştir.

2. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 5.959 Hz

olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %51.35 azalış olarak tespit edilmiştir.

3. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 5.121 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %29.74 azalış olarak tespit edilmiştir.

4. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 7.264 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %34.34 azalış olarak tespit edilmiştir.

5. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 6.329 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %26.42 azalış olarak tespit edilmiştir.

4.8.2. Periyot Değerlerinin Karşılaştırılması

Diyagonal elemanlar ile yapılmış model çelik köprü ve diyagoneller sökülerek elde edilmiş model çelik köprü için ayrı ayrı periyot değerleri ilk 5 mod için elde edilmiştir. Tablo 4.5’de periyot değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.5. Periyot değerlerinin karşılaştırılması

Mod	1	2	3	4	5
DİYAGONALLİ-Periyot [s]	0.174	0.086	0.058	0.047	0.042
DİYAGONALSİZ-Periyot [s]	0.284	0.177	0.082	0.072	0.056
Fark [s]	-0.11	-0.091	-0.024	-0,025	-0.014
Fark [%]	63.21	105.8	41.38	53.19	33.3

1. Modda diyagonalli model elik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model elik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.11 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 63.21 artış olarak tespit edilmiştir.

2. Modda diyagonalli model elik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model elik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.091s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 105.8 artış olarak tespit edilmiştir.

3. Modda diyagonalli model elik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model elik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.024 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 41.38 artış olarak tespit edilmiştir.

4. Modda diyagonalli model elik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model elik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.025 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 53.19 artış olarak tespit edilmiştir.

5. Modda diyagonalli model elik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model elik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.014 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 33.3 artış olarak tespit edilmiştir.

4.8.3. Sönüm Değerlerinin Karşılaştırılması

Diyagonal elemanlar ile yapılmış model elik köprü ve diyagoneller sökülerek elde edilmiş model elik köprü için sönüm değerleri ilk 5 mod için elde edilmiştir. Tablo 4.6'da sönüm değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.6 Sönüm değerlerinin karşılaştırılması

Mod	1	2	3	4	5
DİYAGONALLİ-Sönüm[ξ]	0.0180	0.0170	0.0201	0.0258	0.0172
DİYAGONALSİZ-Sönüm [ξ]	0.0208	0.0187	0.0213	0.0211	0.0189
Fark [ξ]	-0.002	-0.0017	-0.0012	0.0047	-0.0017
Fark [%]	11.1	10	5,97	18.2	10

1. Modda diyagonalli model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.002 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %11.1 artış olarak tespit edilmiştir.

2. Modda diyagonalli model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 0.0017 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %10 artış olarak tespit edilmiştir.

3. Modda diyagonalli model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.0012 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %5.97 artış olarak tespit edilmiştir.

4. Modda diyagonalli model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 0.0047 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %18.2 azalış olarak tespit edilmiştir.

5. Modda diyagonalli model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 0.0017 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %10 artış olarak tespit edilmiştir.

4.8.4. . Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

Diyagonal elemanlar ile yapılmış model çelik köprü ve diyagoneller sökülerek elde edilmiş model çelik köprü için mod şekilleri ilk 5 mod için elde edilmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde diyagonal elemanları sökülmüş model çelik köprüde X, Y ve Z öteleme mod şekilleri ile birlikte burulma mod şekilleri de görülmüştür. 1. Modda Y doğrultusunda öteleme, 2. Modda X doğrultusunda öteleme, 3. Mod şeklinde ise Z doğrultusunda ötelenme görülmektedir.4.Mod şeklinde Y eksenini etrafında burulma,Z doğrultusunda ötelenme,5.Mod şeklinde ise Y yönünde burulma görülmektedir. Diyagonal elemanlar ile yapılmış model çelik köprüde ise mod şekillerinde öteleme ve burulma görülmektedir.1.Modda X,Z doğrultusunda ötelenme 2.Modda Y doğrultusunda ötelenme,3.Modda Y doğrultusunda burulma,4.Modda X,Y doğrultusunda burulma,5.Modda Y eksenini etrafında burulma, Z doğrultusunda ötelenme mod şekilleri görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, laboratuvar koşullarında oluşturulmuş çelik model bir köprü de diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisi diyagonal ve diyagonal bağlantısız olmak üzere iki ayrı deney model yapısı oluşturularak deneysel yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında model çelik köprüde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak dinamik parametreler belirlenmiştir. Bu dinamik parametreler ise doğal frekans, periyot, sönüm oranları ve mod şekillerinden oluşmaktadır. Diyagonal elemanlı model çelik köprü deney yapısı ile Diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde ilk 5 modda doğal frekans, periyot, sönüm oranları ve mod şekilleri her iki modelde de birbirinden bağımsız olarak elde edilmiştir.

Çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Diyagonal elemanlı model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden frekans değerleri;

- ✚ 1.Mod için frekans değeri 5.751 Hz
- ✚ 2.Mod için frekans değeri 11.605 Hz
- ✚ 3.Mod için frekans değeri 17.219 Hz
- ✚ 4.Mod için frekans değeri 21.151 Hz
- ✚ 5.Mod için frekans değeri 23.949 Hz

Olarak elde edilmiştir. Diyagonal elemanlı model çelik köprüde hâkim frekansı 5.751 Hz olarak tespit edilmiştir.

Diyagonal elemanlı model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden periyot değerleri;

- ✚ 1.Mod için periyot değeri 0.174 s
- ✚ 2.Mod için periyot değeri 0.086 s
- ✚ 3.Mod için periyot değeri 0.058 s
- ✚ 4.Mod için periyot değeri 0.047 s
- ✚ 5.Mod için periyot değeri 0.042 s

Olarak elde edilmiştir. Diyagonal elemanlı model çelik köprüde hâkim periyodu 0.174 s olarak tespit edilmiştir.

Diyagonal elemanlı model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden sönüm değerleri;

- ✚ 1.Mod için sönüm değeri 0.0180, sönüm oranı ise % 1.80
- ✚ 2.Mod için sönüm değeri 0.0170, sönüm oranı ise % 1.70
- ✚ 3.Mod için sönüm değeri 0.0201, sönüm oranı ise % 2.01
- ✚ 4.Mod için sönüm değeri 0.0258, sönüm oranı ise % 2.58
- ✚ 5.Mod için sönüm değeri 0.0172, sönüm oranı ise % 1.72

Olarak elde edilmiştir.

Diyagonal elemanlı model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden mod şekilleri incelendiğinde;

- ✚ 1.Mod için mod şekli incelendiğinde X ve Z doğrultusunda ötelenme
- ✚ 2.Mod için mod şekli incelendiğinde Y doğrultusunda ötelenme
- ✚ 3.Mod için mod şekli incelendiğinde Y eksenini etrafında burulma
- ✚ 4.Mod için mod şekli incelendiğinde X ve Y doğrultusunda burulma
- ✚ 5.Mod için mod şekli incelendiğinde Y eksenini etrafında burulma, Z doğrultusunda ötelenme mod şekilleri görülmüştür.

Diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden frekans değerleri;

- ✚ 1.Mod için frekans değeri 3.513 Hz
- ✚ 2.Mod için frekans değeri 5.646 Hz
- ✚ 3.Mod için frekans değeri 12.098 Hz
- ✚ 4.Mod için frekans değeri 13.887 Hz
- ✚ 5.Mod için frekans değeri 17.620 Hz

Diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden periyot değerleri;

- ✚ 1.Mod için periyot değeri 0.284 s
- ✚ 2.Mod için periyot değeri 0.177 s
- ✚ 3.Mod için periyot değeri 0.082 s
- ✚ 4.Mod için periyot değeri 0.072 s
- ✚ 5.Mod için periyot değeri 0.056 s

Diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden sönüm değerleri;

- ✚ 1.Mod için sönüm değeri 0.0208, sönüm oranı ise % 2,08
- ✚ 2.Mod için sönüm değeri 0.0187, sönüm oranı ise % 1.87
- ✚ 3.Mod için sönüm değeri 0.0213 sönüm oranı ise % 2.13
- ✚ 4.Mod için sönüm değeri 0.0211, sönüm oranı ise % 2.11
- ✚ 5.Mod için sönüm değeri 0.0189, sönüm oranı ise % 1.89

Diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde operasyonel modal analiz ile ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametrelerinden mod şekilleri incelendiğinde;

- ✚ 1.Mod için mod şekli incelendiğinde Y doğrultusunda ötelenme
- ✚ 2.Mod için mod şekli incelendiğinde X doğrultusunda ötelenme
- ✚ 3.Mod için mod şekli incelendiğinde Z doğrultusunda ötelenme
- ✚ 4.Mod için mod şekli incelendiğinde Y eksenini etrafında burulma Z doğrultusunda ötelenme mod şekilleri görülmüştür.
- ✚ 5.Mod için mod şekli incelendiğinde Y eksenini etrafında burulma

Diyagonal elemanlı model çelik köprü ve diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde ilk 5 mod için elde edilen dinamik parametreleri diyagonal elemanların etkisini ortaya çıkartmak amacıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen frekans verilerinin karşılaştırması sonucunda;

- ✚ 1. Modda diyagonal model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 2.238 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %38,9 azalış olarak tespit edilmiştir.
- ✚ 2. Modda diyagonal model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 5.959 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %51.35 azalış olarak tespit edilmiştir.
- ✚ 3. Modda diyagonal model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 5.121 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %29.74 azalış olarak tespit edilmiştir.

- 4. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 7.264 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %34.34 azalış olarak tespit edilmiştir.
- 5. Modda diyagonalli model çelik köprünün frekans değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün frekans değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 6.329 Hz olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %26.42 azalış olarak tespit edilmiştir

Elde edilen periyot verilerinin karşılaştırması sonucunda;

- 1. Modda diyagonalli model çelik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.11 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 63.21 artış olarak tespit edilmiştir.
- 2. Modda diyagonalli model çelik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.091s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 105.8 artış olarak tespit edilmiştir.
- 3. Modda diyagonalli model çelik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.024 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 41.38 artış olarak tespit edilmiştir.
- 4. Modda diyagonalli model çelik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.025 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 53.19 artış olarak tespit edilmiştir.
- 5. Modda diyagonalli model çelik köprünün periyot değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün periyot değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.014 s olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise % 33.3 artış olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sönüm verilerinin karşılaştırması sonucunda;

- 1. Modda diyagonalli model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar

sonucunda -0.002 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %11.1 artış olarak tespit edilmiştir.

2. Modda diyagonal model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.0017 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %10 artış olarak tespit edilmiştir.
3. Modda diyagonal model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.0012 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %5.97 artış olarak tespit edilmiştir.
4. Modda diyagonal model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda 0.0047 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %18.2 azalış olarak tespit edilmiştir.
5. Modda diyagonal model çelik köprünün sönüm değeri ile diyagonalsiz model çelik köprünün sönüm değeri arasındaki fark karşılaştırmalar sonucunda -0.0017 olarak bulunmuştur. Farkın yüzde olarak değeri ise %10 artış olarak tespit edilmiştir.

Diyagonal elemanlar ile güçlendirilmiş model çelik köprüde ve diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprüde mod şekilleri genel olarak incelendiğinde diyagonal elemanlar ile güçlendirilmiş çelik deney yapısında diyagonal elemanlar sökülmüş model çelik köprü deney yapısına kıyasla öteleme mod şekilleri yerini burulma mod şekillerine bırakmıştır.

Diyagonal elemanların eklenmesi ile y yönündeki yerdeğiştirme değerlerinin yerine daha dengeli ve küçük olarak diğer yönlerde de deformasyonlar görülmüştür. Buradan sonuçla diyagonal elemanların çelik deney yapısı üzerine gelen yatay yüklerin dengeli dağılmasında olumlu bir rol oynadığı açıkça görülmektedir.

Model çelik köprüde diyagonal elemanların hâkim periyoda etkisi %63.21 olarak elde edilmiştir. Buradan sonuçla diyagonal elemanların eklenmesinin yapı periyodunu düşürmesine etki etmesiyle birlikte yapının rijitliğinin arttığı söylenebilir.

Model çelik köprüde diyagonal elemanların hâkim frekansa etkisi %38.9 olarak elde edilmiştir. Buradan sonuçla diyagonal elemanlı durumda frekanslardaki bu

değişiklik çelik model köprünün rezonans durumundan uzaklaştırarak daha emniyetli bir duruma gelmesini sağladığı görülmüştür.

Model çelik köprüde diyagonal elemanlı durumda sönüm oranının azaldığı görülmektedir. Bu durumda yapı rijitliğinin arttığını göstermektedir. Bilindiği üzere yapıların sönüm oranları deneysel olarak belirlenmekte olup, sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan analizlerde her bir yapı türü için sabit sönüm oranları tüm modlar için sabit bir değer olarak kabul edilmektedir.

Çelik yapılarda sönüm oranı %2 olarak kabul edildiği bilinmektedir. Kabul edilen bu oranın deneysel olarak elde edilen sönüm oranlarıyla birebir örtüşmediği görülmektedir. Ayrıca her bir modda ve durumda farklı deneysel sönüm oranları elde edilmiştir. Sonuç olarak deneysel sönüm oranlarının mevcut yapıyı çok daha doğru şekilde temsil ettiği anlaşılmaktadır.

Varılan bu sonuçlar doğrultusunda diyagonal elemanların yapının dinamik karakteristiklerine olumlu yönde etkilerinin olduğunu, yapının rijitliğini artırıp daha kararlı bir durumda kalmasına faydasının olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diyagonal elemanların sistemlerde uygulama kolaylığı ile birlikte maliyet açısından değerlendirilecek farklı tip malzemelerden de üretilmiş eleman çeşitleriyle kablo, gergi, frp'li malzemeler vb. yapının rijitliğine olumlu katkılarının olabileceği sonucuna varılmaktadır.

İnşaat mühendisliğinin temel prensibi olan 3E ilkesine göre Emniyet, Ekonomi ve Estetik öğelerden tümünün içinde bulunduğu bir eleman şekli olan Diyagonal kullanımı yapılmış olan tez çalışmasında tüm avantajlı yönleriyle irdelenmiş bulunmaktadır.

Çelik yapı imalatçılarının daha rijit yapılar meydana çıkarması veya mevcut yapıyı güçlendirmesi için sıklıkla kullandıkları ve yukarıda bahsedildiği üzere 3E prensibini tümüyle yansıtan Diyagonal elemanlar çalışmadaki çelik yapılar haricinde betonarme, beton, kompozit vb. türündeki yapılarda da aynı avantajları sağlayarak yapının dinamik davranışlarına olumlu etkilerde bulunmaktadır.

Model çelik köprüde diyagonal elemanların kullanılması ile model çelik köprünün dinamik etkilere karşı daha güvenli kılındığı sonucuna yapılan bu çalışma ile ulaşılmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki bazı öneriler sunulmaktadır:

- ✚ Köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yönteminin etkin bir işleve sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapıların sonlu eleman modellerinin doğruluğunu kontrol etmek için Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması çok önem arz etmektedir.
- ✚ Model çelik köprü üzerinde uygulanan deneysel yöntemlerden elde edilen dinamik karakteristikler, ölçüm esnasındaki durumun yansıtmaktadır. Bu ölçümler belirli zaman dilimlerinde tekrarlanarak yapı davranışı sürekli izlenebilir. Böylece her hangi bir olumsuz durumu gecikmeden müdahale edilebilir.
- ✚ Yapılacak olan tüm Operasyonel Modal Analizlerde mevcut çevresel koşulların kayıt altına alınması gerekmektedir. Çünkü yapılmış olan tez çalışması sırasında ve literatür çalışması sırasında sıcaklık, nem, rüzgar vb. gibi faktörlerin son derece etkili olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aydın, H.(2020).“*Obtaining Modal Parameters in Steel Model Bridge by System Identification Using Artificial Neural Networks*”. International Journal of Trend in Scientific Research and Development(IJTSD),Volume 4 Issue 2,February 2020 Available Online:www.ijtsrd.com e-ISSN:2456-6470
- Allemang, R.J. and Brown, B.L. (1982). “A *Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis,*” Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference, Orlando, 8-10 November 1982, pp. 110-116.
- Artemis Modal Pro, *Structural Vibration Solutions A/S NOVI*, [computer program] Available at: <http://www.svibs.com> ,Science Park Niels Jernes Vej 10 DK-9220 Aalborg East Denmark
- Boru, E.O. ve Kutunis. M, (2015). “Çevrel Titreşim Kayıtları Kullanılarak Yapı Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi”, SAÜ Fen Bil Der 19. Cilt, 1. Sayı, s. 59-66,
- Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P. (2000), “*Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition*”, Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA.
- Cellier F.E. (1991). Basic Principles of Continuous System Modeling. In: Continuous System Modeling. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3922-0_2
- Cıtak,S.O.,Ohuri,M.,Nakamura,T.,Sakaue,M.,Takemura.S.,Takemoto,T.,Furumura,T.,Kazza hisa Iwai,K.,Kubo A.,Kawatani,K.,Tajima,S.,Takahashi N. and Kaneda,Y. (2012) *Microtremor Measurements And Earthquake Response Analysis On Urado Bridge*, Kochi, JAPAN,15th Worlds Conference of Earthquake Engineering,24-28 September 2012,Lisbon,Portugal
- C. Gentile, (2006). “*Modal and structural identification of a R.C. arch bridge*” , Structural Engineering and Mechanics, Vol. 22, No.1, 53-70
- Costa,B.J.A.,Magalhaes,F.,Cunha,A. And Figueiras J.(2014), “Modal Analysis for the Rehabilitation Assessment of the Luiz I Bridge”.Journal of Bridge Engineering/Volume 19 Issue 12 - December 2014
- Damjanovic, D., Duvnjak, I., Bartolac, M. and Koščak, J. (2018). “Operational modal analysis of two identical single span road bridges”. Proceedings of the 5th 210 International Conference on Road and Rail Infrastructure, V-CETRA 2018, 17-19 May, 103-110, Zagreb.
- Dynamic Academy,2017, <https://www.dynaaca.com/Hizmet/deneysel-calismalar.html> (Erişim tarihi: 01.03.2020)
- Dynamic Design Solutions, FEMtools, Leuven, Belgium, (2008)
- Dascotte E, Strobbe J, Hua H. (1995), Sensitivity-Based Model Updating Using Multiply Types of Simultaneous State Variables, Proceedings of the 13th International Model Analysis Conference, Nashville, Tennessee, p. 1-5.
- Dönmez, C. ve Karakan, E.(2009). “Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları”, İMO Teknik Dergi, 2009 4851-4863,318
- Drygala, I.J. and Dulinska, J.M. (2019). “Full-Scale Experimental and Numerical Investigations on the Modal Parameters of a Single-Span Steel-Frame Footbridge” Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, 31-155 Kraków, Poland, Symmetry 2019, 11(3), 404; <https://doi.org/10.3390/sym11030404>

- Drygala,I.J., Dulinska.J.M. and Polak M.A, Seismic Assessment Of Footbridges Under Spatial Variation Of Earthquake Ground Motion (SVEGM):Experimental Testing And Finite Element Analyses, *Sensors* 2020, 20, 1227; doi:10.3390/s20041227, www.mdpi.com/journal/sensors
- El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S. Ve Gharairi, A., (2004). Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, *Emirates Journal for Engineering Research*.
- Erol, O.(2017). “39+646 Çelik Demiryolu Köprüsünün Sonlu Eleman Modelinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi” ,Yüksek Lisans Tezi, DEÜ, İzmir
- Ewins. (1984). “Modal Testing: Theory and Practice (Engineering Dynamics) by D. J. Ewins (1984-12-30) Hardcover – January 1,
- Fagin, S.L., (1964). Recursive Linear Regression Theory, Optimal Filter Theory and Error Analysis Optimal System. *IEEE Int. Convention Record*, Vol. 16; 216-240.
- Fitzgerald, R.J., 1971. Divergence of the Kalman Filter. *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. AC-16; 736-747.
- Giraldo D. F. (2006). A Structural Health Monitoring Framework for Civil Structures, Ph.D. Thesis, Washington University The Henry Edwin Server Graduate School Department of Civil Engineering, 167 p.
- Günday, F. (2017). Çelik Yapıların Çelik Çapraz Elemanlarla Güçlendirilmesinin Yapı Dinamik Davranışına Etkilerinin İncelenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ,Yüksek Lisans Tezi
- Gündoğan, M. (2012) Model çelik köprünün Yapı Sağlığının Gözlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ,2012, Yüksek Lisans Tezi
- Güneş S., ve Anıl Ö. (2017,Ekim). Operasyonel Modal Analiz Tekniği İle Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi,4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı,11-13 Ekim 2017-Anadolu Üniversitesi-Eskişehir
- Hökelekli E.,(2015) Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Orerasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü,İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,Doktora Tezi
- Jung H. (1992), Structural Dynamics Model Updating Using Eigen sensitivity Analysis, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London
- Juang J.N., Pappa, R.S., 1985. An Eigensystem Realization Algorithm For Modal Parameter Identification And Model Reduction, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No.5, pp. 620.
- Juang, J.N. (1994), Applied system identification, Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall Inc.
- Kasımzade A.A., Tuhta S., (2004). Estimation of Sensitivity and Reliability base Isolation Buildings under Earthquake Action, International Symposium on Network And Center-Based For Smart Structure Technologies And Earthquake Engineering, Osaka, Japan.
- Kasımzade A.A., Tuhta S., (2005). Finite Element, Analytical, Experimental Investigation of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP and Related Structure Analysis Problem’s Solutions , AACEU, Scientific Works No 2, p.18.
- Kasımzade A.A., Tuhta S., (2005). Performance of Reinforced Concrete Columns Confined by Composite Wraps , AACEU, Scientific Works No 2, p.13.

- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2005). Ambient Vibration Test on Detection of Dynamic Properties of Reinforced Concrete Building, First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, p. 345-352.
- Kasımzade A.A., (2005). *Finite Element Method: Foundation and Application to Earthquake Engineering (is included education and finite element analysis programs CD)* , Istanbul, Beta Publication , (First edition 1997) Second edition, p.827. (ISBN 975-511-379-7)
- Kasımzade A.A., (2005). *Structural Dynamics: Theory and Application to Earthquake Engineering (is included education and dynamic analysis programs CD)* , Istanbul, Beta Publication , (First edition 1998) Second edition, p.527. (ISBN 975-511-381-9)
- Kasımzade A.A.,(2006). *Fuzzy Finite Element Modeling of Structures under Earthquake Action*, the 5 Th International Symposium on Intelligent Manufacturing System.
- Kasımzade A. A., Tuhta S. (2006), *The Eigensensitivity-Based Finite Element Model Updating Benchmark Model*, 7th International Congress on. Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey, 9p.
- Kasımzade A. A., Tuhta S., Uslu A. (2006), *Finite Element Modal Updating of Reinforce Concrete Building Use of Ambient Vibration Measurements*, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Geneva, Switzerland, 10p.
- Kasımzade A.A., (2006). *Coupling of the Control System and the System Identification Toolboxes with Application in Structural Dynamics*, International Conference Control 2006, Glasgow, Scotland, UK.
- Kasımzade A. A.,Tuhta S. (2007), *Ambient Vibration Analysis of Steel Structure, First International Operational Modal Analysis*, Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, 9p.
- Kasımzade A. A.,Tuhta S. (2007), *Ambient Vibration Analysis of Steel Structure, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07)*, Porto, Portugal, 10p.
- Kasımzade A. A.,Tuhta S. (2007), *Particularities of Monitoring, Identification, Model Updating Hierarchy in Experimental Vibration Analysis of Structures*, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07), Porto, Portugal, 10p.
- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2008). *A Novel Approach for Modal Identification from Ambient Vibration*, SEISMIC ENGINEERING INTERNATIONAL CONFERENCE, MERCEA'08, Reggio Calabria and Messina, July 8-11, Italy.
- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2009). *Optimal Estimation the Building System Characteristics for Modal Identification*, INTERNATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSES CONFERENCE, IOMAC 2009, Porto Novo (Ancona), Italy.
- Kasımzade A.A., Tuhta S., Bal S., (2009). *Natural Seismic Protection Peculiarities of Historical "Walled Obelisk" Structure In Istanbul: Modeling And Numerical Approach*, Smart Structures And Materials, Smart 09, Porto-Portugal
- Kasımzade A.A., (2009). *Mathematical Model of the Natural Seismic Protection: Modeling, Implementation, Applications*, The 2nd International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI 2009 Orlando, Florida, USA.
- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2010). *Novel Approach for Monitoring, Identification, Modal Updating Hierarchy in Experimental and Finite Element Vibration Analysis, Part I: Theoretical Discussions*

- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2012), *Analytical Numerical and Experimental Examination of Reinforced Composites Beams Covered with Carbon Fiber Reinforced Plastic*, March 2012 *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 42(1):55-70, DOI: 10.2478/v10254-012-0004-1
- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2012), *Stochastic parametric system identification approach for validation of finite element models: industrial applications*, TWMS Jour. Pure Appl. Math., V.3, N.1, 2012, pp.41-61
- Kasımzade, A. A., (2012), Depreme Dayanımlı Yapı Tasarımı ve Yeni Deprem Yalıtım Sistemi. Samsun İlinin Deprem Riski ve Alınabilecek Önlemler Sempozyumu, 11-12 Mayıs, Sempozyum Bildiri Kitabı, 33-51, Samsun, Türkiye.
- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2017), *Application of OMA on the bench-scale earthquake Simulator using micro tremor data*”Structural Engineering and Mechanics
- Kasımzade, A.A., Tuhta, S., (2017), *OMA of model steel structure retrofitted with CFRP using earthquake Simulator*”Structural Engineering and Mechanics
- Kasımzade, A. A., (2018a) *Yapı dinamiği temelleri ve deprem mühendisliğinde uygulamaları* (Üçüncü Baskı). Nobel Yayınevi, 406-407, Ankara.
- Kasımzade, A. A., (2018b). *Sonlu elemanlar metodu temelleri ve yapı mekaniğinde uygulamaları* (Üçüncü Baskı). Nobel Yayınevi, Ankara.
- Kasımzade, A., Tuhta, S., Günday, F., Aydın, H.(2019d). *Determination of Modal Parameters on Steel Model Bridge Using Operational Modal Analysis*. Presented at the 8th International Steel Structures Symposium, Konya.
- Kasımzade, A., Tuhta, S., Günday, F., Aydın, H.(2019c). *Investigation of Modal Parameters on Steel Structure Using FDD from Ambient Vibration*. Presented at the 8th International Steel Structures Symposium, Konya.
- Kasımzade A., Tuhta S., Aydın H., Günday. F.(2019a). *Investigation of Modal Parameters on Steel Model Bridge Using EFDD Method*, Techno-Science, 2nd International Conference on Technology and Science, Burdur [Uluslararası]
- Kasımzade A., Tuhta S., Günday F., Aydın H.(2019b). *Extraction of Modal Parameters on Steel Structure Using EFDD.*, Techno-Science, 2nd International Conference on Technology and Science ,Burdur [Uluslararası]
- Kasımzade, A. A., Şafak, E., Ventura, C. E., Naeim, F. and Mukai, Y.(2019). *Seismic Isolation, Structural Health Monitoring, and Performance Based Seismic Design in Earthquake Engineering*. Springer International Publishing, Chapter 1, 3-54, Cham, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-93157-9_1
- Kasımzade, A. A., Şafak, E., Ventura, C. E., Naeim, F. and Mukai, Y. (Editors) . (2019k). *Seismic Isolation, Structural Health Monitoring, and Performance Based Seismic Design in Earthquake Engineering*. Springer International Publishing, Chapter 3, 85-127, Cham, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-93157-9_3
- Kalman, R.E., (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Journal of Basic Engineering, Vol. 83D, 95-108.
- Kamas, L.A., Sanders, S.R., (1993). *Parameter and State Estimation in Power Electronics Circuits*, IEEE Transactions on Circuits and Systems-1: Fundamental Theory and Applications. 40, 12, 920–928.
- Katayama, T.(2009). *Subspace Methods for System Identification*. Springer London, 2009 ISBN: 1848008805, 9781848008809,Page:392
- Koçak. A., Toydemir. B., Zengin. B., (2015, Mayıs) .Tek Açıklıklı Bir Demiryolu Köprüsünde Modal Parametrelerin Operasyonel Modal Analiz ve Sayısal Analiz Yöntemleri İle

Belirlenmesi. 3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu 08-09-10 Mayıs 2015 İnşaat Mühendisleri Odası, Bursa Şubesi

- Kömür, M.A, Deneme İ.Ö,Yerli H.R.,(2015). Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 73-79 ss., Aralık 2015
- Kvale, K. A., Oiseth, O. and Ronnquist, A. (2017). *Operational modal analysis of an end-supported pontoon bridge. Engineering Structures*, 148, 410-423. Ljung, L., 1987. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall, New Jersey. 519 p.
- M. Nakashima, T. Matsumiya, D. Liu, K. Suita (2004), *Roles of Large-Scale Test for Assessment of Seismic Performance, Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation*, Proceedings of an International Workshop, Bled, Slovenia, p. 269-281.
- Natke H.G.,C.Cempel (1997), *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*, Springer, DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60413-3>
- Özçelik.Ö,Gündoğan.M,Kahraman.S, Model Çelik Köprü'nün Sistem Tanımlama Yöntemleri ile Modal Parametrelerinin Tahmini, İMO Teknik Dergi, 2013 ,6471-6478, Yazı 405
- Pastor M.,Binda M.,Harcarik T.,(2012),Modal Insurance Criterion, *Procedia Engineering* Volume 48, 2012, Pages 543-548, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>
- P. E. Wellstead, *Introduction to Physical System Modelling*, Academic Press, (1979), Michigan Üniversitesi,279 pg.
- Peeters B. (2000), *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*, Ph.D. Thesis, K.U., Leuven, Belgium
- Peeters, B. and De Roeck, G. (1999), "Reference based stochastic subspace identification in civil engineering", *Proceedings of the 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems*, Swansea, UK..
- Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E. and Manfredi, G. (2007), "Implementation of OMA procedures using labview: theory and application", *Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference*, 30 April-2 May, Copenhagen, Denmark, 1-13.
- Ren, W.X., Zhao, T. and Harik, I.E. (2004), "Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge", *J.Struct. Eng. - ASCE*, **130**(7), 1022-1031.
- Reynolds, P., Mohanty, P. and Pavic, A. (2005). Use of Operational Modal Analysis on empty and occupied stadia structures. *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, 26-27 April, Curran Associates, 75-85,Copenhagen, Denmark.
- Salawu, O. S. and Williams, C. (1995). Review of full-scale dynamic testing of bridge structures. *Engineering Structures*, 17:2, 113-121.
- Sanayei, M. ve DiCarlo, C., (2009). Finite Element Model Updating of Scale Bridge Model Using Measured Modal Response Data, *Structures Congress*
- Sethi V. and Song G. (2006), Multimode Vibration Control of A Smart Model Frame Structure,*Smart Materials and Structures*, p. 473-479.
- Şafak, E. (2007, Ekim). Yapı Titreşimlerinin İzlenmesi:Nedir,Neden Yapılır Ve Ne Elde Edilir?Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı,16-20 Ekim 2007,İstanbul
- T.Söderström and P. Stoica, *System Identification*, Prentice Hall International, (1989),DOI: <https://doi.org/10.1017/S026646660000880X>,Published online by Cambridge University Press: 11 February 2009

- TBDY2018. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm> (Erişim tarihi: 19.03.2018)
- Tören, A. (2011). I Ve Kutu Kesitli Çelik-Betonarme Kompozit Köprü Kirişlerinin Analitik İncelenmesi ,Yüksek Lisan Tezi,İstanbul Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü,İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,İstanbul
- Tuhta, S. (2010). Yapı Parametrelerinin Tahribatsız Belirlenmesi,Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Doktora Tezi,Samsun
- Tuhta S. (2018). Optimal Determination of Structural Dynamical Parameters Using Ambient Vibration, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 21(1):55-65,DOI: [10.17780/ksujes.344989](https://doi.org/10.17780/ksujes.344989)
- Tuhta S. (2018). OMA of GFRP Retrofitted Model Concrete Structure Using Ambient Vibration International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) International Open Access Journal | www.ijtsrd.com ISSN No: 2456 - 6470 | Volume - 3 | Issue – 1 | Nov – Dec 2018
- Tuhta, S. (2018), GFRP retrofitting effect on the dynamic characteristics of model steel structure, Steel and Composite Structures, Vol. 28, No. 2 (2018) 223-231 DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2018.28.2.223>
- Tuhta.S., Gunday F., Aydın H. (2019). Dynamic Analysis of Model Steel Structures Retrofitted with GFRP Composites under Microtremor Vibration International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)Volume: 3 | Issue: 2 | Jan-Feb 2019.
- Tuhta.S., Abrar O., Gunday F., (2019). Experimental Study on Behavior of Bench-Scale Steel Structure Retrofitted with CFRP Composites under Ambient Vibration, European Journal of Engineering Research and Science,
- Tuhta, S., Gunday, F., (2019). *Multi Input Multi Output System Identification of Concrete Pavement Using N4SID*. International Journal of Interdisciplinary Innovative Research Development, 4(1).
- Tuhta S., Gunday F., Aydın H.,Alalou M. (2019d). MIMO System Identification of Machine Foundation Using N4SID, International Journal of Interdisciplinary Innovative Research & Development, 7 / 2019 [Uluslararası]
- Tuhta, S., Alameri, I., Gunday, F., (2019). *Numerical Algorithms N4SID for System Identification of Buildings*. International Journal of Advanced Research in Engineering Technology Science, 1(6).
- Tuhta, S., Gunday, F., (2019). *Mimo System Identification of Industrial Building Using N4sid with Ambient Vibration.*,International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology.
- Tuhta, S., Gunday, F., (2019). *Application of Oma on The Bench scale Aluminum Bridge Using Micro Tremor Data*,International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 5(5), 912–923.
- Tuhta, S., Gunday, F., Abrar, O., (2019). “*Experimental Study on Effect of Seismic Damper to Reduce the Dynamic Response of Bench Scale Steel Structure Model*”. International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 5(5), 901–911.
- Tuhta S., Gunday F., Aydın H.(2019a). “Numerical Algorithms for System Identification of Benchmark Steel Bridge”. ISTE-CE'2019- International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering [Uluslararası]

- Tuhta S., Gunday F., Aydın H.(2019c). System Identification of Model Steel Bridge with Fuzzy Logic, International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS) | Volume V, Issue I, January 2020|ISSN 2454-6194
- Tuhta, S., Gunday, F., Aydın, H. (2019b). *Numerical Algorithms for System Identification of Benchmark Steel Structure*. Presented at the iSTE-CE'xx2019- International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering.
- Tuhta S., Gunday F., Aydın H.(2020e). “System Identification of Model Steel Bridge with Genetic Algorithms”. International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS) | Volume V, Issue I, January 2020|ISSN 2454-6194
- Tuhta S., Aydın H.,Gunday F.(2020a). “Updating For Structural Parameter Identification of the Model Steel Bridge Using OMA, International Journal of Latest Technology in Engineering”. Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume IX, Issue III, March 2020 | ISSN 2278-2540
- Tuhta S.,Gunday F., Aydın H.(2020b). Update of Structural Parameters on the Bench-Scale Aluminum Bridge Model Using Ambient Vibration, International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume IX, Issue IV, April 2020 | ISSN 2278-2540
- Tuhta, S., Gunday, F., Aydın, H., Alalou, M. (2020m). *Modal analysis of model steel bridge by finite element method*, 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2020) 07-09 October 2020 , Gaziantep, Turkey [Uluslararası]
- Tuhta, S., Gunday, F., Aydın, H., Alalou, M. (2020n). *Modal analysis of steel test structure reinforced with cable elements by finite element method*, 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2020) 07-09 October 2020, Gaziantep, Turkey [Uluslararası]
- Van Overschee, P. and De Moor, B. (1996), *Subspace identification for linear systems: theory, implementation and applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Ventura C.E., Turek M. (2005), *Fifteen Years of Ambient Vibration Testing in Canada*, Proceedings of the First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, p. 105-115.
- Yetkin, M. (2016). Betonarme Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Elâzığ
- Y. Matsumoto ve H. Yamaguchi,(2010) *A field investigation of vibration-based structural health monitoring in a steel truss bridge*, ABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, August 8-10, 2010, Dhaka, Banglades
- Yu, D.J. and Ren, W.X. (2005), “EMD-based stochastic subspace identification of structures from operational vibration measurements”, *Eng. Struct.*, **27**(12), 1741-1751.
- Ventura C., *Introduction to Operational Modal Analysis*, ISBN: 978-1-118-53515-8 July 2015 376 Pages
- Wei-Xin Ren; Tong Zhao; and Issam E. Harik, M.ASCE (2004) *Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge*,Journal of Structural Engineering Volume 130 Issue 7 - July 2004
- Wei-Xin Ren, Xue-Lin Peng, *Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests*, Computers and Structures 83 (2005) 536–550, www.elsevier.com/locate/compstruc

- Whelan, M.J., Gangone, M.V., Janoyan, K.D. ve Jha, R., (2009). *Real-Time Wireless, Vibration Monitoring for Operational Modal Analysis of an Integral Abutment Highway Bridge*, Engineering Structures, 31, 2224-2235.
- Wikipedia (2020). Sistem tanılama tekniği. Erişim:(11 Ekim 2020), <https://tr.wikipedia.org/wiki?curid=184497>
- Zadeh, L.A., (1962). *From circuit theory to system theory*, IRE Proceedings, 50(5), 856-865.
- Zenunovic, D., Topalovic, M. And Folic, R. (2015). *Identification of modal parameters of bridges using ambient vibration measurements*. Shock and Vibration, Volume 2015, Article ID 957841, 21 pages.
- Zhang, L. (2013). *From traditional experimental modal analysis (EMA) to operational modal analysis (OMA), an overview*. 5th International Operational Modal Analysis Conference, 13-15 May, Curran Associates, 1-14, Guimaraes, Portugal.



2-Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, Alalou M., “MIMO System Identification of Machine Foundation Using N4SID”, International Journal of Interdisciplinary Innovative Research & Development, **7 / 2019** [Uluslararası]

3-Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, “System Identification of Model Steel Bridge with Genetic Algorithms”, International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS) | Volume V, Issue I, **January 2020**|ISSN 2454-6194[Uluslararası]

4- Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, “System Identification of Model Steel Bridge with Fuzzy Logic”, International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS) | Volume V, Issue I, **January 2020**|ISSN 2454-6194 [Uluslararası]

5- **Aydın H.**, “Obtaining Modal Parameters in Steel Model Bridge by System Identification Using Artificial Neural Networks”, International Journal of Trend in Scientific Research and Development(IJTSRD),Volume 4 Issue 2,**February 2020** Available Online:www.ijtsrd.com e-ISSN:2456-6470 [Uluslararası]

6- Tuhta S., **Aydın H.**,Gunday F., “Updating For Structural Parameter Identification of the Model Steel Bridge Using OMA”, International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume IX, Issue III, March 2020 | ISSN 2278-2540 [Uluslararası]

7- Tuhta S.,Gunday F., **Aydın H.**, “Update of Structural Parameters on the Bench-Scale Aluminum Bridge Model Using Ambient Vibration, International Journal of Latest Technology in Engineering”, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume IX, Issue IV, April 2020 | ISSN 2278-2540 [Uluslararası]

8- Sertac Tuhta, Furkan Gunday, **Hakan Aydın**, "SUBSPACE IDENTIFICATION USING N4SID METHODS APPLIED TO MODEL CONCRETE CHIMNEY", JournalNX - A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal, Volume 6, Issue 6, ISSN: 2581-4230, Page No. 415-423, **June -2020** [Uluslararası]

Konferans Bildirisi:

1- Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, “Numerical Algorithms for System Identification of Benchmark Steel Bridge” , 7 /2019, ISTE-CE'2019- International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering [Uluslararası]

- 2-Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, “Numerical Algorithms for System Identification of Benchmark Steel Structure”, 7 /2019, ISTE-CE'2019- International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering [Uluslararası]
- 3- Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, Pehlivan Ç., “Investigation of CFRP Retrofitting Effect on Masonry Dome on Period and Frequency Using Finite Element Method”, 6 /2019, idRc2019-International Disaster & Resilience Congress, Eskişehir [Uluslararası]
- 4- Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, Pehlivan Ç., “Investigation of CFRP Retrofitting Effect on Masonry Dome on Stress Using Finite Element Method”, 6 / 2019,idRc2019- International Disaster & Resilience Congress, Eskişehir [Uluslararası]
- 5- KasıMZade A., Tuhta S., **Aydın H.**, Gunday F., “Determination of Modal Parameters on Steel Model Bridge Using Operational Modal Analysis”, 10 / 2019, 8th International Steel Structures Symposium, Konya [Uluslararası]
- 6- KasıMZade A., Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, “Investigation of Modal Parameters on Steel Structure Using FDD from Ambient Vibration”, 10 / 2019 , 8th International Steel Structures Symposium, Konya [Uluslararası]
- 7- KasıMZade A., Tuhta S., **Aydın H.**, Gunday F.,”Investigation of Modal Parameters on Steel Model Bridge Using EFDD Method”, 11/2019,Techno-Science, 2nd International Conference on Technology and Science, Burdur [Uluslararası]
- 8- KasıMZade A., Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**,”Extraction of Modal Parameters on Steel Structure Using EFDD”, 11/2019, Techno-Science, 2nd International Conference on Technology and Science ,Burdur [Uluslararası]
- 9- Sertaç Tuhta, Furkan Gunday, **Hakan Aydın**, Mohammad Alalou, “Modal analysis of model steel bridge by finite element method”, 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2020) **07-09 October 2020**, Gaziantep, Turkey [Uluslararası]
- 10-Sertaç Tuhta, Furkan Gunday, **Hakan Aydın**, Mohammad Alalou, “Modal analysis of steel test structure reinforced with cable elements by finite element method”, 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and

Technology (EurasianSciEnTech 2020) **07-09 October 2020**, Gaziantep, Turkey
[Uluslararası]

11- Sertac Tuhta, Furkan Gunday, **Hakan Aydın**, “Nonlinear System Identification Of Model Concrete Chimney Using Hammerstein–Wiener Models ”, Proceeding of Global Congress of Contemporary Study- A Multidisciplinary International Scientific Conference Hosted from Pune, M.S. India www.econferenceglobe.com. Global Congress of Contemporary Study , **November 7th, 2020** [Uluslararası]

12- Sertac Tuhta, Furkan Gunday, **Hakan Aydın**, “Example For Nonlinear System Identification Of Model Masonry Retaining Wall With Hammerstein–Wiener Models”,Proceeding of A Multidisciplinary International Scientific Conference on Science, Technology, Education and Humanities Hosted from Ukraine on November 30th, 2020, www.econferenceglobe.com, **November 30th, 2020** [Uluslararası]

13- Sertac Tuhta, Furkan Gunday, **Hakan Aydın**, “Examination Of Nonlinear System Identification Parameters Of Model Smokestack Using Hammerstein – Wiener Model”, International Vritual Conference On Innovative Thoughts,Research Ideasand Inventions in Sciences Hosted from Newyork, USA, <http://euroasiaconference.com>, January 20th, 2021 [Uluslararası]

Konferans Sunumu:

1 - Kasımzade A., Tuhta S., **Aydın H.**, Gunday F., “Investigation of Modal Parameters on Steel Model Bridge Using EFDD Method”, 11/2019,Techno-Science, 2nd International Conference on Technology and Science ,Burdur [Uluslararası]

2 - Kasımzade A., Tuhta S., Gunday F., **Aydın H.**, “ Extraction of Modal Parameters on Steel Structure Using EFDD”, 11/2019, Techno-Science, 2nd International Conference on Technology and Science, Burdur [Uluslararası]