

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK MODEL KÖPRÜNÜN YAPI SAĞLIĞININ
GÖZLENMESİ

Merve GÜNDOĞAN

Şubat, 2012
İZMİR

ÇELİK MODEL KÖPRÜNÜN YAPI SAĞLIĞININ GÖZLENMESİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı**

Merve GÜNDOĞAN

**Şubat, 2012
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MERVE GÜNDOĞAN, tarafından PROF. DR. SERAP KAHRAMAN yönetiminde hazırlanan “ÇELİK MODEL KÖPRÜNÜN YAPI SAĞLIĞININ GÖZLENMESİ” başlıklı tez tarafımdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. SERAP KAHRAMAN

Danışman



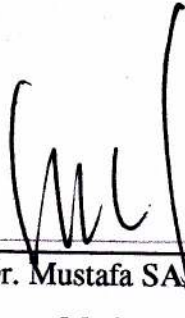
Doç. Dr. Bihnur Görür Kural

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Özgür Özcelik

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalı, Yapı Yüksek Lisans tez çalışmam süresince, yakın ilgi ve değerli yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimleriyle destek olan, değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serap KAHRAMAN’a ve değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Özgür ÖZÇELİK’e verdikleri destek için teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Deney çalışmasındaki yardımlarından dolayı Mohammad SALAVATI’ye teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi destekle yanımda olan Sevgili Anneme, Babama ve canım Ağabeyime, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Merve GÜNDOĞAN

ÇELİK MODEL KÖPRÜNÜN YAPI SAĞLIĞININ GÖZLENMESİ

ÖZ

İnşaat mühendisliği yapıları, inşa edildikleri andan itibaren çeşitli kuvvetler etkisi altında kalmaktadır. Bu kuvvetler, deprem, fırtına, trafik yükü, patlama vb. çok çeşitli etkilere sahiptir. Yapının bu gibi kuvvetlerin etkisi altında nasıl davranacağını önceden saptamak, şu anki durumunu değerlendirmek ve varsa hasarları tespit edebilmek için yapı sağlığının gözlenmesi işlemleri yapılmaktadır. Sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasında, çelik model bir köprünün yapı sağlığının gözlenmesi süreci içerisinde yer alan sistem tanımlama ve köprünün şu anki davranışını tespit etme işlemi yapılmıştır. Yapı sağlığının gözlenmesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiş, fakat sadece NExT-ERA ve ERA sistem tanımlama yöntemi deney sonuçlarının analizinde kullanılmıştır. İlgili yöntemler Matlab programı kullanılarak programlanmıştır. Bu çalışma sonucunda, modal parametreler (doğal frekanslar, mod şekilleri, sönüm oranı) elde edilmiştir. Aynı zamanda SAP2000 programı kullanılarak köprünün sayısal bir modeli oluşturulmuş ve bu sayısal model kalibre edilmiştir. Daha sonra modal analizi yapılan çelik köprünün, modal parametreleri bulunmuştur. NExT-ERA ve ERA analizinden elde edilen deney sonuçlarından çıkan mod şekilleri ve SAP2000 programından elde edilen mod şekilleri arasındaki karşılaştırma, modal güvenlik kriteri (MAC) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. İki farklı sistem tanımlama yöntemiyle elde edilen doğal frekanslar da birbirine yakın değerlerdedir. Bu yöntemlere ek olarak çapraz güç spektrum yöntemi ile tahmini mod şekilleri ve doğal frekanslar elde edilmiştir. Bir diğer modal parametre olan sönüm oranı ise, NExT-ERA, ERA, yarım güç bant kalınlığı yöntemi ve logaritmik azalma yöntemi ile hesaplanmıştır. Fakat sönüm oranı sonuçlarının çeşitli etkenler sebebiyle birbirinden farklılık gösterdiği görülmüştür. Buna karşın bulunan sonuçlar makul sayılabilecek seviyelerdedir.

Anahtar Sözcükler: Çelik model köprü, deneysel modal analiz, NExT, ERA, modal güvenlik kriteri, modal parametrelerin tahmini, sistem tanımlama, yapı sağlığının gözlenmesi.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF STEEL BRIDGE MODEL

ABSTRACT

Civil engineering structures are exposed to various dynamic effects such as earthquakes, storms, traffic loads, blast etc during their lifetime. So Structural Health Monitoring techniques are used on structures to determine how to behave against these effects, to evaluate the current condition of structures right now and to detect damage if there is any. In this M. Sc. thesis, system identification of a model steel bridge has been performed and calibrated finite element model of the bridge is obtained. Although there are many different system identification types, in this study only NExT-ERA and ERA methods are used. Methods are programmed using Matlab. As a result of this study, modal parameters (mode shapes, natural frequencies, damping ratios) of the structure has been estimated. On the other hand, modal assurance criteria is calculated to mode shapes between NExT-ERA, ERA results and SAP2000 analysis results. It has been shown that mode shapes are in good agreement with each other. Natural frequencies, obtained from NExT-ERA and ERA, are also in good agreement. In addition to these methods, mode shapes and natural frequencies have been estimated by using Cross Power Spectrum method. Besides NExT-ERA and ERA methods, to further estimate damping ratios half-power bandwidth, logarithmic decrement methods are used. Damping results estimated using different methods are found to be different from each other. In spite of this, estimated damping ratio results are reasonable.

Keywords: Steel bridge model, experimental modal analysis, NExT, ERA, modal assurance criteria, estimation modal parameters, system identification, structural health monitoring.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç	1
1.2 Kapsam	2
BÖLÜM İKİ – YAPI SAĞLIĞININ GÖZLENMESİ.....	4
2.1 Yapı Sağlığı Gözlenmesi Süreci.....	5
2.1.1 İşlevsel değerlendirme.....	5
2.1.2 Veri toplama, normalleştirme ve temizleme.....	6
2.1.3 Özellik Seçimi, Bilgi Özetleme.....	6
2.1.4 Seçilen farklı özellikler için istatistiksel model geliştirme.....	7
2.2 Sistem Tanımlama.....	8
2.2.1 Zorlanmış Kuvvet ile Uyarım.....	10
2.2.2 Ortamsal Titreşim.....	11
2.3 Sistem Tanımlama Yöntemleri.....	11
2.3.1 Doğal Uyarım Tekniği ve Özsistem Realizasyonu Algoritması, NExT-ERA.....	12
2.3.2 Çoklu Doğal Uyarım Tekniği ve Özsistem Realizasyonu Algoritması, MNExT-ERA.....	14
2.3.3 Veri-sürüm Stokastik Altuzay Tanımlama, SSI-DATA.....	14
2.3.4 Deterministik - Stokastik Altuzay Tanımlama, DSI.....	14
2.3.5 Gözlemlenebilir Kalman Filtresi-Özsistem Realizasyonu Algoritması OKID-ERA.....	15
2.3.6 Genel Realizasyon Algoritması, GRA.....	16

BÖLÜM ÜÇ – DOĞAL UYARIM TEKNİĞİ NEXt.....17

3.1 Welch-Bartlett Yöntemi.....	19
3.1.1 Bartlett Yöntemi.....	19
3.1.2 Welch Yöntemi.....	19

BÖLÜM DÖRT – ÖZ SİSTEM REALİZASYONU ALGORİTMASI ERA.....21

4.1 Durum-Uzay Gösteriminin Tanımlanması.....	21
4.2 ERA, Özsistem Realizasyonu Algoritması.....	24
4.3 Modal Güvenlik Kriteri.....	28

BÖLÜM BEŞ – NEXt-ERA SİSTEM TANIMLAMA SÜRECİNDE GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULMASI GEREKEN ÖZELLİKLER29

5.1 Kayıt Seçimi.....	30
5.2 Örnekleme Frekansı, FFT Uzunluğu, Kayıt Uzunluğu, Referans Kanal Seçimi.....	30
5.3 Hankel Matrisinin Satır ve Sütunlarının Oluşturulması.....	32
5.4 Model Derecesi ve Stabilizasyon Diyagramı.....	33

BÖLÜM ALTI – ÇAPRAZ GÜÇ SPEKTRUM YÖNTEMİ İLE MOD ŞEKİLLERİNİN ELDE EDİLMESİ.....35

6.1 Güç Spektrum.....	35
6.2 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT).....	36
6.3 Çapraz Güç Spektrum.....	36
6.4 Mod Şekillerinin Çapraz Güç Spektrum Yöntemi ile Elde Edilmesi.....	38

BÖLÜM YEDİ – SÖNÜM ORANI HESAPLARI.....39

7.1 Logaritmik Azalma (LA) Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesabı.....	39
7.2 Yapılarda Sönüm Oranının Yarım-Güç Bant Kalınlığı Yöntemi ile Bulunması.....	40

BÖLÜM SEKİZ – DENEY ÇALIŞMASI.....41

8.1 Hazırlık Aşaması ve Deneyler.....	41
8.2 Mod Şekilleri.....	54
8.2.1 Çelik Model Köprü SAP 2000® Modal Analiz Sonuçları.....	54
8.2.2 Çelik Model Köprü NExT -ERA Yöntemi Sonuçları.....	56
8.2.3 Çelik Model Köprü ERA (8 sensör) Yöntemi Mod Şekilleri Sonuçları.....	58
8.2.4 Çelik Model Köprü Çapraz Güç Spektrum Yöntemi Mod Şekilleri Sonuçları.....	60
8.3 Sönüm Oranı Hesap Sonuçları.....	69
8.3.1. Yarım Güç Bant Kalınlığı Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesap Sonuçları.....	70
8.3.2 Logaritmik Azalma Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesabı Sonuçları.....	73
8.3.3 NExT-ERA, ERA Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesabı Sonuçları.....	75
8.4 Değerlendirme.....	76

BÖLÜM DOKUZ – SONUÇ VE ÖNERİLER.....77

9.1 Sonuç.....	77
9.2 Öneriler.....	78

KAYNAKLAR.....80

EKLER.....	84
EK 1 – NExT Yönteminin Teorik Alt Yapısı	84
EK 2 – Çapraz Korelasyon Fonksiyonu Hesap Yöntemi.....	89
EK 3 – Şekil Listesi.....	90
EK 4 – Tablo Listesi.....	94
EK 5 – Semboller Listesi.....	95

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Amaç

İnşaat mühendisliği, havacılık ve uzay mühendisliği ile makine mühendisliği alanlarında hasar tanımlama işleminin yerine getirilmesi sürecine, *yapı sağlığının gözlenmesi (Structural Health Monitoring-SHM)* ismi verilmektedir. Sürecin tanımlanmasında hasar, malzemedeki değişimler ya da sistemin çalışmasını etkileyen, geometrik şeklindeki değişimler olarak da belirtilmektedir. Yapı sağlığının gözlenmesi alanındaki çalışmaların, gelişen teknoloji ile birlikte büyük artış gösterdiği görülmektedir. Bu konuya verilen önemin artmasının sebebi, yapı sağlığı gözlenmesinin yaşam-güvenlik ve ekonomik fayda potansiyeli bulunmasından kaynaklanmaktadır. Deprem hattı üzerinde bulunan ülkemizde, yapı stoğunun değerlendirilmesi amacıyla bu konuya ilginin artması beklenmektedir. Çünkü şiddetli bir deprem sonrasında, yapıların bir anda yok olması ülke açısından maddi ve manevi büyük bir kayıptır. Bu kayıpları yaşamamamız adına inşaat mühendisliği olarak, yapılarımızın değerlendirilmesi, deprem vb. etkiler altında ayakta kalabilmesi için bu çalışmalar yapılmalıdır.

Son yıllarda, yapı sağlığının gözlenmesinin öneminin artmasının sebeplerinden biri inşaat mühendisliği, bilimsel araştırma çevrelerinin; hangi hasar ilk olarak tanımlanabilir? yapının kullanılabilir ömrü ne kadar kalmıştır? gibi soruların cevaplanabilmesi için yöntemler geliştirmek konusundaki çalışmalarıdır. Bu çalışmalar giderek artmaktadır. Gerek yapının doğal ve yapay etkilere karşı sağlığı, gerekse ekonomik açıdan uzun ömürlülüğü gibi etkenlerle bu konuya önem verilmektedir.

Yapılarda hasar, en genel tanımıyla, sistemin mevcut ya da gelecekteki performansını etkileyen değişimler olarak tanımlanmaktadır. Hasarın varlığından söz edilebilmesi için sistemin iki halinin karşılaştırılması gerekmektedir. Genelde karşılaştırma için seçilen bu hal, ilk olarak sistemin başlangıç hali ve hasarsız

olduğu durum olarak kabul edilmektedir. Diğer durum ise, sistemde gözlenmesi istenen herhangi bir andır. Bu bölüm, yapısal ve mekanik sistemlerde hasar tanımlaması konu başlığında anlatılmaktadır.

Bütün sistemlerde hasarlar malzeme düzeyinde başlamaktadır. Sistemdeki hasar arttıkça bozulma olarak tanımlanan bir değere ulaşmaktadır. İnşaat mühendisliği yapıları ömürleri boyunca doğal ve yapay türde çeşitli etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler yapının dinamik karakteristiğini ve dolayısıyla kullanma ömrünü etkileyebilen türde kuvvetlerdir. Sunulan çalışmanın amacı, literatürde yer alan bilgiler ışığında, laboratuvar ortamında çelik model bir köprüde yapı sağlığının gözlenmesinin uygulanmasıdır. Tez kapsamında yapı sağlığının gözlenmesi sürecinin bir bölümü olan, sistem tanımlama ve modal parametreler elde edilmiştir.

1.2 Kapsam

Sunulan çalışmanın ikinci bölümü, yapı sağlığının gözlenmesi konusunu içermektedir. Bu bölümde literatürde bulunan çalışmalar, sistem tanımlama, sistem tanımlama yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, NExT Doğal Uyarım Tekniği (Natural **Excitation Technique**) ve Welch-Bartlett yöntemleri açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde **durum-uzay** gösterimi aşamalarıyla açıklanmış, Özsistem Realizasyonu Algoritması ERA (**Eigensystem Realization Algorithm**) anlatılmıştır. Sistem tanımlamada bulunan modların doğruluğunu belirleyen modal güvenlik kriteri açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, sistem tanımlama yöntemlerinden olan NExT-ERA sistem tanımlama süreci ve bu süreçte göz önünde bulundurulması gereken özellikler anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, çapraz güç spektrum yöntemi ile mod şekillerinin elde edilmesi açıklanmıştır. Bu yöntemin kullanılmasının amacı, NExT-ERA ve ERA yöntemi ile elde edilen mod şekillerinin doğruluğunu sağlamaktır.

Yedinci bölümde deneyde kullanılan sönüm oranı hesap yöntemleri anlatılmıştır. NExT-ERA, ERA yönteminden elde edilen sönüm oranlarını karşılaştırmak amacıyla yarım güç bant kalınlığı ve logaritmik azalma yöntemleri kullanılarak sönüm oranlarının nasıl hesaplanacağı anlatılmıştır

Sekizinci bölüm, yapılan deney çalışması ve elde edilen mod şekilleri, sönüm oranları, frekansların gösterildiği grafikleri içermektedir. NExT-ERA, ERA' dan elde edilen modal parametrelerin şekil ve grafikleri, çapraz güç spektrumundan elde edilen mod şekilleri, logaritmik azalma yöntemi, yarım güç bant kalınlığı yönteminden elde edilen sönüm oranı grafikleri bu bölümde yer almaktadır.

Dokuzuncu bölümde yapılan tez çalışmasının sonuçları açıklanmış, değerlendirmelerde bulunulmuştur. Ayrıca çalışmanın devamında yapılabilecekler hakkında önerilere yer verilmiştir.

BÖLÜM İKİ

YAPI SAĞLIĞININ GÖZLENMESİ

Makine ve inşaat mühendisliğinde hasar tanımlanmasının yerine getirilme sürecinin alt yapısını *Yapı Sağlığının Gözlenmesi* konusu oluşturmaktadır. Bina gözlenmeden hasarın varlığı ya da yokluğu çalışmasına girmek mümkün değildir. Yapı sağlığının gözlenmesi süreci , bir yapı veya mekanın sisteminin periyodik olarak gözlenmesini, hasar-hassasiyet özelliklerinin ölçülen değerlerden elde edilmesini ve bu özelliklerin istatistiksel olarak analiz edilmesi ile sistemin şu anki sağlık durumunun belirlenmesini kapsamaktadır. Uzun zaman yapı sağlığı gözlenmesinde, süreçte elde edilen çıktı periyodik olarak güncellenmekte ve işlenmektedir. Deprem, patlama ya da hortum gibi aniden gelişen çok uç durumlarda yapı sağlığı gözlenmesi hızlı durum izlenmesinde kullanılmaktadır (Farrar ve Worden, 2007, Farrar ve Doebling, 2001) .

Yapı sağlığının gözlenmesini (YSG) oluşturan süreci tanımlayan çok sayıda akademik çalışma ve makale bulunmaktadır. Doğal Uyarım Tekniği *NExT (Natural Excitation Technique)* ilk olarak James ve diğer. (1993) çalışmasında gösterilmiştir. Yöntem rüzgâr türbinlerinin yerinde gözlenmesinde kullanılmış, sistemin modal parametreleri *ortamsal titreşim* verileri yardımıyla elde edilmiştir. NExT yöntemini tamamlayan Özsistem Realizasyonu Algoritması *ERA (Eigensystem Realization Algorithm)* ise, NExT yönteminden elde edilen, sistemin serbest titreşim tepkisiyle benzerlik gösteren çapraz-korelasyon fonksiyon değerlerini kullanarak sistemin indirgenmiş dinamik modelini tahmin etmektedir (Juang ve Pappa, 1985). Sistem tanımlama ve yapı sağlığının gözlemlenmesi ile ilgili diğer önemli çalışmalara örnek olarak; köprü türü yapıların ortamsal titreşim verilerinin (trafik yükü, rüzgar yükü, mikro-tremor v.b.) kullanıldığı, köprünün modal parametrelerinin elde edildiği Farrar ve James (1997) çalışması verilebilir. Caicedo ve diğer. (2004) çalışmasında, her iki yönde iki açıklıklı, dört katlı çelik model bir yapı, laboratuvar ortamında, yapı sağlığı gözlenmesi işlemine tabi tutulmuş, NExT-ERA yöntemi kullanılarak hasar tespiti yapılmıştır. Yine Nayeri ve diğer. (2007) makalesinde, 1994 Northridge depreminden etkilenen 6 katlı bir bina, NExT-ERA yöntemi kullanılarak

yapı sağlığı gözlenmesi sürecine tabi tutulmuş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Özsistem Realizasyonu Algoritması (ERA)'nın aşamaları ve modal güvenlik kriteri (MAC) De Callafon ve diğer. (2008) makalesinde açıklanmaktadır. Ortamsal titreşim yardımı ile sistem tanımlama hakkında diğer bir çalışmaya da, Giraldo ve diğer. (2009) makalesi örnek olarak verilebilir. Genel olarak sistem tanımlama yöntemlerini uygularken tüm sürece ait dikkat edilmesi gereken noktaların ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı Caicedo (2011) çalışması, süreç hakkında önemli bilgiler vermektedir. Modal parametrelerden sönüm oranının yarım güç bant kalınlığı yöntemi ile elde edilmesi, Papagiannopoulos ve Hatzigeorgiou (2011) makalesinde detaylı olarak açıklanmaktadır. Yapı sağlığının gözlenmesi süreci, 1996-2001 yılları arasında bu alanda yapılan çalışmaların anlatıldığı Sohn, H. ve diğer. (2004) raporunda da yer almaktadır.

2.1 Yapı Sağlığının Gözlenmesi Süreci

Yapı sağlığı gözlenmesi süreci, *işlevsel değerlendirme, veri toplama, normalleştirme ve temizleme, özellik seçimi, bilgi özetleme, seçilen farklı özellikler için istatistiksel model geliştirme* aşamalarından oluşmaktadır.

2.1.1 İşlevsel Değerlendirme

İşlevsel değerlendirme, mevcut yapının durumunun değerlendirilmesi için uygulanan yapı sağlığının gözlenmesi işleminin ilk basamağıdır. Bu işlem sırasında sisteme aşağıdaki soruların yöneltmesi ile alınacak cevaplar önemlidir (Sohn, H. ve diğer., 2004) :

- Yapı sağlığının gözlenmesinin yaşam güvenliği ve ekonomik doğruluğu nedir?
- Sistem incelendiği anda ve çoklu hasar oluşabilme durumunda hasar nasıl tanımlanmaktadır? Bu iki durumdan hangisi daha tehlikelidir?
- Gözlenecek sistem fonksiyonunda işlevsel ve çevresel durumlar nelerdir?
- İşlevsel çevreden elde edilen verilerin sınır değerleri nelerdir?

2.1.2 Veri toplama, normalleştirme ve temizleme

Yapı sağlığının gözlem işleminin en önemli basamaklarından biri veri toplama işlemidir (Sohn, H. ve diğer., 2004). Bu basamak, sisteme verilecek uyarım tipinin seçildiği, kullanılacak olan sensör tipinin, modelinin, sayısının, hangi noktalara yerleştirileceğinin, hangi yazılım ve donanım ürünlerinin kullanılacağına belirlendiği aşamadır. Göz önünde bulundurulması gereken çok sayıda faktörden ilki en ekonomik maliyetle iyi gözlemin yapılması, sonuca ulaşılmasıdır. Diğer bir önemli husus ise, hangi verinin sistem tanımlamada kullanılacağıdır. Sağlıklı bir veri kaydı alabilmek, sistem tanımlamada önemli bir yer tutmaktadır. Örneğin aşırı gürültü içeren ya da sistemin baskın frekansının bulunduğu bir sinyal, modal tanımlamada kullanılırsa, hatalı sonuçlar elde edilmektedir. Yine aynı şekilde verilerin temizlenmesi de önemli bir bölümü oluşturmaktadır. Zira sensörden veri alındığı sırada, dış ortam kaynaklı değişimler olabilmekte ve bu etkilerin mümkün olduğunca sinyalden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu durumla, tez kapsamında sürdürülen deneyler esnasında çok kez karşılaşılmış ve deney tekrarlanmak zorunda kalınmıştır. Sunulan çalışmada, filtreleme işlemi ile sinyalde bulunan gürültü etkisi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Önemli noktalardan biri de girdi verileri sonucu oluşan, ölçülen tepki değerlerinin normalleştirilmesidir. Ölçüm cihazları, veri işlemleri, sistem tanımlama yöntemleri vb. farklı türlerde olabilmektedir. Önemli olan ilgili istatistiksel yöntemlerin uygulanabileceği bir sinyal elde etmektir.

2.1.3 Özellik Seçimi, Bilgi Özetleme

Özellik seçimi ve bilgi özetleme, yapı sağlığının gözlem sürecinin en ilgi çeken aşamasıdır (Sohn, H. ve diğer., 2004). Bu aşamada yapı sağlığının gözlenmesi işlemi bitmiştir. Sonuç olarak, hasarlı yapı ile hasarsız yapı arasındaki fark belli olmaktadır. Özellik seçimi süreci, verinin özetlenmesi gibidir. En iyi hasar tanımlama özelliğinin ne olduğu duruma göre değişmektedir. Bunlardan en önemlisi, sistemden gözlenen ölçülmüş tepki değerlerinden **modal parametrelerin (mod şekli, doğal frekans, sönüm oranı)** elde edilmesidir. Hasar tanımlaması için geliştirilen bir diğer yöntem de planlı kusurları uygulamaktır. İlk olarak dinamik hareketleri tahmin edilen

yapının, gerçek durumdaki parametrelerinin anlaşılabilmesi gerekmektedir. Yine bu yöntemde, yapının gerçek yaşamında planlandığı şekilde davranıp davranmadığı kontrol edilebilmektedir. Deneysel verilerden oluşturulan analitik çözümler ve sistemin sonlu elemanlar ile oluşturulmuş modeli de bu aşamada önemli bir basamaktır. Analitik yöntemler, nümerik deneylerde bilgisayar simülasyonu olarak kullanılabilir. Bu süreç, uyarılmış-hasar testleri, yorgunluk testleri, korozyon artışı ya da ivmeden kaynaklı ısı çevrimi hasarlarının belirli tiplerini kapsamaktadır. Birçok analitik ve deneysel çalışma, hasar tanımlanmasında kullanılabilir. Bazen de analitik olarak hesaplanan sonuçlar, deneysel olarak elde edilen veriler ile karşılaştırma yapabilmek amacı ile birlikte kullanılabilir. Yapı sağlığının gözlenmesi işleminde, yapının dinamik özelliklerini içeren bilgilere ihtiyaç olmaktadır. Veri yoğunluğu yararlı ve gereklidir. Çünkü yapı sağlığı gözlenmesi işlemi bazen kullanım ömrü bitmiş olan yapılara da uygulanmaktadır. İyi bir gözlem yapabilmek için, doğru seçilmiş verilere ve onların değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.

2.1.4 Seçilen farklı özellikler için istatistiksel model geliştirme

Bu bölüm, yapının hasarlı ve hasarsız durumları için istatistiksel model geliştirme aşamasını kapsamaktadır. İstatistiksel model geliştirme, yapının hasarlı durumunu ölçmek için geliştirilen algoritmaların uygulamasıyla ilgilidir. Hasarlı ve hasarsız durum için veriler elde edilebildiğinde, istatistiksel algoritmalar, genel tanımlamada *denetlenen bilgi* olarak yer almaktadır. Grup sınıflandırması ve regresyon analizi de, *denetlenen bilgi* algoritmasının bölümlerindendir. *Denetlenmeyen bilgi* algoritması ise, yapının hasarlı durumu hakkında bilgi içermemektedir. Aykırı değer ya da yeni bir tespit, *denetlenmeyen bilgi* algoritmasının temelini oluşturmaktadır. Bütün algoritmalar hasar tanımlama sürecinde ölçülen ya da elde edilen verilerin istatistiksel dağılımını analiz etmektedir. Sistemin hasar durumu beş adımlık bir süreçte ifade edilebilmektedir:

- i. Var oluş : Sistemde bir hasar var mı?
- ii. Yer : Hasar sistemin hangi noktasında bulunuyor?

- iii. Tür : Ne çeşit bir hasar var?
- iv. Derece : Hasarın derecesi nedir?
- v. Tahmin : Kullanılabilir yapı ömrü ne kadar kalmıştır?

Yapı sağlığının gözlenmesi işleminin, hasar tanımlanması aşamasının tamamlanması bu beş soruya verilen cevaplarla mümkün olmaktadır. *Denetlenmeyen bilgi* algoritmasında, hasar olup olmadığı, varsa hasarın yeri ve çeşidi nedir sorusu cevaplanmalıdır. Denetlenen bilgi algoritmasına uygulandığında ve analitik modelle birleştirildiğinde ise, istatiksel süreç, hasarın türünü belirlemekte daha yardımcı olmakta, yapının kullanılabilir ömrünü ölçmekte kullanılmaktadır. Kurulan bu istatiksel modeller:

- Hata I: Hasar olmadığı halde hasar varmış gibi gösterilmesi
- Hata II: Hasar olduğu halde hasar yokmuş gibi gösterilmesi

türünden yanlış hasar belirtilerini minimize etmek için kullanılmaktadır.

Hata I'de yer alan hasarlar, istenmeyen hasarlardır. Gereksiz zaman kaybına yol açmaktadır ve gelir kaybına neden olmaktadır. Ve yine sistem gözleminin güvenilirliğini kaybetmesine yol açmaktadır. Daha önemlisi, eğer Hata II 'deki gibi ikinci tip yanlış sınıflandırma olursa, sistemin güvenilirliği sorgulanır hale gelmiş demektir. Birçok örnek kabul edilmiş algoritma, birinin diğerinden daha çok hata sonucu vermesine izin verir. Bu işlevsel değerlendirmede karar verilmesi gereken bir kısımdır.

2.2 Sistem Tanımlama

Yapıda hasar belirlenmesi, *hasarın varlığının belirlenmesi, yerinin saptanması ve büyüklüğünün tahmini* işlemini kapsamaktadır. Genel hasar tanımı prosedürü ise yapının ömrü boyunca maruz kaldığı tekrarlı titreşimleri de içine alan bir işlemdir. Deneysel modal analiz (**Experimental Modal Analysis, EMA**) , sistemin dinamik karakteristiklerinin tanımlanması ve beraberinde hasarın belirlenmesi için geliştirilmiştir. Deneysel modal analizde, hasarın tanımlanması verilerin doğruluğuna bağlı bir durumdur.

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. Yapı sağlığının gözlenmesinde (YSG) modal güncelleme tekniklerinden bahsedilmektedir. Bu yöntemler, **girdi-çıkı** ve **sadece-çıkı** sistem tanımlama yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır (Moaveni, 2007).

Girdi-çıkı sistem tanımlama yöntemleri için hem sisteme uygulanan kuvvetin ölçülmesine, hem de sistemin bu uygulanan kuvvet sonucu verdiği tepkinin (ivme, gerilme, deplasman vb.) ölçülmesine ihtiyaç vardır. **Sadece-çıkı** sistem tanımlama yönteminde ise, yapıya uygulanan kuvvetin ölçülmesine gerek bulunmamaktadır. Bu tür sistem tanımlama yöntemleri inşaat mühendisliği yapıları için daha uygundur. Çünkü inşaat mühendisliği yapılarında sistemi harekete geçirecek bir uyarıyı vermek hem çok zor hem de maliyetli bir işlemdir. Bu yüzden uyarım, bazı özel karakteristikler ile stokastik varsayılmaktadır.

Birçok inşaat mühendisliği yapısında kontrollü bir şekilde sistemin uyarılması zor olmaktadır. Çünkü gözlem yapılması istenen yapılar genelde büyük yapılardır. Ayrıca köprü gibi yapılarda sistemden *trafik yükü*, *rüzgar yükü* gibi etkileri ayrıştırarak gözlem yapmak zor, neredeyse olanaksızdır. Bunlara ek olarak yapı sahipleri de gözlem yapılması için, sistemin kullanıma kapatılıp gözlem yapılmasına ekonomik sebepler ile karşı çıkmaktadırlar.

Örneğin çok kalabalık bir köprü gözlem amacıyla kullanıma kapatıldığında, önemli trafik problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden sadece-çıkı modal tanımlama yöntemi ortamsal titreşimi (trafik yükü, rüzgar yükü vb.) kullanarak yapı sağlığının gözlenmesi yapılmaktadır.

Modal tanımlamada temelde ortamsal titreşimden elde edilen tepki verilerinin kullanılmasına dayanan birçok yöntem kullanılabilmektedir. Bunlardan önemlileri,

SSI ve *NExT-ERA*' dır. Bu yöntemlerin bazı kabuller altında doğru olduğu görülmüş ve formülizasyonu o şekilde yapılmıştır. Sistemin *lineer* olduğu, zamanla değişmeyen ve sisteme uygulanan kuvvetler ile sistemin tepki kuvvetleri arasında korelasyon olmaması temeline dayanmaktadır. *SSI* yöntemi doğrudan ortamsal titreşim verilerini kullanan bir modal tanımlama yöntemidir. Bu sebeple göz önüne alınan parametre sayısı az olmaktadır. *ERA* ise genelde ani bir itme gücünden faydalanan bir yöntemdir. *NExT* yöntemi ortamsal titreşim verilerinden serbest titreşim verileri ile aynı karakteristiğe sahip ivme kayıtlarını kullanmaktadır. Böylece serbest titreşim verisini, *ERA*' nın kullanacağı şekle dönüştürmektedir.

Sistem tanımlamada kullanılan uyarım tipleri Zorlanmış Kuvvet ile Uyarım ve Ortamsal Titreşim olarak ikiye ayrılmaktadır (Sohn ve diğer. , 2004).

2.2.1 Zorlanmış Kuvvet ile Uyarım

Zorlanmış kuvvet etkisi ile uyarılmış yapıların deneylerinde, çok çeşitli uyarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar hareketlendirici, sarsıcı, kademe kademe gevşetici şeklindedir. Aynı şekilde sisteme verilen uyarımın ölçülebilmesi için de çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Birçok zorlanmış-titreşim testlerinde, girdi kuvveti fonksiyonu iyi bir şekilde tanımlanabilmektedir.

Frekanslar, mod şekilleri, sönüm oranları gibi modal parametrelerin elde edilmesinde kullanılan sistem tanımlama yöntemleri iyi kurulmuş olan, ölçülen girdi kuvvetlerine tabi tutulmaktadır. Zorlanmış titreşim kuvvetlerinin bir avantajı da, girdi kuvvetlerinin, güçlü sinyal gürültü oranıyla, gürültü etkisini azaltacak şekilde olmasıdır. Ayrıca lokal etkiler, tüm sistemdeki belirli bir bölgeyi uyarmada kullanılabilir. Lokal uyarımın bu şekilde kullanımı, tüm sistemin sadece belirli bir bölgesini uyarmak içindir.

Ani darbe etkisi ile sistem uyarıldığında her zaman girdi kuvvetini bilmemize gerek olmamakta ya da ölçülemeyen durumlar da olabilmektedir. Bu şekilde de

sadece sistem tepki fonksiyonları elde edilerek de sistem tanımlama süreci gerçekleştirilebilmektedir.

2.2.2 Ortamsal Titreşim

Ortamsal titreşim, yapının normal işletimi sırasında aldığı uyarımları tanımlamaktadır. Tüm yapılar sürekli olarak çeşitli kaynaklardan gelen ortamsal titreşim etkisi altındadır. Ortamsal titreşimin kullanıldığı dinamik testler sırasında, girdi kuvveti genellikle kaydedilmemekte ya da ölçülememektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi inşaat mühendisliği yapılarının büyük olması nedeni ile sistemin girdi kuvvetini ölçmek hem fiziksel açıdan zor, hem de ekonomik olarak yüksek maliyetlidir. Bu tip uyarımlarda, uyarım kaynağının girdi frekansına ilişkin bilgi bilinmemektedir. Ne kadar durağan bir girdi sinyaline sahip ya da parça frekans aralığında bu girdi sinyalinin, ne derece uniform olduğu bilinmemektedir. Hatta, ölçülen bir girdi kuvveti (zorlanmış uyarım) kullanıldığında, ortamsal titreşim kaynakları çoğu zaman hala mevcut, karşı konulamadan üretilmeye devam eden ve sıklıkla kaçınılmaz olan girdilerdir. Yapı sağlığının gözlenmesinin geliştirilmesinde, ortamsal titreşimlerin kullanımı, yapıyı etkilemenin anlamını çekici kılmaktadır. Bu tip uyarımlar bir parça zorlanmış etkiye göre alternatif olarak görülmektedir. Çünkü deney esnasında köprü gibi büyük yapılar *trafik yükü*, *rüzgar yükü*, *yaya yükü*, *sismik uyarımlar* gibi ortamsal titreşim kaynaklarının sürekli etkisi altındadır. Sismik uyarım haricinde, ortamsal titreşimin kullanıldığı dinamik testler esnasında, girdi kuvvetleri genellikle ya kaydedilmez ya da kaydedilemez durumdadır. Ortamsal titreşimin yapı sağlığı gözlenmesi sürecinde kullanılması, gerek ekonomik sebepler gerekse sistemin harekete geçirilmesinin zorluğu konusunda kolaylık sağlamaktadır.

2.3 Sistem Tanımlama Yöntemleri

Sistem tanımlamadaki amaç, *modal parametreleri (mod şekilleri, doğal frekanslar, sönüm oranları)* hasarsız ve hasarlı durumlar için elde etmektir. Bu konuda uygulanabilen birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden bazıları sadece sistemden alınan çıktı verileri yardımıyla tanımlama yapabilmekte, bazıları ise sisteme

uygulanan girdi verisi ve bundan doğan tepki verisini bir arada kullanarak tanımlama yapmaktadır. İnşaat mühendisliği yapılarından, laboratuvar ortamında bulunan yapılarda uyarım tipi bilinen ve ölçülebilen uygulamalar yapılabilmektedir. Fakat laboratuvar dışında bu çalışmaları uygulamak, inşaat mühendisliği yapılarının büyük olması ve yapının deney için kullanıma kapatılmasının maliyeti arttırmasından, **sadece-çıktı** yöntemler tercih edilmektedir. Örneğin Boğaz Köprüsü gibi bir yapının kullanıma kapatılması ve köprünün kuvvetli bir şekilde uyarılması çok zordur. Ancak **sadece-çıktı** sistem tanımlama ile ortamsal titreşimden faydalanarak yerinde gözlem yapılabilmesi daha uygun olmaktadır. Fakat bu tercih, gözlem yapılması istenen yapıya göre değişiklik göstermektedir. **Doğal Uyarım Tekniği ve Özsystem Realizasyonu Algoritması NExT-ERA** (*Natural Excitation Technique with Eigensystem Realization Algorithm*), **Çoklu Doğal Uyarım Tekniği ve Özsystem Realizasyonu Algoritması, MNExT-ERA** (*Multiple Natural Excitation Technique with Eigensystem Realization Algorithm*), **Veri-Sürüm Stokastik Altuzay Tanımlama SSI-DATA** (*Data-Driven Stochastic Subspace Identification*), **Deterministik - Stokastik Altuzay Tanımlama DSI** (*Deterministic Stochastic Subspace Identification*), **Gözlemlenebilir Kalman Filtresi-Özsystem Realizasyonu Algoritması OKID-ERA** (*Observer/Kalman Filter Identification Combined with ERA*), **Genel Realizasyon Algoritması GRA** (*General Realization Algorithm*) sistem tanımlamada kullanılan yöntemlerdir (Moaveni, 2007). Sözü edilen altı adet sistem tanımlama yönteminden ilk üçü **sadece-çıktı** sistem tanımlama yöntemi, diğerleri ise **girdi-çıktı** sistem tanımlama yöntemidir.

2.3.1 Doğal Uyarım Tekniği ve Özsystem Realizasyonu Algoritması, NExT-ERA

NExT yöntemi arkasındaki temel prensip, ortamsal titreşim etkisi altında bulunan bir yapıdan, iki tepki verisi ya da iki çıktı kanalından elde edilen veri arasındaki çapraz korelasyon fonksiyonunun serbest titreşim denklemini sağlamasıdır (James ve diğer. 1993). Öncelikle, tepki çapraz korelasyon fonksiyonu, referans kanalından alınan tepki ve diğer kanallardan alınan tepki değerleri arasında elde edilir. **ERA** yöntemi yardımıyla modal parametrelerin tahmini kolayca yapılabilmektedir (Juang ve Pappa, 1985). Buradaki önemli nokta sensörlerin hangi noktalara yerleştirileceği

hususudur. Sensör yerleşim noktaları referans kanalı olacağı için, lokal modlarla çakışmamasına özen gösterilmelidir. Sunulan çalışmada **modal parametreler (doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri)** yatay Y eksen boyunca ilk üç mod için tanımlanabilmiştir.

Tanımlı koşullar altında, sistemin belirli noktalarından elde edilen titreşim verileri (çıktılar) ve bir referans noktasında ölçülen titreşim verisi arasındaki **çapraz korelasyon fonksiyonu**, homojen hareket (serbest titreşim) denklemini, sağlamaktadır. Bu yüzden iki tepki değeri arasında elde edilen **çapraz korelasyon fonksiyonu**, yapının serbest titreşim hareketine benzemektedir. Yapının darbe tepkisi sonrası yaptığı serbest titreşim verisini gereksinen **Özsistem Realizasyonu Algoritması (ERA)**, ilk aşamada elde edilen çapraz korelasyon değerlerini alarak, yapının azaltılmış bir **durum-uzay (state-space)** dinamik modelini oluşturmaktadır. Oluşturulan bu modelin özdeğer analizinden, yapının **modal karakteristikleri** elde edilebilmektedir (Moaveni, 2007).

Yapı mühendisliğinde, bu dinamik parametreler köprülerin, binaların ve diğer yapıların davranışı konusunda önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada kullanılan **NExT-ERA** sistem tanımlama yöntemi aşağıdaki aşamaları kapsamaktadır:

- i. NExT yönteminde yapının serbest titreşim tepkisine karşılık gelen çapraz korelasyon fonksiyonları **Welch-Bartlett** yöntemi ile elde edilmektedir (Manolakis ve diğer., 2000).
- ii. Serbest titreşim verileri kullanılarak oluşturulan Hankel matrisine, **tekil-değer ayrıştırması (SVD)** uygulandıktan sonra belirlenen model derecesi kullanılarak, çeşitli matris manipülasyonları ile sistemin indirgenmiş durum-uzay modeli elde edilmektedir.
- iii. Durum-uzay modelinden; mod şekilleri, doğal frekanslar, sönüm oranları belirlenmektedir. Veri toplama, temizleme ve işleme basamakları sonuçları etkileyebilmektedir.

2.3.2 Çoklu Doğal Uyarım Tekniği ve Özsistem Realizasyonu Algoritması, MNExT-ERA

NExT yönteminin temelinde yer alan ilke, bu yöntemin ilk olarak yayımlandığı Sandia Raporu (James ve diğer. 1993) isimli çalışmada, ortamsal titreşim ile uyarılan bir sistemden ölçülen iki tepki değeri arasındaki çapraz korelasyon fonksiyonunun, serbest titreşim denklemini sağladığı kabulüne dayanmaktadır. İlk olarak bir referans kanalından ölçülen ivmeden elde edilen çapraz korelasyon fonksiyonu tahmini ve ardından *Özsistem Realizasyonu Algoritması (ERA)* yönteminden sistemin modal parametreleri elde edilmektedir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta referans kanalının seçimidir. Bu nedenle yapının modlarını elde edebilecek nokta, referans noktası olarak belirlenmelidir. *MNExT-ERA* yönteminin farkı isminden de anlaşılacağı üzere, tek bir referans noktası seçimi yerine birden fazla sayıda referans noktası seçip, bu noktalardan alınan veriler ile çapraz korelasyon fonksiyonunu oluşturmaktır. Tepki çapraz korelasyon fonksiyonları, çapraz spektral yoğunluk fonksiyonlarının ters Fourier dönüşümü yardımıyla tahmin edilmektedir. Çapraz spektral yoğunluk fonksiyonunun temeli *Welch-Bartlett* yöntemine dayanmaktadır.

2.3.3 Veri-sürüm Stokastik Altuzay Tanımlama, SSI-DATA

Sadece-çıkı sistem tanımlama yöntemlerindendir. Durum-uzay gösterimi yardımıyla çözüm yapmaktadır. Yöntemin diğerlerine göre avantajı aldığı verileri doğrudan kullanabilmesidir. Örneğin NExT-ERA yöntemindeki gibi çapraz korelasyon fonksiyonuna yada herhangi bir spektrum hesabı yapılırken bir ön süreç gerek yoktur. Yine NExT-ERA'da olduğu gibi tekil değerlerin ayrıştırılmasıyla modal parametreler elde edilmektedir.

2.3.4 Deterministik - Stokastik Altuzay Tanımlama, DSI

DSI, girdi - çıkı sistem tanımlama yöntemlerinden bir tanesidir. Lineer zaman-değişken sistemler için durum uzay gösterimi şu şekilde gösterilmektedir (2.1):

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \mathcal{A}x(k) + \mathcal{B}u(k) + w(k) \\ y(k) &= \mathcal{C}x(k) + \mathcal{D}u(k) + v(k) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$, $\mathcal{C}$, $\mathcal{D}$ durum-uzay matrislerini, $u(k)$ ve $y(k)$ girdi ve çıktı vektörlerini, $x(k)$ durum vektörünü göstermektedir. $w(k)$ ölçülemeyen küçük etkiler ve modelleme hatalarından kaynaklanan gürültüyü, $v(k)$ ise sensör hatalarından ölçülen gürültüyü tanımlamaktadır. Ancak *sadece-çıkı* sistem tanımlama yöntemlerinden SSI yöntemi de, gürültü bilgisini ayırt etmek imkansız olduğundan kapalı şekilde, w ve v gürültüsünü içermektedir. İki varsayım göz önüne alınarak,

- I. Belirlenen girdi $u(k)$, süreçteki gürültü $w(k)$ ve ölçülen gürültü $v(k)$ ile bağlantılı değildir.
- II. Her iki gürültü koşulu aynı anda sıfır değildir, sistemde mutlaka gürültü etkisi vardır (Moaveni, 2007).

DSI yönteminde de, SSI-DATA’da olduğu üzere, kuvvetli nümerik teknikler ile çarpanlara ayırma, tekil değer ayrıştırması, en küçük kareler yöntemi bulunmaktadır. $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$, $\mathcal{C}$, $\mathcal{D}$ durum-uzay matrisleri ölçülen girdi ve çıktı titreşimlerinden doğrudan belirlenmektedir. *Modal parametreler (mod şekli, doğal frekanslar, sönüm oranları)* de durum-uzay matrislerinden elde edilmektedir.

2.3.5 Gözlemlenebilir Kalman Filtresi-Özsistem Realizasyonu OKID-ERA

Bu yöntem, Phan ve diğer. (1992) tarafından geliştirilmiş ve sistem girdi-çıkı ilişkisi, gömülü özdeğer belirleme prosedürünün asimptotik olarak durağan hale getirdiği bir gözlemci kuralları olarak açıklanmıştır. Gözlemci için tavsiye edilen özdeğerler reel, karmaşık, hem reel hem karmaşık ya da sıfır olabilmektedir. Bu formülde, Gözlemcinin Markov parametreleri girdi-çıkı verilerinden tanımlanır. Gerçek sistemin Markov parametreleri bu gözlemciden bulunur. ERA tarafından sistemin durum-uzay modeli elde edilmesinde kullanılır. Yöntem, sonlu boyutlu sistemler için,

- Girdi-çıkı verileri yeterince uzun bir kayda sahiptir.
- Gürültü ortalaması sıfıra eşit olan beyaz gürültüdür.
- Gürültü sinyal oranı küçüktür. (Lus ve diğer., 2002)

olarak belirtilen koşullar altında görevini tamamen yerine getirir.

Bu yöntem, sadece temelden uyarılan yapılardaki gibi özellikle tek girdili sistemlerdeki araştırmacılara çekici gelmektedir . Beyaz gürültüyle uyarılan bir sistemden, filtrelenmiş ve ortalaması sıfır olan ivme tepki değerleri alınır. Girdi-çıkı matrisi oluşturulur. **Markov parametrelerinin** tanımlanmasıyla birlikte, ERA yardımıyla modal parametrelerin tahmini yapılır (Moaveni, 2007).

2.3.6 Genel Realizasyon Algoritması, GRA

Genel realizasyon algoritması girdi-çıkı verilerine dayanan lineer dinamik bir sistemin modal parametrelerini tanımlamada kullanılan bir yöntemdir (De Callafon ve diğer., 2007, Moaveni, 2007). ERA ani darbe ya da serbest titreşim sonucu sistemden ölçülen tepki verilerinden oluşturulan Hankel matrisinin tekil değerlerinin ayrıştırmasına dayanırken, GRA ise sisteme verilen yüklemeden tanımlanan ağırlık sonucu oluşturulan Hankel matrisinin tekil değerlere ayrıştırma işlemine dayanır. GRA ile durum-uzay matrisleri iki basamaklı bir süreç ile tahmin edilmektedir. Tepki değerleri için en küçük kareler yöntemi ile minimum hata tahmini sonucu durumun yeniden yapılandırılmasını kapsamaktadır. Modal parametreler durum-uzay gösterimi matrislerinden tahmin edilmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

DOĞAL UYARIM TEKNIĞİ NExT

İnşaat mühendisliği yapı sistemlerinde *NExT* tekniği aşağıdaki işlemler kullanılarak tanımlanmaktadır. n serbestlik derecesindeki zamanla değişmeyen lineer bir sistemin zorlanmış titreşimde hareket denklemi (James III vd., 1993):

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. $x(t)$ ve $f(t)$,sırasıyla $(n \times 1)$ boyutlu deplasman ve dış kuvvet vektörüdür. M, C ve K ise sırasıyla $(n \times n)$ boyutlu kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. *NExT* in arkasındaki temel prensip, seçilen herhangi bir tepki vektörü ile referans olarak seçilen noktadaki tepki değeri arasındaki çapraz-korelasyon fonksiyonunun, homojen hareket denklemini sağladığı kabulüdür. Burada uygulanan ortamsal titreşimin beyaz-gürültü ve geniş bantlı, uyarım ve tepkilerin her birinin istasyonier rassal süreç olduğu var sayılmıştır (Caicedo vd., 2004).

$$ME[\ddot{X}(t)X_{ref}(t - \tau)] + CE[\dot{X}(t)X_{ref}(t - \tau)] + KE[X(t)X_{ref}(t - \tau)] = E[F(t)X_{ref}(t - \tau)] \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. $\ddot{X}, \dot{X}, X, F$ sırasıyla ivme, hız,deplasman ve uyarım stokastik vektör sürecidir. X_{ref} kabul edilen referans serbestlik derecesi tepki süreci, E ise beklenen değer işlemcisidir (*expectation operatörü*). Denklem (3.1)'de bulunan $\ddot{x}(t)$ $E[\ddot{X}(t)X_{ref}(t - \tau)]$ şeklinde , $\dot{x}(t)$, $E[\dot{X}(t)X_{ref}(t - \tau)]$ şeklinde , $x(t)$, $E[X(t)X_{ref}(t - \tau)]$ şeklinde ve $f(t)$ ise $E[F(t)X_{ref}(t - \tau)]$ şeklinde stokastik süreç boyunca beklenen bütün değerlerinin olasılığı cinsinden yazılmıştır. Denklem (3.2)'de hareket denklemi korelasyon fonksiyonu şeklinde yeniden yazıldığında denklem (3.3) halini almaktadır:

$$MR[x_{ref}\ddot{x}(\tau)] + CR[x_{ref}\dot{x}(\tau)] + KR[x_{ref}x(\tau)] = Rx_{ref}F(\tau) \quad (3.3)$$

Burada R korelasyon fonksiyonunu temsil etmektedir. Beklenen değerler, denklem (3.3)'de korelasyon şeklinde yazılmıştır. Uyarım ve sistem tepkileri zayıf istasyonere rassal süreçtir. Bu yüzden aralarında bir korelasyon bulunmamaktadır ve birbirinden bağımsızdır. Bu nedenle $R_{x_{ref}}\mathbf{F}(\tau) = 0$ olmaktadır. Korelasyon fonksiyonu kullanılarak (Bendat ve Piersol, 1993):

$$\begin{aligned} R_{x_{ref}}\dot{\mathbf{x}}(\tau) &= \dot{R}_{x_{ref}}\mathbf{x}(\tau) \\ R_{x_{ref}}\ddot{\mathbf{x}}(\tau) &= \ddot{R}_{x_{ref}}\mathbf{x}(\tau) \end{aligned} \quad (3.4)$$

tanımlamaları yardımıyla hareket denklemi yeniden yazıldığında:

$$\mathbf{M}\ddot{R}_{x_{ref}}\mathbf{x}(\tau) + \mathbf{C}\dot{R}_{x_{ref}}\mathbf{x}(\tau) + \mathbf{K}R_{x_{ref}}\mathbf{x}(\tau) = 0 \quad (3.5)$$

ifadesi deplasman cinsinden elde edilmektedir.

Hareket denklemleri incelendiğinde, seçilen bir referans noktasındaki tepki değerleri ile diğer noktalardan alınan tepki değerleri arasındaki çapraz-korelasyon fonksiyonu değerlerinin, serbest titreşim denklemini sağladığı görülmektedir. İvme değerlerinin çapraz-korelasyon fonksiyonları da, denklem (3.5)'dekine benzer olarak:

$$\mathbf{M}\ddot{\ddot{R}}_{x_{ref}}\ddot{\mathbf{x}}(\tau) + \mathbf{C}\dot{\ddot{R}}_{x_{ref}}\ddot{\mathbf{x}}(\tau) + \mathbf{K}\ddot{R}_{x_{ref}}\ddot{\mathbf{x}}(\tau) = 0 \quad (3.6)$$

şeklinde serbest titreşim denklemini sağlamaktadır .

Burada iki önemli nokta vardır. İlk olarak hareket denkleminde istasyonere rassal uyarım olan ortamsal titreşim alınmaktadır. Daha sonra da sadece ivme kayıtları kullanılarak bu yöntem uygulanmaktadır. Modal parametrelerin elde edilmesi için **NExT-ERA** kullanılmaktadır. NExT yönteminde çapraz korelasyon hesabı yapılırken, **Welch-Bartlett Yöntemi** kullanılmaktadır.

3.1 Welch-Bartlett Yöntemi

Güç spektral yoğunluk (PSD) tahminine periodogram adı verilmektedir. *Welch-Bartlett* yöntemi bu tahmin için uygulanan yöntemlerden biridir. İki temele dayanmaktadır. Bunlardan ilki periodogramların ortalamasının alınmasıdır. İkincisi ise otokorelasyon fonksiyonunu pencerelere ayırarak düzgün hale getirmektir. Bartlett yöntemi ilk olarak tanımlanmış, daha sonra Welch yöntemi ile geliştirilmiştir (Rowell, 2008).

3.1.1 Bartlett Yöntemi

Bu yöntemde, N tane nokta uzunluğunda olan $\{f_n\}$ veri kaydı olduğu varsayılmaktadır. Bu kaydın toplam uzunluğu, her biri K uzunluğunda olan Q adet daha küçük bloklara ayrılır. Her bloğun periodogramı hesaplanır ve $I_k^q(k)$, $q = 1, \dots, Q$ ile belirtilirse, ortalaması alınmış periodogram;

$$\bar{I}_k(k) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q I_k^q(k) \quad (3.7)$$

olarak gösterilir.

Her küçük blok daha az örnek barındırdığı için, ayrık Fourier Dönüşümü sırasında hesaplanan spektrum, spektral kararlılığı azaltacaktır. Ancak her Q periodogramının istatistiksel bağımsızlığı sağlandığında, varyans Q etkisiyle;

$$V[\bar{I}_k(j\Omega)] = \frac{1}{Q} V[I_k^q(j\Omega)] \approx \frac{1}{Q} \Phi_{ff}^2(k) \quad (3.8)$$

şeklinde azalacaktır. Denklem (3.8)'de, Ω , Spektral bölge, Φ_{ff} de güç yoğunluk spektrumudur.

3.1.2 Welch Yöntemi

Welch, Bartlett yöntemini iki konuda geliştirmiş ve bu aşamadan sonra yöntem *Welch-Bartlett* adını almıştır. Bu konular:

- i. Welch, veri zincirini ardışık daha küçük bloklara ayırmak yerine, bitişik blokların %50 olarak kesiştiği (çakıştığı) ve hala istatistiksel olarak bağımsızlığın sürdürmesi kabulü ile periodogram hesabı yapmaktadır.
- ii. Welch yöntemi, ayrık Fourier Dönüşümü hesaplanmadan önce veri kaydına pencereleme fonksiyonu $\omega(n)$ uygulamaktadır. Modifiye edilmiş periodogram pencerelenmiş kayda dayalıdır ve işlem:

$$\bar{I}_k(k) = \frac{1}{KU} \sum_{n=0}^{K-1} f_n \omega(n) e^{-j2\pi nk/Q}, \quad q = 1, \dots, Q \quad (3.9)$$

şeklini almaktadır

Denklem (3.9)'de $\bar{U}$, dalga formunun gücünü azaltan pencereleme işlemini karşılayan faktör olup ;

$$\bar{U} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \omega^2(n) \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Aynı zamanda tahmincinin asimptotik olarak tarafsız olmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak *spektral tahmin*, pencerelenmiş ve kesişen blok halindeki verinin grup ortalaması alınarak:

$$\bar{I}_k(k) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \hat{I}_k^{(q)}(k) \quad (3.11)$$

denklem (3.11)'deki şekilde bulunmaktadır.

BÖLÜM DÖRT

ÖZ SİSTEM REALİZASYONU ALGORİTMASI ERA

Yapıların ölçülebilen tepkilerinden, o yapının karakteristiğini anlayabilmek son yıllarda bilgisayar ile hesaplanabilirliğin artmasıyla büyük önem kazanmıştır. Bu alanda birçok çalışma yapılmış olup, lineer dinamik sistemlerin zaman alanında durum-uzay gösterimi Gilbert (1963) ve Kalman'ın (1963) çalışmalarında ilk olarak gösterilmiştir. Markov parametreleri ve onların lineer dinamik sistemlerde gösterimi hakkında birçok çalışma literatürde mevcuttur. Devam eden zaman tanım alanlı çalışmalarda, Juang ve Pappa (1985) öz sistem realizasyonu algoritması ile lineer sistemlerde modal parametrelerin tanımlanması ve lineer dinamik sistemin modal indirgenmesi için yöntem sunmuştur. Bu yöntemin matematiksel olarak temeli durum-uzay gösterimidir (Moaveni, 2007).

4.1 Durum-Uzay Gösteriminin Tanımlanması

P serbestlik dereceli lineer dinamik bir sistem , ikinci derece diferansiyel hareket denklemi ve ölçüm denklemi

$$\begin{aligned} M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) &= Fu(t) \\ y(t) &= \hat{C}[x(t)^T \quad \dot{x}(t)^T \quad \ddot{x}(t)^T]^T \end{aligned} \quad (4.1)$$

şeklinde gösterilmektedir. Denklem (4.1)'de $x(t) \in R^{p \times 1}$, zamana bağlı bir fonksiyon olan tepki deplasman vektörüdür. $\ddot{x}(t)$ $\dot{x}(t)$, $x(t)$ zamana bağlı türevleri göstermektedir. T ise matrisin transpozunu temsil etmektedir. **M**, **C** ve **K** $p \times p$ boyutunda sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. Girdi matrisi **F** , $u(t)$ kuvvet fonksiyonunun uzaysal dağılımıdır. Çıktı vektörü $y(t) \in R^{m \times 1}$, (m çıktı ölçümlerinin boyutu) ölçülen sistem tepkisi , çıktı matrisi $\hat{C}$ ise ölçülen tepkideki ivme, hız ve deplasmanın olası kombinasyonlarını ifade etmektedir.

Dinamik sistemler, denklem (4.2)'deki şekilde *durum-uzay* gösterimi formunda da yazılabilmektedir. Bu gösterim sistem tanımlama için daha uygun olmaktadır.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \mathcal{A}x(t) + \mathcal{B}u(t) \\ y(t) &= \mathcal{C}x(t) + \mathcal{D}u(t)\end{aligned}\tag{4.2}$$

Denklem (4.2)' de yer alan, $x(t) \in R^{nx1}$ ($n=2p$), $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$ sırasıyla, tepki vektörlerinden deplasman, hız ve ivme vektörlerinin rastgele lineer kombinasyonu içeren n boyutlu durum vektörüdür. Durum matrisi $\mathcal{A} \in R^{nxn}$, girdi matrisi $\mathcal{B} \in R^{nxr}$, çıktı matrisi $\mathcal{C} \in R^{m \times n}$, $\mathcal{D} \in R^{m \times r}$ geçiş besleyici (feed-through) matrisi r boyutlu kuvvet fonksiyonu $u(t)$ ve m boyutlu çıktı $y(t)$, lineer dinamik bir sistemi tanımlamaktadır.

Durum-uzay gösterimi, kütle, sönüm, rijitlik matrisi cinsinden yazılarak genel halde modellenebilir. Tanımlanan bu durum-uzay modeli, fiziksel olarak da tanımlanabilmektedir. Tekil olmayan durum dönüşüm vektörü yardımıyla, bu işlem gerçekleştirilir. Örnek olarak, yapıya konuşlandırılmış sensörlerden $\ddot{x}(t)$ (örn. $m=P$) ölçümü göz önüne alınsın. $\bar{x}(t) = [x(t)^T \dot{x}(t)^T]^T$ fiziksel durum vektörü, $y(t) = \ddot{x}(t)$ dir. Bu durumda, $\dot{\bar{C}} = [0_{(PxP)} \ 0_{(PxP)} \ I_{(PxP)}]$ şeklinde tekrar yazılabilmektedir. $\bar{x}(t) = Yx(t)$ olarak tanımlanırsa, $Y^{-1}\bar{x}(t) = Y^{-1}Yx(t)$ ve $x(t) = Y^{-1}\bar{x}(t)$ şeklinde elde edilir. Y dönüşüm matrisini ($Y \in R^{nxn}$, tekil değer olmayan matris) göstermektedir. Durum-uzay gösteriminde yerine yazıldığında;

$$\begin{aligned}Y^{-1}\bar{x}(t) &= \mathcal{A}Y^{-1}\bar{x}(t) + \mathcal{B}u(t) \\ y(t) &= \mathcal{C}Y^{-1}\bar{x}(t) + \mathcal{D}u(t)\end{aligned}\tag{4.3}$$

Denklem (4.3) soldan Y matrisi ile çarpıldığında,

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}(t) &= Y\mathcal{A}Y^{-1}\bar{x}(t) + Y\mathcal{B}u(t) \\ y(t) &= \mathcal{C}Y^{-1}\bar{x}(t) + \mathcal{D}u(t)\end{aligned}\tag{4.4}$$

denklem (4.4) şeklinde yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned}\hat{\mathcal{A}} &= \Upsilon \mathcal{A} \Upsilon^{-1} & \hat{\mathcal{B}} &= \Upsilon \mathcal{B} \\ \hat{\mathcal{C}} &= \mathcal{C} \Upsilon^{-1} & \hat{\mathcal{D}} &= \mathcal{D}\end{aligned}\quad (4.5)$$

$$\hat{\mathcal{A}} = \begin{bmatrix} 0_{(PxP)} & I_{(PxP)} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2Px2P}$$

$$\hat{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} 0_{(Pxr)} \\ -M^{-1}\mathbb{F} \end{bmatrix}_{2Pxr}$$

$$\hat{\mathcal{C}} = \begin{bmatrix} -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{Px2P}$$

$$\hat{\mathcal{D}} = \begin{bmatrix} -M^{-1}\mathbb{F} \end{bmatrix}_{Pxr} \quad (4.6)$$

Bir dinamik sistemin durum-uzay modeli tanımlanırken, tanımlanan durum-uzay modeli genel denklem (4.2)' de görüldüğü durumla uyuşmaktadır. Durum-uzay modeli, $\bar{x}(t)$ fiziksel durumundaki eşdeğer modele dönüştürülebilir. Geçiş durum-uzay modeli denklem (4.7)'deki şekilde gösterilmektedir:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}(t) &= \hat{\mathcal{A}}\bar{x}(t) + \hat{\mathcal{B}}u(t) \\ y(t) &= \hat{\mathcal{C}}\bar{x}(t) + \hat{\mathcal{D}}u(t)\end{aligned}\quad (4.7)$$

Yapılarda sistem tanımlama için, dinamik sistemlerin gösterimi ayrık zamanlı, zaman tanım alanı çerçevesinde belirtilmektedir. Çıktı $y(t)$ ' den alınan ölçümler ya da girdi $u(t)$ ' den alınan ölçümler ayrık zamanlar $t = k\Delta T$, $k = 0,1,2, \dots$ sabit örnekleme zamanı ΔT yardımıyla elde edilmektedir. ΔT aralıklı örneklenen sürekli zaman sistemi için, *ayrık zaman durum-uzay modeli* denklem (4.8) şeklinde olmaktadır:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}((k+1)\Delta T) &= \mathcal{A}\mathbf{x}(k\Delta T) + \mathcal{B}\mathbf{u}(k\Delta T) \\ \mathbf{y}(k\Delta T) &= \mathcal{C}\mathbf{x}(k\Delta T) + \mathcal{D}\mathbf{u}(k\Delta T)\end{aligned}\quad (4.8)$$

4.2 ERA, Özsistem Realizasyonu Algoritması

ERA, gerçek dinamik sistemlerin modal parametrelerini tahmin etmektedir. Notasyonlarının basitleştirilmesi için, ayrık zaman itme tepki ölçümleri, $g(k\Delta T)$ (birim itme girdisi için Markov Parametreleri) vektör değeri olarak farz edilmektedir (Juang ve Pappa,1985, Moaveni, 2007, Amaddeo ve diğer., 2009).

Lineer sistemlerin ayrık zaman *durum-uzay* gösteriminde (4.8), çıktı $y(k\Delta T)$ ve sistem girdisi $u(k\Delta T)$ denklem (4.9) şeklinde yazılabilmektedir.

$$y(k) = \mathcal{D}(u) + \sum_{i=1}^x G(i)u(k-1), \quad G(i) = \mathcal{C}\mathcal{A}^{i-1}\mathcal{B} \quad (4.9)$$

$G(i)$, Markov parametrelerini temsil etmektedir. ΔT , kısaltma amaçlı olarak $\Delta T = 1$ olarak normalize edilmiş, eşitlik k cinsinden yazılmıştır. k ise ayrık zamanlı sistemlerde, $t=k$ ($k=0, 1, \dots, 2N$) anındaki girdi ve çıktı örnekleridir. Verilen ayrık (kesikli) çıktı ölçümleri $y(k)$ ve olası girdi ölçümleri $u(k)$, ($k=0, 1, 2, \dots, 2N$) n. dereceden durum vektörü $x(k)$ ' yı oluşturmak ve ayrık zaman durum-uzay realizasyonunun ($\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}, \mathcal{D}$) göz önüne alınmasını amaçlanmaktadır. Birim itme girdisinin özel bir hali (4.10) şeklinde yazılmaktadır:

$$u(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Çıktı $y(k)$, ayrık zamanlı sistem $G(k)$, Markov parametrelerini sağlamaktadır. Realizasyon algoritmasını, ölçüm değerlerinden oluşturabilmek için özel bir tür matris olan Hankel matrisi, NExT yönteminden bulunan çapraz korelasyon fonksiyonu değerlerinden oluşturulmaktadır (4.11):

$$H = \begin{bmatrix} g(1) & g(2) & \dots & g(N) \\ g(2) & g(3) & \dots & g(N+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(N) & g(N+1) & \dots & g(2N-1) \end{bmatrix}_{(m \times N) \times N}$$

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} g(2) & g(3) & \dots & g(N+1) \\ g(3) & g(4) & \dots & g(N+2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(N+1) & g(N+2) & \dots & g(2N) \end{bmatrix}_{(m \times N) \times N} \quad (4.11)$$

Temel denklemden yola çıkılacak olursa;

$$g(k) = G(k) = \begin{cases} \mathcal{D}, & k = 0 \\ \mathcal{C}\mathcal{A}^{k-1}\mathcal{B}, & k \geq 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

B durum-uzay modelinin girdi matrisidir (denklem 4.12). Hankel matrisi denklem (4.13) şeklinde yazılabilmektedir:

$$H = H_1 H_2 \quad (4.13)$$

Denklem (4.14)'de yer alan H_1 ile H_2 , gözlemlenebilen ve kontrol edilebilen matrislerdir.

$$H_1 = \begin{bmatrix} \mathcal{C} \\ \mathcal{C}\mathcal{A} \\ \mathcal{C}\mathcal{A}^2 \\ \dots \\ \mathcal{C}\mathcal{A}^{N-1} \end{bmatrix}_{(m \times N) \times n}$$

$$H_2 = [\mathcal{B}, \quad \mathcal{B}\mathcal{A} \quad \mathcal{B}\mathcal{A}^2 \quad \dots \quad \mathcal{B}\mathcal{A}^{N-1}]_{(n \times N)} \quad (4.14)$$

Ayrık zaman durum-uzay modeli için sistemin derecesi n ' dir. H_1 ve H_2 matrislerinin rankı sistemin model derecesi sayısı kadar satır ve sütun sayısına sahiptir. Bunun sonucunda Hankel matrisinin rankı da model derecesi olan n ' e eşittir. O halde $\bar{H}$ (kaydırılmış Hankel matrisi) matrisi (4.15) denklemindeki gibi yazılabilmektedir:

$$\bar{H} = H_1 \mathcal{A} H_2 \quad (4.15)$$

Burada bulunan H_1 ve H_2 denklem (4.14)' de tanımlandığı şekilde olmak üzere, H_1 ve H_2 matrisleri tamamen satır ve sütun olarak n sayıda ranka sahiptir. $\check{I}$ birim matrisi temsil etmek üzere, H_1^+ soldan ters matrisi ve H_2^+ sağdan ters matrisi (4.16)'da gösterilmiştir:

$$H_1^+ H_1 = \check{I}_{n \times n} \text{ ve } H_2^+ H_2 = \check{I}_{n \times n} \quad (4.16)$$

Bu denklemlerden, $\mathcal{A}$ matrisi (4.17)'deki şekilde yazılır :

$$\mathcal{A} = H_1^+ \bar{H} H_2^+ \quad (4.17)$$

Matrislerin sol ve sağ ters matrisleri, denklem (4.18)'deki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} H_1^+ &= [H_1^T H_1]^{-1} H_1^T \\ H_2^+ &= H_2^T [H_2 H_2^T]^{-1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Sistem tanımlama süreci içerisinde, Hankel matrisinin H_1 ve H_2 matrislerine ayrıştırılması, $H = H_1 H_2$ eşitliğindeki H matrisinin, tekil değerlerine ayrıştırılması işlemiyle gerçekleşmektedir. $H = U \Sigma V^T$ denkleminde U ve V *ortonormal matris* ve Σ ise *diagonal tekil değerler matrisi*dir. **ERA** yönteminin temel prensibi minimum realizasyon olduğundan, tekil değerler ayrıştırılması denklem (4.19)'da gösterilmiştir:

$$H = U \Sigma V^T = [U_n U_s] \begin{bmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & \Sigma_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^T \\ V_s^T \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

(4.19)'da, Σ matrisi Σ_n ve Σ_s olmak üzere iki adet diagonal matrise ayrılmaktadır. s küçük tekil değerler (gürültü, serbest gürültü ölçümleri durumunda sıfır), n ise büyük tekil değerlerdir (sıfır olmayan durumu içeren gürültü hariç ölçümler) . Bu değerlerden n' in belirlenmesi tekil değerlerin grafik olarak çizdirilmesi ile belirlenebilmektedir. Yine aynı şekilde stabilizasyon diyagramı (Caicedo,2011) ile çeşitli iterasyonlar yapılarak n model derecesi belirlenebilmektedir.

Ayrıştırılmış tekil değerler yardımı ile, indirgenmiş Hankel matrisi oluşturulmaktadır (4.20):

$$H_n = U_n \Sigma_n V_n^T \quad (4.20)$$

Rank n model derecesi ile indirgenmiş Hankel matrisinden, H_1 ve H_2 matrisleri denklem (4.21) şeklinde oluşturulmaktadır:

$$\begin{aligned} H_1 &= U_n \Sigma_n^{1/2} \\ H_2 &= \Sigma_n^{1/2} V_n^T \end{aligned} \quad (4.21)$$

Buradan bu matrislerin sağ ve sol ters matrisleri (4.22) denklemindeki gibidir:

$$H_1^+ = \Sigma_n^{-1/2} U_n^T, \quad H_2^+ = V_n \Sigma_n^{-1/2} \quad (4.22)$$

şeklindedir. Bu eşitliklerden, ayrık zamanlı durum-uzay matrisleri (4.23) denklemini yardımıyla elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \mathcal{A} &= H_1^+ \bar{H} H_2^+ \\ \mathcal{B} &= H_2(:, 1) \\ \mathcal{C} &= H_1(1:m, :) \\ \mathcal{D} &= g(0) \end{aligned} \quad (4.23)$$

m: matrisin ilk m tane satırı (sensör sayısı)

ERA serbest titreşim verilerine de doğrudan uygulanabilen bir yöntemdir. Bu durumda Hankel matrisi serbest titreşim verisi kullanılarak oluşturulur. Birim girdi matrisi, lineer dönüşüm esnasında sistemin fiziksel durumundaki başlangıç nodal yer değiştirmeleri ve hızları gösteren, sıfırdan farklı başlangıç durumunu göstermektedir.

Ayrık-zaman sistemler için tanımlanmış olan $\mathcal{A}$ matrisinin öz değerleri, kompleks eşlenik çiftler şeklinde olup sistemin kutupları olarak isimlendirilir.

Her kompleks eşlenik çiftten açısal frekanslar ve sönüm oranları aşağıdaki denklemler yardımı ile bulunabilmektedir. Bu işlem için öncelikle $\mathcal{A}$ matrisi;

$$\mathcal{A} = \psi \Lambda \psi^{-1} \quad (4.24)$$

şeklinde öz değerlerine (Λ) ve öz vektörlerine (ψ) ayrıştırılmaktadır (4.24). Bulunan öz değer vektörünün reel (σ) ve imajiner (Ω) değerleri yardımıyla,

$$\Lambda = \text{diag}(\bar{\sigma}_i \pm j\bar{\Omega}_i) , \quad \sigma_i \pm j\Omega_i = \frac{\ln(\bar{\sigma}_i)}{\Delta t} \pm \frac{\ln(\bar{\Omega}_i)}{\Delta t} \quad (4.25)$$

$$\omega_i = \sqrt{\sigma_i^2 + \Omega_i^2} , \quad \xi_i = -\cos\left[\arctan\left(\frac{\Omega_i}{\sigma_i}\right)\right] , \quad \varphi_i = C\psi_i \quad (4.26)$$

denklemlerinden, sistemin ayırık (kesikli) zamanlı olduğu dikkate alınarak, **doğal frekans** (ω), **sönüm oranı** (ξ) ve **mod şekli** (φ) değerleri bulunabilmektedir. Δt örnekleme zaman aralığıdır (Nayeri ve diğer., 2007, Moaveni, 2007, Caicedo ve diğer., 2004).

4.3 Modal Güvenlik Kriteri

Modal güvenlik kriteri (Modal Assurance Criteria, MAC), farklı gürültü seviyeleri sonucu elde edilen tahmini mod şekillerinin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. MAC değeri 0 ile 1 arasındadır, tahmini mod şekli φ_a ile karşılaştırılan mod şekli φ_b arasındaki korelasyon derecesini ölçen bir hesaplama (Caicedo, 2011, Farrar ve James III, 1997, Moaveni, 2007). Doğru tahminli mod şekli için MAC değeri 1'dir. Yapılan bu tez çalışmasında hasar elde etme aşaması yapılmayıp, sadece var olan durum için mod şekilleri hesaplandığından, MAC işlemi ERA, NExT-ERA sonucu elde edilen mod şekilleri ile SAP 2000 programında kalibre edilen köprünün modal analizi sonucu bulunan mod şekilleri arasında hesaplanmıştır.

$$MAC(a, b) = \frac{\{\varphi_{a,j}, \varphi_{b,j}\}^2}{\{\varphi_{a,j}\}^2 \{\varphi_{b,j}\}^2} \quad (4.27)$$

$\varphi_{a,j}$, $\varphi_{b,j}$, sırasıyla a ve b mod vektörünün j. koordinatında bulunan değerdir.

BÖLÜM BEŞ

NExT-ERA SİSTEM TANIMLAMA SÜRECİ VE BU SÜREÇTE GÖZ ÖNÜNDE BULUNDURULMASI GEREKEN ÖZELLİKLER

Modal tanımlamalardan, *NExT* ve *ERA* üç basamaktan oluşmaktadır. İlk olarak, ortamsal titreşim verileri *NExT* yardımıyla serbest titreşim verisi ile aynı karakteristiğe sahip veriye dönüştürülmektedir. Bu süreçte, *Hızlı Fourier* dönüşümündeki nokta sayısı (uzunluğu), örnekleme frekansı gibi parametreler sistem tanımlama sürecinin doğruluğunu etkilemektedir. *NExT*' in devamında gelen *ERA* sistemdeki serbest titreşim verilerini kullanarak sistemin nümerik modelini elde etmektedir. Fakat sadece zorlanmış uyarım kuvveti tepki ölçümleri ile sistem tanımlama yapıyorsa, doğrudan *ERA* ile işleme başlamak gerekmektedir. Sonuç olarak *modal parametreler* (mod şekli, doğal frekanslar, sönüm oranı) tanımlanan nümerik modelden bulunmaktadır. Veri toplama, temizleme, nicelendirme problemi sistem tanımlama ve analizini doğrudan etkilemektedir (Caicedo, 2011). *NExT-ERA* sistem tanımlama süreci esnasında uygulanan işlemler aşağıdaki gibidir:

- Veri düzeltme ve filtreleme,
- Referans kanalı, pencereleme ve çakışma oranlarının belirlenmesi,
- Tüm sensör kanalları ile referans seçilen sensör kanalı arasında çapraz güç spektral yoğunluk değerinin hesaplanması,
- Çapraz güç spektral yoğunluk değerlerinin ters Fourier dönüşümünün yapılması sonucu çapraz korelasyon fonksiyonunun elde edilmesi,
- Çapraz korelasyon fonksiyonu verileri ile Hankel matrisinin oluşturulması,
- Hankel matrisinin tekil değerlerine ayrıştırılması,
- Oldukça küçük tekil değerlerin kısaltılması,
- Ayırık zamanlı durum-uzay realizasyon matrislerinin tanımlanması,
- Sürekli zaman yapısal modelleri için mod şekilleri, sönüm oranı ve doğal frekansların elde edilmesi,
- Ayırık zamanlı durum-uzay realizasyonu için özdeğer probleminin çözülmesi (Nayeri ve diğer., 2007).

5.1 Kayıt Seçimi

Başarılı bir modal tanımlama işlemi erişilebilen verileri anlamakla başlamaktadır. Örnekleme frekansı, gürültü-sinyal oranı, kayıtların durağan (sabit) olması önemli etkenlerdendir. Burada, veri kayıtlarının durağan olma eğiliminde olduğu kabul edilmektedir. Doğal Uyarım Tekniği (NExT) ve Özsistem Realizasyonu Algoritması (ERA) başarılı bir şekilde tamamen durağan olmayan sinyalleri kullanarak modal tanımlama yapabilmektedir (Caicedo, 2011).

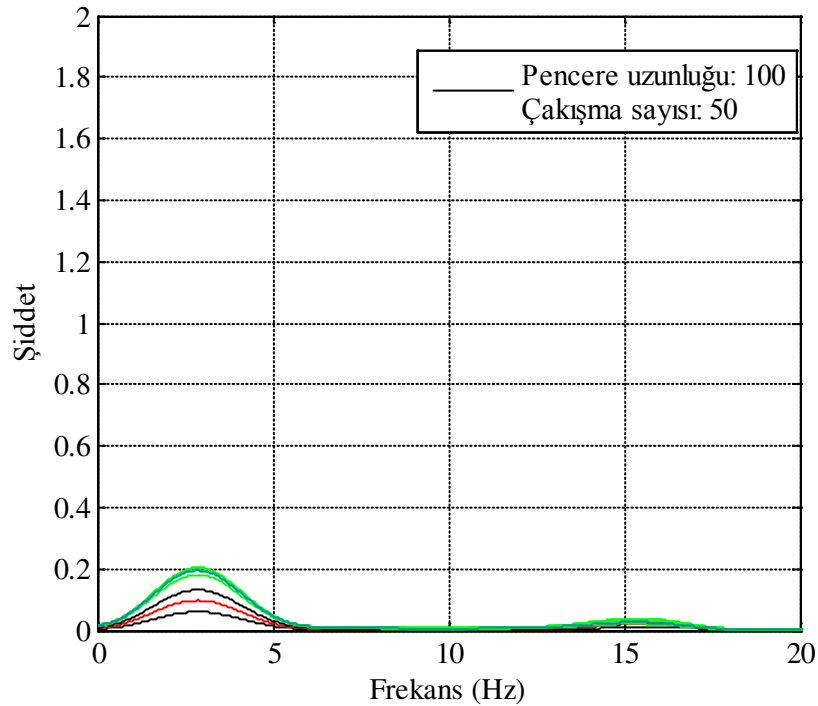
Durağan sinyal kayıtlarında, sistem tanımlama en iyi sonucu vermektedir. Eğer verinin ortalaması ve korelasyon fonksiyonları zamanla değişmez ise, kayıtlar daha az stabil olmaktadır. Veri ortalaması μ , t anında $\mu(t)$ sabittir ve korelasyon fonksiyonu $R_{xx}(t, t + \tau) = R_{xx}(t, t + \tau)$ herhangi bir zamanda değişmediğinde veri kaydı kuvvetli durağandır. Eğer kaydın bir bölümü durağan, bir bölümü durağan değil ise yani köprü gibi bir yapıdan periyodik olarak devamlı şekilde elde edilen trafik yükü ile köprüdeki seyrek trafik yükü gibi bir durumda, durağan olmayan kısım, sistem tanımlama işleminden atılabilmektedir. Modal tanımlamaya başlamadan önce, çapraz güç spektrumu hesaplamak ve eğer görünüyorsa grafikteki tepe noktalarını belirlemek, doğal frekansların belirlenmesi açısından faydalı olmaktadır. Eğer bu noktalar bulunamazsa, ya deneyde daha büyük bir örnekleme frekansı kullanılmalı ya da gürültü-sinyal oranı sistemin modal parametrelerinin elde edilebilmesi için kontrol edilmelidir. Spektral grafikler aynı zamanda tanımlanacak frekansların alanlarını belirlemek için kullanılmaktadır.

5.2 Örnekleme Frekansı, FFT Uzunluğu, Kayıt Uzunluğu, Referans Kanal Seçimi

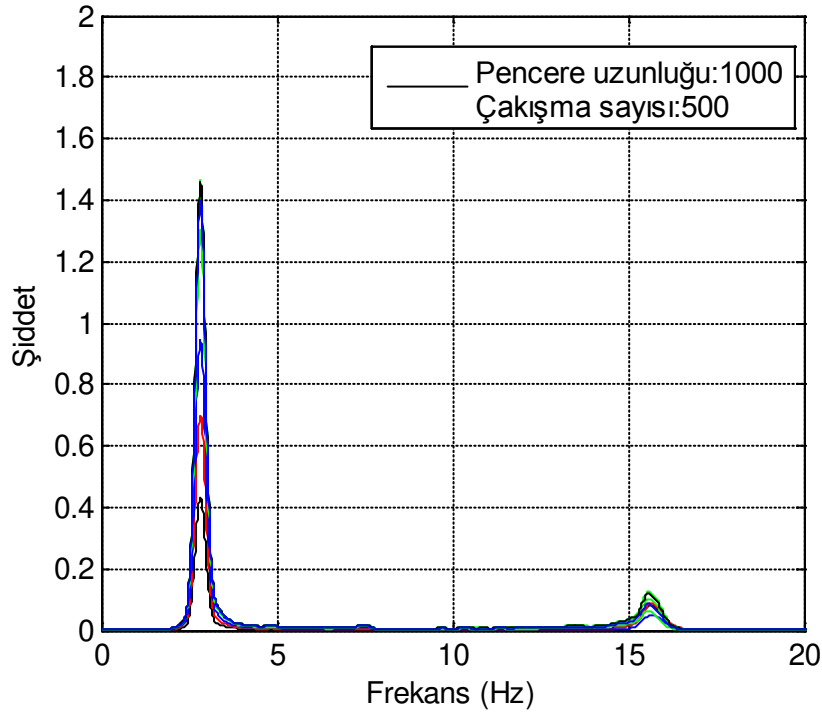
NExT-ERA kullanarak yapılan modal tanımlamada önemli bir basamak yüksek kalitede, doğru bir çapraz korelasyon fonksiyonu hesaplamaktır. NExT' in ise performansını etkileyen üç parametre bulunmaktadır. Bunlar çapraz korelasyon fonksiyonu hesaplanırken kullanılan hızlı Fourier dönüşümü için, *veri kayıt uzunluğu*, *nokta sayısı* ve *pencere sayısı*, *çakışma oranı*, veri kaydının *örnekleme*

*frekans*ıdır (Caicedo, 2011). Bu parametreler, uzunluk ve çapraz korelasyon fonksiyonunun frekans içeriğini etkilemektedir. Kayıt uzunluğu ve çakışma miktarı, pencere etkisi ve ortalamalar arasında, spektral yoğunluk fonksiyonu ve FFT' de kullanılan nokta sayısı ile birleşik şekilde göz önüne alınmalıdır. Gürültülü kayıtlarda uzun kayıtlar tercih edilmektedir. Nispeten kısa kayıtlar temiz veri elde edildiği zaman kullanılmaktadır. Kayıt uzunluğu yapının beklenen frekansına göre seçilmelidir. Düşük frekanslı yapılar, kablo-durağan köprüler gibi, aynı çevrimi yakalamak için yüksek frekanslı yapılardan daha uzun veri kaydına ihtiyaç duyarlar. Örneklem frekansı, modal parametrelerin tanımlandığı frekans aralığını belirlemektedir.

Şekil 5. 1 ve Şekil 5.2' de görüldüğü üzere, aynı sinyalde pencere uzunluğunun kısa olması, sinyali daha çok pencereye bölmektedir. Bu sebeple frekansın şiddeti Şekil 5.1' de, Şekil 5.2' ye oranla daha düşüktür.



Şekil 5.1 Pencereleme ve çakışma etkisi altında spektrumun değişimi, (pencere uzunluğu:100, çakışma oranı: %50).



Şekil 5.2 Pencereleme ve çakışma etkisi altında spektrumun değişimi, pencere uzunluğu: 1000, çakışma oranı:%50).

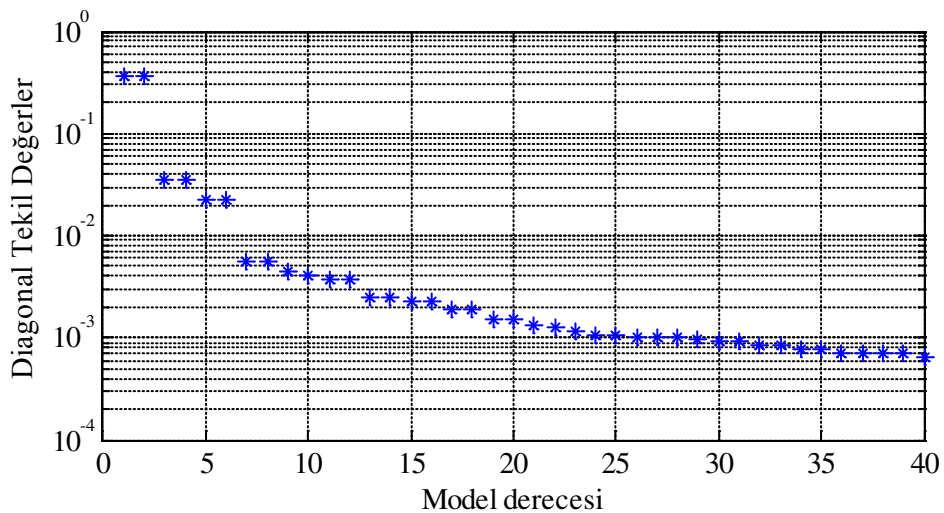
5.3 Hankel Matrisinin Satır ve Sütunlarının Oluşturulması

Hankel matrisinde bulunan satır ve sütunlar, ERA algoritmasının önemli bir basamağını oluşturmaktadır. Tahmini doğal frekans adedine göre Hankel matrisinin satır ve sütunu belirlenmektedir (Caicedo,2011). Eğer tahmin yapıldığı esnada, sistemin dinamik karakteristiği ya da nümerik modeli hakkında önceden bilgi sahibi olunursa, yaklaşık bir tahmin kullanarak, doğal frekansların sayısı ve Hankel matrisi boyutları tahmin edilebilmektedir. Fakat yapının dinamik parametreleri hakkında önceden hiçbir bilgiye sahip olunmadığı durumlarda, deney verilerinden elde edilen çapraz güç yoğunluk fonksiyonundaki tepe noktalarından yada önceki bir nümerik model aracılığıyla satır ve sütun sayıları tahmin edilebilir. Hankel matrisinin sütun sayısı için parmak kuralına göre tahmini mod sayısının 4 katı (tahmini kutupların sayısının 2 katı) kullanılmaktadır. Zorlanmış alçak-rank Hankel matrisi, titreşimdeki bazı fiziksel modların kaybına sebep olmaktadır.

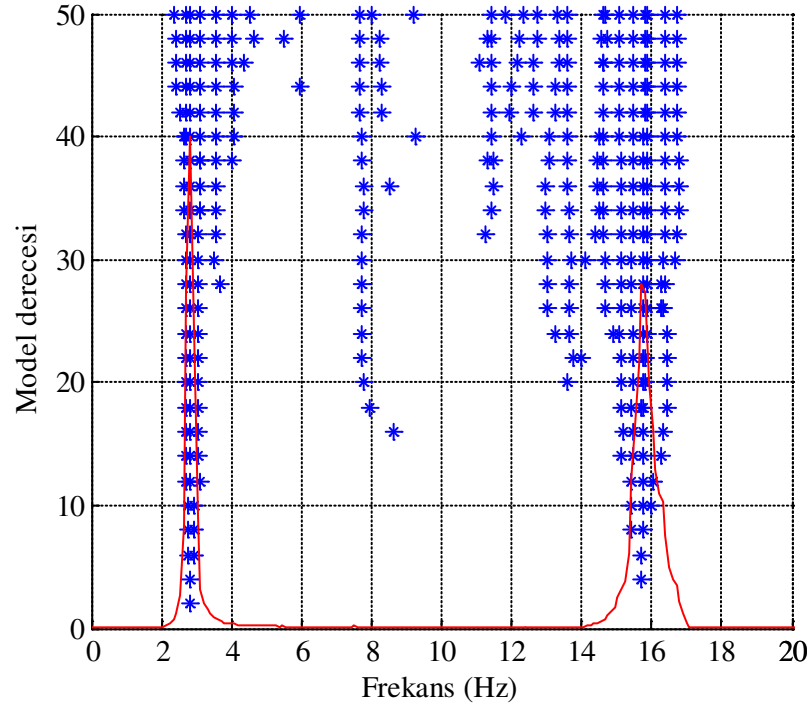
Hankel matrisindeki satır sayısı tahmini ise, çapraz spektral yoğunluk fonksiyonundaki erişilebilen nokta sayısına bağlıdır. Buradaki amaç, elde edilen sinyaldeki spektral yoğunluk fonksiyonunun mümkün olduğunca gürültü içermeyen bir sinyal olmasıdır. Düşük doğal frekanslı yapılarda çapraz korelasyon kaydı uzun tutulmalıdır.

5.4 Model Derecesi Ve Stabilizasyon Diyagramı

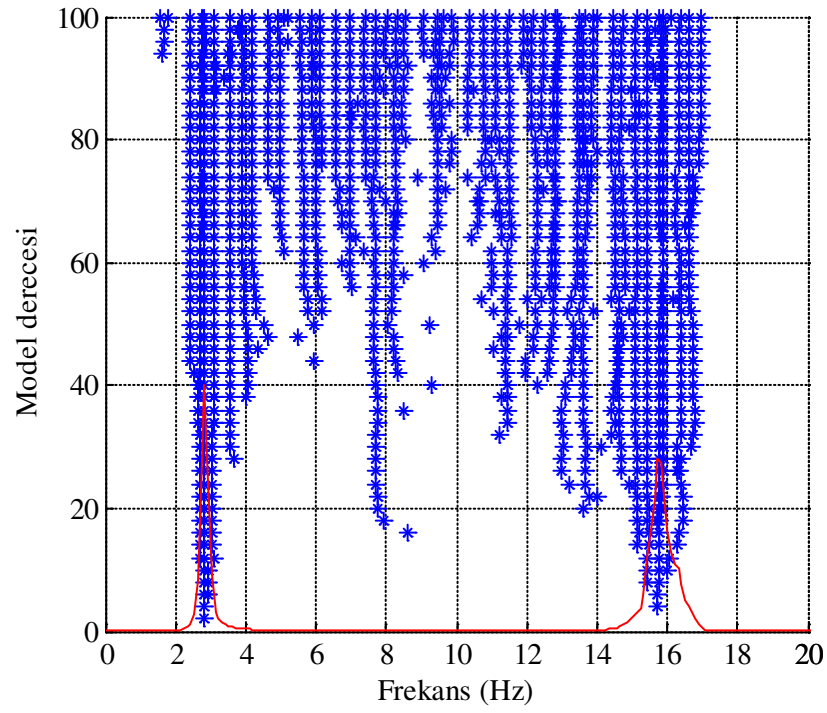
Sistem tanımlamada doğru model derecesini seçmek önemli bir aşamadır. Eğer model derecesi çok yüksek ise gerçek olmayan modlar sonuçlarda çıkabilmektedir. Model derecesi çok küçük seçildiğinde ise modal parametreler elde edilemeyebilir. Bu durumda devreye stabilizasyon diyagramı girmektedir (Caicedo, 2011). Buradaki temel amaç, sistem tanımlama sürecinin farklı model derecesi için her defasında tekrarlayarak hesaplanmasıdır. Stabilizasyon diyagramı model derecesine göre elde edilen frekans değerleri ile çapraz spektral yoğunluk grafiği ile ortak çizdirilerek, grafikteki tepe noktaları ve model frekans noktaları arasındaki çakışma durumuna göre doğru modun frekansının bulunmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 5.4(a) ve Şekil 5.4(b)). Model derecesi tahmini için bir diğer yöntem de, Hankel matrisinin diagonal tekil değerlerinin düşey eksen logaritma eksenini boyunca çizdirilen bir grafikte de belirlenebilmesidir. Grafikteki belirgin bir sıçrayış bize o noktanın model derecesi olabileceği hakkında fikir vermektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Model derecesinin tekil değerler yardımıyla belirlenmesi.



Şekil 5.4(a) Model derecesinin stabilizasyon diyagramına etkisi.



Şekil 5.4(b). Model derecesinin stabilizasyon diyagramına etkisi.

BÖLÜM ALTI

ÇAPRAZ GÜÇ SPEKTRUM YÖNTEMİ İLE MOD ŞEKİLLERİNİN ELDE EDİLMESİ

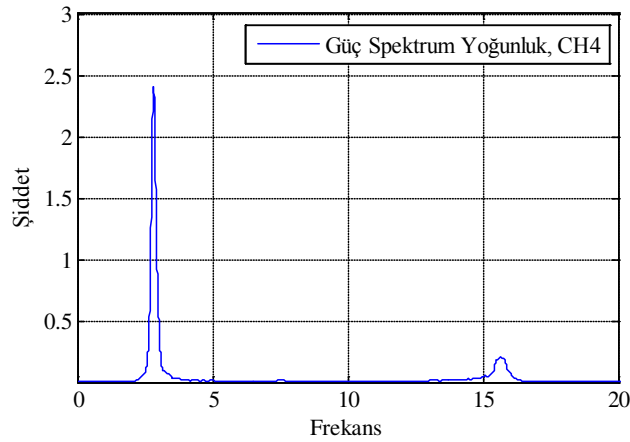
Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) ve güç spektrumu (Power Spectrum-PS), sinyal ölçme ve o sinyali analiz etmekte kullanılan önemli uygulamalardır. Var olan bir sinyalden bu hesaplamalar yardımıyla yaklaşık olarak sistemin nasıl hareket edeceği tahmini yapılabilir. FFT ve PS durağan ya da geçişken sinyallerdeki frekans içeriğini ölçmek için kullanılan işlemlerdir. FFT sinyali içeren tüm zaman boyunca oluşan frekansın ortalamasını oluşturmaktadır.

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (6.1)$$

Burada (6.1) N sinyaldeki nokta sayısı, Δt ise zaman aralığı, Δf frekans aralığıdır.

6.1 Güç Spektrum

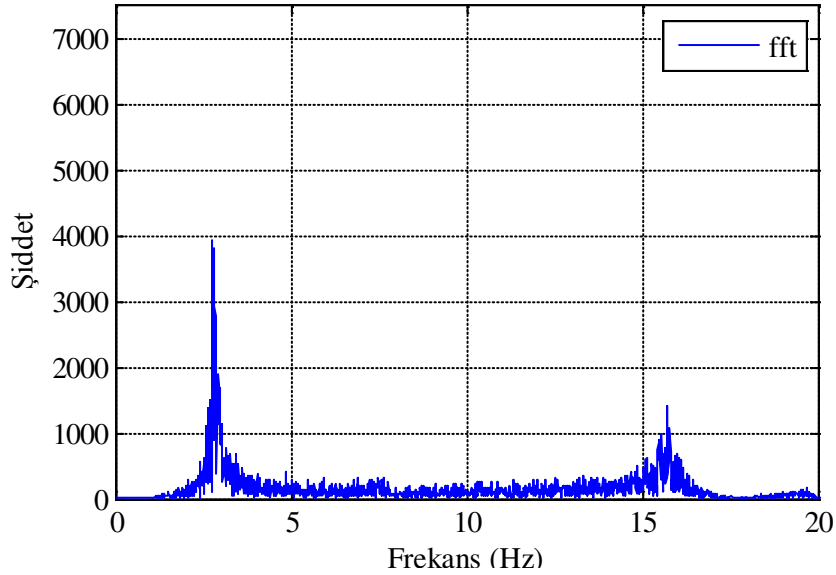
Güç spektrumu, her frekans çizgisinin genliğinin kareler ortalamasını güç olarak göstermektedir (Bendat ve Piersol,1993) . Bu grafik, faz bilgisini içermemektedir. Eğer frekans ve faz bilgisi isteniyorsa Hızlı Fourier Dönüşümü yapılmalıdır. Güç spektrumunun birimleri çoğu zaman en küçük karelerinin miktarının yerine geçmektedir. Güç spektrum yoğunluk grafiği örneği Şekil 6.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Güç spektrum yoğunluk grafiği, CH4.

6.2 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Zaman ekseninde bulunan bir sinyalin kompleks forma (reel ve imajiner) dönüşümüdür (Bendat ve Piersol, 1993). Diğer bir deyişle sinyalin zaman tanım alanından frekans tanım alanında dönüştürülmesidir. Sinyalin şiddet ve faz grafiğini elde edebilmek için polar forma dönüştürülmesi gereklidir. Frekans aksı güç spektrumu ile aynıdır. FFT genliği zaman alanındaki sinyalin üzerindeki örnek sayısı kadardır. FFT faz bilgisi sinyalin başladığı ana rölative bulunmaktadır. Bu nedenle, aynı noktalar sinyalden atılmaktadır. Böylece iki sinyal arasında bulunan faz açısı elde edilmektedir. Sunulan çalışmada alınan bir sinyal verisinin Fourier dönüşüm grafiği Şekil 6.2’ de gösterilmiştir.



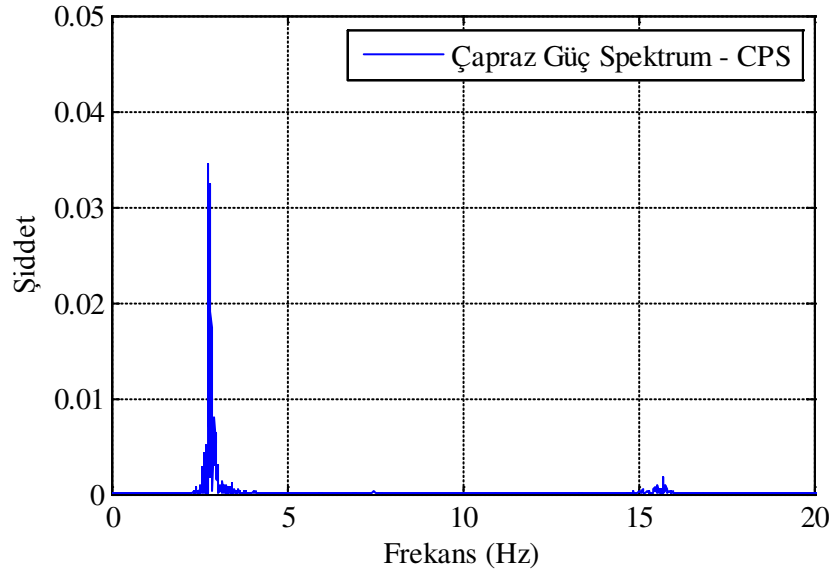
Şekil 6.2 Hızlı Fourier dönüşüm grafiği, CH3.

6.3 Çapraz Güç Spektrum

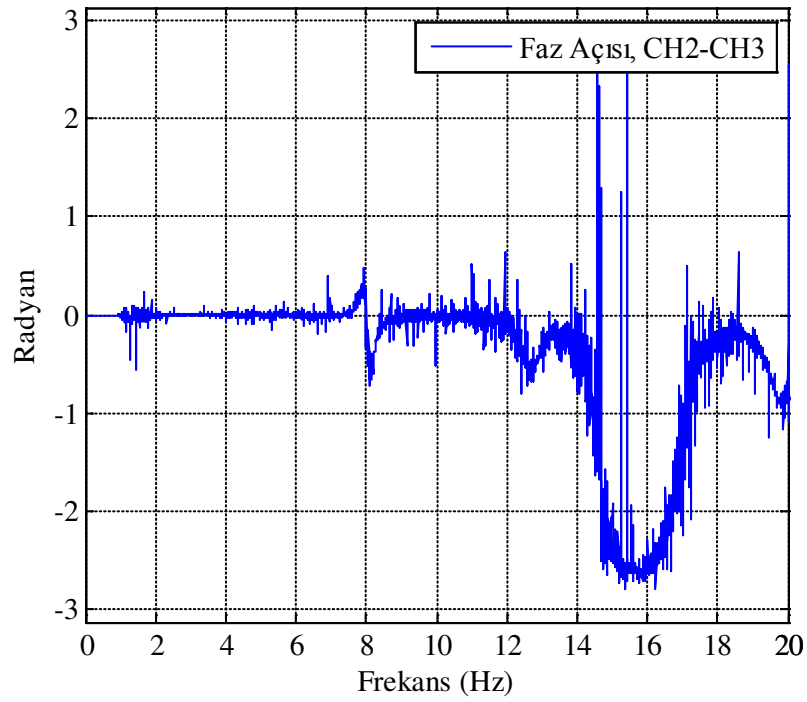
İki sinyal arasındaki faz spektrumunu elde etmeye yarayan bir yöntemdir. Zaman tanım alanında kayıtlı iki ayrı sinyal için:

$$S_{AB}(f) = \frac{FFT(B).FFT(A)^*}{N^2} \quad (6.2)$$

Denklem (6.2)'de; B 2. sinyal, A ise 1. sinyaldir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de güç spektrum grafiği ve iki sensör arasında bulunan faz açısı örneği verilmiştir.



Şekil 6.3 Çapraz güç spektrum grafiği, CH3.



Şekil 6.4 Faz açısı grafiği, CH2-CH3 sensörleri arasında.

6.4 Mod Şekillerinin Çapraz Güç Spektrum Yöntemi ile Elde Edilmesi

Çapraz Güç Spektrum Yöntemi'nde, öncelikle zaman tanım alanındaki ivme kaydından, kullanılacak olan anlamlı veriler belirlenmektedir. Bu veriler ortamsal titreşim ve darbe testlerindeki, darbe anından sonra sistemin kendi serbest titreşimleridir.

İlk olarak bu verilerin güç spektral yoğunluğu belirlenmekte ve grafik olarak çizilmektedir. Çizilen bu grafikten ilgili frekansın şiddet değeri ve aynı frekans için diğer kanallardaki şiddet değeri okunmaktadır. Seçilen bir referans kanalı ile diğer kanallar arasında çapraz güç spektral yoğunluk (CPSD) bulunmaktadır. Bu çapraz güç spektral yoğunluk değerlerinden de faz açısı elde edilmektedir. Bulunan faz açısı değerleri $-\pi$ ve $+\pi$ arasındadır. Buradaki açılar hangi kanaldaki sensörün hareketinin, seçilen kanaldaki sensörün hareketi ile aynı ya da zıt yönlü olduğunu göstermektedir. Sensörlerin olduğu noktalar hareketi gözlenen noktalar olduğundan, bu noktalardan geçen mod şekilleri elde edilmektedir (Bendat ve Piersol, 1993).

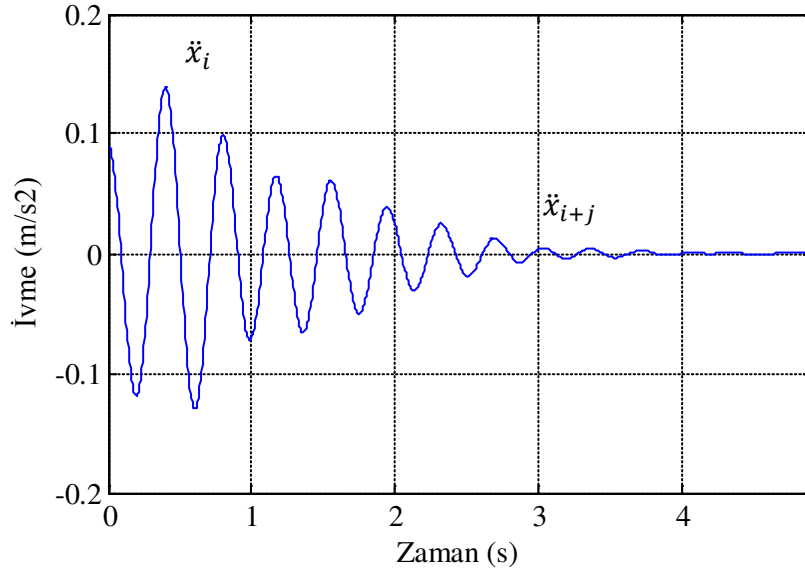
BÖLÜM YEDİ

SÖNÜM ORANI HESAPLARI

7.1 Logaritmik Azalma (LA) Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesabı

Logaritmik azalma, zaman - tanım alanında sönüm oranı hesabında kullanılan bir yöntemdir. Modlara ait frekansların bulunduğu bir sinyalde, bu frekansları içinde barındıran bir frekans aralığı belirlenmektedir. Belirlenen bu aralıklara, modal frekansları içine alan sınır değerler konularak, ayrı ayrı band-geçirgen filtre uygulanmaktadır. Böylece modları içeren sinyaller birbirinden ayrıştırılır. Filtrelenmiş sinyalde bulunan $\ddot{x}_i$, $\ddot{x}_{i+j}$ sırasıyla i. ve j. adımda okunan ivme değerindeki azalmanın logaritması (Şekil 7.1) sönüm oranını vermektedir. Bu azalma dikkate alınarak, ξ sönüm oranı denklem (7.1) şeklinde bulunmaktadır (Clough ve Penzien, 1995, Chopra, 1995) :

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{x}_i}{\ddot{x}_{i+j}} \quad (7.1)$$



Şekil 7.1 Logaritmik azalma yöntemi.

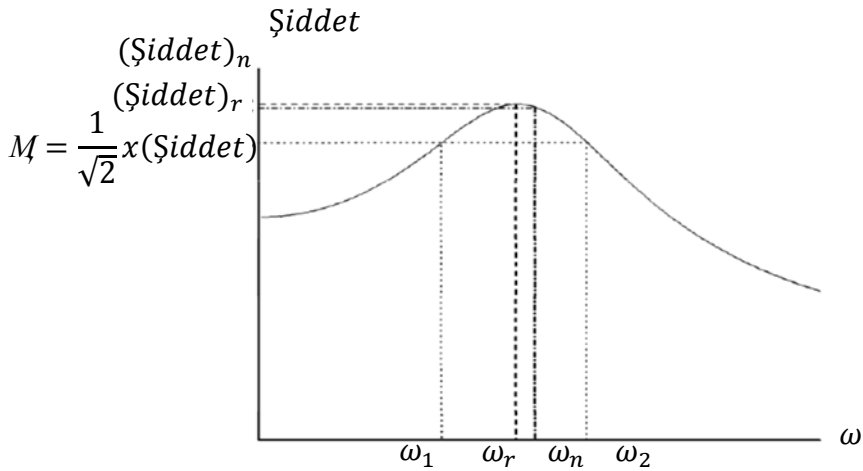
7.2 Sönüm Oranının Yarım - Güç Bant Kalınlığı Yöntemi ile Bulunması

Sönüm farklı yöntemlerle bulunabilmektedir. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerin sönüm oranlarının tahmini için kullanılabilen yarım-güç bant kalınlığı yöntemi (Half Power Band-Width Method) bunlardan bir tanesidir. Yapının dinamik tepkisi kullanılarak elde edilen Fourier genlik spektrumu grafiğinden, sistemin doğal titreşim frekanslarına karşılık gelen tepelerin belli bir oranındaki kalınlığıyla orantılı olarak, o moda karşılık gelen sönüm oranı hesaplanmaktadır.

Deneylerden elde edilen ivme verilerine hızlı Fourier dönüşümü (FFT) uygulanarak, elde edilen değerlerin şiddetleri, frekansın bir fonksiyonu şeklinde çizilmektedir. Aynı şekilde güç spektral yoğunluk grafiği de bu işlemde kullanılabilir. Yapılan deneysel çalışmada güç spektral yoğunluk grafiği kullanılmıştır. Doğal titreşim frekanslarına, ω_n , karşılık gelen tepelerin şiddetlerine M denirse, bu tepe noktalarının $M/\sqrt{2}$ değerine karşılık gelen frekans değerleri, ω_1 ve ω_2 (Şekil 7.2), kullanılarak sönüm oranları (ξ) (7.2)'de hesaplanmaktadır;

$$\omega_n \cong \omega_r, \quad \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n} \cong 2\xi, \quad M = \frac{1}{\sqrt{2}} x(\text{Şiddet}) \quad (7.2)$$

ifadeleri kullanılarak bulunabilmektedir (Papagiannopoulos ve Hatzigeorgiou, 2011).



Şekil 7.2 Yarım güç bant kalınlığı yöntemi ,

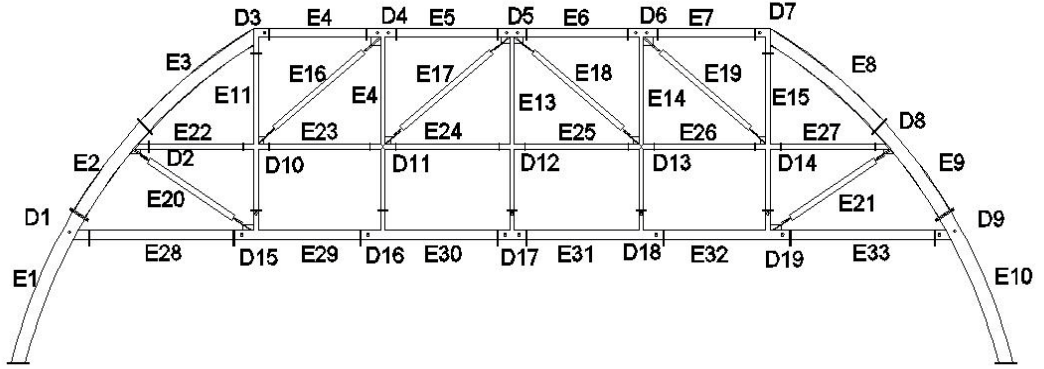
(Papagiannopoulos ve Hatzigeorgiou , 2011).

BÖLÜM SEKİZ

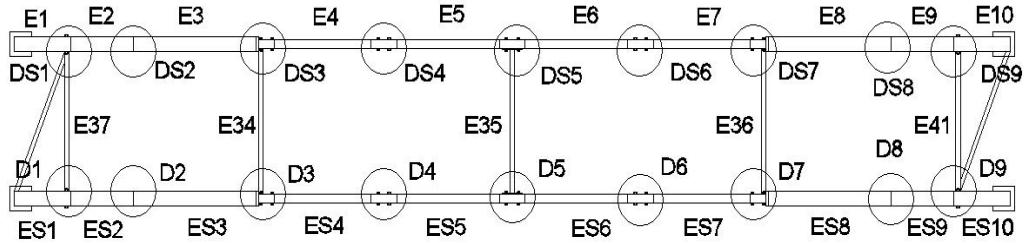
DENEY ÇALIŞMASI

8.1 Hazırlık Aşaması ve Deneyler

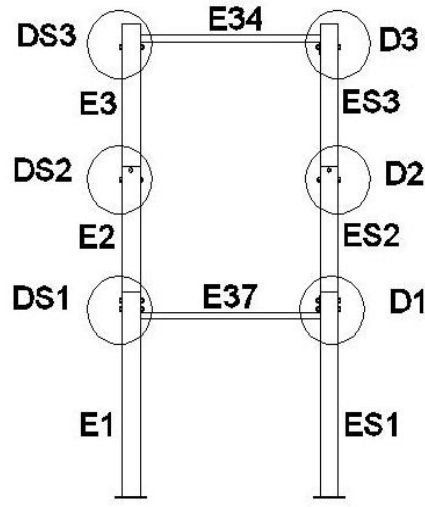
Sunulan bu tez çalışmasında, 6,30 m açıklığında, 2,05 m yüksekliğinde ve 247,32 kgf ağırlığında olan *Ponsarcus* (Şekil 8.1) isimli çelik model köprü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çelik model köprü, Boğaziçi Üniversitesi Yapı Kulübü' nün düzenlediği Design&Construct 2010 yarışmasında ikinci olmuştur. Deneysel çalışmaya, deney ortamının hazırlanması işlemi ile başlanmıştır. Köprünün plan görünümü Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3' de gösterilmiştir.



Şekil 8.1 Köprünün önden görünüşü, (PonsArcus, 2010).



Şekil 8.2 Köprünün üstten görünüşü, (PonsArcus, 2010).



Şekil 8.3 Köprünün yandan görünüşü, (PonsArcus,2010), (DS $I(I=1,n)$): Arka yüz düğüm noktaları, D $I(I=1,n)$: Ön yüz düğüm noktaları, E $I(I=1,n)$: Köprünün D ve DS dışındaki elemanları.

Çelik model köprünün ayakları, sabit mesnet olarak mesnetlenmiştir. Mesnetleme işleminde, laboratuvarında bulunan 30 x 12 x 150 cm ebatlarında ve 135 kgf ağırlığında olan betonarme bloklar kullanılmıştır. Deneye hazırlık aşaması, ilk olarak betonarme blok üzerindeki işlemlerle başlatılmış, blok üzerinde bulunan kancalar kesilmiştir (Şekil 8.4).



Şekil 8.4 Betonarme blokta bulunan kancaların kesilmesi.

Bu işlemden sonra 22 cm x 22 cm ebatlarında fabrikada kestirilen çelik sac plağın betonarme blok üzerine yerleştirilmesi için, betonarme blok üzerinde uygun noktalar işaretlenmiştir. Bu noktalar, matkap yardımı ile $\phi 8$ boyutundaki ankraj çubuklarının (dübel) girebilmesi için delinmiştir. Bu noktalara ankraj çubuğunun takılması ile çelik sac, betonarme bloğa mesnetlenmek için hazır hale getirilmiştir (Şekil 8.5, Şekil 8.6).



Şekil 8.5 Çelik sac ve betonarme blok.



Şekil 8.6 Betonarme bloğa dübellerin yerleştirilmesi.

Ardından vinç yardımı ile çelik model köprü, mesnet olarak kullanılması planlanan betonarme blok üzerine, köprü ayakları çelik sacı ortalayacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 8.7, Şekil 8.8, Şekil 8.9, Şekil 8.10).



Şekil 8.7 Köprünün betonarme blok üzerine yerleştirilmesi.



Şekil 8.8 Köprü ayaklarının görünümü.



Şekil 8.9 Sacın betonarme plak üzerine yerleştirilmesi.



Şekil 8.10 Köprü ayaklarının dübellenmesi.

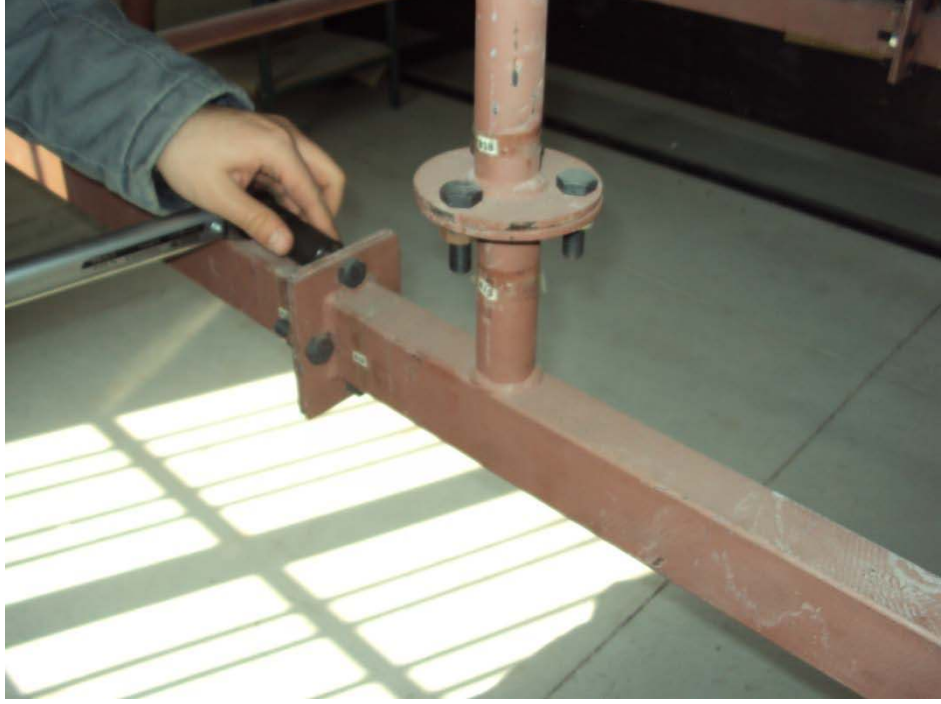
Çelik model köprünün öncelikle ayaklarının doğrudan betonarme bloğa bağlanması planlanmış fakat laboratuvar şartlarında matkap yardımıyla çeliğin delinmesinin zor olduğu görülmüştür. Bu yüzden çelik sac, özel olarak üzeri lazer ile önceden delinmiş şekilde fabrikadan alınmıştır. Çelik sac ile üzerinde bulunan köprü ayağı kaynak yapılması yardımıyla birleştirilmiştir (Şekil 8.11).



Şekil 8.11 Köprü Ayaklarının Kaynaklanarak Mesnetlenmesi.

Çelik model köprünün sabit mesnet olarak mesnetlenmesinin ardından, köprün elemanlarının birlikte hareket edebilmesi için, sistemdeki tüm elemanlar tamamen gevşetilerek 100Nm tork değeri ile sıkıştırılmıştır.

Fakat yapılan ilk deneyler sonucunda sistemin aşırı rijit olduğu, köprüden alınan ivme kayıtlarının analizi ile anlaşılmış ve tork değeri %70 azaltılarak 30 Nm değeri ile tekrar sıkılmıştır (Şekil 8.12, Şekil 8.13).

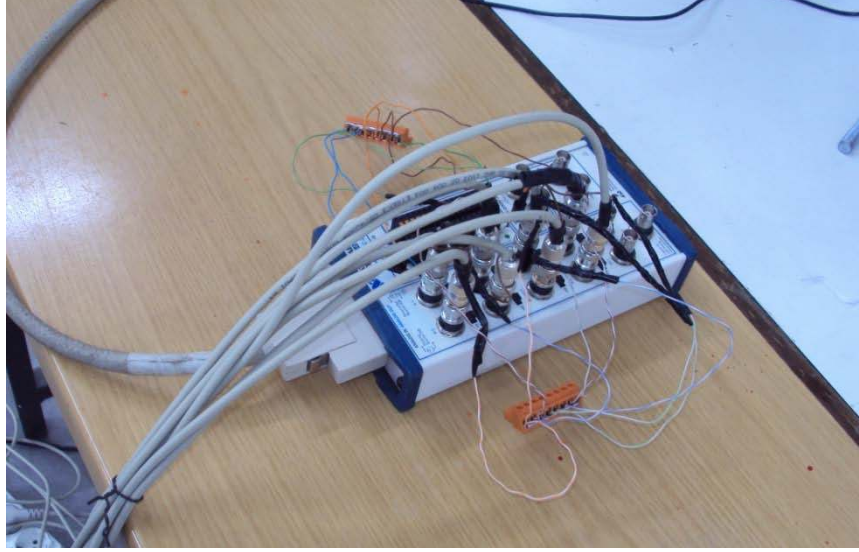


Şekil 8.12 Köprü bağlantılarının belirli tork değeri ile sıkılması.



Şekil 8.13 Köprünün bağlantılarının belirli tork değeri ile sıkılması.

Deney esnasında elektronik cihazlar ile ilgili sorunlar da yaşanmıştır. Bunların en önemlileri veri toplama bloğu (Şekil 8.14) ve sensörler (Şekil 8.15) arasında kullanılan kablolarda yaşanan bağlantı sorunları olmuştur. Bağlantı sorunları bazı zamanlarda sensörün yanlış veri ölçmesine sebep olmuş, bazen de deney esnasında sinyalin kesilmesine yol açarak, deneyler tekrarlanmak zorunda kalmıştır.



Şekil 8.14 Veri toplama bloğu.



Şekil 8.15 Tek eksenli sensör.

Ayrıca köprünün elemanlarından bazıları laboratuvar ortamında deney şartlarının zorluğundan ötürü çıkartılmıştır. Çünkü sisteme uyarım vermenin zorluğunun yanı sıra, yapıda istenilen frekanslarının elde edilememesi gibi durumlar ortaya çıkmıştır.

Daha sonraki işlem olarak, 30cm x 12cm x 150 cm ebatlarında olan diğer betonarme bloklar köprü yüzeyine vinç yardımıyla yerleştirilmişlerdir (Şekil 8.16, Şekil 8.17, Şekil 8.18). Köprü yüzeyine ağırlık yerleştirilmesindeki amaç, köprünün laboratuvar ortamında istenilen frekanslarının elde edilebilmesidir.



Şekil 8.16 Köprüye betonarme blok ağırlıkların yerleştirilmesi.



Şekil 8.17 Köprü üzerindeki betonarme ağırlıklar.



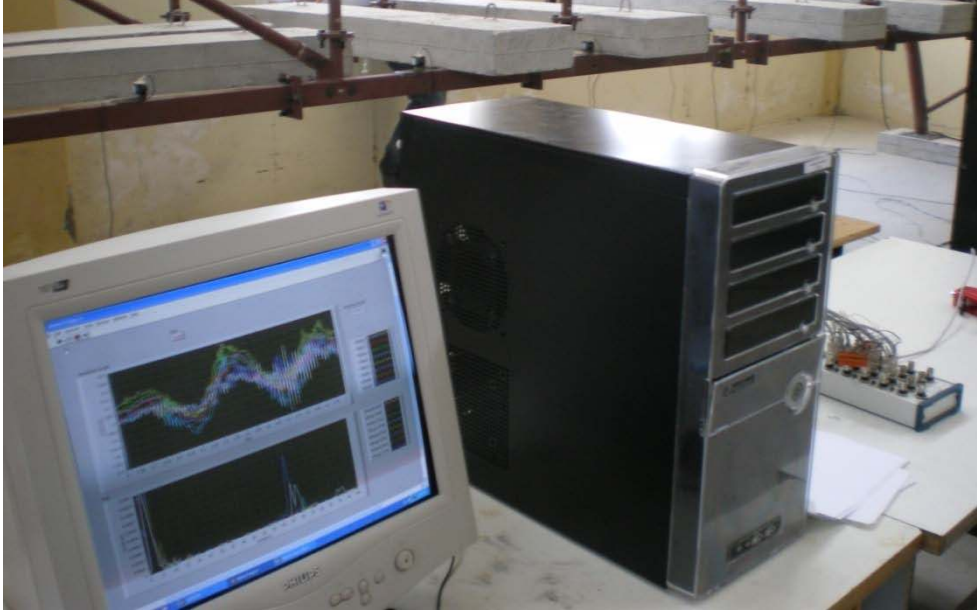
Şekil 8.18 Farklı açılardan köprü ve blokların görünümü.

Sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasında, çelik model köprüde test tanımlama işlemi yapılmıştır (Caicedo, 2011). Deney esnasında köprü, ani darbe ve ortamsal titreşim ile uyarılmıştır. 8 adet kanalı bulunan veri toplama bloğundan ivme kayıtları alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan sensörler tek eksenlidir ve Y eksenini boyunca hareket edecek şekilde yerleştirilmiştir. İlk deney düzeneğinde 4 adet sensör yatay Y eksenini doğrultusundaki hareketi algılayacak şekilde, 4 adet sensör düşey Z eksenini yönündeki hareketi algılayacak şekilde yerleştirilmiştir. İkinci tip deney düzeneğinde ise, deney düzeneğinde 8 adet sensör yatay Y eksenindeki hareketi algılayacak şekilde yerleştirilmiştir.

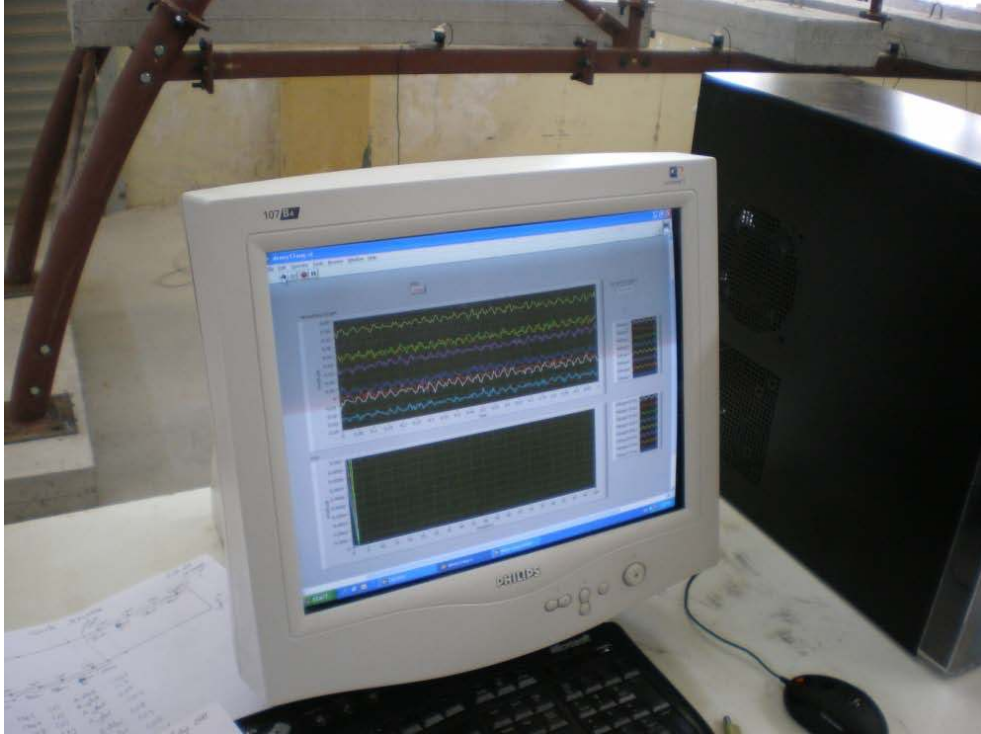
Deney esnasında, ani darbe ile uyarılan köprünün ivme kaydının bilgisayar ekranındaki görünümü Şekil 8.19, ortamsal titreşim etkisi altındaki köprünün ivme kaydının bilgisayar ekranındaki görünümü Şekil 8.20’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.19(a) Ani darbe etkisi ile uyarılan köprünün ivme kaydı örneği.



Şekil 8.19(b) Ani darbe etkisi ile uyarılan köprünün ivme kaydı örneği.



Şekil 8.20 Ortamsal titreşim etkisi altındaki sistemden alınan ivme kaydı örneği.

Sunulan tez çalışmasında yapılan ve analizde kullanılan deneyler Tablo 8.1’ de gösterilmektedir.

Tablo 8.1 Deney listesi

Deney No	Deney Adı	Deney Tarihi	Uyarım Şekli
1	rec	12.05.2011	Ortamsal titreşim
2	rec_1	12.05.2011	Ani darbe
3	rec_2	12.05.2011	Ani darbe
4	rec_3	12.05.2011	Ani darbe
5	rec_4	12.05.2011	Ani darbe
6	rec_5	12.05.2011	Ani darbe
7	rec_6	12.05.2011	Ani darbe
8	rec_7	12.05.2011	Ani darbe
9	rec_8	12.05.2011	Ani darbe
10	rec_9	12.05.2011	Ani darbe
11	rec_10	12.05.2011	Ani darbe
12	rec_11	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
13	rec_12	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
14	rec_13	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
15	rec_14	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
16	rec_15	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
17	rec_16	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
18	rec_17	12.05.2011	Ani darbe (Zıplama)
19	rec_18	12.05.2011	Ani darbe
20	rec_19	12.05.2011	Ani darbe
21	rec_20	12.05.2011	Ani darbe
22	rec_21	12.05.2011	Ani darbe
23	rec_22	12.05.2011	Ani darbe
24	rec_23	12.05.2011	Ani darbe
25	rec_24	12.05.2011	Ortamsal Titreşim
26	deney	11.08.2011	Ortamsal Titreşim

Tablo 8.1 (devamı)

27	deney_1	11.08.2011	Ortamsal Titreşim
28	deney_2	11.08.2011	Ortamsal Titreşim
29	deney_3	11.08.2011	Ani darbe
30	deney_4	11.08.2011	Ani darbe
31	deney_5	11.08.2011	Ani darbe
32	deney_6	11.08.2011	Ani darbe
33	deney_7	11.08.2011	Ani darbe
34	deney_8	11.08.2011	Ani darbe
35	deney_9	11.08.2011	Ani darbe
36	deney_10	11.08.2011	Ani darbe
37	deney_11	11.08.2011	Ani darbe
38	deney_12	11.08.2011	Ani darbe
39	deney_13	11.08.2011	Ani darbe
40	deney_14	11.08.2011	Ani darbe
41	deney_15	11.08.2011	Ani darbe
42	deney_16	11.08.2011	Ani darbe
43	deney_17	11.08.2011	Ortamsal Titreşim
44	deney_18	11.08.2011	Ortamsal Titreşim
45	deney_19	11.08.2011	Ani darbe

8.2 Mod Şekilleri

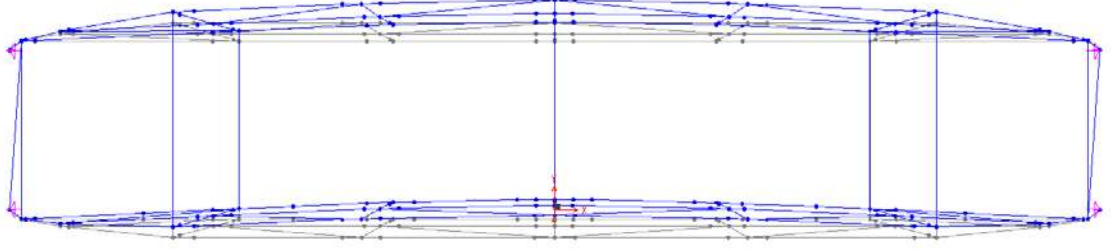
8.2.1 Çelik Model Köprü SAP 2000® Modal Analiz Sonuçları

Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvar'ında bulunan çelik model köprünün, ortamsal titreşim deneylerinin analizi sonucunda gürültü vb. etkenlerden dolayı modal parametrelerin elde edilemediği görülmüştür. Bu sebeple var olan köprü, bilgisayar ortamında kalibre edilmiştir. Matlab® programında oluşturulan beyaz gürültü (White Noise) verisi, modellenen bu köprüye bilgisayar ortamında etkilmiştir. Sonuç olarak hem modal analiz yapılarak sistemin mod şekilleri ve frekansları bulunmuş, hem de tanımlanan

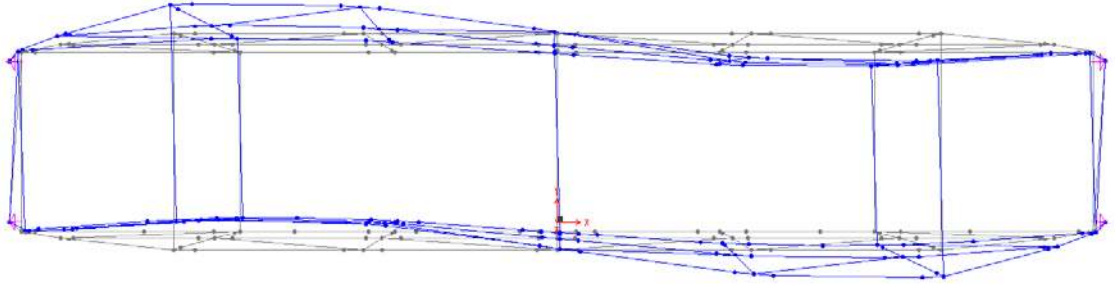
noktalardan okunan tepki değerlerinin NExT-ERA' da analiz edilmesi sağlanmıştır. Sistemin SAP 2000® programından elde edilen modal analiz sonuçları Tablo 8.2' de gösterilmiştir. Mod şekilleri Şekil 8.21, Şekil 8.22, Şekil 8.23' de görülmektedir. Bu sonuçlara göre modal kütle katılım oranı en fazla olan 2,739 Hz frekanstaki moddur. Tablo 8.2'de bulunan 1, 4 ve 8 numaralı modlar deney ortamından alınan veri analizinde elde edilebilmiş, bu yüzden sırasıyla NExT-ERA, ERA ve çapraz güç spektrum yönteminden elde edilen mod şekillerinde 1., 2. ve 3. mod şekli olarak adlandırılmıştır. Kalibre işlemi deney verilerinin kullanıldığı, ERA yönteminden bulunan modal parametrelere göre yapılmıştır.

Tablo 8.2 Çelik model köprünün SAP 2000® programında modal analizi sonucu elde edilen periyot ve frekanslar

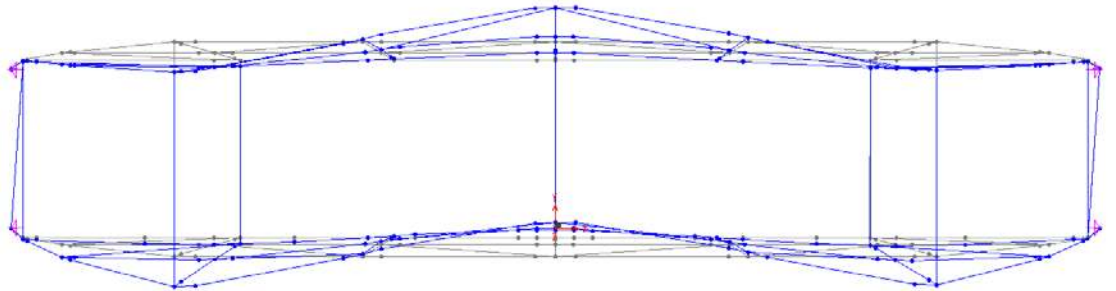
Analiz Şekli	Basamak Tipi	Mod Numarası	Periyot	Frekans	Modal Kütle Katılım Oranı
		Birimsiz	Saniye	Çevrim/Saniye (Hz)	Birimsiz
MODAL	Mod	1	0,36509	2,739	0,728
MODAL	Mod	2	0,158368	6,3144	0,00002035
MODAL	Mod	3	0,144613	6,915	0,002785
MODAL	Mod	4	0,121994	8,1971	0,00009718
MODAL	Mod	5	0,113534	8,808	0,000001026
MODAL	Mod	6	0,106048	9,4297	1,12E-08
MODAL	Mod	7	0,081867	12,215	0,0003836
MODAL	Mod	8	0,066124	15,123	0,079
MODAL	Mod	9	0,050646	19,745	0,00829
MODAL	Mod	10	0,0466	21,459	0,000003144
MODAL	Mod	11	0,0382	26,178	0,000004086
MODAL	Mod	12	0,037084	26,966	0,000006211



Şekil 8.21 1. Mod şekli (SAP 2000® programı ile analiz edilmiştir, XY düzlemindeki hareket).



Şekil 8.22 2. Mod şekli (SAP 2000® programı ile analiz edilmiştir, XY düzlemindeki hareket).

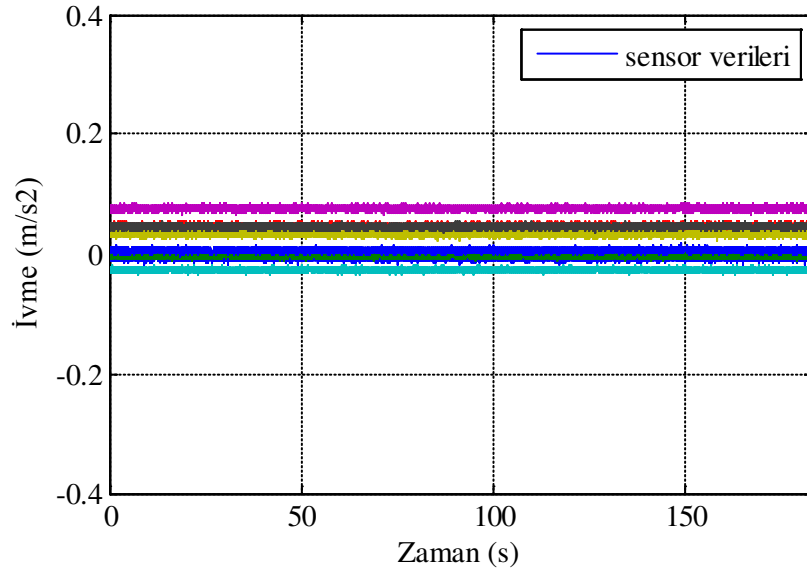


Şekil 8.23 3. Mod şekli (SAP 2000 ® programı ile analiz edilmiştir, XY düzlemindeki hareket).

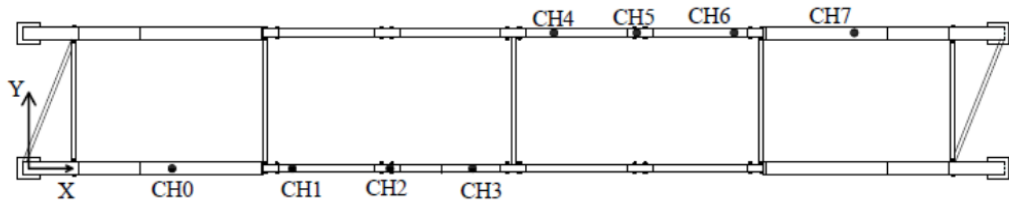
8.2.2 Çelik Model Köprü NExT-ERA Yöntemi Sonuçları

NExT-ERA yöntemi, diğer bölümlerde de bahsedildiği üzere ortamsal titreşim verisini (Şekil 8.24) kullanan bir sistem tanımlama yöntemidir. Deney sırasında sensörlerin XY düzleminde planda görünümü Şekil 8.25’ de gösterilmiştir. NExT-ERA’ dan bulunan mod şekilleri ile, çelik model köprünün SAP2000® programında

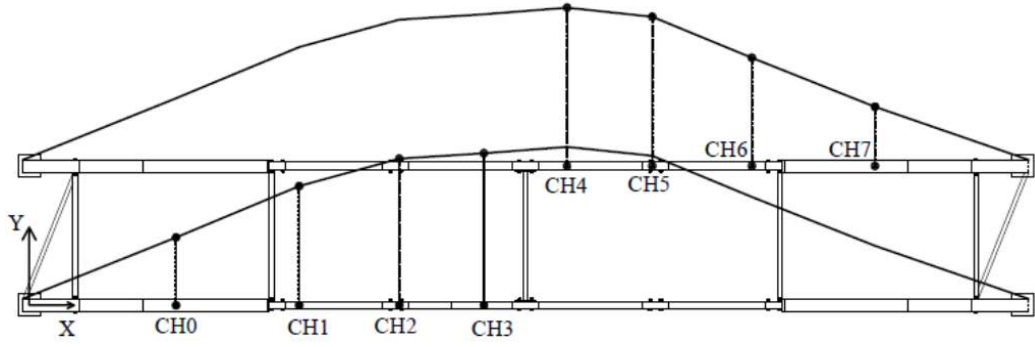
kalibre edilmiş modelinin, modal analizi sonucu elde edilen Y eksenı yönündeki mod vektörleri arasında modal güvenlik kriteri (MAC) hesaplanmıştır. Simulasyon ortamına etkililen beyaz gürültü (white noise) sinyalinde kullanılan rms değeri arttıkça, farklı mod noktalarındaki frekansların şiddetinin arttığı, dolayısıyla farklı modların elde edildiği görülmüştür. Bulunan MAC değerlerini %70'i geçmesi nedeniyle Şekil 8.26, Şekil 8.27 ve Şekil 8.28' de gösterilen birinci, ikinci ve üçüncü doğal titreşim frekanslarına ait mod şekillerinin sistemin modal analiz sonucu bulunan mod hareketiyle örtüştüğü gözlenmiştir.



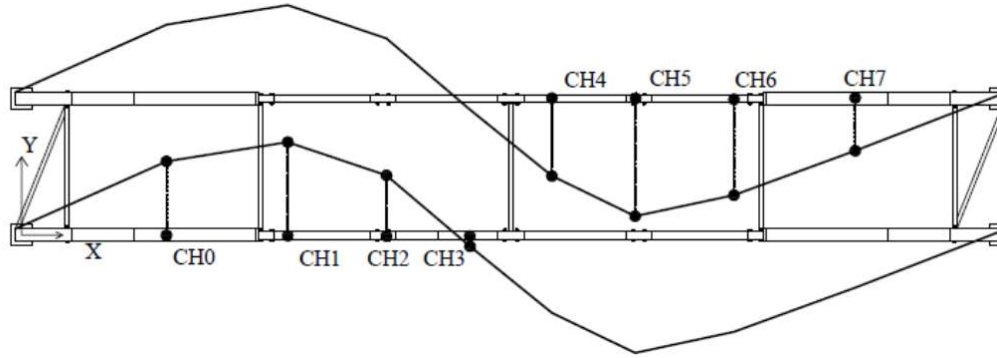
Şekil 8.24 NExT-ERA yönteminde kullanılan, ortamsal titreşim etkisi altındaki sistem türü ivme kayıt örneği.



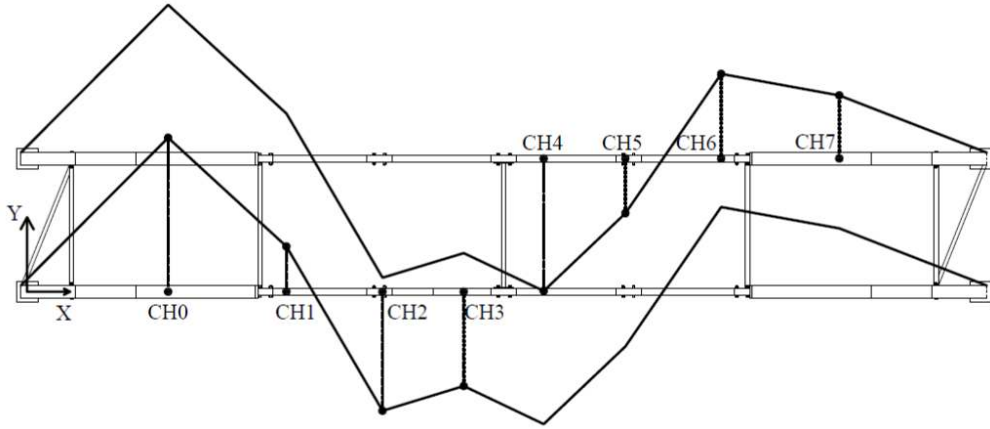
Şekil 8.25 XY düzleminde 8 sensörün planda görünümü, (Sensör hareket eksenı: Y).



Şekil 8.26 NExT-ERA yönteminden bulunan birinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (1. mod, doğal titreşim frekansı 2,73 Hz, sönüm oranı 0,0817, MAC=1).



Şekil 8.27 NExT-ERA yönteminden bulunan ikinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (2. mod, doğal titreşim frekansı 8,2 Hz, sönüm oranı 0,01, MAC=0,9045).



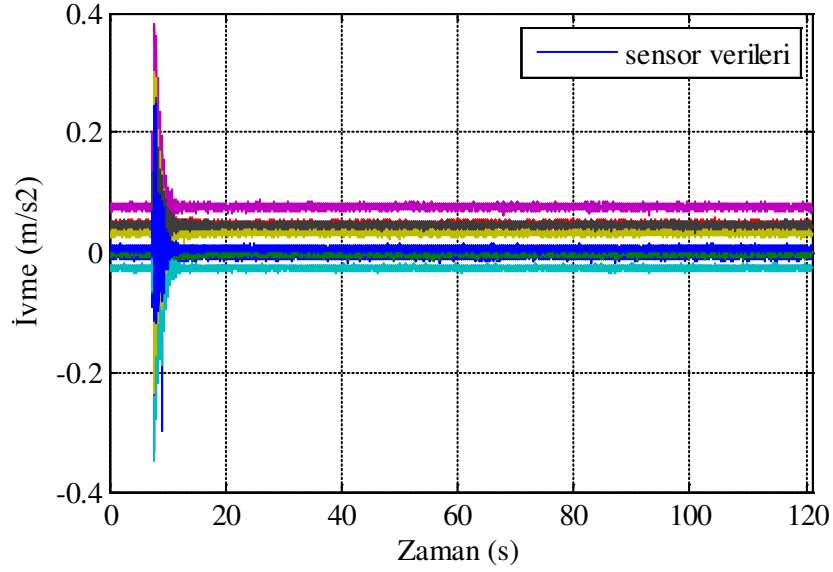
Şekil 8.28 NExT-ERA yönteminden bulunan üçüncü doğal titreşim frekansına ait mod şekli (3. mod, doğal titreşim frekansı 15,13 Hz, sönüm oranı 0,0046, MAC=0,9999).

8.2.3 Çelik Model Köprü ERA (8 sensör) Yöntemi Mod Şekilleri Sonuçları

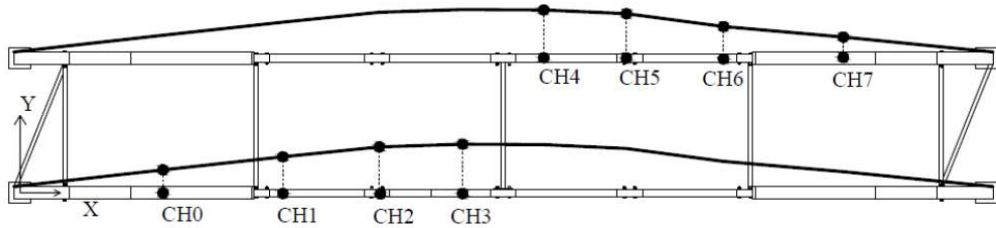
ERA yöntemi ani darbe etkisiyle uyarılmış sistemin analizinde kullanılmıştır (Şekil 8.29). ERA' dan bulunan birinci, ikinci ve üçüncü doğal titreşim frekanslarına ait mod şekilleri ile, çelik model köprü'nün SAP2000® programında kalibre edilmiş

modelinin, modal analizi sonucu elde edilen Y eksenindeki mod vektörleri arasında modal güvenlik kriteri (MAC) hesaplanmıştır.

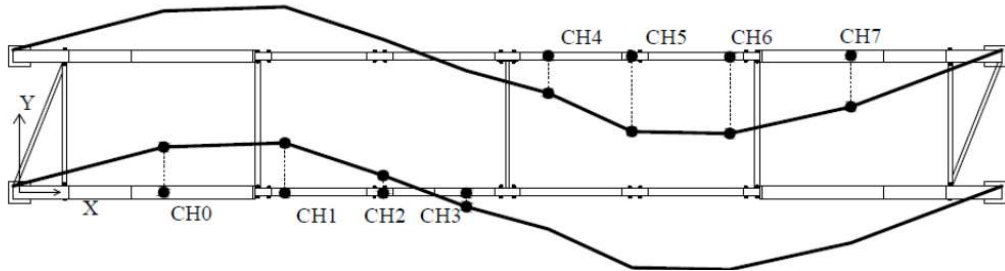
Bulunan MAC değerlerini %70'i geçmesi nedeniyle Şekil 8.30, Şekil 8.31, Şekil 8.32' de gösterilen mod şekillerinin, sistemin kalibre edilmiş modelinden elde edilen hareketiyle örtüştüğü gözlenmiştir.



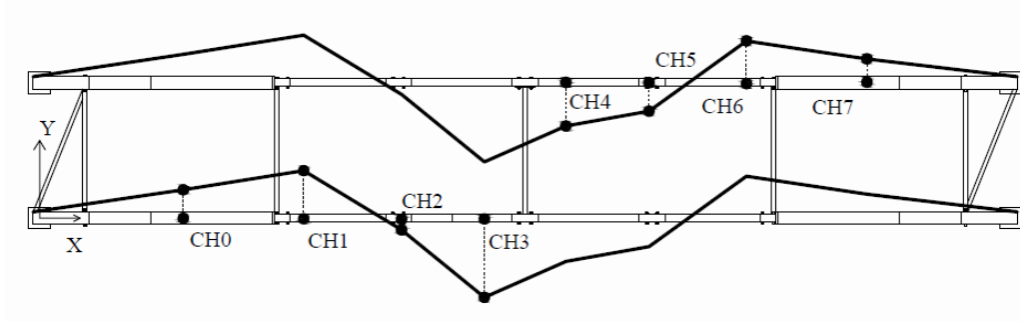
Şekil 8.29 ERA yönteminde kullanılan, ani darbe etkisiyle uyarılmış sistem türü ivme kayıt örneği.



Şekil 8.30 ERA yönteminden bulunan birinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (1. mod, doğal titreşim frekansı 2,63 Hz, sönüm oranı 0,0802, MAC =0,9982).



Şekil 8.31 ERA yönteminden bulunan ikinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (2. mod, doğal titreşim frekansı 8,16 Hz, sönüm oranı 0,0105, MAC =0,8694).

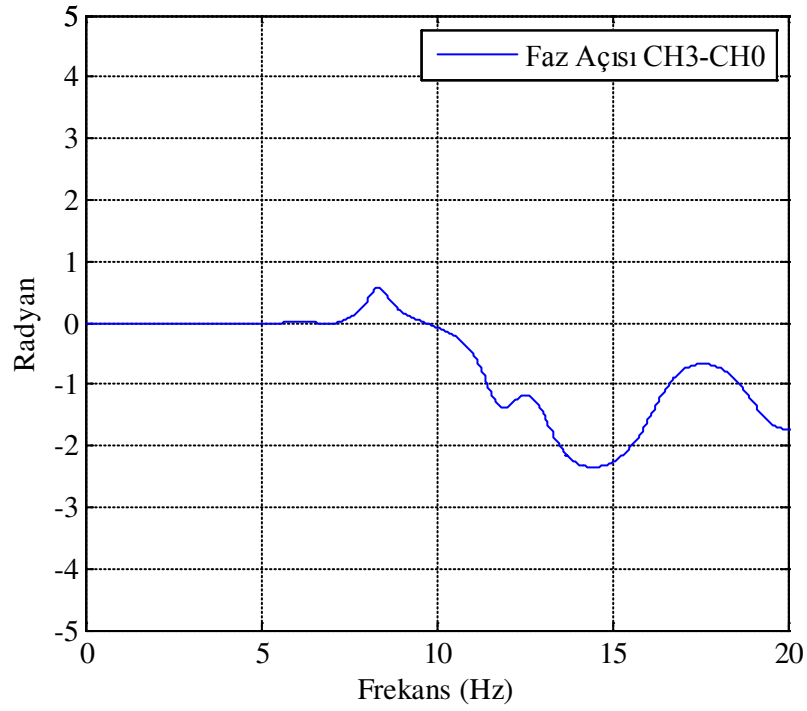
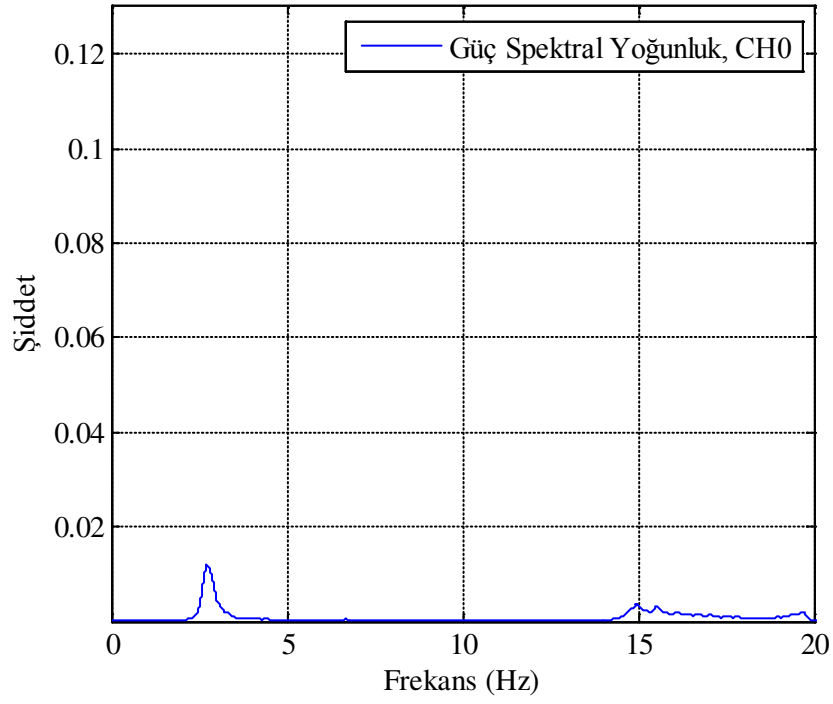


Şekil 8.32 ERA yönteminden bulunan üçüncü doğal titreşim frekansına ait mod şekli (3. mod, doğal titreşim frekansı 15,22 Hz, sönüm oranı 0,0040, MAC =0,7751).

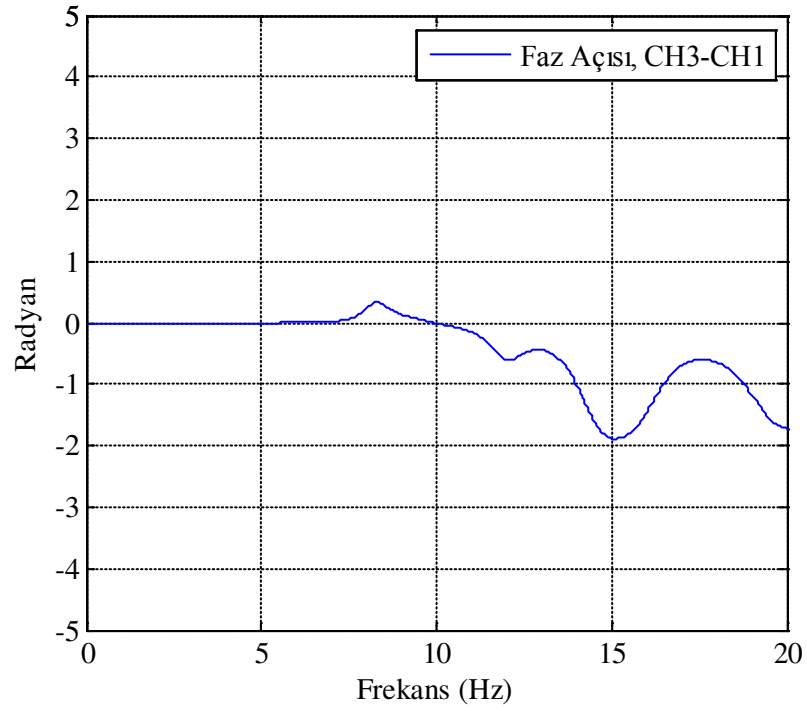
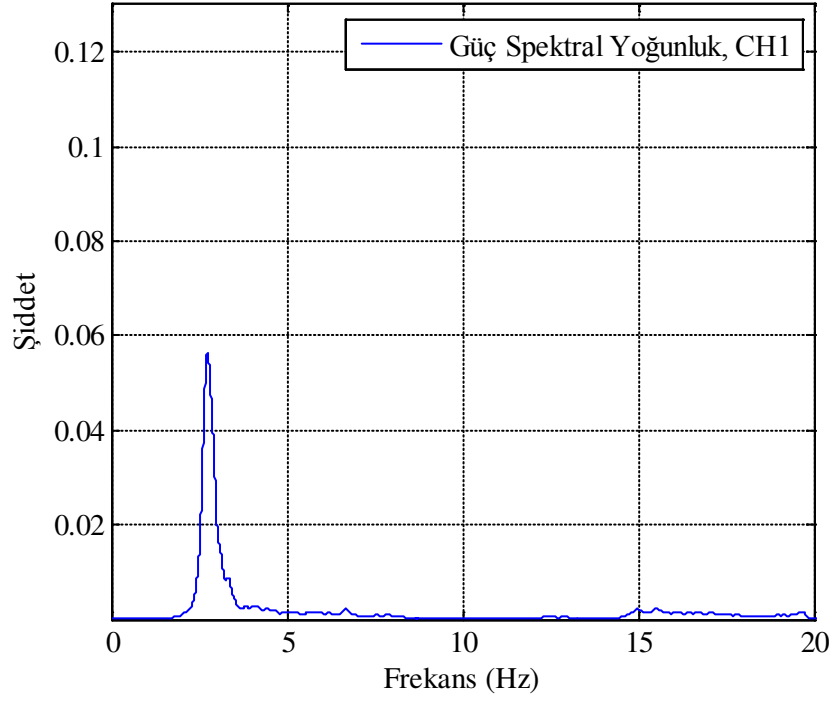
8.2.4 Çelik Model Köprü Çapraz Güç Spektrum Yöntemi Mod Şekilleri Sonuçları

Sunulan bu çalışmada çapraz güç spektrum yönteminin kullanılmasındaki amaç, NExT-ERA ve ERA’ dan elde mod şekillerinin, farklı bir yöntemle sağlamasının yapılmasıdır.

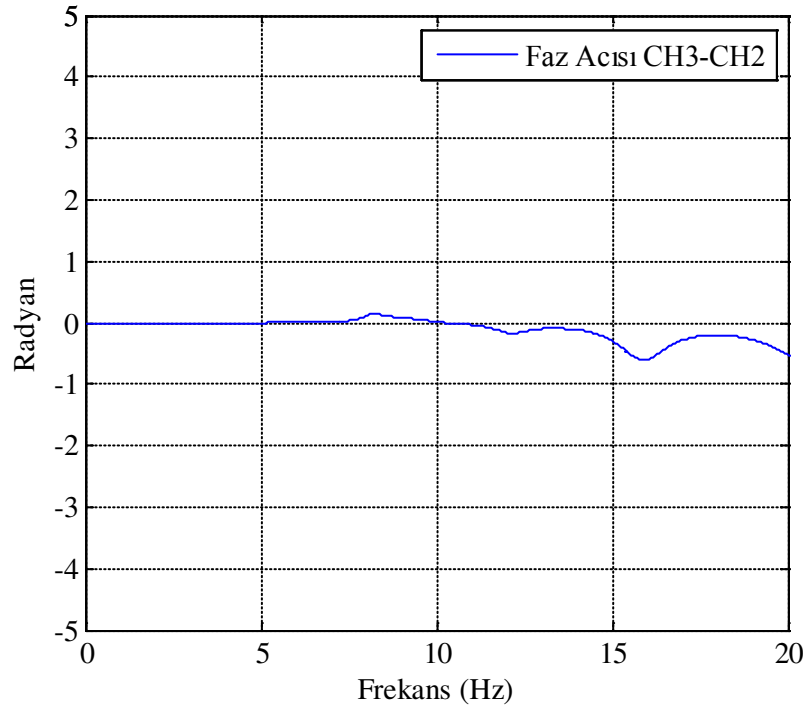
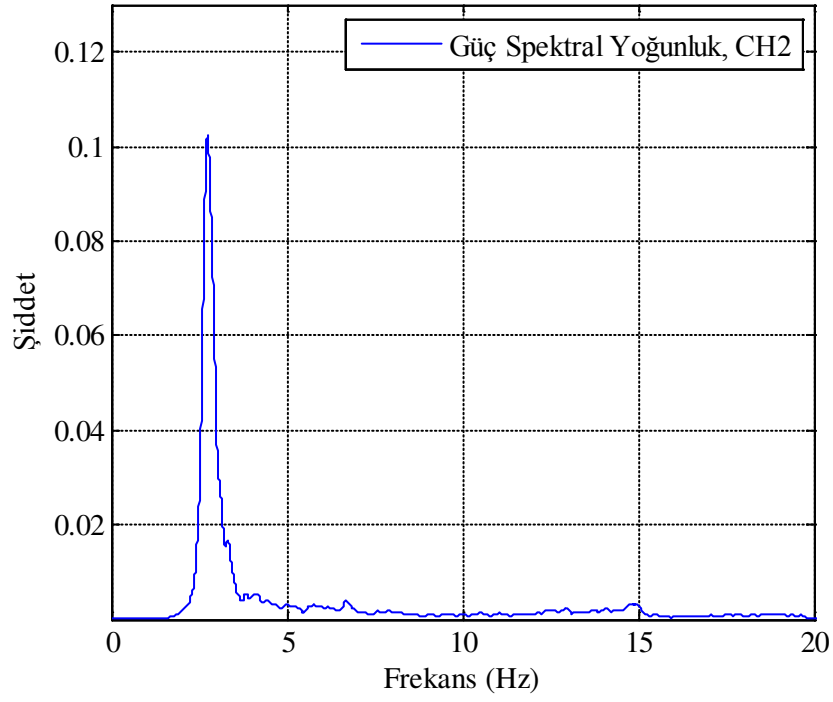
CH3 sensörü referans kabul edilerek uygulanan bu yöntemde, güç spektral yoğunluk ve sensörler arasında bulunan faz farkı yardımıyla sistemin doğal titreşim frekanslarına ait mod şekilleri yaklaşık olarak tahmin edilmiştir. Güç spektral yoğunluk ve sensörler arasındaki faz açısı grafikleri, Şekil 8.33, Şekil 8.34, Şekil 8.35, Şekil 8.36, Şekil 8.37, Şekil 8.38, Şekil 8.39, Şekil 8.40’ de gösterilmektedir. Bunlara bağlı olarak bulunan mod şekilleri ise Şekil 8.41, Şekil 8.42 ve Şekil 8.43’ de gösterilmiştir.



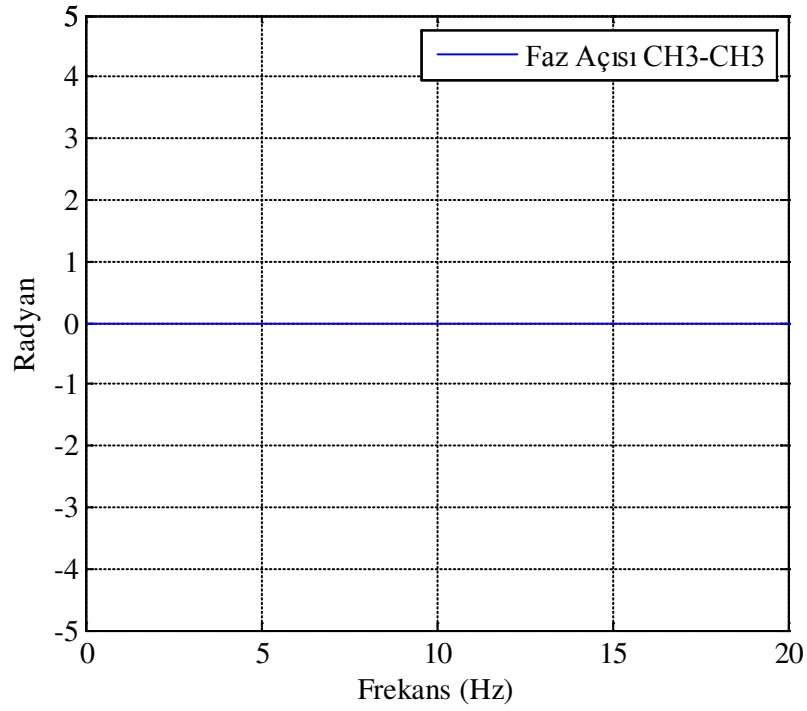
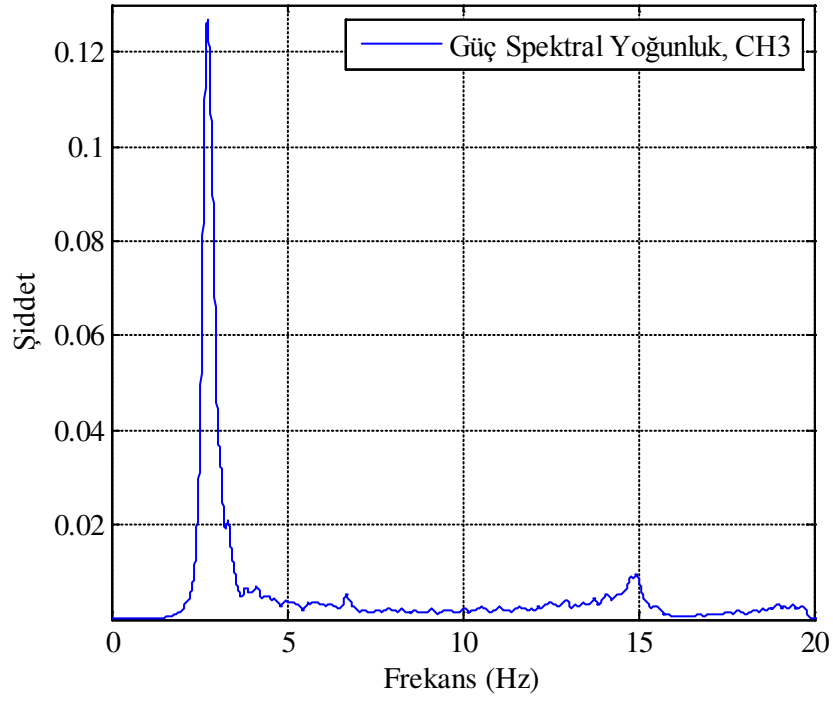
Şekil 8.33 CH0 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



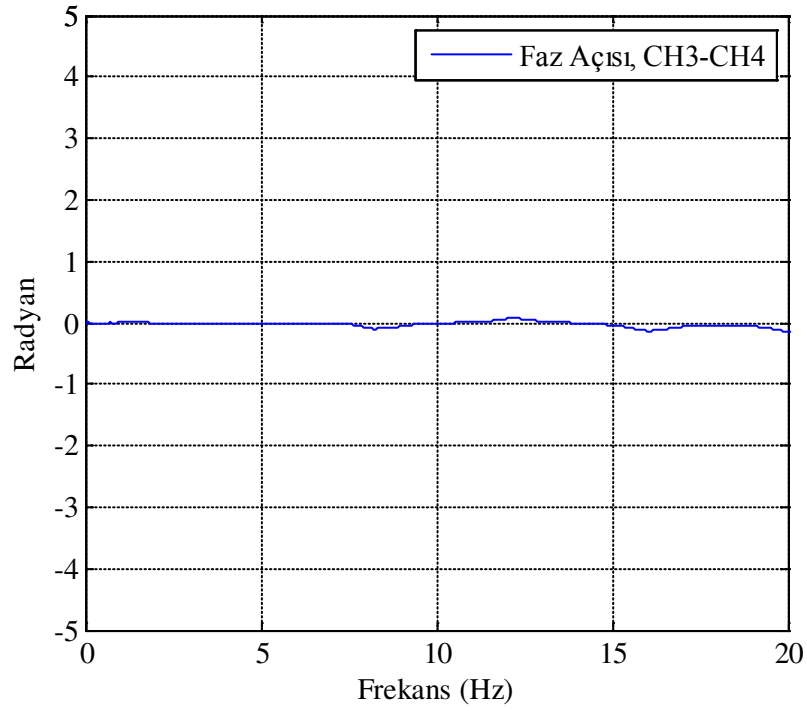
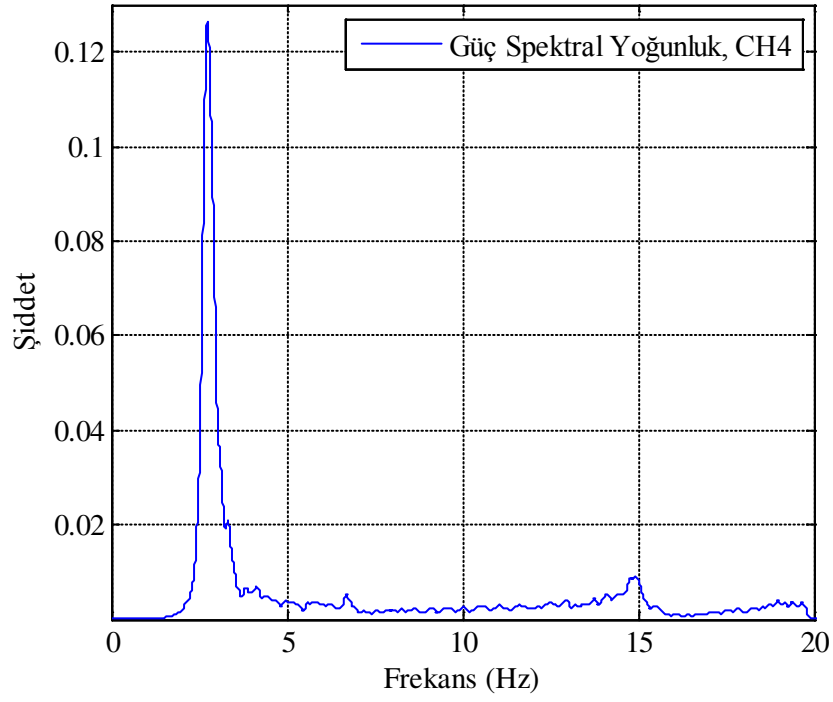
Şekil 8.34 CH1 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



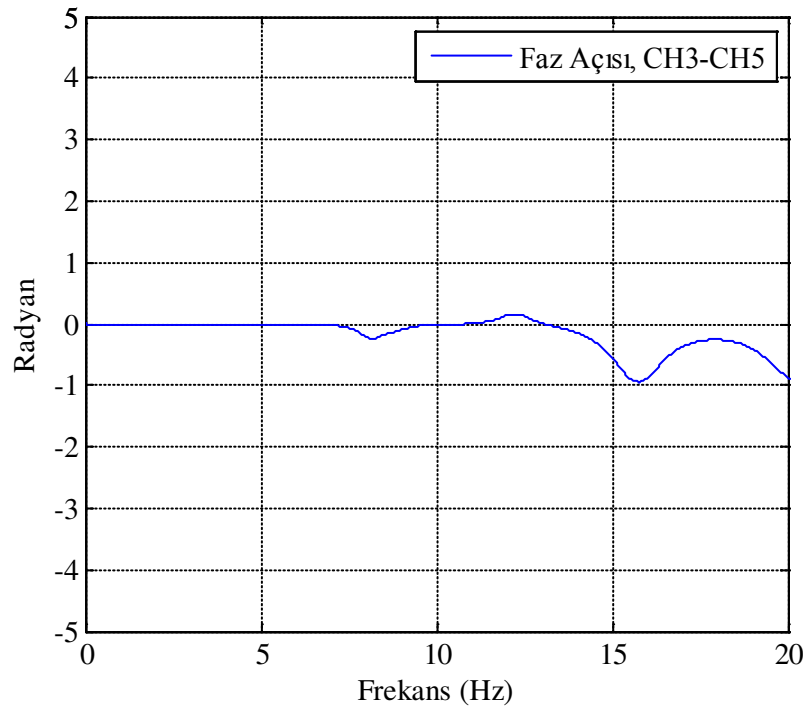
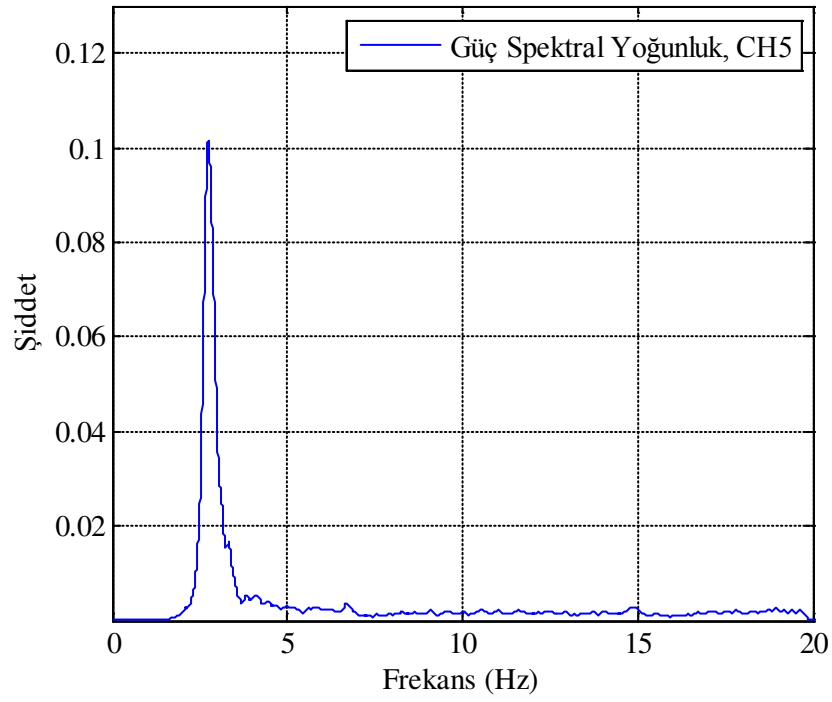
Şekil 8.35 CH2 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



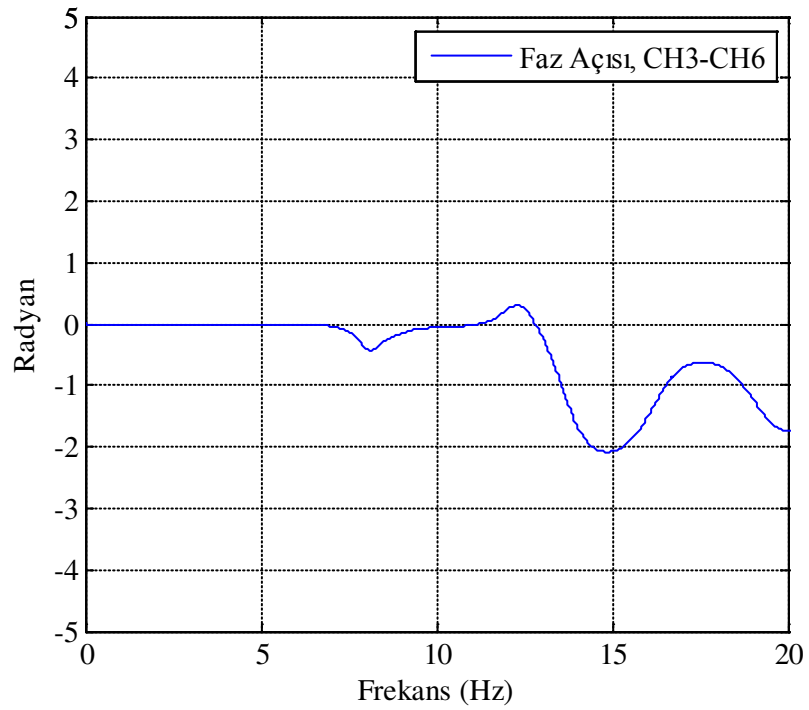
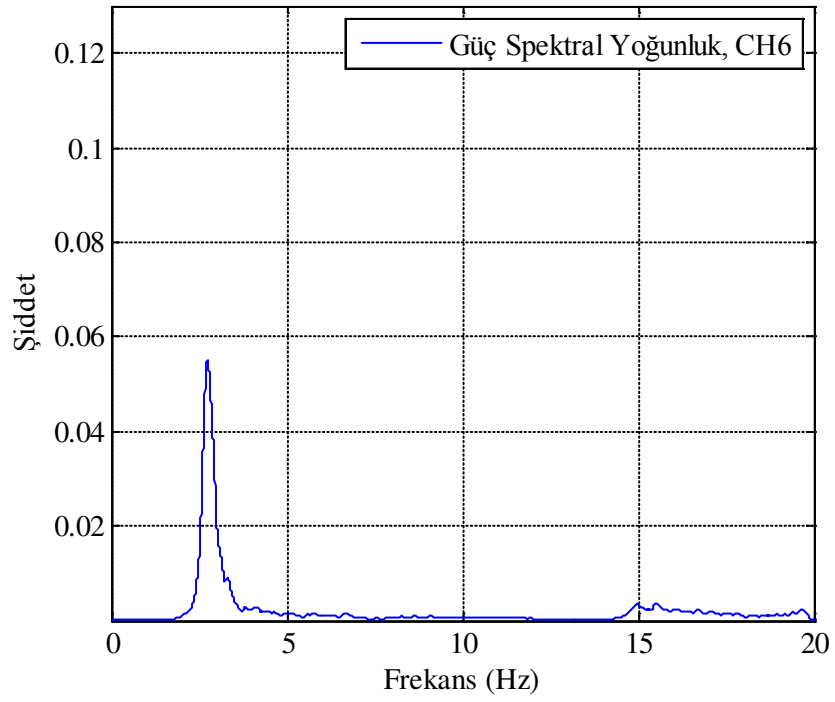
Şekil 8.36 CH3 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



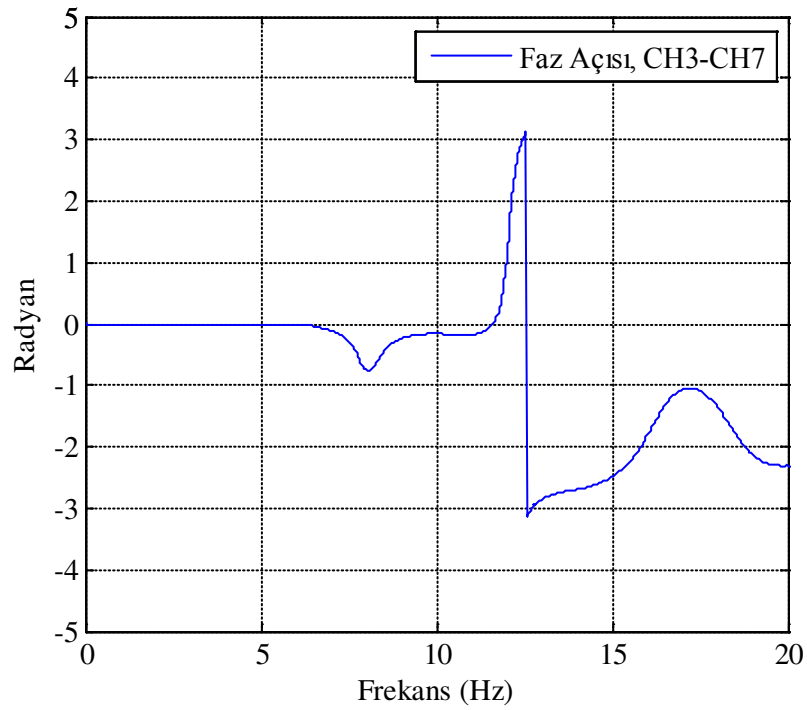
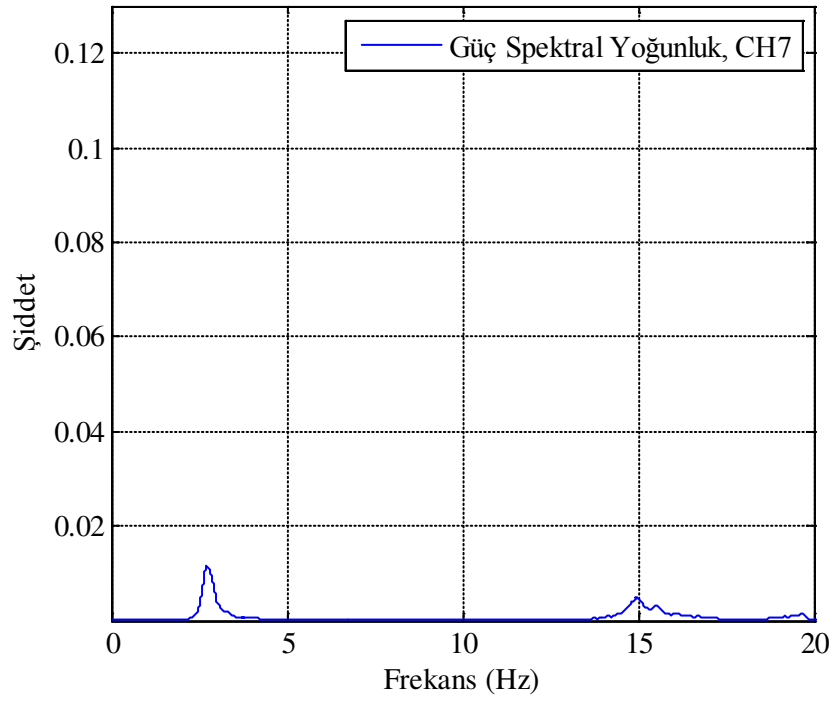
Şekil 8.37 CH4 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



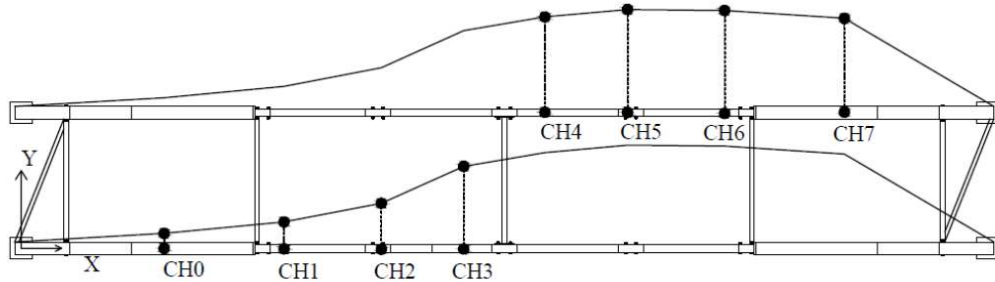
Şekil 8.38 CH5 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



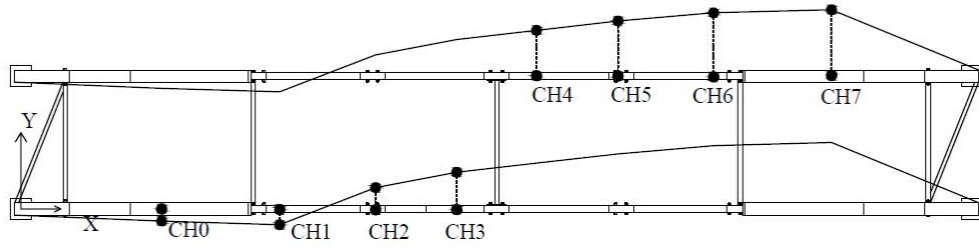
Şekil 8.39 CH6 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



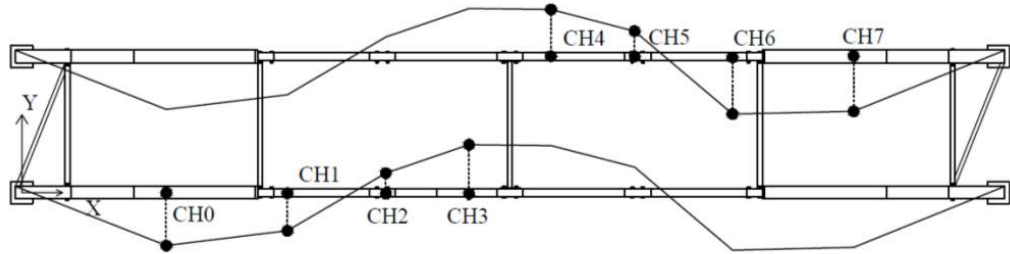
Şekil 8.40 CH7 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = -3,14$).



Şekil 8.41 Çapraz güç spektrum yönteminden bulunan birinci doğal titreşim frekansına (2,7 Hz, 1. mod) ait mod şekli.



Şekil 8.42 Çapraz güç spektrum yönteminden bulunan ikinci doğal titreşim frekansına (8,2 Hz, 2. mod) ait mod şekli.



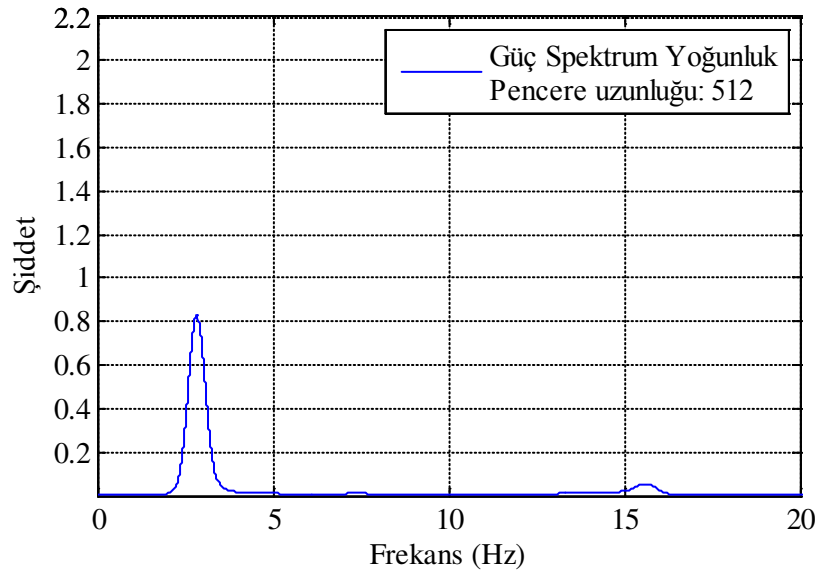
Şekil 8.43 Çapraz güç spektrum yönteminden bulunan üçüncü doğal titreşim frekansına (15,12 Hz, 3. mod) ait mod şekli .

8.3 Sönüm Oranı Hesap Sonuçları

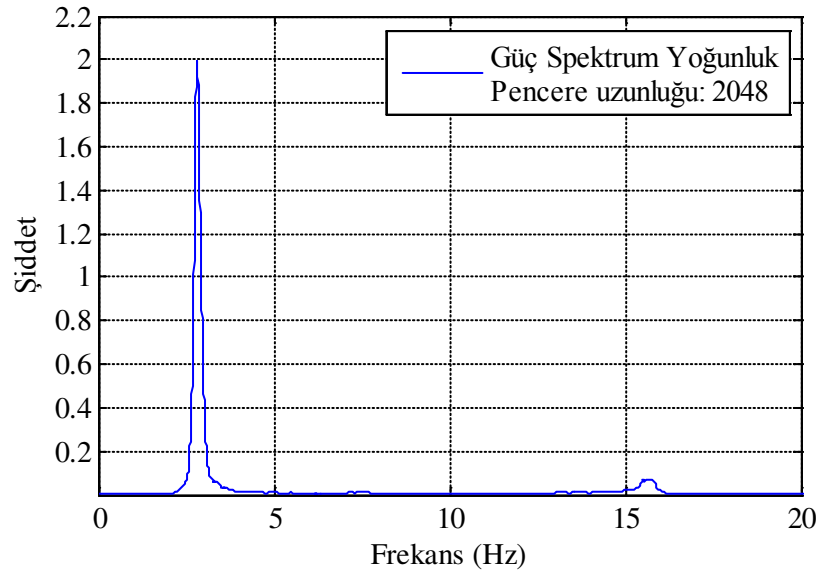
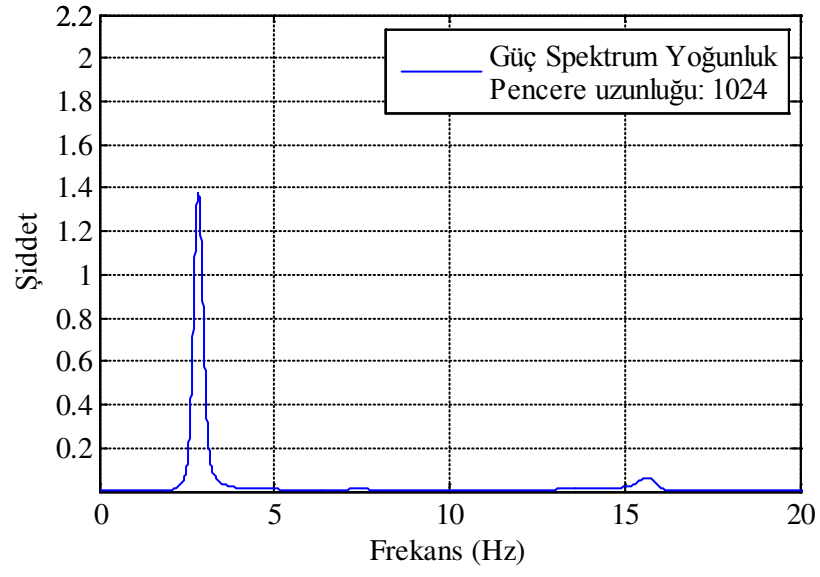
Sönüm oranı (ξ) sonuçları yarım güç bant kalınlığı yöntemi, logaritmik azalma yöntemi, NExT-ERA ve ERA yöntemine göre hesaplanmıştır.

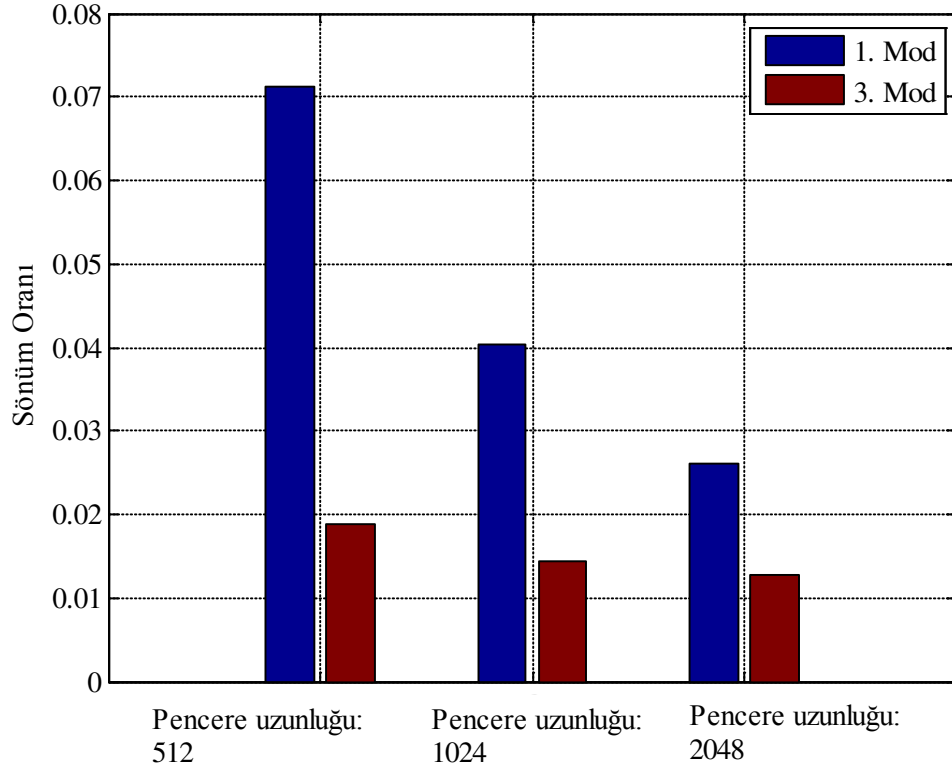
8.3.1. Yarım Güç Bant Kalınlığı Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesap Sonuçları

Yarım güç bant kalınlığı yöntemi ile sönüm oranı hesaplanırken pencereleme sayısı önemli rol oynamaktadır. Şekil 8.44, Şekil 8.45, Şekil 8.46, Şekil 8.47 grafiklerinden görüldüğü üzere, bir sinyalin üç farklı pencere uzunluğu kullanılarak güç spektral yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Bu grafikler incelendiğinde pencere uzunluğu arttıkça pencere sayısı azaldığından, frekans şiddetinin arttığı görülmüş ve sönüm oranının değerin azaldığı görülmüştür. Buna karşın pencere sayısı arttığında daha gerçeğe uygun bir spektral yoğunluk hesabı yapılmış olup, sönüm oranının arttığı gözlenmiştir. Bu yüzden sönüm oranı hesabı yapılırken uygun pencere sayısı belirlenmelidir. Aksi takdirde sönüm oranı yanlış hesaplanabilmektedir. İki farklı deney düzeneği kullanılarak elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 8.48’ de gösterilmektedir.

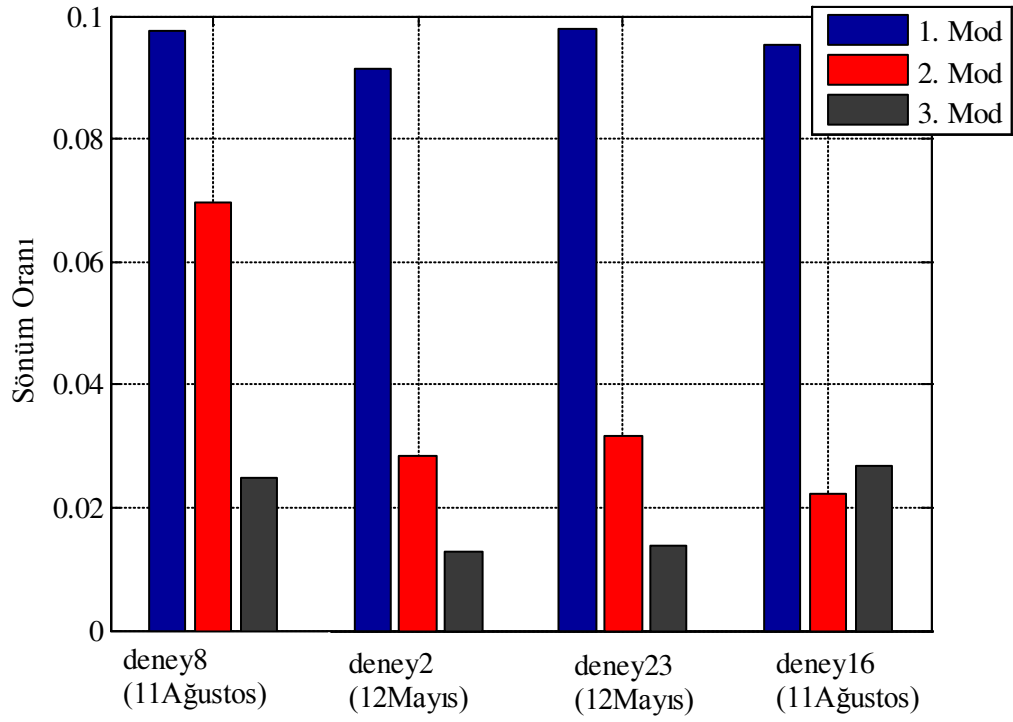


Şekil 8.44 Güç spektrum yoğunluk grafiği, pencere uzunluğu: 512.





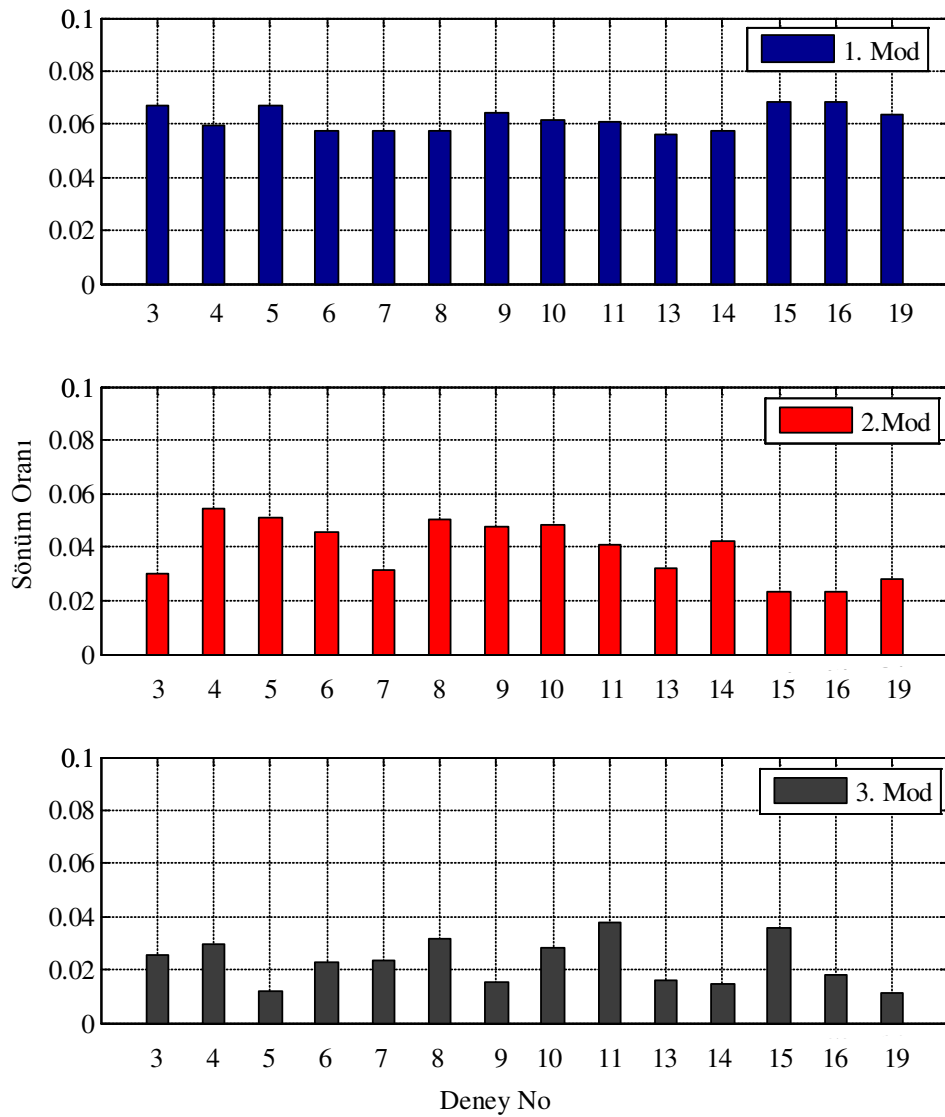
Şekil 8.47 Yarım güç bant kalınlığı yönteminde, seçilen pencere uzunluğuna göre aynı sinyale ait, sönüm oranı değişim grafiği.



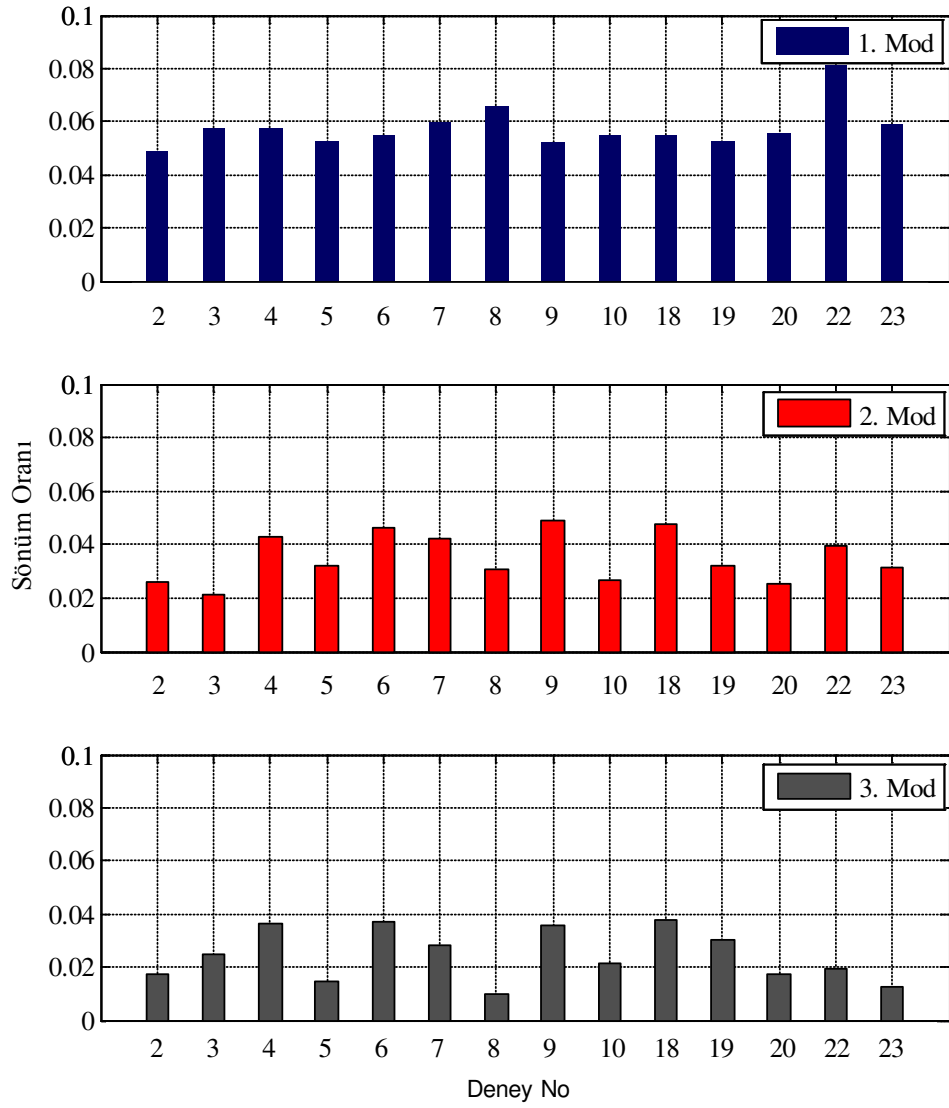
Şekil 8.48 Yarım güç bant kalınlığı yönteminde hesaplanan modlara ait sönüm oranı.

8.3.2 Logaritmik Azalma Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesap Sonuçları

Logaritmik azalma yöntemi, bir sinyalde okunan i ve j anındaki ivme değerindeki azalma miktarının logaritması olarak tanımlanmaktadır. Sunulan bu çalışmada 3 farklı mod için, bu modların frekanslarını içeren ayrı ayrı filtre oluşturulmuştur. Her biri modal sönüm oranı için, oluşturulan grafikten logaritmik azaldığı görülen iki noktadaki ivme değeri okunarak sönüm oranları hesaplanmıştır. Bulunan sönüm oranı değerleri Şekil 8.49 ve Şekil 8.50’ de gösterilmiştir.



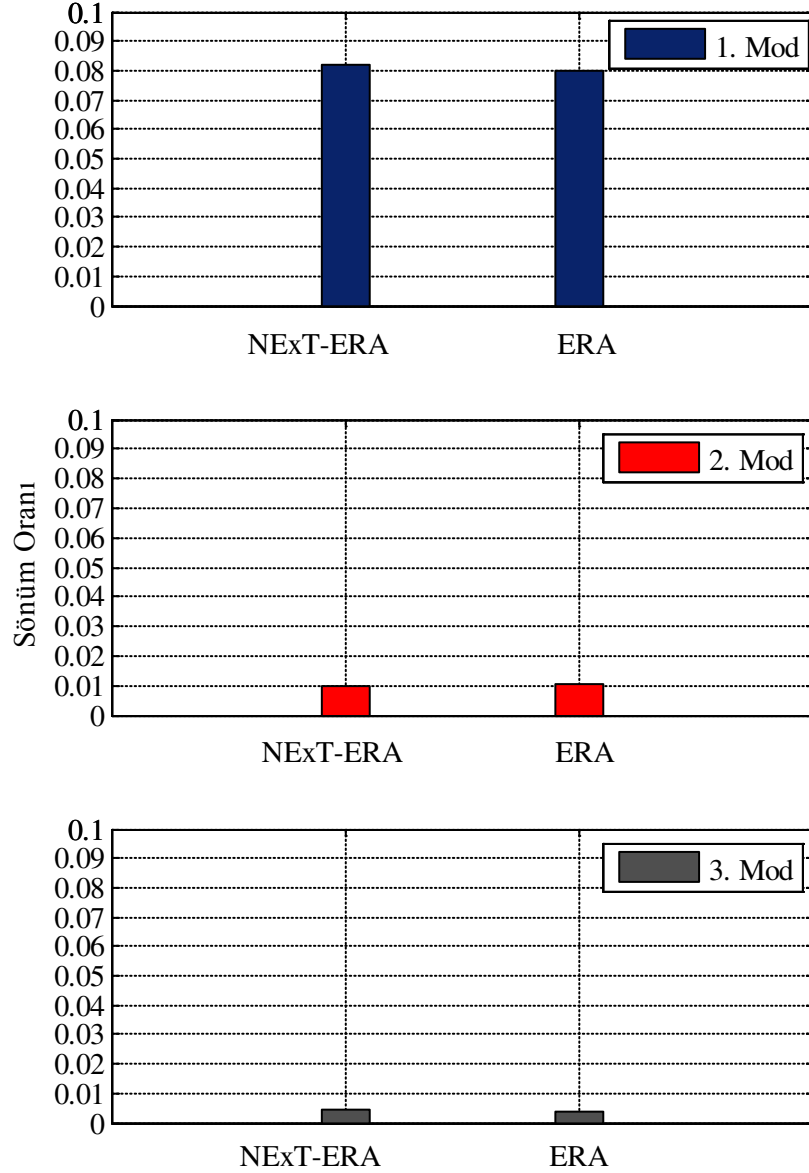
Şekil 8.49 Logaritmik azalma yöntemi sönüm oranı değerleri (11 Ağustos tarihli deneyler)



Şekil 8.50 Logaritmik azalma yöntemi sönüm oranı değerleri (12 Mayıs tarihli deneyler) .

8.3.3 NExT-ERA, ERA Yöntemi ile Sönüm Oranı Hesap Sonuçları

Simulasyon verisi kullanılarak uygulanan NExT-ERA ve deney verisi kullanılarak uygulanan ERA yöntemi ile analiz sonuçlarından bulunan sönüm oranı değerleri, Şekil 51’ de gösterilmiştir (1.mod 2,7 Hz, 2. mod 8,2 Hz, 3. mod 15,12 Hz).



Şekil 8.51 NExT-ERA ve ERA sonucu bulunan sönüm oranı değerleri.

8.4 Değerlendirme

Sunulan çalışmada deneysel modal analiz sırasında, modal parametrelerin tahminine birçok faktörün etki ettiği görülmüştür. Örneğin modal parametrelerden sönüm oranında bu etki diğerlerinden daha fazla görülmektedir. Değişen her pencere sayısına göre, sönüm oranı değerleri farklılık göstermektedir. Pencere uzunluğu kısa, dolayısıyla pencere sayısı çok olan veriler seçildiğinde daha gerçekçi bir periodogram elde edilmektedir.

NExT-ERA yöntemine değinildiğinde ise, sinyal filtrelenmesi, Hankel matrisinin boyutu, yeniden örnekleme frekansının oluşturulması, model derecesi açısından her bir değer değiştirildiğinde, analiz sonucu elde edilen modal parametreler değişebilmektedir. Bu açıdan doğru tahmini yapabilmek için stabilizasyon diyagramı, çapraz güç spektral yoğunluk ve tekil değerler matrisinin ayrıştırılması sonucu elde edilen diagonal matristeki sıçramalar göz önüne alınarak en iyi tahmin yapılmalıdır.

BÖLÜM DOKUZ

SONUÇ VE ÖNERİLER

9.1 Sonuç

Sunulan çalışma kapsamında, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan deneylerde çelik model bir köprü üzerinden toplanan dinamik veriler kullanılarak yapı sağlığının gözlenmesi sürecinden, sistem tanımlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bunun sonunda modal parametreler elde edilmiş ve değerlendirilmiştir.

Deneyler esnasında ilk olarak 4 adet tek eksenli sensör yatay Y eksenı yönünde yerleştirilmiş, diğer 4 adet tek eksenli sensör ise düşey Z eksenı yönünde yerleştirilmiştir. Uygun sonuçlara ulaşılabilmesi sebebiyle deneyler, 8 adet tek eksenli sensörün Y eksenı doğrultusunda yerleştirilmesiyle tekrarlanmıştır.

Çelik model köprüye laboratuvar ortamında ortamsal titreşim ve ani darbe testleri uygulanarak yapının modal parametrelerinden; mod şekilleri, doğal titreşim frekans değerleri ve sönüm oranları bulunmuştur. Köprünün düşey yöndeki hareketine ilişkin modal parametreler elde edilememiştir.

Her üç yöntemde de yatay X yönündeki birinci doğal titreşim frekansı 2.7 Hz, ikinci doğal titreşim frekansı ise 8.2 Hz, üçüncü doğal titreşim frekansı 15.12 Hz civarında bulunmuştur. Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında, mod şekilleri NExT-ERA, ERA ve çapraz güç spektrum yöntemleri ile elde edilmiştir. Bulunan mod vektörleri arasından, bu frekanslarda oluşan en yüksek MAC değerine sahip olan vektörler kullanılarak sistemin gerçek hareketine yakın mod şekilleri elde edilmiştir. Mod şekillerinin de benzer olduğu görülmüştür.

Sönüm oranını belirlemek için ise NExT-ERA, ERA, logaritmik azalma ve yarım güç bant kalınlığı yöntemleri kullanılmıştır. Birinci modun sönüm oranının yaklaşık değeri %9 ile %5 arasında, ikinci modun sönüm oranı ise %2 ile %5

arasında, üçüncü mod sönüm oranı %3 ile %1 arasında değişmektedir. Deney verilerinin kullanıldığı ERA ve simulasyon verilerinin kullanıldığı NExT-ERA yönteminden bulunan sönüm oranı değerleri ise 1. mod için % 8 , 2. mod için %1, 3. mod için %0.4' dür. Bulunan bu sönüm oranı değerleri çelik bir yapı için biraz fazla olmakla beraber mantıklı değerlerdir. Farklı yöntemlerle elde edilen sönüm oranlarındaki değişim frekans değerlerinde gözlenen değişimden daha fazladır. Sönüm oranlarının bu denli farklı sonuçlar verebilmesinin sebebi sönüm oranının karmaşık yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. İlk üç modun üstündeki modal parametreler (düşey mod, düşey-burulma birlikte mod, v.b.) laboratuvar ortamında üst modları harekete geçirecek uyarmanın sisteme verilmesinin zorluğu, sensörlerin çalışabilir bant aralığının (DC-100 Hz) çözünürlük özelliğinin düşük olması gibi nedenlerle elde edilememiştir. Köprünün kütleini artırarak doğal titreşim frekanslarının azaltılması da üst modların yeterli düzeye çekilmesine yetmemiştir.

9.2 Öneriler

Sunulan çalışma kapsamında yürütülen deneyler sırasında köprüden alınan verilerdeki gürültü fazlalığı ve analog anti-aliasing filtrelerinin olmaması nedenleriyle, ortamsal titreşim verilerinin sağlıklı bir şekilde elde edilemediği gözlenmiştir.

Yapılan deneyler sırasında sensörlerin bağlı olduğu kablo uzunluğunun gürültü oranını büyük oranda etkilediği belirlenmiştir. Ortamdaki gürültü etkisini azaltmak için kablosuz sensörler kullanılması bir alternatif olabilir.

Daha iyi veri elde edilebilmesi için bant kalınlığı geniş olan, daha geniş bir frekans aralığında ölçüm yapabilen sensörlerin tercihinin ve analog filtre kullanılmasının çalışma sonuçlarını daha güvenilir bir duruma getirebileceği düşünülmektedir.

Deney sonuçlarında düşey modlar elde edilememiştir. Sistemi düşey yönde uyarabilecek bir sarsıcı (shaker) olması durumunda, düşey modlar da elde edilebilecektir.

Yapı sağlığının izlenmesi işlemleri, sistemin o anki durumunu ortaya çıkarmakta ve modal parametreleri elde etmektedir. Bu modal parametreler kullanılarak, sistemin hasar tanımlaması yapılabilir. Eğer sistemde hasar varsa, bir adım daha ileri gidilerek hasar seviyeleri belirlenebilir.

Hasar tespit edilen bir yapıda, hasarın seviyesine göre güçlendirme yapıp yapılmaması kararı alınabilir. Güçlendirme yapıldıktan sonra, güçlendirilmiş yapının yapı sağlığını izlenerek, güçlendirmenin başarısı, etkinliği hakkında modal parametrelerdeki değişime bakılarak karar verilebilir.

KAYNAKLAR

- Amaddeo, C., Özçelik, Ö., Mısır, S., ve Kahraman, S., (2009). Deprem Verilerinin Yapıların Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesinde Kullanımı, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 4 (3), Article Number: 1A0034.
- Bendat, J. S. ve Piersol, A. G. (1993). *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis* (2). USA: A Wiley-Interscience Publication John Wiley&Sons Inc.
- Caicedo, J. M., ve Dyke, S. J. (2004). Johnson, E. A., Natural Excitation Technique and Eigensystem Realization Algorithm for Phase I of the IASC-ASCE Benchmark Problem: Simulated Data, *Journal of Engineering Mechanics*, 130 (1), 49-60.
- Caicedo, J. M. (2011). Practical Guidelines for the Natural Excitation Technique (NExT) and the Eigensystem Realization Algorithm (ERA) for Modal Identification Using Ambient Vibration. *Experimental Techniques*, 35 (4), 52-58.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering* (1). New Jersey: Prentice Hall.
- Clough, R.W., ve Penzien, J. (1995). *Dynamics of Structures* (3). Berkeley,CA, USA: Computers and Structures Inc.
- De Callafon, R. A., Moaveni, B., Conte, J. P., He, X., ve Udd, E., (2008). General Realization Algorithm for Modal Identification of Linear Dynamic Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, 134, 712-722.

- Farrar, C. R., ve James, G. H. III (1997). System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge, *Journal of Sound and Vibration*, 205 (1), 1-18.
- Farrar, C. R., ve Doebling, S. W. (2001). An overview of modal-based damage identification methods. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 359, 131-149.
- Farrar, C. R., ve Worden, K. (2007). An Introduction to Structural Health Monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 365 (1851), 303-315.
- Gilbert, E. G. (1963). Controllability and observability in multivariable control systems. *SIAM J. Control*, 1(2), 128-151.
- Giraldo, D.F., Song, W., Dyke, S. J., ve Caicedo, J. M., (2009). Modal Identification through Ambient Vibration: Comparative Study. *Journal of Engineering Mechanics*, 135 (8), 759 - 770.
- James, G. H. III, Carne, T. G., ve Lauffer, J. P., (1993). The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction From Operating Wind Turbines, *Sandia Report SAND92-1666*, UC-261.
- Juang, J. N., ve Pappa, R. S., (1985). Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* , 8 (5), 620-627.
- Kalman, R. E., (1963).Mathematical Description of Linear Dynamical Systems. *SIAM J. Control*, 1(2), 152-192.
- Lus, H., Betti, R., ve Longman, R. W. (2002). Obtaining Refined First Order Predictive Models of Linear Structural Systems, *Earthquake Engineering&Structural Dynamics*, 31 (7), 1413-1440.

- Manolakis, D. G., Ingle, V. K., ve Kogon, S. M. (2000). *Statistical and Adaptive signal Processing*, McGraw- Hill.
- Moaveni, B., Xianfei, He, Conte, J. P., ve Udd, E. , (2006). Effect of Damage on Modal Parameters Using Full-Scale Test Data, in *Proc. of International Conference on Modal Analysis (IMAC-XXIV)*, St. Louis, USA.
- Moaveni, B., (2007). *System and Damage Identification of Civil Structures*, Doctor of Philosophy in Structural Engineering, University of California, San Diego.
- Nayeri, R. D., Masri, S. F., ve Chassiakos, A. G., (2007). Application of Structural Health Monitoring Techniques to Track Structural Changes in a Retrofitted Building Based on Ambient Vibration. *Journal of Engineering Mechanics*, 33 (12), 1311-1325.
- Papagiannopoulos, G. A., Hatzigeorgiou, G. D., (2011). On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7),1075-1079.
- Phan, M., Horta, L. G., Juang, J.-N., ve Longman, R. W. (1992). Identification of linear systems by an asymptotically stable observer. *NASA Tech. Paper*, 3164.
- Rowell, D. (2008). *Signal Processing - Continuous and Discrete*, 13 Aralık 2011, http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-161-signal-processing-continuous-and-discrete-fall-2008/lecture-notes/lecture_22.pdf.
- Rowell, D. (2008). *Signal Processing - Continuous and Discrete*, 13 Aralık 2011, http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-161-signal-processing-continuous-and-discrete-fall-2008/lecture-notes/lecture_23.pdf.

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R. (2004). *A Review of Structural Health Monitoring Literature:1996-2001*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.

EKLER

EK- 1 NExT YÖNTEMİNİN TEORİK ALT YAPISI

(James ve diğer. 1993)

Hareket denklemi:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad \text{E1.1}$$

$[M]$: Kütle matrisi

$[C]$: Sönüm matrisi

$[K]$: Rijitlik matrisi

f : Rassal kuvvet fonksiyonu vektörü

x : Rassal deplasman vektörü

Standart modal koordinat dönüşümü kullanılarak, hareket denklemi modal koordinatlarda yazılmaktadır.

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{q(t)\} = \sum_{r=1}^n \{\varphi^r\} q^r(t) \quad \text{E1.2}$$

Φ : Mod matrisi

$q(t)$: Modal koordinat vektörü

φ^r : r. Mod şekli

E1.1 numaralı denklemde $[\Phi]^T$ ile ön çarpımı yapılır. Gerçek normal modlar farz edilmesinden itibaren, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ matrisleri eş zamanlı olarak diagonalleştirilir. Hareket denklemi modal koordinatlar ile şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\ddot{q}^r(t) + 2\xi^r \omega_n^r \dot{q}^r(t) + \omega_n^{r^2} q^r(t) = \frac{1}{m^r} \{\varphi^r\}^T \{f(t)\} \quad \text{E1.3}$$

ω_n^r : r. Modal frekans

ξ^r : r. Modal sönüm oranı

m^r : r. Modal kütle

E1.3 numaralı denklemin çözümü , genel $f(t)$ ve sıfır başlangıç koşulları kabul edildiğinde, katlı şekilde ya da *Duhamel integrasyonu* yardımıyla elde edilmektedir.

$$q^r(t) = \int_{-\infty}^t \{\varphi^r\}^T \{f(\tau)\} g^r(t - \tau) d\tau \quad \text{E1.4}$$

Burada $g^r(t) = \frac{1}{m^r \omega_d^r} e^{-\xi \omega_n^r t} \sin(\omega_d^r t)$ v e $\omega_d^r = \omega_n (1 - \xi^2)^{1/2}$ ise sönümlü modal frekanstır.

E1.4 ve E1.2 numaralı denklemlerden $\{x(t)\}$ E1.5 denklemindeki şekilde bulunmaktadır:

$$\{x(t)\} = \sum_{r=1}^n \{\varphi^r\} \cdot \int_{-\infty}^t \{\varphi^r\}^T \{f(\tau)\} g^r(t - \tau) d\tau \quad \text{E1.5}$$

Bu denklemde n mod sayısını belirtmektedir. E1.5 numaralı denklem tekil çıktı $x_{ik}(t)$, k noktasındaki (anındaki) bir tekil girdi kuvveti $f_k(\tau)$ için özelleştirilirse,

$$x_{ik}(t) = \sum_{r=1}^n \varphi_i^r \varphi_k^r \cdot \int_{-\infty}^t f_k(\tau) g^r(t - \tau) d\tau \quad \text{E1.6}$$

r. mod şeklinin i. içeriği φ_i^r şeklinde gösterilmektedir. k girdisi ile i sonucu arasındaki etki tepki fonksiyonu, denklem E1.6' daki $f(\tau)$ fonksiyonu $\tau = 0$ anında Dirac-Delta fonksiyonudur. İntegrasyon katlanır ve E1.7 numaralı denklem elde edilir:

$$x_{ik}(t) = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_i^r \varphi_k^r}{m^r \omega_d^r} e^{-\xi \omega_n^r t} \sin(\omega_d^r t) \quad \text{E1.7}$$

Bu aşamadan sonra NExT' in ilerlemesine çapraz-korelasyon fonksiyonu dahil olmaktadır. Beyaz-gürültünün sisteme verilmesi sonucu oluşan, k noktasındaki iki tepki x_{ik} ve x_{jk} arasında çapraz-korelasyon fonksiyonu hesaplanmaktadır. $R_{ijk}(T)$ T zaman farkından oluşan beklenen (expected) değerdir. E ise beklenen değer operatörüdür.

$$R_{ijk}(T) = E[x_{ik}(t+T)x_{jk}(t)] \quad \text{E1.8}$$

E1.6 numaralı denklem E1.8 numaralı denklemde yerine yazılırsa, $f_k(\tau)$ tek rassal değişken olmak üzere;

$$R_{ijk}(T) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \varphi_i^r \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s \cdot \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{t+T} g^r(t+T-\sigma) g^s(t-\tau) E[f_k(\sigma) f_k(\tau)] d\sigma d\tau \quad \text{E1.9}$$

Otokorelasyon fonksiyonunun tanımından, f otokorelasyon fonksiyonunun beyaz gürültü olduğu farz edilerek, E1.10 denklemi gösterilmektedir;

$$R_{ff}^k(\tau - \sigma) = E[f_k(\tau) f_k(\sigma)] = \alpha_k \delta(\tau - \sigma) \quad \text{E1.10}$$

α_k sabit, $\delta(t)$ ise Dirac Delta fonksiyonunu göstermektedir.

E1.10 numaralı denklem, E1.9 numaralı denklemde yerine yazılırsa, Dirac Delta fonksiyonunun tanımından ilk integrasyon katlanır ve E1.11 numaralı denklem elde edilir:

$$R_{ijk}(T) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \alpha_k \varphi_i^r \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s \cdot \int_{-\infty}^t g^r(t+T-\tau) g^s(t-\tau) d\tau \quad \text{E1.11}$$

Denklem E1.11' de değişken değiştirerek işleme devam edilirse, $\lambda = t - \tau$ ve integralin limitleri ise 0 ile ∞ olmaktadır.

$$R_{ijk}(T) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \alpha_k \varphi_i^r \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s \cdot \int_0^\infty g^r(\lambda+T) g^s(\lambda) d\lambda \quad \text{E1.12}$$

E1.4 numaralı denklemde tanımlanan g yardımıyla E1.13 denklemi elde edilmektedir:

$$g^r(\lambda+T) = [e^{-\xi \omega_n^r T} \cos(\omega_d^r T)] \frac{e^{-\xi \omega_n^r \lambda} \sin(\omega_d^r \lambda)}{m^r \omega_d^r} + [e^{-\xi \omega_n^r T} \sin(\omega_d^r T)] \frac{e^{-\xi \omega_n^r \lambda} \cos(\omega_d^r \lambda)}{m^r \omega_d^r} \quad \text{E1.13}$$

Denklem E1.13 , E1.12' de yerine yazıldığında E1.14 halini almaktadır:

$$R_{ijk}(T) = \sum_{r=1}^n [G_{ijk}^r e^{-\xi \omega_n^r T} \cos(\omega_d^r T) + H_{ijk}^r e^{-\xi \omega_n^r T} \sin(\omega_d^r T)] \quad \text{E1.14}$$

G_{ijk}^r ve H_{ijk}^r zamandan T ' den bağımsızdır. S ' ye kadar toplanan modal parametrelerin fonksiyonunu göstermektedir.

$$\begin{Bmatrix} G_{ijk}^r \\ H_{ijk}^r \end{Bmatrix} = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_k \varphi_i^r \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s}{m^r \omega_d^r m^s \omega_d^s} \cdot \int_0^\infty e^{(-\xi^r \omega_n^r - \xi^s \omega_n^s) \lambda} \sin(\omega_d^s \lambda) \begin{Bmatrix} \sin(\omega_d^r \lambda) \\ \cos(\omega_d^r \lambda) \end{Bmatrix} d\lambda \quad \text{E1.15}$$

Çapraz korelasyon fonksiyonları, orijinal sistemin etki tepki fonksiyonları ile aynı karakteristiğe sahip azalan sinüzoidlerin toplamı şeklinde ifade edilmektedir. Çapraz korelasyon fonksiyonları modal parametre tahmininde zaman tanım alanında itme tepki fonksiyonu olarak kullanılabilir. İntegralin tanımından, G_{ijk}^r ve H_{ijk}^r şu şekilde basitleştirilebilir:

$$G_{ijk}^r = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_k \varphi_i^r \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s}{m^r m^s \omega_d^r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad \text{E1.16}$$

$$H_{ijk}^r = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha_k \varphi_i^r \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s}{m^r m^s \omega_d^r} \left[\frac{J_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad \text{E1.17}$$

Burada;

$$I_{rs} = 2\omega_d^r (\xi^r \omega_n^r + \xi^s \omega_n^s) \quad \text{ve} \quad J_{rs} = (\omega_d^{s^2} - \omega_d^{r^2}) + (\xi^r \omega_n^r + \xi^s \omega_n^s)^2 \quad \text{şeklindedir.}$$

Bu sonuçların yararlı olduğunu göstermek için γ_{rs} için E1.18 eşitlik tanımlanır:

$$\tan(\gamma_{rs}) = I_{rs} / J_{rs} \quad \text{E1.18}$$

Bu eşitlik denklem E1.16 ve E1.17' de yerine yazıldığında,

$$\begin{aligned} G_{ijk}^r &= \frac{\varphi_i^r}{m^r \omega_d^r} \sum_{s=1}^n \beta_{jk}^{rs} (J_{rs}^2 + I_{rs}^2)^{-1/2} \sin \gamma_{rs} \\ H_{ijk}^r &= \frac{\varphi_i^r}{m^r \omega_d^r} \sum_{s=1}^n \beta_{jk}^{rs} (J_{rs}^2 + I_{rs}^2)^{-1/2} \cos \gamma_{rs} \end{aligned} \quad \text{E1.19}$$

Burada;

$\beta_{jk}^{rs} = \frac{\alpha_k \varphi_k^r \varphi_j^s \varphi_k^s}{m^s}$ ' dir. Denklem E1.19 denklem E1.14' de yerine yazıldığında, çapraz korelasyon fonksiyonu şu şekilde elde edilmektedir:

$$R_{ij}(T) = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_i^r}{m^r \omega_d^r} \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^m \beta_{jk}^{rs} (J_{rs}^2 + I_{rs}^2)^{-1/2} e^{(-\zeta^r \omega_n^r T)} \sin(\omega_d^r T + \gamma_{rs}) \quad \text{E1.20}$$

s ve k lerin iç toplamı sadece sabit zaman sinüs fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar değişken faza sahip fakat kararlı frekanstadır. Bu yüzden denklem E1.20 tekil sinüs fonksiyonu olarak yeni bir faz açısı ve yeni bir çarpma sabiti A_j^r ile tekrar yazılırsa;

$$R_{ij}(T) = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_i^r A_j^r}{m^r \omega_d^r} e^{(-\zeta^r \omega_n^r T)} \sin(\omega_d^r T + \gamma_{rs}) \quad \text{E1.21}$$

Denklem E1.21 ile tekil girdi, çoklu-çıkı, çoklu-mod durumları için NExT algoritması tanımlanmış olmaktadır. Çapraz korelasyon fonksiyonları azalan sinüzoidler şeklinde toplanıp orijinal sistemdeki itme tepki fonksiyonu ile aynı hali almaktadır.

EK –2 ÇAPRAZ KORELASYON FONKSİYONU HESAP YÖNTEMİ

Çapraz korelasyon fonksiyonu, $f(t)$ ve $g(t)$ gibi iki dalga formu arasındaki benzerliği ölçen fonksiyondur. Oto korelasyon fonksiyonundan türetilen iki denklem bulunmaktadır (Rowell, 2008). Bunlar E2.1 ve E2.2 denklemlerinde gösterilmektedir:

$$\phi_{fg}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)g(t + \tau)d\tau \quad \text{E2.1}$$

Denklem sonsuz süre dalga formu durumunda;

$$\rho_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)d\tau \quad \text{E2.2}$$

Denklem sonlu süre formundadır.

EK- 3 ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 5.1 Pencereleme ve çakışma etkisi altında spektrumun değişimi, (pencere uzunluğu:100, çakışma oranı: %50)

Şekil 5.2 Pencereleme ve çakışma etkisi altında spektrumun değişimi, pencere uzunluğu: 1000, çakışma oranı:%50

Şekil 5.3 Modal derecesinin tekil değerler yardımıyla belirlenmesi.

Şekil 5.4 (a) Model derecesinin stabilizasyon diyagramına etkisi.

Şekil 5.4 (b) Model derecesinin stabilizasyon diyagramına etkisi.

Şekil 6.1 Güç spektrum yoğunluk grafiği, CH4.

Şekil 6.2 Hızlı Fourier dönüşüm grafiği, CH3.

Şekil 6.3 Çapraz güç spektrum grafiği, CH3.

Şekil 6.4 Faz açısı grafiği, CH2-CH3 sensörleri arasında.

Şekil 7.1 Logaritmik azalma yöntemi.

Şekil 7.2 Yarım güç bant kalınlığı yöntemi , (Papagiannopoulos ve Hatzigeorgiou , 2011).

Şekil 8.1 Köprü'nün önden görünüşü, (PonsArcus,2010).

Şekil 8.2 Köprü'nün üstten görünüşü, (PonsArcus,2010).

Şekil 8.3 Köprü'nün yandan görünüşü, (PonsArcus,2010), (DS I(I=1,n): Arka yüz düğüm noktaları, D I(I=1,n): Ön yüz düğüm noktaları, E I(I=1,n): Köprü'nün D ve DS dışındaki elemanları.

Şekil 8.4 Betonarme blokta bulunan kancaların kesilmesi.

Şekil 8.5 Çelik sac ve betonarme blok.

Şekil 8.6 Betonarme bloğa dübellerin yerleştirilmesi.

Şekil 8.7 Köprü'nün betonarme blok üzerine yerleştirilmesi.

Şekil 8.8 Köprü ayaklarının görünümü.

Şekil 8.9 Sacın betonarme plak üzerine yerleştirilmesi.

Şekil 8.10 Köprü ayaklarının dübellenmesi.

Şekil 8.11 Köprü Ayaklarının Kaynaklanarak Mesnetlenmesi.

Şekil 8.12 Köprü bağlantılarının belirli tork değeri ile sıkılması.

Şekil 8.13 Köprü'nün bağlantılarının belirli tork değeri ile sıkılması.

Şekil 8.14 Veri toplama bloğu.

Şekil 8.15 Tek eksenli sensör.

Şekil 8.16 Köprüye betonarme blok ağırlıkların yerleştirilmesi.

Şekil 8.17 Köprü üzerindeki betonarme ağırlıklar.

Şekil 8.18 Farklı açılardan köprü ve blokların görünümü.

Şekil 8.19 (a) Ani darbe etkisi ile uyarılan köprünün ivme kaydı örneği.

Şekil 8.19 (b) Ani darbe etkisi ile uyarılan köprünün ivme kaydı örneği.

Şekil 8.20 Ortamsal titreşim etkisi altındaki sistemden alınan ivme kaydı örneği.

Şekil 8.21 1. Mod şekli (SAP 2000® programı ile analiz edilmiştir, XY düzlemindeki hareket).

Şekil 8.22 2. Mod şekli (SAP 2000® programı ile analiz edilmiştir, XY düzlemindeki hareket).

Şekil 8.23 3. Mod şekli (SAP 2000 ® programı ile analiz edilmiştir, XY düzlemindeki hareket).

Şekil 8.24 NExT-ERA yönteminde kullanılan, ortamsal titreşim etkisi altındaki sistem türü ivme kayıt örneği.

Şekil 8.25 XY düzleminde 8 sensörün planda görünümü, (Sensör hareket eksen: Y).

Şekil 8.26 NExT-ERA yönteminden bulunan birinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (1. mod, doğal titreşim frekansı 2,73 Hz, sönüm oranı 0,0817, MAC =1).

Şekil 8.27 NExT-ERA yönteminden bulunan ikinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (2. mod, doğal titreşim frekansı 8,2 Hz, sönüm oranı 0,01, MAC =0,9045).

Şekil 8.28 NExT-ERA yönteminden bulunan üçüncü doğal titreşim frekansına ait mod şekli (3. mod, doğal titreşim frekansı 15,13 Hz, sönüm oranı 0,0046, MAC =0,9999).

Şekil 8.29 ERA yönteminde kullanılan, ani darbe etkisiyle uyarılmış sistem türü ivme kayıt örneği.

Şekil 8.30 ERA yönteminden bulunan birinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (1. mod, doğal titreşim frekansı 2,63 Hz, sönüm oranı 0,0802, MAC =0,9982).

Şekil 8.31 ERA yönteminden bulunan ikinci doğal titreşim frekansına ait mod şekli (2. mod, doğal titreşim frekansı 8,16 Hz, sönüm oranı 0,0105, MAC =0,8694).

Şekil 8.32 ERA yönteminden bulunan üçüncü doğal titreşim frekansına ait mod şekli (3. mod, doğal titreşim frekansı 15,22 Hz, sönüm oranı 0,0040, MAC =0,7751).

Şekil 8.33 CH0 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.34 CH1 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.35 CH2 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.36 CH3 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.37 CH4 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.38 CH5 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.39 CH6 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.40 CH7 sensörü güç spektral yoğunluk grafiği ve referans olarak seçilen CH3 sensörü ile faz açısı değerleri ($+\pi = 3,14$, $-\pi = 3,14$).

Şekil 8.41 Çapraz güç spektrum yönteminden bulunan birinci doğal titreşim frekansına (2,7 Hz, 1. mod) ait mod şekli .

Şekil 8.42 Çapraz güç spektrum yönteminden bulunan ikinci doğal titreşim frekansına (8,2 Hz, 2. mod) ait mod şekli.

Şekil 8.43 Çapraz güç spektrum yönteminden bulunan üçüncü doğal titreşim frekansına (15,12 Hz, 3.mod) ait mod şekli.

Şekil 8.44 Güç spektrum yoğunluk grafiği, pencere uzunluğu: 512.

Şekil 8.45 Güç spektrum yoğunluk grafiği, pencere uzunluğu: 1024.

Şekil 8.46 Güç spektrum yoğunluk grafiği, pencere uzunluğu: 2048.

Şekil 8.47 Yarım güç bant kalınlığı yönteminde, seçilen pencere uzunluğuna göre aynı sinyale ait, sönüm oranı değişim grafiği.

Şekil 8.48 Yarım güç bant kalınlığı yönteminde hesaplanan modlara ait sönüm oranı.

Şekil 8.49 Logaritmik azalma yöntemi sönüm oranı değerleri (11 Ağustos tarihli deneyler)

Şekil 8.50 Logaritmik azalma yöntemi sönüm oranı değerleri (12 Mayıs tarihli deneyler) .

Şekil 8.51 NExT-ERA ve ERA sonucu bulunan sönüm oranı değerleri.

EK – 4 TABLO LİSTESİ

Tablo 8.1 Deney listesi

Tablo 8.2 Çelik model köprünün SAP 2000® programında modal analizi sonucu elde edilen periyot ve frekanslar

EK – 5 SEMBOLLER LİSTESİ

M	: Kütle matrisi
C	: Sönüm matrisi
K	: Rijitlik matris
$x(t)$	: Deplasman vektörü
$\dot{x}(t)$	: Hız vektörü
$\ddot{x}(t)$	: İvme vektörü
$f(t)$	: Dış kuvvet vektörü
$\ddot{X}$	: İvme stokastik vektör süreci
$\dot{X}$	: Hız stokastik vektör süreci
X	: Deplasman stokastik vektör süreci
F	: Uyarım stokastik vektör süreci
X_{ref}	: Kabul edilen referans serbestlik derecesi tepki süreci,
E	: Expectation operatörü
R	: Korelasyon fonksiyonu
$u(t)$	: Dışarıdan uygulanan kuvvet fonksiyonu
$y(t)$	: Çıktı vektörü
$w(k)$	: Ölçülemeyen küçük etkiler ve modelleme hatalarından kaynaklanan gürültü
$v(k)$	: Sensör hatalarından ölçülen gürültüyü temsil etmektedir.
$\mathcal{A}$	: Durum matrisi
$\mathcal{B}$	: Girdi matrisi
$\mathcal{C}$	: Çıktı matrisi
$\mathcal{D}$	: Geçiş besleyici (feed-through) matris
$\bar{x}(t)$	: Fiziksel durum vektörü
T	: Matrisin transpozu
U	: <i>Ortonormal matris</i>
V	: <i>Ortonormal matris</i>
ΔT	: Zaman aralığı
$G(i)$	: Markov parametrelerini temsil etmektedir.
H	: Hankel matrisi

$\bar{H}$	: Kaydırılmış Hankel matrisi
H_1^+	: Soldan ters matris
H_2^+	: Sağdan ters matris
I_k	: Periodogram
V	: Varyans
Ω	: Spektral bölge
Φ_{ff}	: Güç yoğunluk spektrum
$\{f_n\}$	: Veri kaydı
$\omega(n)$	: Pencereleme fonksiyonu
$\hat{U}$	: Dalga formunun gücünü azaltan pencereleme işleminin karşılayan karşılayan faktör
$\mathbb{F}$	: Dışarıdan uygulanan $u(t)$ kuvvet fonksiyonunun uzaysal dağılımı
$\hat{C}$	: Ölçülen tepkideki ivme, hız ve deplasmanın olası kombinasyonlarını
Y	: Dönüşüm matrisi
$\hat{\mathcal{A}}$	: Fiziksel hale dönmüş sistem durum matrisi
$\hat{B}$	: Fiziksel hale dönmüş sistem girdi matrisi
$\hat{C}$	: Fiziksel hale dönmüş sistem girdi matrisi çıktı matrisi
$\hat{D}$	: Fiziksel hale dönmüş sistem geçiş besleyici (feed-through) matris
t	: Zaman
$q(t)$	: Modal koordinat vektörü
f	: Rassal kuvvet fonksiyonu vektörü
x	: Rassal deplasman vektörü
m^r	: r. Modal kütle
S_{AB}	: Çapraz güç spektrum değeri
$g^r(t)$	: NExT algoritması teorik gelişim süresinde tanımlanan bir parametre
$x_{ik}(t)$	: Tekil sistem çıktısı
T	: Zaman
$\hat{I}$	: Birim matris
Σ	: <i>Diagonal tekil değerler matrisi</i>
Λ	: Öz değerler
ψ	: Öz vektör

ω	: Doğal frekans
ξ	: Sönüm oranı
φ	: Mod şekli
μ	: Veri ortalaması
Δf	: Frekans aralığı parçası
$\ddot{x}$	: İvme değeri
M	: Frekans şiddet değeri
Φ	: Mod matrisi
α_k	: Sabit
$\delta(t)$	: Dirac Delta fonksiyonu
λ	: Zaman farkıyla tanımlanan bir değişken dönüşümü parametresi
G_{ijk}^r	: Modal parametreleri içeren fonksiyon (NExT)
H_{ijk}^r	: Modal parametreleri içeren fonksiyonu (NEx)
I_{rs}	: NExT algoritmasının teorik alt yapısında işlemin devamlılığı için tanımlanan parametre
J_{rs}	: NExT algoritmasının teorik alt yapısında işlemin devamlılığı için tanımlanan parametre
γ_{rs}	: NExT algoritmasının teorik alt yapısında işlemin devamlılığı için tanımlanan parametre
β_{jk}^{rs}	: NExT algoritmasının teorik alt yapısında işlemin devamlılığı için tanımlanan parametre