

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPILARIN DENEYSEL VE OPERASYONEL MODAL ANALİZLERİ İÇİN
SAYISAL SİNYAL İŞLEME, DİNAMİK KARAKTERİSTİK BELİRLEME
VE SONLU ELEMAN MODEL İYİLEŞTİRME YAZILIMLARI:
SignalCAD - ModalCAD - FemUP**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Abdurrahman ŞAHİN

**HAZİRAN 2009
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPILARIN DENEYSEL VE OPERASYONEL MODAL ANALİZLERİ İÇİN
SAYISAL SİNYAL İŞLEME, DİNAMİK KARAKTERİSTİK BELİRLEME
VE SONLU ELEMAN MODEL İYİLEŞTİRME YAZILIMLARI:

SignalCAD - ModalCAD - FemUP

İnş. Yük. Müh. Abdurrahman ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Doktor (İnşaat Mühendisliği)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11.05.2009
Tezin Savunma Tarihi : 12.06.2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Murat EKİNCİ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Erdal ŞAFAK

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

ÖNSÖZ

“Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD - ModalCAD - FemUP” adlı bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yapıların dinamik davranışlarının deneysel olarak belirlenmesi ve analitik modellerin deney sonuçları kullanılarak iyileştirilmeleri son yıllarda üzerinde çok sayıda araştırma yapılan oldukça güncel bir konudur. Deneysel ve operasyonel modal analiz çalışmasının yapılabilmesi için donanımsal altyapı ile beraber yazılım altyapısının da kurulması gerekmektedir. Mevcut yazılımlarda sunulan çözüm algoritmalarının sınırlı sayıda olması ve formülasyonlarının kapalı formlarda verilmesi, çözüm algoritmalarına müdahale edilememesi, bu konuda çalışma yapan araştırmacıların ihtiyaçlarının tam olarak karşılanamamasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeple, bu çalışmada, mevcut en temel çözüm algoritmalarının çözümlenerek fonksiyonel olarak kodlandığı ve yeni geliştirilecek çözüm yöntemlerinin rahatlıkla içerisine dâhil edilebileceği yazılımların üretilmesine karar verilmiştir.

Bu konuda çalışmamı sağlayan, çalışmamın her aşamasında benimle yakından ilgilenen, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum ve her konuda kendisini örnek alacağım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’a, bana vermiş olduğu destekten, göstermiş olduğu sabır ve anlayıştan ötürü minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE’ye ve Yrd. Doç. Dr. Murat EKİNCİ’ye bana ayırdıkları zaman ve gösterdikleri ilgiden dolayı ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tez jürimde yer almayı kabul ederek çok değerli görüş ve önerilerini benimle paylaşan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Erdal ŞAFAK’a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez jürimde yer almayı kabul eden, değerli görüşlerini aktaran kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU’na teşekkür ederim.

Deneysel ölçümler konusunda yardımlarını benden esirgemeyen Araş. Gör. Temel TÜRKER’e teşekkür ederim. Değerli dostlarım Araş. Gör. Mehmet ÇAPIK, Araş. Gör. Barış SEVİM, Araş. Gör. Ahmet Can ALTUNIŞIK, Araş. Gör. Mehmet ÖZCAN, Araş. Gör. Hasan Basri BAŞAĞA ve Araş. Gör. Murat Emre KARTAL başta olmak üzere çalışmamı destekleyerek yanımda olduklarını hissettiren tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu günlere gelmeme vesile olan ve her zaman kendilerine layık olmak için çalıştığım fedakâr Anne ve Babama, desteklerini her zaman yanımda hissettiğim çok değerli Ablama, Ağabeyime ve Kardeşime minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Bu çalışmanın güzel ülkemiz için faydalı olmasını temenni ederim.

Abdurrahman ŞAHİN
Trabzon 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XXIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XXIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	3
1.2.1. Zorlanmış Titreşim Deneyi Konusunda Yapılmış Çalışmalar	3
1.2.2. Çevresel Titreşim Deneyi Konusunda Yapılmış Çalışmalar	5
1.2.3. Analitik Modellerin İyileştirilmesi Konusunda Yapılmış Çalışmalar	9
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	13
1.4. Sayısal Sinyal İşleme	15
1.4.1. Farklı Sinyal Türleri için Fourier Dönüşümü	16
1.4.1.1. Periyodik Sinyaller	16
1.4.1.2. Periyodik Olmayan Sinyaller.....	17
1.4.1.3. Örneklemeli Zaman Fonksiyonları	19
1.4.1.4. Örneklemeli Zaman ve Frekans Dönüşümü	20
1.4.2. Sayısal Sinyal İşlemede Kullanılan Analiz Parametreleri	21
1.4.3. Sayısal Sinyal İşlemede Karşılaşılan Hatalar ve Çözüm için Uygulanan Pencereler	22
1.4.3.1. Örtüşme Hatası	22
1.4.3.2. Sızıntı Hatası.....	23
1.4.3.3. Pencereler ile Sızıntı Probleminin Çözümü.....	26
1.4.4. Zaman ve Frekans Fonksiyonları ve Uygulamaları.....	28
1.4.4.1. Otogüç Spektrumu ve Otokorelasyon Fonksiyonu.....	28
1.4.4.2. Çaprazgüç Spektrumu ve Çaprazkorelasyon Fonksiyonu	29
1.4.4.3. Frekans Davranış ve Koherans Fonksiyonları.....	30

	<u>Sayfa No</u>
1.4.4.3.1. Tek Etki Tek Tepki.....	30
1.4.4.4. Güç Spektral Yoğunlukları.....	32
1.4.4.5. Spektrogram.....	33
1.5. Modal Parametrelerin Belirlenmesi.....	34
1.5.1 İşletim Vektörleri Yöntemi.....	35
1.5.2. Kompleks Eksponansiyel Yöntemi.....	37
1.5.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi.....	42
1.5.3.1. Birinci Aşama Çözümü: Kutuplar ve Modal Katılım Matrisi.....	48
1.5.3.2. İkinci Aşama Çözümü: Kalıntılar.....	57
1.6. Hesaplanan Modal Parametrelerin Kontrolü.....	63
1.6.1. FRF Matrislerinin Sentezlenmesi.....	64
1.6.2. Modal Güvence Kriteri (MAC).....	64
1.6.3. Modal Faz Doğrudaşlığı (MPC).....	66
1.6.4. Stabilitate Diyagramı.....	67
1.7. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	68
1.7.1. Model İyileştirmede Kullanılan Karşılaştırma ve Korelasyon Teknikleri.....	69
1.7.1.1. Doğal Frekansların Korelasyonu.....	69
1.7.1.2. Mod Şekillerinin Görsel Karşılaştırması.....	70
1.7.1.3. Modal Güvence Kriteri.....	70
1.7.2. Genel Optimizasyon Algoritması.....	71
1.7.2.1. Arama Yönü.....	72
1.7.2.2. Hat Arama ve Emniyet Bölgesi Stratejileri.....	75
1.7.3. Model İyileştirmede Kullanılan Optimizasyon Algoritması.....	76
1.7.3.1. Ardışık Kuadratik Programlama (Sequential Quadratic Programming – SQP) Algoritması.....	76
1.7.3.1.1. Lagrange Fonksiyonunun Hessian Matrisinin Güncellenmesi.....	77
1.7.3.1.2. Kuadratik Programlama Probleminin Çözümü.....	78
1.7.3.1.3. Hat Arama ve Değer Fonksiyonu.....	81
1.7.3.2. SQP Algoritmasının Sonlu Eleman Model İyileştirmede Kullanımı.....	82
1.7.3.2.1. Hedef Fonksiyonu.....	82
1.7.3.2.1.1. Doğal Frekanslar.....	83

	<u>Sayfa No</u>
1.7.3.2.2. Sınırlandırma Fonksiyonu	84
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	85
2.1. Laboratuar Modelinin Zorlanmış ve Çevresel Titreşim Deneyleri.....	85
2.2. Geliştirilen Bilgisayar Programları.....	89
2.2.1. SignalCAD Programı.....	89
2.2.1.1. Zorlanmış Titreşim Deneyinden Elde Edilen Verilerin SignalCAD Programı ile Analiz İşlemi.....	94
2.2.1.1.1. Verilerin Sisteme Tanıtılması	94
2.2.1.1.2. Hızlı Fourier Dönüşüm Ayarlarının Yapılması	95
2.2.1.1.3. Çaprazgüç Spektrumu ve Frekans Davranış Fonksiyonu Spektral Analizlerinin Yapılması.....	96
2.2.1.1.4. Güç Spektral Yoğunluk Analizinin Yapılması	100
2.2.1.1.5. Otogüç Spektrumu Analizinin Yapılması.....	102
2.2.1.1.6. Spektrogram Analizinin Yapılması	103
2.2.1.1.7. Sinyallerin Toplu Analizi ve Spektrumların Kaydedilmesi	104
2.2.1.2. Çevresel Titreşim Deneyinden Elde Edilen Verilerin SignalCAD Programı ile Analiz İşlemi.....	106
2.2.1.2.1. Verilerin Sisteme Tanıtılması	106
2.2.1.2.2. Sinyallerin Görsel Kontrolü, Filtreleme ve Spektral Değerlendirme	106
2.2.1.2.3. Çaprazgüç Spektrumu Spektral Analizlerinin Yapılması.....	113
2.2.1.2.4. Güç Spektral Yoğunluk Analizinin Yapılması	118
2.2.1.2.5. Otogüç Spektrumu Analizinin Yapılması.....	120
2.2.1.2.6. Spektrogram Analizinin Yapılması	122
2.2.1.2.7. Sinyallerin Toplu Analizi ve Spektrumların Kaydedilmesi	124
2.2.2. ModalCAD Programı	126
2.2.2.1. Spektrumların Sisteme Tanıtılması	131
2.2.2.2. Yapı Sisteminin Geometrisinin Programa Tanıtılması.....	132
2.2.2.3. Ölçüm Alınan Kanalların Sistem Geometrisi Üzerinde Konumlandırılması	140
2.2.2.4. Titreşim Deneyine Bağlı Olarak Spektral Fonksiyonun Belirlenmesi	141
2.2.2.5. Yapı Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	143
2.2.2.5.1. İşletim Vektörleri (OV) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	143

	<u>Sayfa No</u>
2.2.2.5.2. Kompleks Ekspansiyel (CE) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	148
2.2.2.5.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	154
2.2.2.6. Belirlenen Dinamik Karakteristiklerinin Analiz ve Değerlendirmesi	160
2.2.2.7. Belirlenen Dinamik Karakteristiklerinin Animasyon Takibi	165
2.2.2.8. Yapılan Çalışmanın Kaydedilmesi	167
2.2.3. FemUP Programı	168
2.2.3.1. FemUP Programı ile Optimum Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	176
2.2.3.1.1. Deneysel Modelin Sisteme Yüklenmesi.....	176
2.2.3.1.2. Teorik Modelin Sisteme Yüklenmesi	176
2.2.3.1.3. Deneysel ve Teorik Modeller Arasındaki Uyumun İncelenmesi	178
2.2.3.1.4. Deneysel ve Teorik Modellerin Başlangıç Korelasyon Analizi	179
2.2.3.1.5. İyileştirme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	179
2.2.3.1.6. Sonlu Eleman Model İyileştirme Analizi	180
2.3. Geliştirilen Bilgisayar Programlarının Kontrolü	182
2.3.1. SignalCAD Programı ile PULSE Programı Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	182
2.3.1.1. Çerçeve Modelinin Zorlanmış Titreşim Verilerinin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	182
2.3.1.2. Çerçeve Modelinin Çevresel Titreşim Verilerinin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	187
2.3.2. ModalCAD Programı Analiz Sonuçlarının OMA Programı Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması	192
2.3.2.1. Çerçeve Modelinin Sadece Tepki Modal Analizine Göre Belirlenen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması.....	192
3. BULGULAR VE İRDELEMELER	197
3.1. Geliştirilen Bilgisayar Programlarının Laboratuar Modeline Uygulanması ..	197
3.1.1. Modelin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi	197
3.1.1.1. Modelin Deneysel (Etki Tepki) Modal Analizi	197
3.1.1.1.1. Model Üzerinde Çekiç Deneyi Yapılması ve Sinyallerin Toplanması.....	197
3.1.1.1.2. SignalCAD Programı ile Ham Sinyal Verilerinin İşlenmesi ve Spektrumların Üretimi.....	202
3.1.1.1.2.1. Frekans Davranış Fonksiyonları.....	202

	<u>Sayfa No</u>
3.1.1.1.2.2. Çaprazgüç Spektrumları	209
3.1.1.1.2.3. Otogüç Spektrumları	210
3.1.1.1.2.4. Güç Spektral Yoğunlukları	210
3.1.1.1.2.5. Spektrogram Grafikleri	211
3.1.1.1.3. Zorlanmış Titreşim Deneyi Yapılan Modelin ModalCAD Programı Kullanılarak Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	217
3.1.1.1.3.1. İşletim Vektörleri (OV) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	217
3.1.1.1.3.2. Kompleks Eksponansiyel (CE) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	223
3.1.1.1.3.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	234
3.1.1.2. Modelin Operasyonel (Sadece Tepki) Modal Analizi	247
3.1.1.2.1. Model Üzerinde Çevresel Titreşim Deneyi Yapılması ve Sinyallerin Toplanması	247
3.1.1.2.2. SignalCAD Programı ile Ham Sinyal Verilerinin İşlenmesi ve Spektrumların Üretimi	253
3.1.1.2.2.1. Otogüç Spektrumları	253
3.1.1.2.2.2. Çaprazgüç Spektrumları	261
3.1.1.2.2.3. Güç Spektral Yoğunlukları	279
3.1.1.2.2.4. Spektrogram Grafikleri	285
3.1.1.2.3. Çevresel Titreşim Deneyi Yapılan Modelin ModalCAD Programı Kullanılarak Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	290
3.1.1.2.3.1. İşletim Vektörleri (OV) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	290
3.1.1.2.3.2. Kompleks Eksponansiyel (CE) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	295
3.1.1.2.3.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	301
3.1.1.3. FemUP Programı ile Üç Boyutlu Çelik Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Deney Sonuçları Referans Alınarak İyileştirilmesi	308
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	316
5. KAYNAKLAR	324
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu çalışmada, yapı sistemlerinin zorlanmış ve çevresel titreşim deneylerinden toplanan sinyal kayıtları analiz edilerek, yapıların göstermiş oldukları dinamik davranışın belirlenmesi ve bu davranış referans kabul edilerek yapıya ait teorik modellerin optimum seviyede iyileştirilmesi amacıyla bilgisayar programlarının geliştirilmesi ve bu programların laboratuvar modeli üzerinde uygulamalarının yapılması amaçlanmaktadır. Deney aşaması tamamlandıktan sonra yapılması gereken sayısal sinyal işleme, modal parametrelerin belirlenmesi ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmeleri konusunda MATLAB platformunda grafik kullanıcı arayüzüne sahip bilgisayar programları geliştirilmiştir. Sayısal sinyal işleme konusunda geliştirilen programa SignalCAD, modal parametrelerin belirlenmesi konusunda geliştirilen programa ModalCAD ve sonlu eleman model iyileştirilmesi konusunda geliştirilen programa da FemUP adı verilmiştir. Programların geliştirilmesi aşamasında literatürde yaygın olarak kullanılan pek çok algoritma kodlanarak sisteme fonksiyonel yapıda dahil edilmiş, böylelikle bu algoritmaların arasındaki farklılıkların analiz edilebilmesi imkanı sağlanmıştır.

Bu çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasını ve deneysel modal analizin aşamalarını oluşturan sayısal sinyal işleme, dinamik karakteristik belirleme ve sonlu eleman model iyileştirme işlemlerinde kullanılan optimizasyon algoritması ile ilgili teorik formülasyonları içermektedir. İkinci bölümde, laboratuvar modeli üzerinde uygulanan deneysel ölçümler hakkında bilgiler verilmekte, bu ölçüm sonuçlarının geliştirilmiş olan bilgisayar programları ile analiz işlemleri açıklanmakta ve elde edilen sonuçların ticari programlar kullanılarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırmaları yapılmaktadır. Üçüncü bölümde laboratuvar modelinden alınan ölçüm verilerinin geliştirilen bilgisayar programları ile yapılan analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

Çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilerek, bundan sonra yapılması düşünülen çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deneysel Modal Analiz, Operasyonel Modal Analiz, Zorlanmış Titreşim, Çevresel Titreşim, Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme, Sonlu Eleman Model İyileştirme, SignalCAD, ModalCAD, FemUP, MATLAB

SUMMARY

Digital Signal Processing, Dynamic Characteristic Identification and Finite Element Model Updating Software for Experimental and Operational Modal Testing of Structures: SignalCAD - ModalCAD - FemUP

In this study, it is aimed to develop computer programs for the purpose of determining the dynamic behavior of structural systems by analyzing signal records collected from forced and ambient vibration tests and updating the theoretical models by assuming this behavior as reference and to perform applications of these programs on laboratory model. Computer programs with graphical user interfaces about digital signal processing, modal parameter estimation and finite element model updating required after experimental procedure have been developed in MATLAB. The software developed for digital signal processing is called as SignalCAD, the software developed for modal parameter estimation is called as ModalCAD and the software developed for finite element model updating is called as FemUP. Most of the algorithms in the literature have been implemented and included into the system in a functional structure and the opportunity to compare these algorithms has been provided.

This study consists of four main chapters. The first chapter includes literature investigations and theoretical formulations about digital signal processing, dynamic characteristic identification and optimization algorithm used in finite element model updating. In the second chapter, information about experimental measurements performed on laboratory model is given, analysis procedures of these measurement results by using developed computer programs are explained and obtained results are compared with those of commercial programs. In the third section, the results obtained from the analyses of measurement data of laboratory model by using developed computer programs are investigated as comparative.

In the last chapter, the results obtained from the study are evaluated in detail, and the recommendations proposed for future researches are presented.

Keywords: Experimental Modal Analysis, Operational Modal Analysis, Forced Vibration, Ambient Vibration, Digital Signal Processing, Dynamic Characteristic Identification, Finite Element Model Updating, SignalCAD, ModalCAD, FemUP, MATLAB

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Dikdörtgen sinyal serisi ve genlik spektrumu..... 17
Şekil 1.2.	Periyodik olmayan dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu..... 18
Şekil 1.3.	Örnekleme dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu 20
Şekil 1.4.	Örnekleme periyodik dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu..... 21
Şekil 1.5.	Pencere: Gözlem zamanı T 24
Şekil 1.6.	Sürekli kosinüs dalgası ($f_1 = n_1/T$) 24
Şekil 1.7.	Pencereli kosinüs dalgası 24
Şekil 1.8.	Periyodiklik varsayımı 25
Şekil 1.9.	Pencere: Gözlem zamanı T 25
Şekil 1.10.	Sürekli kosinüs dalgası ($f_2 \neq n/T$) 25
Şekil 1.11.	Pencereli kosinüs dalgası 25
Şekil 1.12.	Periyodiklik varsayımı 26
Şekil 1.13.	Dikdörtgen pencere ve dönüşümü 27
Şekil 1.14.	Hanning penceresi ve dönüşümü 27
Şekil 1.15.	Hamming penceresi ve dönüşümü 27
Şekil 1.16.	Gaussian penceresi ($\beta = 3.0$) ve dönüşümü 27
Şekil 1.17.	Düz tepe penceresi ve dönüşümü..... 28
Şekil 1.18.	FRF nin sanal kısmından elde edilen modal vektörler..... 37
Şekil 1.19.	Model derecesi ve modların yerini belirlemek için kullanılan genel bir stabilite diyagramı örneği ve kullanılan simgelerin açıklamaları..... 68
Şekil 1.20.	Quasi-Newton yönteminin grafiksel yorumu..... 74
Şekil 2.1.	Üç boyutlu çelik çerçeve modeli..... 86
Şekil 2.2.	Modele yerleştirilen ivmeölçerlerin yönleri ve kanal numaraları..... 87
Şekil 2.3.	Deneyde kullanılan üç eksenli ivmeölçer ile veri toplama ünitesi ve kayıt bilgisayarı..... 87
Şekil 2.4.	Modelin darbe çekici ile titreştirilmesi 88
Şekil 2.5.	SignalCAD programında zorlanmış titreşim deney verilerinin analizi için hazırlanmış olan akış diyagramı 90

Şekil 2.6.	SignalCAD programında çevresel titreşim deney verilerinin analizi için hazırlanmış olan akış diyagramı	91
Şekil 2.7.	SignalCAD programı ana penceresi.....	92
Şekil 2.8.	SignalCAD programı ana ekran düğmeleri.....	93
Şekil 2.9.	Sisteme veri yükleme seçenek penceresi	94
Şekil 2.10.	SignalCAD programına zorlanmış titreşim deneyinden elde edilen etki ve tepki verilerinin yüklenmesi.....	95
Şekil 2.11.	Hızlı Fourier dönüşümü hesap ayarları.....	95
Şekil 2.12.	Çekiç sinyali ile 1 numaralı kanalın sinyalinin pencereleme uygulanmadan yapılan CPS analizi	98
Şekil 2.13.	Çekiç sinyali ile 1 numaralı kanalın sinyalinin dikdörtgen pencereleme uygulanarak yapılan CPS analizi	98
Şekil 2.14.	Çekiç sinyali ile 1 numaralı kanalın sinyalinin dikdörtgen pencereleme uygulanarak yapılan FRF analizi	99
Şekil 2.15.	Zorlanmış titreşim deney verileri kullanılarak üretilen FRF'ler.....	99
Şekil 2.16.	Etki grubuna ait 1 numaralı kanalın Periodogram Yöntemi ile elde edilen PSD grafiği	101
Şekil 2.17.	Tepki grubuna ait 1 numaralı kanalın Welch Yöntemi ve dikdörtgen pencereleme filtresi kullanılarak elde edilen PSD grafiği	101
Şekil 2.18.	Tepki grubuna ait 1 numaralı kanalın dikdörtgen pencereleme filtresi kullanılarak elde edilen APS grafiği	102
Şekil 2.19.	Tepki grubuna ait 1 numaralı kanalın dikdörtgen pencereleme filtresi kullanılarak elde edilen spektrogram	103
Şekil 2.20.	SignalCAD programında etki tepki modal analizi için otomatik spektrum analizi ve kayıt penceresi	104
Şekil 2.21.	SignalCAD programı kayıt penceresi	105
Şekil 2.22.	Üç boyutlu çerçevenin etki tepki modal analizi için seçilen spektrumların analiz ve kayıt işlemi	105
Şekil 2.23.	Çevresel titreşim deneyinden elde edilen ve 1 numaralı kanala ait olan sinyal kümesinin üç boyutlu ve anlık görüntüleri.....	107
Şekil 2.24.	İvme spektrum kümesi içerisinde görüntü hattının ilerletilmesi ile elde edilen görüntü (1 numaralı kanal için).....	108
Şekil 2.25.	İvme spektrum kümesinin üç boyutlu ve zaman ekseninde izdüşüm görüntüleri (1 numaralı kanal için).....	108
Şekil 2.26.	İvme spektrum kümesi içerisinde sinyal özelliğini kısmen kaybetmiş olan bir anlık kayıt	109

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.27.	SignalCAD programında seçilen 7 numaralı kanala ait zamana bağlı sinyal kayıtları (Üç boyutlu görüntü yüzey formatında)..... 110
Şekil 2.28.	SignalCAD programında seçilen 7 numaralı kanala ait zamana bağlı sinyal kayıtları (Üç boyutlu görüntü çizgi formatında) 112
Şekil 2.29.	SignalCAD programında seçilen 1 numaralı kanal için hesaplanan APS spektrum kümesi ve iki boyutlu anlık görüntü 112
Şekil 2.30.	SignalCAD programında seçilen 1 numaralı kanal için hesaplanan APS spektrum kümesi ve iki boyutlu izdüşüm görüntüsü 113
Şekil 2.31.	SignalCAD programında 10 numaralı kanalın 2 numaralı kanala göre hesaplanan CPS kümesinin üç boyutlu çizgisel gösterimi..... 115
Şekil 2.32.	SignalCAD programında 10 numaralı kanalın 2 numaralı kanala göre hesaplanan CPS kümesinin iki boyutlu düzlem üzerine izdüşümü 115
Şekil 2.33.	SignalCAD programında 10 numaralı kanalın 2 numaralı kanala göre hesaplanan CPS kümesinin tekil spektruma indirgenmesi 116
Şekil 2.34.	Çevresel titreşim deney verileri kullanılarak üretilen CPS'ler 117
Şekil 2.35.	SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait sinyalin Welch Yöntemi ile yapılan PSD analizi sonucunun üç boyutlu çizgisel görüntüsü 118
Şekil 2.36.	SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait sinyalin Welch Yöntemi ile yapılan PSD analizi sonucunun iki boyutlu izdüşüm görüntüsü 119
Şekil 2.37.	SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait sinyalin PSD fonksiyonunun hesabı 120
Şekil 2.38.	SignalCAD programında 16 numaralı kanala ait sinyalin APS analiz sonucunun iki boyutlu izdüşüm görüntüsü 121
Şekil 2.39.	SignalCAD programında 16 numaralı kanala ait APS fonksiyonunun hesabı 121
Şekil 2.40.	SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait grafiksel spektrogramın izdüşümü 122
Şekil 2.41.	SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait grafiksel spektrogramın tekil değer ayrıştırması..... 123
Şekil 2.42.	SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait resimsel spektrogramın elde edilmesi 123
Şekil 2.43.	SignalCAD programında sadece tepki modal analizi için otomatik spektrum analiz ve kayıt penceresi 124
Şekil 2.44.	Sadece tepki modal analizi için kayıt penceresi 125
Şekil 2.45.	Üç boyutlu çerçevenin sadece tepki modal analizi için seçilen spektrumların analiz ve kayıt aşaması 125
Şekil 2.46.	ModalCAD programı ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ve sonuçların kontrolü için hazırlanan akış diyagramı 128

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.47.	ModalCAD programı ana penceresi 129
Şekil 2.48.	ModalCAD programının ana kontrol düğmeleri..... 130
Şekil 2.49.	ModalCAD programının geometrik görüntü ve seçimler ile ilgili düğmeleri 131
Şekil 2.50.	ModalCAD programı spektrum yükleme penceresi 132
Şekil 2.51.	SignalCAD spektrum dosyasının ModalCAD programına yüklenme penceresi 132
Şekil 2.52.	ModalCAD programında çizim ızgarası oluşturma penceresi..... 133
Şekil 2.53.	Üç boyutlu çerçeve modeli için ModalCAD programında oluşturulan çizim ızgarası 133
Şekil 2.54.	Üç boyutlu çerçeve modelinin ModalCAD programında geometrisinin oluşturulması..... 134
Şekil 2.55.	ModalCAD programında silinmek istenen elemanların seçilme işlemi 136
Şekil 2.56.	ModalCAD programında elemanların silinme işlemi..... 136
Şekil 2.57.	ModalCAD programında sistemin eleman ve düğüm numaralarının gösterimi 137
Şekil 2.58.	ModalCAD programında sistemin bütün eleman ve düğümlerinin seçimi 137
Şekil 2.59.	ModalCAD programında sistemin istenilen açıda görsel takibi 138
Şekil 2.60.	ModalCAD programında aktif ekranın xz düzlemi ($y=0.9$) konumuna getirilmesi 139
Şekil 2.61.	ModalCAD programında aktif ekranın xy düzlemi ($z=1.8$) konumuna getirilmesi 139
Şekil 2.62.	Seçili düğümlere atanacak kanalların yön tayin penceresi 140
Şekil 2.63.	Üç boyutlu çerçeve modelinin deneysel ölçüm düzeneğinin ModalCAD programında simülasyonu 141
Şekil 2.64.	Analizlerde kullanılacak spektral fonksiyonun türünün ve özelliğinin seçimi 142
Şekil 2.65.	ModalCAD programında OV Yöntemi analiz ekranı 144
Şekil 2.66.	ModalCAD programında OV Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin hesaplanması için tasarlanan akış diyagramı 145
Şekil 2.67.	OV Yöntemi ekranında yer alan yönetim düğmeleri..... 146
Şekil 2.68.	ModalCAD programında OV Yöntemi ile analizde 1 numaralı tepeye karşılık gelen dinamik karakteristiklerin hesabı..... 147
Şekil 2.69.	ModalCAD programında çevresel titreşim deneyi yapılan modelin OV Yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi 148

Şekil 2.70.	ModalCAD programında CE Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin hesaplanması için tasarlanan akış diyagramı	149
Şekil 2.71.	CE Yöntemi analiz ekranı	150
Şekil 2.72.	CE Yöntemi analiz düğmeleri.....	151
Şekil 2.73.	CE Yöntemi için stabilite diyagramının çizimi	152
Şekil 2.74.	CE Yöntemi ile üç boyutlu çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi	153
Şekil 2.75.	15 numaralı kanal için elde edilen teorik CPS ile deney sonucunda üretilen CPS nin karşılaştırılması.....	154
Şekil 2.76.	ModalCAD programında PTD Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin hesaplanması için tasarlanan akış diyagramı.....	155
Şekil 2.77.	PTD Yöntemi analiz ekranı	156
Şekil 2.78.	PTD Yöntemi analiz düğmeleri	156
Şekil 2.79.	PTD Yönteminde spektral çizim alanında stabilite diyagramının çizimi ..	158
Şekil 2.80.	PTD Yönteminde spektral alanın altında stabilite diyagramının çizimi....	158
Şekil 2.81.	PTD Yöntemi ile üç boyutlu çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi	159
Şekil 2.82.	1 numaralı kanal için elde edilen teorik CPS ile deney sonucunda üretilen CPS nin karşılaştırılması.....	160
Şekil 2.83.	ModalCAD programında hesaplanan dinamik karakteristiklerin kontrol ve değerlendirilmesi ekranı	161
Şekil 2.84.	Modal analiz sonuçlarının kontrol ekranındaki yönetim düğmeleri.....	162
Şekil 2.85.	OV Yöntemi ile belirlenen modal vektörler için 3 boyutlu MAC grafiği.....	163
Şekil 2.86.	OV Yöntemi ile belirlenen modal vektörler için 2 boyutlu MAC grafiği.....	163
Şekil 2.87.	OV Yöntemi ile belirlenen modal vektörler için farklı renk tonlarında 2 boyutlu MAC grafiği.....	164
Şekil 2.88.	OV Yöntemi ile belirlenen 1. modal vektör için MPC grafiği	164
Şekil 2.89.	ModalCAD programı modal animasyon ekranı.....	165
Şekil 2.90.	Animasyon ekranı yönetim düğmeleri.....	166
Şekil 2.91.	Animasyon ekranında farklı bakış açıları ve artırılmış genlikle modların takibi	167
Şekil 2.92.	ModalCAD programı kayıt penceresi.....	168
Şekil 2.93.	Tez çalışması kapsamında geliştirilen SignalCAD, ModalCAD ve FemUP programları arasında kurulan ilişki.....	170

Şekil 2.94.	FemUP programı ile uygulanan sonlu eleman model iyileştirme yöntemine ait genel akış diyagramı	171
Şekil 2.95.	FemUP programı optimizasyon algoritmasının hedef fonksiyonu akış diyagramı	173
Şekil 2.96.	FemUP programı optimizasyon algoritmasının sınırlandırma fonksiyonu akış diyagramı	174
Şekil 2.97.	FemUP programı ana ekranı	175
Şekil 2.98.	FemUP programına ModalCAD dosyasının yüklenmesi penceresi	176
Şekil 2.99.	FemUP programına ANSYS dosyasının yüklenmesi penceresi	177
Şekil 2.100.	Model uyum kontrolü sonrası verilen rapor.....	178
Şekil 2.101.	FemUP programı ile deneysel ve teorik modellerin korelasyon analizi	179
Şekil 2.102.	Sonlu eleman model iyileştirme analizi için optimizasyon parametrelerinin seçim penceresi.....	180
Şekil 2.103.	Model iyileştirme analiz ekranı	181
Şekil 2.104.	Model iyileştirme tamamlandıktan sonra FemUP ana ekranı.....	182
Şekil 2.105.	Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 1., 2. ve 3. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri.....	183
Şekil 2.106.	Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 4., 5., 6. ve 7. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri.....	184
Şekil 2.107.	Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 8., 9., 10. ve 11. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri.....	185
Şekil 2.108.	Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 12., 13., 14. ve 15. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri.....	186
Şekil 2.109.	Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 16. tepki kanalı için bulunan FRF grafikleri.....	187
Şekil 2.110.	Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 1., 2., 3. ve 4. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri.....	188
Şekil 2.111.	Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 5., 6., 7. ve 8. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri.....	189
Şekil 2.112.	Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 9., 10., 11. ve 12. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri.....	190
Şekil 2.113.	Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 13., 14., 15. ve 16. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri.....	191
Şekil 2.114.	ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen 1., 2. ve 3. mod şekilleri.....	194
Şekil 2.115.	ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen 4., 5. ve 6. mod şekilleri.....	195

Şekil 2.116.	ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen 7. mod şekilleri.....	196
Şekil 3.1.	Model üzerinde yapılan zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri için sisteme yerleştirilen kanalların numaraları ve yönler	198
Şekil 3.2.	Modelinin zorlanmış titreşim deneyinde çekiçten alınan etki sinyali.....	198
Şekil 3.3.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları	199
Şekil 3.4.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları	200
Şekil 3.5.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları	201
Şekil 3.6.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 16 numaralı kanaldan alınan sinyal kaydı	202
Şekil 3.7.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 1 numaralı kanal için hesaplanan frekans davranış fonksiyonu.....	202
Şekil 3.8.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 2, 3, 4 ve 5 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları	203
Şekil 3.9.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 6, 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları	204
Şekil 3.10.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 10, 11, 12 ve 13 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları.....	205
Şekil 3.11.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 14, 15 ve 16 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları	206
Şekil 3.12.	Frekans davranış fonksiyonlarından hesaplanan kompleks mod gösterge fonksiyonu	207
Şekil 3.13.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucunda 0-25 Hz aralığında yapılan hesap sonucu elde edilen FRF grafikleri.....	207
Şekil 3.14.	Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucunda 0-50 Hz aralığında yapılan hesap sonucu elde edilen FRF grafikleri.....	208
Şekil 3.15.	Modelin 0-50 Hz arasında hesaplanan frekans davranış fonksiyonlarından meydana gelen kompleks mod gösterge fonksiyonu ...	208
Şekil 3.16.	Zorlanmış titreşim deney verilerinden hesaplanan CPS grafikleri	209
Şekil 3.17.	Zorlanmış titreşim deney verilerinden hesaplanan APS grafikleri	210
Şekil 3.18.	Zorlanmış titreşim deney verilerinden hesaplanan PSD grafikleri	211
Şekil 3.19.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde etki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi	212
Şekil 3.20.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 1 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi.....	213

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.21.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 2 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi..... 214
Şekil 3.22.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 3 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi..... 215
Şekil 3.23.	Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 4 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi..... 216
Şekil 3.24.	Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen modların 2 numaralı kanala ait FRF üzerindeki konumları..... 218
Şekil 3.25.	Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri..... 220
Şekil 3.26.	Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri..... 221
Şekil 3.27.	Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri..... 222
Şekil 3.28.	Modelin etki tepki modal analizine göre CE yöntemi ile belirlenen modların kanal 2 FRF spektrumu üzerindeki konumları..... 223
Şekil 3.29.	Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri..... 225
Şekil 3.30.	Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri..... 226
Şekil 3.31.	Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri..... 227
Şekil 3.32.	Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 100 olması durumunda CE Yöntemi ile elde edilen stabilite diyagramları..... 228
Şekil 3.33.	Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 1, 2 ve 3 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler..... 229
Şekil 3.34.	Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 4, 5 ve 6 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler..... 230
Şekil 3.35.	Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler..... 231
Şekil 3.36.	Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 10, 11 ve 12 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler..... 232
Şekil 3.37.	Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 13, 14 ve 15 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler..... 233

Şekil 3.38.	Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 16 numaralı kanal için üretilen teorik FRF ile deney sonucu elde edilen FRF.....	234
Şekil 3.39.	Modelin etki tepki modal analizine göre PTD yöntemi ile belirlenen modların kanal 2 FRF spektrumu üzerindeki konumları.....	235
Şekil 3.40.	Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri.....	236
Şekil 3.41.	Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri.....	237
Şekil 3.42.	Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri.....	238
Şekil 3.43.	Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 100 olması durumunda PTD Yöntemi ile elde edilen stabilite diyagramları.....	239
Şekil 3.44.	Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 100, 150 ve 200 olması durumunda PTD Yöntemi ile elde edilen stabilite diyagramları....	240
Şekil 3.45.	Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 1 numaralı kanal için üretilen teorik FRF ile deney sonucu elde edilen FRF.....	241
Şekil 3.46.	Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 2, 3 ve 4 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler.....	242
Şekil 3.47.	Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 5, 6 ve 7 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler.....	243
Şekil 3.48.	Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 8, 9 ve 10 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler.....	244
Şekil 3.49.	Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 11, 12 ve 13 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler.....	245
Şekil 3.50.	Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 14, 15 ve 16 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler.....	246
Şekil 3.51.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 1 numaralı kanaldan alınan sinyal kayıtları.....	247
Şekil 3.52.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 2, 3 ve 4 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları.....	248
Şekil 3.53.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 5, 6 ve 7 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları.....	249
Şekil 3.54.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 8, 9 ve 10 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları.....	250

Şekil 3.55.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 11, 12 ve 13 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları	251
Şekil 3.56.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 14, 15 ve 16 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları	252
Şekil 3.57.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 1, 2 ve 3 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri	254
Şekil 3.58.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 4, 5 ve 6 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri	255
Şekil 3.59.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri	256
Şekil 3.60.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 10, 11 ve 12 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri	257
Şekil 3.61.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 13, 14 ve 15 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri	258
Şekil 3.62.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 16 numaralı kanal için hesaplanan APS serisi	259
Şekil 3.63.	Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan APS grafikleri	260
Şekil 3.64.	Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan APS grafiklerinin ayrı eksenler üzerinde gösterimi	260
Şekil 3.65.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 1 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	262
Şekil 3.66.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 2 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	263
Şekil 3.67.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 3 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	264
Şekil 3.68.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 4 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	265
Şekil 3.69.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 5 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	266
Şekil 3.70.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 6 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	267
Şekil 3.71.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 7 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	268
Şekil 3.72.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 8 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	269
Şekil 3.73.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 9 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	270

Şekil 3.74.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 10 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	271
Şekil 3.75.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 11 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	272
Şekil 3.76.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 12 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	273
Şekil 3.77.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 13 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	274
Şekil 3.78.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 14 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	275
Şekil 3.79.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 15 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	276
Şekil 3.80.	Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 16 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi.....	277
Şekil 3.81.	Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan CPS grafiklerinin ayrı eksenler üzerinde gösterimi	278
Şekil 3.82.	Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan CPS grafikleri.....	279
Şekil 3.83.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 1, 2 ve 3 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri	280
Şekil 3.84.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 4, 5 ve 6 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri	281
Şekil 3.85.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri	282
Şekil 3.86.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 10, 11 ve 12 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri	283
Şekil 3.87.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 13, 14 ve 15 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri	284
Şekil 3.88.	Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 16 numaralı kanal için hesaplanan PSD serisi	285
Şekil 3.89.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 1 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi.....	286
Şekil 3.90.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 2 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi.....	287
Şekil 3.91.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 3 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi.....	288
Şekil 3.92.	Modelin çevresel titreşim deneyinde 4 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi.....	289

Şekil 3.93.	Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen modların CMIF spektrumu üzerindeki konumları	291
Şekil 3.94.	Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri.....	292
Şekil 3.95.	Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri	293
Şekil 3.96.	Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri.....	294
Şekil 3.97.	Modelin sadece tepki modal analizine göre CE yöntemi ile belirlenen modların CMIF spektrumu üzerindeki konumları	295
Şekil 3.98.	Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri.....	297
Şekil 3.99.	Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri	298
Şekil 3.100.	Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri.....	299
Şekil 3.101.	Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 100 olması durumunda CE Yöntemi ile edilen stabilite diyagramları.....	300
Şekil 3.102.	Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD yöntemi ile belirlenen modların CMIF spektrumu üzerindeki konumları	301
Şekil 3.103.	Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri.....	303
Şekil 3.104.	Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri	304
Şekil 3.105.	Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri.....	305
Şekil 3.106.	Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 75 olması durumunda PTD Yöntemi ile edilen stabilite diyagramları	306
Şekil 3.107.	Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 100, 150 ve 200 olması durumunda CE Yöntemi ile edilen stabilite diyagramları.....	307
Şekil 3.108.	Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin başlangıç kabulleri ile ANSYS programı ile bulunan 1., 2., 3. ve 4. mod şekilleri	308
Şekil 3.109.	Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin başlangıç kabulleri ile ANSYS programı ile bulunan 5., 6. ve 7. mod şekilleri	309
Şekil 3.110.	İyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen 1. mod şeklinin karşılaştırılması	312
Şekil 3.111.	İyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen 2., 3. ve 4. mod şekillerinin karşılaştırılması	313

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.112. İyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen 5., 6. ve 7. mod şekillerinin karşılaştırılması	314
Şekil 3.113. Deneysel model ile analitik model arasındaki uyumu gösteren MAC grafikleri.....	315

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Sinyal türleri	16
Tablo 2.1. ModalCAD programında yer alan modal parametre belirleme yöntemleri....	127
Tablo 2.2. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen doğal frekanslar.....	192
Tablo 2.3. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen sönüm oranları	193
Tablo 3.1. Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri.....	218
Tablo 3.2. Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri.....	223
Tablo 3.3. Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri.....	235
Tablo 3.4. Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri.....	291
Tablo 3.5. Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri.....	296
Tablo 3.6. Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri.....	302
Tablo 3.7. Modelin etki tepki modal analizine göre hesaplanan doğal frekans değerleri	309
Tablo 3.8. Modelin sadece tepki modal analizine göre hesaplanan doğal frekans değerleri	310
Tablo 3.9. Deneysel model ile teorik modelin başlangıç korelasyon analiz sonuçları	310
Tablo 3.10. Model iyileştirmeden sonra deneysel model ile teorik modelin korelasyon analiz sonuçları	311
Tablo 3.11. Sonlu eleman model iyileştirmeden önce ve sonraki malzeme ve geometri özellikleri.....	311

SEMBOLLER DİZİNİ

APS	Otogüç spektrumu (Autopower spectrum)
BMS	Bileşen Mod Sentezi
BFGS	Broyden, Fletcher, Goldfarb ve Shanno'nun formülü
CE	Kompleks Eksponansiyel Yöntemi (Complex Exponential Method)
CPS	Çaprazgüç spektrumu (Crosspower spectrum)
EFDD	Geliştirilmiş Frekans Ortamlı Ayrıştırma Yöntemi (Enhanced Frequency Domain Decomposition Method)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FRF	Frekans davranış fonksiyonu (Frequency Response Function)
GBMS	Geliştirilmiş Bileşen Mod Sentezi
GUI	Grafik Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface)
GVT	Yerden Titreşim Deneyi (Ground Vibration Test)
Im	Kompleks bir sayının sanal kısmı
IRF	İmpuls davranış fonksiyonu (Impuls Response Function)
MAC	Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criteria)
MPC	Modal Faz Doğrudaşlığı (Modal Phase Collinearity)
NExT	Doğal Titreşim Tekniği (Natural Excitation Technique)
OV	İşletim Vektörleri Yöntemi (Operating Vectors Method)
PSD	Güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density)
PTD	Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi (Polyreference Time Domain Method)
QP	Kuadratik programlama (Quadratic Programming)
Re	Kompleks bir sayının gerçek kısmı
SHM	Tahribatsız yapı sağlık taraması (Structural Health Monitoring)
SQP	Ardışık kuadratik programlama (Sequential Quadratic Programming)
SSI	Stokastik Altalan Tanımlama Yöntemi (Stochastic Subspace Identification Method)
STFT	Kısa süreli Fourier dönüşümü (Short Term Fourier Transform)
SVD	Tekil Değer Ayrıştırma Yöntemi (Singular Value Decomposition)

$A(f)$	$a(t)$ zaman sinyalinin Fourier dönüşümü
$\{A\}$	Kalıntı vektörü
$[A]$	Kalıntı matrisi
a_d	Orantılılık sabiti
$a(t)$	Bir zaman sinyali
$B(f)$	$b(t)$ sinyalinin Fourier dönüşümü
β	Özdeğer
$[D]$	Katsayı matrisi
d_k	Arama yönü
$[E]$	Katsayı matrisi
f_s	Örnekleme frekansı
$f(x)$	Minimize edilecek olan hedef fonksiyonu
$f_{r_{aj}}$	j. modun analitik frekansı
$f_{r_{dj}}$	j. modun deneysel frekansı
f_{\max}	Bir taban bant sinyalindeki analiz edilecek olan en yüksek frekans
f_{r_j}	j. moda karşılık gelen frekans değeri
$F(f)$	Etki sinyali $f(t)$ 'nin frekans spektrumu
Δf	Frekans aralığı veya frekans çözünürlüğü
$g(x)$	Eşitlik veya eşitsizlik sınırlamalarının değerlerini üreten vektör fonksiyonu
$[G]$	Altalanın $2N$ vektörleri
$G(f)$	İleri Fourier dönüşümü
$G(k\Delta f)$	$g(t)$ fonksiyonunun spektrumu
$G_{AA}(f)$	$a(t)$ zaman sinyalinin otogüç spektrumu
$G_{AB}(f)$	$a(t)$ ve $b(t)$ zaman sinyalleri arasındaki çaprazgüç spektrumu
$g(t)$	Ters Fourier dönüşümü
$g_i(x)$	Sınırlandırma vektörü

H_k	Yaklaşık Hessian matrisi
$h(t)$	İmpuls davranış fonksiyonu
$H(f)$	Frekans davranış fonksiyonu
$[H(j\omega)]$	Frekans davranış fonksiyonu matrisi
$[\hat{H}]$	FRF'nin maksimum değeri
$[I]$	Özdeşlik matrisi
j	Kompleks değer
k	Frekans adımlarını sayan tam sayı
$[K]$	Sistem rijitlik matrisi
L_{iqr}	Modal katılım faktörü
$[L]$	Modal katılım matrisi
$\langle L \rangle_r$	r. mod için modal katılım faktör vektörü
$\{\lambda\}$	Sistem kutup vektörü
λ_{aj}	Analitik özdeğerler
λ_{ej}	Deneysel özdeğerler
λ_r	r. mod için sistem kutupları
$[M]$	Kütle matrisi
m_f	İyileştirme işleminde kullanılan belirlenmiş frekansların sayısı
N	Örnek Sayısı
n_f	Ölçülen frekansların sayısı
n	Matris polinomunun derecesi, zaman örneklerini sayan tamsayı
N_s	Zaman örneklerinin sayısı veya frekans çizgilerinin toplam sayısı
N	İlgili frekans bant genişliğindeki modların sayısı
$2N$	Serbestlik derecesi sayısı
N_a	Ortalamaların sayısı
N_i	Referans sayısı
N_0	Tepki noktalarının sayısı

$\bar{P}_{[\omega_1, \omega_2]}$	Frekans bandı üzerinde bir sinyalin ortalama gücü
$P_{xx}(\omega)$	Güç spektral yoğunluğu
$P_{\text{tektarafli}}(\omega)$	Tek taraflı güç spektral yoğunluğu
p	Tepki noktası
q	Etki noktası veya referans noktası
Q_r	r. mod için modal ölçek faktörü
[Q]	N_i vektörlerinin transpozu
$R_{ab}(\tau)$	a(t) ve b(t) 'nin çaprazkorelasyon fonksiyonu
$R_{aa}(\tau)$	a(t) zaman sinyalinin otokorelasyon fonksiyonu
r	Mod numarası
τ	Dikdörtgen sinyalin genişliği
t	Zaman
T	Zaman penceresi, zaman periyodu, sonlu gözlem süresi
Δt	Zaman örnekleme aralığı
ω_r	r modu için sönümlü doğal frekans
ω_a, ω_b	Yarım-güç noktaları
$\Delta\omega$	Frekans bant genişliği
ω_r	Modun doğal frekansı, rezonans frekansı
X	Gelişigüzel bir büyük sayı
\bar{x}	Üst parametre sınırı
\underline{x}	Alt parametre sınırı
{X}	Özvektör
x	Tasarım parametreleri vektörü
X(f)	Tepki sinyali x(t) 'nin frekans spektrumu
[Z]	Köşegeni üzerinde kutuplara sahip bir diyagonal matris
Φ_{aj}	j. analitik modal vektör
γ^2	Bir tek etki/tek tepki durumu için koherans fonksiyonu
Φ_{dj}	j. deneysel modal vektör

σ_r	r modu için sistem sönümü
$\{0\}$	Sıfır vektörü
$\ \cdot\ $	I_2 normu
Υ_i	Lagrange çarpanlarının bir tahmini
$\{\psi\}$	Mod şekil vektörü
ψ_{pr}	r. mod için bir kompleks modal vektörün ölçekli p. tepkisi
ψ_{qr}	r. mod için bir kompleks modal vektörün ölçekli q. tepkisi
σ_r	Sönüm katsayısı, sönüm faktörü
*	Kompleks eşlenik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Deneysel modal analiz, bir sistemin dinamik karakteristiklerinin (frekanslar, sönüm oranları, mod şekilleri) deneysel bir yaklaşımla belirlenmesi işlemidir. Dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesi işlemi, sistemin belirli noktalarından ivmeölçerler ile sinyallerin toplanması ve bu sinyallerin analiz edilmesi ile yapılmaktadır. Deneysel modal analiz, bir sistemden sinyaller alınırken aynı zamanda sistemde titreşime sebep olan sinyal de kayıt altına alınır ise bu deneye zorlanmış titreşim deneyi, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi işlemine ise deneysel modal analiz ya da etki tepki modal analizi denir. Eğer deney yapılacak olan sistemden, çevresel etkiler altında sadece davranış sinyalleri kayıt altına alınır ise bu deneye çevresel titreşim deneyi, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi işlemine ise operasyonel modal analiz ya da sadece tepki modal analizi denir. Dinamik karakteristikler belirlendikten sonra, deneysel sonuçlar referans alınarak analitik modelde yapılan düzeltme işlemine ise model iyileştirme denilmektedir.

Deneysel modal analizin tarihsel süreci 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Bu yıllarda uçaklardaki titreşimin doğru olarak belirlenmesi amacıyla dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesine çalışılmıştır. O zamanlar, dinamik kuvvetleri ölçen dönüştürücüler basit seviyelerde olduğundan çoğunlukla pratik olmayan ve zaman alan analog yaklaşımlar kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda sayısal bilgisayarların ve Hızlı Fourier Dönüşümlerinin (Fast Fourier Transform - FFT) geliştirilmesi ile birlikte, deneysel modal analizin modern çağı başlamıştır (Allemang, 1999).

Deneysel modal analiz konusu, inşaat mühendisliğinden havacılık ve uzay sanayisine, otomotiv sektöründen silah sanayisine kadar pek çok alanda uygulanabilmektedir. Teorik olarak ise, elektronik mühendisliğinin, makine mühendisliğinin ve uygulamalı matematiğin bir arada olduğu çok disiplinli bir çalışma alanıdır (Bendat ve Piersol, 1971; Otnes ve Enochson, 1972; Lawson ve Hanson, 1974; Tse vd., 1978; Bendat ve Piersol, 1980; Craig, 1981; Dally vd., 1984; Jolliffe, 1986; Ljung, 1987; Strang, 1988; Allemang, 1994; Ewins, 1995; Allemang, 1999).

İnşaat mühendisliğinde yapıların projelendirilme aşamasında yapılan birtakım kabuller, üretim aşamasında projede belirlenen hedeflerin tam olarak sağlanamaması ya da yıllar içerisinde yapıda çeşitli sebeplerle meydana gelen bir takım farklılıklar, analitik modelin yapının o anda sahip olduğu dinamik davranışı tam olarak yansıtamamasına sebep olabilmektedir. Yapıların göstermiş olduğu dinamik davranışı deney yolu ile belirleyebilmenin en etkili yolu deneysel modal analiz yöntemlerinin kullanılmasıdır.

Deneysel modal analizin yapılabilmesi için donanım ve yazılım araçlarına gereksinim duyulmaktadır. Kullanılan donanımlar genellikle ivmeölçerler, veri toplama üniteleri ve kayıt bilgisayarlarıdır. Veriler toplandıktan sonra yapılan sayısal sinyal işleme, dinamik karakteristik belirleme ve sonlu eleman model iyileştirme işlemleri yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Deneysel modal analiz ve analitik model iyileştirmenin gerçekleştirilmesi için yapılması gereken aşamalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Etki tepki modal analizi

- ✓ Zorlanmış titreşim deneyi yapılır. Bunun için sistemden gelen tepki sinyalleri ile beraber sistemin titreşimine sebep olan kuvvetler de kayıt altına alınır. Tepki sinyalleri zaman ortamlı ivme, hız ya da yerdeğiştirme kayıtları, etki sinyalleri de zamana bağlı kuvvet kayıtlarıdır.
- ✓ Sayısal sinyal işleme ile etki kuvvetleri referans alınarak frekans ortamlı spektrumlar üretilir. Etki tepki modal analizinde bu spektrumlar frekans davranış fonksiyonlarıdır.
- ✓ Sinyallerin işlenmesi ile elde edilen frekans ortamlı spektrumlar analiz edilerek, sistemin dinamik karakteristikleri belirlenir.

- Sadece tepki modal analizi

- ✓ Çevresel titreşim deneyi yapılır. Bu deneyde, sistemin belirli bir süre boyunca çevresel etkiler altındaki titreşimi kayıt altına alınır. Bu yöntem doğal titreşim tekniği (Natural Excitation Technique - NExT) olarak adlandırılmaktadır. Kayıt altına alınan sinyaller, kayıt süresinin sonuna kadar seriler halinde her bir kanalın içerisinde kümelenirler. Sistemin titreşimine sebep olan etki sinyalleri kaydedilmezler. Tepki sinyalleri zaman ortamlı ivme, hız ya da yerdeğiştirme kayıtlarıdır.
- ✓ Sayısal sinyal işlemede, tepki sinyal serilerinin birbirleri ile korelasyon ilişkisi göz önüne alınarak frekans ortamlı spektrum serileri üretilir. Sadece tepki modal analizinde bu spektrumlar çaprazgüç spektrumlarıdır. Üretilen

çaprazgüç spektrum serileri Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemi (Singular Value Decomposition – SVD) ile ya da ortalamalarının alınması ile kanalları temsil eden tekil spektrumlara indirgenirler.

- ✓ Sinyallerin işlenmesi ile elde edilen frekans ortamlı spektrumlar analiz edilerek, sistemin dinamik karakteristikleri belirlenir.
- Analitik model iyileştirme
 - ✓ Sistemin sonlu eleman modeli oluşturularak analiz edilir.
 - ✓ Sistemin etki tepki ya da sadece tepki modal analizi yapılarak dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenir.
 - ✓ Sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirilme yapılması düşünülen parametreler belirlenir. Bu parametreler çoğunlukla kesin olarak belirlenememiş olan malzeme özellikleri, değişikliğe uğramış olduğu düşünülen sınır koşulları vb. analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen sistem bilgileridir.
 - ✓ Deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler referans alınarak, sonlu eleman modelinde iyileştirmeye gidilir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

1.2.1. Zorlanmış Titreşim Deneyi Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Yapıların zorlanmış titreşim deneylerinde, erişim düzenekleri, titreştiriciler, kademe azaltıcılar ve çeşitli darbe yöntemleri kullanılmaktadır. Zorlanmış titreşim deneyinin önemli bir avantajı etki kuvvetinin genellikle diğer gürültü ve parazit dağılımını bastıracak yeterlilikte kuvvetli olmasıdır. Ayrıca, sistemin sadece lokal bir bölgesini titreştirmek için lokal tetikleme yapılabilir. Zorlanmış titreşim deneyi konusunda yapılmış olan çalışmalar bu bölümde sunulmaktadır.

Salawu ve Williams (1995), çok açıklıklı betonarme bir karayolu köprüsünde yapılan birtakım tamiratların öncesinde ve sonrasında zorlanmış titreşim deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, tamirat çalışmaları arasında ilişkileri ve köprünün dinamik karakteristiklerindeki değişiklikleri incelemek amacıyla yapılmıştır. Köprünün titreştirilmesinde hidrolik bir titreştirici kullanılmıştır. Köprüde yapılan tamirat çalışmalarının doğal frekanslarda az miktarda azalmaya sebep olduğu, bunun yanında

sönüm oranlarında önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür. Yazarlar, tamirattan önce ve sonraki mod şekillerinin karşılaştırılmasının tamirat yapılan bölgelerin yerlerini belirlemede bir işaret verdiği ifade etmişlerdir.

Rytter ve Kirkegaard (1997), tam ölçekli dört katlı betonarme bir binanın titreşim deneyini gerçekleştirmişlerdir. Bu bina dinamik yapay bir deprem etkisine maruz bırakılmıştır. Deneysel veriler, çok katmanlı sinir ağı ve radyal tabanlı fonksiyon ağına dayalı titreşim kontrol tekniklerinin geçerliliğini denetlemek için kullanılmışlardır. Modal parametrelerdeki rölatif değişiklikler, çıkış tabakasındaki eğilme rijitliği değişimini ortaya çıkarmak için ağ girdisi olarak kullanılmışlardır.

Skjaerbaek vd. (1997) bir titreştirici masası kullanarak altı katlı iki açıklıklı betonarme deney çerçevelerinin zorlanmış titreşim deneyi ve etki tepki modal analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılar yapay olarak üretilen üç deprem grubuna maruz bırakılmışlardır. Yazarlar son kattan alınan ivme kayıtlarını takip etmişlerdir ve yapıların zamana bağlı değişen en düşük iki frekansını elde etmişlerdir.

Wilcox vd. (1999), kalın plakların dağıtım, azaltma, duyarlılık ve titreşme karakteristiklerinin dalga modu ve frekansının uygun olarak seçilmesine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Zak vd. (1999), tabakalı bir kompozit plağın titreşimini çalışmışlardır. Tabakalara ayrılmış katmanlar arasında bir temas kuvveti göz önüne alınarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sayısal simülasyonların sonuçları, tabakalı kompozit plaklardan elde edilen deneysel veriler kullanılarak kontrol edilmiştir. Deneyde titreştirme etkisi olarak harmonik bir titreşim ile darbe etkisi kullanılmıştır.

Zimmerman (1999), bir uzay mekiğinin yörünge izleyicisinin düşey stabilizatör çeviricisi üzerindeki hasarları belirlemek için toplam 55 adet zorlanmış titreşim deneyi gerçekleştirmiştir.

Christensen vd. (2001), köprülerin yapısal davranışlarının değerlendirilmesi amacıyla zorlanmış titreşim deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Üç açıklıklı bir köprü üzerinde 9 adet zorlanmış titreşim deneyi yapılmıştır. Köprünün davranışının belirlenmesinde hızölçerler kullanılmıştır. Deneylerin dördünde üç deney parametresi değiştirilmiştir. Bu parametreler, sıcaklık, tetikleme kuvvetinin değeri ve doğrultusudur. Hem deney hem de analizlerde değişkenliği saptayabilmek için zorlanmış titreşim deneyleri tekrarlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönümleri içeren dinamik karakteristikler belirlenmiştir.

Gottipati (2002), Utah State Üniversitesi Ulaşım Bölümü tarafından tekrar yapılandırılan I-15 karayolu köprüsünün deneysel modal analizi ve sonlu eleman modellenmesi üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında I-15 karayolunun 6 açıklıklı köprü kısmı dikkate alınmıştır. Eksantrik kütle titreştiricileri ve darbe çekiçleri gibi kuvvet uyarıcıları kullanılarak köprü yatay doğrultuda farklı frekanslarda titreştirilmiş ve zorlanmış titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler sonucunda frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

Jun vd. (2002), yarı aktif sönüm sistemine sahip 11 katlı çelik çerçeveli bir binanın zorlanmış titreşim deneyini gerçekleştirmişlerdir. Sönüm sisteminin etkinliğini değerlendirmek için, sabit bir titreşim uygulanmıştır ve iki farklı durum için serbest titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Birinci deneyde, yarı-aktif söndürücüler binaya yerleştirilmemiştir. Daha sonra, yarı-aktif söndürücüler binaya kısmen yerleştirilmiştir ve birinci deneydeki ile aynı titreşim binaya uygulanmıştır.

Türker (2005), konsol kiriş, düzlem çerçeve ve üç boyutlu çerçeve modellerinin zorlanmış titreşim deneylerini ve analitik modal analizlerini gerçekleştirmiştir. Deneysel modal analiz sonucunda belirlenen dinamik karakteristikler ile analitik modelin dinamik karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

Yu vd. (2006), 1994 Northridge depreminde hasar gören 4 katlı betonarme bir binanın zorlanmış ve çevresel titreşim deneyini gerçekleştirmişlerdir. Lineer bir titreştirici ile iki eksantrik kütleli titreştiriciler kullanılarak sırasıyla hem düşük genlikli geniş bantlı hem de orta seviyede harmonik tetikleme uygulanmıştır ve her bir zorlanmış titreşim deneyinden önce ve sonra çevresel titreşimler ölçülmüştür. İlk 7 mod için doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Eksantrik kütleli titreştirici ile yapılan deneyden elde edilen doğal frekanslar, çevresel titreşim deneyinden elde edilenlerin %70 ila %75'i, lineer titreştirici ile yapılan deneyden elde edilenlerin de %92 ile %93'ü arasında değer almıştır.

1.2.2. Çevresel Titreşim Deneyi Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Çevresel titreşim, normal işletim koşulları altında bir yapının titreşim deneyi olarak tanımlanır. Bütün yapılar, devamlı olarak çeşitli kaynaklardan gelen çevresel titreşimlerin etkisi altındadırlar. Etki kuvvetleri genellikle kaydedilmezler veya çevresel titreşimi kullanan dinamik ölçüm süresince ölçülemezler. Çünkü bu titreşim kaynaklarının ilgili frekanslarda bir etki verip vermediği, değişmeyen etkinin nasıl olduğu veya belirli bir

frekans alanı üzerinde etkinin ne kadar üniform olduğu bilinemez. Ölçülen etki titreşimi (zorlanmış titreşim) kullanıldığında bile, arzu edilmeyen ve kaçınılmaz olarak yapıya dışarıdan gelen etkileri üreten çevresel titreşim kaynakları çoğunlukla mevcut olmaktadır. Bir yapının sağlık taraması için, çevresel titreşimlerin kullanımı yapıyı titreştirmede cazip bir araçtır. Bu tür titreşim deneyleri, zorlanmış titreşim deneyine karşı iyi bir alternatiftir. Çevresel titreşimin kullanıldığı dinamik deneyler sırasında sismik titreşimler haricindeki etki kuvvetleri genellikle kaydedilmez veya ölçülemezler. Çevresel titreşimin kullanımı çoğunlukla yapının gerçek çevresel titreşimlere karşı davranışının değerlendirilmesi için bir fırsat sunar.

Brownjohn (1997), titreşim kaynağı olarak köprü üzerinde yürüyen ve sıçrayan bir insan kullanarak Singapur'da bir üstgeçidin çevresel titreşim deneyini yapmıştır. Yaya etkilerine karşı köprünün modal davranışının, normal yaya adımının genel frekansı ile çakışan 2 Hz civarındaki iki moddan (simetrik ya da asimetrik düşey modlar) kaynaklandığı görülmüştür.

Büyük açıklıklı kirişlere uygulanan zorlanmış ve çevresel titreşim yöntemlerinin bazı detayları Felber (1997) tarafından sunulmuştur. Zorlanmış ve çevresel titreşim yöntemleri karşılaştırılmış, her iki yöntem ile elde edilen deney sonuçlarının sonlu eleman model iyileştirmesi için faydalı olduğu gösterilmiştir.

Peeters ve De Roeck (2000), kompleks mod gösterge fonksiyonu, etkili değişken yöntemi ve stokastik altalan tanımlama gibi modal parametre hesaplama tekniklerini kullanarak, Z24 köprüsünün çevresel titreşimler altındaki davranışını incelemiştir.

Farrar vd. (2000), Alamaso ve I-40 karayolu köprülerinin çevresel ve zorlanmış titreşim deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada köprülerin sonlu eleman modellerinin deneysel veriler referans alınarak iyileştirilmesi yapılmıştır.

Chang ve Chang (2001), Hong Kong'da bulunan uzun açıklıklı bir kablolu köprünün dinamik karakteristiklerini Sonlu Eleman Yöntemi ve çevresel titreşim ölçümlerini kullanarak detaylı olarak belirlemiştir.

Baptista vd. (2004), Portekiz'de sismik risk altında bulunan Algerva bölgesinde 16 yy.'da yapılmış ve 1755 yılındaki Lizbon depreminden hasar gören N. Sra do Carmo kilisesini incelemiştir. Dinamik karakteristikler hem yapının analitik modelinden hem de çevresel titreşim deneylerinden elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Ren vd. (2004a), çelik kirişli kemer köprülerin deneysel ve analitik modal analizlerinin gerçekleştirilmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, arazi deneyleri için trafik ve rüzgâr gibi çevresel uyarıcıları dikkate almışlardır.

Ren vd. (2004b), Ohio’da bulunan Roebling asma köprüsünün çevresel titreşim etkisi altındaki dinamik karakteristiklerini operasyonel modal analiz yöntemiyle elde etmişlerdir.

Ren vd. (2004c), köprülerin çevresel titreşim deneylerine dayalı sismik performans değerlendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada örnek olarak üç açıklıklı sürekli kirişli Cumberland köprüsünü dikkate almışlardır. Çalışma, çevresel titreşim deneylerinin yapılarak gerekli ölçümlerin alınması, sonlu eleman modelinin oluşturulması, deprem yer hareketinin seçilmesi ve zaman tanım alanında analizlerin gerçekleştirilerek sismik değerlendirilmenin yapılması kısımlarından oluşmaktadır.

Ren vd. (2005), uzun açıklıklı kablolu köprülerin deneysel ve analitik olarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine yapmış oldukları çalışma için, örnek olarak Çin’de bulunan 605m açıklığında Dünya’daki en uzun açıklıklı tamamen kompozit tabliyeli Qingzhou kablolu köprüsünü seçmişlerdir. Analitik olarak köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, modal analizler yapılarak frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Deneysel ölçümler için çevresel titreşimler uyarıcı olarak dikkate alınmış ve modal parametreler belirlenmiştir. Analitik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda, çevresel titreşim deneylerinin uzun açıklıklı kablolu köprülerde 1 Hz’in altındaki önemli mod şekillerinin belirlenmesinde yeterli olduğu vurgulanmıştır.

Macdonald ve Daniell (2005), kablolu köprülerin çevresel titreşim deneyleri ve sonlu eleman modelleri kullanılarak modal parametrelerindeki değişimleri incelemişlerdir. Uzun süreli dikkate alınan ölçüm kayıtları ile dinamik karakteristikler arasındaki değişiklikler belirlenmiştir. Rüzgâr hızı ve trafik yükü gibi etkiler altında doğal frekanslardaki değişimler incelenmiş, sıcaklığın doğal frekanslar üzerinde etkili olmadığı belirtilmiştir.

Lee ve Yun (2006), çevresel titreşim verilerini kullanarak çelik kirişli köprülerin hasar tespitlerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Modal parametreler frekans ortamında piklerin seçilmesi yöntemi kullanılarak çevresel titreşim verilerinden elde edilmiş ve bu parametreler hasar tespiti için kullanılmıştır.

Bayraktar vd. (2007a), elektrik iletim kablolarının, çelik direklerin dinamik karakteristiklerine etkisini çevresel titreşim deneyleri ile incelemişlerdir. Uygulama amacıyla, yaygın olarak kullanılan iki ayaklı çelik elektrik direkleri seçilmiştir.

Bayraktar vd. (2007b), düzlem kafes taşıyıcı sistemlerin dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim deneyi ile belirlemişlerdir. Uygulama amacıyla, Trabzon İli Akçaabat İlçesinde yapım aşamasında olan bir çatı sistemi seçilmiştir.

Bayraktar vd. (2007c), taş ocağı yakınlarında yer alan bir yığma binanın, taş ocağında yapılan patlatma etkisi altındaki dinamik davranışını çevresel titreşim deneyi ile değerlendirmişlerdir. Ölçümlerin sonunda bulunan maksimum partikül hızlarının uluslararası standartlara göre en yüksek sınırların altında olduğu görülmüş, patlatma etkisinin çevrede herhangi bir olumsuz etki yapmayacağı tespit edilmiştir.

Bayraktar vd. (2007d), karayolu köprülerinin deprem davranışlarının çevresel titreşim deneyleri ile belirlenmesi konusunda çalışma yapmışlardır. Uygulama amacıyla Trabzon ilinde bulunan ve ağır araç trafiğine maruz bir karayolu köprüsü seçilmiştir.

Bayraktar vd. (2008a), iki şerefeli betonarme bir minarenin çevresel titreşim deneyini gerçekleştirmişlerdir. Minarenin ANSYS programı ile üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Minarenin çevresel titreşim deneyi, rüzgar etkisi ve insan hareketleri gibi doğal etkiler altında gerçekleştirilmiştir.

Bayraktar vd. (2008b), patlatma etkisinden kaynaklanan yer hareketi etkisinin karayolu köprülerinin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini çevresel titreşim deneyi ile incelemişlerdir. Uygulama için taş ocağından yaklaşık 500 m uzaklıkta bulunan bir karayolu köprüsü seçilmiştir. Çevresel titreşim deneyinde, taş ocağından kaynaklanan patlatma etkilerinin yanında, trafik yükleri ve ağır taşıtların hareketi de dikkate alınmıştır.

Bayraktar vd. (2009a), Malatya-Elazığ karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlemişler ve elde edilen değerleri birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Köprü'nün sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak köprü'nün dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Deneysel ölçümler sırasında çevresel titreşim hareketi olarak taşıt yükünden yararlanılmıştır. Ölçüm verilerinin karşılaştırılabilmesi için hem kutu kesit içerisinden hem de tabliye üzerinden ölçümler alınmıştır.

Bayraktar vd. (2009b), tarihi Ayasofya müzesinin çan kulesinin dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim deneyi yaparak belirlemişlerdir. Belirlenen dinamik karakteristiklerin, ANSYS programı ile bulunan teorik dinamik karakteristikler ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

1.2.3. Analitik Modellerin İyileştirilmesi Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Chattopadhyay vd. (1997) sensor ve erişim düzenekleri ile donatılmış tabakalara ayrılmış kompozit kirişlerin dinamik davranışını modellemek için daha yüksek dereceli teoriye dayanan iyileştirilmiş bir sonlu eleman modeli sunmuşlardır. Yazarlar, modellerinin piezoelektrik erişim düzeneklerinden uygulamalı elektrik alanları tarafından indüklenen nonlinear zorlamaların yanı sıra kalınlık çapraz kayma deformasyonlarını kesin olarak açıkladığını ifade ederler.

Beardsley vd. (1999) deneylerden elde edilen verilerle nonlinear sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi için iki yöntemi karşılaştırmışlardır. Birinci yöntem, basit olarak kalıntıyı veya ölçülen zaman verisi ile sonlu eleman modelinden elde edilen zaman verisi arasındaki farkı tanımlar. İkinci yöntem'de aynı zaman verisini kullanır. Fakat farklı bir hedef fonksiyonu minimize edilir.

Ruotolo vd. (2000) üç boyutlu kafes sistemlerin sonlu eleman modellerini iyileştirmek için deneysel verilerden yararlanmışlardır.

Lopez-Diez vd. (2000) model iyileştirme için Geliştirilmiş Bileşen Mod Sentezi (GBMS) Yöntemini sunmuşlardır. GBMS yönteminin Bileşen Mod Sentezine (BMS) göre bir avantajı, GBMS'nin ana serbestlik derecelerinin birim yerdeğiştirmelerine karşılık gelen bazı dinamik deformasyonları içermesidir. Yapılan çalışmada kompozit bir plak üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Chen ve Ewins (2000) sonlu eleman model iyileştirilmesine başlanmadan önce, başlangıç sonlu eleman modelinin iyileştirilebilip iyileştirilemeyeceğini belirleyen bir yöntem geliştirmişlerdir.

Brownjohn ve Xia (2000), köprüleri toplumun altyapı sisteminin vazgeçilmez bir parçası olarak nitelendirmişler ve bu yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinin büyük önem taşıdığını vurgulamışlardır. Bu çalışma kapsamında, Singapur'da bulunan Safti Link eğik kablolu köprüsünün model iyileştirme yöntemi kullanılarak dinamik davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, ilk ölçüm deneylerinden elde edilen modal verilere dayalı olarak yapısal geometri ve betonun elastisite modülü gibi belirli olmayan yapısal parametrelerin düzeltilmesiyle sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir.

Zhang vd. (2001), Hong Kong'da bulunan Kap Shui Mun kablolu köprüsünün sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Köprü 430m açıklığında olup, çift tabliyeli kablolu bir köprüdür. Çalışma kapsamında, köprünün üç boyutlu sonlu eleman

modeli oluşturulmuş ve köprüye ait saha deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle elde edilen analitik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış, deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Çalışmada, sınır şartları ve malzeme özellikleri gibi yapısal parametrelerin modlara etkisi de gösterilmiştir.

İki katlı çelik çerçeve bir sistemde hasarın yerini ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla Görl ve Link (2001) tarafından yapılan çalışmada, öncelikle hasarsız yapı üzerinde titreşim deneyleri yapılarak analitik modelde iyileştirme yapılmış ve referans model olarak dikkate alınmıştır. Hasarlı yapı üzerinde ölçümler yapılarak hasarın yeri ve boyutu belirlenmiştir. Hasarlı yapı, referans yapının rijitlik parametrelerinde değişiklik yapılarak modellenmiştir. Rijitlik parametreleri, deneysel ile analitik sonuçlar arasında doğal frekanslar ve mod şekilleri bakımından en iyi uyum elde edilecek şekilde değiştirilmiştir.

Ren vd. (2001), 19.yy da yapılan asma köprülerin çoğunun günümüze kadar geldiğini ve bu köprülerin şu an taşıdıkları otomobil trafiğinden çok farklı hareketli yüklere göre tasarlandıklarından günümüz standartlarına göre güvenilirliklerinin belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bunun yapılabilmesi için köprünün analitik çözümlemesi ve saha ölçüm testlerinin birlikte yapılıp karşılaştırılması gerektiği açıklanmış, örnek olarak 1867 yılında Ohio'da tamamlanan Roebling asma köprüsü seçilerek köprünün yapısal durumunun belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS'de oluşturulmuş ve mod şekilleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilerek köprünün yapısal değerlendirilmesinde esas alınmıştır.

Teughels ve De Roeck (2003), Z24 köprüsünün sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi kullanılarak hasar durumunun belirlenmesi üzerine alternatif bir çalışma yapmışlardır. İnşaat mühendisliği yapılarında oluşan hasarların sonlu eleman modelinin deneysel modal analiz verileri kullanılarak iyileştirmesiyle belirlenebileceği, bu gibi durumlarda sonlu eleman modeli içerisindeki malzeme ve rijitlik gibi belirsiz parametrelerin seçilmesi ile deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki farklılıkların minimize edilebileceği belirtilmiştir.

El-Borgi vd. (2004), betonarme köprülerin sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi ve modal özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada Tunus'taki eski betonarme köprülerin mevcut durumlarının belirlenmesini amaçlamışlardır.

Jaishi ve Ren (2005), çevresel titreşim deney sonuçlarını kullanarak yapılar için pratik bir sonlu eleman iyileştirme tekniği geliştirmiştir. Bu amaçla, seçilen bir basit kirişin

frekans değişimleri ve mod şekilleri göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmış ve kirişin sonlu eleman iyileştirmesi için bir hedef fonksiyonu geliştirmişlerdir. Bu hedef fonksiyonu kullanılarak kompozit bir köprünün çevresel titreşim deneylerinden elde edilen sonuçlara göre analitik modelde iyileştirme yapılmıştır.

Jaishi (2005), çalışma koşulları altında inşaat mühendisliği yapılarının bilgisayarlı sonlu eleman model iyileştirmesi konusunda çalışmalar yapmıştır. MATLAB kullanılarak bir optimizasyon algoritması hazırlanmış ve Beichun köprüsünün optimum sonlu eleman model iyileştirmesi gerçekleştirilmiştir.

Zivanovic vd. (2006), yaya üstgeçitlerinin çevresel titreşim deneyi ve sonlu eleman model iyileştirilmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, Podgorica yaya üstgeçidinin tam ölçekli modelini kullanmışlardır. Çalışma sonunda elde edilen analitik ve deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Jaishi ve Ren (2006) tarafından Modal Esneklik Kalıntısı (Modal Flexibility Residual) Yöntemi kullanılarak analitik modelin iyileştirilmesi ve hasar tespitine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Çalışma, ilk önce basit mesnetli bir kirişe uygulanmış ve gürültünün iyileştirme algoritmaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı metot labratuvar ortamında hasar görmüş betonarme kirişe de uygulanmıştır.

Jaishi ve Ren (2007), Çok Amaçlı Optimizasyon Tekniğini kullanarak özdeğerlere dayalı sonlu eleman iyileştirilmesi üzerine alternatif bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada, sonlu eleman analizinden elde edilen dinamik karakteristiklerin genellikle deneysel sonuçlardan elde edilen karakteristiklerden farklı olduğu, oluşan farklılıkların giderilmesi için yapılan sonlu eleman iyileştirilmesinde belirsiz parametrelerin seçilmesi gerektiği ve bunun da beraberinde optimizasyon problemlerini ortaya çıkardığı vurgulanmıştır.

Gentile ve Saisi (2007), çevresel titreşim deneyleri ile geçmişi 17. yüzyıla dayanan 74m yüksekliğindeki çan kulesinin yapısal özelliklerini ve hasar seviyelerini belirlemişlerdir. Yapılan çalışma, çevresel titreşim deneyi, modal parametrelerin elde edilmesi, sonlu eleman ağının modellenmesi ve sonlu eleman model iyileştirmesi için modele ait belirli olmayan yapısal parametrelerin dinamik davranışa dayalı belirlenmesi aşamalarından oluşmaktadır.

Bayraktar vd. (2007e), model iyileştiriminin yığma binaların deprem davranışları üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, yarım bodrum, zemin ve çatı katından oluşan yığma bir bina üzerinde incelemeler yapılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki

farklılıkları en aza indirecek şekilde analitik model üzerinde malzeme özelliklerine göre iyileştirmeler yapılmıştır. Son olarak, iyileştirme yapılmış ve yapılmamış analitik modellerin 1992 Erzincan deprem ivme kaydı kullanılarak dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bayraktar vd. (2007f), Karadeniz sahil yolunda yer alan kemer türü çelik yaya köprüsünün çevresel titreşim deneyi ve sonlu eleman model iyileştirmesini gerçekleştirmişlerdir. Çevresel titreşim deneyi, yaya etkileri ile trafik akışı altında, köprünün tabliyesi üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerle kayıt alınarak yapılmıştır.

Bayraktar vd. (2007g), tarihi bir yığma köprüünün Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini belirlemişler ve deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modelini iyileştirmişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, köprüünün analitik modeli oluşturulmuş ve modal analizi yapılarak doğal frekansları ve mod şekilleri Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İkinci aşamada, titreşim deneyleri yapılarak köprüünün dinamik karakteristikleri deneysel ölçümlerden elde edilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkları en aza indirecek şekilde köprüünün sonlu eleman modeli sınır şartlarındaki değişim göz önüne alınarak iyileştirilmiştir.

Bayraktar vd. (2007h), karayolu köprülerinin sonlu eleman modellerinin Operasyonel Modal Analiz sonuçları kullanılarak iyileştirilmesi konusunda çalışma yapmışlardır. Bu amaçla, Trabzon'un Of ilçesinde bulunan bir karayolu köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Çalışmanın teorik kısmında SAP2000 programı kullanılarak köprüünün üç boyutlu sonlu eleman modeli proje verileri üzerinden oluşturulmuş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Titreşim deneyinde 17 kanallı veri toplama ünitesi ve üç eksenli ivmeölçerlere sahip ölçüm sistemi kullanılmıştır. Deneysel ve teorik analizlerden elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkları minimize edebilmek için, malzeme özelliklerindeki değişimler kullanılarak köprüünün sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir.

Bayraktar vd. (2008c), Trabzon şehir merkezinde yer alan tek şerefeli tarihi yığma bir minarenin sonlu eleman analizini, modal deneyini ve sonlu eleman model iyileştirmesini gerçekleştirmişlerdir. Minarenin ANSYS programı ile üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve teorik frekans ve mod şekilleri modal analiz yapılarak elde edilmiştir. Minarenin çevresel titreşim deneyi, rüzgar etkisi, trafik etkisi ve insan hareketleri gibi doğal etkiler altında gerçekleştirilmiştir.

Bayraktar vd. (2008d), sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin, Operasyonel Modal Analiz sonuçları kullanılarak sonlu eleman model iyileştirmesini gerçekleştirmişlerdir. Örnek uygulama olarak, akaryakıt depolamada kullanılan çelik silindirik bir tank seçilmiştir. Yapının sonlu eleman modeli ANSYS programı ile oluşturulmuş ve teorik dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tank içerisindeki akaryakıtın davranışı, Lagrangian yaklaşımı kullanılarak hesaba katılmıştır. Depolama tankına çevresel titreşim deneyi uygulanmış ve deneysel dinamik karakteristikler sadece tepki modal analizi ile belirlenmiştir. Analitik ve deneysel frekanslar arasındaki farklılıkları minimize etmek amacıyla, sistemin sonlu eleman modeli malzeme özelliklerindeki belirsizlikler göz önüne alınarak iyileştirilmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Deneysel ve operasyonel modal analizin yapı sistemlerinde uygulanabilmesi için öncelikle donanımsal altyapının tesis edilmesi gerekmektedir. Bu donanımsal altyapı, en temel olarak, ivmeölçerler, veri toplama ünitesi ve kayıt bilgisayarından oluşmaktadır. Bu altyapı kurulduktan sonra herhangi bir yapı modeli üzerinde ölçüm sistemi kurularak, tespit edilen noktalardan, ölçüm kanalları vasıtası ile zamana bağlı davranış spektrumları kayıt altına alınır. Bu davranış spektrumları genellikle zamana bağlı ivme kayıtlarıdır. Eğer zorlanmış titreşim deneyi yapılırsa, sistemin titreştirilmesinde kullanılan kuvvet spektrumu da kayıt altına alınır. Veriler kayıt altına alındıktan sonra çeşitli sinyal işleme ve sistem tanımlama programları kullanılarak, deneysel ya da operasyonel modal analiz gerçekleştirilmiş olur.

Deneysel modal analiz sonuçlarının değerlendirilebilmesi için donanım altyapısı ile birlikte yazılımlar da gerekmektedir. Donanım sistemi ile işlenmemiş ham sinyaller bilgisayara aktarıldıktan sonra, geriye kalan bütün işlemler yazılım sistemleri vasıtası ile gerçekleştirilir. Bununla beraber, mevcut yazılımların algoritmalarının kapalı olması, sayısal çözüm yöntemlerinin oldukça kısıtlı bir miktarda kullanıcıya sunulması, zorlanmış titreşim ve çevresel titreşim deneyleri sonucunda gerçekleştirilen etki tepki ve sadece tepki modal analiz paketlerinin yine kullanıcılara farklı programlar halinde sunulması, ara işlemlerin kontrol edilememesi, geliştirilen yeni algoritmaların sisteme dahil edilememesi, sonuçların iç kontrolünün yapılamaması gibi pek çok sebep, araştırmacılar için deneysel ve operasyonel modal analiz ile optimum sonlu eleman model iyileştirmeleri konusunda açık

kodlu, fonksiyonel yapıda, grafik arayüzü güçlü, çok alternatifli ve kontrol mekanizmaları olan yazılımlar geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, sunulan tez çalışmasında modal analiz sonuçlarının değerlendirilebilmesi için temel yöntemleri içeren yazılımların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yazılımlar üç aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşamada, ölçüm sistemleri ile elde edilen işlenmemiş zamana bağlı ham sinyallerin analiz edilerek frekans ortamında davranış spektrumlarının elde edilebilmesi amacıyla MATLAB (2009a) platformunda bir sayısal sinyal işleme programı hazırlanmıştır. Hazırlanan programa SignalCAD adı verilmiştir. SignalCAD programı ile MATLAB Signal Processing Toolbox (2009b)'da yer alan genel filtreleme ve analiz fonksiyonlarının kullanılmasının yanında, deneysel ve operasyonel modal analiz için sinyal işlemeye yönelik olarak pek çok fonksiyon hazırlanmış ve paketlenmiştir. Literatürde yer alan spektral analiz ve filtreleme özelliklerinin tamamına yakını alternatifli ve grafiksel olarak bu programın kütüphanesine fonksiyonel yapıda dahil edilmiştir.

İkinci aşamada, SignalCAD programı ile üretilen spektral fonksiyonların analiz edilerek, sinyallerin alınmış olduğu yapı sisteminin modal parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, MATLAB (2009a) platformunda bir dinamik karakteristik belirleme programı hazırlanmıştır. Hazırlanan programa ModalCAD adı verilmiştir. ModalCAD programı ile MATLAB System Identification Toolbox (2009c)'da yer alan genel sistem tanımlama fonksiyonlarının kullanılmasının yanında, modal analize yönelik olarak pek çok fonksiyon hazırlanmış ve paketlenmiştir. ModalCAD programı ile ölçüm alınan yapı sisteminin geometrisinin oluşturulabileceği, üretilen spektral fonksiyonların analiz edilebileceği, İşletim Vektörleri Yöntemi, Kompleks Eksponansiyel Yöntemi ve Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi kullanılarak ölçüm alınan yapı sisteminin dinamik karakteristiklerin belirlenebileceği, Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criteria - MAC), Modal Faz Doğrudaşlığı (Modal Phase Collinearity - MPC) grafikleri, spektrumların sentezlenmesi ve stabilite diyagramları ile üretilen modal parametrelerin doğruluk ve tutarlılık kontrolünün yapılabileceği ve animasyon ekranı ile her türlü grafiksel animasyon ve film kaydının alınabileceği, fonksiyonel ve grafik tabanlı, interaktif ve karşılaştırmalı bir yazılım hazırlanmıştır.

Üçüncü aşamada, deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler referans alınarak, teorik sonlu eleman modelinin optimum iyileştirmesinin otomatik olarak yapılabilmesi amacıyla, yine MATLAB platformunda bir model iyileştirme programı

hazırlanmıştır. Hazırlanan programa FemUP adı verilmiştir. FemUP programı ile MATLAB Optimization Toolbox (2009d)'da yer alan optimizasyon fonksiyonları ile beraber sonlu eleman model iyileştirmeye yönelik olarak pek çok fonksiyon hazırlanmış ve paketlenmiştir. Optimizasyon algoritması olarak literatürde pek çok alanda yaygın ve başarılı bir şekilde kullanılan Ardışık Quadratik Programlama (Sequential Quadratic Programming – SQP) yöntemi seçilmiştir. FemUP programı, deneysel modeller için ModalCAD programı ile, teorik modeller için ise ANSYS (2007) programı ile uyumlu olarak hazırlanmıştır.

Yazılım geliştirme aşaması tamamlandıktan sonra, laboratuarda üretilmiş olan üç boyutlu çelik çerçeve modeli üzerinde zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri yapılmıştır. Modelden alınan işlenmemiş ham sinyaller, geliştirilmiş olan SignalCAD ve ModalCAD programları ile analiz edilmiş ve modelin deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Çerçeve modelinin ANSYS programında teorik modeli oluşturulmuştur. Teorik model, FemUP programı kullanılarak iyileştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda programların başarısı, hem bu alanda geliştirilmiş olan başka programlar ile yapılan karşılaştırmalar, hem kendi içinde yapılan kontrol mekanizmaları, hem de literatüre olan uygunluk yönünden kontrol edilmiş, programlar paketlenerek, bu alanda çalışma yapacak olan mühendisler ve araştırmacılar için uygun hale getirilmiştir.

1.4. Sayısal Sinyal İşleme

Sayısal sinyal işleme konusunda literatürde pek çok kaynak bulunmaktadır. Bu bölümde sunulan bilgiler Heylen vd. (2007) tarafından hazırlanan kaynakta ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Sistem tanımlamada kullanılabilen sinyaller Tablo 1.1'de görüldüğü gibi sınıflandırılabilirler. Sabit sinyaller, ortalama özellikleri zamanla birlikte değişiklik göstermeyen sinyallerdir. Deterministik veya rastgele olabilirler. Deterministik sabit sinyallerin en önemli grubu periyodik sinyaller grubudur. Sözd-rastgele sinyal periyodik olarak tekrarlanan bir rastgele sinyalden oluşmaktadır (Heylen vd., 2007).

Tablo 1.1. Sinyal türleri (Heylen vd., 2007)

Sinyaller			
Sabit		Sabit Değil	
Deterministik	Rastgele	Sürekli	Anlık
Periyodik			
Yarı Periyodik			
Sözde-rastgele			

Ölçülen sinyaller bilindiği üzere zaman ortamı fonksiyonudurlar. Frekans ortamında sinyallerin incelenmesi daha kolaydır. Her iki ortamda da araştırma yapmayı mümkün kılmak için, zamandan frekansa ve tersine bir dönüşüm yapılabilmelidir. Ters Fourier dönüşümü bu amaca yönelik bir vasıtaadır. Bundan dolayı, Fourier dönüşümü sinyal işlemedeki başlıca konulardan birisidir (Heylen vd., 2007).

1.4.1. Farklı Sinyal Türleri için Fourier Dönüşümü

1.4.1.1. Periyodik Sinyaller

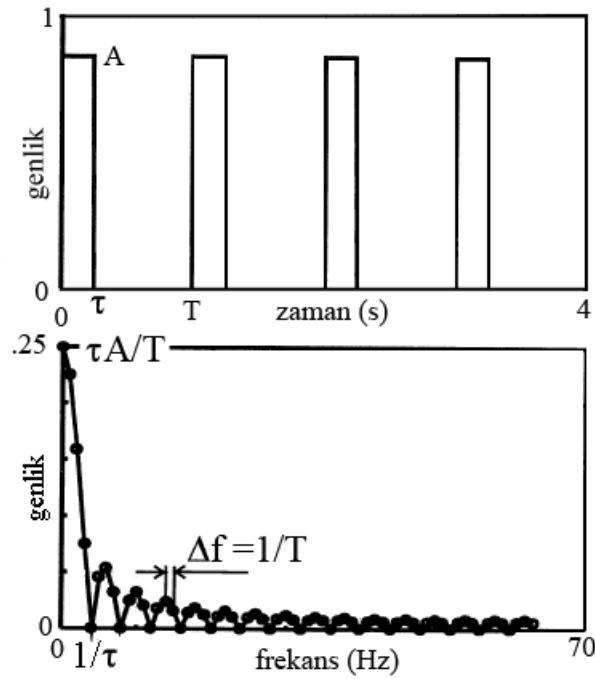
Onsekizinci yüzyılın sonlarında J.B. Fourier, zamana bağlı periyodik bir fonksiyonun eşit olarak ayrılmış frekanslardaki sinüsoidal bileşenlerin bir toplamı olarak gösterilebileceğini kanıtlamıştır (Heylen vd., 2007):

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} G(k\Delta f) \cdot e^{j2\pi k\Delta f t} \quad (1)$$

Buradaki Fourier katsayıları aşağıdaki gibidir (Heylen vd., 2007):

$$G(k\Delta f) = \left(\frac{1}{T}\right) \int_{-T/2}^{+T/2} g(t) \cdot e^{-j2\pi k\Delta f t} dt \quad (2)$$

(2) denkleminde t , zamanı; k , frekans adımlarını sayan tam sayı; Δf , frekans aralığı veya frekans çözünürlüğünü ($\Delta f = 1/T$); j , $\sqrt{-1}$ değerini, T zaman periyodunu ($T = 1/\Delta f$) göstermektedir. $G(k\Delta f)$ değerler kümesi, $g(t)$ fonksiyonunun spektrumudur. Genellikle spektrum kompleks değerlidir. Periyodik bir sinyal ayrık bir spektrum üretir. Periyodu T olan, blok genişliği τ olan ve genliği A olan periyodik bir dikdörtgen sinyal serisi göz önüne alındığında (Şekil 1.1), denklem (2), $G(k\Delta f) = \tau A \Delta f (\sin \pi k \tau \Delta f) / \pi k \tau \Delta f$ şeklinde olur. Şekil 1.1, bu spektrumun genliğini pozitif frekans ekseninde gösterir. Spektrumun negatif kısmı simetriktir (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.1. Dikdörtgen sinyal serisi ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

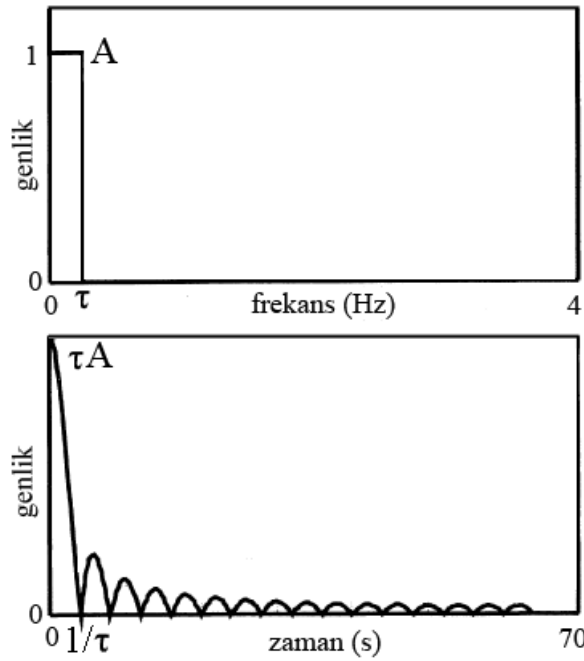
1.4.1.2. Periyodik Olmayan Sinyaller

Anlık veya rastgele sinyaller gibi, periyodik olmayan sinyaller, sonsuz bir periyoda, T , sahip periyodik fonksiyonlar olarak göz önüne alınabilirler. Denklem (1) ve denklem (2)'de T , denklem (3)'te görüldüğü gibi sonsuza yaklaştırılırsa, Fourier dönüşümün ifadesi denklem (4)'te görüldüğü gibi olur (Heylen vd., 2007):

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (3)$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

$G(f)$ (ileri) Fourier dönüşümü, $g(t)$ ise ters Fourier dönüşümü olarak adlandırılır. Periyodik olmayan fonksiyonlar için spektrum süreklidir ve genellikle kompleks değerlidir. Şekil 1.2, bir dikdörtgen sinyalin zaman ve ona karşılık gelen frekans fonksiyonunu göstermektedir (Sadece pozitif frekanslar için) (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.2. Periyodik olmayan dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

τ genişlikli bir dikdörtgen sinyalin Fourier dönüşümü $G(f) = A\tau \sin(\pi\tau f)/\pi\tau f$ şeklindedir. Bu fonksiyon $n=0$ noktası haricindeki n/τ noktalarında sıfır değerini almaktadır (Heylen vd., 2007).

1.4.1.3. Örneklemeli Zaman Fonksiyonları

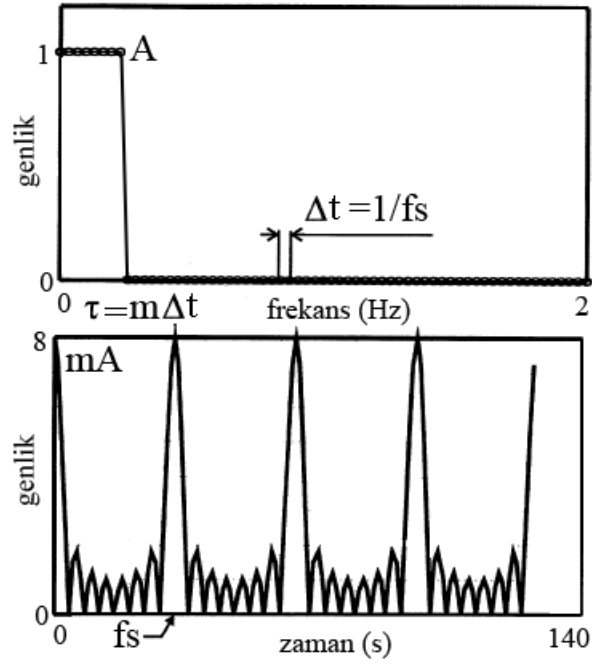
Sayısal bilgisayarlar kullanırken, sürekli zaman verisini örneklemek bir zorunluluktur. Bu, gerçek zaman verisinin, bir zaman serisi yani zamanda eşit uzaklıktaki ve ayrık noktadaki değerler serisi ile temsil edileceği anlamına gelmektedir. Bu düşünce, Fourier dönüşümü için denklem (5) ve (6)'yı vermektedir (Heylen vd., 2007):

$$g(n\Delta t) = \left(\frac{1}{f_s} \right) \int_{-f_s/2}^{+f_s/2} G(f) \cdot e^{j2\pi f n \Delta t} df \quad (5)$$

ve

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n\Delta t) \cdot e^{-j2\pi f n \Delta t} \quad (6)$$

Burada, n , zaman örneklerini sayan tamsayıyı; Δt , zaman örnekleme aralığını ($\Delta t = 1/f_s$); f_s , örnekleme frekansını ($f_s = 1/\Delta t$) göstermektedir. Denklem (6), örneklemeli (yani ayrık) bir zaman fonksiyonunun Fourier dönüşümünün frekans ortamında periyodik bir fonksiyon verdiğini göstermektedir. Bu periyodik zaman sinyallerindeki duruma benzer bir durumdur. Fakat zaman ve frekans ortamları yer değiştirilir. Şekil 1.3'te bu örnekleme dikdörtgen bir titreşime uygulanmasının sonucu gösterilmektedir (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.3. Örnelemeli dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

1.4.1.4. Örnelemeli Zaman ve Frekans Dönüşümü

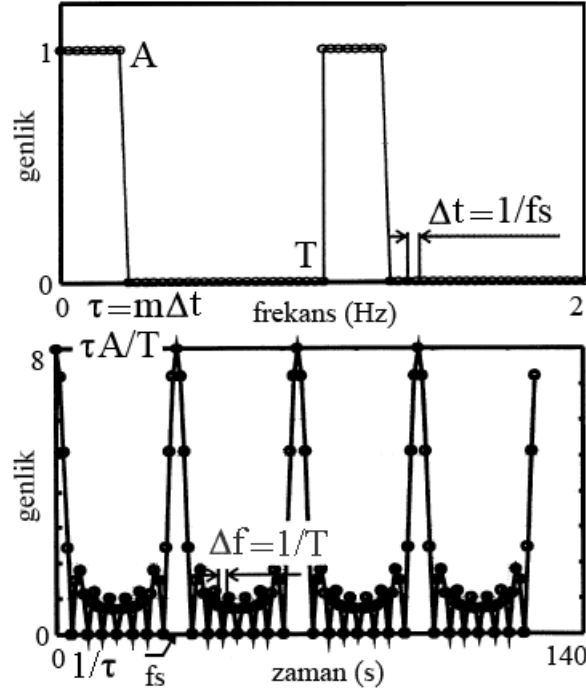
Gerçek ölçüm durumlarında, zaman sinyalini sonsuz bir süreye kadar ölçmek mümkün değildir. Sinyalin bir bölümünün seçilmesi gerekmektedir (zaman penceresi, zaman kaydı, T). Daha sonra, yakalanan sinyalin periyodik bir zaman fonksiyonu vererek T periyodu ile kendini tekrarladığı kabul edilir. Bu durumda spektrum daha öncede belirtildiği üzere ayrık olur. Sinyal örnelemeli periyodik tekrarlanma kabulünün kombinasyonu ayrık Fourier dönüşüm çiftinin tanımı ile sonuçlanır (Heylen vd., 2007):

$$g(n\Delta t) = \sum_{k=0}^{N_s-1} G(k\Delta f) \cdot e^{j2\pi nk/N_s} \quad (7)$$

ve

$$G(k\Delta f) = \left(\frac{1}{N_s} \right) \sum_{n=0}^{N_s-1} g(n\Delta t) \cdot e^{-j2\pi nk/N_s} \quad (8)$$

Burada N , Örnek Sayısını göstermektedir. Ayrıca $T = N_s \Delta t$ ve $f_s = N_s \Delta f$ şeklinde ifade edilir. Şekil 1.4 ayrık Fourier dönüşümünün dikdörtgen titreşim örneği üzerindeki uygulamasını göstermektedir (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.4. Örneklemeli periyodik dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

1.4.2. Sayısal Sinyal İşlemede Kullanılan Analiz Parametreleri

Sayısal sinyal işlemede kullanılan analiz parametrelerinin bazıları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Heylen vd., 2007):

- T - Zaman periyodu: Analiz edilecek sinyalin eşit olarak ardı ardına ayrılan N_s örneklerinin alındığı zaman periyodudur. N_s çoğu Fourier çözümleyicisinde 2'nin bir üssü ile sınırlandırılır (örneğin, 1024 ile). Zaman periyodu $T = N_s \Delta t = 1/\Delta f$ şeklinde hesaplanır.
- f_s - Örnekleme frekansı: Analog sinyalin sayısal sinyale dönüştürülmesinde kullanılan örnekleme ve sayısallaştırılma oranıdır. Örnekleme frekansı

$f_s = 1/\Delta t = N_s \Delta f$ şeklinde hesaplanır. Ayrıca, Shannon'un örnekleme teoremine göre $f_s \geq 2f_{\max}$ şeklinde ifade edilir.

- Δt - Örnekleme aralığı: Sinyalin örneklendiği zaman aralığıdır ve $\Delta t = T/N_s = 1/f_s$ şeklinde hesaplanır.
- Δf - Frekans aralığı, frekans adımı: Frekans sinyalindeki çizgi aralığı olup $\Delta f = 1/T = f_s/N_s$ ifadesi ile belirlenir. Sonuç olarak, küçük frekans aralığı olan (yani yüksek bir frekans çözünürlüğü olan) ölçümler, eğer ortalamaların sayısı değişmez ise uzun bir ölçüm süresinde sonuçlanacaklardır.
- f_{\max} - Maksimum frekans: Zaman sinyalinde bulunan ya da izin verilen en yüksek frekans olup, Shannon'un teoremine göre $f_{\max} \leq f_s/2$ şeklinde ifade edilir.
- N_s - Zaman örneklerinin sayısı veya frekans çizgilerinin toplam sayısı olup $N_s = T/\Delta t = f_s/\Delta f$ ifadesi ile hesaplanır.

1.4.3. Sayısal Sinyal İşlemede Karşılaşılan Hatalar ve Çözüm için Uygulanan Pencereleler

Sayısal sinyal analiz işlemleri sırasında, çeşitli türde hatalar meydana gelebilir. Tipik hatalar, aşırı yükleme, sayısallaştırıcı gürültüsü, niceleme hatası, dinamik alan kısıtlamalarıdır. Ancak, en önemli iki hata türü örtüşme ve sızıntı hatalarıdır (Heylen vd., 2007).

1.4.3.1. Örtüşme Hatası

Örtüşme, zaman sinyallerinin örneklenmesi zorunluluğundan kaynaklanmaktadır. Sinyal içerisindeki yüksek frekans bileşenleri spektrum içerisinde genlik ve frekans hatalarına sebep olabilirler. Eğer bir taban bant sinyalindeki analiz edilecek olan en yüksek frekans, f_{\max} , Shannon'un denklem (9)'da ifade edilen teoremini karşılamaz ise $f_s/2$ nin üzerindeki frekanslar, $f_s/2$ nin altında görüneceklerdir (Heylen vd., 2007).

$$f_{\max} \leq f_s/2 \quad (9)$$

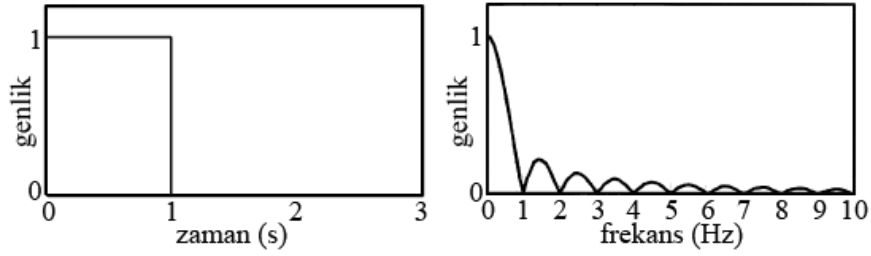
Burada f_s örnekleme frekansdır. Örtüşme, $f_s/2$ den büyük olan frekanslardaki bütün bileşenlerin ortadan kaldırılması ile engellenebilir. Bu işlem sistemin kusursuz bir şekilde lineer olması kabulüne göre uygun bir tetikleme sinyali ile başarılabilir (Heylen vd., 2007).

1.4.3.2. Sızıntı Hatası

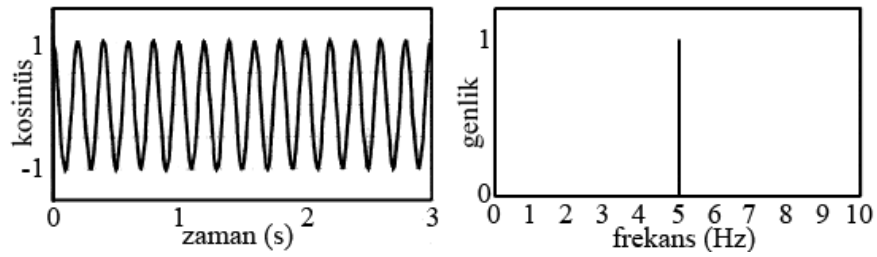
Sızıntı hataları, ölçümlerin sonlu bir gözlem süresi (T) içerisinde yapılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrık Fourier dönüşümünde, göz önüne alınan sinyalin T periyotlu bir periyodik sinyal olduğu kabul edilir. Eğer bu koşul karşılanmaz ise, bir sızma hatası meydana gelir. Şekil 1.5 - Şekil 1.12'de gözlem penceresi (T) içinde sırasıyla periyodik ($f_1 = n_1/T$) ve periyodik olmayan ($f_2 \neq n/T$) bir kosinüs dalgasının ölçüm süreci tasvir edilmektedir (Heylen vd., 2007).

Şekil 1.5 ve Şekil 1.9, aynı T uzunluklu gözlem penceresini ve onun Fourier dönüşümünü göstermektedir. Bütün n/T frekanslarında frekans spektrumu sıfırdır. Şekil 1.6 ve 1.10 sürekli kosinüs dalgalarını ve onların spektrumlarını göstermektedir. Bu spektrumlar sırasıyla f_1 ve f_2 frekansında bir çizgidirler. Şekil 1.7, Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'nın zaman sinyallerinin çarpımının nasıl pencereli kosinüsü verdiğini göstermektedir. Frekans ortamında, bu, Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'daki frekans sinyallerinin konvolüsyonuna karşılık gelmektedir. Bu Şekil 1.7'de ayrıca gösterilmektedir. Görülebileceği üzere, kosinüs dalgası gözlem penceresi içerisinde periyodiktir. Zaman sinyalinin T periyodundaki periyodikliğinin kabulü (Şekil 1.8), n/T frekanslarında örnekleri olan, bir ayrık Fourier spektrum ile sonuçlanır. Şekil 1.7'de f_1 dışında bütün frekans çizgileri sürekli spektrumun sıfırları ile çakışır. Sonuç, doğru spektrumun Şekil 1.6'da özdeş bir yeniden üretimidir. Şekil 1.10'da, gözlem penceresi içerisinde kosinüs dalgası periyodik değildir. Sonuç olarak, Şekil 1.11'deki spektrumun merkezi lopu $1/T$ 'nin bir katsayısında yer almaz. Bundan dolayı, periyodik olarak tekrarlanma kabulünden meydana gelen frekans çizgileri, bu spektrumun sıfırları ile çakışmaz (Şekil 1.12). Sonuç olarak, ayrık spektrum özdeş spektrum ile çakışmaz (Şekil 1.10). f_2 frekansındaki gerçek enerji, önemli bir genlik hatasına sebep olarak yanındaki (periyodik) frekanslara genişler (sızar). Bu hata

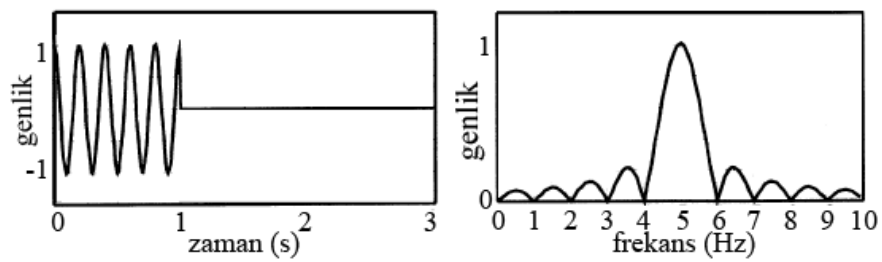
periyodik olmamanın derecesinin bir fonksiyonudur. Zaman ortamında gözlem penceresi içerisinde sinyalin periyodik olmaması T 'nin bütün katlarında süreksizliklere sebep olur: kabul edilen (periyodik) sinyal doğru sinyalden farklılık gösterir (Şekil 1.10). Bundan dolayı, hatalar beklenebilir (Heylen vd., 2007).



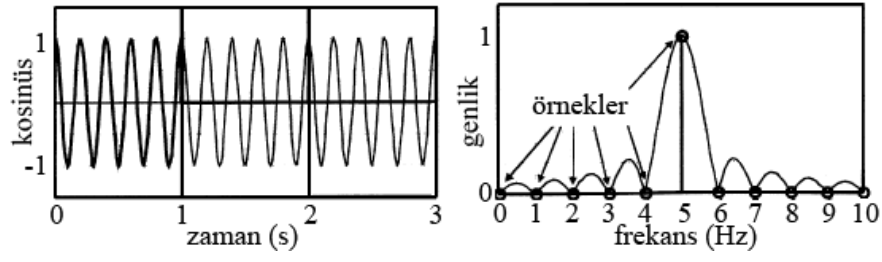
Şekil 1.5. Pencere: Gözlem zamanı T (Heylen vd., 2007)



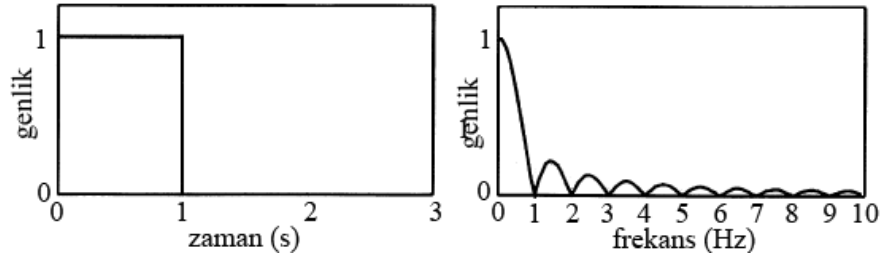
Şekil 1.6. Sürekli kosinüs dalgası ($f_1 = n_1/T$) (Heylen vd., 2007)



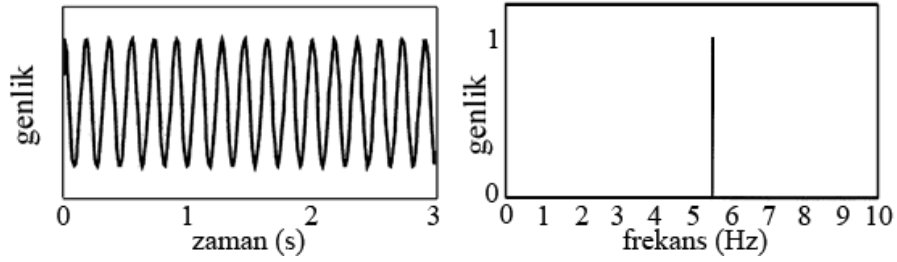
Şekil 1.7. Pencereleli kosinüs dalgası (Heylen vd., 2007)



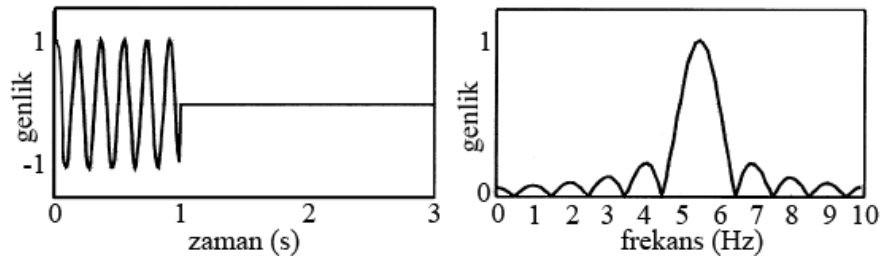
Şekil 1.8. Periyodiklik varsayımı (Heylen vd., 2007)



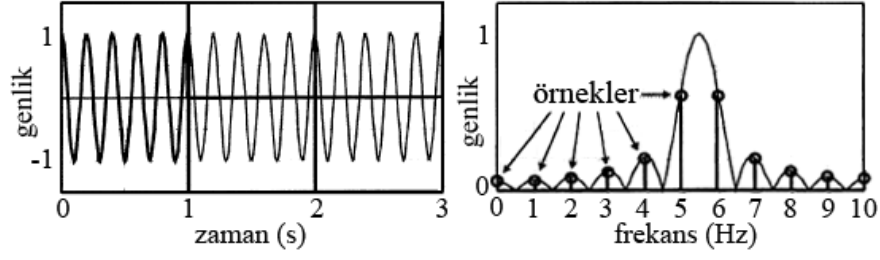
Şekil 1.9. Pencere: Gözlem zamanı T (Heylen vd., 2007)



Şekil 1.10. Sürekli kosinüs dalgası ($f_2 \neq n/T$) (Heylen vd., 2007)



Şekil 1.11. Pencereci kosinüs dalgası (Heylen vd., 2007)



Şekil 1.12. Periyodiklik varsayımı (Heylen vd., 2007)

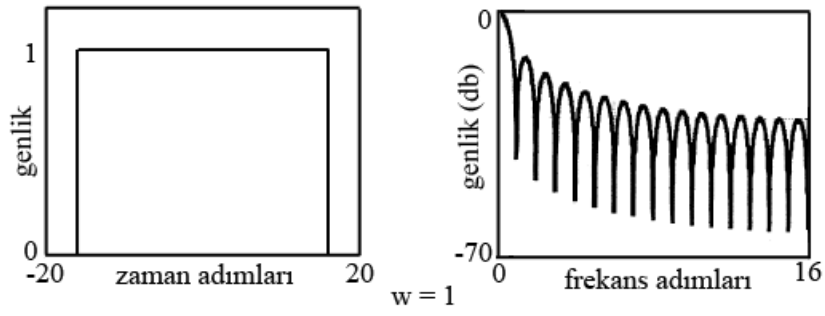
Bu basit kosinüs örneği sızıntı olgusunun tasvir eder. Herhangi bir sinyal sinüs ve kosinüslerin lineer bir kombinasyonu olarak ifade edilebileceğinden, bir sinyal ne zaman periyodik olmayan frekans bileşenleri içerse, sızıntı meydana gelir (Heylen vd., 2007).

Sızıntı problemine karşı tek çözüm yolu, sinyalin periyodik olmasını ya da tamamıyla gözlem penceresi içerisinde gözlemlenmesini temin etmektir. Genellikle bunu başarmak çok zordur. Kusursuz lineer davranışlı sistemler için, yapının periyodik bir sinyal ile titreştirilmesi ile bu başarılabilir. Frekans adımını (Δf) azaltmak, gözlem süresini (T) artırır ve bundan dolayı sinyalin periyodikliğini geliştirir. Yukarıda bahsedilen dikdörtgen şeklindeki pencereden başka, zaman pencerelerinin kullanımı sızıntı problemine yaklaşık bir çözüm getirir (Heylen vd., 2007).

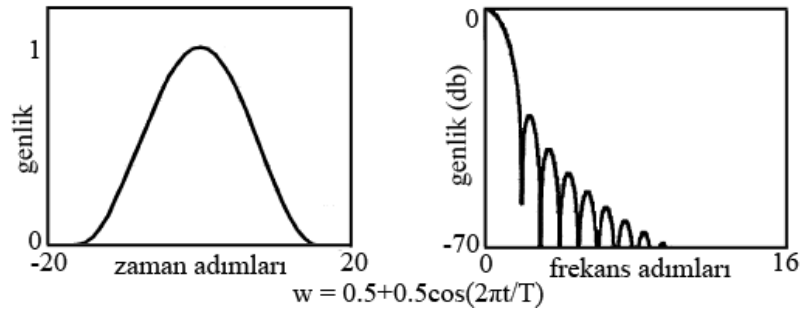
1.4.3.3. Pencereler ile Sızıntı Probleminin Çözümü

Sayısal sinyal işlemede zaman pencerelerinin uygulaması kaçınılmazdır. Zaman sinyalleri ölçülürken, toplam sinyalin (yani, T uzunluğundaki zaman kaydının) yalnızca bir kısmı göz önüne alınır. Bu işlem gerçek sinyalin dikdörtgen şeklinde bir zaman penceresi ile çarpımına eşittir (Şekil 1.7 ve Şekil 1.11). Ancak, zaman penceresinin daha uygun bir seçimi sızıntıyı kuvvetli bir şekilde azaltır. Örnek periyodun sınırlarındaki süreksizlikleri azaltan pencereler, sinyali periyodik olmaya zorlayarak sızma hatasını azaltırlar (Heylen vd., 2007).

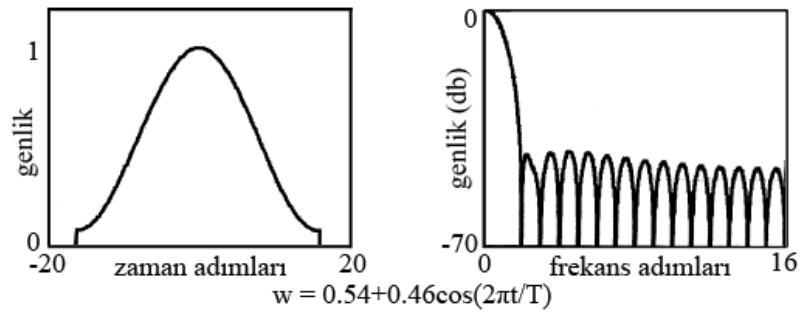
Şekil 1.13-Şekil 1.17'de bazı yaygın olarak kullanılan zaman pencerelerine, ilgili ifadeler ve Fourier dönüşümlerine (yalnızca pozitif frekanslar) genel bir bakış sunulmaktadır (Heylen vd., 2007).



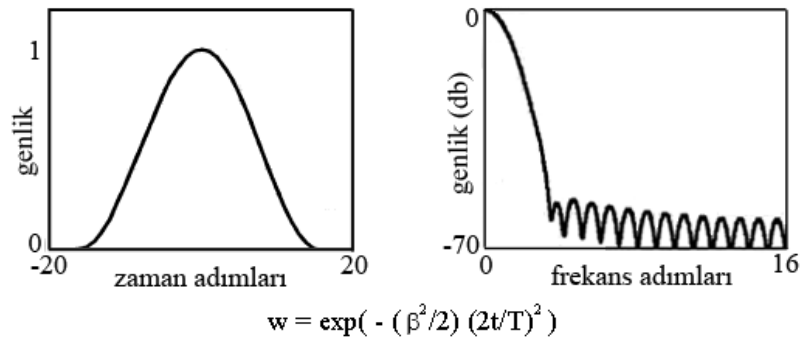
Şekil 1.13. Dikdörtgen pencere ve dönüşümü (Heylen vd., 2007)



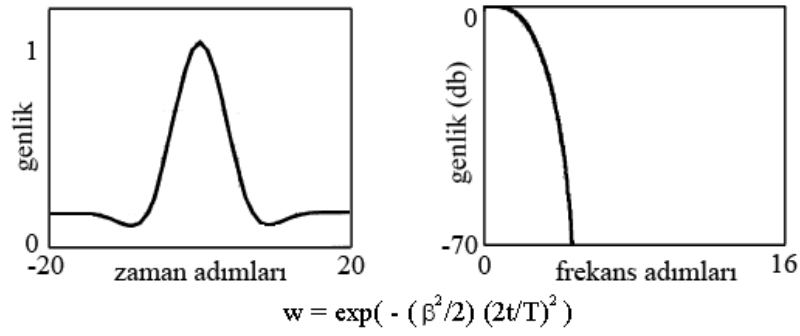
Şekil 1.14. Hanning penceresi ve dönüşümü (Heylen vd., 2007)



Şekil 1.15. Hamming penceresi ve dönüşümü (Heylen vd., 2007)



Şekil 1.16. Gaussian penceresi ($\beta = 3.0$) ve dönüşümü (Heylen vd., 2007)



Şekil 1.17. Düz tepe penceresi ve dönüşümü (Heylen vd., 2007)

1.4.4. Zaman ve Frekans Fonksiyonları ve Uygulamaları

Titreşim ve gürültü olaylarının analizi için çeşitli fonksiyon türleri çalışılabilir. Bu fonksiyonlar zaman ve frekans sinyalleri olabilirler. Çoğunlukla, fonksiyonların yalnızca bir kombinasyonu ses ve/veya titreşimin net bir değerlendirmesini verir. Burada tez çalışması sırasında geliştirilmiş olan yazılımlarda kullanılan fonksiyonlar tanıtılacaktır. Bunlardan en önemlileri frekans ortamında otogüç spektrumu, çaprazgüç spektrumu, koherans ve frekans davranış fonksiyonu ile zaman ortamında otokorelasyon, çapraz korelasyon ve impuls davranış fonksiyonudur (Heylen vd., 2007).

1.4.4.1. Otogüç Spektrumu ve Otokorelasyon Fonksiyonu

Bir $a(t)$ zaman sinyalinin otogüç spektrumu (Autopower Spectrum - APS) aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Heylen vd., 2007):

$$G_{AA}(f) = A(f) \cdot A^*(f) \quad (10)$$

Burada $A(f)$, $a(t)$ 'nin Fourier dönüşümüdür ve $*$ kompleks eşleniği göstermektedir. Otogüç spektrumu bir sinyaldeki ortalama gücün frekans üzerinde nasıl dağıtılacağını göstermektedir (Heylen vd., 2007).

Anlık bir $a(t)$ zaman sinyalinin otokorelasyon fonksiyonu denklem (11)'de görüldüğü gibidir (Heylen vd., 2007):

$$R_{aa}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t).a(t+\tau)dt \quad (11)$$

Sabit bir sinyal için, otokorelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi verilebilir (Heylen vd., 2007):

$$R_{aa}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_{-T/2}^{T/2} a(t).a(t+\tau)dt \quad (12)$$

1.4.4.2. Çaprazgüç Spektrumu ve Çaprazkorelasyon Fonksiyonu

$a(t)$ ve $b(t)$ zaman sinyalleri arasındaki çaprazgüç spektrumu (Crosspower Spectrum - CPS),

$$G_{AB}(f) = A(f).B^*(f) \quad (13)$$

şeklinde ifade edilir (Heylen vd., 2007). Burada $A(f)$ ve $B(f)$ sırasıyla $a(t)$ ve $b(t)$ nin Fourier dönüşümleridir ve $*$ kompleks eşleniği göstermektedir. Çaprazgüç spektrumunun magnitudü her frekansta sinyallerdeki düğüm gücünü ölçer (Heylen vd., 2007).

Anlık zaman sinyalleri $a(t)$ ve $b(t)$ için çaprazkorelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Heylen vd., 2007):

$$R_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t).b(t+\tau)dt \quad (14)$$

Sabit sinyaller için, çaprazkorelasyon fonksiyonu denklem (15)'te verilmektedir (Heylen vd., 2007):

$$R_{ab}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_{-T/2}^{+T/2} a(t).b(t+\tau)dt \quad (15)$$

Otogüç spektrumu ve otokorelasyon fonksiyonlarında olduğu gibi, çaprazgüç spektrumu ve çaprazkorelasyon fonksiyonları da bir Fourier dönüşüm çifti teşkil ederler (Heylen vd., 2007)

Modal analiz konusunda, çapraz güç spektrumunun en yaygın kullanılışı, iki sinyal arasındaki ortalama frekans davranış fonksiyonlarının hesaplanması ve yalnızca tepkinin ölçüldüğü operasyonel modal analiz çalışmalarında frekans davranış fonksiyonlarının yerine hesap spektrumu olarak kullanılmalarıdır (Heylen vd., 2007).

Çaprazgüç spektrumu ve çaprazkorelasyon fonksiyonunun nedensel bilgileri içermesi, ‘oto’ ve ‘çapraz’ nicelikleri arasındaki anahtar farklılıktır. Bundan dolayı, gecikmenin tespiti ve tanımlanması için faydalı vasıtalar (Heylen vd., 2007).

1.4.4.3. Frekans Davranış ve Koherans Fonksiyonları

1.4.4.3.1. Tek Etki Tek Tepki

$F(f)$, bir etki sinyalinin ($f(t)$) frekans spektrumu, $X(f)$ bir tepki sinyalinin ($x(t)$) frekans spektrumu ise, bu sinyaller arasındaki $H(f)$ frekans davranış fonksiyonu (Frequency Response Function - FRF) aşağıdaki gibi tanımlanır (Heylen vd., 2007):

$$X(f) = H(f)F(f) \quad (16)$$

Frekans davranış fonksiyonunun doğrudan hesabı aşağıdaki gibi olur (Heylen vd., 2007):

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (17)$$

Bu niceliklerin ortalaması alınarak $H(f)$ 'nin doğrudan hesabında, yani

$$\hat{H}(f) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} \left(\frac{X(f)}{F(f)} \right)_n \quad (18)$$

ifadesinde $F(f)$ 'in 0'a eşit olması riski bulunmaktadır. Bu yüzden, pratikte, otogüç ve çaprazgüç spektrumları kullanarak $H(f)$ 'yi hesaplamının aşağıdaki gibi alternatif yollarını kullanmak daha avantajlıdır (Heylen vd., 2007):

$$H_1(f) = \frac{X(f) F^*(f)}{F(f) F^*(f)} = \frac{G_{XF}}{G_{FF}}, \quad (19)$$

$$H_2(f) = \frac{X(f) X^*(f)}{F(f) X^*(f)} = \frac{G_{XX}}{G_{FX}} \quad (20)$$

Frekans davranış fonksiyonunun denklem (19) veya denklem (20) ile hesaplanmasının asıl sebebi, ortalama olarak etki veya tepki sinyalleri üzerindeki ilişkili olmayan parazitlerin azaltılmasını sağlamaktır. Frekans davranış fonksiyonlarına uygulanan sinyal ortalama alma işlemi frekans davranış fonksiyonuna has özellikler kullanılarak önemli ölçüde basitleştirilir. Frekans davranış fonksiyonu, çaprazgüç veya otogüç spektrumları kullanarak formüle edilirken, sistem lineer olduğu sürece frekans davranış fonksiyonunun hesabı kendine özgüdür. Bu hesap etki sabit, sabit olmayan ya da deterministik iken geçerlidir (Heylen vd., 2007).

Pratikte, frekans davranış fonksiyonu otogüç ve çaprazgüç spektrumlarının ortalama değerleri ile (denklem (21)'deki ifadeler ile) belirlenir (Heylen vd., 2007).

$$\begin{aligned} \hat{G}_{FF} &= \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{FF})_n, & \hat{G}_{XX} &= \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{XX})_n \\ \hat{G}_{FX} &= \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{FX})_n, & \hat{G}_{XF} &= \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{XF})_n \end{aligned} \quad (21)$$

Burada N_a ortalamaların sayısıdır ve $H(f)$ için bir en küçük kareler yaklaşımı sunar. Eşzamanlı olmayan sinyallerin olması durumunda, $H(f)$ otogüç ve çaprazgüç spektrumlarının ortalaması alınarak hesaplanmalıdır. Çünkü, fazı muhafaza eden ve hesabı geliştiren mevcut başka bir yol yoktur (Allemang vd., 1987). Yalnızca eşzamanlı sinyallerin ortalamalarının alınması durumunda, frekans davranış fonksiyonu doğrudan

formülasyonun ortalaması alınarak hesaplanabilir, ancak bu nadiren yapılır (Heylen vd., 2007).

Bu frekans davranış fonksiyonu hesapları en küçük kareler yaklaşımları olduğundan, uygun bir korelasyon katsayısı tanımlanabilir. Bu katsayı koherans fonksiyonu olarak adlandırılır. Koherans fonksiyonu en küçük kareler hatasının bir ölçümüdür. Bir tek etki/tek tepki durumu için bu koherans aşağıdaki gibi tanımlanır (Heylen vd., 2007):

$$\gamma^2 = \left| \hat{G}_{FX} \right|^2 / \left(\hat{G}_{FF} \cdot \hat{G}_{XX} \right) \quad (22)$$

Koherans bir korelasyon katsayısıdır, bundan dolayı, 0 ile 1 arasında değişir. 1 değeri, karşılaştırılan iki sinyal (yani etki ve tepki) arasında mükemmel bir lineer ilişkinin olduğunu gösterir. 1 değerinden daha az olan bir koherans, $f(t)$ ve/veya $x(t)$ 'nin ölçümlerindeki ilişkilendirilememiş ses, incelenen sistemin lineer olmaması, analizdeki sızıntı ve analizde telafi edilemeyen sistem içerisindeki gecikmeler gibi sebeplerden bir veya daha fazlasından dolayı olabilir (Heylen vd., 2007).

1.4.4.4. Güç Spektral Yoğunlukları

Spektral analizde amaç sonlu bir veri kümesine dayanarak, bir sinyalin içerisinde bulunan gücün (frekans üzerinde) dağılımını tanımlamaktır. Güç spektral yoğunluğunun (Power Spectral Density - PSD) hesabı, geniş bant parazitleri içerisinde gömülü olan sinyallerin belirlenmesini içeren çeşitli uygulamalarda oldukça faydalıdır (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b).

Sabit bir rastgele sinyalin güç spektral yoğunluğu, matematiksel olarak, ayrık zaman Fourier dönüşümü üzerinden korelasyon serisi ile ilişkilidir. Bu, normalleştirilmiş frekansa göre aşağıdaki gibi ifade edilir (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b):

$$P_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m) e^{-j\omega m} \quad (23)$$

Bu ifade, $\omega = 2\pi f/f_s$ ilişkisi kullanılarak, fiziksel frekansın (f) bir fonksiyonu olarak denklem (24)'teki gibi yazılabilir. Burada, f_s örnekleme frekansıdır (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b).

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{f_s} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m) e^{-2\pi jfm/f_s} \quad (24)$$

Gerçek sinyaller için, güç spektral yoğunluğu simetriktir ve bundan dolayı $0 \leq \omega < \pi$ için $P_{xx}(\omega)$ güç spektral yoğunluğunu karakterize etmek için tamamen yeterlidir. Bununla beraber, bütün aralık üzerindeki ortalama gücü elde etmek için, tek taraflı güç spektral yoğunluğu kavramının tanıtılması gerekmektedir. Tek taraflı güç spektral yoğunluğu denklem (25)'de görüldüğü gibidir (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b).

$$P_{\text{tektaraflı}}(\omega) = \begin{cases} 0, & -\pi \leq \omega < 0 \\ 2P_{xx}(\omega), & 0 \leq \omega < \pi \end{cases} \quad (25)$$

Frekans bandı üzerinde ($[\omega_1, \omega_2]$, $0 \leq \omega_1 < \omega_2 \leq \pi$) bir sinyalin ortalama gücü tek taraflı PSD kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b):

$$\bar{P}_{[\omega_1, \omega_2]} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} P_{\text{tektaraflı}}(\omega) d\omega \quad (26)$$

1.4.4.5. Spektrogram

Spektrogram, bir sinyalin spektral yoğunluğunun zamana göre nasıl değiştiğini gösteren bir resimdir. Spektral şelale, sonogram, sesizi ya da sesgram olarak da bilinen spektrogramlar, fonetik seslerin tanımlanmasında, hayvan seslerinin analiz edilmesinde, müzik, su altı radarları, hava radarları, ses işleme, sismoloji vb. pek çok alanda kullanılmaktadırlar (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b).

Spektrum diyagramları çok kısa bir zaman periyoduna sahip kompleks bir sinyalin durumunu görmek açısından oldukça faydalıdır. Bir spektrogramda, yatay boyut zamanı, düşey boyut ise frekansı gösterir. Spektrogramda görülen daha koyu alanlar sinyalin yüksek genliğe sahip olduğu frekansları göstermektedir (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b).

Spektrogram bileşik bir sinyalin pencerelemiş çerçevelerinin frekans spektrumunun hesabının bir sonucudur. Spektrogramlar genellikle, iki yöntemden birisi ile oluşturulurlar; ya bant geçirici filtrelerin bir serileri ile ya da kısa süreli Fourier dönüşümü (Short term Fourier Transform – STFT) kullanılarak zaman sinyalinden hesaplanırlar. Spektrogramı STFT'nin magnitudünü kullanarak hesaplamak sayısal bir işlemdir. Zaman ortamında sayısal olarak örneklenen veri, çoğunlukla birbirleri ile örtüşen parçalara ayrılır ve her bir parça için frekans spektrumunun magnitudünü hesaplamak amacıyla Fourier dönüşümü alınır. Daha sonra her bir parça resim içerisinde dikey bir hatta karşılık gelir. Zaman içinde spesifik bir an için frekansa karşı magnitudün bir ölçümü yapılmış olur (MATLAB Signal Processing Toolbox User Guide, 2009b).

1.5. Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Modal parametrelerin belirlenmesi konusunda yapılan araştırmalar, son yıllarda yapısal deney alanında önemli etkiler bırakmışlardır. Bu araştırmalar sonucunda kişisel olarak kullanılan ya da ticari yazılımların bir parçası olarak satılan birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalar birbirlerinden bağımsız olarak incelendiğinde oldukça iyi anlaşılabilirlerdir, bununla beraber bir algoritmanın diğeri ile mukayesesi güncel araştırmaların önemli bir kısmını meşgul etmektedir. Bu güncel çalışmalar, modal parametre belirleme tekniklerinin farklı sınıflarını performanstan daha ziyade benzerlikten veya farklılıklar açısından değerlendirmek üzerine yoğunlaşmışlardır. Modal parametre belirleme işlemi kesinliğe ulaşamayan bir problemi içerdiğinden, farklı algoritmalarından elde edilen modal parametre tahminleri, modal modeldeki ve model ortamdaki farklılıklardan, algoritmaların verileri nasıl kullandıkları konusundaki farklılıklardan, verilerin ağırlaştırılma ya da yoğunlaştırılma yöntemlerindeki farklılıklardan ve kullanıcı tecrübesindeki farklılıklardan dolayı aynı olmayacaktır (Allemang, 1999).

1.5.1. İşletim Vektörleri Yöntemi

İşletim Vektörleri Yöntemi, ‘pik genliği’ veya ‘piklerin seçilmesi’ yöntemi olarak da bilinir. Bu yöntem basit ve yaklaşık bir yöntemdir. Modal frekans, FRF’nin sanal kısmında pik değerlidir, FRF’nin gerçek kısmında sıfırı kesmektedir ve FRF’nin magnitudü ya da logaritmik magnitudünde pik değerlidir. Bu yöntem FRF’leri iyi dağılmış modları gösteren yapılarda yeterli olur. Bu yapılar rezonanslarda doğru ölçümlerin elde edilmesi zor olan az sönümlü yapılar olmamalıdır, bununla beraber, bir rezonanstaki davranışın bir moddan daha fazla olacak şekilde kuvvetli olarak etkileneceği yüksek sönümlü sistemler de olmamalıdır. Bu durum yöntemin uygulanabilirliğini kısıtlar gibi gözükse de, daha zor durumlarda, gereken parametrelerin başlangıç tahminlerinin alınmasında böyle bir yaklaşım faydalı olmaktadır. Yöntem aşağıdaki gibi uygulanır (Ewins, 1995):

- i. İlk önce, FRF çizimi üzerinde rezonans pikleri bulunur ve maksimum tepkinin frekansı, o modun doğal frekansı olarak alınır (ω_r).
- ii. İkinci olarak, FRF nin maksimum değeri ($[\hat{H}]$) alınır ve $|\hat{H}|/\sqrt{2}$ ’lik bir tepki seviyesi için fonksiyonun frekans bant genişliği belirlenir ($\Delta\omega$). Böylece ω_a ve ω_b şeklinde iki nokta tanımlanır (yarım-güç noktaları).
- iii. Söz konusu olan modun sönümü aşağıdaki formüllerden hesaplanabilir:

$$\eta_r = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{2\omega_r^2} \cong \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (27)$$

$$\zeta_r = 2\eta_r \quad (28)$$

- iv. Sonuç olarak, bu rezonans bölgesindeki toplam tepkinin, genel FRF serilerindeki bir tek terime dayandığı kabul edilerek, analiz edilen modun modal sabiti için aşağıdaki gibi bir hesap yapılabilir:

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{(\Phi_{jr})(\Phi_{kr})}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} \quad (29)$$

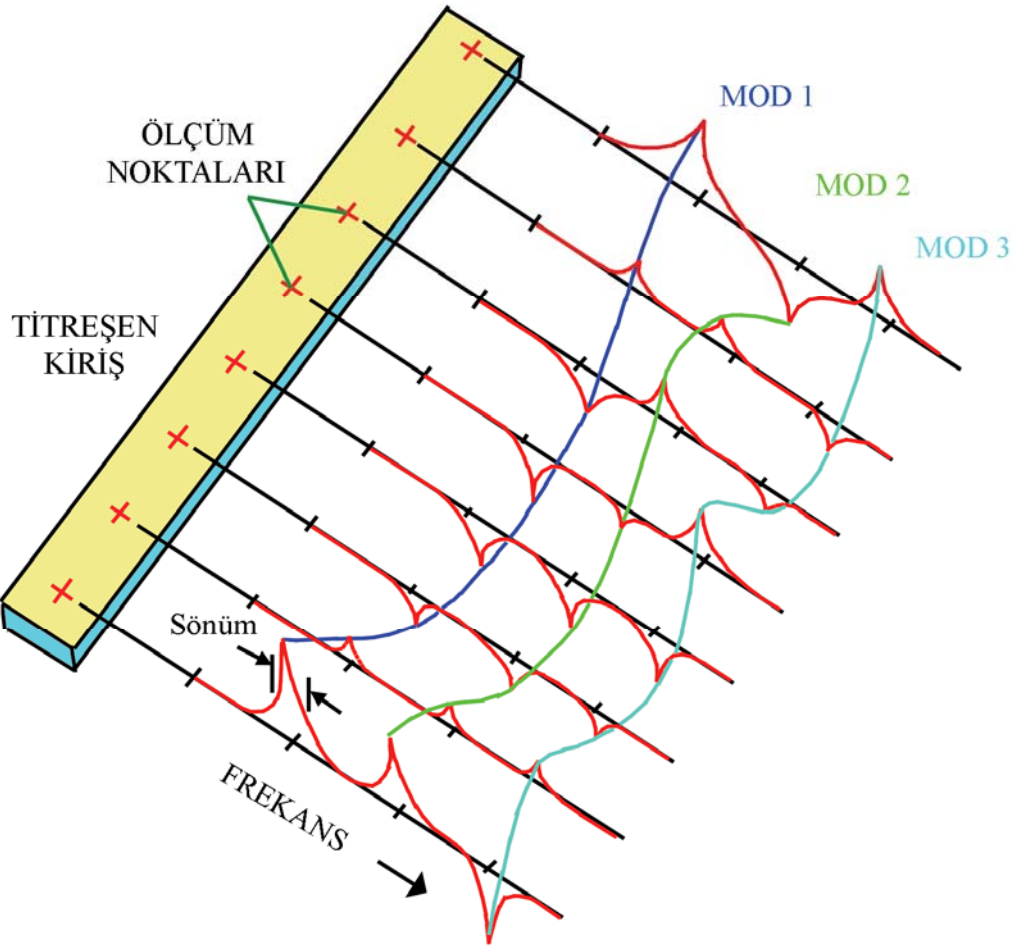
Kalıntı vektörleri aşağıdaki denklemden elde edilir. Kalıntı vektörü belirlendikten sonra modal vektörler kolaylıkla hesaplanabilir (Ewins, 1995):

$$A_r = \left| \hat{H} \right| \omega_r^2 \eta_r. \quad (30)$$

Bu yöntemin birtakım kısıtlamaları mevcuttur. İlk önce, belirtmek gerekir ki, hem sönüm hem de modal sabitin hesapları önemli ölçüde maksimum FRF seviyesinin $\left| \hat{H} \right|$ doğruluğuna bağlıdır. Ölçümlerdeki hataların çoğu, rezonans bölgesi civarında yoğunlaşır ve pik değerinin tamamen FRF spektrumundaki tek bir noktanın geçerliliğine bağlı olabileceği az sönümlü yapılara özellikle dikkat edilmelidir (Ewins, 1995).

İkinci en ciddi kısıtlama genellikle tek mod kabulünün tam anlamıyla uygulanabilir olmamasından kaynaklanmaktadır. Açıkça ayrılmış modların olması durumunda bile, çoğunlukla analiz edilen modun rezonansındaki toplam davranışa komşu modların dikkate değer bir katkı yaptığı görülmüştür (Ewins, 1995).

Teknik olarak, modal parametrelerin belirlenmesinde birçok tek serbestlik dereceli yaklaşımlar kullanıldığında, çok miktarda sadeleştirme kabulleri yapılır. Bu durumlarda, sonuçlar çoğunlukla modal vektörler olarak değil işletim vektörleri olarak adlandırılırlar. Bu terim, yapı sisteminin bu frekansta tetiklendiğinde, yapıda oluşacak hareketin tek bir modal vektörden daha ziyade modal vektörlerin lineer bir kombinasyonu olacağı gerçeğini göstermektedir. Eğer bir mod baskın ise, o zaman işletim vektörü yaklaşık olarak mod vektörüne eşit olacaktır. Şekil 1.18'de basit bir kirişin modal vektörlerinin belirlenmesinde pik frekans noktalarındaki (Frekans davranış fonksiyonlarının sanal kısmındaki pozitif veya negatif pik) bilginin kullanımına dair bir örnek görülmektedir (Allemang, 1999).



Şekil 1.18. FRF'nin sanal kısmından elde edilen modal vektörler (Allemang, 1999)

1.5.2. Kompleks Ekspansiyel Yöntemi

Kompleks Ekspansiyel Yöntemi ile ilgili olarak bu bölümde sunulan bilgilerin tamamı Ewins (1995) tarafından hazırlanan kaynakta ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Zaman ortamı formatında, ölçülen veri üzerinde çalışan bir takım alternatif modal analiz yöntemleri mevcuttur. Sayısal prosedürleri bilgisayarlarda daha etkili ve uygun hale getirmek için ortaya konan değişiklik ve düzeltmeler olmasına rağmen, kullanılan yöntemlerinin çoğu "Kompleks Ekspansiyel" yöntemi olarak bilinen bir teknikten türetilmektedirler. Başlıca avantajı, modal parametrelerin başlangıç tahminine dayanmamak olan yöntemin esası bu bölümde kısaca açıklanacaktır.

Yöntem, sistemden frekans ortamında elde edilen tepki spektrumunu zaman ortamında impuls davranış fonksiyonu şeklinde kullandığından, mevcut uygulamaları

viskoz sönümlü sistemler ile sınırlıdır. Başlangıç noktası, viskoz sönümlü genel çok serbestlik dereceli sistemin FRF' sinin aşağıdaki gibi yazılabilen ifadesidir (Ewins, 1995):

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{r^{A_{jk}}}{\omega_r \zeta_r + i(\omega - \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2})} + \frac{r^{A_{jk}^*}}{\omega_r \zeta_r + i(\omega + \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2})} \quad (31)$$

veya

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^{2N} \frac{r^{A_{jk}}}{\omega_r \zeta_r + i(\omega - \omega'_r)} \quad (32)$$

Bu denklemlerde,

$$\omega'_r = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}, \quad \omega'_r + N = -\omega'_r, \quad (r + N)^{A_{jk}} = r^{A_{jk}^*} \quad (33)$$

şeklinde ifade edilirler. Klasik teoriden, FRF'nin ters Fourier dönüşümü alınarak uygun impuls davranış fonksiyonu (Impuls Response Function - IRF), denklem (34)'de görüldüğü gibi elde edilebilir (Ewins, 1995).

$$h_{jk}(t) = \sum_{r=1}^{2N} r^{A_{jk}} e^{s_r t} \quad (34)$$

Burada,

$$s_r = -\omega_r \zeta_r + i\omega'_r \quad (35)$$

şeklinde ifade edilir. Eğer orijinal FRF dijital şekilde ölçülürse ya da elde edilirse ve bu suretle birtakım eşit olarak dağılan frekanslarda tanımlanırsa, FRF'nin ters Fourier dönüşümü ile elde edilen IRF, benzer şekilde uygun birtakım eşit olarak dağılmış zaman aralıklarında ($\Delta t = 1/\Delta f$) tanımlanır ve bu veri kümesine denklem (36)'da görüldüğü gibi tanımlanabilir (Ewins, 1995):

Denklem (45), aşağıda görüldüğü gibi yeniden düzenlenebilir (Ewins, 1995):

$$\sum_{i=0}^{2N-1} \beta_i h_i = -h_{2N} \quad (\beta_{2N} = 1 \text{ alınarak}) \quad (46)$$

Denklem (46)'da elde edilen ifade, aşağıdaki gibi açık olarak yazılabilir (Ewins, 1995):

$$\{h_0 \quad h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_{2N-1}\} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \end{Bmatrix} = -h_{2N} \quad (47)$$

Denklem (36)'dan denklem (47)'ye kadar olan tüm süreç, IRF veri noktalarının farklı bir kümesi kullanılarak tekrarlanabilir. Bundan başka, ilk küme ile oldukça örtüşen yeni veri kümesi aşağıdaki gibi seçilebilir (Ewins, 1995):

$$\{h_1 \quad h_2 \quad h_3 \quad \dots \quad h_{2N}\} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \end{Bmatrix} = -h_{2N+1} \quad (48)$$

Bu prosedürün arka arkaya uygulamaları, denklem (49)'da görüldüğü gibi tam bir $2N$ denklem kümesini verir (Ewins, 1995):

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & \dots & h_{2N-1} \\ h_1 & h_2 & h_3 & \dots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{2N-1} & h_{2N} & h_{2N+1} & \dots & h_{4N-2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{2N-1} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} h_{2N} \\ h_{2N+1} \\ \vdots \\ h_{4N-1} \end{Bmatrix}$$

$$[h]_{2N \times 2N} \{\beta\}_{2N \times 1} = -\{\tilde{h}\}_{2N \times 1} \quad (49)$$

Bu denklem kullanılarak bilinmeyen katsayılar denklem (50)'de görüldüğü gibi elde edilebilir (Ewins, 1995):

$$\{\beta\} = -[h]^{-1} \{\tilde{h}\} \quad (50)$$

Bu katsayılarla, denklem (51)'de görülen ilişkiyi kullanmak suretiyle, sistemin doğal frekanslarının elde edilebileceği V_1, V_2, \dots, V_{2N} değerlerini tanımlamak için denklem (43) kullanılabilir (Ewins, 1995).

$$V_r = e^{s_r \Delta t} \quad (51)$$

Denklem (40) kullanılarak, uygun modal sabitler A_1, A_2, \dots, A_{2N} türetilerek, çözüm tamamlanabilir. Bu aşağıdaki gibi yazılabilir (Ewins, 1995):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ V_1 & V_2 & \dots & V_{2N} \\ V_1^2 & V_2^2 & \dots & V_{2N}^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ V_1^{2N-1} & V_2^{2N-1} & \dots & V_{2N}^{2N-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_{2N} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{2N-1} \end{Bmatrix}$$

veya

$$[V]\{A\} = \{h\} \quad (52)$$

1.5.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi

Çokreferanslı Zaman Ortamı yöntemi ile ilgili olarak bu bölümde sunulan bilgilerin tamamı Allemang ve Brown (1987) tarafından hazırlanan kaynakta ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi Vold vd. (1982) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem iki aşamalı bir parametre belirleme tekniğidir. Birinci aşamada, bir veya birden fazla referans kullanılarak sönümlü doğal frekans ve sönüm değerleri zaman verisinden alınır. Ondan sonra ikinci aşamada modal katsayılar veya kalıntılar hesaplanır. Birinci aşama bir zaman ortamı tekniği kullanmasına karşılık, kalıntıların hesabı zaman ortamının

yanı sıra frekans ortamında da yapılabilir. Frekans, sönüm değerleri ve modal katsayıların hesabında yalnızca bir tek referanstan alınan veriler kullanıldığı zaman, Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi, Enküçük Kareler Kompleks Ekspansiyel Yöntemi ile aynı olur. Bundan dolayı, Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi tek bir referans ile veya birden çok referans ile kullanılabilir (Allemang ve Brown, 1987).

Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi, serbest sönüm ya da impuls davranış fonksiyonu verilerinden modal parametrelerin yani modal sönüm, frekans ve kalıntıların elde edilmesi için kullanılır. Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi, pek çok zaman ortamı algoritmasında olduğu gibi frekans davranış fonksiyonu yerine impuls davranış fonksiyonundan ($h(t)$) formüleştirelmıştır. Bu $h(t)$ bir impuls etkisine karşı sistemin davranışını göstermektedir. İmpuls davranış fonksiyonu, frekans davranış fonksiyonun ters Fourier dönüşümünün alınması ile elde edilebilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$h(t) = F^{-1}(H(\omega)) \quad (53)$$

İmpuls davranış fonksiyonu, sistemin azalan bir zaman kaydını göstermektedir ve sistemin sönümlü ekspansiyellerinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$h_{pq}(t) = \sum_{r=1}^N A_{pqr} e^{\lambda_r t} + A_{pqr}^* e^{\lambda_r^* t} \rightarrow h_{pq}(t) = \sum_{r=1}^{2N} A_{pqr} e^{\lambda_r t} \quad (54)$$

Burada p, tepki noktasını; q, etki noktası veya referans noktasını; r, mod numarasını; A_{pqr} , r modu için q noktasındaki bir etkiden dolayı p noktasındaki kalıntıyı; A_{pqr}^* , A_{pqr} 'nin kompleks eşleniğini; λ_r , sistemin kutbunu ($\lambda_r = \sigma_r + j\omega_r$), λ_r^* , λ_r 'nin kompleks eşleniğini; σ_r , r modu için sistem sönümünü; ω_r , r modu için sönümlü doğal frekansı; N, ilgili frekans bant genişliğindeki modların sayısını göstermektedir (Allemang ve Brown, 1987).

Mod numarasını gösteren r değerinin $r = 1, 2, 3, \dots, N$ değerleri için denklem (55)'de görülen eşitlikler söz konusudur (Allemang ve Brown, 1987):

$$A_{pqr+N} = A_{pqr}^* \quad , \quad \lambda_{r+N} = \lambda_r^* \quad (55)$$

Örnekmeli veriler kullanıldığından, $h(t)$ sürekli bir fonksiyon değil, denklem (56)'de görüldüğü gibi ayırık bir fonksiyondur (Allemang ve Brown, 1987).

$$h_{pq}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{pqr} e^{\lambda_r t_k} \quad (56)$$

Denklem (56)'da kullanılan bazı ifadeler, aşağıda görülen değerlere sahiptirler (Allemang ve Brown, 1987):

$$\begin{aligned} t_k &= k\Delta t \\ e^{\lambda_r t_k} &= e^{\lambda_r k\Delta t} = z_r^k \\ z_r &= e^{\lambda_r \Delta t} \end{aligned} \quad (57)$$

Burada, Δt , örnekleme zamanı ya da zaman çözünürlüğü; k , tamsayı değerini göstermektedir. Denklem (57)'de görülen ifadeler denklem (56)'da yerine konulursa, denklem (58)'de görülen sonuç elde edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$h_{pq}(t_k) = \sum_{r=1}^N A_{pqr} z_r^k + A_{pqr}^* z_r^{*k} \rightarrow h_{pq}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{pqr} z_r^k \quad (58)$$

Genellikle, birden daha fazla referans olabileceğinden, her bir etki denklem (56) gibi bir denklem üretecektir. Bundan dolayı, her bir tepki noktası için, denklem (59)'da görüldüğü şekilde bir N_i denklemler kümesi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{p1}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{p1r} e^{\lambda_r t_k} \\ h_{p2}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{p2r} e^{\lambda_r t_k} \\ \vdots \\ h_{pN_i-1}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{pN_i-1r} e^{\lambda_r t_k} \\ h_{pN_i}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{pN_i r} e^{\lambda_r t_k} \end{array} \right. \quad (59)$$

Burada N_i referansların ya da etkilerin sayısına eşittir. Temel modal analiz teorisinde, kalıntılar ve özvektörler arasında denklem (60)'da görüldüğü gibi bir ilişki kurulmuştur (Allemang ve Brown, 1987):

$$A_{pqr} = Q_r \psi_{pr} \psi_{qr} \quad (r = 1, 2, \dots, 2N) \quad (60)$$

Burada, Q_r , r . mod için ölçek faktörünü; ψ_{pr} , r . mod için bir kompleks modal vektörün ölçekli p . tepkisini; ψ_{qr} , r . mod için bir kompleks modal vektörün ölçekli q . tepkisini göstermektedir (Allemang ve Brown, 1987).

Bu ilişki bütün kalıntıları, belirli bir referansın kalıntılarının bir fonksiyonu olarak denklem (61) ve denklem (62)'de görüldüğü gibi ifade etme imkanı sağlar (Allemang ve Brown, 1987).

$$A_{pir} = \frac{\psi_{ir}}{\psi_{qr}} A_{pqr} \quad (61)$$

$$\frac{\psi_{ir}}{\psi_{qr}} = L_{iqr} \quad (62)$$

Denklem (60)'da görülen L_{iqr} modal katılım faktörü olarak tanımlanır. Modal katılım faktörü ağırlaştırma ya da zorlama faktörü olarak da adlandırılmaktadır. Burada, i bir referans konumunu, q referans olarak kullanılan referans veya etki konumunu, r ise mod numarasını göstermektedir (Allemang ve Brown, 1987).

Denklem (61) ve denklem (62), denklem (59)'da yerine koyulursa, denklem (63) elde edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\begin{cases} h_{p1}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} A_{p1r} e^{\lambda_r t_k} \\ h_{p2}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} L_{2,1r} A_{p1r} e^{\lambda_r t_k} \\ \vdots \\ h_{pN_1-1}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} L_{N_1-1,r} A_{p1r} e^{\lambda_r t_k} \\ h_{pN_1}(t_k) = \sum_{r=1}^{2N} L_{N_1,r} A_{p1r} e^{\lambda_r t_k} \end{cases} \quad (63)$$

Bu denklemler birinci referansın bir fonksiyonu olarak yazılmışlardır. Bu zorunlu bir gösterim değildir ve kolaylık açısından yapılmıştır. Teorinin aşağıdaki uygulaması modal katılım faktörleri için kullanılan referanstan bağımsızdır (Allemang ve Brown, 1987).

Denklem (58)'de geliştirilen kavram kullanılarak, denklem (63) matris formunda aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\begin{Bmatrix} h_{p1}(t_k) \\ h_{p2}(t_k) \\ \vdots \\ h_{pN_1}(t_k) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{I\} \\ [L_{i1}] \end{bmatrix} [Z]^k \{A_p\} \quad (64)$$

Denklem (64)'de görülen ifadelerin açılımları denklem (65) - denklem (70)'de gösterildiği gibidir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[Z]_{2N \times 2N} = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_{2N} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$z_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad (66)$$

$$\{A_p\}_{2N \times 1} = \begin{Bmatrix} A_{p1,1} \\ A_{p1,2} \\ \vdots \\ A_{p1,2N} \end{Bmatrix}_{2N \times 1} \quad (67)$$

$$[L_{i1}]_{(N_1-1) \times 2N} = \begin{bmatrix} L_{2,1,1} & L_{2,1,2} & \cdots & L_{2,1,2N} \\ L_{3,1,1} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{N_1,1,1} & L_{N_1,1,2} & \cdots & L_{N_1,1,2N} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$\{I\}_{1 \times 2N} = \{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ \cdots \ 1\}_{1 \times 2N} \quad (69)$$

$$[L]_{N_1 \times 2N} = \begin{bmatrix} \{I\} \\ [L_{i1}] \end{bmatrix}_{N_1 \times 2N} \quad (70)$$

Burada, $[L]$ modal katılım matrisini, $\{A_p\}$ ise kalıntı vektörünü göstermektedir. Denklem (64), yukarıda verilen ifadelere bağlı olarak denklem (71)'de görüldüğü gibi ifade edilebilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\begin{Bmatrix} h_{p1}(t_k) \\ h_{p2}(t_k) \\ \vdots \\ h_{pN_1}(t_k) \end{Bmatrix} = [L][Z]^k \{A_p\} \quad (71)$$

Denklem (71)'de elde edilen ifadeyi basitleştirmek için denklem (72)'de gösterilen konvansiyon kullanılacaktır (Allemang ve Brown, 1987).

$$\{h_{pk}\} = \begin{Bmatrix} h_{p1}(t_k) \\ h_{p2}(t_k) \\ \vdots \\ h_{pN_1}(t_k) \end{Bmatrix}_{N_1 \times 1} \quad (72)$$

Bu ifadeye bağılı olarak denklem (64) daha özlü bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\{h_{pk}\}_{N_i \times 1} = [L]_{N_i \times 2N} [Z]_{2N \times 2N}^k \{A_p\}_{2N \times 1} \quad (73)$$

Denklem (73)'ün sadece sol tarafı ölçülen verilere dayanarak bilinmektedir (Allemang ve Brown, 1987).

1.5.3.1. Birinci Aşama Çözümü: Kutuplar ve Modal Katılım Matrisi

Birinci aşamada, kutuplar ve modal katılım matrisi için bir çözüm geliştirilecektir. Kutupların bir matris polinomunun özdeğerleri olduğu ve modal katılım matrisinin sütunlarının bu matris polinomunun özvektörleri olduğu gösterilecektir. Matris polinomu çok referanslı durumdaki karakteristik denklemdir (Allemang ve Brown, 1987).

Bir matris polinomu, skalerler yerine katsayılar şeklinde matrisleri olan polinomdur (Gohberg vd., 1982). Polinomun matris katsayıları farklı yollarla türetilir. Prony Yöntemi bu matris katsayılarını elde etmek için kullanılır (Allemang ve Brown, 1987).

Bir skaler polinom yerine bir matris polinomunun kullanımı Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemine birden çok referans konumundan eşzamanlı olarak verilerin işlenmesini sağlamanın yanında birden çok referans verisinden yararlanabilme imkanı verir. Böylelikle Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi tekrarlanan kökleri referans sayısına veya matris katsayılarının boyutuna eşit olarak bulur (Allemang ve Brown, 1987).

Bütün referanslardan alınan veriler kutup hesabında kullanılabilirler. Ancak, sistemin belirli özelliklerini vurgulamak için belirli referanslar seçilir. N_i referansların sayısı olarak tanımlanır ancak deney sırasında kullanılan referansların sayısına eşit olmak zorunda değildir. Onun yerine N_i hesaplarda yer alması için seçilen referansların sayısına eşittir (Allemang ve Brown, 1987).

Parametre belirleme tekniklerindeki ana kavram modelin derecesidir. Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi için bu problem bilinmeyen kutupların ($2N$) ve bilinmeyen mod şekillerinin ($2N$) seçimine dönüştürülebilir. Burada, $2N$ sistemin kabul edilen serbestlik derecesi sayısıdır. Hesapların birinci aşamasında, yalnızca $2N$ bilinmeyen kutuplar için bir çözüm aranır (Allemang ve Brown, 1987).

Bilinmeyen kutuplar matris polinomunun özdeğerleri olarak bulunurlar. Bir matris polinomdaki özdeğerlerin sayısı polinomun derecesi ile matris katsayılarının boyutunun çarpımına eşittir. Bilinmeyen kutupların sayısı $2N$ iken, matris katsayısının boyutu referansların sayısına eşittir. Bundan dolayı matris polinomunun derecesi (n) aşağıdaki gibi olmalıdır (Allemang ve Brown, 1987):

$$n \geq \frac{2N}{N_i} \quad (74)$$

Burada, n , matris polinomunun derecesini; $2N$, serbestlik derecesi sayısını; N_i , referans sayısını göstermektedir. Örneklemeli verilerin ayrık yapısından dolayı, n , denklem (74)'ü karşılayacak en küçük tamsayı olarak tanımlanmalıdır. $n > \frac{2N}{N_i}$ olması durumunda, $n \times N_i$ özdeğer bulunacaktır. $n \times N_i > 2N$ olduğundan, bazı hesaba dayalı kutuplar olacaktır (Allemang ve Brown, 1987).

Kutupları ve modal katılım matrislerini veren bir matris polinomu araştırılır. Bu polinom aşağıdaki şekilde gösterilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[a(0)][L][Z]^n + [a(1)][L][Z]^{n-1} + \dots + [a(n)][L][Z]^0 = [0] \quad (75)$$

Burada, $[a(i)]_{N_i \times N_i}$, i . matris katsayısını göstermektedir. Tam bir matris gösterimi içerisinde, denklem (75) aşağıdaki gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[Q]_{N_i \times (n+1)N_i} [G]_{(n+1)N_i \times 2N} = [0]_{N_i \times 2N} \quad (76)$$

Burada kullanılan $[Q]$ ve $[G]$ matrisleri denklem (77) ve denklem (78)'deki gibi ifade edilirler (Allemang ve Brown, 1987).

$$[Q] = \left[[a(n)], [a(n-1)], \dots, [a(0)] \right]_{N_i \times (n+1)N_i} \quad (77)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} [L] & [Z]^0 \\ [L] & [Z]^n \end{bmatrix}_{(n+1)N_i \times 2N} \quad (78)$$

Denklem (75)'in geçerliliğini kanıtlamanın bir yolu işe denklem (76)'daki matristen başlamaktır. Bu matrisin sütunları $2N$ ve satırları $(n+1)N_i$ dir. Burada, denklem (79)'da görüldüğü gibi bir ilişki mevcuttur (Allemang ve Brown, 1987).

$$(n+1) \times N_i = \left(\frac{2N}{N_i} + 1 \right) \times N_i = 2N + N_i \quad (79)$$

Sütunlar $2N + N_i$ boyutlu bir alanda $2N$ boyutunda vektörlerdir. Bu vektörler birbirlerinden bağımsız olabilirler fakat öyle olmak zorunda değildirler. $2N$ boyutlu vektörlerin bağımsız olması durumunda, $2N + N_i$ boyutlu alanın bir altalanı için taban oluştururlar. Başka bir deyişle, bu $2N$ boyutlu vektörler, $2N + N_i$ boyutlu global uzayın bir altalanı olan $2N$ boyutlu bir alanı kapsarlar. Bu global uzay $2N + N_i$ bağımsız vektör ile genişlediğinden dolayı, N_i vektörleri ile genişletilen $[G]$ matrisinin $2N$ boyutlu bağımsız vektörleri bu $2N$ boyutlu vektörlerden bağımsız olarak alınabilir, böylelikle toplam alan için tam bir taban tanımlanır. Böyle bir yolla, N_i ilave vektör tanımlamak mümkündür, bu vektörler bütün $2N$ vektörlerine ortogondirler. Başka bir deyişle, $2N$ vektörleri ile N_i vektörlerinin nokta ürünü sıfırdır. Bu durum aşağıda tekrar ifade edilmektedir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[Q]_{N_i \times (n+1)N_i} [G]_{(n+1)N_i \times 2N} = [0]_{N_i \times 2N} \quad (80)$$

Burada, $[Q]$, N_i vektörlerinin transpozunu, $[G]$, altalanın $2N$ vektörlerini göstermektedir. Vektörler, bağımsız bir vektörler kümesi oluşturmadıkları durumda, $2N$ boyutlu bir uzaya genişlemezler fakat bağımsız vektörlerin sayısı Y olan bir Y boyutlu alana genişlerler. Bu durum için, hala bağımsız olan ve Y vektörleri ile ortogonal olan bir

N_i vektörler kümesi mevcuttur ve denklem (76)'nın geçerliliği devam etmektedir. Başka bir deyişle, $2N$ vektörleri bağımsız olsa da olmasa da denklem (76)'yı sağlayan N_i vektörleri her zaman bulunabilir (Allemang ve Brown, 1987).

$[G]$ matrisinin bu özelliği kullanılarak, $[a(i)]$ matris katsayılarını belirlemek için bir denklem türetilir. Yöntem Prony Yöntemi (Prony, 1995) olarak adlandırılır. Bu yöntemde bir denklemler kümesi türetmek için $[a(i)]$ matris katsayılarından ve denklem (73)'den yararlanılır (Allemang ve Brown, 1987).

Denklem (73)'ün t_{0+n_a} anında (yani k 'nin t_{0+n_a} 'ya eşit olması durumu) alınması ile ve bu denklemin $[a(n)]$ matris katsayısı ile çarpılmasıyla birinci denklem elde edilir. Zamanın bir zaman aralığı ile ötelenmesi ile (k 'nin $n_a + 1$ 'e eşit olması için) ve denklemin $[a(n-1)]$ matris katsayısı ile çarpılması ile diğer denklem elde edilir. Bu prosedür, t_{n+n_a} zamanında $[a(0)]$ katsayı matrisi ile çarpılan son denklemin, denklem (73)'e eşit olması için $n-1$ kere tekrarlanır. Bu denklemler kümesinin toplanması ile aşağıdaki sonuç elde edilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\begin{aligned}
[a(n)]\{h_{p,n_a+0}\} &= [a(n)][L][Z]^{n_a+0}\{A_p\} \\
[a(n-1)]\{h_{p,n_a+1}\} &= [a(n-1)][L][Z]^{n_a+1}\{A_p\} \\
&\vdots = \vdots \\
[a(1)]\{h_{p,n_a+n-1}\} &= [a(1)][L][Z]^{n_a+n-1}\{A_p\} \\
[a(0)]\{h_{p,n_a+n}\} &= [a(0)][L][Z]^{n_a+n}\{A_p\} \\
\sum_{i=0}^n [a(i)]\{h_{p,n_a+n-i}\} &= \sum_{i=0}^n [a(i)][L][Z]^{n_a+n-i}\{A_p\}
\end{aligned} \tag{81}$$

Denklem (81)'deki n_a indeksi, zamana bağlı veri kaydının isteğe bağlı kaynağını göstermek için kullanılır. Bu denklem (81)'in aynı veri kaydı için farklı başlangıç noktalarında yazılmasını sağlar (Allemang ve Brown, 1987).

Denklem (81)'in sağ tarafı, denklem (75)'in $[Z]^{n_a} \{A_p\}$ ile çarpılmış halidir. Bundan dolayı, denklem (81)'in sağ tarafı sıfıra eşittir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\sum_{i=0}^n [a(i)] \{h_{p,n_a+n-i}\} = \{0\} \quad (82)$$

Denklem (82)'de bilinmeyenler, $[a(i)]$ katsayı matrisleridir. Denklem (82)'nin sadece serbest sönümlü fonksiyonlar için ya da impuls davranış fonksiyonları için geçerli olduğuna dikkat edilmelidir, çünkü denklem (82) aynı sınırlamalara sahip olan denklem (73)'den türetilmiştir (Allemang ve Brown, 1987).

$[a(0)]$ matris polinomundaki en yüksek dereceli matris katsayısı olduğundan, özdeşlik matrisi $[I]$ olarak seçilebilir. Bundan dolayı, denklem (82) aşağıdaki gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\sum_{i=1}^n [a(i)] \{h_{p,n_a+n-i}\} = -\{h_{p,n_a+n}\} \quad (83)$$

Her bir p noktası için, n_a 'nın 0'dan $(X-1)$ 'e değiştirilmesi ile denklemler kümesi yazılabilir, burada X gelişigüzel bir büyük sayıdır. Özdeş bir denklemler kümesi her bir tepki noktası için elde edilebilir. Bütün bu denklemler kümesi matris formunda tek bir denklem şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[B^n] \left[\begin{array}{cccc} [\Psi_1^n] & [\Psi_2^n] & \cdots & [\Psi_{N_0}^n] \end{array} \right] = - \left[\begin{array}{cccc} [R_1^n] & [R_2^n] & \cdots & [R_{N_0}^n] \end{array} \right] \quad (84)$$

Burada, n , polinomun derecesini; N_0 , tepki noktalarının sayısını; X ise gelişigüzel bir büyük sayıyı ifade etmektedir. Denklem (84)'de yer alan ifadelerin açık gösterimleri denklem (85) – denklem (87)'de gösterilmektedir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[R_p^n] = \left[\begin{array}{c} \{h_{p,n}\}, \{h_{p,n+1}\}, \dots, \{h_{p,n+X-1}\} \end{array} \right]_{N_1 \times X} \quad (85)$$

$$[\mathbf{B}^n] = \left[[\mathbf{a}(1)], [\mathbf{a}(2)], \dots, [\mathbf{a}(n)] \right]_{N_i \times nN_i} \quad (86)$$

$$[\Psi_p^n]_{nN_i \times X} = \begin{bmatrix} \{h_{p,n-1}\} & \{h_{p,n}\} & \dots & \{h_{p,n+X-2}\} \\ \{h_{p,n-2}\} & \{h_{p,n-1}\} & \dots & \{h_{p,n+X-3}\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \{h_{p,0}\} & \{h_{p,1}\} & \dots & \{h_{p,X-1}\} \end{bmatrix} \quad (87)$$

Burada, Ψ_p^n altmatrisindeki en son satırın, her bir farklı etki noktası ile ilişkili olan impuls davranış fonksiyonunun başlangıç kısmı olduğuna dikkat edilmelidir. En son satır bir zaman örneği (Δt) kadar ötelenen aynı impuls davranış fonksiyonudur. Bu ifadelerin gösterimleri, aşağıdaki tanımları kullanarak basitleştirilebilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[\mathbf{R}] = - \left[[\mathbf{R}_1^n], [\mathbf{R}_2^n], \dots, [\mathbf{R}_{N_0}^n] \right]_{N_i \times N_0 X} \quad (88)$$

$$[\mathbf{B}] = \left[[\mathbf{a}(1)], [\mathbf{a}(2)], \dots, [\mathbf{a}(n)] \right]_{N_i \times N_i n} \quad (89)$$

$$[\Psi] = \left[[\Psi_1^n] \quad [\Psi_2^n] \quad \dots \quad [\Psi_{N_0}^n] \right]_{N_i n \times N_0 X} \quad (90)$$

Buna göre denklem (84) daha öznlü bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[\mathbf{B}][\Psi] = [\mathbf{R}] \quad (91)$$

Denklem (91)'de $N_i \times nN_i$ bilinmeyen vardır. Denklemlerin sayısı N_i ($[\mathbf{B}]$ 'nin satır sayısına eşittir) $\times (N_0 X)$ ($[\Psi]$ sütunlarının sayısına eşittir)'dir. $N_0 X$ 'in nN_i 'ye eşit olacağı şekilde X ele alınır, bilinmeyenler olarak pek çok denklem görülmektedir (Gohberg vd., 1982). Bundan dolayı, denklemler mevcut olduğu sürece, katsayı matrisleri için özel bir çözüm vardır (Allemang ve Brown, 1987).

Bununla beraber, X 'in N_0X değerinin nN_i 'den büyük olacak şekilde tanımlanması tavsiye edilmektedir. Bu durum, denklem (91)'i fazladan tanımlanmış bir sistem yapar. Bundan dolayı, katsayı matrislerini çözmek için en küçük kareler yöntemi kullanılabilir. En küçük kareler yönteminin kullanımı, verideki rastgele hataları azalttığından dolayı bir avantaj sağlar (Allemang ve Brown, 1987).

Bununla beraber, çok büyük olan bir X değerinin çeşitli dezavantajları vardır. Bu değışkene sahip sayısal yük lineer olmadığından, sayısal bir bakış açısından, X 'in çok büyük alınması avantajlı değildir. İkincisi, zaman kaydındaki değerler X 'in büyük değerleri için azalır, çünkü impuls davranış fonksiyonu sönümlü bir fonksiyondur. Sonuç olarak, artan zaman ile beraber ses sinyali zayıflar. Üçüncüsü, ters bir hızlı Fourier dönüşümünden kaynaklanan kırpma hatası, veri bloğunun sonunda artış gösterir. Bu kırpma hatası sadece FFT verilerinde olur (Allemang ve Brown, 1987).

Denklem (91)'in en küçük kareler çözümü aşağıda görüldüğü gibi normal denklemden bulunabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[B][\Psi][\Psi]^T = [R][\Psi]^T \rightarrow [B] \left(\sum_{p=1}^{N_0} [\Psi_p^n][\Psi_p^n]^T \right) = - \sum_{p=0}^{N_0} [R_p^n][\Psi_p^n]^T \quad (92)$$

Burada $[\Psi_p^n][\Psi_p^n]^T$ ve $[R_p^n][\Psi_p^n]^T$ ifadeleri asimptotik olarak gecikmeli otokorelasyon ve çaprazkorelasyon matrislerine eşit olacak şekilde gösterilebilirler. Bilinmeyen katsayı matrisleri Gaussian eliminasyon tekniği gibi eşzamanlı bir denklem çözüm tekniği kullanılarak denklem (92)'den çözülebilirler (Allemang ve Brown, 1987).

Katsayı matrisleri belirlendikten sonra, doğal frekans ve sönüm değerleri denklem (93) ile bulunabilirler (Allemang ve Brown, 1987).

$$\sum_{i=0}^n [a(i)][L][Z]^{n-i} = [0] \quad (93)$$

Denklem (93)'ün her iki tarafı, sistem kutbuna karşılık gelen konumdaki birim değerler dışında tamamı sıfırlardan oluşan $(2N \times 1)$ boyutunda bir birim vektör ile çarpılırsa denklem (94)'de görülen ifade elde edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\sum_{i=0}^n [a(i)] z_d^{n-i} \{L_d\} = \{0\} \quad (94)$$

Burada, $\{L_d\}_{N_i \times 1}$, $[L]$ nin 'd' sütununu, $\{0\}_{N_i \times 1}$ ise sıfır vektörünü göstermektedir. Denklem (94)'de yer alan z_d^{n-i} ifadesi ise denklem (95)'de görüldüğü gibidir (Allemang ve Brown, 1987).

$$z_d^{n-i} = (e^{\lambda_d \Delta t})^{n-i} \quad (95)$$

$\{L_d\}$ sıfır olmayan bir vektör olduğundan, denklem (94) yalnızca aşağıdaki şarta bağlı olarak sağlanabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\det \left[\sum_{i=0}^n [a(i)] z_d^{n-i} \right] = 0 \quad (96)$$

Bundan dolayı, rezonans frekansları ve sönüm değerleri matris polinomunun kutuplarının çözülmesi ile elde edilir. Daha önce de ifade edildiği gibi, bu matris polinomunun $nN_i = \left(\frac{2N}{N_i} \times N_i \right) = 2N$ adet veya bazen $\left(\frac{2N}{N_i} + 1 \right) \times N_i = 2N + N_i$ kutbu vardır (Allemang ve Brown, 1987).

Bu denklemler sistemini çözmenin yollarından birisi, denklem (94)'ü standart bir özdeğer problemi olarak formüleştirmektir. Denklemi $[a(0)] = [I]$ şeklinde yeniden düzenlersek, denklem (96)'dan aşağıdaki matris polinom denklemi elde edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\{[a(1)]z_d^{n-1} + [a(2)]z_d^{n-2} + \dots + [a(n)]\} \times \{L_d\} = \{L_d\} z_d^n \quad (97)$$

Denklem (97)'nin kökleri bir eş matris yaklaşımı kullanarak bulunabilir (Gohberg vd., 1982). Bu yaklaşım özdeşlik ilişkilerini ifade eden (n-1) matris denklemlerini kullanır.

Bu yöntem, polinomu denklem (98)'de görüldüğü gibi bir özdeğer problemine dönüştürür (Allemang ve Brown, 1987):

$$([E] - \beta[I]) \times \{X\} = \{0\} \quad (98)$$

Burada, β : özdeğeri; $\{X\}$, özvektörü; $[E]$, katsayı matrisini göstermektedir. Eş matrisi kurmadan önce, (n-1) kimlik matrisinin yazılmasını sağlamak için denklem (99)'daki vektörler tanımlanır (Allemang ve Brown, 1987):

$$\begin{cases} \{V_0\} = a_d z_d^0 \{L_d\} \\ \{V_1\} = a_d z_d^1 \{L_d\} = z_d [V_0] \\ \{V_2\} = a_d z_d^2 \{L_d\} = z_d [V_1] \\ \vdots \\ \{V_{n-1}\} = a_d z_d^{n-1} \{L_d\} = z_d [V_{n-2}] \end{cases} \quad (99)$$

Burada a_d orantılılık sabitidir. Denklem (97) ve denklem (99) kullanılarak, aşağıdaki matris denklemi formüleleştirilebilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\begin{bmatrix} -[a(1)] & -[a(2)] & \cdots & -[a(n-1)] & -[a(n)] \\ [I] & [0] & \cdots & [0] & [0] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ [0] & [0] & \cdots & [I] & [0] \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \{V_{n-1}\} \\ \{V_{n-2}\} \\ \vdots \\ \{V_0\} \end{Bmatrix}_{nN_1 \times 1} \quad (100)$$

$$= z_d \begin{Bmatrix} \{V_{n-1}\} \\ \{V_{n-2}\} \\ \vdots \\ \{V_0\} \end{Bmatrix}_{nN_1 \times 1}$$

Denklem (100), denklem (97) matris polinom denklemi için eş matris denklemdir. Denklem (100)'ün kutuplarının denklem (97)'nin kutupları ile aynı olduğuna dikkat edilmelidir. Denklem (97)'deki $\{L_d\}$ vektörü z_d kutbu ile ilişkili özvektördür ve ayrıca

modal katılım faktörüdür. Bu $\{L_d\}$ vektörü, denklem (99)'da tanımlandığı üzere $\{V_0\}$ ile orantılıdır (Allemang ve Brown, 1987).

Uygun çözüm algoritması kullanılarak, denklem (100)'ün özdeğer ve özvektörleri bulunabilir. Denklem (101) - denklem(104)'de görülen ifadelerin yerine konulması ile rezonans frekansı ve sönüm hesaplanabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$Z_r = Z_{r,real} + Z_{r,imag} \quad (101)$$

$$\sigma_r = \ln \frac{Mag}{\Delta t} \quad (102)$$

$$Mag = (Z_{r,real}^2 + Z_{r,imag}^2)^{1/2} \quad (103)$$

$$\omega_r = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{Z_{r,imag}}{Z_{r,real}} \right)}{\Delta t} \quad (104)$$

Burada, σ_r , sönümü; ω_r rezonans frekansını; Δt , örnek zamanını göstermektedir (Allemang ve Brown, 1987).

1.5.3.2. İkinci Aşama Çözümü: Kalıntılar

Çokreferanslı zaman ortamı için kutup hesabı tamamıyla bir zaman ortamı tekniği olmasına rağmen, kalıntı hesabı zaman ortamında olduğu gibi frekans ortamında da yapılabilir. Burada zaman ortamındaki kalıntı hesabı ele alınacaktır. Zaman ortamında kalıntıları ve sonuçta oluşan modal katsayıları belirlemek için denklem (105)'den yararlanılır (Allemang ve Brown, 1987):

$$\{h_{pk}\}_{N_1 \times 1} = [L]_{N_1 \times 2N} [Z]_{2N \times 2N}^k \{A_p\}_{2N \times 1} \quad (105)$$

$[Z]$ matrisi köşegeni üzerinde kutuplara sahip bir diyagonal matristir, her bir kutup kompleks eşleniklidir. Bundan dolayı $[Z]$ matrisi denklem (106)'da görüldüğü gibi yeniden yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[Z] = \begin{bmatrix} [Y] & [0] \\ [0] & [Y^*] \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \quad (106)$$

Denklem (106)'da görülen $[Y]$ matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[Y]_{N \times N} = [Y^*]_{N \times N}^* = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_N \end{bmatrix} \quad (107)$$

Denklem (105)'de görülen $[L]$ matrisinin sütunları, özdeğerleri z_i olan bir özdeğer probleminin özvektörleri olarak alındıklarından dolayı, bu vektörler kompleks eşlenik çiftlerinde de görünürler. Böylece, $[L]$ matrisi denklem (108)'de görüldüğü gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[L] = \left[[E], [E^*] \right] \quad (108)$$

Burada kullanılan $[E]$ matrisi denklem (109)'da görüldüğü gibidir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[E] = [E^*]^* = [I_1, I_2, \dots, I_n] \quad (109)$$

Denklem (109), denklem (108)'de yerine yazılırsa denklem (110)'da görülen ifade elde edilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[L] = [I_1, I_2, \dots, I_N, I_1^*, I_2^*, \dots, I_N^*] \quad (110)$$

$[L]$ ve $[Z]$ arasındaki matris çarpımı gerçekleştirilir. Bu çarpımın sonucunda elde edilen matris, denklem (111)'de görüldüğü gibi birbirinin kompleks eşleniği olan iki alt matristen meydana gelir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\begin{aligned} [L][Z]^k &= \begin{bmatrix} [E], [E^*] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Y]^k & [0] \\ [0] & [Y^*]^k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} [E][Y]^k, [E^*][Y^*]^k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} [V]^k, [V^*]^k \end{bmatrix}_{N_1 \times 2N} \end{aligned} \quad (111)$$

Burada, k , zaman noktasını göstermektedir. Denklem (111)'de görülen $[V]$ matrisi, denklem (112)'deki gibi ifade edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[V]_{N_1 \times N}^k = [E][Y]^k \quad (112)$$

Kalıntılar kompleks eşlenik kutuplarına karşılık gelen kompleks eşlenik çiftlerinde görülürler. Böylelikle, denklem (105)'deki $\{A_p\}$ vektörü, denklem (113)'deki gibi yeniden yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\{A_p\}_{2N \times 1} = \begin{Bmatrix} \{U_p\} \\ \{U_p^*\} \end{Bmatrix}_{2N \times 1} \quad (113)$$

Burada yer alan $\{U_p\}$ vektörünün açık ifadesi denklem (114)'de görüldüğü gibidir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\{U_p\} = \{U_p^*\}^* = \begin{Bmatrix} A_{p11} \\ A_{p12} \\ \vdots \\ A_{p1N} \end{Bmatrix} \quad (114)$$

Denklem (111) ve denklem (113)'ün denklem (105)'de yerine yazılmasıyla aşağıdaki sonuçlar elde edilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\begin{aligned} \{h_{pk}\}_{N_1 \times 1} &= \left[[V]^k, [V^*]^k \right]_{N_1 \times 2N} \begin{Bmatrix} \{U_p\} \\ \{U_p^*\} \end{Bmatrix}_{2N \times 1} \\ &= \left[[V]^k \{U_p\} + [V^*]^k \{U_p^*\} \right] \\ \{h_{pk}\}_{N_1 \times 1} &= 2 \operatorname{Re} \left\{ [V]^k \{U_p\} \right\} \end{aligned} \quad (115)$$

Burada, V ve U, denklem(116)'da görüldüğü gibi kompleks vektörlerdir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\begin{aligned} [V]^k &= [V_{\text{real}}]^k + j[V_{\text{imag}}]^k \\ \{U_p\} &= \{U_{p,\text{real}}\} + j\{U_{p,\text{imag}}\} \end{aligned} \quad (116)$$

Denklem (116)'da yer alan terimler denklem (117) – denklem (120)'de görüldüğü gibi ifade edilirler (Allemang ve Brown, 1987):

$$\{U_{p,\text{real}}\} = \operatorname{Re} \left\{ \{U_p\} \right\} \quad (117)$$

$$\{U_{p,\text{imag}}\} = \operatorname{Im} \left\{ \{U_p\} \right\} \quad (118)$$

$$\{V_{\text{real}}\} = \operatorname{Re} \left\{ [V] \right\} \quad (119)$$

$$\{V_{\text{imag}}\} = \text{Im}\{[V]\} \quad (120)$$

Burada, Re, kompleks bir sayının gerçek kısmını, Im Kompleks bir sayının sanal kısmını göstermektedir. Denklem (115), denklem (121)'de görüldüğü gibi yazılabilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$\{h_{pk}\} = 2 \left[[V_{\text{real}}]^k, -[V_{\text{imag}}]^k \right] \times \begin{Bmatrix} \{U_{p,\text{real}}\} \\ \{U_{p,\text{imag}}\} \end{Bmatrix} \quad (121)$$

Belirli durumlarda, modların normal kabul edilmesi doğrudur. Böyle durumlarda, $\{U_{p,\text{real}}\} = \{0\}$ alınır ve denklem (121) aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\{h_{pk}\} = -2 [V_{\text{imag}}]^k \{U_{p,\text{imag}}\} \quad (122)$$

Kalıntıların bir en küçük kareler hesabı da formüleleştirilebilir. Denklem (105)'de k'nın değiştirilmesi ile aşağıdaki denklem elde edilebilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\begin{Bmatrix} \{h_{p0}\} \\ \{h_{p1}\} \\ \vdots \\ \{h_{pX}\} \end{Bmatrix}_{(X+1)N_1 \times 1} = \begin{bmatrix} [L][Z]^0 \\ [L][Z]^1 \\ \vdots \\ [L][Z]^X \end{bmatrix}_{(X+1)N_1 \times 2N} \{A_p\}_{2N \times 1} \quad (123)$$

Burada, X, gelişigüzel bir pozitif tamsayıyı göstermektedir. Denklem (123)'ün kenarları, denklem (124)'te görülen ifade ile çarpılırsa, denklem (125)'de görüldüğü gibi bir normal denklem elde edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[\mathbf{B}]_{2N \times (X+1)N_1} = \begin{bmatrix} [\mathbf{L}^*][\mathbf{Z}^*]^{-0} \\ [\mathbf{L}^*][\mathbf{Z}^*]^{-1} \\ \vdots \\ [\mathbf{L}^*][\mathbf{Z}^*]^{-X} \end{bmatrix}^T \quad (124)$$

$$[\mathbf{B}]\{\mathbf{H}_p\} = [\mathbf{C}]\{\mathbf{A}_p\} \quad (125)$$

Denklem (125)'de görülen $[\mathbf{C}]$ matrisi ve $\{\mathbf{H}_p\}$ vektörü, denklem (126) ve denklem (127)'de görüldüğü gibidir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[\mathbf{C}]_{2N \times 2N} = [\mathbf{B}] \times [\mathbf{B}^*]^T \quad (126)$$

$$\{\mathbf{H}_p\}_{(X+1)N_1 \times 1} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{h}_{p0}\} \\ \{\mathbf{h}_{p1}\} \\ \vdots \\ \{\mathbf{h}_{pX}\} \end{Bmatrix} \quad (127)$$

Denklem (125)'den, eşzamanlı lineer bir denklem çözüm tekniği kullanılarak bilinmeyen kalıntılar belirlenebilir (Allemang ve Brown, 1987).

Normal mod kabulü için de bir en küçük kareler çözümü bulunabilir. Denklem (122)'de k değiştirilerek denklem (123)'e benzer şekilde bir denklemler kümesi elde edilir (Allemang ve Brown, 1987):

$$\{\mathbf{H}_p\}_{(X+1)N_1 \times 1} = -2[\mathbf{D}]\{\mathbf{U}_{p,imag}\}_{N \times 1} \quad (128)$$

Bu denklemde yer alan $[\mathbf{D}]$ matrisi denklem (129)'da görüldüğü gibidir (Allemang ve Brown, 1987):

$$[D]_{(X+1)N_1 \times N} = \begin{bmatrix} [V_{\text{imag}}]^0 \\ [V_{\text{imag}}]^1 \\ \vdots \\ [V_{\text{imag}}]^X \end{bmatrix} \quad (129)$$

Denklem (128)'in her iki tarafı katsayı matrisi $[D]$ 'nin transpozu ile çarpılırsa, denklem (130)'da görüldüğü gibi, eşzamanlı bir lineer denklem çözüm tekniği ile tekrar çözülebilen normal denklem elde edilir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[D]^T \{H_p\} = -2[C] \{U_{p,\text{imag}}\} \quad (130)$$

Denklem (130)'da görülen $[C]$ matrisi denklem (131)'de görüldüğü gibidir (Allemang ve Brown, 1987).

$$[C]_{N \times N} = [D]^T [D] \quad (131)$$

1.6. Hesaplanan Modal Parametrelerin Kontrolü

Modal parametrelerin doğruluğunun kontrolü, deneysel modal analizin son aşamasıdır. Hesaplanan dinamik karakteristiklerin kalitesinin değerlendirilmesi için ya da çeşitli modal parametre belirleme analizleri sırasında toplanan modal verilerden olası en iyi modal modelin oluşturulabilmesi için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Mod şekillerinin görsel takibinin yanında sonuçların kontrolü amacıyla tez çalışmasında uygulanan teknikler FRF matrislerinin sentezlenmesi, modal güvence kriteri (Modal Assurance Criterion – MAC), modal faz doğruduşluğu (Modal Phase Collinearity – MPC) ve stabilite diyagramlarıdır.

1.6.1. FRF Matrislerinin Sentezlenmesi

Birinci kontrol aşaması, deney sonucunda elde edilmiş olan frekans davranış fonksiyonlarının, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi sürecinde hesaplanan modal parametrelerden sentezlenen frekans davranış fonksiyonları ile karşılaştırılmasını içermektedir. Frekans davranış fonksiyonları, aşağıdaki denklemlerden sentezlenirler (Heylen vd., 2007):

$$[H(j\omega)] = \sum_{r=1}^N \left(\frac{Q_r \{\psi\}_r \{\psi\}_r^t}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{Q_r^* \{\psi\}_r^* \{\psi\}_r^{*t}}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right) \quad (132)$$

$$[H(j\omega)] = \sum_{r=1}^N \left(\frac{\{\psi\}_r \langle L \rangle_r}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{\{\psi\}_r^* \langle L \rangle_r^*}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right) \quad (133)$$

$$[H(j\omega)] = \sum_{r=1}^N \left(\frac{[A]_r}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{[A]_r^*}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right) \quad (134)$$

Burada, $[H(j\omega)]$, frekans davranış fonksiyonu matrisini; λ_r , r . mod için sistem kutuplarını; $\{\psi\}_r$, r . mod şeklini; $\langle L \rangle_r$, r . mod için modal katılım faktör vektörünü; $[A]_r$, r . mod için kalıntı matrisini; Q_r , r . mod için modal ölçek faktörünü göstermektedir (Heylen vd., 2007).

1.6.2. Modal Güvence Kriteri (MAC)

Modal güvence kriteri, hesaplanan farklı mod şekil gruplarının karşılaştırılmasında ya da bir yöntem kullanılarak hesaplanan mod şekil grubunun doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılabilir. İki mod şekli ($\{\psi_r\}$, $\{\psi_s\}$) arasındaki modal güvence kriteri aşağıdaki gibi ifade edilir (Heylen vd., 2007):

$$\text{MAC}(\{\psi\}_r, \{\psi\}_s) = \frac{|\{\psi\}_r^{*t} \{\psi\}_s|^2}{(\{\psi\}_r^{*t} \{\psi\}_s)(\{\psi\}_s^{*t} \{\psi\}_r)} \quad (135)$$

Eğer $\{\psi\}_r$ ve $\{\psi\}_s$ aynı mod şekil vektörleri iseler, modal güvence kriteri birim matris olmalıdır. Eğer $\{\psi\}_r$ ve $\{\psi\}_s$ farklı mod şekil vektörleri iseler, modal güvence kriteri düşük olmalıdır. Bu son nokta, mod şekillerinin ortogonalite şartına dayanmaktadır. Uygun sönüm kabulü ile bu ortogonalite şartı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Heylen vd., 2007):

$$[\psi]^t [M] [\psi] = \begin{bmatrix} \backslash & & \\ & m & \\ & & \backslash \end{bmatrix} \quad (136)$$

$$[\psi]^t [K] [\psi] = \begin{bmatrix} \backslash & & \\ & k & \\ & & \backslash \end{bmatrix} \quad (137)$$

Burada $[M]$, kütle matrisini; $[K]$, sistem rijitlik matrisini göstermektedir. Burada ifade edilen $[\psi]$ matrisi, denklem (138)'de görüldüğü gibidir (Heylen vd., 2007).

$$[\psi] = [\{\psi\}_1 \quad \dots \quad \{\psi\}_N] \quad (138)$$

Bundan dolayı, eğer kütle (veya rijitlik) matrisi, denklem (135)'e bir ağırlık matrisi olarak dahil edilirse, farklı modlar arasındaki modal güvence kriteri orantılı sönümlü durumda sıfır olmalıdır. Ancak, deneysel modal analizde kütle matrisi bilinmez. Ayrıca, gerçek sönüm genellikle tamamen orantılı değildir (Heylen vd., 2007).

1.6.3. Modal Faz Doğrudaşlığı (MPC)

Orantılı sönümlü sistemlerin mod şekilleri, ‘normal’ modlardır. Yani spesifik bir modun bütün mod şekil katsayıları için değişmeyen bir faz mevcuttur. Uygun ölçekleme ile katsayının fazının 0° veya 180° olduğu modlar üretilir. Modal faz doğrudaşlığı bir modun komplekslik derecesini kontrol eden bir göstergedir. MPC ile mod şekil katsayılarının gerçek ve sanal kısımları arasındaki fonksiyonel lineer ilişki değerlendirilir. Juang ve Pappa (1985), yaklaşık olarak gerçek normal modlar için modal faz doğrudaşlığını tanımlamışlardır. Her bir r . mod şekli için, bütün elemanların ortalama kompleks değeri her bir elemandan çıkartılarak bir vektör hesaplanır (Heylen vd., 2007):

$$\tilde{\Psi}_{ir} = \Psi_{ir} - \frac{\sum_{o=1}^{N_o} \Psi_{or}}{N_o} \quad i = 1, 2, \dots, N_o \quad (139)$$

Buna bağlı olarak modal faz doğrudaşlık değeri aşağıdaki gibi hesaplanır (Heylen vd., 2007):

$$\text{MPC}_r = \frac{\|\text{Re}\{\tilde{\Psi}\}_r\|^2 + \left(\text{Re}\{\tilde{\Psi}\}_r^t \cdot \text{Im}\{\tilde{\Psi}\}_r\right) \left(2(\varepsilon^2 + 1) \sin^2 \theta - 1\right) / \varepsilon}{\|\text{Re}\{\tilde{\Psi}\}_r\|^2 + \|\text{Im}\{\tilde{\Psi}\}_r\|^2} \quad (140)$$

Burada kullanılan ε ve θ ifadeleri denklem (141) ve denklem (142)’de gösterildiği gibidir (Heylen vd., 2007).

$$\varepsilon = \frac{\|\text{Im}\{\tilde{\Psi}\}_r\|^2 - \|\text{Re}\{\tilde{\Psi}\}_r\|^2}{2\left(\text{Re}\{\tilde{\Psi}\}_r^t \cdot \text{Im}\{\tilde{\Psi}\}_r\right)} \quad (141)$$

$$\theta = \arctan\left(|\varepsilon| + \text{sign}(\varepsilon) \sqrt{1 + \varepsilon^2}\right) \quad (142)$$

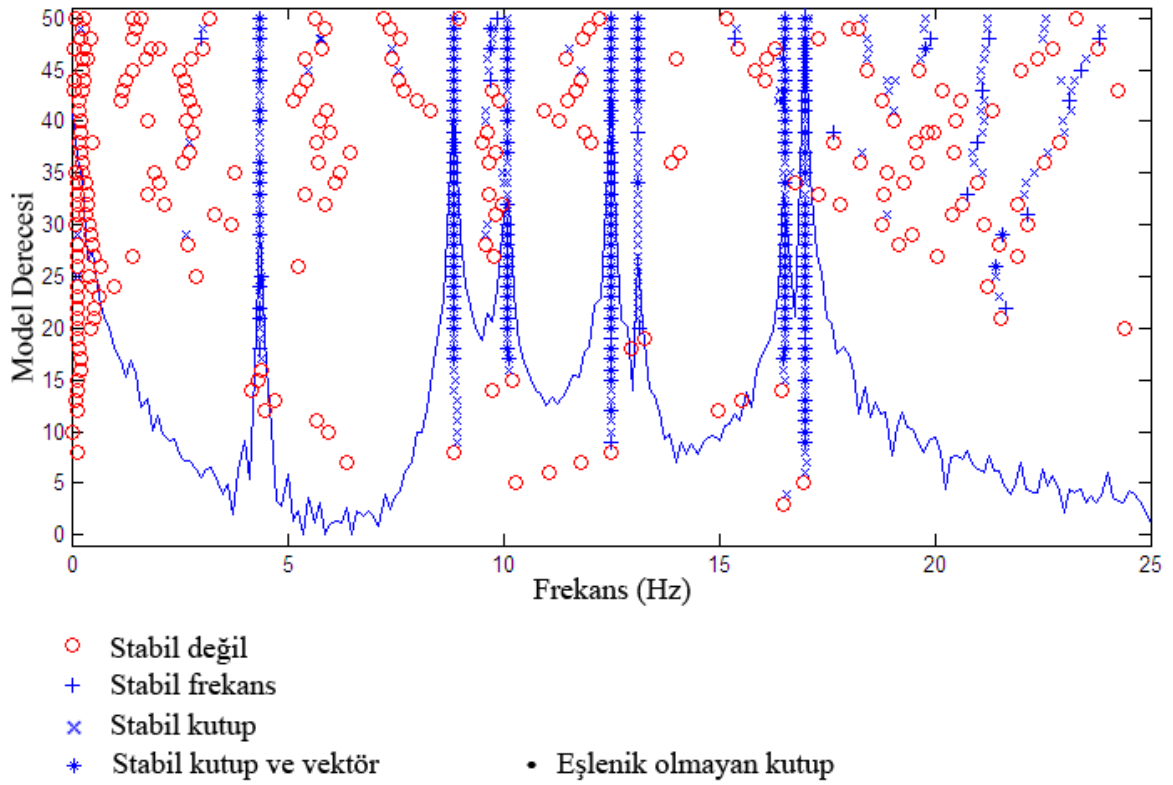
Gerçek modlar için bu indeks bire yaklaşıp. Düşük indeksli bir mod oldukça kompleksdir ve yaklaşık normal modların beklendiği durumlarda hesap veya gürültü modu

gösterir (yani orantılı ya da çok düşük sönümlü yapılarda). Kontrolsüz fazlı modlarda yöntemi uygulanabilir hale getirmek için, ilk olarak modal vektör katsayıları vektörün ortalama fazı üzerinde döndürülür (Heylen vd., 2007).

1.6.4. Stabilite Diyagramı

Stabilite diyagramları, model derecesinin bir fonksiyonu olarak, frekans, sönüm ve olası modal katılım faktörlerinin hesaplarının grafik üzerinden takip edilmesine yararlar. Model derecesi artırıldıkça, çok daha fazla modal frekans hesaplanır. Ancak, doğru model derecesi bulunduğu zaman fiziki modal parametrelerin hesapları dengelenecektir. Ölçülen veriler içerisinde çok aktif olan modlar için modal parametreler çok düşük bir model derecesinde dengeye ulaşacaklardır. Ölçülen veriler içerisinde zayıf olarak tetiklenmiş modlar için, çok yüksek bir model derecesi seçilene kadar modal parametreler dengelenemeyebilir. Bununla beraber, fiziksel olmayan modlar bu süreç boyunca hiçbir zaman dengelenemeyeceklerdir ve böylelikle modal parametre veri kümesinden çok daha kolay bir şekilde ayırt edilebileceklerdir (Allemang, 1999).

Ölçülen veri kümesindeki tutarsızlıklar (frekans ötelemeleri, sızma hataları, vb.) kararlılığı belirsiz hale getirecektir ve stabilite diyagramının kullanımını zorlaştıracaktır. Genellikle, değerlendirilen modal parametrelerin her birinin stabilitesi için yüzde içerisinde bir tolerans miktarı verilir. Şekil 1.19'da bir stabilite diyagramı örneği gösterilmektedir. Bu örnekte stabilite diyagramı üzerine FRF'lerin toplamı çizilmiştir. Stabilite diyagramlarında arka planda herhangi bir mod gösterge fonksiyonu da kullanılabilir (Allemang, 1999).



Şekil 1.19. Model derecesi ve modların yerini belirlemek için kullanılan genel bir stabilite diyagramı örneği ve kullanılan simgelerin açıklamaları (Allemang, 1999)

1.7. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sonlu eleman modelinin, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile daha iyi bir uyum göstermesi için yapılan çalışmalar, sonlu eleman model iyileştirmesi olarak adlandırılır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde atılacak ilk adım sonlu eleman model sonuçları ile deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Eğer modeller arasında görülen fark, kabul edilebilir sınırlar içerisinde ise sonlu eleman model iyileştirmesine gerek görülmez.

Sonlu eleman model iyileştirme çalışması 3 kısma ayrılabilir. Bunlar;

- Sonlu Eleman analizi sonuçları ile deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Tez çalışmasında bu karşılaştırma, üretilen bilgisayar programı içerisindeki hedef fonksiyonu ve nonlinear eşitsizlik sınırlandırma fonksiyonları kullanılarak yapılmaktadır.)
- Sonlu eleman analizi ile deneysel modal analiz sonuçları arasındaki uyumu sağlamak için sonlu eleman modelinin modifiye edilmesi (Bu modifikasyon

hazırlanan bilgisayar programındaki optimizasyon modülü tarafından yapılmaktadır.)

- c) İyileştirilmiş olan sonlu eleman modelinin analizi (Sonlu eleman analizleri, geliştirilen bilgisayar programının, ANSYS sonlu eleman analiz programını çağırması ile yapılmaktadır).

Optimizasyona geçmeden önce, deneysel model ile analitik model arasında ilişkinin kurulması konusunda geliştirilen tekniklerin ortaya konulması gerekmektedir. Analitik ve deneysel modeller arasında karşılaştırma yapabilmemize imkan veren bu yöntemler, model iyileştirme optimizasyon çalışması içerisinde her aşamada kullanılacaklardır.

1.7.1. Model İyileştirmede Kullanılan Karşılaştırma ve Korelasyon Teknikleri

Korelasyon, analitik modelin doğruluğunu değerlendirmenin ilk adımı olarak tanımlanabilir. Deney verileri sonlu eleman modelinin doğruluğunu değerlendirmek için referans alınırlar. Korelasyon yöntemleri, analitik modal veriler ile deneysel modal verileri karşılaştıran bir takım tekniklerden meydana gelir. Bu bölümde en yaygın olarak kullanılan korelasyon teknikleri hakkında kısaca bilgi verilecektir.

1.7.1.1. Doğal Frekansların Korelasyonu

İki modal modelin ilişkisini inceleme konusundaki en yaygın ve basit yaklaşım, doğal frekanslarının karşılaştırılmasıdır. Doğal frekanslar arasında denklem (143)'deki gibi bir fark yüzdesi tanımlanabilir ya da denklem (144)'deki gibi frekansların yığılması ile oluşturulan bir gösterge kullanılabilir (Jaishi, 2005).

$$d_{ij} = \frac{|fr_{dj} - fr_{aj}|}{fr_{dj}} \times 100 \quad (143)$$

$$d_r = \left[\frac{\sum_{j=1}^{n_r} (fr_{dj} - fr_{aj})}{\sum_{j=1}^{n_r} fr_{dj}^2} \right] \times 100 \quad (144)$$

Burada fr_{dj} ve fr_{aj} sırasıyla j. modun deneysel ve analitik frekanslarıdır ve n_f ölçülen frekansların sayısıdır (Jaishi, 2005).

1.7.1.2. Mod Şekillerinin Görsel Karşılaştırması

İki modal veri kümesi arasındaki görsel karşılaştırma, analizcinin grafiksel olarak sunulan verilerle ilgili sayısal olmayan görsel değerlendirmesini içerir. Görsel değerlendirme genel olarak mod şekillerinin animasyonlarının karşılaştırılması ve doğrudan doğruya frekansların karşılaştırılmasından ibarettir (Jaishi, 2005).

Bu karşılaştırma yöntemi, modeller arasındaki uyum hakkında genel bir fikir verir.

1.7.1.3. Modal Güvence Kriteri

Sonlu eleman model iyileştirmesi, modal verilere dayandığı zaman, mod eşleşmesi en kritik konulardan birisi olur. Özellikle yüksek modal yoğunluklu yapılar için modların çakışması en zor işlerden birisidir. MAC kriteri, Allemang ve Brown (1982) tarafından tanımlanmıştır ve çoğunlukla analitik ve deneysel mod şekillerinin otomatik eşleştirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılır. Uygulaması kolaydır, kütle ve rijitlik matrislerini gerektirmez. MAC kriteri aşağıdaki gibi tanımlanır (Jaishi, 2005):

$$MAC_j = \frac{(\Phi_{aj}^T \Phi_{dj})^2}{(\Phi_{aj}^T \Phi_{aj})(\Phi_{dj}^T \Phi_{dj})} \quad (145)$$

Burada Φ_{aj} j. analitik modal vektördür ve Φ_{dj} de j. deneysel modal vektördür. MAC değeri 0 ile 1 değeri arasında sınırlıdır. 1 değeri mükemmel bir korelasyon olduğu anlamına gelmektedir. Sıfıra eşit olan bir MAC değeri ise iki mod arasında herhangi bir korelasyon olmadığını gösterir (Jaishi, 2005).

Deneysel ve analitik mod şekilleri, ölçekleri aynı olmak zorunda olmamalarına rağmen aynı sayıda eleman içermelidirler. Ayrıca, ivmeölçerler ile kayıt alınan düğüm noktalarının analitik modelde karşılığı olmalıdır. Aksi halde modal vektörler ile yapılan karşılaştırma anlamlı olmaz. MAC kriterinde modal vektörler hesaba katılmadan önce

normalleştirilerek birbirleri ile mukayese edilecek formata getirilmelidirler. Eğer modlar sayısal bir düzen içerisinde eşleşirlerse, MAC matrisinin köşegenlerinin yüksek değerleri (> 0.9) iyi bir korelasyonu ve 0.05 den düşük olan değerleri de korelasyon sağlanamamış olan modları gösterir (Jaishi, 2005).

1.7.2. Genel Optimizasyon Algoritması

Optimizasyon, optimal olarak tanımlanabilen bir tasarım parametreleri kümesini $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ bulmak için kullanılır. Genellikle, minimize edilecek olan hedef fonksiyonu, $f(x)$, sırasıyla eşitlik sınırlamalarının ($g_i(x) = 0 (i = 1, \dots, m_e)$), eşitsizlik sınırlamalarının ($g_i(x) \leq 0 (i = m_e + 1, \dots, m)$) ve alt ve üst parametre sınırlarının (\underline{x}, \bar{x}) etkisi altındadır. Genel optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilir (Jaishi, 2005):

$$\begin{aligned} &\text{hedef min } f(x) \\ &x \in \mathcal{R}^n \\ \text{Sınırlamalar } &g_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \\ &g_i(x) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \\ &\underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{aligned} \quad (146)$$

Burada x tasarım parametreleri vektörü ($x \in \mathcal{R}^n$), $f(x)$ skaler bir değer üreten hedef fonksiyonu ($f(x): \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$) ve $g(x)$, $x(g(x): \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^m)$ durumunda değerlendirilen eşitlik veya eşitsizlik sınırlamalarının değerlerini üreten vektör fonksiyonudur (Jaishi, 2005).

Bu tez çalışmasında yukarıda gösterilen sınırlandırma fonksiyonlarından lineer olmayan eşitsizlik fonksiyonu ile beraber, parametre alt ve üst sınırlamaları da kullanılacaktır.

Optimizasyon problemleri, sınırlamaların olmasına ya da olmamasına bağlı olarak sınırlandırılmış veya sınırlandırılmamış şeklinde kategorize edilebilirler. Birçok pratik problemde mevcut olan sınırlandırılmış optimizasyonda tasarım değişkenleri rastgele seçilemezler, belirli gereksinimleri karşılamaları gerekmektedir. Optimizasyon algoritmaları iteratif olarak ilerleyerek yaklaşık bir çözüm ararlar. Değişkenlerin optimal

değerlerinin başlangıç tahmini ile başlarlar ve çözüme ulaşana kadar seri halinde geliştirilmiş tahminler üretirler (Jaishi, 2005).

Optimizasyon konusunda birçok yaygın yöntem olmasına karşılık, yöntemler açık olarak optimizasyon sırasında kullanılan ya da kullanılmayan türev bilgisine göre sınıflandırılabilirler. Genellikle, optimizasyon yöntemleri üç kategoriye ayrılabilir (Jaishi, 2005):

- Yalnızca fonksiyonel değerlendirmeleri kullananlar (direk yöntemler)
- Gradyan değerlendirmelerini kullananlar
- Gradyan ve fonksiyon değerlendirmelerinin yanında Hessian değerlendirmelerini de kullananlar.

Denklem (147)'de genel bir iterasyon prosedürü gösterilmektedir (Jaishi, 2005):

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (147)$$

Burada \mathbf{d}_k arama yönüdür ve $f_{k+1} < f_k$ olması için $\alpha_k > 0$ seçilir. Sadece fonksiyon değerlendirmelerini kullanan arama yöntemleri, çok fazla nonlineer olan ya da birtakım süresizlikleri olan problemler için en uygun optimizasyon yöntemleridir. Benzer şekilde, ileri sıfır derece yöntemleri olarak da adlandırılan altproblem yaklaşım yöntemi türev bilgisine ihtiyaç duymaz. Gradyan tabanlı yöntemlerde, en az f 'nin gradyanının makul bir maliyet ile elde edilebilir olduğu kabul edilir. Gradyan tabanlı yöntemlerde, arama yönünün (\mathbf{d}_k) bulunma yöntemleri aşağıda açıklandığı gibidir (Jaishi, 2005).

1.7.2.1. Arama Yönü

En dik iniş yönteminde, denklem (147) için arama yönü aşağıdaki gibidir (Jaishi, 2005):

$$\mathbf{d}_k = -\nabla f_k \quad (148)$$

En dik iniş yönü klasik emniyet bölge yöntemi içerisindeki bir parça olarak ortaya çıkar. Eğer bağımsız modda kullanması gerekirse, bazı hat arama teknikleri ile

birleştirilmelidir. Benzer şekilde, Newton'un yöntemi için, f 'yi lokal olarak modellemede kuadratik bir ifade ile Taylor'un genişletmesi kullanılabilir (Jaishi, 2005):

$$f(x_k + d) \approx f_k + d^T \nabla f_k + \frac{1}{2} d^T H_k d = M_k(d) \quad (149)$$

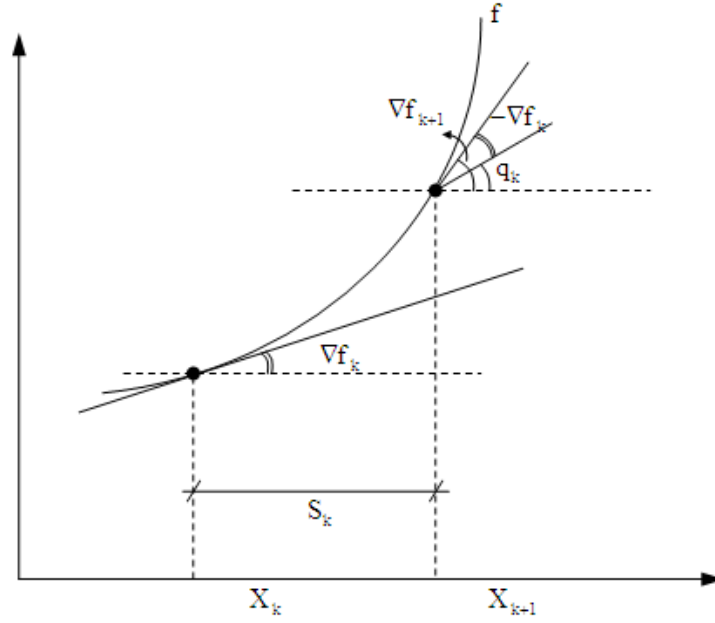
Eğer hedef fonksiyonu H_k 'nin ikinci türevinin matrisi pozitif belirli ise, $M_k(d)$ 'nin minimumu $\nabla f_k + H_k d_k = 0$ kritik noktasındadır. Bu nedenle, Newton'un yönü aşağıdaki gibi verilir (Jaishi, 2005):

$$d_k = -H_k^{-1} \nabla f_k \quad (150)$$

Denklem (150)'deki Newton'un yönünün iki sakıncası vardır. Birincisi, $\nabla^2 f_k$ pozitif belirli olmadıkça, hesaplanan d_k yönü kesin bir iniş yönü olmaz. Bir diğer sakıncası, ikinci türev bilgisinin açık bir kullanımının yapılmasıdır. Bunun değerlendirmesi zor olabilir, maliyetli olabilir ve uygulamaya bağlı olarak tümünü tersine çevirmek maliyetlidir. Bu yüzden quasi-Newton yönteminde, simetrik pozitif belirli, kolaylıkla hesaplanabilir ve ters çevrilebilir olan yaklaşık Hessian matrisi H_k aranır ve bir şekilde $\nabla^2 f_k$ 'nin hareketine yaklaşır. H_k her bir iterasyonda hesaplanamaz fakat son adımların çoğunda gradyan bilgisi kullanılarak güncellenir (Jaishi, 2005).

$$H_k d_k = -\nabla f_k \quad (151)$$

Varsayılan tekrarlamalı x_k ve yaklaşık Hessian matrisi H_k göz önünde tutulursa, lineer sistem d_k yönünü üretmek için çözülebilir. H_k 'nin güncellemeleri, gradyandaki değişikliklerin arama yönü boyunca f 'nin ikinci derece türevi ile ilgili bilgileri sağladığı gerçeğinden yararlanılarak hesaplanır. Quasi-Newton yöntemlerinde, yeni Hessian tahmini H_{k+1} , Şekil 1.20'nin yardımı ile tanımlanan quasi-Newton koşulu veya sekant denklemini karşılar. Bu koşula ait ifadeler denklem (152) – denklem (154)'de gösterildiği gibidir (Jaishi, 2005).



Şekil 1.20. Quasi-Newton yönteminin grafiksel yorumu (Jaishi, 2005)

$$H_{k+1}s_k = q_k \quad (152)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (153)$$

$$q_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) \quad (154)$$

Tipik olarak, H_{k+1} üzerinde pozitif kesinlik, simetri ve ardışık yaklaşımlar gibi bazı ilave ihtiyaçlar (veya ters şekli) uygulanır. Genellikle, Broyden (1970), Fletcher (1970), Goldfarb (1970) ve Shanno (1970)'nun formülü (BFGS), genel amaçlı bir yöntemde kullanım için en etkili yöntem olarak görülür. Formül aşağıdaki gibidir (Jaishi, 2005):

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k^T s_k H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (155)$$

Bir başlangıç noktası olarak, H_0 herhangi bir pozitif matrise (örneğin özdeşlik matrisi I) ayarlanabilir. Hessian matrisinin (H) ters dönmesinden kaçınmak için, Hessian matrisinin tersinin (H^{-1}) yaklaşık olarak belirlendiği diğer formüller kullanılarak H'nin

doğrudan tersinin alınmasından kaçınıldığı bir güncelleştirme yönteminin türevi alınabilir (Jaishi, 2005).

1.7.2.2. Hat Arama ve Emniyet Bölgesi Stratejileri

Hat arama terimi, denklem (147)'deki α_k 'nın seçimi için bir prosedür ile ilgilidir. Newton veya bir quasi-Newton yöntemi kullanılır, daha sonra güncelleştirme denklemi (156), x_0 'ın minimum çözüm olan x^* 'a yeterli yakınlıkta olmasını sağlayan kuadratik veya süperlineer bir hızlı yakınsamayı verir (Jaishi, 2005).

$$x_{k+1} = x_k + d_k \quad (156)$$

Ancak, global yakınsamayı elde etmek için, temel güncelleştirme modifiye edilmelidir. f_{k+1} 'de f_k 'ya nazaran yeterli bir azaltım gereklidir. Eğer $x_k + d_k$ ile bu başarılamaz ise, o zaman denklem (147)'de α_k , hat aranarak ya da hep beraber bir emniyet bölgesi yaklaşımı kullanılması ile d_k yönü modifiye edilerek bulunur (Jaishi, 2005).

Hat arama yöntemlerinde, d_k arama yönü sabit tutulur ve denklem (147)'ye göre bir sonraki iterasyonu tanımlayacak olan α_k uzunluğunda bir adım için arama gerçekleştirilir. Tam bir hat araması gerçekleştirilmez, yani, çözümün masraflı olmasından dolayı tek boyutlu minimizasyon problemi $\left(\min_{\alpha} f(x_k + \alpha d_k) \right)$ çözülmez. Hedef fonksiyonu f 'deki yeterli bir azalmayı sağlayan ilk α 'nın α_k olarak kabul edilmesi ile zayıf bir hat araması gerçekleştirilir. Bu arama yönünde oluşan hat, içindeki minimum bir arama prosedürü kullanılarak veya interpolasyon ya da ekstrapolasyon içeren bir polinom yöntemi ile yaklaşık olarak belirlenir. Arama yönü ve hat arama ile ilgili bu kavramlar, denklem (146)'daki sınırlandırılmış optimizasyon yönteminin çözümünde kullanılırlar (Jaishi, 2005).

1.7.3. Model İyileştirmede Kullanılan Optimizasyon Algoritması

Herhangi bir optimizasyon probleminin çözümü için öncelikli olarak, analiz sonucunda neyin hedeflendiği açık olarak ortaya konmalıdır. Optimizasyon algoritmalarında üretilen bir hedef fonksiyonun en büyük ya da en küçük değeri, üretilen sınırlandırma fonksiyonlarına bağlı olarak hesaplanır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde amaç, sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen dinamik karakteristikler (frekans ve mod şekilleri) arasındaki farkı kabul edilebilir sınırlar içerisine çekmektir. Burada hedef fonksiyonu eğer sonlu eleman modeli ile deneysel model arasındaki dinamik parametreler arasındaki farkı ifade eden bir fonksiyon olursa, kullanılacak olan optimizasyon algoritması bir minimizasyon problemi şeklinde olmalıdır. Bununla beraber kullanılan iyileştirme parametrelerinin bir alt ve üst sınırının olması yanında bir de sınırlandırma fonksiyonu kullanılacağından, sınırlandırılmış bir optimizasyon probleminin çözümü gerekmektedir. Bu çözüm için en uygun çözüm yöntemi Ardışık Kuadratik Programlama Yöntemi olarak belirlenmiştir.

1.7.3.1. Ardışık Kuadratik Programlama (Sequential Quadratic Programming - SQP) Algoritması

Sınırlandırılmış optimizasyonda genel amaç problemi çözülebilen ve iterasyon sürecinin temeli olarak kullanılabilen daha kolay bir altprobleme dönüştürmektir. Eski yöntemlerin büyük kısmının önemli bir özelliği, sınırlandırılmış problemi, sınırın limitine yakın ya da ötesindeki sınırlamalar için bir fonksiyon kullanarak sınırlandırılmamış bir probleme dönüştürmektir. Bu yolla, sınırlandırılmış problem parametrik hale getirilmiş bir sınırlandırılmamış optimizasyonlar serisi kullanılarak çözülür. Denklem (146)'daki optimizasyon problemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Jaishi, 2005):

$$\begin{aligned}
 f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \cdot \nabla g_i(x^*) &= 0 \\
 \nabla g_i(x^*) &= 0 \quad i = 1, \dots, m_e \\
 \lambda_i^* &\geq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{157}$$

Bu denklem sisteminin çözümü, birçok lineer olmayan programlama algoritmasının esasını teşkil etmektedir. Bu algoritmalar direk olarak Lagrange çarpanlarını hesaplamaya çalışırlar. Bu yöntemler, her bir büyük iterasyonda bir kuadratik programlama (Quadratic Programming – QP) alt-problemi çözüldüğünden, genel olarak ardışık kuadratik programlama (Sequential Quadratic Programming - SQP) yöntemleri olarak adlandırılırlar. SQP yöntemleri, Schittowski (1985) tarafından ifade edildiği gibi lineer olmayan programlama yöntemlerinin en gelişmişidir. Yöntem sınırlandırılmış optimizasyon için, Newton'un yönteminin sınırlandırılmamış optimizasyondaki gibi modellenmesine izin verir. SQP uygulaması üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar:

- Lagrange fonksiyonun Hessian matrisinin güncelleştirilmesi
- Kuadratik programlama probleminin çözümü
- Hat taramasının ve değer fonksiyonunun hesabı

şeklinde sıralanırlar (Jaishi, 2005).

1.7.3.1.1. Lagrange Fonksiyonunun Hessian Matrisinin Güncellenmesi

Her bir büyük iterasyonda, Lagrange fonksiyonunun Hessian matrisinin pozitif belirli bir quasi-Newton yaklaşımı, H, denklem (155)'de gösterilen BFGS yöntemi kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır (Jaishi, 2005):

$$q_k = \nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1}) - \left(\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \nabla g_i(x_k) \right) \quad (158)$$

Burada $(Y_i, i = 1, \dots, m)$ Lagrange çarpanlarının bir tahminidir ve n tasarım parametrelerinin sayısıdır. Powell (1978), çözüm noktasında pozitif belirsiz olabilmesine rağmen, Hessian pozitif belirlisinin tutulmasını tavsiye etmektedir. Bir pozitif belirli Hessian, her bir güncelleştirmede $q_k^T s_k$ 'nin pozitif olmasının sağlanması ve H matrisinin s_k 'nin denklem (153)'de tanımlandığı bir pozitif belirli matris ile başlatılmasıyla korunabilir. $q_k^T s_k$ pozitif olmadığı zaman, $q_k^T s_k > 0$ olması için q_k bir eleman üzerinde modifiye edilir. Bu modifikasyondaki genel amaç, pozitif belirli bir güncelleştirmeye katkı yapan q_k 'nin elemanlarını mümkün olduğu kadar az tahrip etmektir. Bundan dolayı,

modifikasyonun başlangıç aşamasında, $q_k \times s_k$ 'nin en negatif elemanı defalarca ikiye bölünür. Bu prosedür, $q_k^T s_k$ 10^{-5} 'e eşit veya daha büyük oluncaya kadar devam ettirilir. Eğer bu prosedürden sonra $q_k^T s_k$ hala pozitif değilse, denklem (159)'da görüldüğü gibi, q_k sabit bir skaler (w_c) ile çarpılan bir vektör (v) ilave edilerek modifiye edilir ve w değeri $q_k^T s_k$ pozitif olana kadar sistematik olarak artırılır. Bu çözümlene denklem (159)'da görüldüğü gibi ifade edilir (Jaishi, 2005).

$$q_k = q_k + w_c v$$

$$v_i = \nabla g_i(x_{k+1}) \cdot g_i(x_{k+1}) - \nabla g_i(x_k) \cdot g_i(x_k) \quad (159)$$

$$\left\{ \text{eğer } (q_k)_i \cdot w_c < 0 \text{ ve } (q_k)_i \cdot (s_k)_i < 0 (i = 1, \dots, m) \text{ ise} \right\}$$

$$v_i = 0 \quad \left\{ \text{Yukarıdaki şartların dışında} \right\}$$

1.7.3.1.2. Kuadratik Programlama Probleminin Çözümü

SQP yönteminin her bir büyük iterasyonunda, bir QP problemi, denklem (160)'da gösterilen şekilde çözülür. Burada, A_i $m \times n$ boyutlu A matrisinin i . satırını göstermektedir (Jaishi, 2005).

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & d \in \mathfrak{R}^n \quad q(d) = \frac{1}{2} d^T H d + c^T d \\ & A_i d = b_i \quad i = 1, \dots, m_e \\ & A_i d \leq b_i \quad i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (160)$$

Kullanılan yöntem aktif küme stratejisidir. Çözüm prosedürü iki alandan oluşmaktadır. Birinci aşama uygulanabilir bir noktanın hesabını içermektedir, ikinci aşama çözüme yakınsayan uygulanabilir iteratif bir serinin üretimini kapsar. Bu yöntemde, çözüm noktasındaki aktif sınırlandırmaların bir tahmini olan aktif küme (\bar{A}_k) korunur (Jaishi, 2005).

\bar{A}_k her bir k . iterasyonda güncelleştirilir ve bu bir arama yönü (\hat{d}_k) için temel oluşturmak amacıyla kullanılır. Eşitlik sınırlandırmaları daima aktif küme (\bar{A}_k) içerisinde kalır. Burada \hat{d}_k değişkeni için işaretli gösterim usulü SQP yöntemini büyük iterasyonlarındaki d_k 'dan ayırt etmek için kullanılır. Arama yönü \hat{d}_k hesaplanır ve aktif sınırlandırma limitlerinde kaldığı sürece hedef fonksiyonunu minimize eder. Aktif kümenin \bar{A}_k tahmini için uygulanabilir bir altalan, sütunları ortogonal olan temel bir Z_k 'dan kurulur (yani $\bar{A}_k Z_k = 0$). Böylece, Z_k 'nın sütunlarının herhangi bir kombinasyonunun lineer bir toplamından meydana gelen bir arama yönünün aktif sınırlandırmaların limitlerinde kalacağı garanti edilir (Jaishi, 2005).

Z_k matrisi, \bar{A}_k matrisinin QR ayrıştırmasının son $m - l_c$ sütunlarından oluşturulur. Burada l_c aktif sınırlandırmaların sayısıdır ve $l_c < m$ dir. Yani, Z_k aşağıdaki gibi olur (Jaishi, 2005):

$$Z_k = Q[:, l_c + 1 : m] \quad \text{ve} \quad Q^T \bar{A}_k^T = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (161)$$

Burada R , \bar{A}_k ile aynı boyutta olan bir üst üçgensel matristir ve Q , $\bar{A}_k = Q * R$ ifadesini sağlayan birim matristir. Z_k 'nın bulunmasıyla, \hat{d}_k 'nin aktif sınırlandırmaların anlamsız uzayında bulunduğu $q(d)$ 'yi minimize eden yeni bir arama yönü \hat{d}_k araştırılır. Bundan sonra, p 'nin fonksiyonu olarak \hat{d}_k 'nin yerine kuadratik fonksiyon hesaba katılırsa, denklem (162) elde edilir. Bu p_v ile ilgili olarak farklılaştırılır ise denklem (163) elde edilir (Jaishi, 2005).

$$q(p_v) = \frac{1}{2} p_v^T Z_k^T H Z_k p_v + c^T Z_k p_v \quad (162)$$

$$\nabla q(p_v) = Z_k^T H Z_k p_v + Z_k^T c \quad (163)$$

Burada $\nabla q(p_v)$, kuadratik fonksiyonun tasarlanan gradyanı olarak adlandırılır. Çünkü Z_k ile tanımlanan altalanda tasarlanan gradyandır. $Z_k^T H Z_k$ terimi tasarlanan Hessian olarak adlandırılır. Hessian matrisinin (H) pozitif belirli olduğu kabul edilirse, denklem (164)'de görüldüğü gibi lineer denklem sisteminin çözümü olan Z_k ile tanımlanan altalandaki $q(p_v)$ fonksiyonu, $\nabla q(p_v) = 0$ olduğunda minimum olur. O zaman, denklem (165)'de görüldüğü gibi bir adım atılır (Jaishi, 2005).

$$Z_k^T H Z_k p_v = -Z_k^T c \quad (164)$$

$$x_{k+1} = x_k + \hat{d}_k \quad (\hat{d}_k = Z_k^T p) \quad (165)$$

Her bir iterasyonda, hedef fonksiyonunun kuadratik yapısından dolayı α adım uzunluğunda yalnızca iki seçenek vardır. \hat{d}_k boyunca atılan bir birimlik adım \bar{A}_k nın anlamsız uzayı ile sınırlanan fonksiyonun minimumuna doğru tam bir adımdır. Eğer sınır ihlalleri olmadan böyle bir adım atılabilirse, bu QP'nin çözümü olur (denklem (161)). Aksi takdirde, en yakın sınıra doğru \hat{d}_k boyunca atılan adım birim adımdan daha küçüktür ve bir sonraki iterasyondaki aktif küme içerisinde yeni bir sınırlama yer alır. Herhangi bir \hat{d}_k yönünde sınırlama limitlerine olan mesafe aşağıdaki gibi olur (Jaishi, 2005):

$$\alpha = \min_i \left\{ \frac{-(A_i x_k - b)}{A_i \hat{d}_k} \right\} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (166)$$

Bu denklem aktif küme içerisinde olmayan sınırlandırmalar için tanımlanmıştır ve burada \hat{d}_k yönü sınırlandırma limitine doğrudur, yani, $A_i \hat{d}_k > 0$, $i = 1, \dots, m$. Aktif küme içerisinde minimumun yeri olmadan n adet bağımsız sınırlandırma yer aldığı zaman, lineer denklemlerin tekil olmayan kümelerini karşılayan Lagrange çarpanları (Υ_k) hesaplanır (Jaishi, 2005).

$$\bar{A}_k^T \Upsilon_k = c \quad (167)$$

Eğer Υ_k 'nin bütün elemanları pozitif ise, x_k QP'nin optimal çözümüdür (denklem (161)). Ancak, eğer Υ_k 'nin herhangi bir bileşeni negatif olursa ve bir eşitlik sınırlandırmasına uymaz ise, o zaman aktif kümeden uygun elemanlar silinir ve yeni bir iterasyon yapılır (Jaishi, 2005).

1.7.3.1.3. Hat Arama ve Değer Fonksiyonu

QP alt probleminin çözümünde, yeni bir iterasyon ($x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$) oluşturmak için kullanılan bir d_k vektörü üretilir. Adım uzunluk parametresi, değer fonksiyonu içerisinde yeterli bir azalma sağlamak için belirlenir. Sınırlandırılmış problemlerde, iterasyon yalnızca f 'yi küçültmek için değil aynı zamanda sınırlamaları karşılamak için de yapılır. Bu iki amaç çoğunlukla birbirleri ile çakışır, bu yüzden bunları karşılaştırmak ve bir noktanın diğerinden daha iyi olup olmadığını belirlemek için kriter olarak kullanılan bir değer fonksiyonu tanımlamak gerekmektedir. Han (1977) ve Powell (1978) tarafından denklem (168)'de gösterildiği gibi kullanılan değer fonksiyonu bu uygulamada kullanılacaktır. Han ve Powell denklem (169)'da görülen penaltı parametresinin kurulmasını da tavsiye etmişlerdir (Jaishi, 2005).

$$\Psi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m_c} r_i \cdot g_i(x) + \sum_{i=m_c+1}^m r_i \cdot \max\{0, g_i(x)\} \quad (168)$$

$$r_i = (r_{k+1})_i = \max_i \left\{ \Upsilon_i, \frac{1}{2}((r_k)_i + \Upsilon_i) \right\}, i = 1, \dots, m \quad (169)$$

Bu, en son durumda aktif QP çözümü içerisinde aktif olmayan sınırlandırmaların pozitif katkılarına izin verir. Bu uygulamada, başlangıçta penaltı parametresi r_i aşağıdaki gibi kurulur (Jaishi, 2005):

$$r_i = \frac{\|\nabla f(x)\|}{\|\nabla g_i(x)\|} \quad (170)$$

Burada $\|\cdot\|$, I_2 normunu göstermektedir. Bu daha küçük gradyanlı sınırlandırmalardan penaltı parametresine daha büyük katkılar sağlar (Jaishi, 2005).

1.7.3.2. SQP Algoritmasının Sonlu Eleman Model İyileştirmede Kullanımı

Bahsedilen SQP algoritması optimum sonlu eleman modelinin elde edilmesi için kurulacak olan model iyileştirme programında kullanılmıştır. Yapılan çözümlerinde sonlu eleman modelinin adım adım çözümü için ANSYS programı kullanılmış, optimizasyon için MATLAB Optimization Toolbox (2009d)'da yer alan optimizasyon fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Programda kullanılacak olan SQP yöntemi sınırlandırılmış optimizasyon tekniklerinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir.

SQP algoritması içerisinde kullanılacak olan hedef fonksiyonu ve sınırlandırma fonksiyonları, sonlu eleman model iyileştirmesi konusunda yapılan yazılım çalışmasının başlangıç kısmını oluşturmaktadır

1.7.3.2.1. Hedef Fonksiyonu

Friswell ve Mottershead (1995) ve Maia ve Silva (1997), sonlu eleman model iyileştirmesinde mevcut olan diğer yaklaşımları da içine alan bir en küçük kareler probleminin çözümünü önermişlerdir. En küçük kareler yaklaşımı oldukça etkilidir ve birçok çalışmada görüldüğü üzere (Link, 1993, Link vd., 1996; Link, 1999a; Link, 1999b; Mottershead vd., 2000) iyileştirme probleminin çözümünde yaygın bir yol haline gelmiştir. Bir hedef fonksiyonu f , bir yapının analitik hesabı ile gerçek davranışı arasındaki sapmayı yansıtır. Sonlu eleman model iyileştirme analizi, x^* tasarım kümesinin minimizasyon problemi olarak görülebilir (Jaishi, 2005):

$$\begin{aligned} f(x^*) &\leq f(x), \quad \forall x \\ \underline{x}_i &\leq x \leq \bar{x}_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (171)$$

Burada tasarım değişkenleri üzerindeki üst (\bar{x}_i) ve alt (\underline{x}_i) sınırlar gereklidir. Genel bir en küçük kareler problemi içerisindeki hedef fonksiyonu farkların karelerinin toplamı olarak tanımlanır (Jaishi, 2005):

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n_r} [z_j(\mathbf{x}) - \bar{z}_j]^2 = \sum_{j=1}^{n_r} r_j(\mathbf{x})^2 \quad (172)$$

Burada her bir $z_j(\mathbf{x})$ optimizasyonun ya da tasarım değişkenlerinin $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n$ lineer olmayan bir fonksiyonu olan analitik bir modal değeri temsil eder ve \bar{z} ölçülen modal parametreleri göstermektedir. Mükemmel bir çözüm elde etmek için, kalıntıların sayısı (n_r), bilinmeyen parametrelerinin (\mathbf{x}) sayısından (n) daha büyük olmalıdır (Jaishi, 2005).

Denklem (172) temel en küçük kareler fonksiyonunu göstermektedir. Genellikle, kalıntı vektörü tanımlanan modal veriler, doğal frekanslar, modal vektörler gibi ilişkili veriler arasındaki farkları içermektedir (Jaishi, 2005).

Tez çalışmasında hedef fonksiyonu olarak farkların toplamının karesi yerine sadece farkların toplamı alınmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, karelerin alınmasının sonuç üzerinde bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

1.7.3.2.1.1. Doğal Frekanslar

Yapı dinamiğinde sonlu eleman model iyileştirmenin en önemli kalıntı vektörü sayısal ve deneysel doğal frekanslar arasındaki farklılıklardır. Doğal frekans kalıntısı aşağıdaki gibi formülize edilir (Jaishi, 2005):

$$r_f(\mathbf{a}) = \frac{\lambda_{aj} - \lambda_{dj}}{\lambda_{dj}} \quad j \in \{1, \dots, m_f\} \quad (173)$$

Burada $\lambda_j = (2 \times \pi \times fr_j)^2$ özdeğeri içerisindeki fr_j , j . moda karşılık gelen frekans değeridir. λ_{aj} ve λ_{dj} sırasıyla analitik ve ona karşılık gelen deneysel özdeğerlerdir. m_f iyileştirme işleminde kullanılan belirlenmiş frekansların sayısını göstermektedir. Her bir frekans kalıntısında benzer bir etki elde etmek için r_f hesabında rölatif farklılıklar dikkate alınır, çünkü daha yüksek frekanslar analitik ve deneysel sonuçlar arasında daha net farklılıklar verir (Jaishi, 2005).

Frekanslar deney sırasında daha doğru olarak ölçülebilir ve tanımlanabilirler. Doğal frekanslar yapı hakkında bize global bir bilgi verirler. Bu yüzden model iyileştirme işleminde kullanılması zorunlu olan değerlerdir ve optimizasyon probleminin çözümünde önemli etkiye sahiptirler. Ancak, yüksek frekanslar, düşük frekanslar kadar hassas ölçülmezler. Yalnızca frekanslar arasındaki farkın minimize edildiği bir optimizasyon problemi, sonlu eleman model iyileştirmede amacı tam olarak karşılayamaz. Optimizasyon probleminin çözümünde analitik ve deneysel modellerden elde edilen modal vektörler arasındaki uyumu denetleyen sınırlandırma fonksiyonu üretilerek optimizasyon algoritmasına dahil edilirse tam bir model iyileştirme optimizasyon algoritması kurulmuş olur (Jaishi, 2005).

1.7.3.2.2. Sınırlandırma Fonksiyonu

Ardışık kuadratik programlama optimizasyon algoritması içerisinde hedef fonksiyonu için minimizasyon taramasının hangi sınırlamalar içerisinde yapılacağını net olarak belirlenebilmesi için sınırlandırma fonksiyonu üretilmelidir. Oluşturulan fonksiyonun içerisinde sıfırdan küçük olması istenilen ifadeler yer almalıdır. Sonlu eleman model iyileştirmesi için kullanılacak olan sınırlandırma fonksiyonu aşağıdaki gibi olmalıdır:

$$f(x_i) - f_{\text{limit}} \leq 0 \quad (174)$$

Burada $f(x_i)$, sınırlandırılması istenilen dinamik parametredir. Bu parametre, deneysel ve analitik modeller arasındaki ilişkiyi gösteren herhangi bir parametre olabilir. Yukarıda belirtildiği üzere, hedef fonksiyonunda frekanslar arasındaki farklar dikkate alındığından ve bu global davranışı ifade ettiğinden dolayı, sınırlandırma fonksiyonunun içerisinde modal vektörler arası ilişkiyi gösteren MAC matrisinin kullanılması uygun olacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ses ve titreşim sinyallerinin analizleri, sistemlerin dinamik karakteristiklerin hesabı ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmeleri konusunda üretilmiş olan ticari yazılımların maliyeti oldukça yüksektir. Bununla beraber son yıllarda çok kanallı ölçüm sistemleri kısmen daha ucuz hale gelmiştir, ancak bu sistemlerin analiz işlevsellikleri sınırlı olmaktadır. Bundan dolayı, birçok firma ölçüm sonuçlarının işlenmesinde, analizinde ve tasarımda kullanılmasında farklı alternatiflere yönelmektedir. MATLAB (2009a) bu amaç için popüler olan ve güçlü grafik altyapısı ve fonksiyonel yapısının yanında zengin kütüphanesiyle birçok avantajı olan bir platformdur. MATLAB'da yer alan açık kodlu fonksiyonlar esneklik ve spesifik ihtiyaçlar için fonksiyonların düzenlenmesi imkanı sağlar. İlave olarak, komut tabanlı programlama ortamı izlenebilirlik ve kalite güvencesi sağlar.

Yapı sistemlerinin deneysel modal analizi üç farklı adımdan meydana gelmektedir. Bunlar, verilerin ölçülmesi, ölçülen ham verilerin işlenmesi ve işlenen verilerden modal parametrelerin elde edilmesidir. Modal parametreler elde edildikten sonra, tasarım için modellenmiş olan analitik modellerin iyileştirilmelerinde referans olarak kullanılırlar. Yani deneysel modal analiz tamamlandıktan sonraki tasarım aşaması analitik modelin yani sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi aşamasıdır.

Tez çalışmasında, deneysel modal analizin yapılabilmesi için gerekli olan her aşamaya ait ve deneysel modal analizin devamı niteliğindeki analitik modelin iyileştirilmesine yönelik yazılımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımlar MATLAB platformunda grafik kullanıcı arayüzü (Graphical User Interface – GUI) özelliği kullanılarak hazırlanmışlardır.

2.1. Laboratuvar Modelinin Zorlanmış ve Çevresel Titreşim Deneyleri

Geliştirilmiş olan bilgisayar programlarının tanıtımı ve kontrollerinde, laboratuvarda üretilmiş olan üç boyutlu çelik çerçeve modeli kullanılmıştır. Bu model üzerinde deneysel ve operasyonel modal analizler yapılmış olup, toplanan veriler geliştirilen yazılımlarla analiz edilmişlerdir.

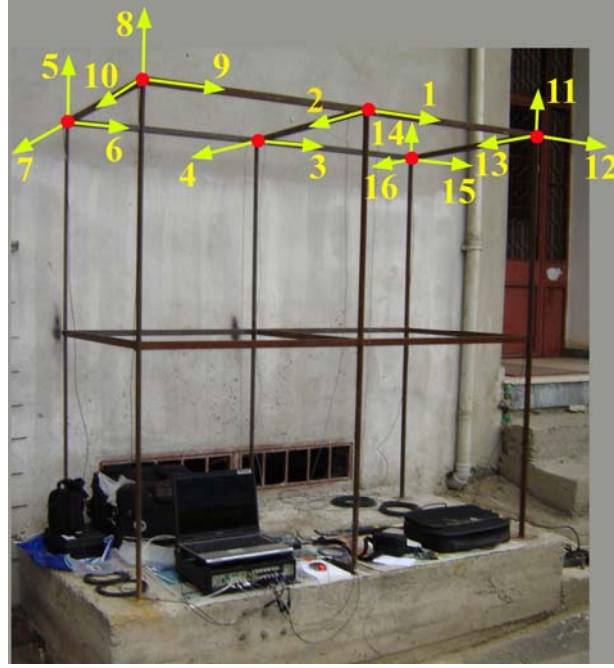
Model, bir doğrultusunda iki açıklıklı, diğer doğrultusunda tek açıklıklı ve iki katlı olup her bir kolon ve giriş elemanının uzunluğu 90 cm dir. Şekil 2.1’de üç boyutlu çerçeve modelinin karşıdan çekilmiş fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Üç boyutlu çelik çerçeve modeli

Model üzerinde ikinci katta yer alan düğümlere ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Kenarlarda yer alan dört köşeye üç eksenli ivmeölçerler, aradaki iki köşeye toplam dört adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Şekil 2.2’de modele yerleştirilmiş olan ivmeölçerlerin kanal numaraları ve yönleri gösterilmektedir.

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi toplam 16 adet kanal, model üzerinden kayıt almak için hazır hale getirilmiştir. Bu kanallar veri toplama ünitesine bağlanarak, kanallardan alınan kayıtların bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmaktadır. Modelin üst köşe noktasına yerleştirilmiş olan 3 eksenli ivmeölçerlerden bir tanesi, veri toplama ünitesi ve kayıt bilgisayarı, Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Veri toplama ünitesi toplam 17 kanal bağlanabilecek kapasitededir.



Şekil 2.2. Modelde yerleştirilen ivmeölçerlerin yönleri ve kanal numaraları



Şekil 2.3. Deneyde kullanılan üç eksenli ivmeölçer ile veri toplama ünitesi ve kayıt bilgisayarı

Model üzerinde ivmeölçerler yerleştirildikten ve kanallar veri toplama ünitesine bağlandıktan sonra, ilk olarak sistemin zorlanmış titreşim deneyi yapılmıştır. Bunun için darbe çekici kullanılmıştır. Veri toplama ünitesi toplam 17 kanal kapasiteli olup, bunun 16 kanalı yapıya yerleştirilmiş olan ivmeölçerler tarafından kapatılmış, kalan tek kanala da darbe çekici bağlanmıştır. Zorlanmış titreşim deneyi için öncelikle darbenin vurulacağı en uygun nokta aranmıştır. Modelin kirişlerine darbe vurulduğunda elde edilen spektrumlarda pürüz yoğunluğu olduğundan darbe kolonlara uygulanmıştır. Toplam 5 ayrı zorlanmış

titreşim deneyi yapılmış olup, bunlar içerisinde etki ve tepki spektrumları arasındaki uyumun ve pürüzlülüğün en az olduğu titreşim deneyi göz önüne alınmıştır. Yapılan deneylerde Şekil 2.4’de görüldüğü gibi en uygun darbe noktasının kenar kolon üst bölgesi olduğu tespit edilmiştir.

Zorlanmış titreşim deneyinden sonra ise çevresel titreşim deneyi gerçekleştirilmiştir. Bunun için belirli bir noktaya darbe vurulmasına gerek yoktur. Çevreden gelen titreşim, gürültü vs. gibi etkiler sistemin davranışının belirlenebilmesi için yeterli olacaktır. Belirli bir süre boyunca çevreden gelen bilinmeyen etkiler altında ivmeölçerlerin göstermiş olduğu tepkiler kayıt altına alınarak kaydedilmiştir. Çevreden gelen etkilerin yeterli olmadığı durumlarda, darbe çekici veya herhangi bir kaydedilmeyen etki ile sistemde titreşim uygulamak sureti ile çevresel titreşim deneyi gerçekleştirilebilir. Üç boyutlu modelin çevresel titreşim deneyinde sinyallerin daha net alınabilmesi amacıyla darbe çekici kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Modelin darbe çekici ile titreştirilmesi

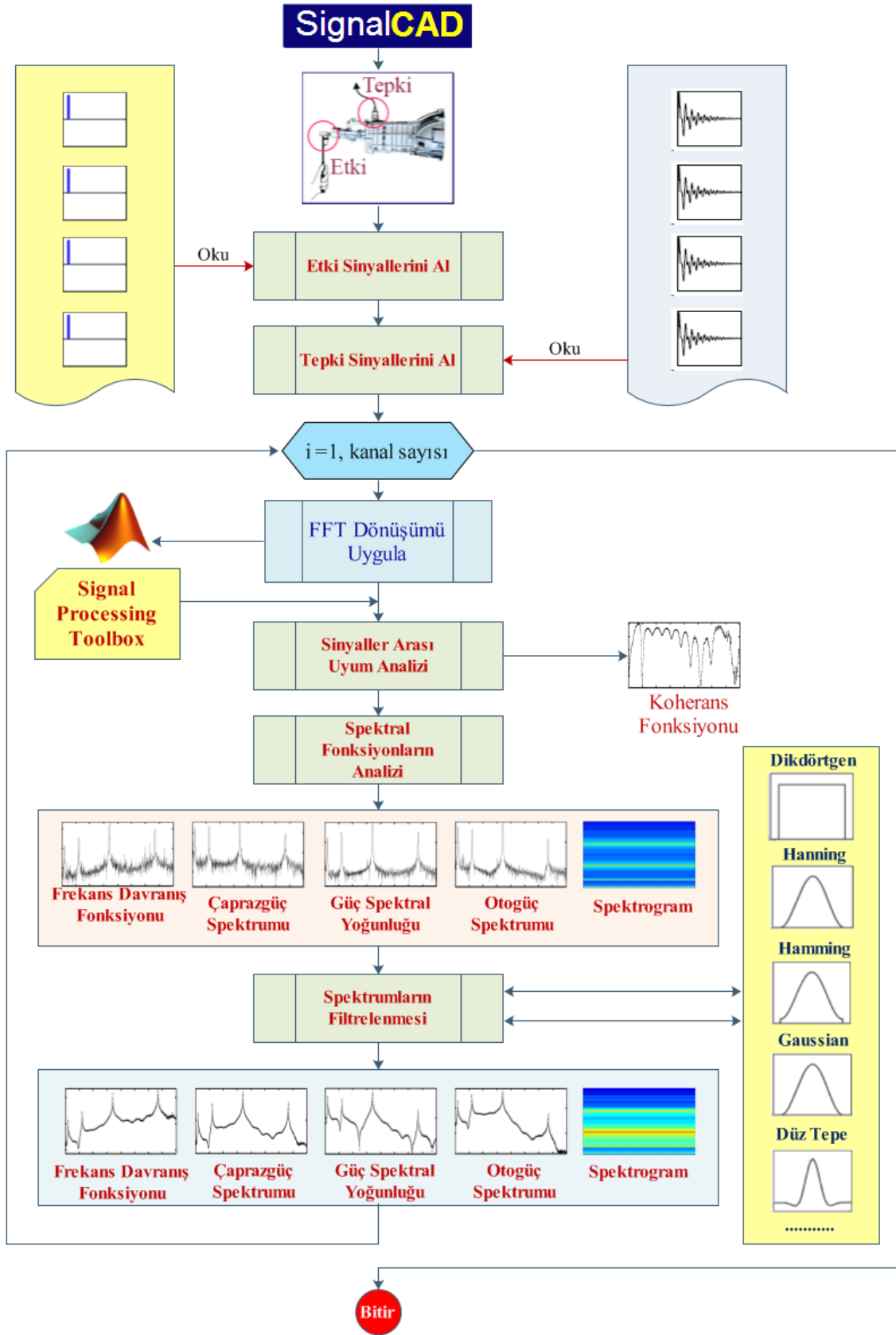
2.2. Geliştirilen Bilgisayar Programları

2.2.1. SignalCAD Programı

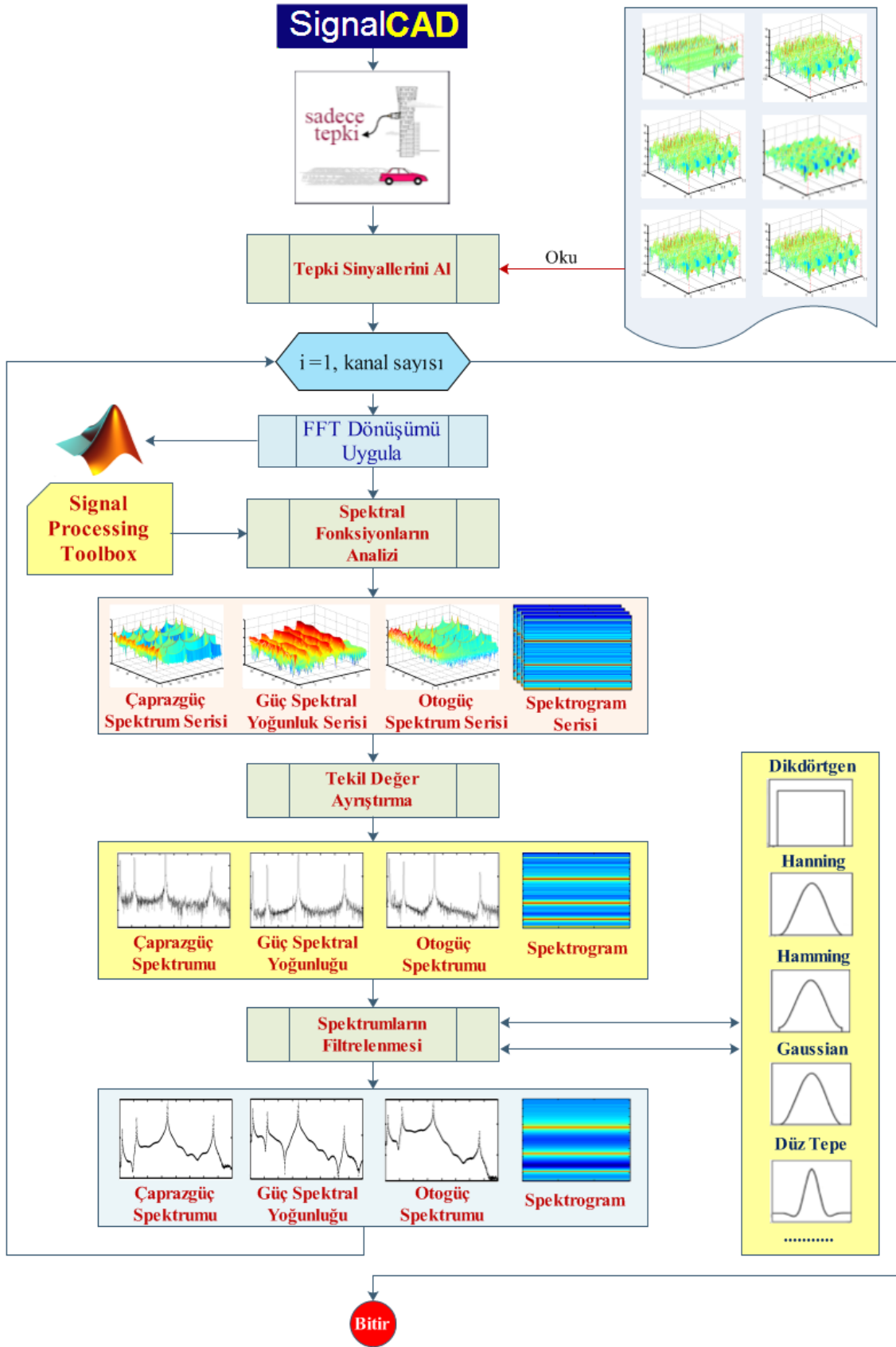
Günümüzde çeşitli sinyal işleme yazılım paketleri bulunmaktadır. Bu programların tamamına yakını donanım ile ilişkili olarak üretilmişlerdir. Ancak ticari yazılımların birçoğunda bir araştırmacı için sakıncalar bulunmaktadır. Bir algoritmanın uygulanmasını denetlemek ve bu yazılımlara geliştirilen algoritmaları ilave etmek çoğunlukla mümkün değildir. Diğer taraftan, MATLAB (2009a), hesaplama, görüntüleme ve programlama araçları sunan açık bir ortamdır. Temel MATLAB paketi, genel amaçlı kullanılan fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu fonksiyonları kullanarak, geliştirerek ve kendi fonksiyonlarını yazarak, programcı yazılım kütüphanesini oluşturabilmektedir. Kütüphanede yer alan fonksiyonların çoğu oturum içerisinde çağrıldıklarında derlenen erişilebilir ASCII dosyalarıdır. Bundan dolayı kullanıcı bu fonksiyonların uygulamalarını öğrenebilir ve fonksiyonları kendi amacına göre değiştirebilir.

SignalCAD programı, çevresel veya zorlanmış titreşim deneyleri ile kayıt altına alınan ham verilerin işlenerek, deney yapılan yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan matematiksel yöntemlerin başlangıç verisi olarak kullanılacak anlamlı spektrumların üretilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu program, kullanıcı ile etkileşimli menü sistemleri ve butonları olan ileri grafik teknolojisinin kullanıldığı bir analiz programıdır. Bu programın geliştirilme amacı, işlenmemiş olan ve zamana bağlı olarak kayıt altına alınan her türlü ham verinin, karşılaştırmalı spektral analiz yöntemleri kullanılarak mühendisler için anlamlı frekans ortamlı spektrumlara dönüştürülmesidir. SignalCAD programı ile en yaygın spektral dönüşüm fonksiyonları, yaklaşık olarak bütün alternatif analiz özelliklerini kapsayacak şekilde analiz edilmektedir.

SignalCAD programında veri filtreleme özelliğinin yanında, spektrumlardaki sızma hatasını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiş olan hemen hemen bütün pencereleme fonksiyonları kullanılabilir. Böylelikle kullanıcı birçok alternatif içerisinden çalışma amacına en uygun olan seçeneği seçebilecektir. SignalCAD programında zorlanmış titreşim deneyi verilerinin analizi için tasarlanan genel akış diyagramı Şekil 2.5'te, çevresel titreşim deneyi verilerinin analizi için tasarlanan genel akış diyagramı ise Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

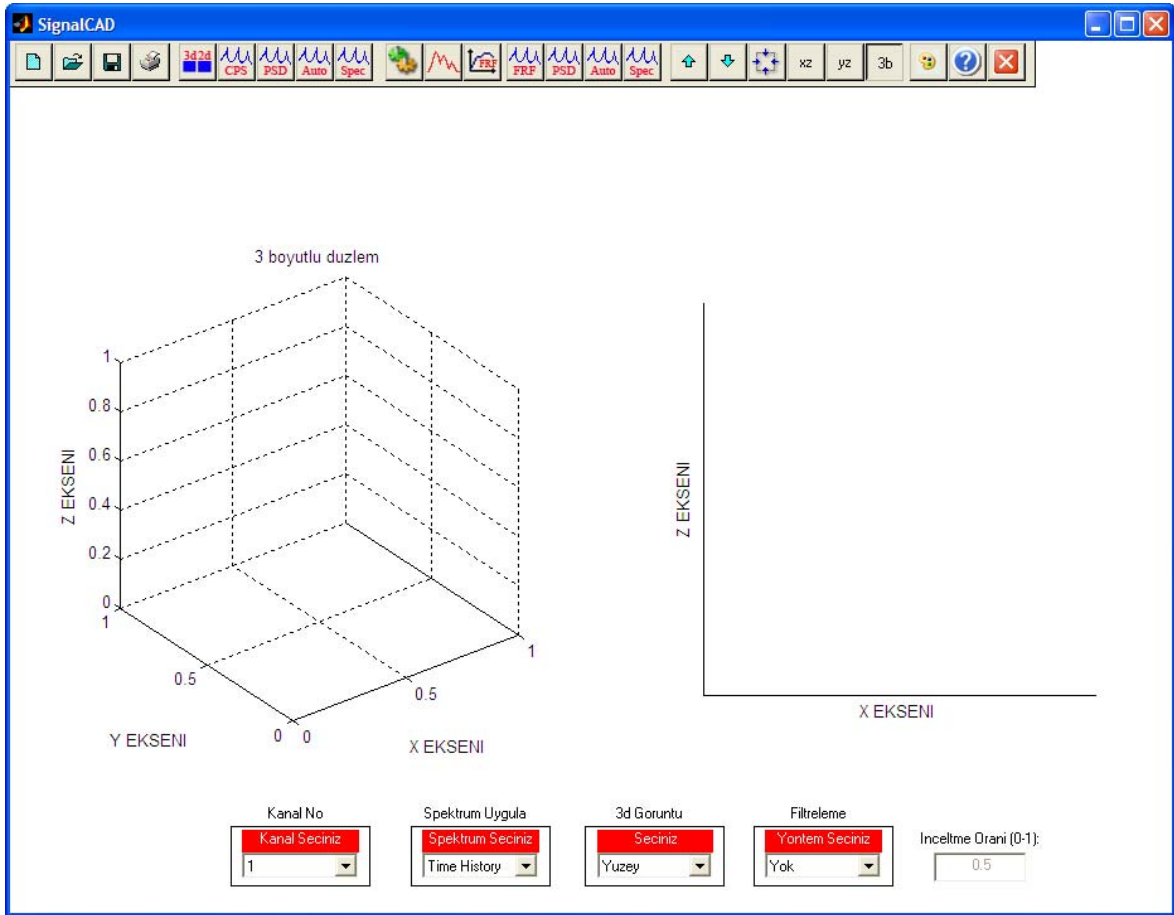


Şekil 2.5. SignalCAD programında zorlanmış titreşim deney verilerinin analizi için hazırlanmış olan akış diyagramı




























Şekil 2.6. SignalCAD programında çevresel titreşim deney verilerinin analizi için hazırlanmış olan akış diyagramı

SignalCAD programı, bir ana pencere etrafında kurulmuştur ve üç ana görev bölümü vardır: zorlanmış titreşim deney verilerinin spektral analizleri, çevresel titreşim deney verilerinin spektral analizleri ve üretilen spektrumlara bazı analiz fonksiyonlarının uygulanması. Bu görevlerin her birisinin uygulanması için program içerisinde yeni ekranlar açılır ve kullanıcı istediği parametreleri seçerek analizini yapar, daha sonra ana ekrana tekrar döner. Şekil 2.7’de SignalCAD programının ana ekranı görülmektedir.



Şekil 2.7. SignalCAD programı ana penceresi

SignalCAD programının ana ekranında üst tarafta yer alan düğmeler ile programın fonksiyonları yerine getirilir. Bu düğmelerin ne anlama geldikleri Şekil 2.8 de gösterilmektedir.

	(1) Yeni sinyal verilerinin yüklenmesi
	(2) SignalCAD dosyasının yüklenmesi
	(3) Yapılan çalışmanın kaydedilmesi
	(4) Seçilen grafik ya da spektrumun yazdırılması
	(5) Çevresel titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin ön değerlendirmesi
	(6) Çevresel titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin çaprazgüç spektrum analizi
	(7) Çevresel titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin güç spektral yoğunluk analizi
	(8) Çevresel titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin otogüç spektrum analizi
	(9) Çevresel titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin spektrogram analizi
	(10) Fourier dönüşümü ve örnekleme frekansı ayarları
	(11) Üretilen spektral fonksiyonların ileri analizleri
	(12) Üretilen spektral fonksiyonların toplu değerlendirilmesi
	(13) Zorlanmış titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin frekans davranış fonksiyonu, koherans ve çaprazgüç spektrum analizi
	(14) Zorlanmış titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin güç spektral yoğunluk analizi
	(15) Zorlanmış titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin otogüç spektrum analizi
	(16) Zorlanmış titreşim deneyi ile elde edilen sinyalin spektrogram analizi
	(17) Üç boyutlu sinyal verisi içerisinde ileri kayıt zamanına ilerleme
	(18) Üç boyutlu sinyal verisi içerisinde geri kayıt zamanına ilerleme
	(19) Üç boyutlu sinyalin izdüşümü
	(20) Üç boyutlu sinyale xz düzleminden bakış
	(21) Üç boyutlu sinyale yz düzleminden bakış
	(22) Üç boyutlu sinyali göster/gizle
	(23) Arka plan renk ayarları
	(24) Yardım
	(25) Programdan çıkış

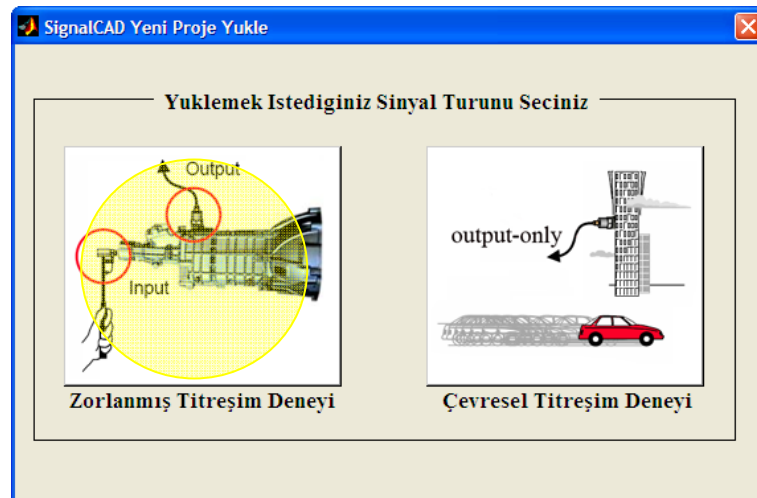
Şekil 2.8. SignalCAD programı ana ekran düğmeleri

2.2.1.1. Zorlanmış Titreşim Deneyinden Elde Edilen Verilerin SignalCAD Programı ile Analiz İşlemi

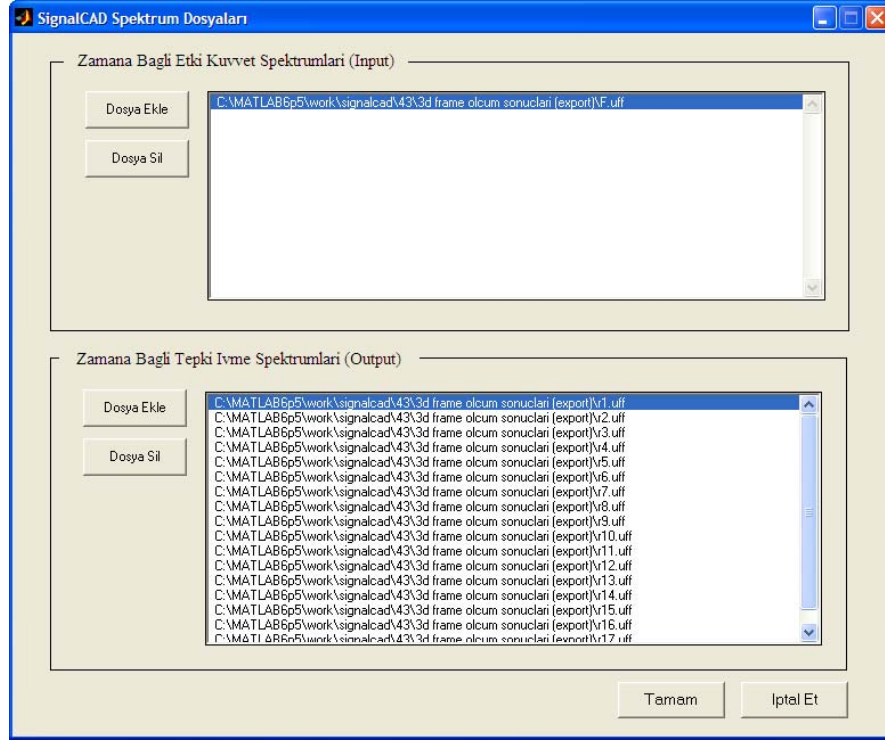
2.2.1.1.1. Verilerin Sisteme Tanıtılması

Öncelikle, SignalCAD programına, zorlanmış titreşim deneyinden elde edilmiş olan verilerin tanıtılması gerekmektedir. SignalCAD programı, ASCII ve UFF (Universal File Format) formatında dosya okuyabilme özelliğine sahiptir. Herhangi bir veri toplama ünitesi tarafından kaydedilmiş olan ham veriler, bu formatlar ile sisteme tanıtılabilirler. Ölçüm alınan her bir etki ve tepki kanalına ait bir dosya oluşturulur ve bu dosyalar sisteme yüklenirler. Bir önceki bölümde bahsedilen üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinde 1 adet etki kanalı ve 16 adet tepki kanalı model üzerine yerleştirilmiştir. Deney sonunda bu kanallardan bilgisayara aktarılan veriler ASCII ya da evrensel dosya formatında (UFF) kaydedilirler ve böylece SignalCAD programına kolaylıkla tanıtılabilirler.

Sistemde yeni verilerin yüklenmesi seçeneği seçildiği zaman, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi iki seçenekli bir pencere açılır. Burada yüklenecek sinyallerin hangi tür dinamik deney ile elde edildiği sorulmaktadır. Zorlanmış titreşim seçeneği seçildikten sonra deneyden elde edilen etki ve tepki verilerinin SignalCAD programına yüklenmesi için ekrana Şekil 2.10'da görüldüğü gibi bir dosya yükleme penceresi gelmektedir. Burada üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinde, etki ve tepki kanallarından elde edilmiş olan verilerin dosyaları sisteme tanıtılmaktadır.



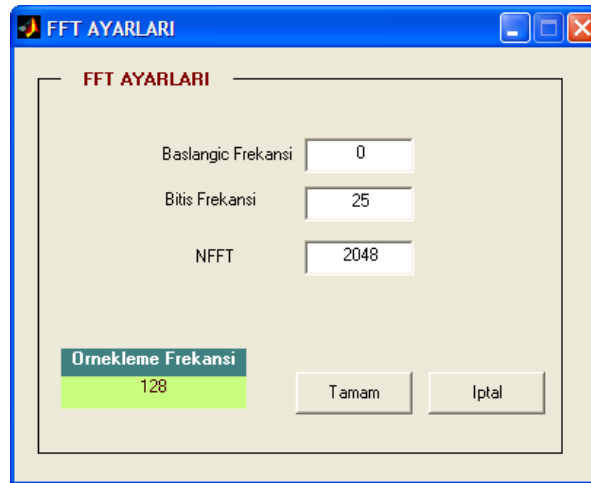
Şekil 2.9. Sisteme veri yükleme seçenek penceresi



Şekil 2.10. SignalCAD programına zorlanmış titreşim deneyinden elde edilen etki ve tepki verilerinin yüklenmesi

2.2.1.1.2. Hızlı Fourier Dönüşüm Ayarlarının Yapılması

Spektral analize başlamadan önce hızlı Fourier dönüşümü ve örnekleme frekansı ayarlamaları ile üretilecek olan spektral fonksiyonların özellikleri belirlenmelidir. Bunun için (10) numaralı düğmeye tıklanır ve Şekil 2.11 de görüldüğü gibi bir pencere açılır.



Şekil 2.11. Hızlı Fourier dönüşümü hesap ayarları

Bu pencerede, hızlı Fourier dönüşümü hesap ayarları yapılmaktadır. Hesaplanacak olan spektral fonksiyonun başlangıç ve bitiş frekansları ile bu fonksiyonun hesabında kullanılacak olan veri sayısı burada belirlenmektedir. Örnekleme frekansı, sisteme yüklenen verilerin zaman aralığına bağlı olarak SignalCAD programı tarafından otomatik hesaplanmıştır ve bu ekranda sadece bilgilendirme açısından gösterilmektedir. Ekranda görülen ayarlar onaylandıktan sonra spektral analizlere başlanılabilir.

2.2.1.1.3. Çaprazgüç Spektrumu ve Frekans Davranış Fonksiyonu Spektral Analizlerinin Yapılması

SignalCAD programında pek çok spektral analiz seçeneği mevcuttur. Bu program ile yapılabilen spektral analizler, iki farklı ölçüm verilerini gerektiren frekans davranış fonksiyonu analizi, çaprazgüç spektrumu analizi, koherans fonksiyonu analizi, transfer fonksiyonu analizi ile sadece bir ölçüm verisinin analizini gerektiren otogüç spektrumu analizi, güç spektral yoğunluk analizi ve spektrogram analizleridir. Öncelikle, iki farklı ölçüm verilerini gerektiren spektral analizler incelenecek olursa, (13) numaralı düğme tıklanır (Şekil 2.12-a), yeni bir spektral analiz ekranı açılır.

Spektral analiz ekranında görülen birinci menü sistemi ve çizim alanı etki spektrumlarına aittir. Burada, deney sırasında etki olarak sisteme kaç adet kanal bağlanmış ise seçenek olarak sol tarafta kullanıcıya sunulur. “Etki Spektrumu” başlığı altındaki “Kanal Seçiniz” başlıklı menüden 1 numaralı etkinin seçilmesi ile (Şekil 2.12-b), üç boyutlu çerçevenin zorlanmış titreşim deneyi sırasında darbe çekicinden alınan işlenmemiş kayıt ekrana yüklenir. Grafiğin sol tarafına, bu etki verisi ile ilgili olan özellikler yüklenir. Kanalın ismi, kaydedilen veri sayısı, veri kayıt aralığı ve verinin birimi, hiç müdahale edilmeden sisteme tanıtıldığı şekilde ekrana aktarılır. Burada deney sırasında ölçüm yapılırken veriye ne isim verilmiş ise SignalCAD programında da ekrana aynı şekilde yansımaktadır. Şekilde görüldüğü gibi etki verisinin adı “Time(Signal 1) – Input 1 (N)” olarak görülmektedir. Çekiçten gelen sinyallerin 17 kanallı veri toplama ünitesinde birinci kanal olarak sisteme tanıtılmış olduğu buradan anlaşılmaktadır.

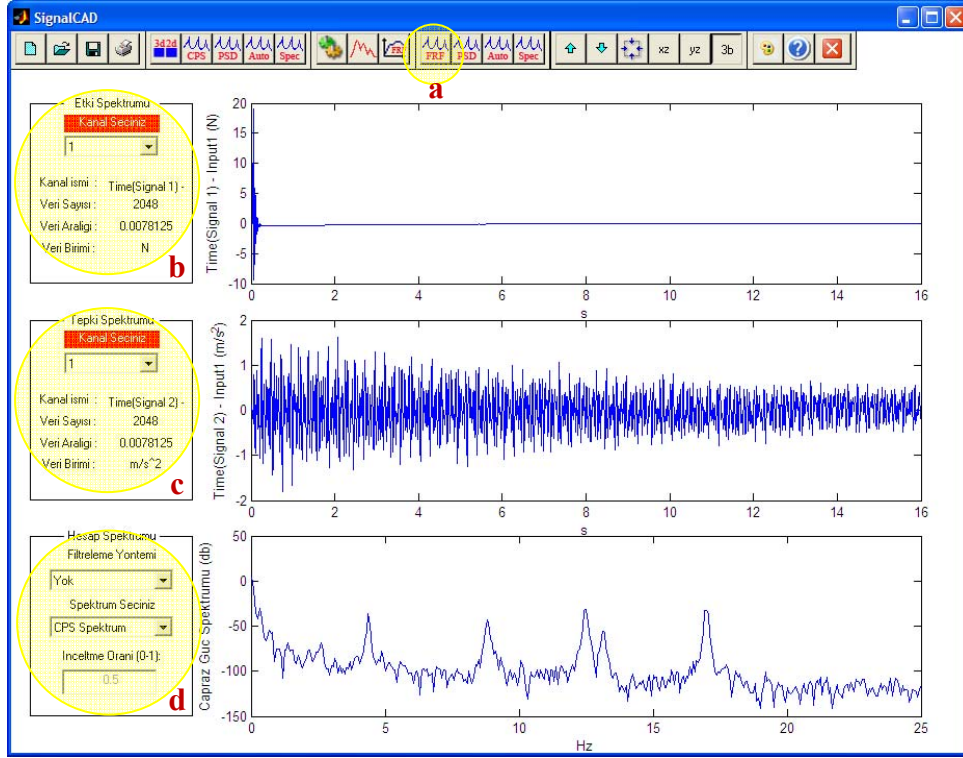
Spektral analiz ekranında görülen ikinci menü sistemi ve çizim alanı tepki spektrumlarına aittir. Burada, deney sırasında tepki ölçümü için sisteme kaç adet kanal bağlanmış ise seçenek olarak sol tarafta kullanıcıya sunulur. “Tepki Spektrumu” başlığı altındaki “Kanal Seçiniz” başlıklı menüden 1 numaralı tepkinin seçilmesi ile (Şekil 2.12-

c), üç boyutlu çerçevenin zorlanmış titreşim deneyi sırasında Şekil 2.2’de görülen kanallardan 1 numaralı kanaldan alınan işlenmemiş kayıt ekrana yüklenir. Grafiğin sol tarafına, bu tepki verisi ile ilgili olan özellikler yüklenir. Kanalın ismi, kaydedilen veri sayısı, veri kayıt aralığı ve verinin birimi, hiç müdahale edilmeden sisteme tanıtıldığı şekilde ekrana aktarılır. Şekilde görüldüğü gibi tepki verisinin adı “Time(Signal 2) – Input 1 (m/s^2)” olarak görülmektedir. Çekiçten gelen veriler, Signal 1 olarak kaydedilmiş olduğundan, tepki kanallarının numaralanmasına Signal 2’den başlanmıştır.

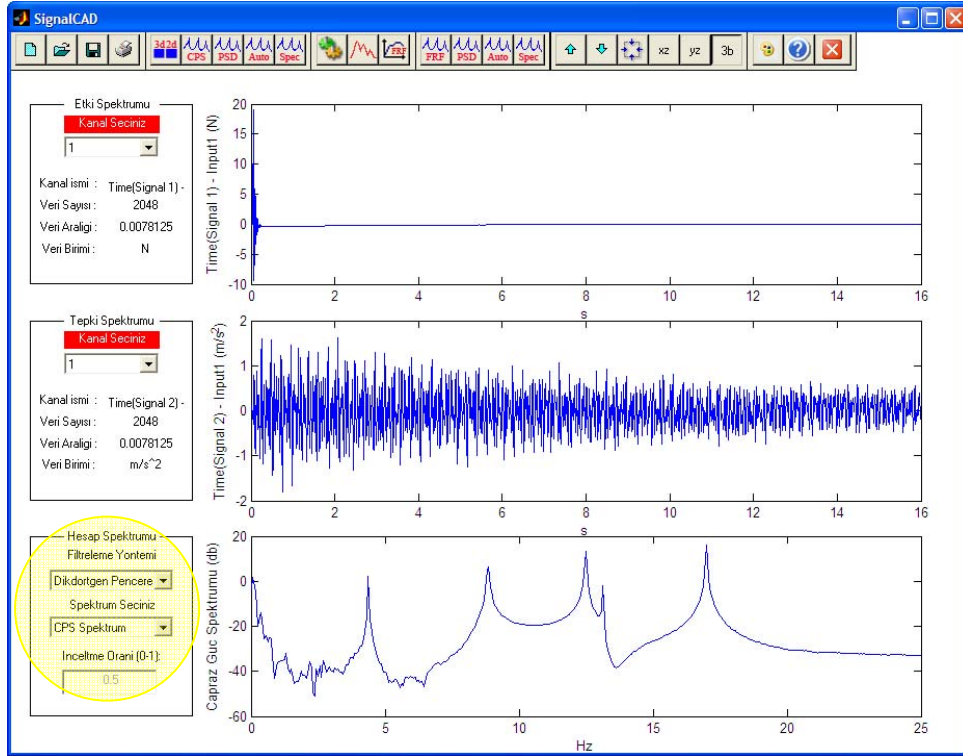
Spektral analiz ekranında, görülen üçüncü menü sistemi ve çizim alanı etki ve tepki verilerinin analiz edilmesi ile üretilen frekans ortamlı spektrumlara aittir. Burada sol tarafta iki adet seçim menüsü görülmektedir. Bunlardan birincisinde, yapılacak olan spektral analizde pencereleme uygulanıp uygulanmayacağı belirlenmesi, eğer uygulanacak ise pencereleme yönteminin seçilmesi imkanı vardır. İkinci seçim menüsünde ise uygulanacak olan spektral analiz seçenekleri vardır. Burada çaprazgüç spektrumu, frekans davranış fonksiyonu, transfer fonksiyonu ve koherans fonksiyonu seçenekleri arasında yer almaktadır. Şekil 2.12’de üçüncü ekseninde, pencerelemenin uygulanmadığı ve spektral analiz fonksiyonu olarak çaprazgüç spektrumunun seçildiği (Şekil 2.12-d), çekiçten gelen etki sinyali ile 1 numaralı kanaldan gelen tepki sinyali kullanılarak hesaplanan frekans ortamlı spektral fonksiyon görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi elde edilen çaprazgüç spektrumunda tepe noktaları net olarak görülmekle beraber, spektrumdaki pürüzlülük dikkat çekmektedir. Bu pürüzlülük sızma hatasından kaynaklanmaktadır ve pencereleme fonksiyonların uygulanması ile rahatlıkla düzeltilebilir.

Burada üretilmiş olan çaprazgüç spektrumuna mevcut pencereleme yöntemlerinden Dikdörtgen Pencereleme uygulandığında, elde edilen çaprazgüç spektrumu Şekil 2.13’te görüldüğü gibi olur. Mevcut yöntemler içinde en etkili pencereleme yönteminin Dikdörtgen Pencereleme Yöntemi olduğu gözlemlendiğinden dolayı, analizlerde çoğunlukla bu yöntem kullanılacaktır.

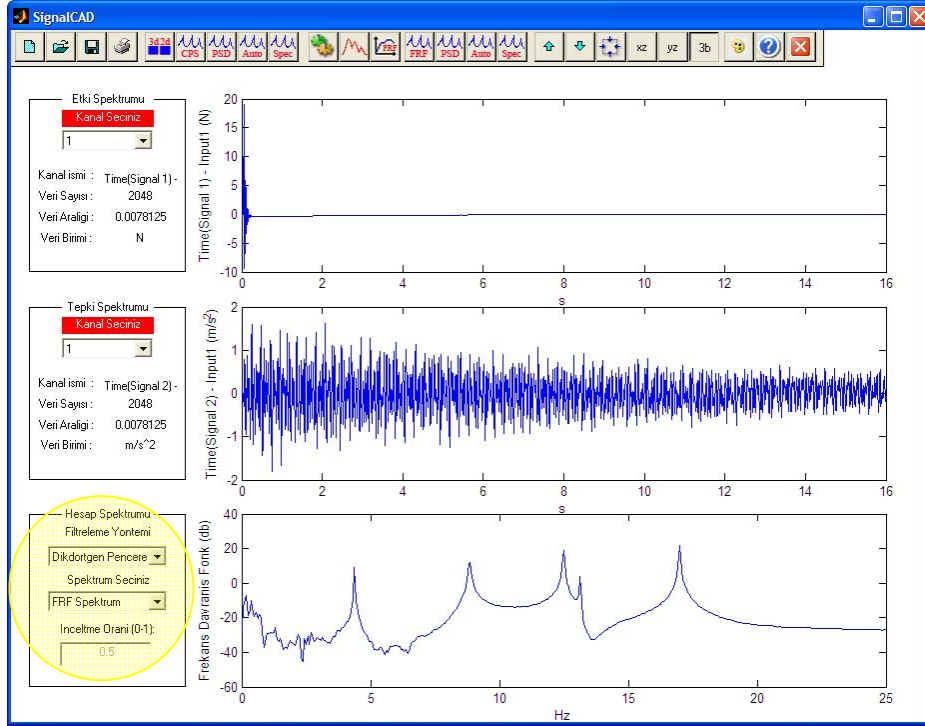
Çaprazgüç spektrumunun yanında Dikdörtgen Pencereleme uygulanarak elde edilmiş olan frekans davranış fonksiyonu Şekil 2.14’te görülmektedir. Bu ekranda yer alan diğer spektral analiz seçenekleri ile pencereleme yöntemlerinin detaylı analiz sonuçları Bulgular ve İrdelemeler Bölümünde kapsamlı olarak incelenecektir.



Şekil 2.12. Çekiç sinyali ile 1 numaralı kanalın sinyalinin pencereleme uygulanmadan yapılan CPS analizi

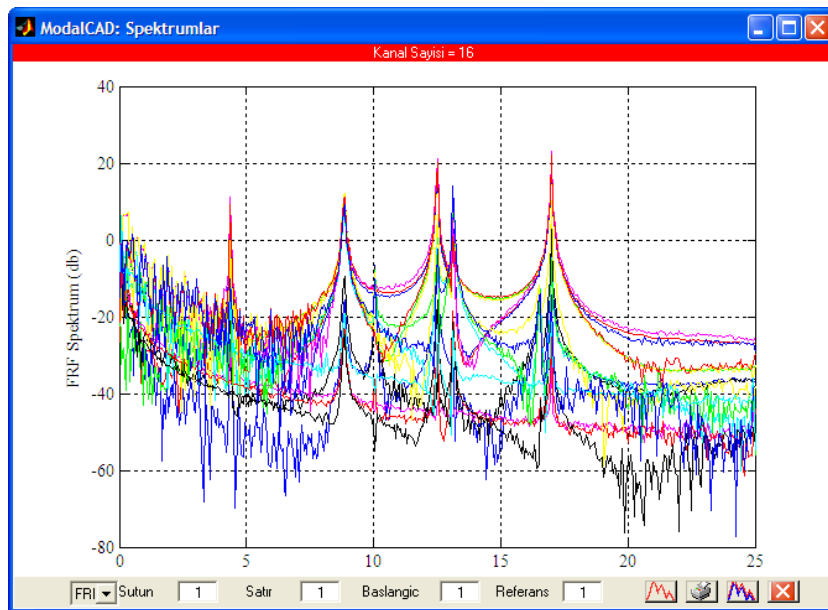


Şekil 2.13. Çekiç sinyali ile 1 numaralı kanalın sinyalinin Dikdörtgen Pencereleme uygulanarak yapılan CPS analizi



Şekil 2.14. Çekiç sinyali ile 1 numaralı kanalın sinyalinin Dikdörtgen Pencereleme uygulanarak yapılan FRF analizi

Bütün kanallar için üretilen spektrumların tümünü bir arada görmek için (12) numaralı düğme seçilir ve yeni bir çizim penceresi açılır. Bu pencere üzerinde frekans davranış fonksiyonlarının tümünün bir arada çizimi Şekil 2.15'te görüldüğü gibidir



Şekil 2.15. Zorlanmış titreşim deney verileri kullanılarak üretilen FRF'ler

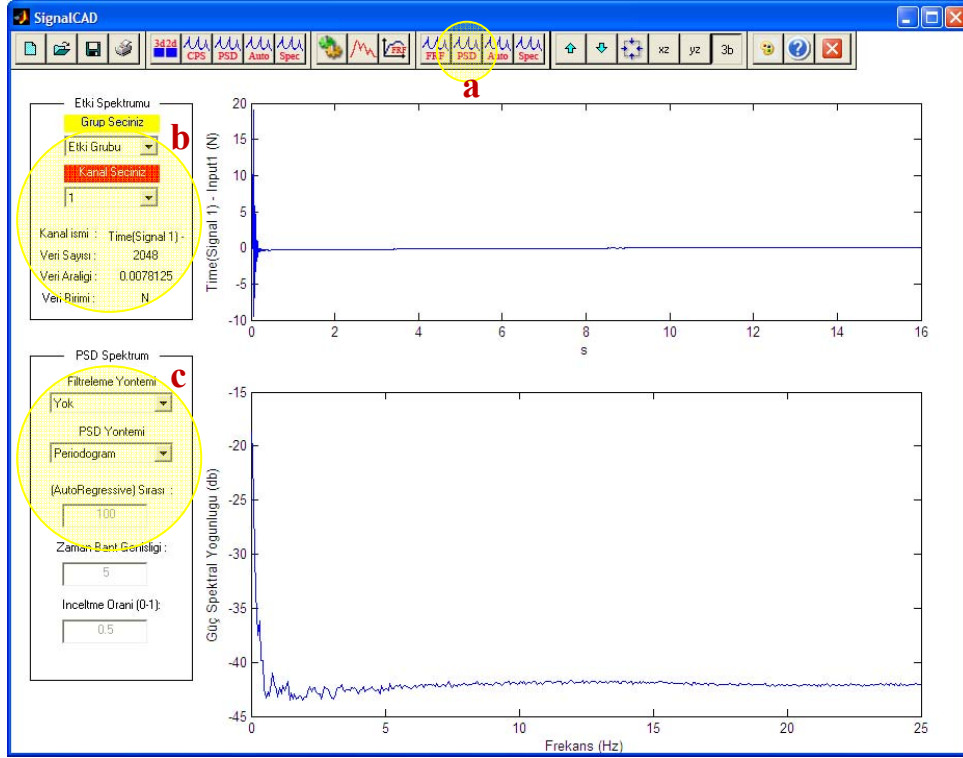
2.2.1.1.4. Güç Spektral Yoğunluk Analizinin Yapılması

SignalCAD programında yalnızca bir sinyal verisinin işlenmesini gerektiren spektral analiz fonksiyonlarından zorlanmış titreşime ait güç spektral yoğunluk (Power Spectral Density - PSD) analizini yapmak için (14) numaralı düğmeye basılır (Şekil 2.16-a) ve yeni bir analiz ekranı açılır. Spektral analiz ekranında, görülen birinci menü sistemi ve çizim alanı güç spektral yoğunluk analizi yapılacak olan sinyale ayrılmıştır. Burada seçilecek olan sinyal etki grubundan ya da tepki grubundan olabilmektedir. Bu yüzden ilk olarak sinyal grubu seçilir. Bunlardan etki grubu seçilir ise, sinyal grubunun altındaki menüde, etki grubunun içerisinde kaç kanal var ise onlar, tepki grubu seçilir ise yine bu sefer tepki grubu içerisinde kaç kanal var ise onlar seçim için kullanıcıya sunulmaktadır.

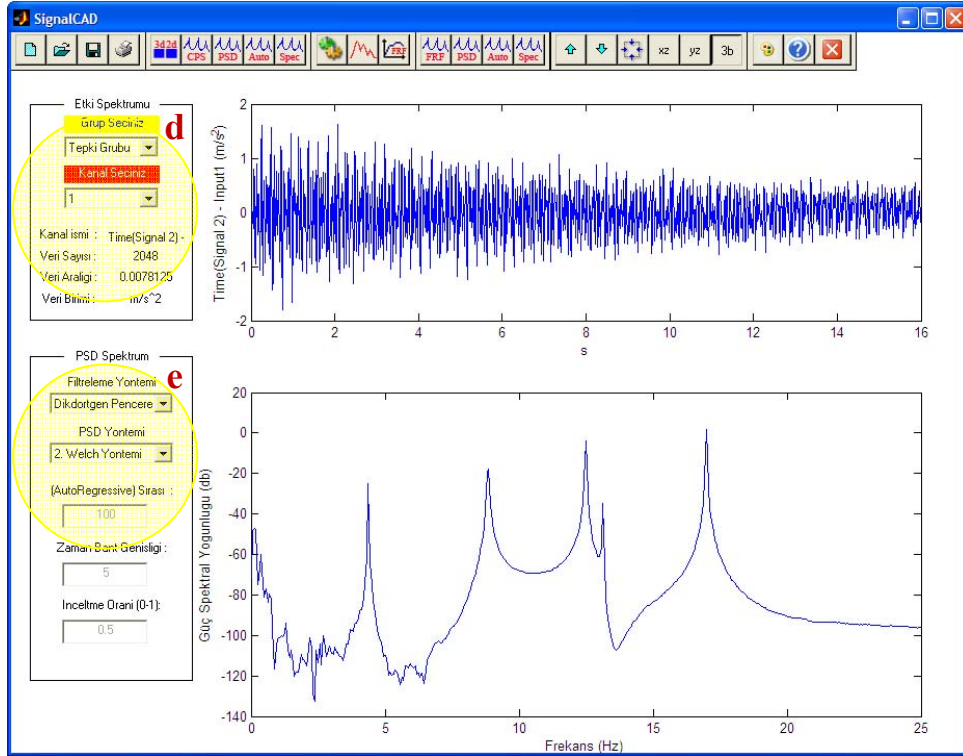
Eğer hesaplanacak spektrum olarak etki spektrumu seçilirse (Şekil 2.16-b), üç boyutlu çerçevenin zorlanmış titreşim deneyi sırasında darbe çekicinden alınan işlenmemiş kayıt Şekil 2.16'da görüldüğü gibi ekrana yüklenir. Grafiğin sol tarafına, bu etki verisi ile ilgili olan özellikler yüklenir. Kanalin ismi, kaydedilen veri sayısı, veri kayıt aralığı ve verinin birimi, hiç müdahale edilmeden sisteme tanıtıldığı şekilde ekrana aktarılır.

Spektrum ekrana yüklendikten sonra, ikinci kısımda yer alan güç spektral yoğunluk analizi seçeneklerine geçilir. Burada, sızma hatalarını filtrelemek için kullanılan pencereleme teknikleri ile güç spektral analiz yöntemlerinin alternatif seçenekleri ve bunlara bağlı detay parametre seçenekleri yer almaktadır. Güç spektral yoğunluk analizi için Periodogram Yöntemi seçilirse (Şekil 2.16-c), çekiçten alınan etki sinyalinin güç spektral yoğunluğu Şekil 2.16'da görüldüğü gibi elde edilmiş olur.

Eğer hesaplanacak spektrum olarak tepki spektrumu seçilirse, üç boyutlu çerçevenin zorlanmış titreşim deneyinde kullanılan tepki ölçüm kanallarının listesi sisteme yüklenir. Bunlar içerisinden spektral analizi yapılacak olan kanal numarası seçilmelidir. Burada 1 numaralı kanal seçilirse (Şekil 2.17-d), bu kanaldan deney sırasında alınan işlenmemiş veriler ekrana yüklenir. Grafiğin sol tarafına, bu tepki kanalı ile ilgili olan özellikler yüklenir. Bu kanal sisteme yüklendikten sonra, güç spektral yoğunluk analiz yöntemi olarak Welch Yöntemi ve sızma hatalarının filtrenmesi için de Dikdörtgen Pencereleme seçeneği seçilirse (Şekil 2.17-e), elde edilen spektral yoğunluk grafiği Şekil 2.17'de görüldüğü gibi elde edilir. Buradaki grafik incelendiğinde tepe noktalarının çaprazgüç spektrumu ve frekans davranış fonksiyonu ile aynı noktalarda olduğu görülmektedir.



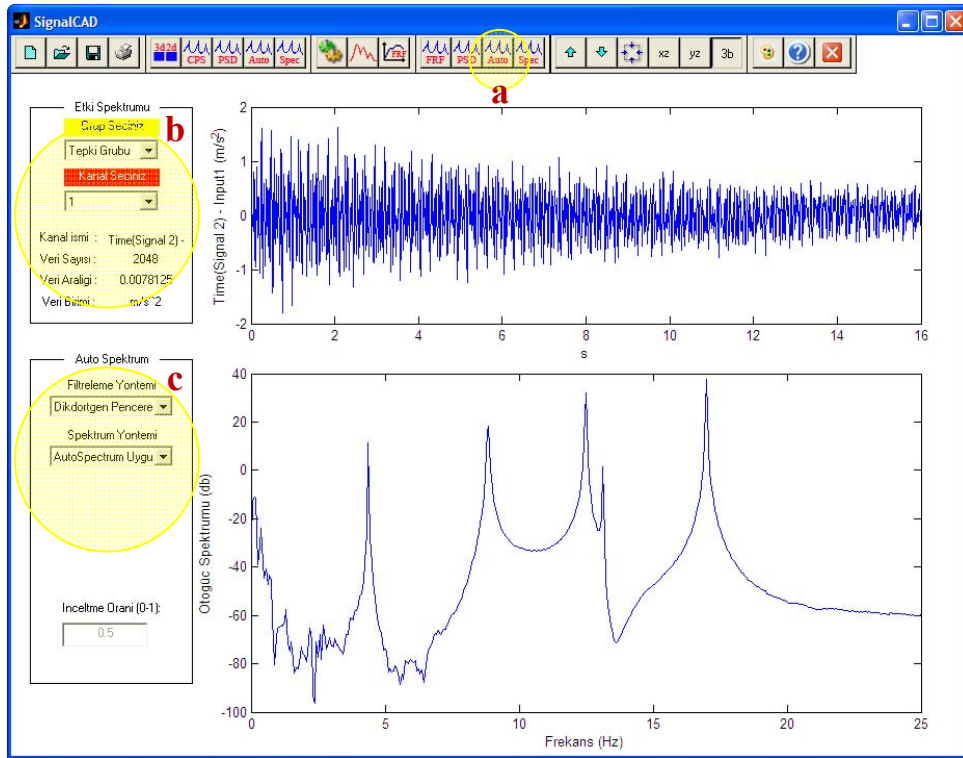
Şekil 2.16. Etki grubuna ait 1 numaralı kanalın Periodogram Yöntemi ile elde edilen PSD grafiği



Şekil 2.17. Tepki grubuna ait 1 numaralı kanalın Welch Yöntemi ve Dikdörtgen Pencereleme filtresi kullanılarak elde edilen PSD grafiği

2.2.1.1.5. Otogüç Spektrumu Analizinin Yapılması

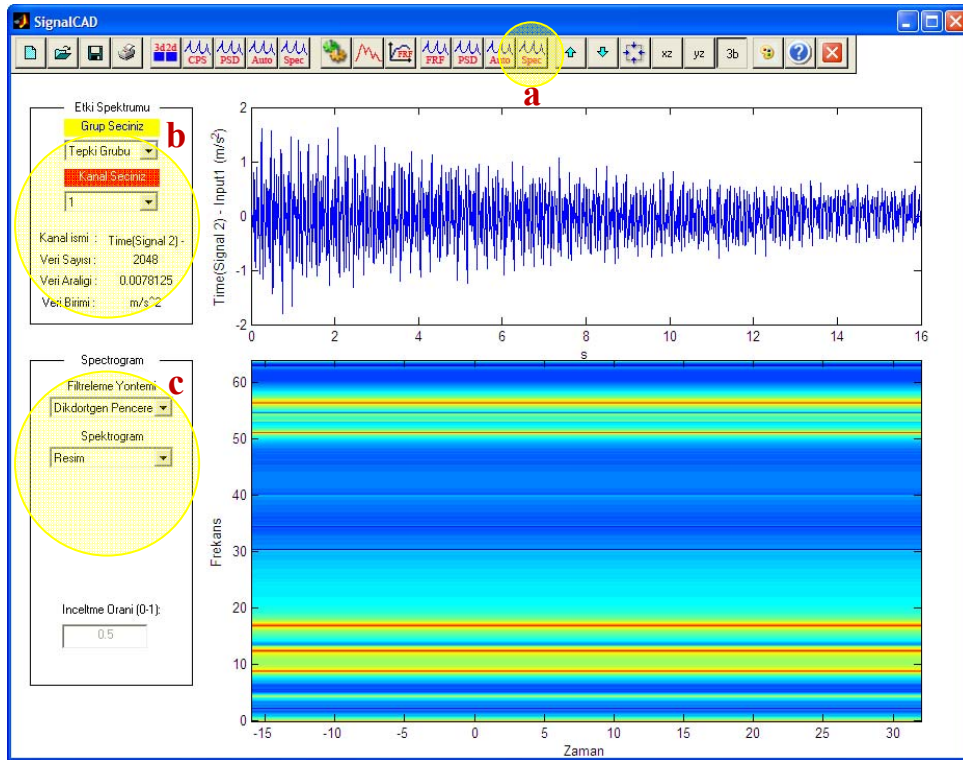
SignalCAD programında yalnızca bir sinyal verisinin işlenmesini gerektiren spektral analiz fonksiyonlarından zorlanmış titreşime ait otogüç spektrum (Auto Power Spectrum - APS) analizini yapmak için (15) numaralı düğmeye basılır (Şekil 2.18-a) ve yeni bir analiz ekranı açılır. Otogüç spektrumu analizinde izlenecek olan yol, güç spektral yoğunluk analizinde izlenen yol ile aynıdır. Analiz yapılacak olan sinyal grubu ve bu gruba ait kanal numarası seçilerek ekrana yüklenir. Spektral analizde sızma hatalarını filtrelemede kullanılacak olan pencereleme yöntemi seçilir ve analiz yapılır. Eğer hesaplanacak spektrum olarak tepki spektrumu seçilirse, üç boyutlu çerçevenin zorlanmış titreşim deneyinde kullanılan tepki ölçüm kanallarının listesi sisteme yüklenir. Bunlar içerisinde spektral analizi yapılacak olan kanal numarası seçilmelidir. Tepki kanalları içerisinde 1 numaralı kanal sisteme yüklendikten sonra (Şekil 2.18-b), sızma hatalarının filtrelenmesi için de Dikdörtgen Pencereleme seçeneği seçilerek otogüç spektrum analizi yapılırsa (Şekil 2.18-c), elde edilen spektrum grafiği şekil 2.18'deki gibi olur.



Şekil 2.18. Tepki grubuna ait 1 numaralı kanalın Dikdörtgen Pencereleme filtresi kullanılarak elde edilen APS grafiği

2.2.1.1.6. Spektrogram Analizinin Yapılması

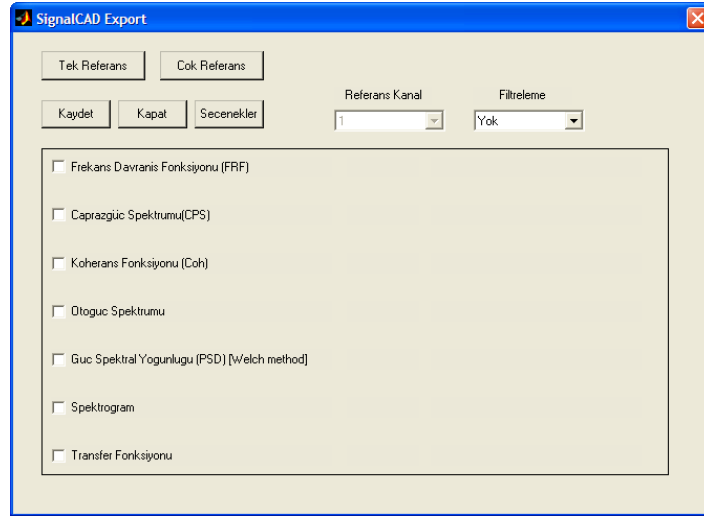
SignalCAD programı, bir serinin zamana bağlı Fourier dönüşümünü veren spektrogramı kullanır veya bilgiyi bir spektrogram olarak gösterir. Zamana bağlı Fourier dönüşümü bir seri için kayan pencere kullanılarak hesaplanan ayrık zamanlı Fourier dönüşümüdür. Kısa süreli Fourier dönüşümü (short time Fourier transform – STFT) olarak da bilinen Fourier dönüşümünün bu şeklinin konuşma, deniz radarı ve radar işlemlerde çok sayıda uygulaması vardır. Bir serinin spektrogramı, zamana bağlı Fourier dönüşümünün magnitudünden elde edilir. Spektrogram analizinde tıpkı güç spektral yoğunluk ve otogüç spektrum analizlerinde olduğu gibi, etki ve tepki veri grupları içerisinde seçim yapılır. Yine bir önceki spektral analiz seçeneklerinde olduğu gibi sızma hatalarına karşı filtreleme yapmak amacı ile pencereleme yöntemi seçilir. Burada farklı olarak grafiksel ve resimsel spektrogram seçenekleri bulunmaktadır. Tepki grubu içerisinde bir kanalın spektrogram analizi yapılacak olursa, önce sol menüde, tepki grubu seçilerek alt taraftan kanal numarası seçilir. Şekil 2.19'da 1 numaralı tepki sinyalinin Dikdörtgen Pencereleme filtresi kullanılarak resimsel spektrogramının elde edilmesi gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Tepki grubuna ait 1 numaralı kanalın Dikdörtgen Pencereleme filtresi kullanılarak elde edilen spektrogram

2.2.1.1.7. Sinyallerin Toplu Analizi ve Spektrumların Kaydedilmesi

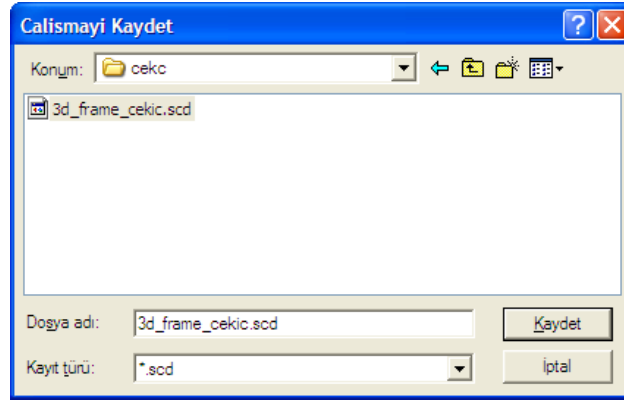
Bu zamana kadar gösterilen bütün spektral analizlerin tek bir pencere içerisinde yapılarak kaydedilmesi mümkündür. Böylece toplu halde kaydedilen veriler, modal parametre belirlenmesi için geliştirilen programlarda giriş verisi olarak kullanılabilirler. Otomatik analiz ve spektrumların kaydedilmesi için öncelikle (3) numaralı düğmeye basılır, böylelikle Şekil 2.20’de görülen pencere açılır. Bu pencerede, şekilde görüldüğü gibi çeşitli seçenekler yer almaktadır. “Tek Referans” ve “Çok Referans” düğmeleri yapılan ölçümün referanslı ölçüm olup olmaması ile ilgilidir. Veri toplama ünitelerindeki kanal sayısı sınırlı olduğundan büyük yapı sistemlerinde referanslı ölçümlerin alınması gerekmektedir. Referanslı ölçümlerde bir referans noktası belirlenir ve yapılan her ölçümde, kesinlikle o referans kanalından da ölçüm alınır. Çaprazgüç spektrumları hesaplanırken de her bir ölçüm grubunda seçilen o referans noktasına göre hesap yapılır. Böylelikle, kanal sayısı yeterli olmadığı halde bile istenilen sayıda sinyal kanalı olan bir ölçüm gerçekleştirilebilmektedir.



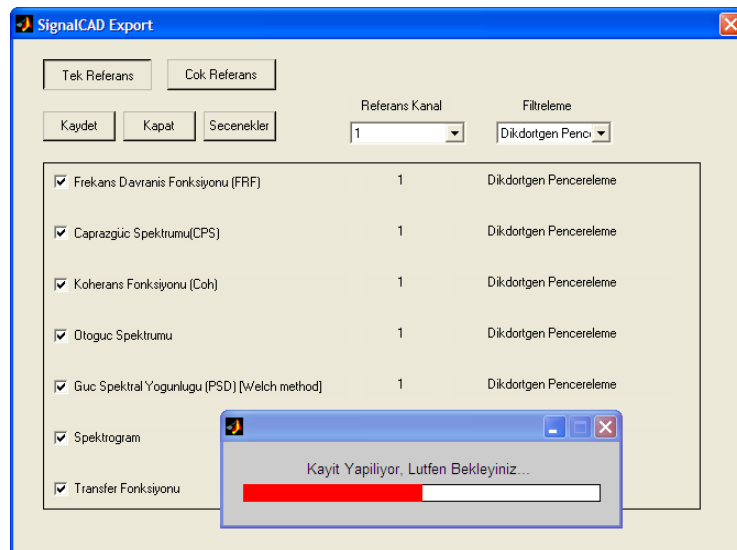
Şekil 2.20. SignalCAD programında etki tepki modal analizi için otomatik spektrum analizi ve kayıt penceresi

Otomatik analiz penceresinde “Tek Referans” seçeneğinin seçilmesi ile referans kanalı seçim menüsü aktif hale gelmiş olur. Burada frekans davranış fonksiyonu ve çaprazgüç spektrum analizlerinde hangi kanalın referans olarak alınacağını belirlemek gerekmektedir. Yapılan deney zorlanmış titreşim deneyi olduğundan, referans kanalı etki

kanallarından birisi olmak zorundadır. Sadece 1 adet etki kanalımız olduğundan 1 numaralı etki kanalı yani darbe çekicinden gelen sinyaller referans olarak seçilmelidir. Bütün analizlerde sızma hatası için filtreleme yöntemi olarak Dikdörtgen Pencereleme Yöntemi seçilirse, geriye sadece hangi spektrumların analizinin yapılacağını belirlemek kalır. “Seçenekler” yazan düğme ile de daha önce bahsedilmiş olan hızlı Fourier dönüşüm ayarları penceresi açılmaktadır. Buradan otomatik analiz için gereken başlangıç ayarları yapılır. “Kaydet” düğmesine basılması ile önce kaydedilecek dosyanın konumu ve isminin belirlenmesi amacıyla Şekil 2.21’de görüldüğü gibi bir pencere açılır, burada dosya ismi yazılıp “Kaydet” düğmesine basıldıktan sonra spektral analizler ve kayıt Şekil 2.22’de görüldüğü gibi yapılmaya başlanır.



Şekil 2.21. SignalCAD programı kayıt penceresi



Şekil 2.22. Üç boyutlu çerçevenin etki tepki modal analizi için seçilen spektrumların analiz ve kayıt işlemi

2.2.1.2. Çevresel Titreşim Deneyinden Elde Edilen Verilerin SignalCAD Programı ile Analiz İşlemi

2.2.1.2.1. Verilerin Sisteme Tanıtılması

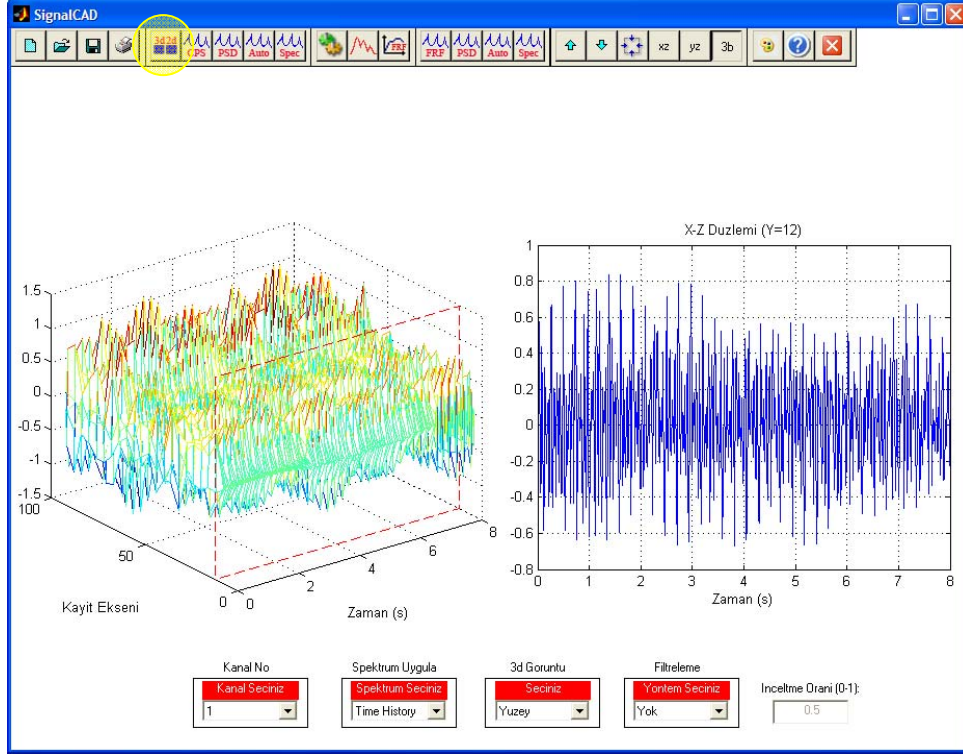
Öncelikle, SignalCAD programına, çevresel titreşim deneyinden elde edilmiş olan verilerin tanıtılması gerekmektedir. Ölçüm alınan her bir tepki kanalına ait bir dosya oluşturulur ve bu dosyalar sisteme yüklenirler. Üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinde 16 adet tepki kanalı model üzerine yerleştirilmiştir. Deney sonunda bu kanallardan bilgisayara aktarılan veriler ASCII ya da evrensel dosya formatında (Universal File Format – UFF) kaydedilirler, böylece SignalCAD programına kolaylıkla tanıtılabilirler.

Sistemde yeni verilerin yüklenmesi işlemi zorlanmış titreşim deney verilerinin yüklenmesine benzer şekilde yapılır. Çevresel titreşim yani sadece tepki (output only) seçeneği seçildikten sonra deneyden elde edilen tepki verilerinin SignalCAD programına yüklenmesi için bir dosya yükleme penceresi ekrana gelmektedir. Burada üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinde tepki kanallarından elde edilmiş olan verilerin dosyaları sisteme tanıtılmaktadır.

2.2.1.2.2. Sinyallerin Görsel Kontrolü, Filtreleme ve Spektral Değerlendirme

Çevresel titreşim deneyinden alınan kayıtlar sisteme yüklendikten sonra, SignalCAD programının ana ekranına Şekil 2.23’de görüldüğü gibi üç ve iki boyutlu spektrum kayıtları yüklenir. Çevresel titreşim deneyinde alınan verilerin kayıt formatı, zorlanmış titreşim deneyinden tamamen farklıdır. Zorlanmış titreşimde çok kısa bir süre için, darbe vurulur ve hemen kayıt alınarak ölçüm tamamlanır. Çevresel titreşim deneyinde ise, kayıt programına bir ölçüm süresi girilir ve bu ölçüm süresi tamamlanana kadar çevreden gelen darbe, titreşim, gürültü vb. her türlü etkiden kaynaklanan sinyaller kayıt altına alınır. Çevresel titreşim deneyinde, bir kanalın zorlanmış titreşim deneyinde olduğu gibi sadece bir adet zamana bağlı spektrumu yoktur. Burada kanalların sinyal serileri vardır. Bilgisayardan sisteme girilen kayıt süresi içinde, yine kullanıcı tarafından belirlenen periyotlarla zamana bağlı kayıtlar devam eder ve bu kayıtlardan oluşan veri kümesi oluşturulur. Şekil 2.23 de sol tarafta görülen üç boyutlu çizim, 1 numaralı kanala ait sinyal kümesini toplu halde

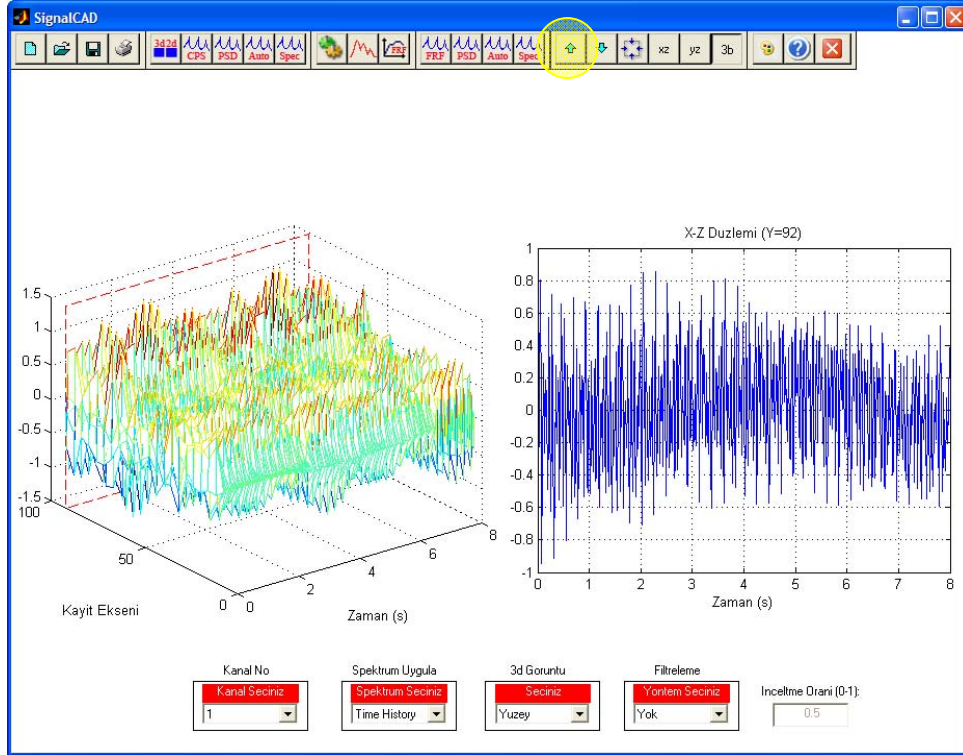
göstermektedir. Sağ taraftaki iki boyutlu ekranda ise, üç boyutlu veri kümesinin bir kayıt anına denk gelen ivme spektrum görüntüsü yer almaktadır.



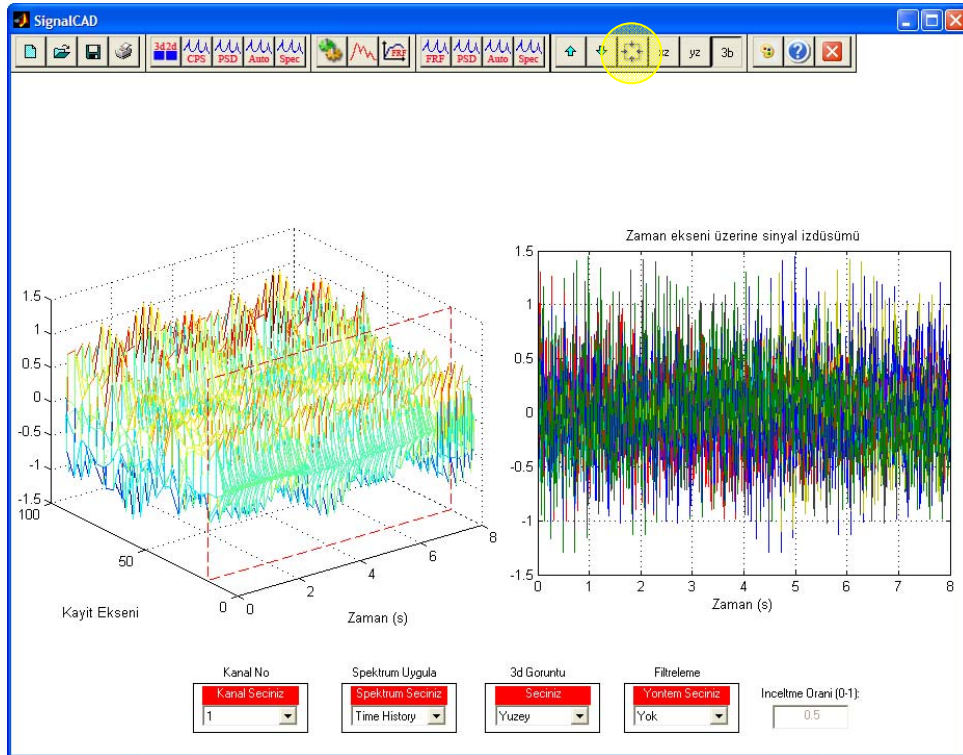
Şekil 2.23. Çevresel titreşim deneyinden elde edilen ve 1 numaralı kanala ait olan sinyal kümesinin üç boyutlu ve anlık görüntüleri

Şekil 2.23’de üç boyutlu ekranın üzerinde kırmızı renkli ve kesikli bir hat görülmektedir. Bu hat, sağ tarafta görülen iki boyutlu ekranın, sinyal kümesi içerisinde hangi konumdan görüntü aldığını kullanıcıya göstermektedir. Ana düğmelerden ileri ve geri tuşlarına basılarak, bu kırmızı hat hareket ettirilir ve aynı zamanda sağ tarafta bulunan iki boyutlu ekranda, hattın bulunduğu konuma ait görüntü yansıtılır. (17) numaralı ileri düğmesine basılarak hattın bir miktar ilerletilmesi ile elde edilmiş olan görüntü Şekil 2.24’de görülmektedir. Bu özellik sayesinde sistem tarafından kayıt altına alınmış olan bütün veriler tek tek incelenebilir.

SignalCAD ana ekranında, zamana bağlı ivme spektrum kümesi içerisindeki anlık zaman kayıtlarını görmenin yanında, iki boyutlu düzlem üzerinde bütün sinyalleri bir arada izdüşüm şeklinde görmek mümkündür. Bunun için ekranın üstünde yer alan ana düğmelerden (19) numaralı düğmeye basılarak, sinyal kümesinin izdüşümü şekil 2.25’de görüldüğü gibi elde edilir.

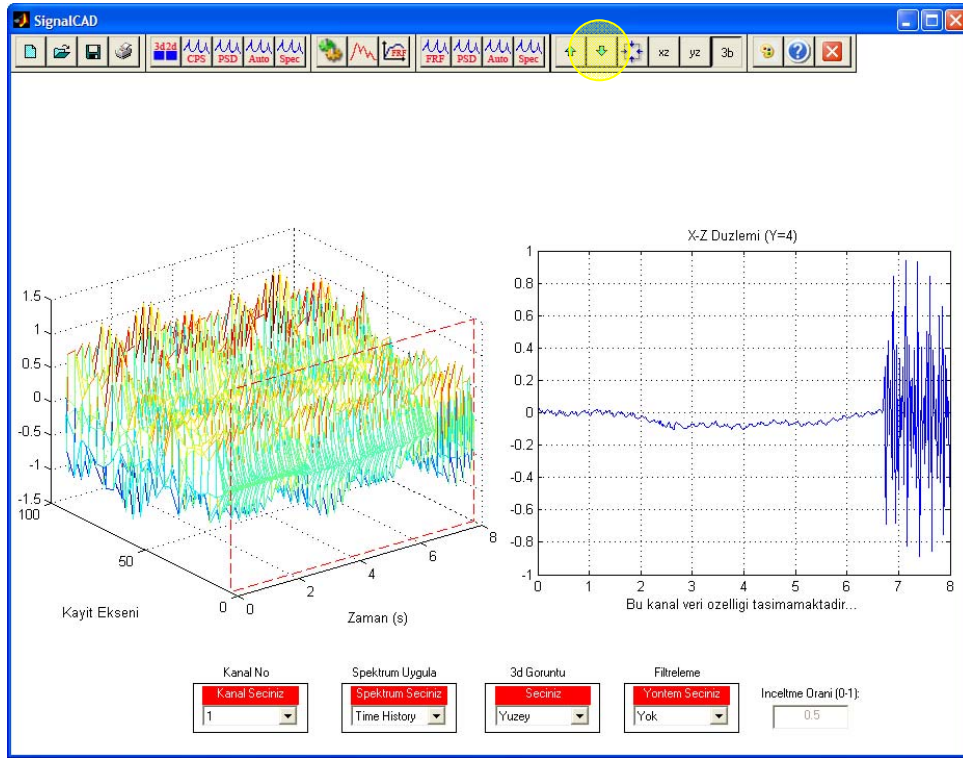


Şekil 2.24. İvme spektrum kümesinde görüntü hattının ilerletilmesi ile elde edilen görüntü (1 numaralı kanal için)



Şekil 2.25. İvme spektrum kümesinin üç boyutlu ve zaman ekseninde izdüşüm görüntüleri (1 numaralı kanal için)

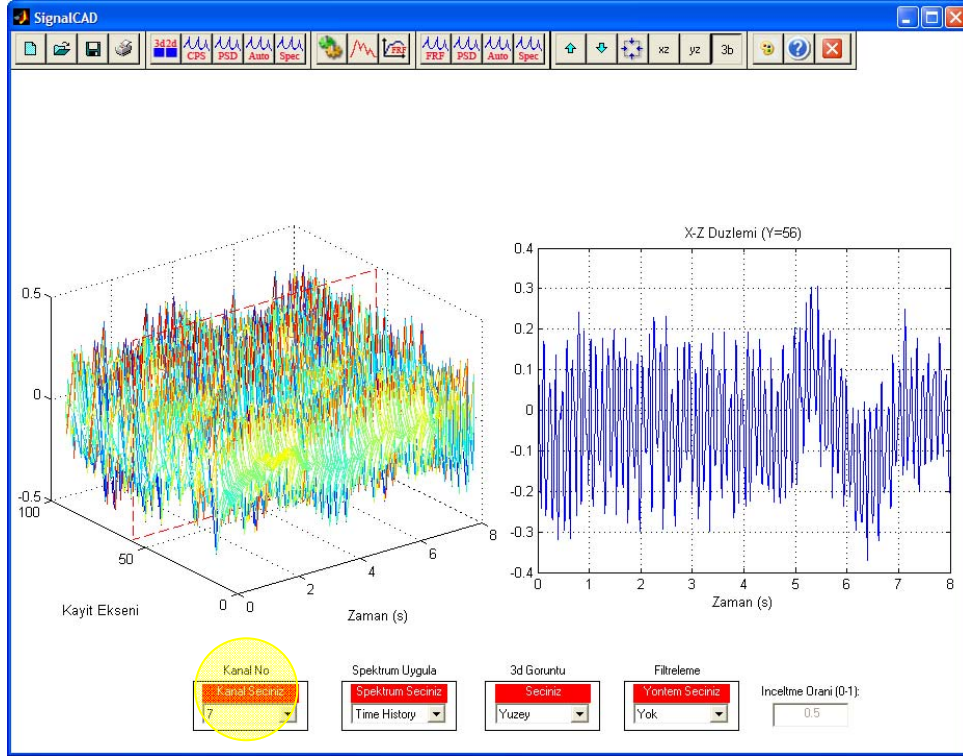
Sinyal kümelerine FFT dönüşümü uygulanarak spektrum kümeleri üretildikten sonra, bu spektrum kümelerine Tekil Değer Ayrıştırması uygulanarak ya da ortalamaları alınarak, kanalları temsil eden spektrumlar üretilmektedir. Bu nedenle, spektrum kümesi içerisinde yer alan bütün spektrum grafikleri sonuca doğrudan doğruya etki etmektedir. Hatalı bir anlık sinyal kaydı ya da sinyal özelliği bozulmuş kayıtların FFT dönüşümü de hatalı olacağından sonuca olumsuz olarak tesir etmektedirler. Bu sebeple sinyaller teker teker kontrol edilerek filtrelemeden geçirilmelidir. Bunun için SignalCAD programı, bütün verileri tarar ve sinyal özelliği olmayan verileri filtreleyerek devre dışı bırakır. Şekil 2.26'da 1 numaralı kanala ait sinyal kümesi içerisinde sinyal özelliği zayıf olduğu için filtrelemeye takılan bir sinyal kaydı görülmektedir. Bu sinyal incelendiğinde, kayıt süresinin belirli bir kısmında düz bir kayıt görülmektedir, bu da FFT dönüşümünde hatalı bir spektrum üretimine sebep olacaktır.



Şekil 2.26. İvme spektrum kümesi içerisinde sinyal özelliğini kısmen kaybetmiş olan bir anlık kayıt

Ana ekranın alt kenarında dört adet menü sistemi yer almaktadır. Bunlardan birincisi, sisteme yüklenmiş olan kanal numaralarını göstermektedir. Üç boyutlu çerçeve için toplam

16 adet tepki ölçüm kanalı olduğundan, burada 16 adet seçenek yer alır. Bunlardan 7 numaralı kanal seçilirse, ana ekrandaki görüntü Şekil 2.27’de görüldüğü gibi olur.



Şekil 2.27. SignalCAD programında seçilen 7 numaralı kanala ait zamana bağlı sinyal kayıtları (Üç boyutlu görüntü yüzey formatında)

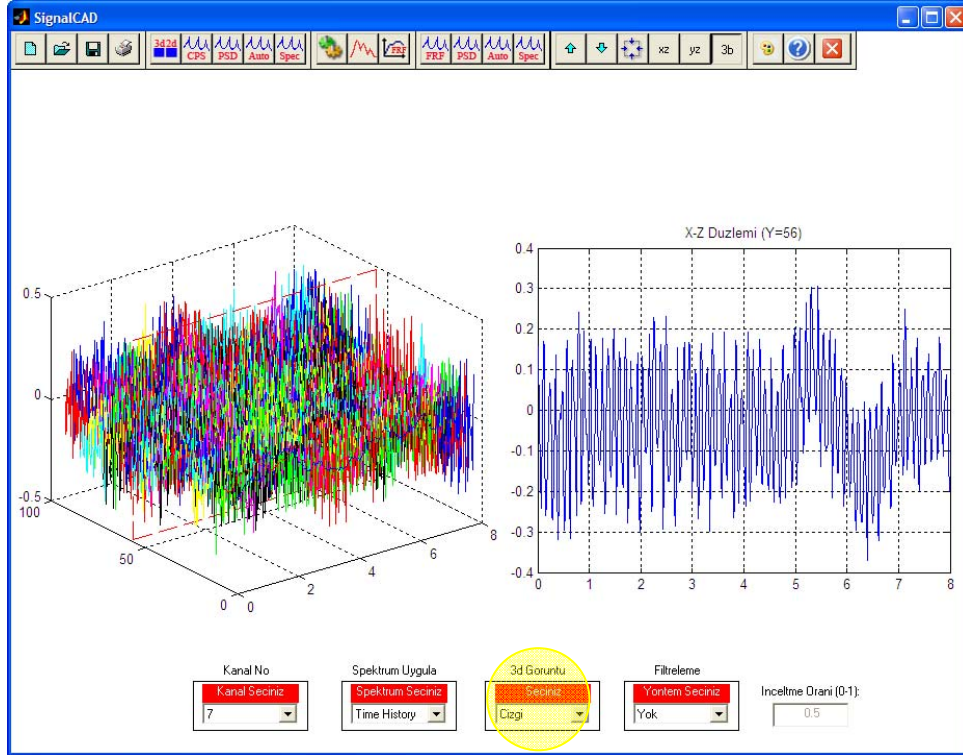
Şekil 2.27’de ekrandaki üç boyutlu veri kümesinin görüntüsü yüzey formatında yer almaktadır. Ana ekranın altında yer alan 3. menüde görüldüğü gibi görüntüleme seçeneği yüzey olarak ayarlanmıştır. Burada yüzeyden başka bir diğer görüntü alternatifi çizgi şeklinde görüntüleme değildir. Bu görüntüleme daha karmaşık görünmekle beraber, gerçek görüntüyü yansıtır. Bunlar sağ taraftaki düzlemde görülen anlık görüntülerin üç boyutlu ekrandaki birebir görüntülerinden oluşmaktadır. Şekil 2.27’de görülen 7 numaralı kanalın zamana bağlı sinyal kaydının görüntü seçeneği olarak çizgi seçilir ise Şekil 2.28’deki gibi görüntü elde edilir. Şekilden görülebileceği gibi değişen kayıtlarda farklı renkler kullanılmıştır.

Ana ekranın altında yer alan menü seçeneklerinden ikincisi ekranda gösterilecek olan spektrumun seçilmesi amacıyla konulmuştur. Burada spektrum görüntü seçenekleri olarak, sisteme yüklenen tepki spektrumu, otogüç spektrumu (APS), güç spektral yoğunluğu (PSD) ve spektrogram seçenekleri vardır. Burada detaylı analizden ziyade genel olarak

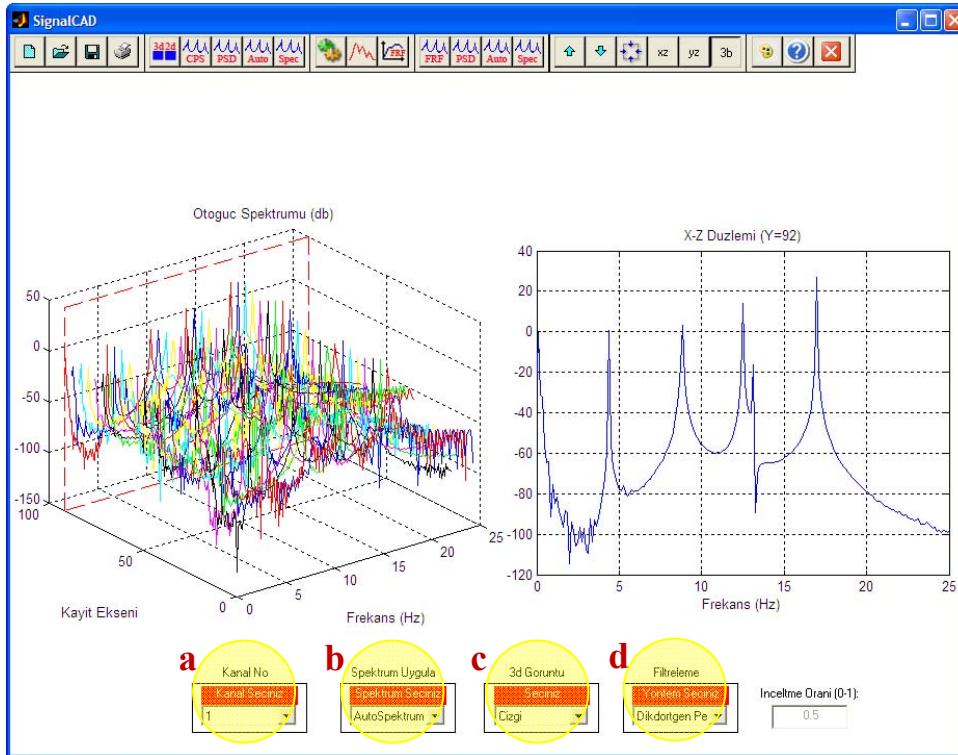
spektrumlara bir bakış amaçlanmıştır. Dördüncü menüde ise, seçilen spektrumda oluşan sızma hatalarının filtrelenmesi için uygulanacak pencereleme yöntemi seçenekleri yer almaktadır. Ana ekrandaki menülerden, analiz için 1 numaralı kanal (Şekil 2.29-a), hesap spektrumu olarak otogüç spektrumu (Şekil 2.29-b), üç boyutlu görüntü seçeneği olarak çizgi görünümü (Şekil 2.29-c) ve filtreleme yöntemi olarak da Dikdörtgen Pencereleme Yöntemi seçilirse (Şekil 2.29-d), elde edilen görüntü Şekil 2.29'da görüldüğü gibi olur.

Şekil 2.29 incelendiği zaman, bir otogüç spektrumu değil, otogüç spektrumlarından oluşmuş olan bir spektrum kümesinin elde edilmiş olduğu görülmektedir. Çevresel titreşim deneyinde her bir kanal için alınan kayıtlar, pek çok sinyal kaydını içerisine alan sinyal kümeleri olduğundan, sinyal kümesini oluşturan bütün bu sinyal kayıtlarının her birisine ait spektrumlar üretilir ve ilgili kanala ait spektrum kümesi elde edilmiş olur. Üretilen spektrum kümelerinin içerisinde yer alan her bir spektrum, kendisi ile aynı konumda bulunan sinyal kaydının FFT dönüşümünden elde edilmiştir. Sağ taraftaki ekranda, daha önce belirtilmiş olduğu gibi, ekranın solundaki 3 boyutlu ekseninde yer alan kırmızı hattın bulunduğu konuma karşılık gelen spektrum görüntüsü yer almaktadır. Bu üretilmiş olan otogüç spektrum kümesinin bütün elemanları, söz konusu kanalı temsil edecek olan otogüç spektrumunun üretilmesine katkı yapacaklardır. Bundan dolayı, en başta yapılan filtreleme taraması oldukça önem kazanmaktadır. Çünkü, hatalı ya da sinyal özelliği olmayan bir verinin otogüç spektrumu ya da başka bir spektral fonksiyonu hatalı olacağından, kanalı temsil edecek olan spektrum hesabına olumsuz etkisi olacaktır. 1 numaralı kanala ait otogüç spektrumunun düzlemde izdüşüm görüntüsü alınmak istendiğinde, (19) numaralı düğmeye basılarak Şekil 2.30'da yer alan görüntü elde edilir.

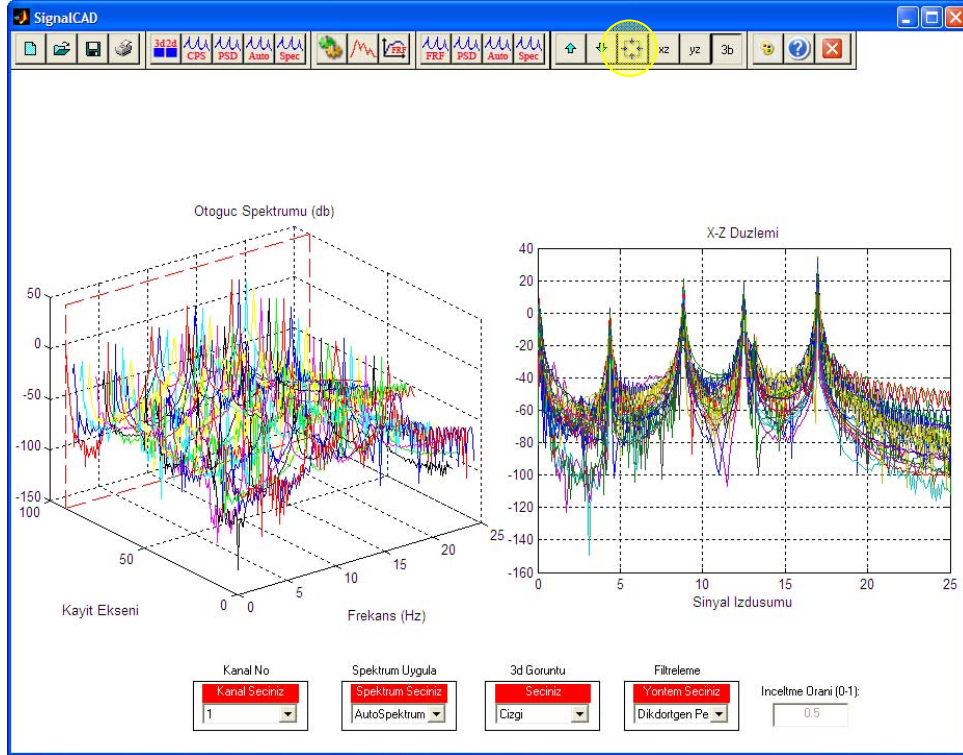
Şekil 2.30'da görülen spektrum kümesi, sadece 1 numaralı tepki kanalına aittir. Daha öncede belirtildiği gibi, bütün kanalların spektrum kümeleri incelenebilir, farklı filtreleme seçenekleri uygulanabilir ve farklı kanallara ait farklı spektrum grafikleri görüntülenebilir. Bu ekran, detaylı analizden ziyade görsel amaçlı olduğundan daha fazla detaya girilmeden, spektral fonksiyonların detaylı analizlerinin yapıldığı kısımlara geçilecektir. Zorlanmış titreşim deney verilerine uygulanan spektral analizlere benzer şekilde, çevresel titreşim sinyal verileri için de ayrı spektral analiz alanları hazırlanmıştır.



Şekil 2.28. SignalCAD programında seçilen 7 numaralı kanala ait zamana bağlı sinyal kayıtları (Üç boyutlu görüntü çizgi formatında)



Şekil 2.29. SignalCAD programında seçilen 1 numaralı kanal için hesaplanan APS spektrum kümesi ve iki boyutlu anlık görüntü



Şekil 2.30. SignalCAD programında seçilen 1 numaralı kanal için hesaplanan APS spektrum kümesi ve iki boyutlu izdüşüm görüntüsü

2.2.1.2.3. Çaprazgüç Spektrumu Spektral Analizlerinin Yapılması

Çevresel titreşim deneyinde, etki sinyalleri kaydedilmediğinden dolayı, frekans davranış fonksiyonları hesaplanamaz. Bunun yerine, tepki sinyalleri arasındaki çapraz korelasyon kullanılarak üretilen çapraz güç spektrumları, operasyonel modal analizde ana fonksiyon olarak kullanılır. Çaprazgüç spektrumunun üretiminde, tepki sinyallerinden bir tanesi referans sinyal olarak seçilir ve bu sinyal referans alınarak, tüm tepki sinyallerinin referans sinyale göre çaprazgüç spektrum fonksiyonları üretilir. Böylelikle her bir kanala ait referanslı çaprazgüç spektrumları elde edilmiş olur ve bu fonksiyonlar modal parametre belirleme programlarında giriş verisi olarak kullanılabilirler. SignalCAD programında çevresel titreşim deneyinden alınan sinyallerin çaprazgüç spektrumlarının hesabı, ana pencerede (6) numaralı düğmeye basılması ile (Şekil 2.31-a) açılan ekrandan yapılmaktadır.

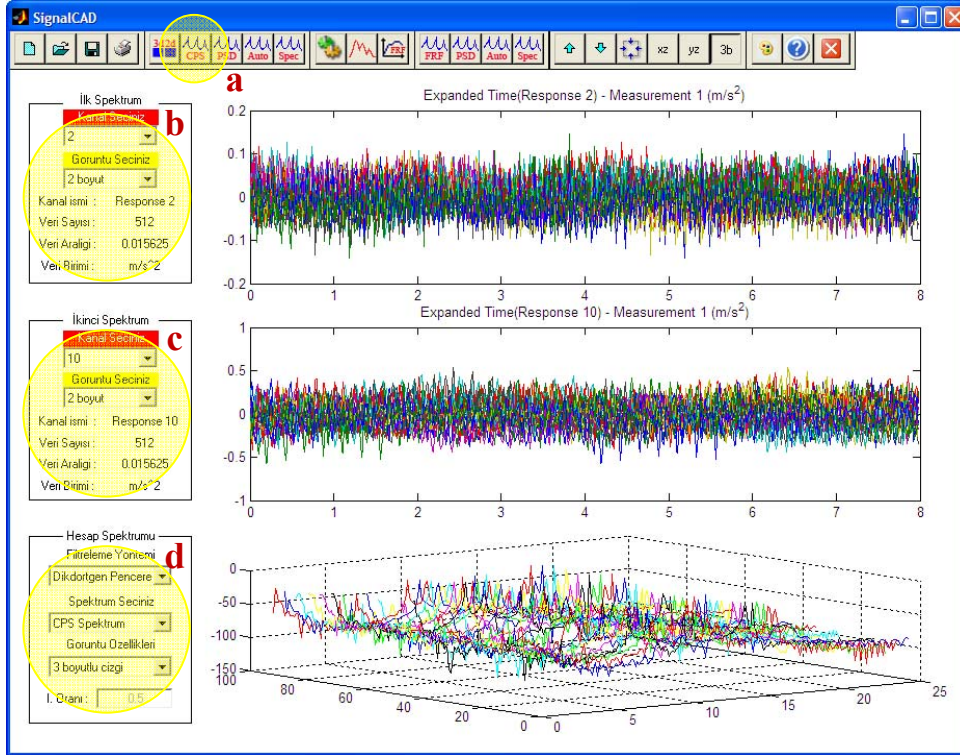
Açılan çaprazgüç spektrumu analiz ekranı üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, çaprazgüç spektrumu analizinde referans olarak kullanılacak olan kanal seçilir. Burada daha öncede bahsedildiği gibi, kanal seçildikten sonra sol tarafa kanalın ismi, veri

sayısı, veri aralığı ve birimi ile ilgili bilgiler yüklenir. Bu bilgilere SignalCAD programında müdahale edilmez, kanala ait dosyadan okunurlar. Kanal numarasının altında yer alan menüde ise, referans olarak seçilen kanalın ekrandaki görüntü özellikleri için seçenekler yer almaktadır. Bu seçenekler, üç boyutlu yüzey görüntüsü, üç boyutlu çizgisel görüntü ve iki boyut üzerinde izdüşüm görüntüleridir. Bu görüntüler hakkında ana ekranda yapılan incelemede detaylı bilgi verilmiş olduğundan burada izdüşüm görüntüsü üzerinden devam edilecektir. Referans kanal olarak 2 numaralı tepki sinyalinin seçilmesi ve görüntü özelliği olarak ta iki boyutlu izdüşümün seçilmesi ile (Şekil 2.31-b), 2 numaralı kanala ait tepki sinyal kümesi ekrana yüklenir.

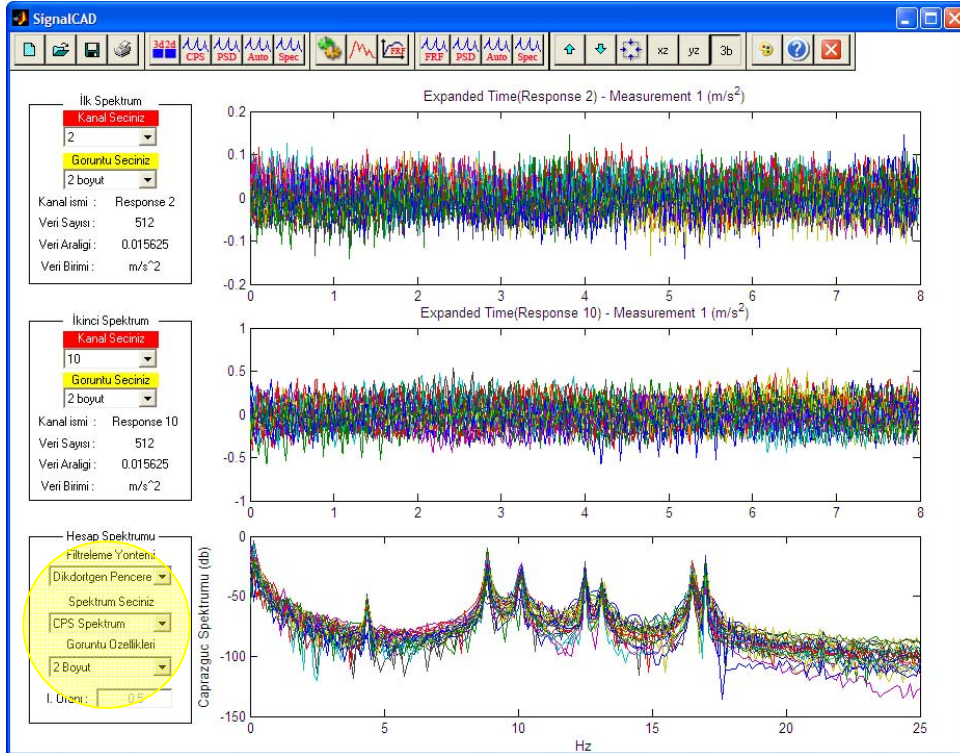
Referans kanal atandıktan sonra, bütün kanalların bu referans kanalına göre çaprazgüç spektrum analizi yapılabilir. Bunun için, spektral analiz ekranındaki ikinci bölüm ayrılmıştır. Burada tıpkı referans kanalın atanmasında olduğu gibi kanal seçimi yapılır ve seçimin yapılması ile beraber ekrana sinyal spektrumu yüklenir. Sol taraftaki bölüme ise daha öncede belirtildiği gibi sinyale ait olan ve bu sinyalin dosyasından okunan bilgiler yüklenir. Çaprazgüç spektrumu analizi için 10 numaralı kanaldan gelen sinyal seçilirse ve görüntü özelliği olarak ta iki boyutlu düzlem üzerine aktarılan izdüşüm seçilirse (Şekil 2.31-c), elde edilen görüntü Şekil 2.31'de görüldüğü gibi olur. Sinyalin ekrana yüklenmesi ile birlikte sinyale ait bilgiler de şekilde görüldüğü gibi ekranın sol tarafına otomatik olarak yüklenmektedir. Burada izdüşüm olarak yüklenen sinyal, üç boyutlu yüzey serisi şeklinde ya da üç boyutlu çizgi serisi şeklinde de gösterilebilmektedir.

Referans sinyali ile analiz yapılacak sinyal yüklendikten sonra çaprazgüç spektrumu analizine geçilir. Burada spektrumda oluşacak olan sızma hatalarını filtrelemek için kullanılacak olan pencereleme yöntemlerinden Dikdörtgen Pencereleme seçilirse ve görüntü özellikleri olarak ta üç boyutlu spektral çizgi seçeneği seçilir ise (Şekil 2.31-d), üretilen çaprazgüç spektrum serisine ait görüntü Şekil 2.31'de görüldüğü gibi olmaktadır.

Buradaki çaprazgüç spektrum serisi, 10 numaralı kanala aittir ve 2 numaralı kanal referans alınarak hesaplanmıştır. Üç boyutlu olarak gösterilen çaprazgüç spektrum kümesinin 2 boyutlu düzlem üzerinde yığılmış haldeki izdüşüm görüntüsü için, solda bulunan görüntü seçeneklerinden izdüşüm seçeneği seçilir ise elde edilen görüntü Şekil 2.32'de görüldüğü gibi olur.

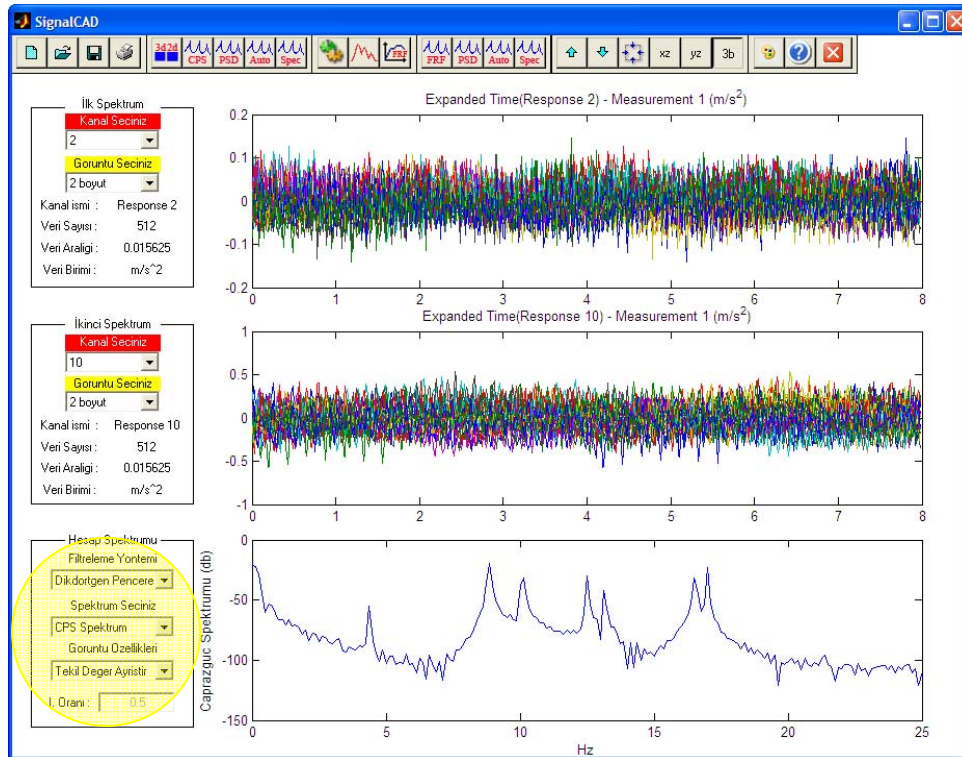


Şekil 2.31. SignalCAD programında 10 numaralı kanalın 2 numaralı kanala göre hesaplanan CPS kümesinin üç boyutlu çizgisel gösterimi



Şekil 2.32. SignalCAD programında 10 numaralı kanalın 2 numaralı kanala göre hesaplanan CPS kümesinin iki boyutlu düzlem üzerine izdüşümü

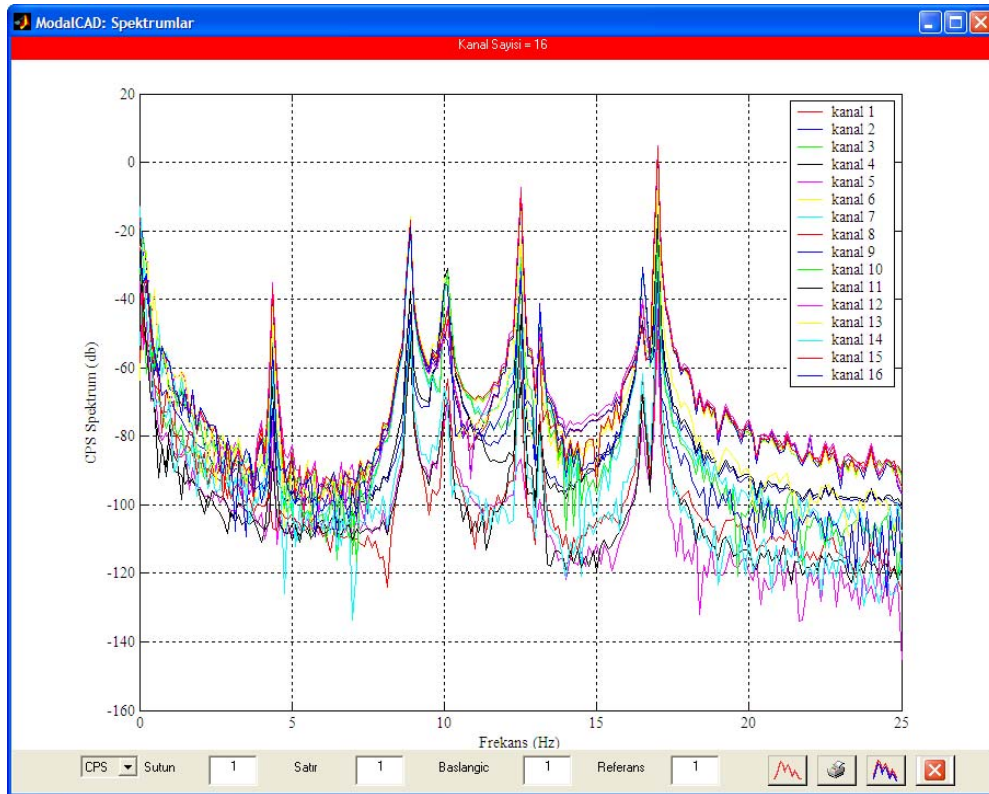
Elde edilen bu çaprazgüç spektrum kümesinin, sistemin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için geliştirilen analiz yöntemlerinde kullanılabilmesi için, ait olduğu kanalı temsil eden tek bir spektruma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu üretilen olan spektrumun matematiksel olarak kanalın özelliklerini tamamıyla yansıtması gerekmektedir. Bu sebeple de bulunduğu spektrum kümesindeki her bir spektrum grafiğinin katkısını alması gerekmektedir. Operasyonel modal analizde bu amaca yönelik olarak Tekil Değer Ayırıştırma (Singular Value Decomposition – SVD) yöntemi kullanılmaktadır. SignalCAD programında bu yöntem uygulanmakla beraber, spektral serinin ortalamasının alınması da alternatif olarak değerlendirilmektedir. Yapılan değerlendirmelerde ortalaması alınan spektral serilerin Tekil Değer Ayırıştırma tabii tutulan spektral serilere göre daha başarılı sonuçlar verdiği görüldüğünden, burada ortalama alma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin spektrum kümesine uygulanması ile 10 numaralı kanalın referans olarak kabul edilmiş olan 2 numaralı kanala göre çaprazgüç spektrumu, tek bir spektrum olarak elde edilebilir. Söz konusu analiz için, sol tarafta bulunan görüntü seçeneklerinde Tekil Değer Ayırıştırma seçeneği seçilir. Böylece yapılan çaprazgüç spektrum analizinden elde edilen sonuç, Şekil 2.33'te görüldüğü gibi olur.



Şekil 2.33. SignalCAD programında 10 numaralı kanalın 2 numaralı kanala göre hesaplanan CPS kümesinin tekil spektruma indirgenmesi

Bu şekilde elde edilen çapraz güç spektrumları, yalnızca tepki sinyallerinin ölçüldüğü çevresel titreşim deneyi uygulanan yapı sistemlerinin modal parametrelerinin belirlenmesinde hesap verisi olarak kullanılırlar. Şekil 2.33'te 10 numaralı kanal için elde edilen çaprazgüç spektrumu, sırasıyla bütün kanallar için tek tek hesaplanabilir ya da otomatik olarak toplu analize alınabilir.

Sistemin spektrumlarının tümünü bir arada görmek ya da bütün sistemi temsil eden mod gösterge fonksiyonlarını kullanmak, bütün tepe noktalarını görmek açısından oldukça faydalıdır. Çünkü bazı kanallarda, sisteme etki eden bütün tepeler görülmeyebilir. Düşey doğrultuda etkili olan bir mod, yatay doğrultudaki bir kanalda çıkmayabilir. Toplu gösterimde tepelerin gözden kaçma ihtimali ortadan kaldırılır. Üç boyutlu çerçeve modelinin 2 numaralı kanal referans alınarak bütün kanallar için hesaplanan çaprazgüç spektrumları Şekil 2.34'te gösterildiği gibidir. Bu pencere ana düğmelerden (12) numaralı düğmeye basılarak açılır.

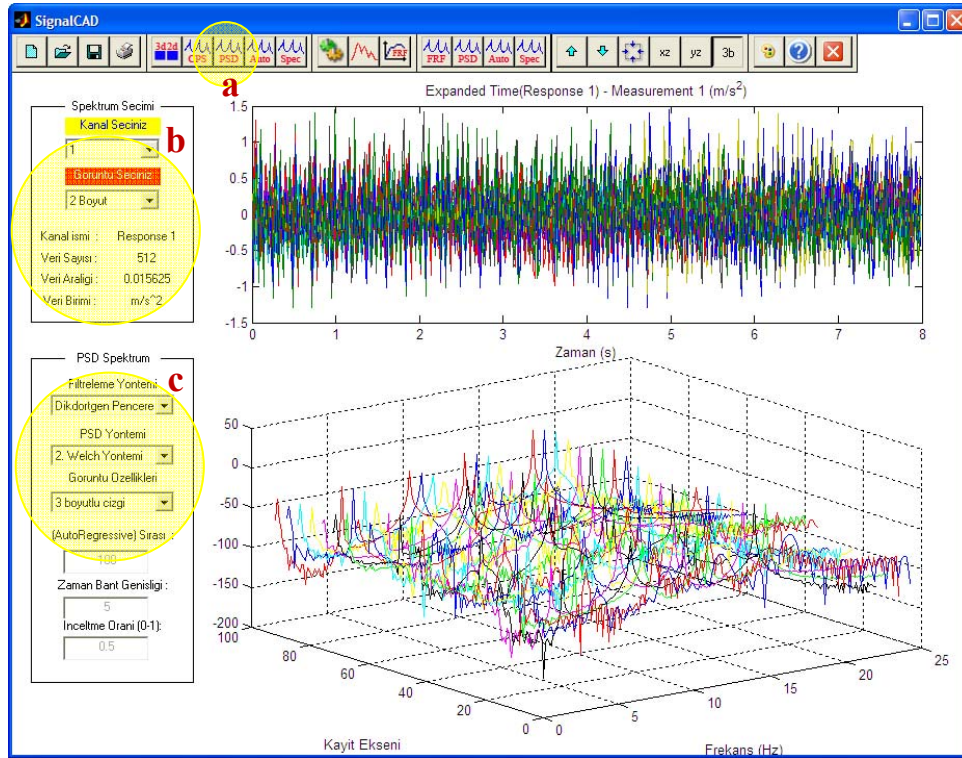


Şekil 2.34. Çevresel titreşim deney verileri kullanılarak üretilen CPS'ler

2.2.1.2.4. Güç Spektral Yoğunluk Analizinin Yapılması

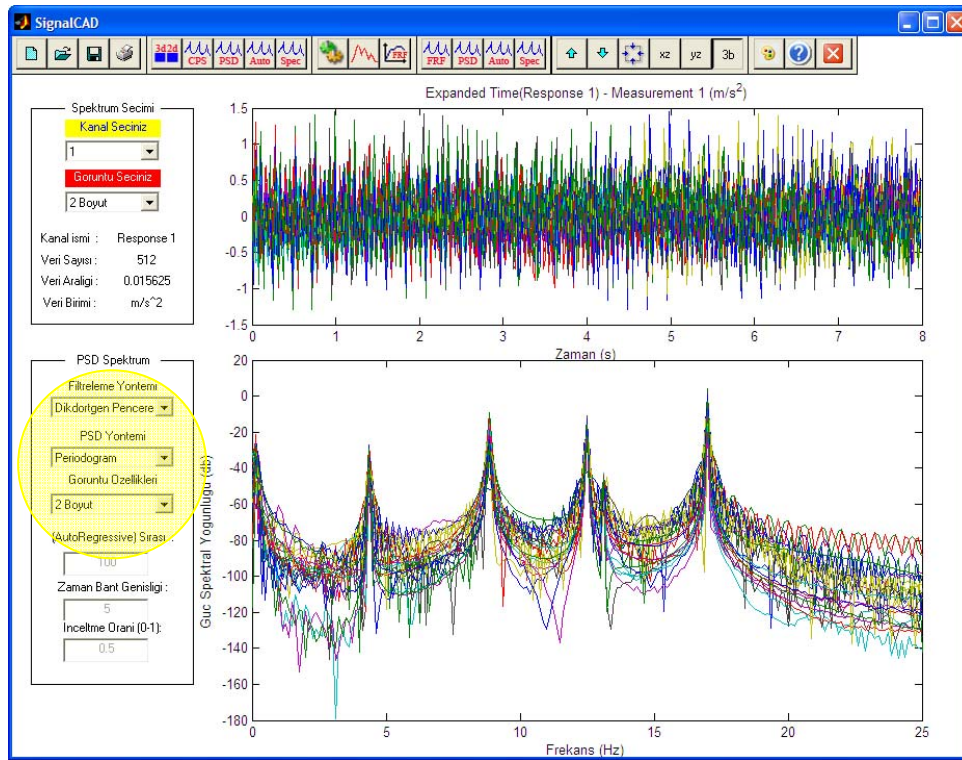
Güç spektral yoğunluk analizinde daha önceden zorlanmış titreşimde yapılan spektral analize benzer şekilde zamana bağlı spektrumlar sisteme yüklenir ve analiz edilirler. SignalCAD programında çevresel titreşim deneyinden alınan sinyallerin güç yoğunluk spektrumlarının analizi, (7) numaralı düğmeye basılması ile (Şekil 2.35-a) açılan ekrandan yapılmaktadır. Analiz yapılacak kanal olarak 1 numaralı kanalı ve görüntü özellikleri olarak da iki boyutlu izdüşüm spektrumu seçilirse (Şekil 2.35-b), 1 numaralı kanalın verileri ekrana yüklenir. Ekran veriler yüklendikten sonra, daha öncede bahsedildiği gibi kanal bilgileri ekranın sol tarafına yüklenir.

Kanal sinyal bilgileri ekrana yüklendikten sonra, güç spektral yoğunluk analiz seçenekleri seçilerek analiz yapılır. Güç spektral analiz yöntemi olarak Welch Yöntemi, sızma hatalarını filtreleme yöntemi olarak Dikdörtgen Pencereleme Yönteminin seçilmesi ile yapılan spektral analiz için görüntüleme seçeneği olarak 3 boyutlu çizgisel spektrum seçilirse (Şekil 2.35-c) elde edilen görüntü Şekil 2.35'te görüldüğü gibi olur.



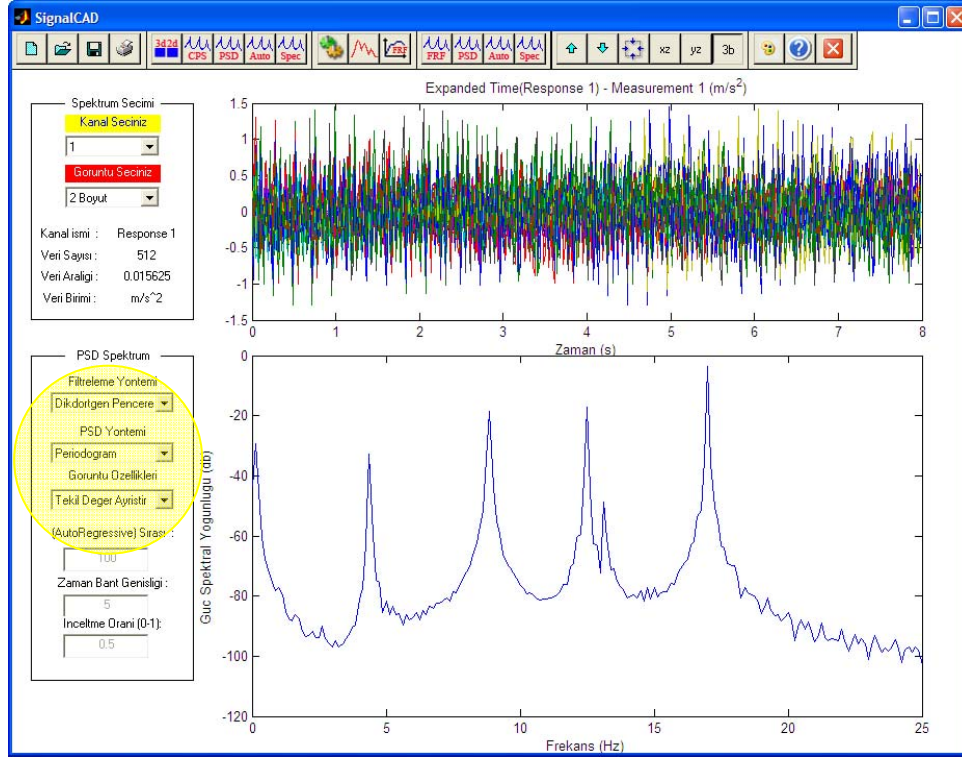
Şekil 2.35. SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait sinyalin Welch Yöntemi ile yapılan PSD analizi sonucunun üç boyutlu çizgisel görüntüsü

Burada 1 numaralı kanala ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu kümesi görülmektedir. Şekilde detaylı olarak görüldüğü gibi, her bir zamana bağlı sinyal spektrumuna karşılık, frekans ortamında bir güç spektral yoğunluk fonksiyonu üretilmiştir. Bu durum daha önceden de belirtildiği gibi operasyonel modal analizin, yani sadece tepkinin ölçüldüğü modal analizin, deneysel modal analizden, yani etki ve tepkinin ölçüldüğü modal analizden, sinyal formatı olarak görülen en belirgin farklılığıdır. Üretilen bu güç spektral yoğunluk fonksiyonunun iki boyutlu düzlem üzerine izdüşümü alınan görüntüsü seçilirse Şekil 2.36'da görülen görüntü elde edilmiş olur. Bu görüntü, üç boyutlu veri kümesinin düzlemde birbiri üzerine bindirilmesinden oluşmaktadır.



Şekil 2.36. SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait sinyalin Welch Yöntemi ile yapılan PSD analizi sonucunun iki boyutlu izdüşüm görüntüsü

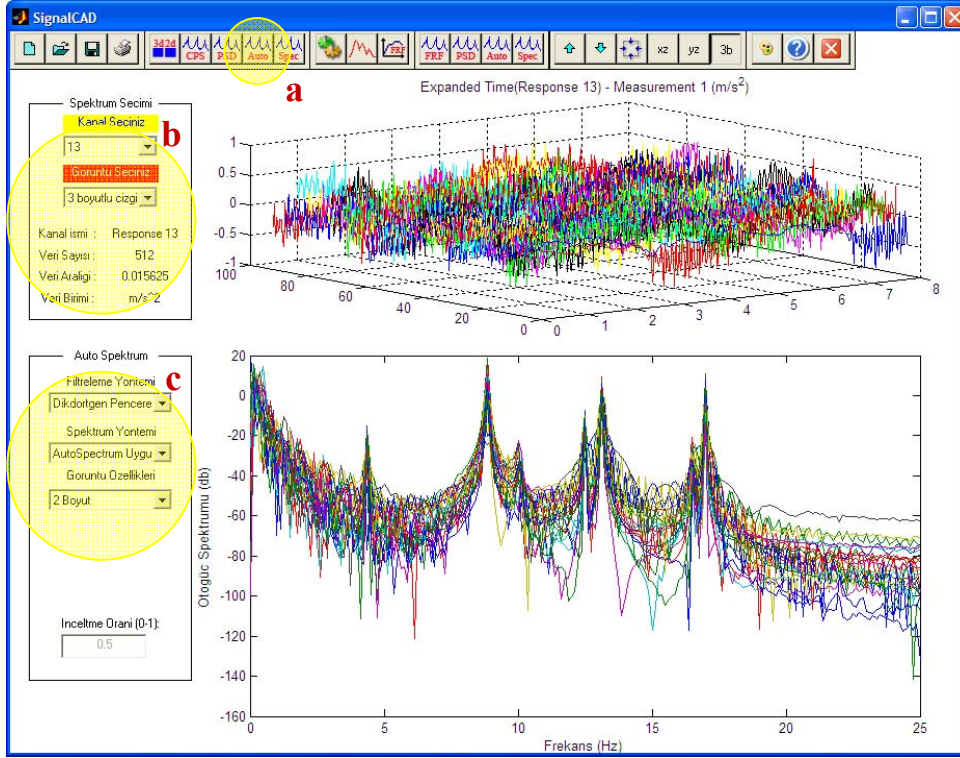
Bu spektral yoğunluk kümesi üzerinde daha önce bahsedilmiş olan Tekil Değer Ayırıştırma analizi uygulanır ise, 1 numaralı kanala ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.37'de görüldüğü gibi elde edilir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu yalnızca tepkinin ölçüldüğü titreşim deneyleri yapılan sistemlerin modal parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilen bazı yöntemlerde giriş verisi olarak kullanılabilir. Bu nedenle dikkat edilmesi gereken önemli bir spektral fonksiyon türüdür.



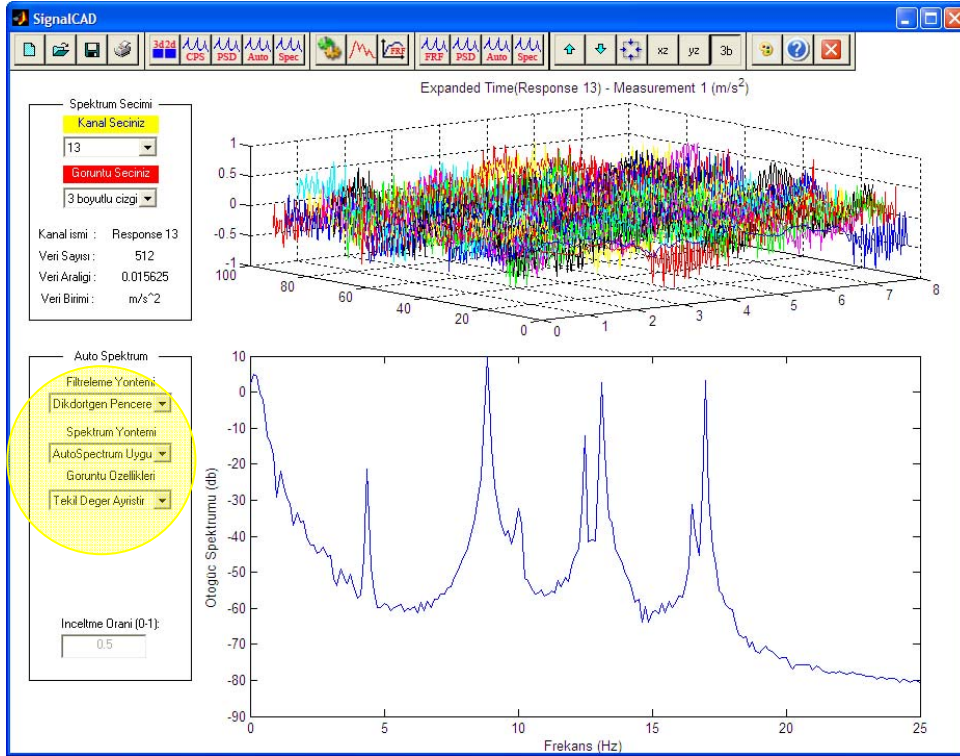
Şekil 2.37. SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait sinyalin PSD fonksiyonunun hesabı

2.2.1.2.5. Otogüç Spektrumu Analizinin Yapılması

Otogüç spektrumu analizinde izlenecek yol, güç spektral yoğunluk fonksiyonunun analizinde izlenecek yol ile aynıdır. Otogüç spektrumu analizinde zamana bağlı sinyaller sisteme yüklenir ve analiz edilirler. SignalCAD programında çevresel titreşim deneyinden alınan sinyallerin güç spektral yoğunluk spektrumlarının analizi (8) numaralı düğmeye basılması ile (Şekil 2.38-a) açılan ekrandan yapılmaktadır. Analiz yapılacak kanal olarak 13 numaralı kanal ve görüntü özellikleri olarak 3 boyutlu çizgisel spektrum seçilirse (Şekil 2.38-b), 13 numaralı kanalın verileri ekrana yüklenir. Kanal sinyal bilgileri ekrana yüklendikten sonra, otogüç spektrum seçenekleri seçilerek analiz yapılır. Sızma hatalarını filtreleme yöntemi olarak Dikdörtgen Pencereleme Yönteminin seçilmesi ile yapılan spektral analiz için görüntüleme seçeneği olarak 3 boyutlu çizgisel spektrum seçilirse (Şekil 2.38-c) elde edilen görüntü Şekil 2.38'de görüldüğü gibi olur. Bu otogüç spektrum kümesi üzerinde daha önce bahsedilmiş olan Tekil Değer Ayrıştırma analizi uygulanır ise, 16 numaralı kanala ait otogüç spektrum fonksiyonu Şekil 2.39'da görüldüğü gibi elde edilir. Her bir kanalın otogüç spektrumu aynı yol takip edilerek belirlenebilir.



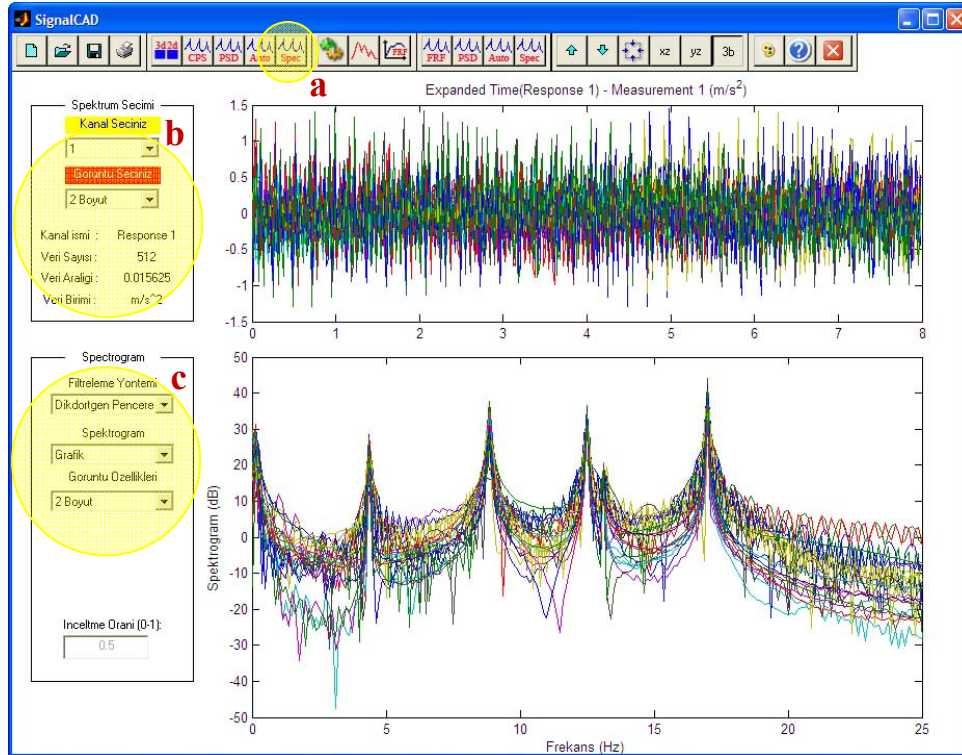
Şekil 2.38. SignalCAD programında 13 numaralı kanala ait sinyalin APS analiz sonucunun iki boyutlu izdüşüm görüntüsü



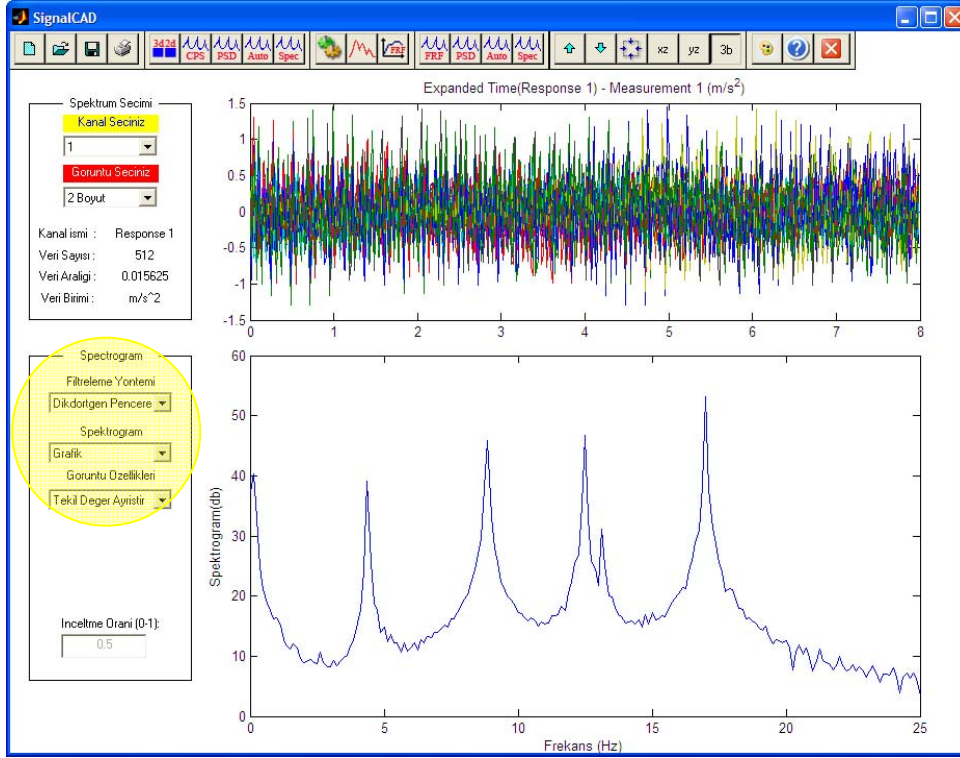
Şekil 2.39. SignalCAD programında 13 numaralı kanala ait APS fonksiyonunun hesabı

2.2.1.2.6. Spektrogram Analizinin Yapılması

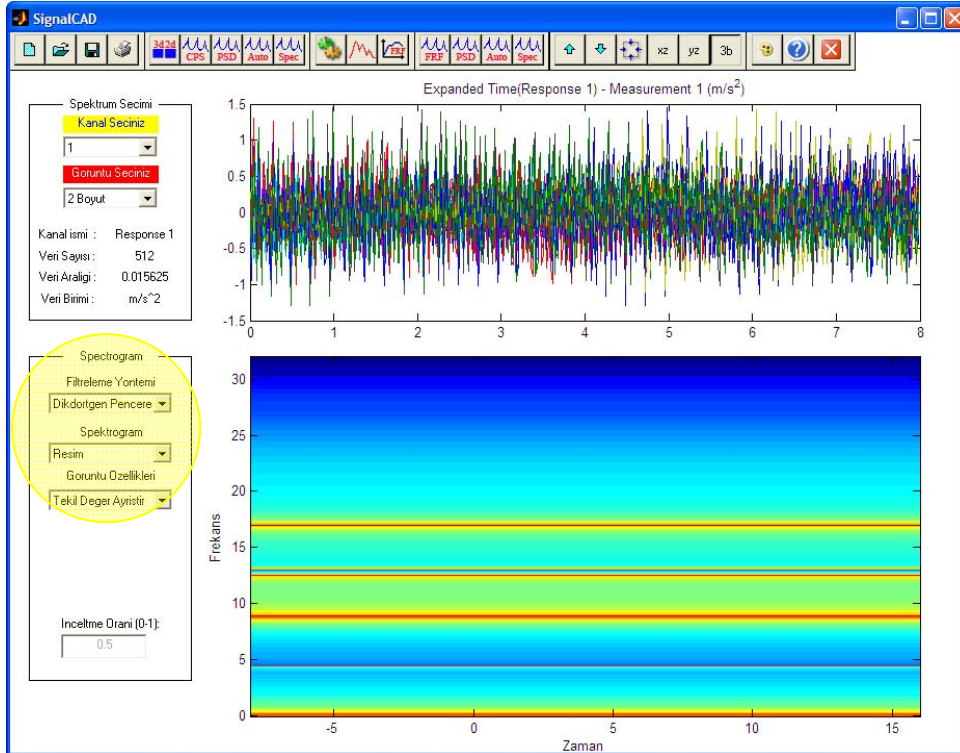
Spektrogram analizinde, daha önce bahsedilen spektral analizlerden farklı olarak grafiksel ve resimsel spektrogram seçenekleri bulunmaktadır. Şekil 2.40'ta 1 numaralı etki sinyalinin Dikdörtgen Pencereleme filtresi kullanılarak grafiksel spektrogramın elde edilmesi gösterilmektedir. Burada spektrogram kümesinin 2 boyutlu düzlem üzerine izdüşümü alınmıştır. Elde edilen spektrogram kümesine, Tekil Değer Ayırıştırma yöntemi uygulanırsa, ilgili kanala ait spektrogram elde edilir. Bu Tekil Değer Ayırıştırma işleminin resimsel spektrogram analizinde de uygulanması gerekmektedir. Şekil 2.41'de 1 numaralı kanala ait spektrogram kümesine Tekil Değer Ayırıştırma analizinin yapılması gösterilmektedir. Spektrogramın resimsel tarama şeklinde görüntüsü elde edilmek istenirse, sol tarafta yer alan spektrogram seçeneklerinden resim seçilir ve Şekil 2.42'de görüldüğü gibi 1 numaralı kanalın resimsel spektrogramı elde edilir. Resimsel spektrogramda x eksenini zaman, y eksenini ise frekans değişimini göstermektedir. Spektrum grafiklerinde görülen tepe noktalarına karşılık, burada rezonans bölgelerinde renk değişimi hat şeklinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.40. SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait grafiksel spektrogramın izdüşümü



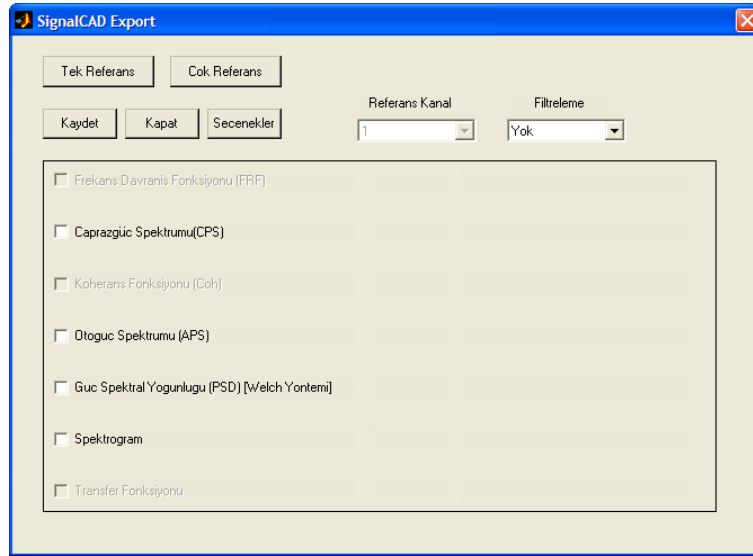
Şekil 2.41. SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait grafiksel spektrogramın Tekil Değer Ayrıştırması



Şekil 2.42. SignalCAD programında 1 numaralı kanala ait resimsel spektrogramın elde edilmesi

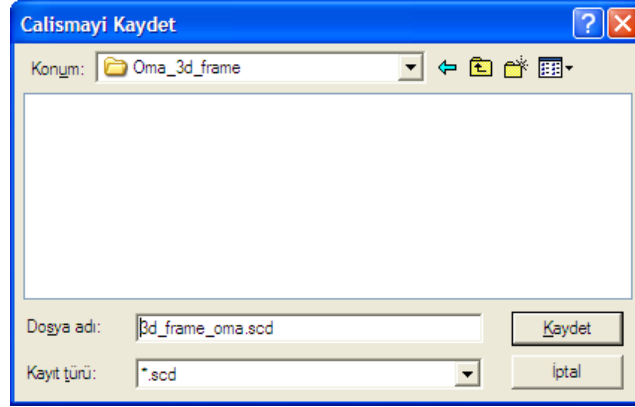
2.2.1.2.7. Sinyallerin Toplu Analizi ve Spektrumların Kaydedilmesi

Bu zamana kadar gösterilen bütün spektral analizlerin tek bir pencere içerisinde yapılarak kaydedilmesi mümkündür. Böylece toplu halde kaydedilen veriler, modal parametre belirlenmesi için geliştirilen programlarda giriş verisi olarak kullanılabilirler. Otomatik analiz ve spektrumların kaydedilmesi için öncelikle (3) numaralı düğmeye basılır, böylelikle Şekil 2.43'te görülen pencere açılır. Bu pencerede etki tepki modal analizi için açılan spektrum analiz ve kayıt penceresinden farklı olarak bazı spektrumların kapalı olduğu görülmektedir. Bu spektrumların hesaplanması için etki sinyali gerekmektedir. Çevresel titreşimde sadece tepkiler ölçüldüğünden bu spektrumlar analizlere dahil edilmemişlerdir.

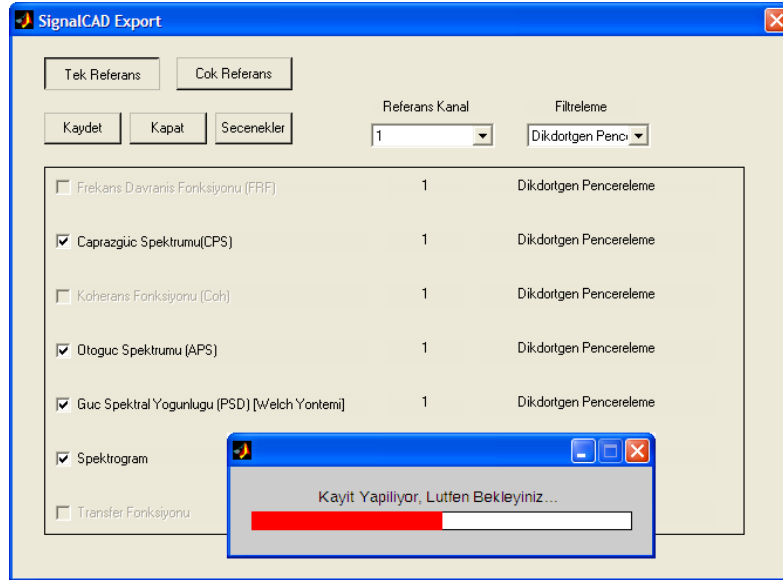


Şekil 2.43. SignalCAD programında sadece tepki modal analizi için otomatik spektrum analiz ve kayıt penceresi

Kayıt yapılmadan önce, referans kanalının, filtreleme yönteminin, hızlı Fourier dönüşümü seçeneklerinin ve tek ya da çok referanslı analiz seçeneklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Burada zorlanmış titreşimden farklı olan tek husus referans kanalının belirlenmesi hususudur. Zorlanmış titreşimde referans kanalı olarak, etki kanallarından bir tanesinin seçilmesi gerekirken, çevresel titreşimde referans kanalı tepkinin ölçüldüğü kanalların içerisinde seçilmelidir. Şekil 2.44 ve Şekil 2.45'te çevresel titreşim deneyinden alınan veriler kullanılarak, sadece tepki modal analizi için spektrumların otomatik analizinin ve kayıtlarının yapıldığı ekranlar gösterilmektedir.



Şekil 2.44. Sadece tepki modal analizi için kayıt penceresi



Şekil 2.45. Üç boyutlu çerçevenin sadece tepki modal analizi için seçilen spektrumların analiz ve kayıt aşaması

Kayıt işlemi bittikten sonra spektral analizler tamamlanmış ve böylelikle deneysel modal analizin sayısal sinyal işleme aşaması başarıyla sonuçlandırılmış olur.

Buraya kadar tez çalışması kapsamında geliştirilmiş SignalCAD programının, üç boyutlu laboratuvar modeli üzerinde gerçekleştirilmiş olan zorlanmış ve çevresel titreşim deneylerinden alınan verilerin işlenmesinde nasıl kullanılacağı anlatılmıştır. SignalCAD programı, tamamıyla fonksiyonel bir yapıda olup yaklaşık 120 adet fonksiyondan oluşmaktadır.

Bu aşamadan sonra yapılması gereken, SignalCAD programı ile üretilen spektrumların analiz edilerek, ölçüm alınan yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin

belirlenmesidir. Bu işlemin yapılabilmesi için de, açıklanan modal parametre belirleme yöntemlerinin kullanıldığı bir analiz programının hazırlanması gerekmektedir.

2.2.2. ModalCAD Programı

Günümüzde mevcut çeşitli modal analiz yazılım paketleri bulunmaktadır. Başlangıçta etki tepki verilerine dayalı tanımlama için makine mühendisliği alanında geliştirilmişlerdir. Bugün ise bu paketlerden bazıları sadece tepki modal analizi modüllerini de içermektedir. Bunlardan en dikkat çekenler OMA programı (2006), Artemis programı (2009) ve LMS CADA-X sistemi (1998)'dir. Ancak ticari yazılımların birçoğunda bir araştırmacı için sakıncalar bulunmaktadır: Birincisi, algoritmanın uygulanmasını denetlemek ve çoğunlukla bu yazılımlara kendi geliştirdiğiniz algoritmaları ilave etmek mümkün değildir. Diğer taraftan, MATLAB (2009a), hesaplama, görüntüleme ve programlama araçları sunan açık bir ortamdır. Temel MATLAB paketi, genel amaçlı kullanılan fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu fonksiyonları kullanarak, geliştirilerek ve kendi fonksiyonlarını yazarak, programcı kendi yazılım kütüphanesini oluşturabilmektedir. Kütüphanede yer alan fonksiyonların çoğu oturma içerisinde çağrıldıklarında derlenen erişilebilir ASCII dosyalarıdır. Bundan dolayı bu fonksiyonların uygulamaları öğrenilebilir ve fonksiyonlar kullanıcının amacına göre değiştirilebilir.

Mevcut yazılım paketlerinin bu dezavantajlarının yanında, çok yüksek maliyetlerinin olması, ayrıca etki tepki modal analizi ile sadece tepki modal analizi için farklı yazılımların üretilmesi, her bir modülün ayrı ayrı satılması gibi sebepler, temel analiz yöntemlerini içerisinde barındıran, grafik altyapısı kuvvetli ve hem etki tepki hem de sadece tepki modal analizinin yapıldığı bir bilgisayar programının geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkartmıştır. Bu amaçla geliştirilen programın ismi ModalCAD olarak belirlenmiştir.

ModalCAD programı, çevresel veya zorlanmış titreşim deneylerinden alınan ham verilerin işlenmesi ile elde edilen spektrumların analiz edilerek deney yapılan yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen, kullanıcı etkileşimli menü sistemleri ve butonları ile ileri grafik teknolojisinin kullanıldığı bir analiz programıdır. ModalCAD programında hem etki tepki hem de sadece tepki modal analizi yapılabilmektedir. Modal parametrelerin belirlenmesi konusunda geliştirilmiş olan matematiksel yöntemlerin en gelişmiş olanları ModalCAD programının bünyesinde yer

almaktadır. ModalCAD programında kullanılabilen modal parametre belirleme yöntemleri tablo 2.1 de görüldüğü gibidir.

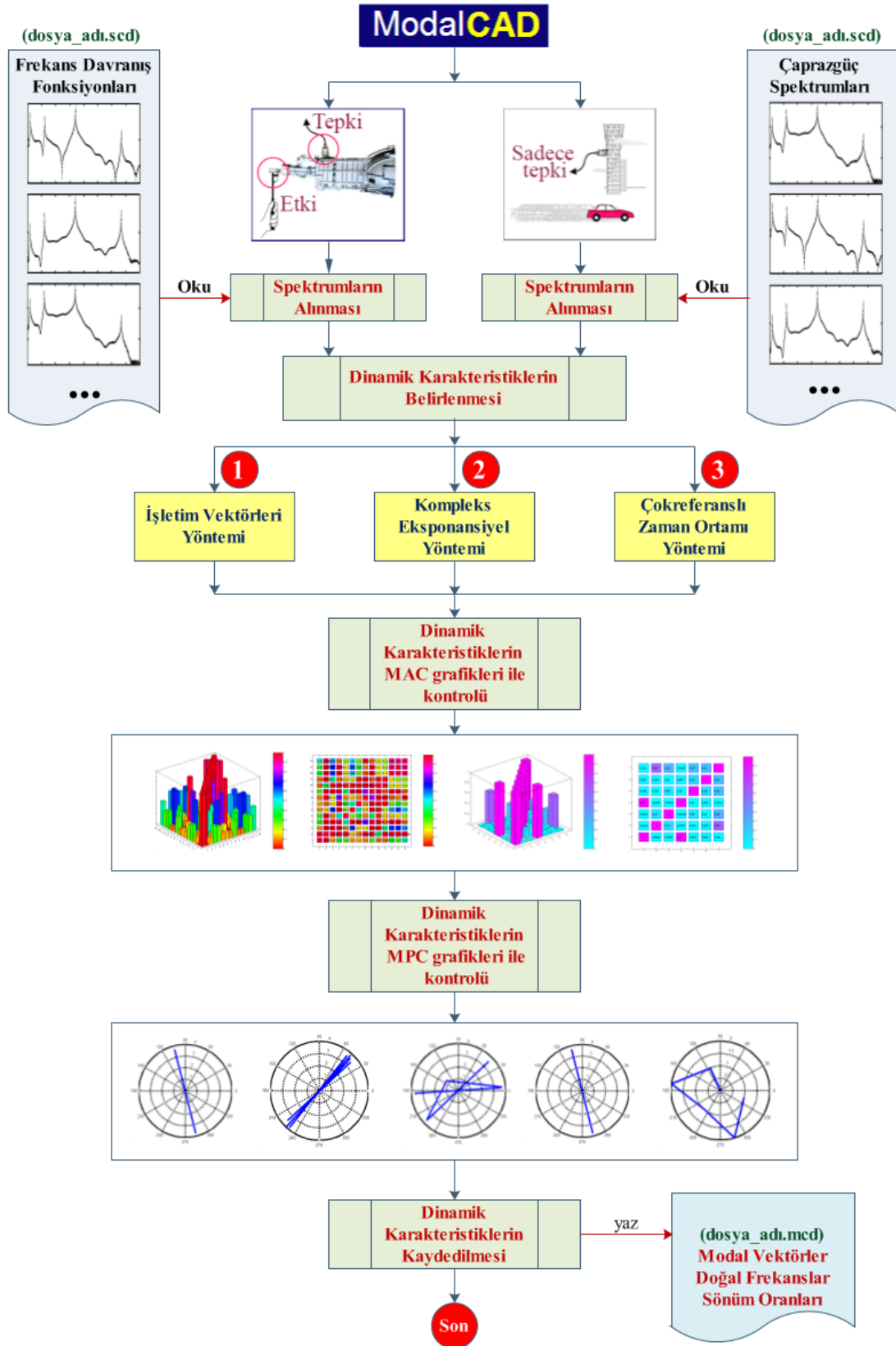
Tablo 2.1. ModalCAD programında yer alan modal parametre belirleme yöntemleri

Yöntem	Ortam
İşletim Vektörleri Yöntemi (Operating Vectors Method – OV)	Frekans
Kompleks Ekspansiyel Yöntemi (Complex Exponential Method – CE)	Zaman
Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi (Polyreference Time Domain Method – PTD)	Zaman

Modal parametrelerin belirlenmesinin yanında, belirlenen modların birbirleri ile uyumu, çeşitli modal kontrol yöntemleri ile modal parametrelerin doğruluk ve güvenilirliği ModalCAD programında grafiksel olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, dinamik karakteristikler belirlendikten sonra, mod şekillerinin görsel takibi ve animasyon filmleri de ModalCAD programında izlenebilmektedir. ModalCAD programının çalışma sistemini gösteren genel akış diyagramı Şekil 2.46 da görüldüğü gibidir.

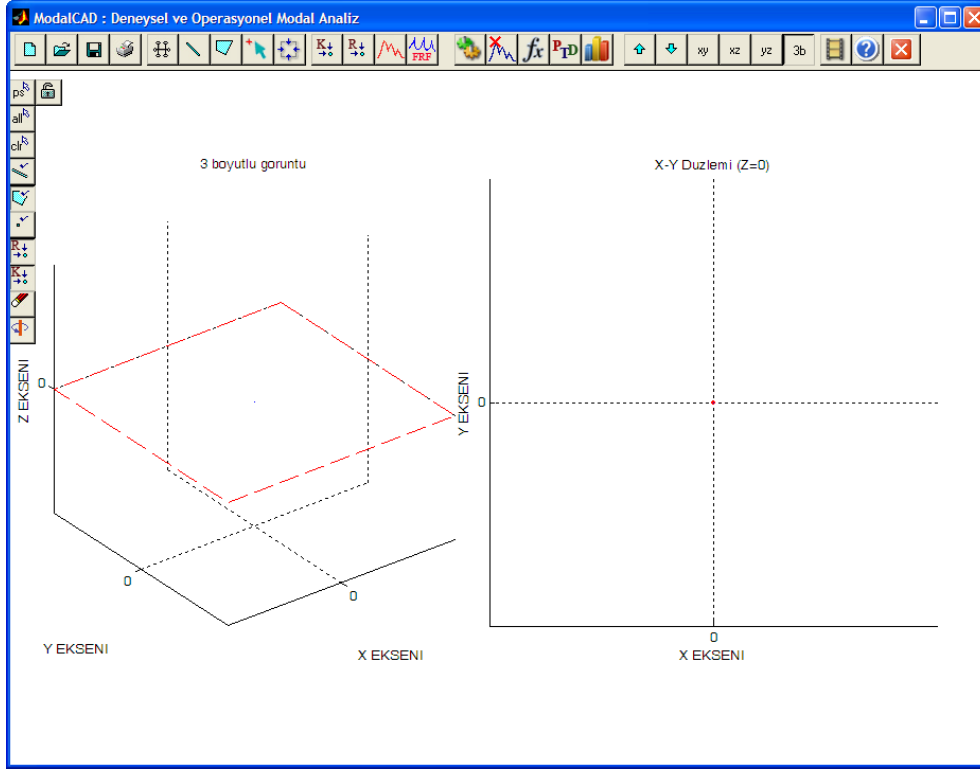
ModalCAD programında modal parametre belirlemek için izlenecek olan yol aşağıdaki gibidir:

- SignalCAD ya da başka bir sinyal analiz programı tarafından üretilen spektrumların sisteme yüklenmesi
- Zorlanmış veya çevresel titreşim deneyi yapılmış olan yapı sisteminin geometrisinin sisteme tanıtılması
- Sistem geometrisi üzerinde kanalların, buldukları düğüm numaralarına yerleştirilmeleri
- Modal parametre belirleme yöntemleri kullanılarak yapı sisteminin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi
- Elde edilen modal parametrelerin doğruluk ve tutarlılık kontrolleri
- Mod şekillerinin görsel animasyonlarının değerlendirilmesi



Şekil 2.46. ModalCAD programı ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ve sonuçların kontrolü için hazırlanan akış diyagramı

ModalCAD programı Şekil 2.47’de görüldüğü gibi bir ana pencere etrafında kurulmuştur. Bu pencerede şekilde görüldüğü gibi ana düğmeler yatay olarak, geometrik görüntü ve seçimler ile ilgili yardımcı düğmeler ise düşey olarak dizilmişlerdir.

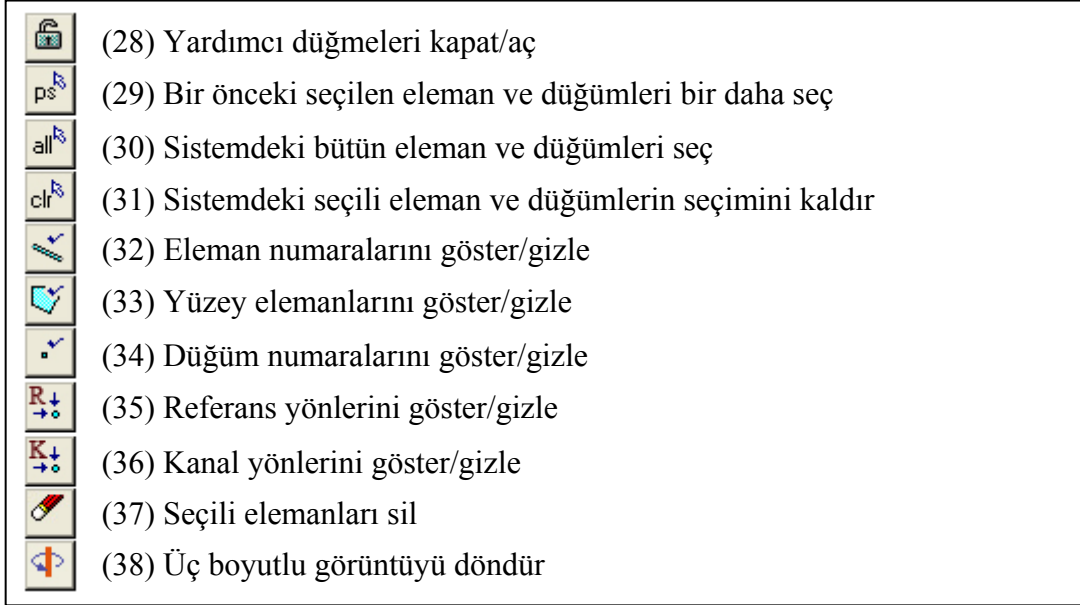


Şekil 2.47. ModalCAD programı ana penceresi

ModalCAD programının üst tarafında yatay yönde sıralanmış olan ana düğmelerin kullanım amaçları Şekil 2.48’de açıklanmaktadır. Sol kenarda düşey doğrultuda sıralanmış olan düğmelerin kullanım amaçları da Şekil 2.49’da görülmektedir. Bu düğmeler kullanılarak, dinamik ölçümleri yapılan yapı sistemlerinin modal karakteristikleri adım adım belirlenir. Şekillerde, her bir düğmenin açıklamaları numaralandırılarak yapılmıştır. Burada yapılan numaralandırmalar, ilerleyen bölümlerde hangi düğmenin kullanıldığını ifade etmekte kullanılırlar.

	(1) Yeni spektral fonksiyonların sisteme yüklenmesi
	(2) ModalCAD dosyasının açılarak sisteme yüklenmesi
	(3) Yapılan çalışmanın .mcd uzantılı olarak kaydedilmesi
	(4) Ekrandaki görüntünün yazdırılması
	(5) Yeni geometri için çizim ızgarasının oluşturulması
	(6) Geometriye çizgisel eleman eklenmesi
	(7) Geometriye yüzeysel eleman eklenmesi
	(8) Fare ile seçim modunun aktif hale getirilmesi
	(9) Görüntünün sıkıştırılması
	(10) Seçili düğümlere kanal atanması
	(11) Seçili düğümlere referans atanması
	(12) Spektrumların değerlendirilmesi ve analizleri
	(13) FRF ve CPS grafiklerinin bir arada irdelenmesi
	(14) Modal parametre belirlenmesi hesap ayarları
	(15) İşletim Vektörleri Yöntemi ile analiz
	(16) Kompleks Eksponansiyel Yöntemi ile analiz
	(17) Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi ile analiz
	(18) Modların değerlendirilmesi
	(19) Düzlemdeki görüntüyü ileriye ya da yukarıya taşı
	(20) Düzlemdeki görüntüyü geriye ya da aşağıya taşı
	(21) Düzlemdeki görüntüyü xy düzlemine getir
	(22) Düzlemdeki görüntüyü xz düzlemine getir
	(23) Düzlemdeki görüntüyü yz düzlemine getir
	(24) Üç boyutlu görüntüyü göster/gizle
	(25) Animasyon ekranını aç
	(26) Yardım
	(27) Programdan Çıkış

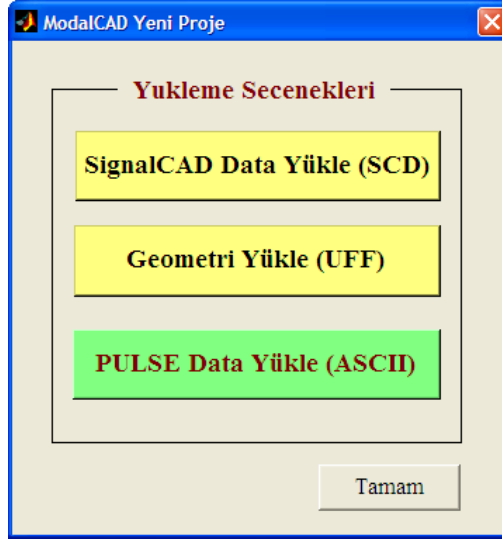
Şekil 2.48. ModalCAD programının ana kontrol düğmeleri



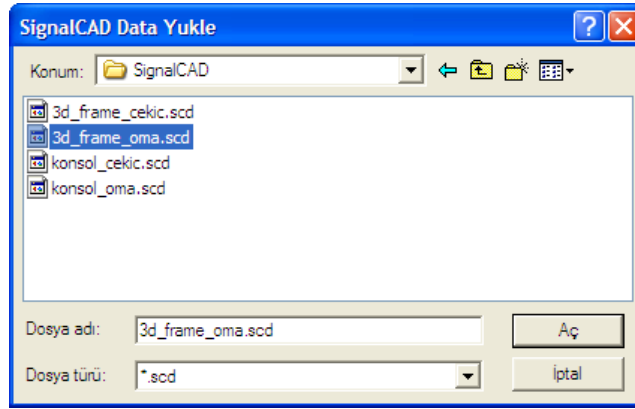
Şekil 2.49. ModalCAD programının geometrik görüntü ve seçimler ile ilgili düğmeleri

2.2.2.1. Spektrumların Sisteme Tanıtılması

Öncelikle, ModalCAD programına, zorlanmış ya da çevresel titreşim deneyinden elde edilmiş olan verilerin işlenmesi ile elde edilmiş olan spektrumların tanıtılması gerekmektedir. Bu spektrumlar herhangi bir sinyal işleme programında üretilebilirler. Sinyallerin işlenmesi için sayısal sinyal işleme amacıyla geliştirilen SignalCAD programı kullanılmıştır. ModalCAD programı doğrudan SignalCAD programının scd uzantılı dosyasını okuyabildiği gibi, titreşimin kaydedildiği programın ürettiği spektrumları da ASCII veya UFF formatlarında okuyabilmektedir. Programın ana düğmelerinden (1) numaralı düğmeye basılması ile açılan spektrum yükleme ekranı Şekil 2.50’de görüldüğü gibidir. Bu pencereden SignalCAD verilerinin yüklenmesi istenilir ise Şekil 2.51’de görüldüğü gibi bir dosya arama penceresi açılır. Burada SignalCAD programında yapılan analiz kayıt dosyasının seçilmesi, spektrumların sisteme tanıtılması için yeterli olmaktadır. Böylelikle, SignalCAD programında otomatik analiz sırasında seçilen bütün spektrumlar, ModalCAD programında kullanılabilir durumda olacaktır. SignalCAD tarafından spektral analizleri yapılmış olan zorlanmış ya da çevresel titreşim deney verilerinden hangisi seçilirse seçilsin, izlenilen yol aynı olacaktır. Burada programın kullanımı anlatılacağından örnek için çevresel titreşimin spektrumları kullanılacaklardır. Bunun için Şekil 2.51’de görülen pencerede, SignalCAD tarafından sadece tepki modal analizi için kaydedilmiş olan 3d_frame_oma.scd isimli spektrum dosyası seçilir.



Şekil 2.50. ModalCAD programı spektrum yükleme penceresi

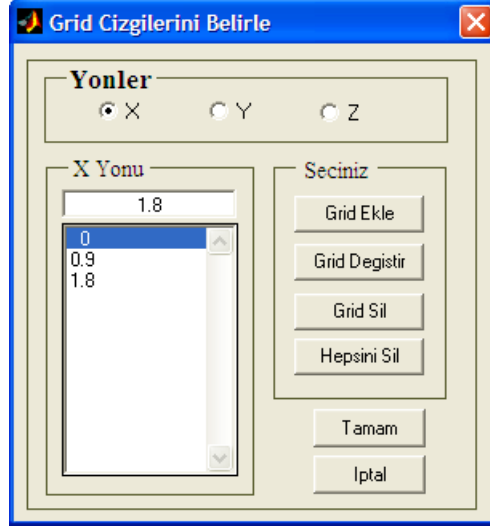


Şekil 2.51. SignalCAD spektrum dosyasının ModalCAD programına yüklenme penceresi

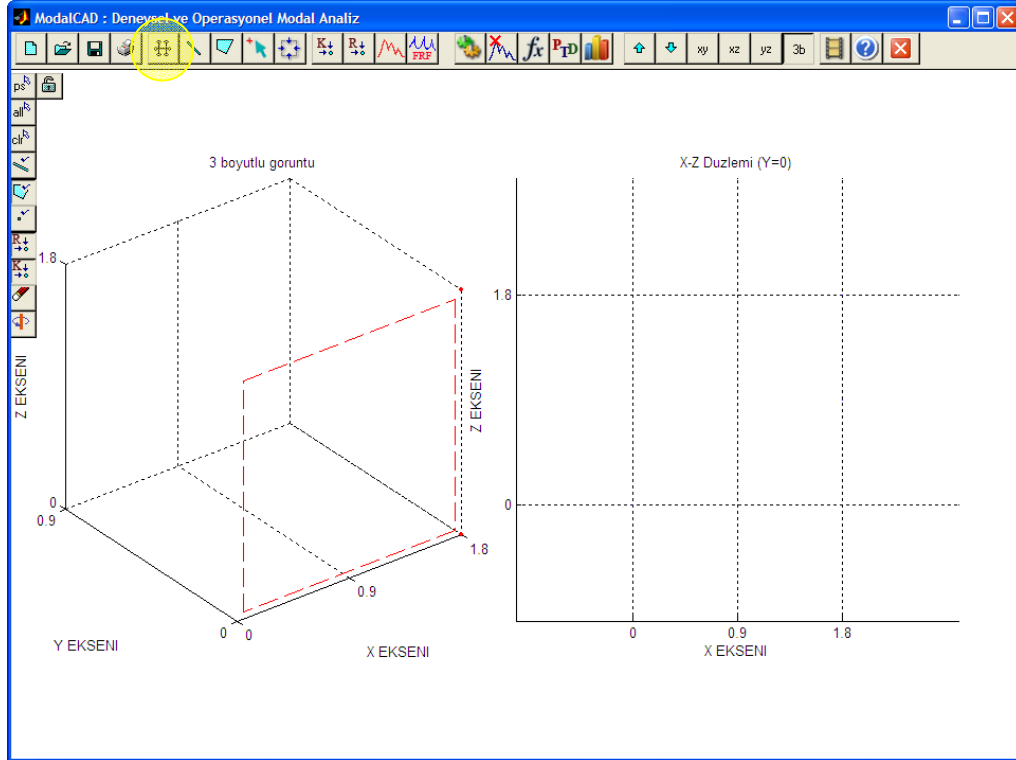
2.2.2.2. Yapı Sisteminin Geometrisinin Programa Tanıtılması

Ölçüm kanallarına ait spektrumlar programa tanıtıldıktan sonra, deney yapılan yapı sisteminin geometrisinin oluşturulması gerekmektedir. ModalCAD programı, model geometrisi oluşturulması konusunda kullanım kolaylığı sunmaktadır. Geometri oluşturulmadan önce, elemanların interaktif olarak modellenmesi için çizim ızgarasının oluşturulması gerekmektedir. Programın ana düğmelerinden (5) numaralı düğmeye basılması ile açılan ızgara oluşturma penceresi Şekil 2.52’de görüldüğü gibidir. Üç boyutlu çerçeve modelinin her bir elemanının uzunluğu daha önce de belirtildiği gibi 90 cm dir. Izgara oluşturulduktan sonra buna göre güncellenen çizim ekranı Şekil 2.53’deki gibi olur.

Şekilden görüldüğü gibi ara kattan ölçüm alınmadığı için, bu katın elemanları sistem geometrisinde tanıtılmayacaktır.

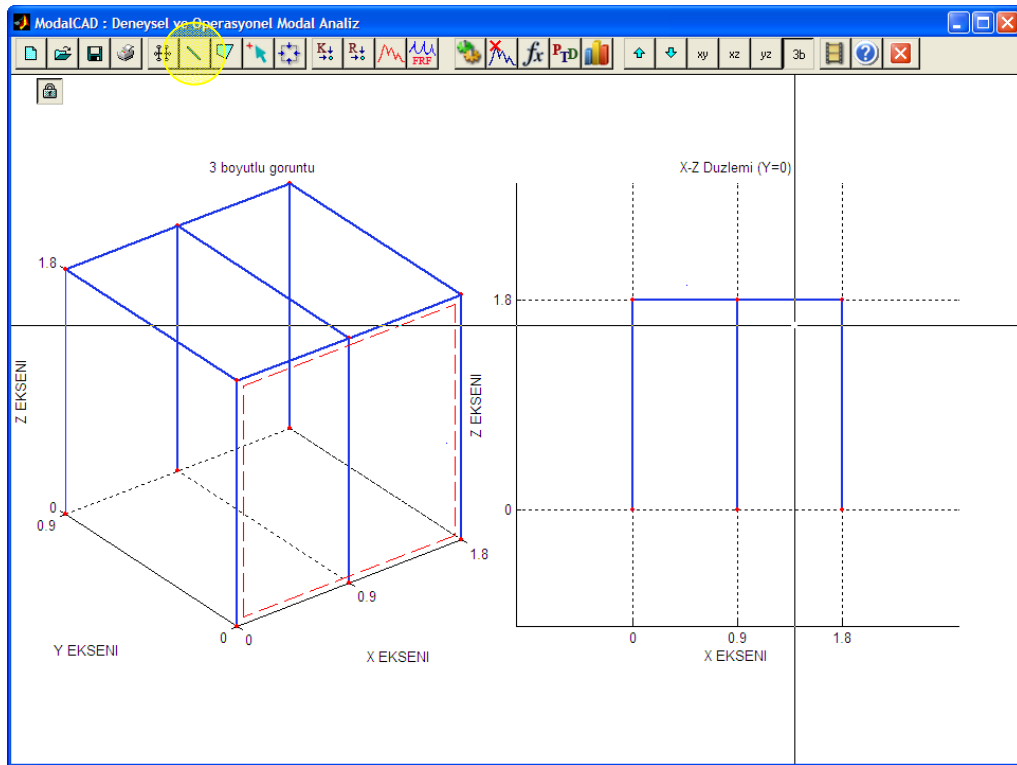


Şekil 2.52. ModalCAD programında çizim ızgarası oluşturma penceresi



Şekil 2.53. Üç boyutlu çerçeve modeli için ModalCAD programında oluşturulan çizim ızgarası

Çizim ızgarası oluşturulduktan sonra, modelin geometrisinin sisteme tanıtılması gerekmektedir. Deney yapılan çerçeve modelinde sadece çubuk elemanlar olduğundan, (6) numaralı düğmeye basılarak, çubuk elemanlar eklenmeye başlanır. Eleman eklemek için farenin sol tuşu ile elemanın başlangıç düğüm noktasına tıklanır, daha sonra bitiş düğüm noktasına tıklanır ve böylece eleman eklenir. Yine farenin sol tuşuna basılarak düğüm noktalarına tıklanmaya devam edilirse, en son düğüm noktası başlangıç düğümü olarak kabul edilerek sisteme eleman eklenmesine devam edilir. Farenin sağ tuşuna basılarak eleman ekleme modu kapatılır. Şekil 2.54'te üç boyutlu çerçeve modelinin geometrisinin ModalCAD programında oluşturulması gösterilmektedir.



Şekil 2.54. Üç boyutlu çerçeve modelinin ModalCAD programında geometrisinin oluşturulması

Model oluşturulurken, hatalı olarak oluşturulmuş elemanlar varsa bunların silinmesi gerekmektedir. Bunun için sol tarafta bulunan yardımcı düğmelerden yararlanılır. (28) numaralı düğmeye basılması ile sol taraftaki yardımcı düğmeler açılır (Şekil 2.55-a). Elemanlar silinmeden önce seçilmelidirler. Bunun için de (8) numaralı düğmeye basılarak eleman seçim modu aktif hale getirilmelidir (Şekil 2.55-b). Eleman seçim modu aktif hale getirildikten sonra, silinecek olan elemanlar üzerlerine tıklanarak seçilirler. Burada örnek

olarak $y=0$ hattında yer alan elemanların silineceği düşünülürse, fare ile bu elemanlar Şekil 2.55'te görüldüğü gibi seçilirler.

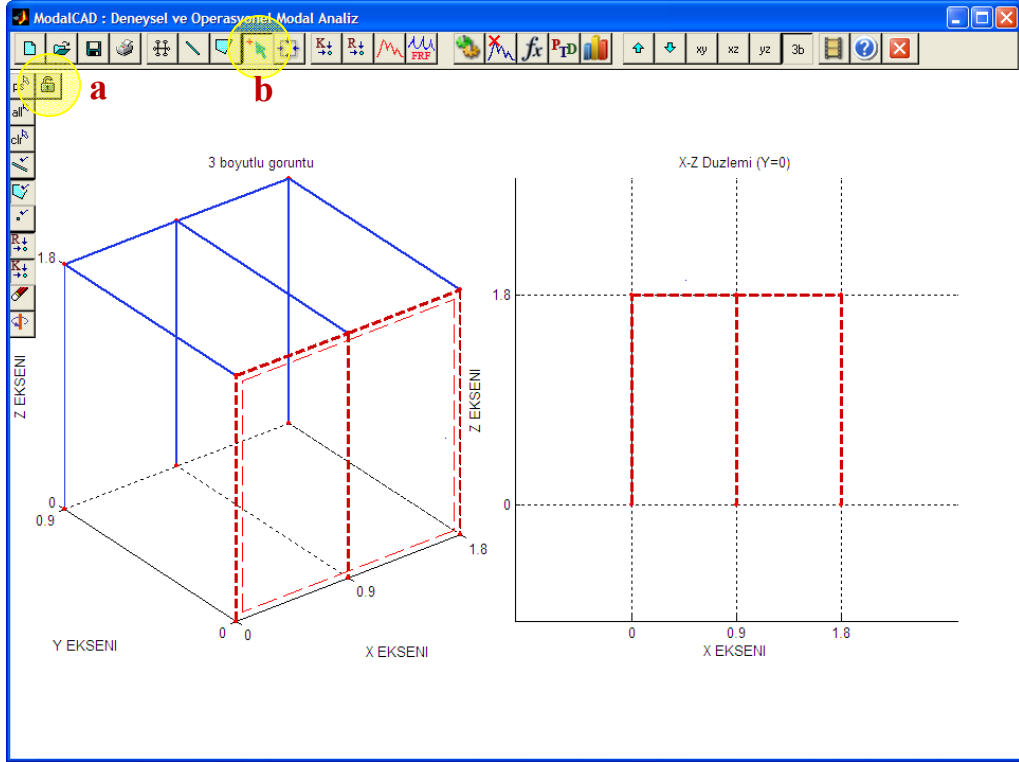
Eleman seçimi yapıldıktan sonra, sol tarafta bulunan yardımcı düğmelerden (37) numaralı düğmeye basılması ile seçilen elemanlar Şekil 2.56'da görüldüğü gibi sistemden silinirler. Silinen bu elemanların sisteme tekrar yüklenmesi için, eleman ekleme işlemi tekrar uygulanır.

Sistem geometrisinin oluşturulma işlemi tamamlandıktan sonra, eleman ve düğüm numaraları yine sol tarafta bulunan yardımcı düğmeler ile kontrol edilebilir. Sol tarafta bulunan (32) ve (34) numaralı düğmelere tıklanırsa, sistemin eleman ve düğüm numaraları Şekil 2.57'de görüldüğü gibi ekrana gelir. Burada eleman ve düğüm numaralandırılması, sistem tarafından eleman ve düğümlerin oluşturulma sırasına göre otomatik olarak yapılmaktadır. Sistem modellenirken eleman oluşturulmasına $y=0$ hattından başlanmış olduğundan dolayı, eleman ve düğüm numaralarının oluşturulma sırasına buradan başlanmıştır.

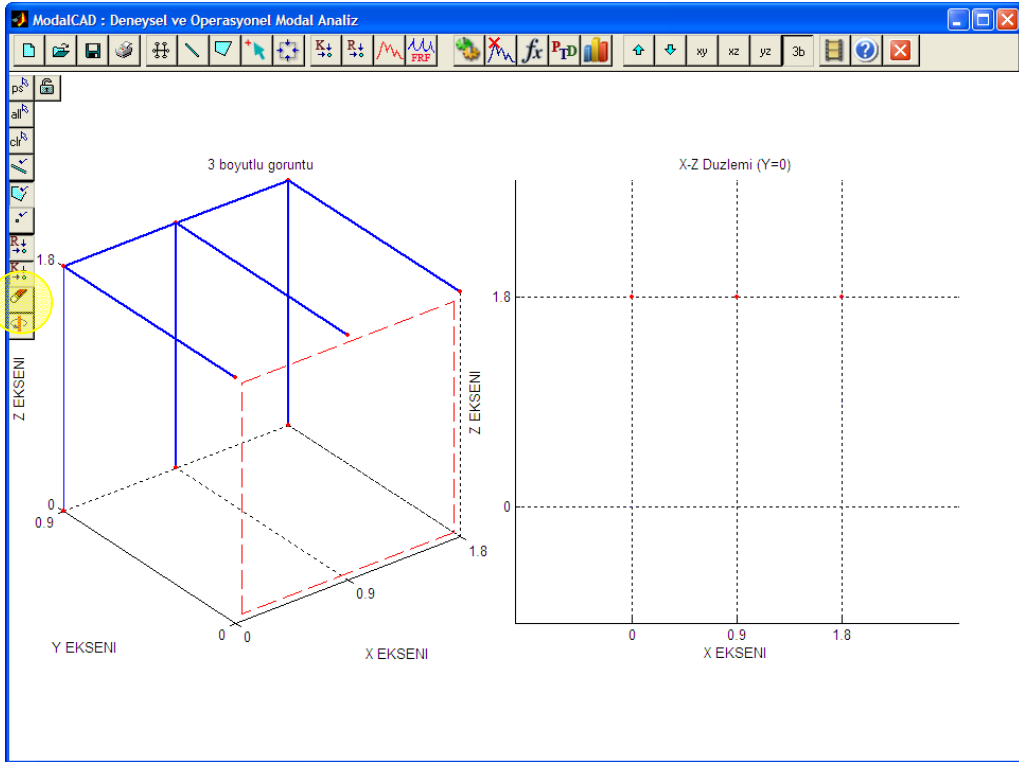
Sol tarafta bulunan düğmelerden ilk üç sırada yer alanlar, eleman ve düğüm seçimini kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmişlerdir. (29) numaralı düğme, en son seçilmiş olan eleman ve düğümleri tekrar seçer, (30) numaralı düğme sistemde yer alan bütün eleman ve düğümleri seçer, (31) numaralı düğme ise sistemdeki bütün seçimleri iptal eder. Şekil 2.58'de sol tarafta yer alan (30) numaralı düğmeye basılması ile sisteme ait bütün eleman ve düğümlerin seçilmesi gösterilmektedir.

Geometri oluşumu sırasında en önemli özellik sistemin görsel olarak her açıdan rahatlıkla değerlendirilebilmesini sağlamaktır. Özellikle karmaşık bileşenlere sahip yapı sistemlerinin modellenmesi sırasında detayların görülebilmesi için bu durum oldukça önemlidir. Bu amaçla ModalCAD programında, oluşturulmuş olan 3 boyutlu modelin istenilen görüş açısında yatay ve düşey derecelerde görüntülenmesi mümkündür. Ekranın sol tarafında bulunan (38) numaralı düğmeye basılırsa, Şekil 2.59'da görüldüğü gibi modelin hareketli izlenme modu aktif hale gelmiş olur. Burada sol alt köşede yatay ve düşey eksene göre açısal olarak alınan konum gösterilmektedir.

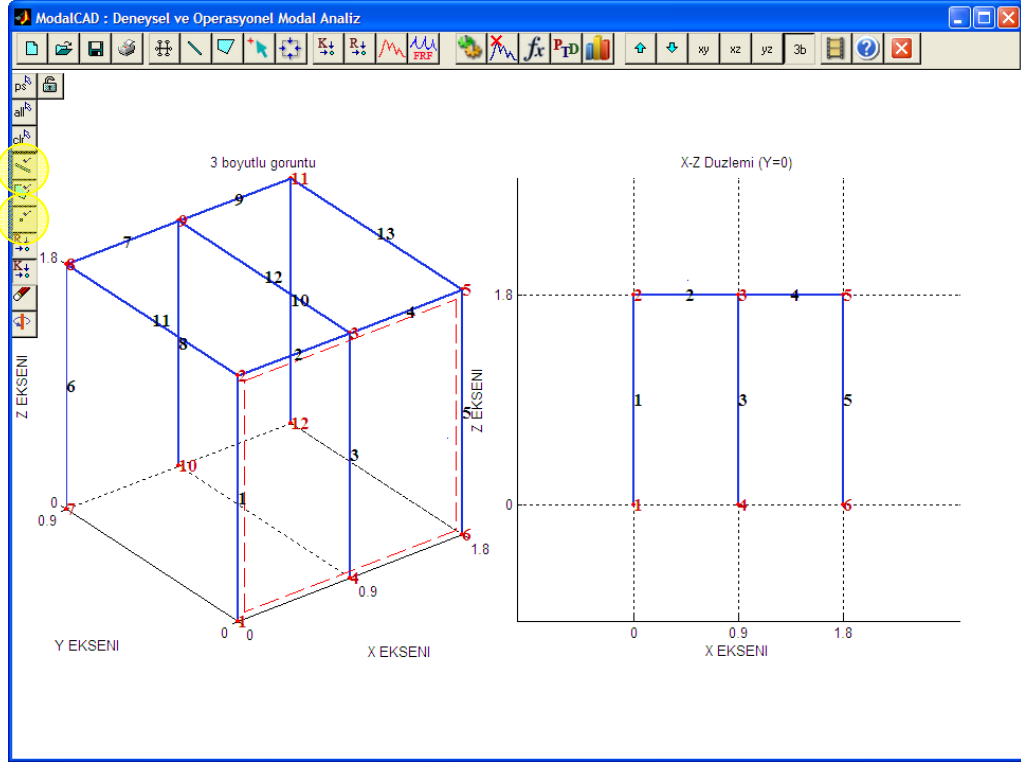
Geometri oluşumunda gerekli olan en önemli parametrelerden birisi de, ızgara hatları arasında geçiş yapılması ve farklı düzlemlerden modelin takip edilebilmesidir. Bu amaçla ModalCAD programında birçok yardımcı modül hazırlanmıştır.



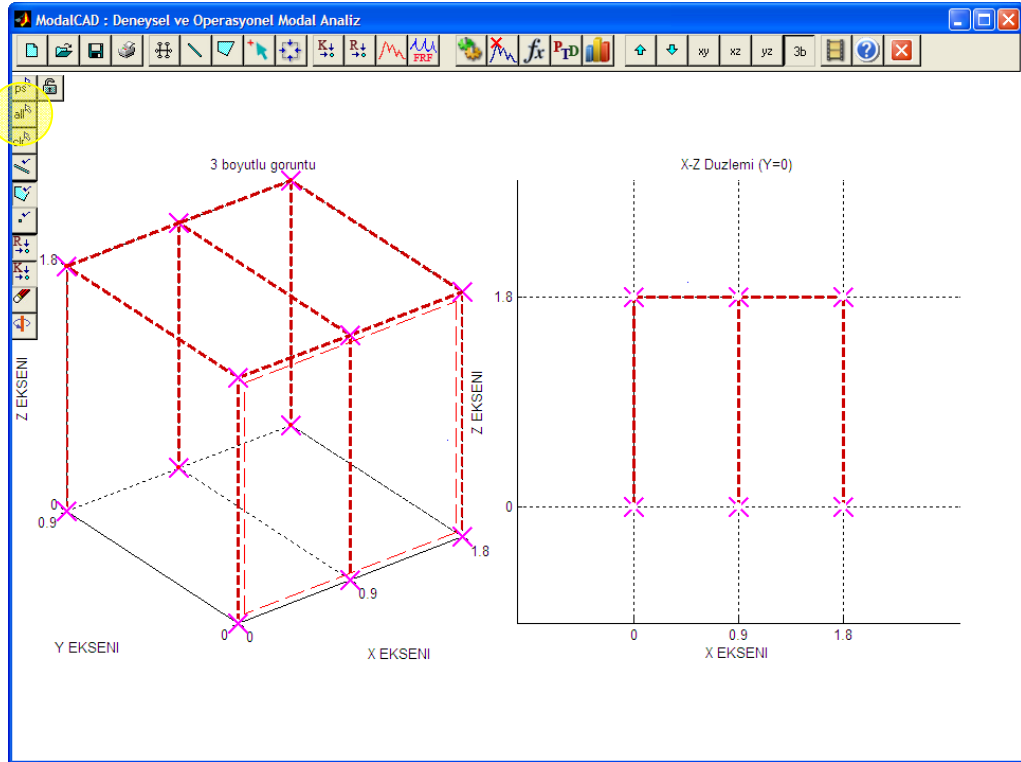
Şekil 2.55. ModalCAD programında silinmek istenen elemanların seçilme işlemi



Şekil 2.56. ModalCAD programında elemanların silinme işlemi

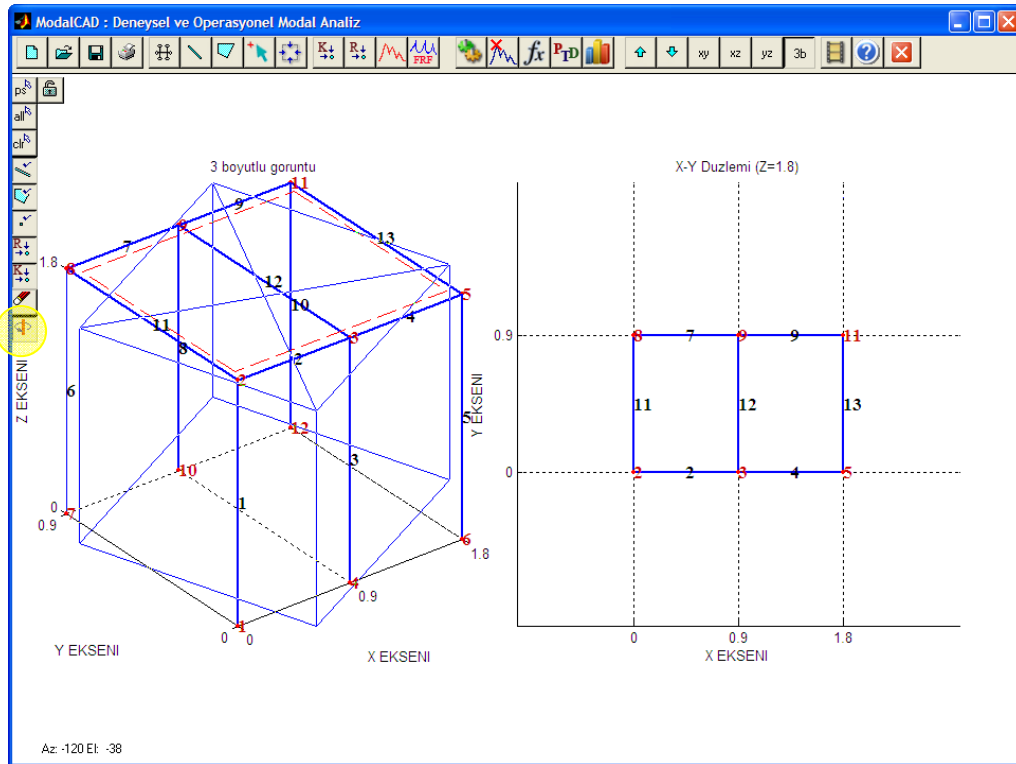


Şekil 2.57. ModalCAD programında sistemin eleman ve düğüm numaralarının gösterimi

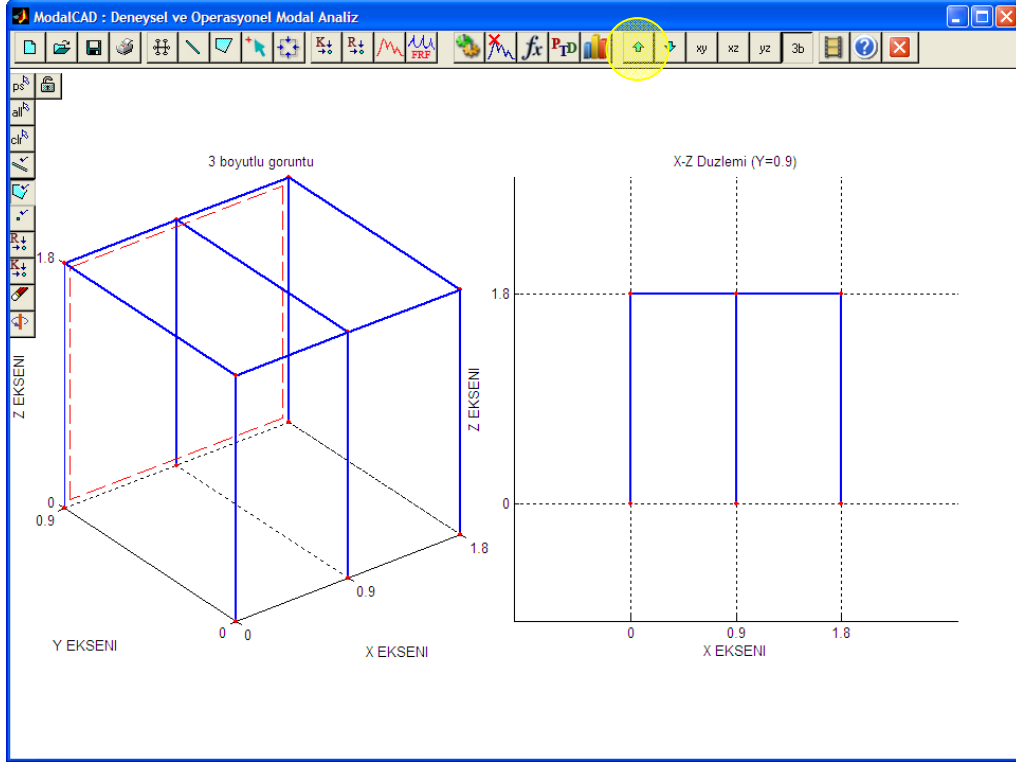


Şekil 2.58. ModalCAD programında sistemin bütün eleman ve düğümlerinin seçimi

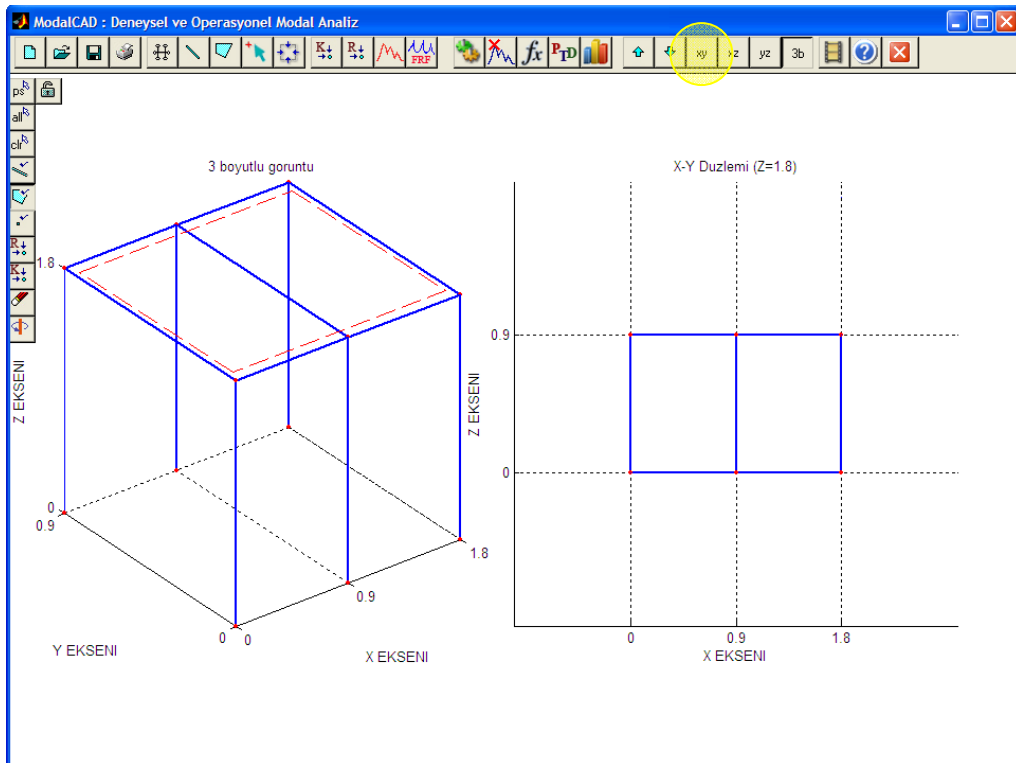
Ana ekranda görülen üç boyutlu model incelendiğinde, modelin içerisinde kırmızı renkli ve kesik çizgili bir hat görülmektedir. Bu hat o anda aktif olan düzlemi göstermektedir. Bu hattın karşılık geldiği düzlem, sağ tarafta bulunan iki boyutlu düzlemde gösterilmektedir. Model üzerinde yapılan bütün işlemler, sağ tarafta yer alan iki boyutlu düzlem üzerinden gerçekleştirilmektedir. (19) ve (20) numaralı düğmelere tıklanması ile model içerisinde kırmızı hat ileri ve geri hareket eder, aynı zamanda sağ tarafta bulunan iki boyutlu ekrandaki görüntü de buna bağlı olarak güncellenmektedir. Şekil 2.60'da xz düzlemi ($y=0$) konumunda bulunan aktif ekran, (19) numaralı ileri tuşuna basılması ile xz düzlemi ($y=0.9$) konumuna getirilmiştir. Böylece bu konumda yapılması gerekli olan işlemler rahatlıkla yapılabilir. Şekil 2.60'da aktif ekran xz düzleminde ve $y=0.9$ konumunda bulunmaktadır. Aktif ekran xy, xz ve yz düzlemlerine getirilebilir ve bu konumlarda da ileri ve geri hareket ettirilebilir. Örneğin (21) numaralı düğmeye basılırsa, yani xy düzlemine geçilen düğmeye basılırsa, aktif ekran Şekil 2.61'de görüldüğü gibi xy düzlemi ($z=1.8$) konumuna getirilmiş olur. Sol taraftaki kırmızı hat, şekilde görüldüğü gibi bahsedilen konuma karşılık gelmektedir. Bu özellikler sayesinde kullanıcı model üzerinde her türlü işlemi rahatlıkla gerçekleştirebilir.



Şekil 2.59. ModalCAD programında sistemin istenilen açıda görsel takibi



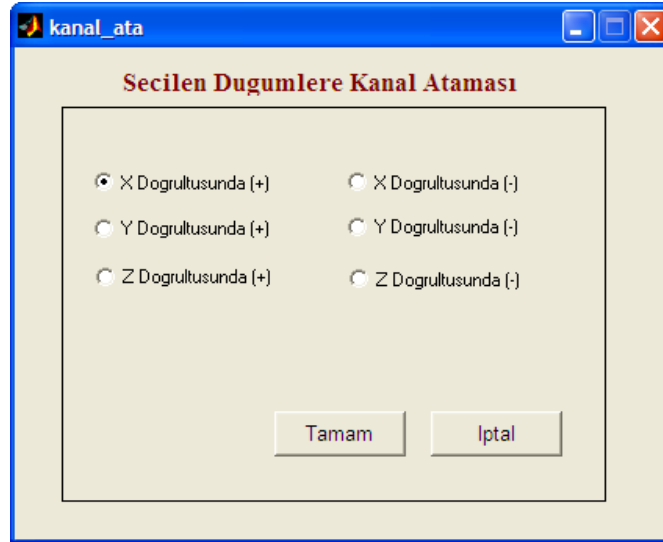
Şekil 2.60. ModalCAD programında aktif ekranın xz düzlemi ($y=0.9$) konumuna getirilmesi



Şekil 2.61. ModalCAD programında aktif ekranın xy düzlemi ($z=1.8$) konumuna getirilmesi

2.2.2.3. Ölçüm Alınan Kanalların Sistem Geometrisi Üzerinde Konumlandırılması

Deney yapılan üç boyutlu çerçeve sisteminin geometrisi ModalCAD programında oluşturulduktan sonra, sisteme SignalCAD programından yüklenen spektrumların yerleştirilmesi gerekmektedir. Modal vektörlerin doğru hesaplanabilmesi ve mod şekillerinin düzgün çıkması için spektrumların ait olduğu kanalların ve yönlerinin doğru bir şekilde sisteme tanıtılması gerekmektedir. Şekil 2.2'de deney modelinden kayıt alınan ivmeölçerlerin yönleri ve kanal numaraları gösterilmektedir. Bu numaralandırma ve yönler aynı şekilde ModalCAD programında geometri üzerinde sisteme tanıtılmalıdır. Kanal ataması yapılmadan önce, atama yapılacak olan düğüm numaraları seçilmelidir. Bunun için daha önce açıklandığı gibi seçim modülü aktif hale getirilir ve atama yapılacak düğümler sırasıyla seçilir. Kanal atanacak olan düğümler seçildikten sonra (10) numaralı kanal atama düğmesi seçilir. Burada şekil 2.62'de görüldüğü gibi bir pencere açılır. Bu pencerede seçilmiş olan düğümlere atanacak kanalların yönleri belirlenir. Titreşim deneylerinde ivmeölçerlerin yönleri çoğunlukla üç ana eksen doğrultusundadır. Bu nedenle programda da üç ana eksen pozitif ve negatif yönleri ile beraber seçilecek şekilde kullanıcıya sunulmaktadır.

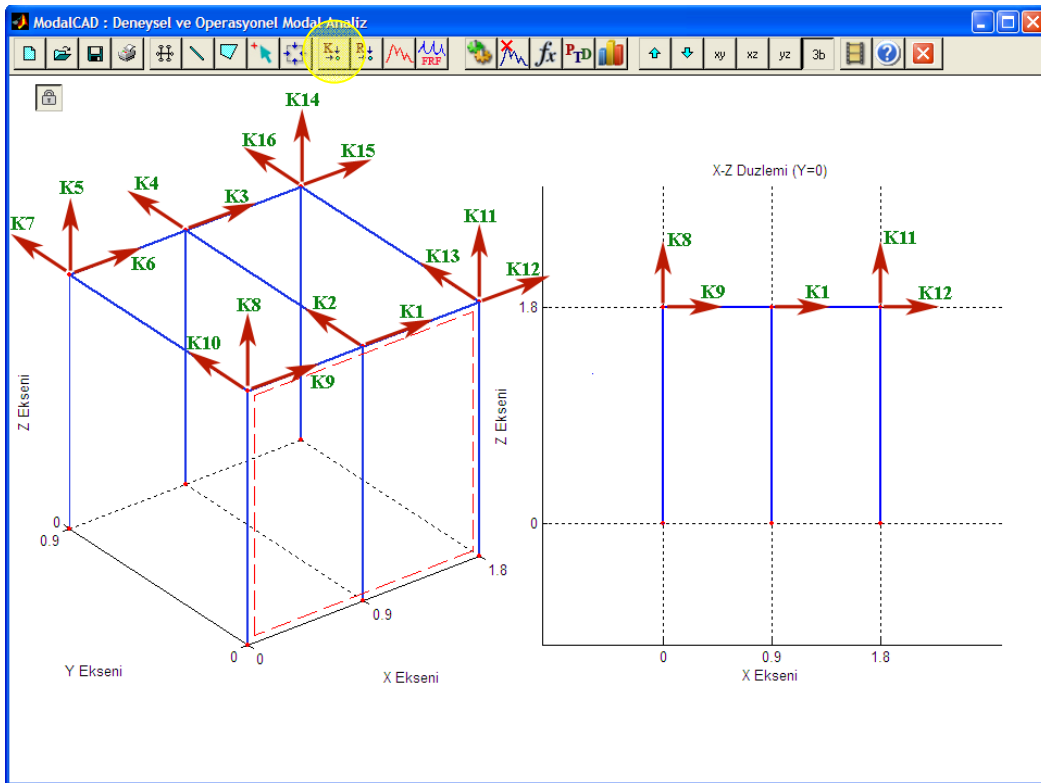


Şekil 2.62. Seçili düğümlere atanacak kanalların yön tayin penceresi

Kanallara ait düğümler tek tek seçilerek yönleri ile birlikte sisteme tanıtıldıktan sonra, Şekil 2.63'de görüldüğü gibi, deney sisteminde kullanılan geometri ve kanallar,

simülasyon ortamında birebir olarak modellenmiş olurlar. Böylelikle, SignalCAD programında bu kanallara ait olarak üretilmiş olan spektrumların ModalCAD programı ile analizi sonucunda, kanalların bağlı buldukları düğüm noktalarının modal yerdeğiştirmeleri belirlenebilecektir.

Referans noktası olarak ta, çaprazgüç spektrumlarının hesabında kullanılan 2 numaralı kanalın yönü benzer şekilde sisteme tanıtılır. Kanal atamaları tamamlandıktan sonra, sistem analizi için gereken bütün ön işlemler başarıyla tamamlanmış olur. Eğer etki tepki modal analizi için zorlanmış titreşim spektrumları kullanılacak olsaydı, çekiçten alınan sinyallere ait olan kanal, burada referans olarak atanacaktı.



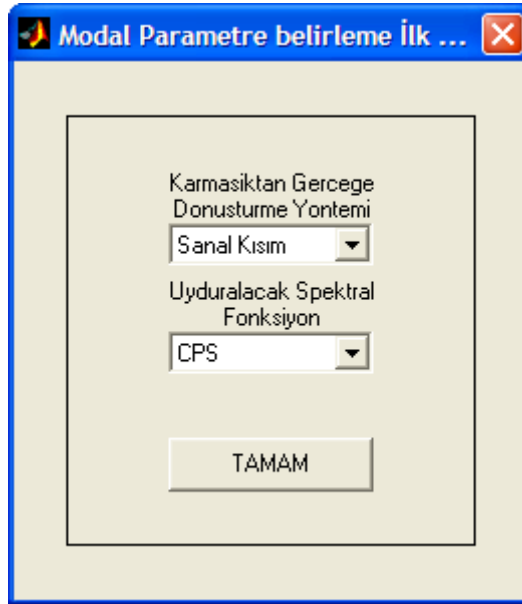
Şekil 2.63. Üç boyutlu çerçeve modelinin deneysel ölçüm düzeneğinin ModalCAD programında simülasyonu

2.2.2.4. Titreşim Deneyine Bağlı Olarak Spektral Fonksiyonun Belirlenmesi

ModalCAD programında, daha önceden de bahsedildiği gibi, hem etki tepki, hem de sadece tepki verilerine göre modal parametre analizi yapılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, analizde kullanılacak olan spektral fonksiyonun seçimidir. Eğer

etki ve tepkinin bir arada olduğu zorlanmış titreşim deney sonuçlarına göre dinamik karakteristikler belirlenecek ise, analiz edilecek spektral fonksiyon olarak frekans davranış fonksiyonları ya da çaprazgüç spektrumları seçilebilirler. Eğer sadece tepkinin olduğu çevresel titreşim deney sonuçlarına göre dinamik karakteristikler belirlenecek ise, analiz edilecek spektral fonksiyon olarak çapraz güç spektrumları seçilirler. Bu sebeple, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi analizine başlamadan önce modal parametre hesap ayarlamalarının yapılması gerekmektedir. Bunun için (14) numaralı düğmeye basılır ve Şekil 2.64’de görüldüğü gibi, deney sonuçlarının yapısına bağlı olarak analizlerde kullanılacak spektral fonksiyon türü seçilir. Bu ayarlama zaten ModalCAD programında açılış sırasında otomatik yapılmaktadır. Ancak kullanıcının analizlerden önce bu ekranı kontrol etmesinde fayda vardır.

Burada ayrıca modal parametrelerin hesabında spektral fonksiyonun gerçek kısmının mı, sanal kısmının mı yoksa faz yuvarlatma seçeneğinin mi kullanılacağı da yine kullanıcıya sorulmaktadır. Genellikle faz yuvarlatma ile sanal kısım uygun olmakla beraber, tecrübelerle göre farklı seçenekler de değerlendirilebilir.



Şekil 2.64. Analizlerde kullanılacak spektral fonksiyonun türünün ve özelliğinin seçimi

2.2.2.5. Yapı Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

ModalCAD programında, spektral fonksiyonlar tanımlanıp, geometri oluşturularak, kanalların yerleri de belirlendikten sonra modal parametrelerin belirlenmesi aşamasına geçilebilir. Buna göre, programda kullanılan modal parametre belirleme yöntemlerinin sırasıyla uygulaması yapılacaktır.

2.2.2.5.1. İşletim Vektörleri (OV) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

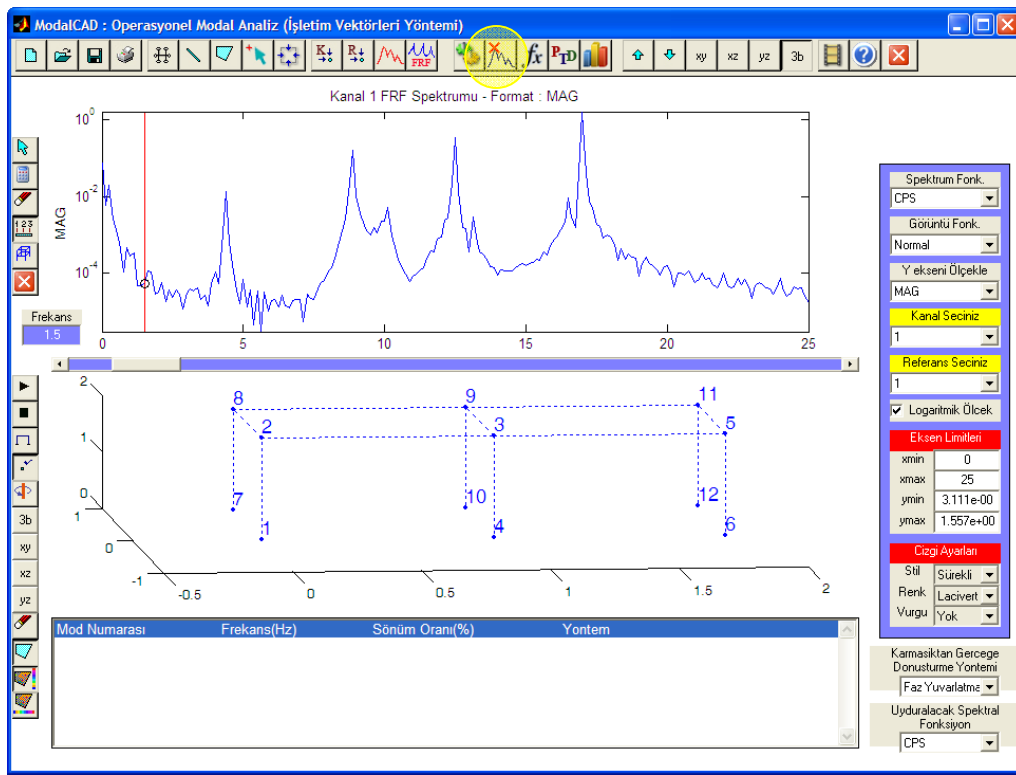
İşletim vektörleri (Operating Vectors - OV) yöntemi ile dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için ana ekranda bulunan (15) numaralı düğmeye basılarak, Şekil 2.65'te görülen analiz ekranı açılır. Bu yöntem için açılan analiz ekranı incelendiğinde, bilgi ekranının 3 ana kısma, yönetim ekranının da sol ve sağ kenarlarda olmak üzere iki ana kısma ayrılmış olduğu görülmektedir.

Birinci sırada yer alan eksen, spektrum eksenidir ve bu eksen üzerinde istenilen kanala ait spektrumlar, sağ tarafta görülen menü sistemleri ile sözkonusu eksen üzerine yüklenebilirler. Sağ tarafta yer alan menüler ile bu eksen üzerinde görülen spektral fonksiyonun parametreleri üzerinde değişiklikler yapılabilir. Farklı referans ve kanallara ait spektrumların yüklenmesinin yanında, yüklenen spektral fonksiyonun türüne karar verilebilir. Ayrıca çeşitli analiz fonksiyonları uygulanarak tüm kanallara ait davranışı temsil eden fonksiyonlar hesaplanarak eksen üzerinde gösterilebilirler. Eksen üzerinde yer alan kursor, bulunulan frekans noktasını ve spektrum üzerindeki konumu göstermektedir. Kursorün bulunduğu frekans değeri, eksenin sol alt tarafında yer alan kutucuktan görülebilmektedir. Buraya herhangi bir frekans değeri yazılırsa, kursor anında o frekans değerine gider ve o noktadaki spektrum değerini gösterir. Kursorün hareketi için aşağıda yer alan kaydırıcı da kullanılabilir. Bu kaydırıcının tutulup çekilmesi ile kursor, kaydırıcıya paralel olarak hareket eder. Bunun yanında sol tarafta yer alan birinci düğme seçilerek te doğrudan eksen üzerine fare ile tıklanıp seçim yapılabilir.

İkinci sırada yer alan eksen ise, sistemin mod şekillerinin analiz sırasında anında takip edilebilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Burada hatalı mod şekilleri hemen görülerek modların silinebilmesi amaçlanmıştır. Sol tarafta yer alan düğmeler ile bu eksen üzerinde yer alan geometri kontrol edilebilmekte, animasyon başlatılıp durdurulabilmekte ve görsel açıdan

istenilen değişiklikler yapılabilmektedir. Bu eksen, isteğe bağlı olarak ekrandan kaldırılabilir, böylelikle diğer işlemler için ekranda daha geniş yer açılabilir.

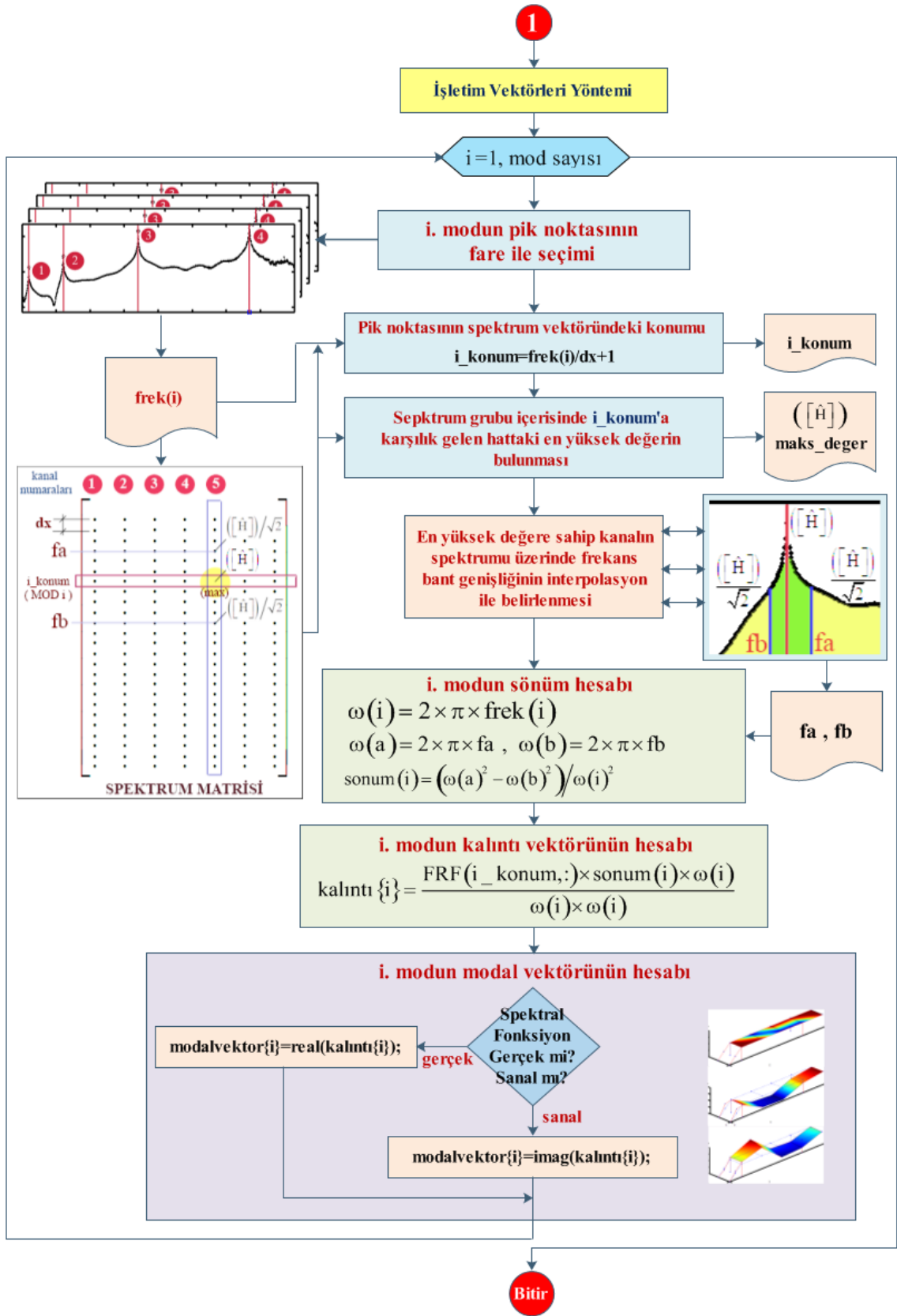
Üçüncü sırada ise, hesaplanan mod şekline karşılık gelen frekans ve sönüm oranlarının yer aldığı liste bulunmaktadır. Bu liste üzerinde herhangi bir mod seçildiği zaman, birinci sıradaki eksen bu modun ait olduğu frekans noktası kırmızı bir hat ile gösterilmekte, ikinci sıradaki mod ekseninde ise, bu moda karşılık gelen mod şekli sunulmaktadır. Yeni bir mod eklendiği ya da silindiği zaman bu liste anında güncellenmektedir.



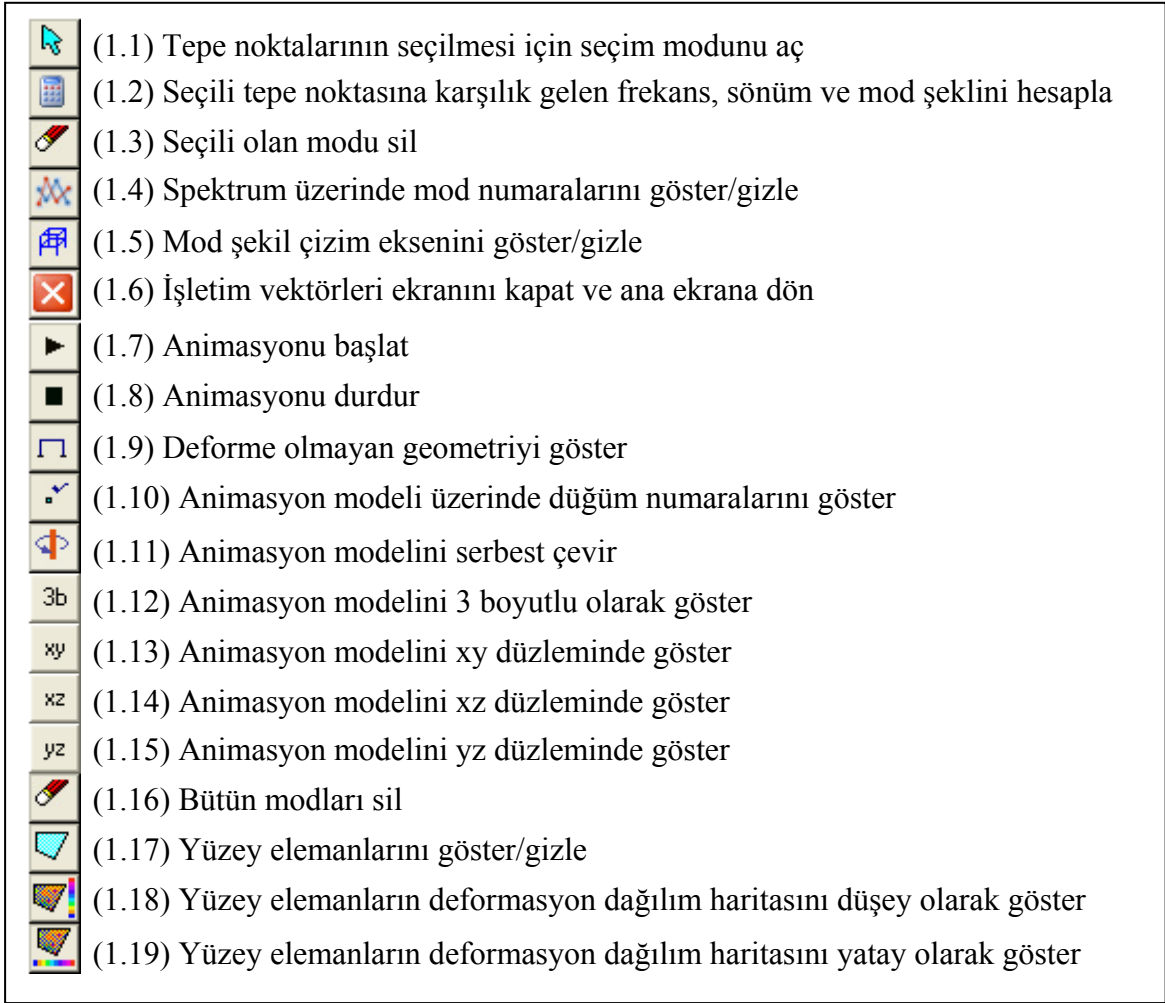
Şekil 2.65. ModalCAD programında OV Yöntemi analiz ekranı

İşletim vektörleri ile modal parametrelerin analizi Şekil 2.66'da görülen akış diyagramına göre yapılmaktadır. Bu akış diyagramına bağlı olarak hazırlanan analiz fonksiyonları program içerisinde menü sistemlerine bağlı olarak çalışmaktadırlar.

Modal parametrelerin analizi sırasında sistemin ana yönetimi sol tarafta yer alan düğmeler ile sağlanmaktadır. Burada yer alan düğmelerin ne işe yaradıkları Şekil 2.67'de görüldüğü gibi açıklanmaktadır.



Şekil 2.66. ModalCAD programında OV Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin hesaplanması için tasarlanan akış diyagramı



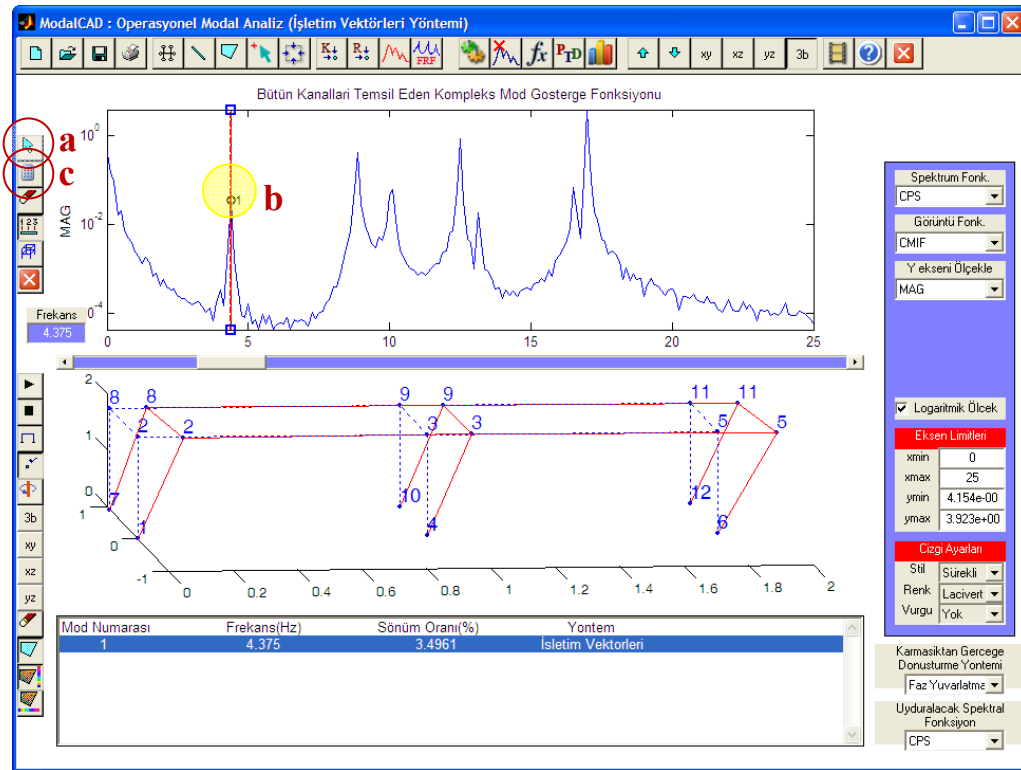
Şekil 2.67. OV Yöntemi ekranında yer alan yönetim düğmeleri

İşletim Vektörleri Yönteminde dinamik karakteristiklerin belirlenmesi işlemi, spektrum üzerinde görülen tepe noktalarının fare ile işaretlenip, o tepe noktalarına karşılık gelen modal parametrelerin sırasıyla hesaplanması şeklinde olmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi, herhangi bir kanala ait spektrumda, diğer kanallarda yer alan tepelerin görülmeme ihtimali olduğundan dolayı tepelerin seçilmesi işleminin, bütün kanalları temsil eden mod gösterge fonksiyonu spektrumunun üzerinden yapılması daha uygun olacaktır. Bunun için, sağ tarafta yer alan görüntü fonksiyonu başlığı altındaki menüden CMIF (Complex Mode Indicator Function) seçeneği seçilerek sistemin kompleks mod gösterge fonksiyonu hesaplanır ve spektrum ekranına Şekil 2.68’de görüldüğü gibi yüklenir.

Tepelerin seçilmesi için, sol tarafta bulunan (1.1) numaralı düğme seçilerek tepe seçim modu aktif hale getirilir (Şekil 2.68-a). Spektrum eksenini üzerinde fare ile 1. sırada

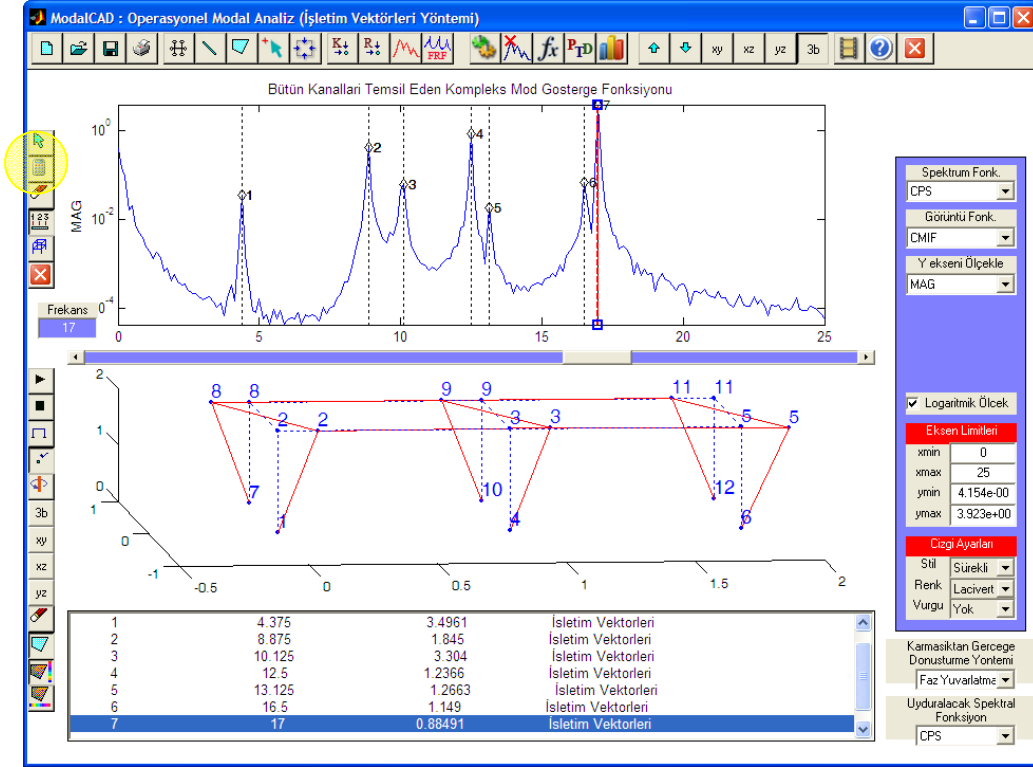
bulunan tepe noktası tıklanarak seçilir (Şekil 2.68-b). Bu tepe noktasına karşılık gelen frekans değeri Şekil 2.68’de görüldüğü gibi 4.375 Hz dir.

Spektral fonksiyon üzerinde 1. tepe noktası seçildikten sonra, bu tepeye karşılık gelen dinamik karakteristikler hesaplanır. Şekilde görülen analiz düğmelerinden (1.2) numaralı düğmeye basılması ile (Şekil 2.68-c) seçilen tepe noktasına karşılık gelen mod şekli ikinci sırada yer alan eksende görülür. Bu tepeye karşılık gelen frekans ve sönüm oranları değerleri ise üçüncü sırada yer alan listede görülmektedir.



Şekil 2.68. ModalCAD programında OV Yöntemi ile analizde 1 numaralı tepeye karşılık gelen dinamik karakteristiklerin hesabı

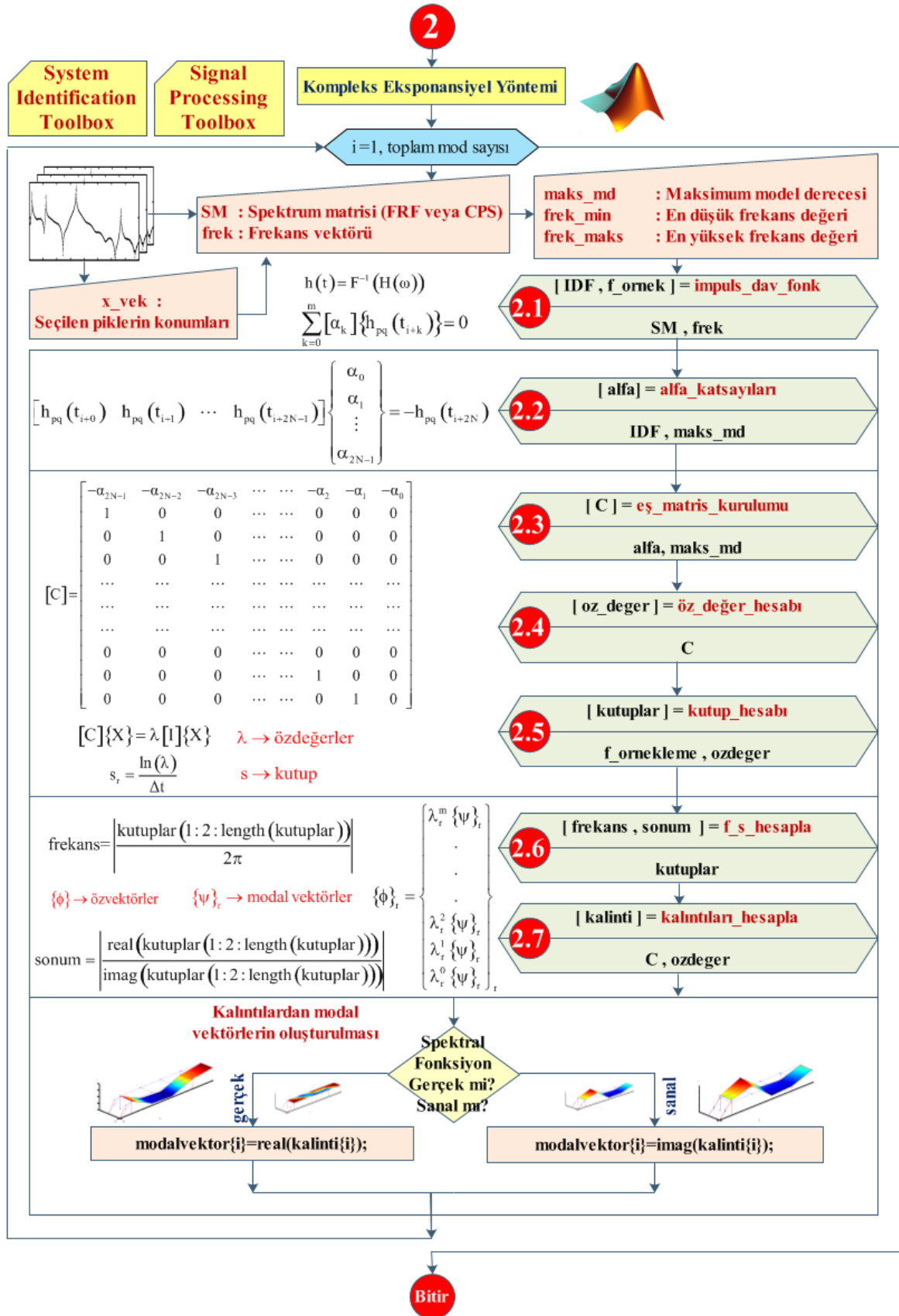
Benzer şekilde diğer tepeler de sırasıyla seçilir ve analiz yapılırsa, üç boyutlu çerçeve modelinin dinamik karakteristikleri İşletim Vektörleri Yöntemi ile Şekil 2.69’da görüldüğü gibi hesaplanmış olur. Her bir moda karşılık olarak hesaplanan dinamik karakteristikler üçüncü sırada yer alan listede görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bu listede 7. Mod seçili olduğundan, birinci sıradaki spektral fonksiyon üzerinde bu moda karşılık gelen frekans üzerinde kırmızı renkli hat bulunmaktadır. Aynı şekilde, ikinci sırada yer alan mod şekli ekranında, bu mod numarasına ait mod şekli görülmektedir.



Şekil 2.69. ModalCAD programında çevresel titreşim deneyi yapılan modelin OV Yöntemi ile dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi

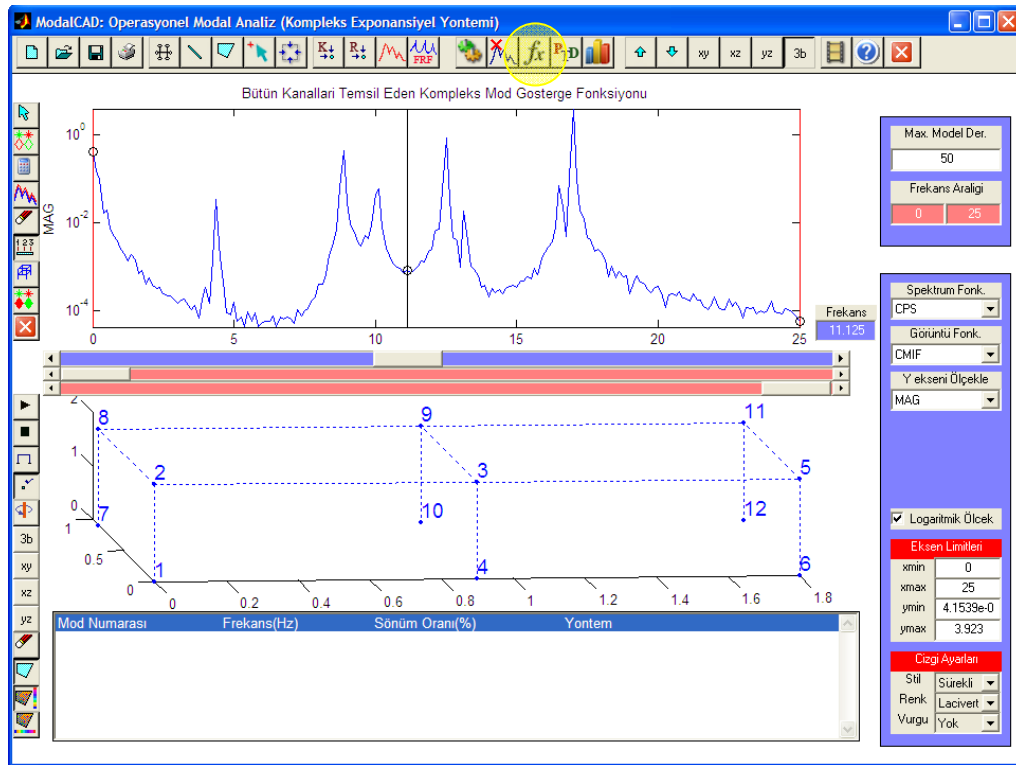
2.2.2.5.2. Kompleks Ekspansiyel (CE) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

ModalCAD programında Kompleks Ekspansiyel (Complex Exponential - CE) Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan çözüm yöntemine ait akış diyagramı Şekil 2.70'de görüldüğü gibidir. Bu akış diyagramına bağlı olarak üretilen analiz fonksiyonları, menü sistemi ile bağlantılı olarak çalışmaktadır. Şekil 2.70'de yer alan akış diyagramında görüldüğü gibi, spektrum üzerinde tepe noktası seçimi yapılır ve daha sonra analiz parametreleri belirlenir. Analiz parametreleri maksimum ve minimum frekans değeri ile maksimum model derecesinden meydana gelmektedir. Giriş verileri tamamlandıktan sonra, sisteme tanıtılan spektrum matrisleri kullanılarak impuls davranış fonksiyonları elde edilir. Çevresel titreşim deneyinde bu spektrum matrisleri çaprazgüç spektrumlarından meydana gelmektedir. Elde edilen impuls davranış fonksiyonları ve analiz parametrelerine bağlı olarak sistemin kutupları hesaplanır. Sistemin kutupları hesaplandıktan sonra ise önce frekans ve sönüm değerleri, daha sonra ise kalıntılar hesaplanır. Kompleks değerli kalıntı vektöründen de, sistemin mod şekilleri elde edilir.



Şekil 2.70. ModalCAD programında CE Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin hesaplanması için tasarlanan akış diyagramı

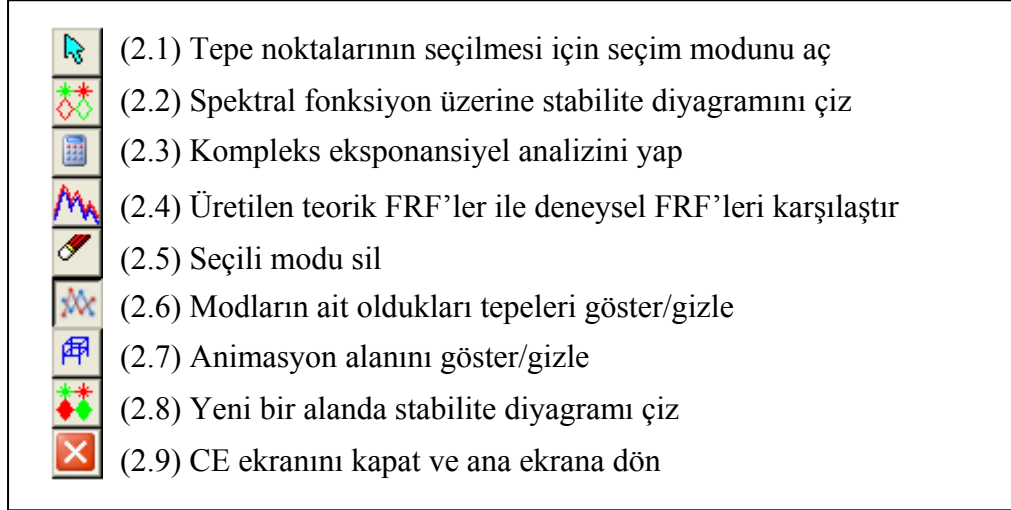
Kompleks Ekspansiyel Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için ana düğmelerden (16) numaralı düğmeye basılırsa, Şekil 2.71’de görüldüğü gibi bir analiz ekranı açılır. Ekranın sol üst tarafında yer alan analiz düğmelerinin ne anlama geldikleri Şekil 2.72’de görülmektedir. Ekranın sol alt kısmında yer alan düğmeler daha önce de açıklandığı gibi animasyon ve geometri ile ilgilidirler. Kompleks Ekspansiyel Yöntemi ile analiz yapmak için, çözüme geçmeden önce bir takım analiz parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Spektral fonksiyonun üzerinde üç adet kursor yer almaktadır. Bunlardan bir tanesi kutup noktalarının seçilmesi için, diğer ikisi ise hesap frekans aralığının belirlenmesi içindir. Bununla birlikte sağ üst tarafta analiz parametreleri bilgi giriş alanı bulunmaktadır. Burada Kompleks Ekspansiyel analizi için modelin maksimum derecesinin girilmesi istenmektedir.



Şekil 2.71. CE Yöntemi analiz ekranı

Modal parametre belirlenmesinde karşılaşılan en önemli problem uygun model derecesinin belirlenmesidir. Bu problem, zaman veya frekans ortamındaki parametre belirleme modelinin formülasyonundan, modal parametre belirleme yönteminin tek ya da

çok referanslı formülasyonundan ve modal parametre belirleme modelindeki rastgele etkiler ve sapma hatalarından dolayı oldukça karmaşıktır.



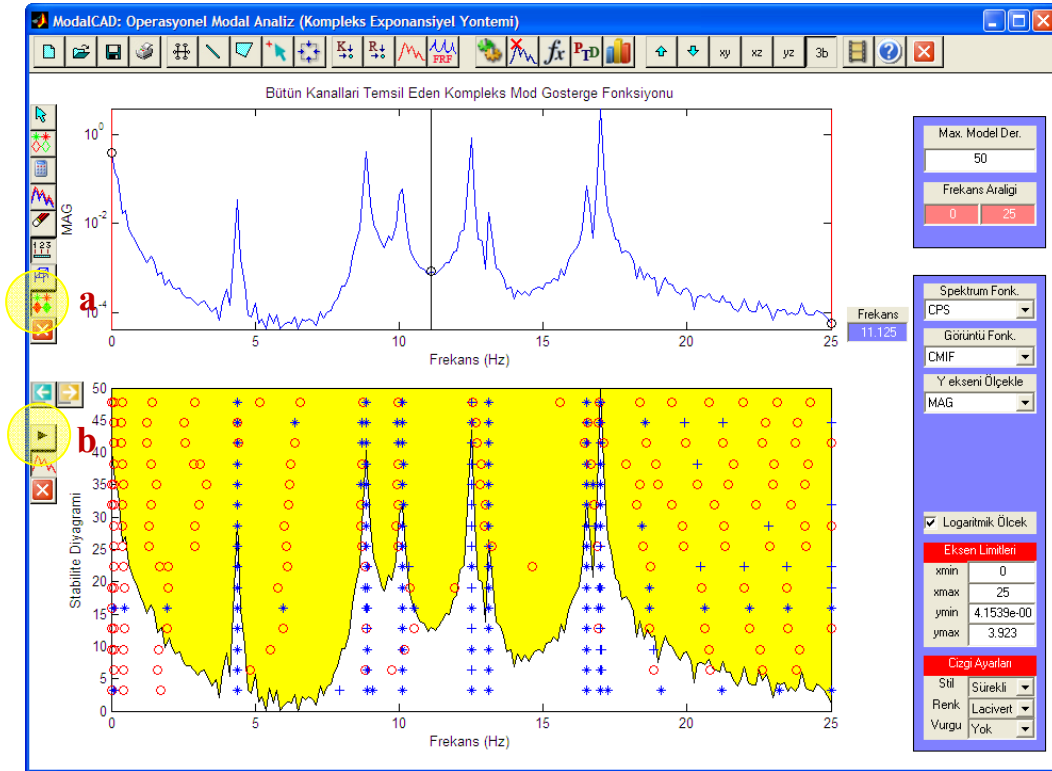
Şekil 2.72. CE Yöntemi analiz düğmeleri

1975 yılından bu yana modal parametrelerin belirlenmesi ile ilgili olarak yapılan çalışmaların çoğu, modal parametre modeli için doğru model derecesinin belirlenmesi konusundaki metodolojileri içermektedir. Teknik olarak, model derecesi matris polinom denklemindeki en yüksek dereceyi göstermektedir. Bulunan modal frekansların sayısı, model derecesi ile matris katsayılarının boyutunun çarpımına eşit olacaktır (genellikle N_0 veya N_1). Verilen bir algoritma için, matris katsayılarının boyutu normalde sabittir. Bu nedenle, model derecesinin belirlenmesi, doğrudan doğruya ölçülen verideki ilgili modal frekanslarının sayısının (N) bulunması ile bağlantılıdır.

Sistemin maksimum model derecesi ve frekans çözüm aralığı belirlendikten sonra hesap için kutup noktalarının seçilmesi aşamasına geçilir. Burada kutup noktaları seçilirken, doğrudan doğruya tepe noktaların seçilmesi her zaman sağlıklı sonuç vermez. Özellikle kompleks yapı sistemlerinde çok belirgin tepeler olmamakla beraber pek çok tepe noktası görülebilir ve bu tepe noktalarının hepside kutup noktası olmayabilirler, yani modun bulunduğu frekansa karşılık gelmeyebilirler. Bu sebeple, kutup noktalarının belirlenebilmesi için stabilite diyagramlarından yararlanır. Stabilite diyagramı eğer spektral fonksiyonun olduğu eksene çizilecekse (2.2) numaralı, eğer aşağıda ayrı bir eksene çizilecekse (2.8) numaralı düğmeye tıklanılır. (2.8) numaralı düğmeye tıklanması

ile (Şekil 2.73-a) açılan stabilite ekranında, çizim düğmesine basılırsa (Şekil 2.73-b), Kompleks Eksponansiyel analizi için stabilite diyagramı Şekil 2.73’de görüldüğü gibi elde edilir.

Stabilite diyagramı, model derecesinin bir fonksiyonu olarak frekans, sönüm ve muhtemel modal katılım faktörlerinin takibini sağlar. Model derecesi artırıldıkça, daha fazla modal frekans hesaplanır fakat doğru model derecesi bulunduğu anda fiziksel modal parametrelerin hesapları dengelenecektir. Ölçülen veri içerisinde çok aktif olan modlar için, modal parametreler çok düşük bir model derecesinde dengelenecektir. Ölçülen veri içerisinde çok zayıf bir şekilde tetiklenmiş olan modlar için, çok yüksek bir model derecesi seçilene kadar modal parametreler dengelenemeyebilir. Yine de, fiziksel olmayan modlar, bu süreç içerisinde hiçbir biçimde dengelenemeyeceklerdir ve modal parametre veri kümesinden kolaylıkla ayıklanabilirler. Ölçülen veri kümesindeki tutarsızlıklar (frekans ötelemeleri, sızıntı hataları vs.) stabiliteyi belirsizleştireceklerdir ve stabilite diyagramının kullanımını zorlaştıracaklardır. Normal olarak, değerlendirilen her bir modal parametrenin stabilitesi için yüzde içinde bir tolerans verilir.

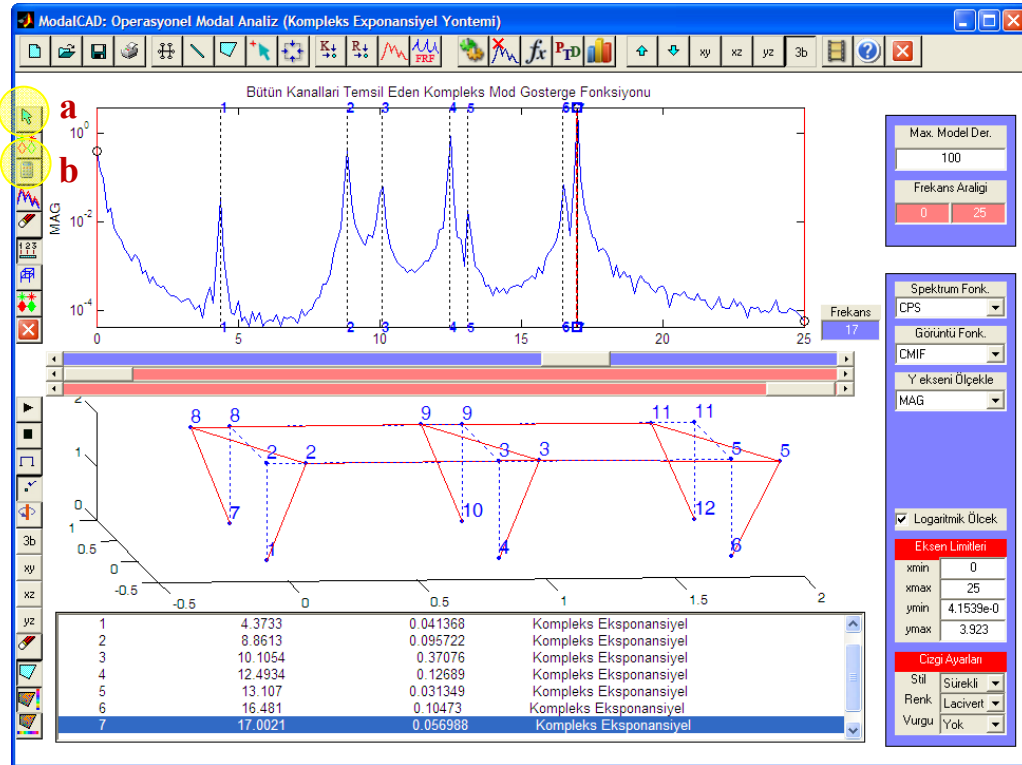


Şekil 2.73. CE Yöntemi için stabilite diyagramının çizimi

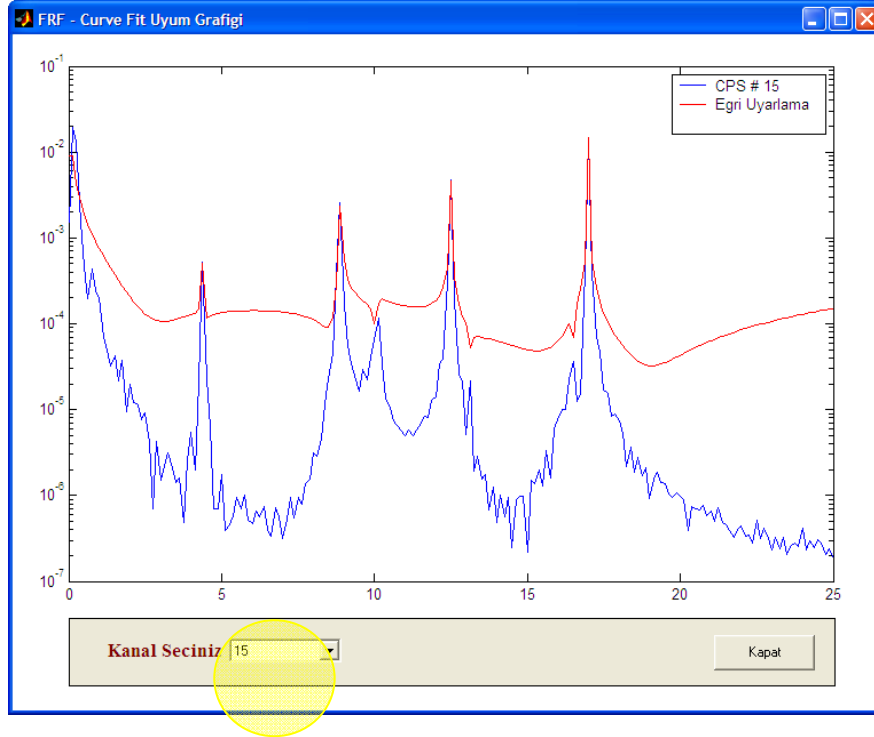
Stabilite diyagramı incelendiği zaman, tepe noktalarına denk gelen frekansların stabil olduğu görülmektedir. Yani, tepe noktalarının her biri bir moda karşılık gelmektedir. Buradaki simgelerin ne anlama geldikleri Genel Bilgiler bölümünde açıklanmaktadır.

Stabilite diyagramı ile tepe noktaları kontrol edildikten sonra, sıra spektral fonksiyon üzerinde tepe noktalarının seçilerek Kompleks Eksponansiyel analizinin yapılmasına gelir. (2.1) numaralı düğmeye basılarak seçim modu aktif hale getirilir (Şekil 2.74-a), daha sonra tepe noktaları sırasıyla seçilir ve (2.3) numaralı analiz düğmesine basılarak (Şekil 2.74-b) dinamik karakteristikler hesaplanır. Sırasıyla bütün tepe noktaları için bu işlemin yapılması ile sistemin modal parametreleri Şekil 2.74’de görüldüğü gibi elde edilir.

Dinamik karakteristikleri belirlendikten sonra, analiz yöntemi içerisinde üretilen teorik FRF/CPS spektrumları ile deney sonuçlarından elde edilen FRF/CPS spektrumları karşılaştırılabilir. Bunun için analiz düğmelerinden (2.4) numaralı düğmeye basılarak FRF/CPS karşılaştırma penceresi açılır. Burada karşılaştırma için 15 numaralı kanal seçilirse Şekil 2.75’de görüldüğü gibi bir sonuç elde edilir.



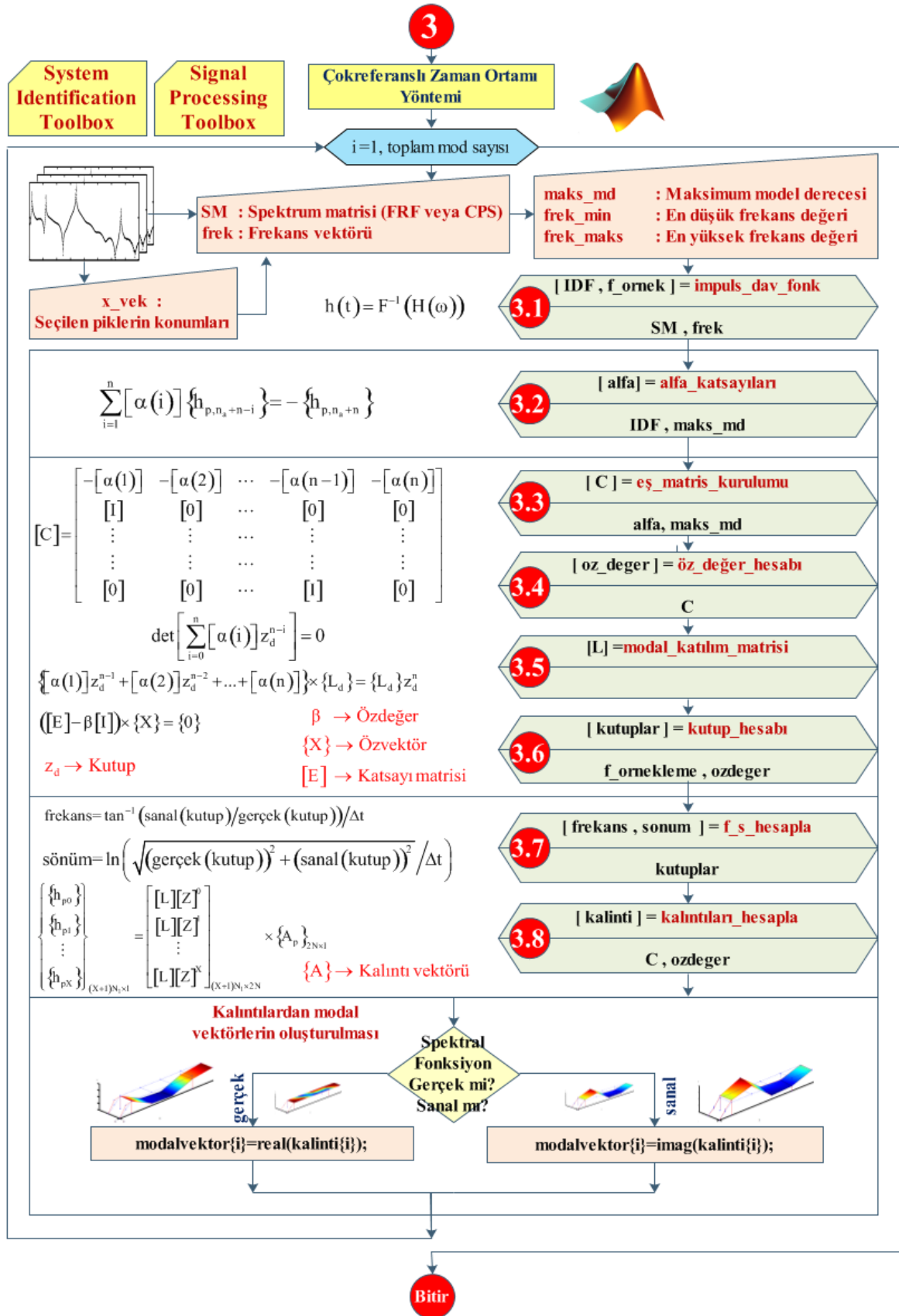
Şekil 2.74. CE Yöntemi ile üç boyutlu çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi



Şekil 2.75. 15 numaralı kanal için elde edilen teorik CPS ile deney sonucunda üretilen CPS' nin karşılaştırılması

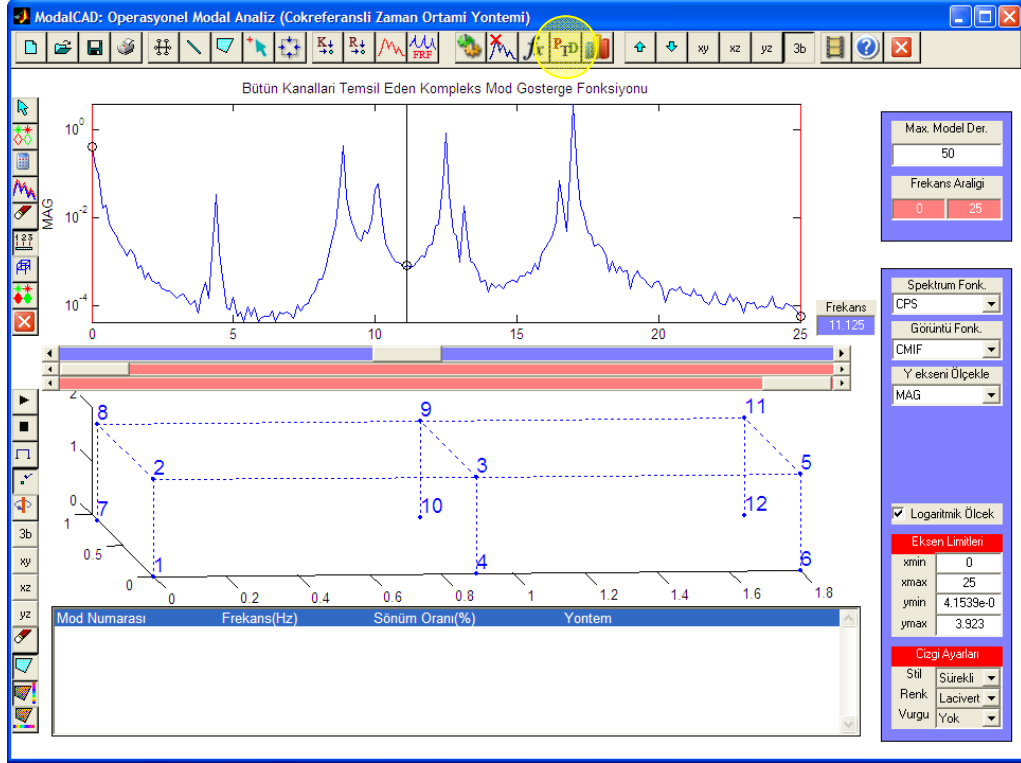
2.2.2.5.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

ModalCAD programında Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi (Polyreference Time Domain - PTD) ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan çözüm algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 2.76'da görüldüğü gibidir. Bu akış diyagramına bağlı olarak üretilen analiz fonksiyonları, menü sistemi ile bağlantılı olarak çalışmaktadır. Şekil 2.76'da yer alan akış diyagramında görüldüğü gibi, spektrum üzerinde tepe noktası seçimi yapılır ve daha sonra analiz parametreleri belirlenir. Analiz parametreleri maksimum ve minimum frekans değeri ile maksimum model derecesinden meydana gelmektedir. Giriş verileri tamamlandıktan sonra, sisteme giriş verisi olarak tanıtılan spektrum matrisleri kullanılarak impuls davranış fonksiyonları elde edilir. Elde edilen impuls davranış fonksiyonları ve analiz parametrelerine bağlı olarak sistemin kutupları hesaplanır. Sistemin kutupları hesaplandıktan sonra ise önce frekans ve sönüm değerleri, daha sonra ise kalıntılar hesaplanır. Kompleks değerli kalıntı vektöründen de, sistemin mod şekilleri elde edilir.



Şekil 2.76. ModalCAD programında PTD Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin hesaplanması için tasarlanan akış diyagramı

Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi ile dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi için ana düğmelerden (17) numaralı düğmeye basılırsa, Şekil 2.77’de görüldüğü gibi bir analiz ekranı açılır. Ekranın sol üst tarafında yer alan analiz düğmelerinin ne anlama geldikleri Şekil 2.78’de görülmektedir. Ekranın sol alt kısmında yer alan düğmeler daha önce de açıklandığı gibi animasyon ve geometri ile ilgilidirler.



Şekil 2.77. PTD Yöntemi analiz ekranı

	(3.1) Tepe noktalarının seçilmesi için seçim modunu aç
	(3.2) Spektral fonksiyon üzerine stabilite diyagramını çiz
	(3.3) Çokreferanslı zaman ortamı analizini yap
	(3.4) Üretilen teorik FRF'ler ile deneysel FRF'leri karşılaştır
	(3.5) Seçili modu sil
	(3.6) Modların ait oldukları tepeleri göster/gizle
	(3.7) Animasyon alanını göster/gizle
	(3.8) Yeni bir alanda stabilite diyagramı çiz
	(3.9) PTD ekranını kapat ve ana ekrana dön

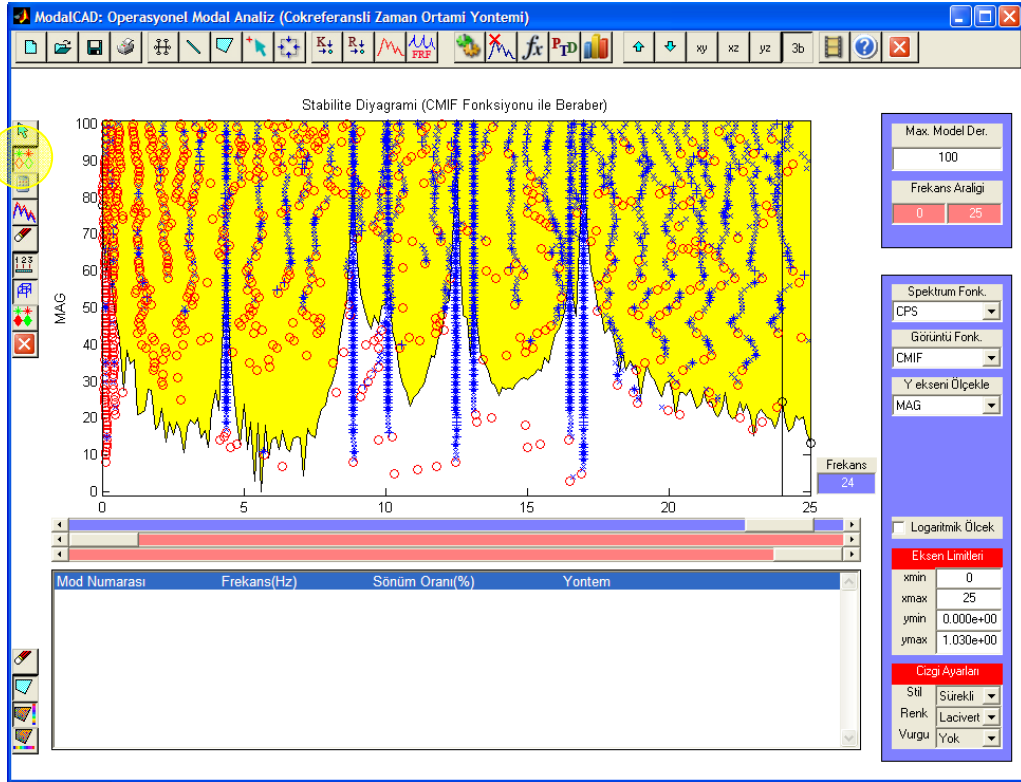
Şekil 2.78. PTD Yöntemi analiz düğmeleri

Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi ile analiz yapmak için, diğer yöntemlerde olduğu gibi, bir takım analiz parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Spektral fonksiyonun üzerinde üç adet kursor yer almaktadır. Bunlardan bir tanesi kutup noktalarının seçilmesi için, diğer ikisi ise hesap frekans aralığının belirlenmesi içindir. Bununla birlikte sağ üst tarafta analiz parametreleri bilgi giriş alanı bulunmaktadır. Burada Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi ile analiz için modelin maksimum derecesinin girilmesi istenmektedir. Burada en uygun model derecesinin sisteme tanıtılması gerekmektedir

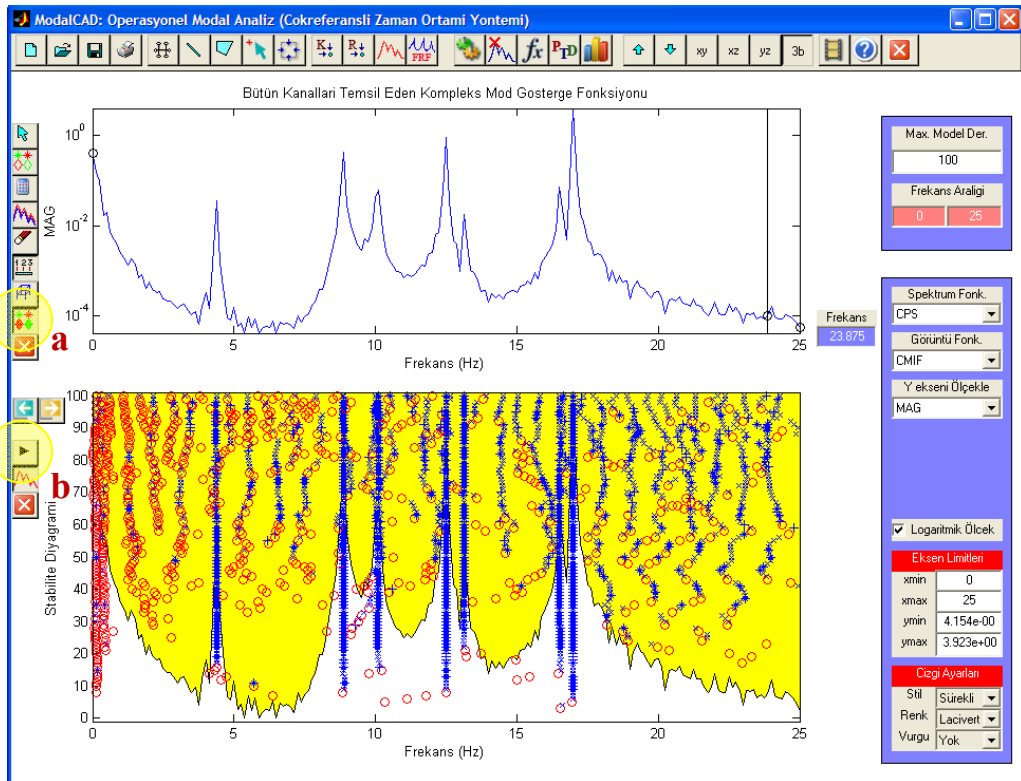
Sistemin maksimum model derecesi ve frekans çözüm aralığı belirlendikten sonra hesap için kutup noktalarının seçilmesi aşamasına geçilir. Burada kutup noktaları seçilirken, doğrudan doğruya tepe noktaların seçilmesi her zaman sağlıklı sonuç vermez. Özellikle büyük ve karmaşık yapı sistemlerinde çok belirgin tepeler olmamakla beraber birçok tepe noktası görülebilir ve bu tepe noktalarının hepside kutup noktası olmayabilirler, yani modun bulunduğu frekansa karşılık gelmeyebilirler. Bu sebeple, kutup noktalarının belirlenebilmesi için stabilite diyagramlarından yararlanır. Stabilite diyagramı eğer spektral fonksiyonun olduğu eksene çizilecekse (3.2) numaralı, eğer aşağıda ayrı bir eksene çizilecekse (3.8) numaralı düğmeye tıklanılır.

Spektrum alanı üzerinde stabilite diyagramını çizdirmek için (3.2) numaralı düğmeye tıklanırsa, Şekil 2.79'da görüldüğü gibi bir görüntü elde edilir. Elde edilen bu stabilite diyagramı incelendiğinde, daha önce bulunmuş olan 7 mod noktası oldukça net bir şekilde görülmektedir.

Spektral fonksiyon üzerinde modların seçiminin yapılabilmesi için Şekil 2.79'da görülen stabilite diyagramı kapatılır ve (2.8) numaralı düğmeye basılarak (Şekil 2.80-a) spektral fonksiyonun aşağısında yeni bir stabilite diyagramı ekranı açılır. Bu ekranda çizim düğmesine basılarak (Şekil 2.80-b), stabilite diyagramı Şekil 2.80'de görüldüğü gibi çizdirilir. Bu çizim incelendiğinde üst grafikte tepe noktalarının stabil hatlarda olduğu görülmektedir. Bu durum, elde edilen tepelerin tamamının ses, gürültü veya harici bir titreşimden dolayı değil, yapıdaki titreşimden dolayı elde edilmiş olduğunu göstermektedir.



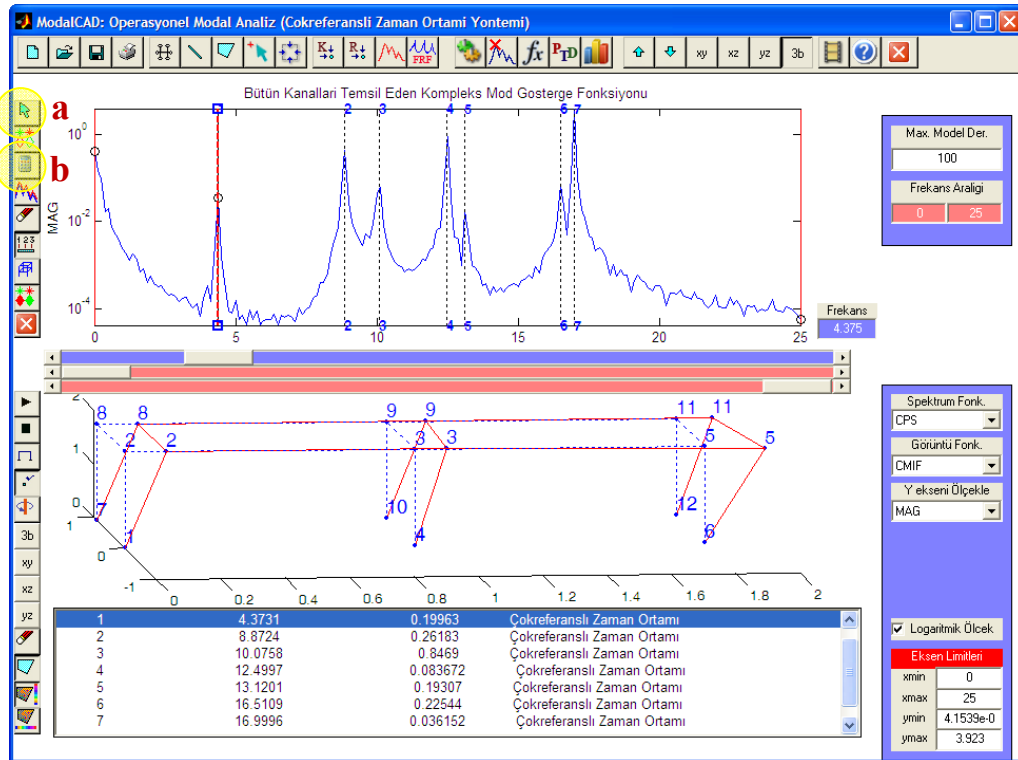
Şekil 2.79. PTD Yönteminde spektral çizim alanında stabilite diyagramının çizimi



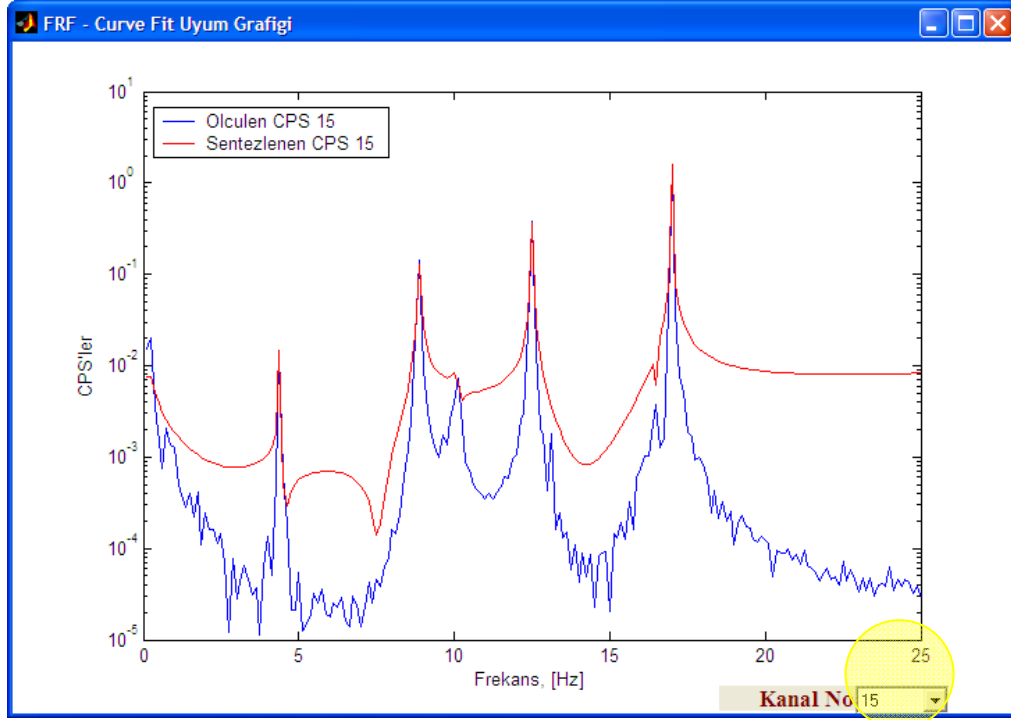
Şekil 2.80. PTD Yönteminde spektral alanın altında stabilite diyagramının çizimi

Stabilite diyagramı ile kutup noktaları belirlendikten sonra, sıra bu kutup noktalarının fare ile seçimine ve dinamik karakteristiklerin analizine gelir. Bunun için, (3.1) numaralı düğmeye basılarak seçim modu aktif hale getirilir (Şekil 2.81-a), kutup noktaları seçildikten sonra (3.3) numaralı düğmeye basılarak (Şekil 2.81-b), o kutup noktasına denk gelen dinamik karakteristikler hesaplanır. Bu işlemin sırasıyla bütün kutup noktalarına uygulanması ile üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyi sonucunda dinamik karakteristikleri Şekil 2.81’de görüldüğü gibi elde edilmiş olur.

Dinamik karakteristikler belirlendikten sonra, üretilen teorik çaprazgüç spektrumları ile deney sonuçlarından elde edilen çaprazgüç spektrumları karşılaştırılabilir. Bunun için analiz düğmelerinden (3.4) numaralı düğmeye basılarak FRF/CPS karşılaştırma penceresi açılır. Burada karşılaştırma için 15 numaralı kanal seçilirse, Şekil 2.82’de görüldüğü gibi bir sonuç elde edilir. Burada teorik spektrumlar, yöntem içerisinde hesaplanan kutup ve kalıntılardan geri dönüşüm yapılarak hesaplanmaktadır. Spektrumlar arasındaki uyum sonuçların doğruluğu hakkında kullanıcıya fikir verir. Eğer çok fazla uyumsuzluk var ise, bu ölçümün çok iyi yapılmadığını ya da dinamik karakteristik belirleme hesabında sorun olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.81. PTD Yöntemi ile üç boyutlu çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi



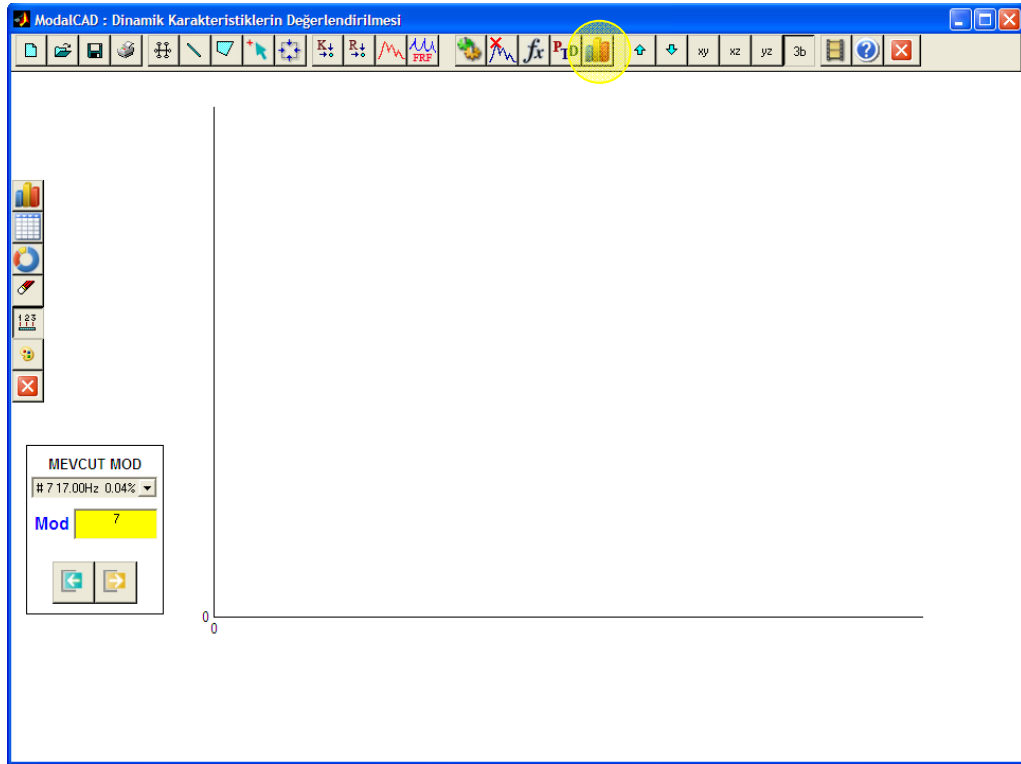
Şekil 2.82. 1 numaralı kanal için elde edilen teorik CPS ile deney sonucunda üretilen CPS nin karşılaştırılması

2.2.2.6. Belirlenen Dinamik Karakteristiklerinin Analiz ve Değerlendirmesi

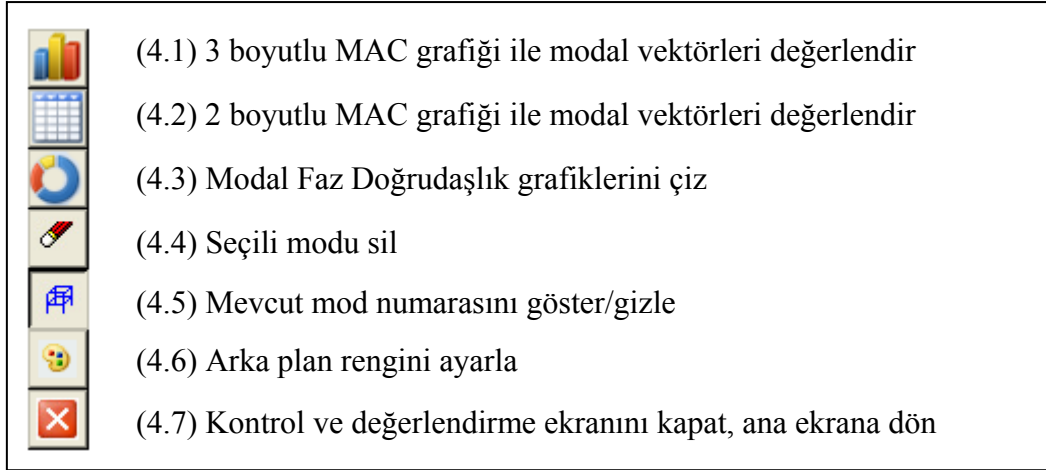
Çeşitli yöntemler ile yapının dinamik karakteristikleri belirlendikten sonra, bunların doğruluğunun kontrolü için birtakım yardımcı parametreler kullanılır. ModalCAD programında bu amaçla ayrı bir modül hazırlanmıştır. Burada en önemli iki kontrol mekanizması modal güvence kriteri (Modal Assurance Criteria – MAC) ve modal faz doğrudaşlığı (Modal Phase Collinearity – MPC)'dır. MAC kriteri esasında analitik ve deneysel mod şekillerinin otomatik eşleştirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılmasına rağmen, üretilen modal vektörlerin uyumunun karşılaştırılmasında da kullanılabilir. MAC değeri, 0 ile 1 arasında sınırlıdır. 1 değeri mükemmel bir korelasyon olduğu anlamına gelmektedir. Sıfıra eşit olan bir MAC değeri ise iki mod arasında herhangi bir korelasyon olmadığını gösterir. Hesaplanan mod şekillerinin kontrolünde MAC grafikleri kullanıldığı zaman, modların birbirlerinden bağımsız hareketleri kontrol edilir. Normalde her bir mod birbirinden farklı olmalıdır ve buna bağlı farklı deformasyon hareketleri göstermelidir. Burada, mod şekil matrisinin kendisi kullanılarak hesaplanan MAC grafiklerinde, köşegenlerin 1 değeri alması beklenirken köşegen dışındaki matris değerlerinin farklı hareketler dolayısı ile 0'a yakın değerler alması beklenir.

Düşük sönümlü yapılar için, normal mod davranışı gözlemlenmelidir. Her bir mod için mod şeklinin gerçek ve sanal kısımları arasındaki lineer fonksiyonel ilişkinin kuvvetini ölçmek amacıyla modal faz doğrudaşlığı (MPC) olarak adlandırılan bir gösterge geliştirilmiştir. Bu gösterge tanımlanan j. mod şeklinin bileşenleri için davranışın 0-180 dereceden sapmasını kontrol eder. Sapma yoksa yani lineer bir yol izliyor ise, mod şeklinin yüksek derecede doğru olduğu anlaşılır. Eğer sapma varsa bu mod ya parazitli bir moddur ya da önemli ölçüde kompleksdir.

Ana ekrandaki düğmelerden (18) numaralı düğmeye basılması ile modların analiz ve değerlendirilmesi ekranı Şekil 2.83’de görüldüğü gibi açılır. Bu ekranda yer alan yönetim düğmelerinin açıklamaları Şekil 2.84’de görüldüğü gibidir. Burada görülen düğmelerden (4.1) numaralı düğmenin seçilmesi ile İşletim Vektörleri Yöntemi ile bulunan modal vektörlerin 3 boyutlu MAC grafiği Şekil 2.85’de görüldüğü gibi elde edilir. MAC grafiği eğer 2 boyutlu ve sayısal değerleri ile incelenmek istenirse, (4.2) numaralı düğmeye basılır ve elde edilen çizim Şekil 2.86’da görüldüğü gibi olur. MAC grafikleri şekil 2.87’de görüldüğü gibi farklı renk tonlarında da değerlendirilebilir.



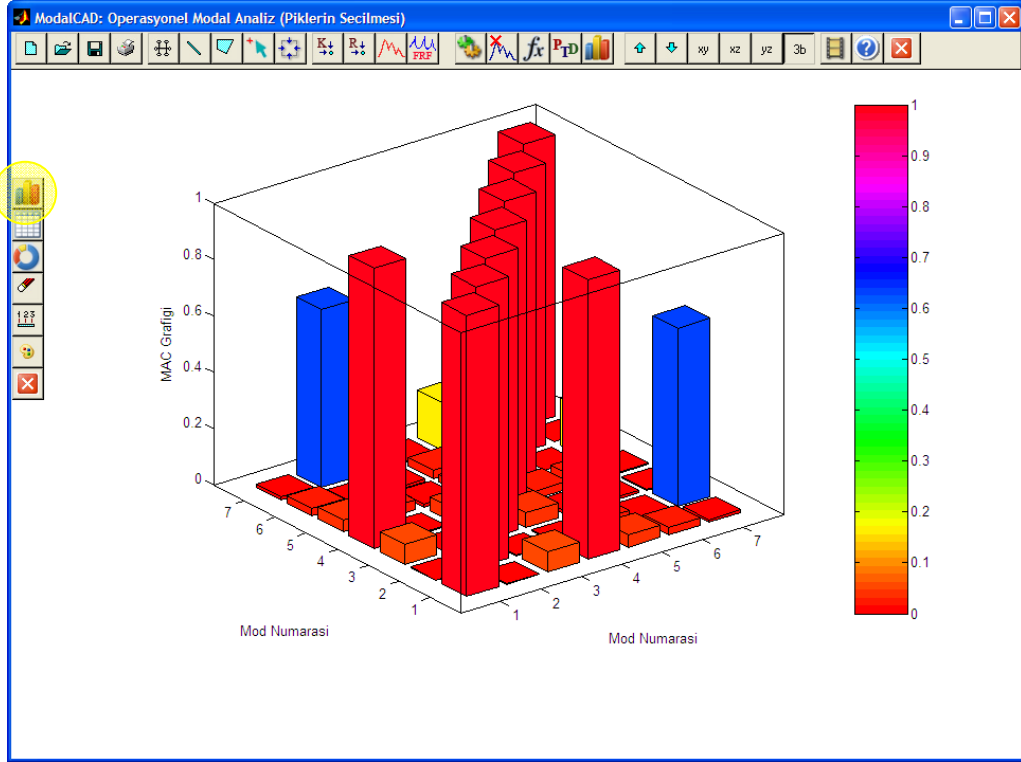
Şekil 2.83. ModalCAD programında hesaplanan dinamik karakteristiklerin kontrol ve değerlendirilmesi ekranı



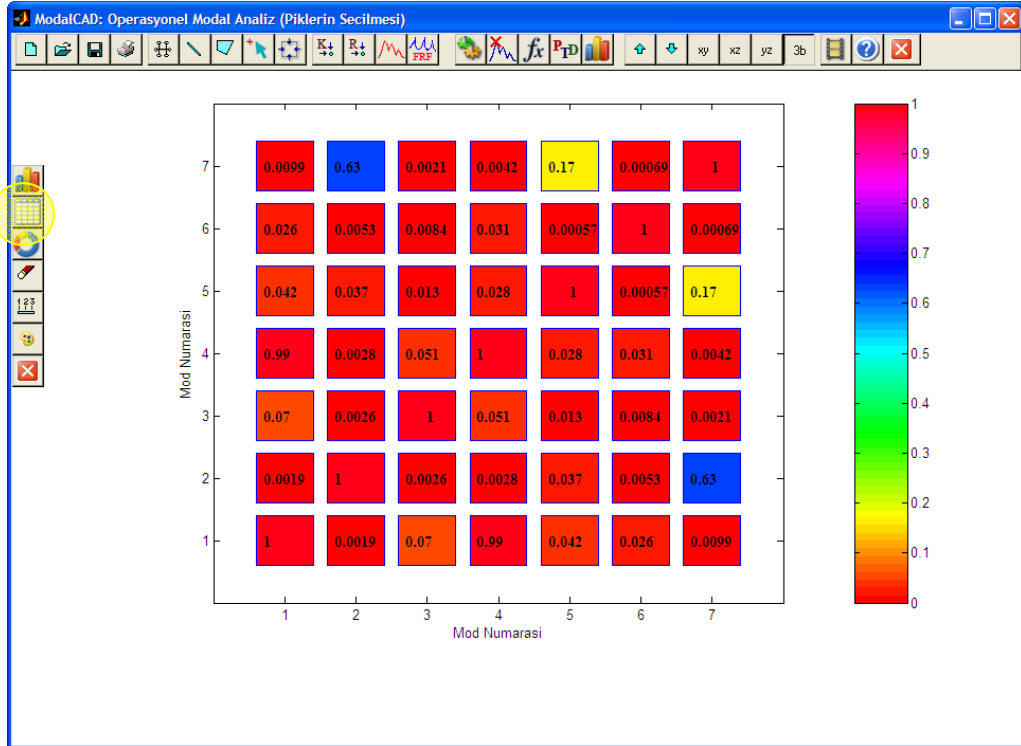
Şekil 2.84. Modal analiz sonuçlarının kontrol ekranındaki yönetim düğmeleri

MAC grafiği incelendiğinde modal vektörlerin oldukça başarılı bir şekilde hesaplandığı görölmektedir. Köşegenler tam 1 ve köşegen dışındaki MAC matrisi değerleri sıfıra yakındır. Burada köşegen dışında ilk satırın dördüncü elemanı ile dördüncü satırın ilk elemanının 0.99 değerini gösterdiği görölmektedir. Bunun sebebi, dördüncü modun birinci moda benzer hareket yapmasından kaynaklanmaktadır. Aslında dördüncü mod birinci moddan tamamen farklı olmasına rağmen, sadece üst kattan ivmeölçerler ile kayıt alındığından dolayı, üs kattaki hareket yönleri de benzer olduğundan, sanki birinci ve dördüncü mod aynı gibi dikkate alınmış, bu sebeple değerler yüksek çıkmıştır. Normalde dördüncü modda yapı modeli ara katta birinci moda tam ters bir hareket yaparak ortadan kesiliyor şeklinde bir harekete sahiptir. Benzer şekilde ikinci mod ile yedinci mod arasında da aynı durum söz konusudur. Bu durumlar göz önüne alındığında modal vektörlerin oldukça başarılı bir şekilde hesaplandığı söylenebilir.

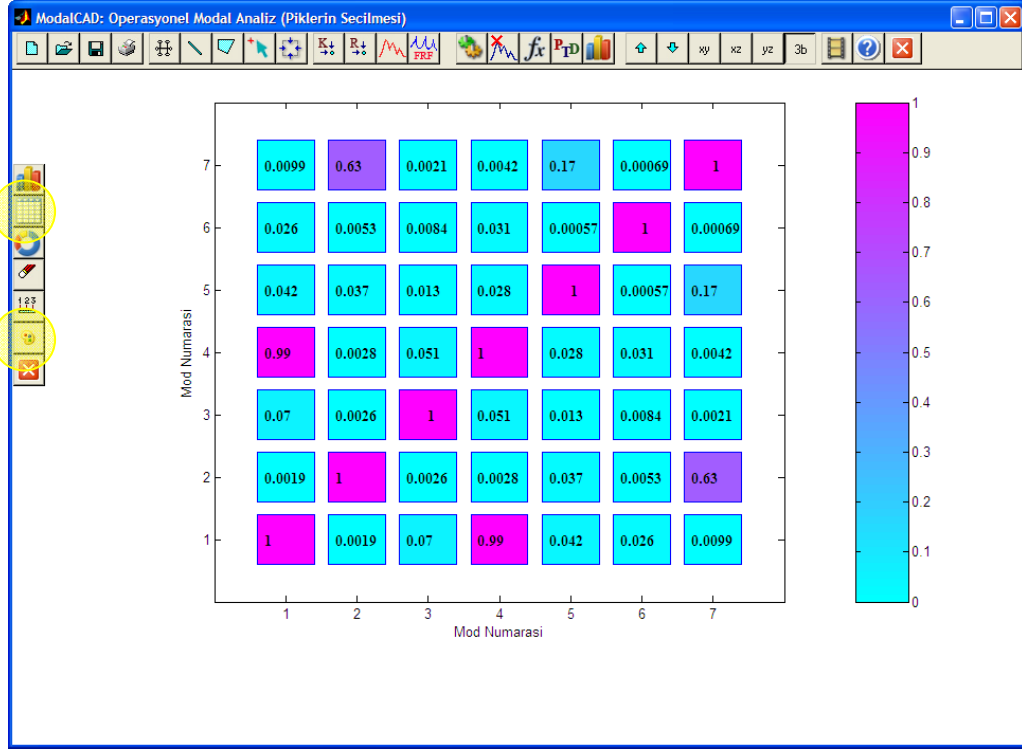
MPC grafiklerinin çizimi için ise (4.3) numaralı düğmeye basılır. Şekil 2.88'de İşletim Vektörleri Yöntemi ile hesaplanan birinci mod şekline ait MPC grafiği ve değerleri görölmektedir. Değerin yüksekliği ve grafikteki lineerlik mod şeklinin doğruluk oranının yüksekliğini açık bir şekilde göstermektedir.



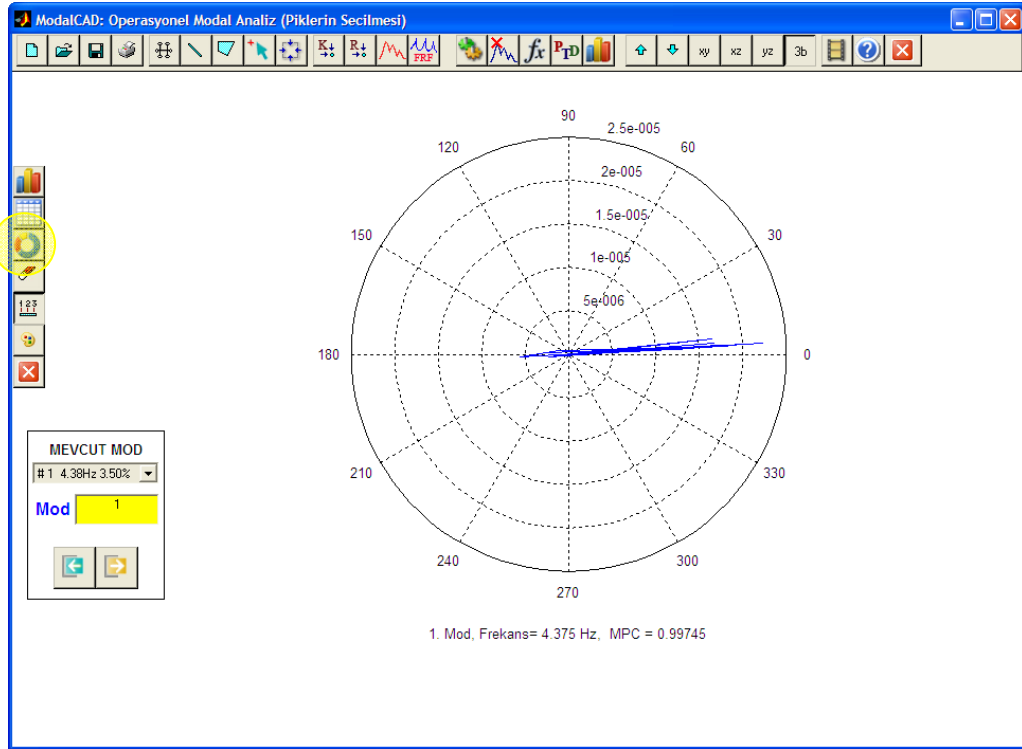
Şekil 2.85. OV Yöntemi ile belirlenen modal vektörler için 3 boyutlu MAC grafiği



Şekil 2.86. OV Yöntemi ile belirlenen modal vektörler için 2 boyutlu MAC grafiği



Şekil 2.87. OV Yöntemi ile belirlenen modal vektörler için renk tonlarında 2 boyutlu MAC grafiği

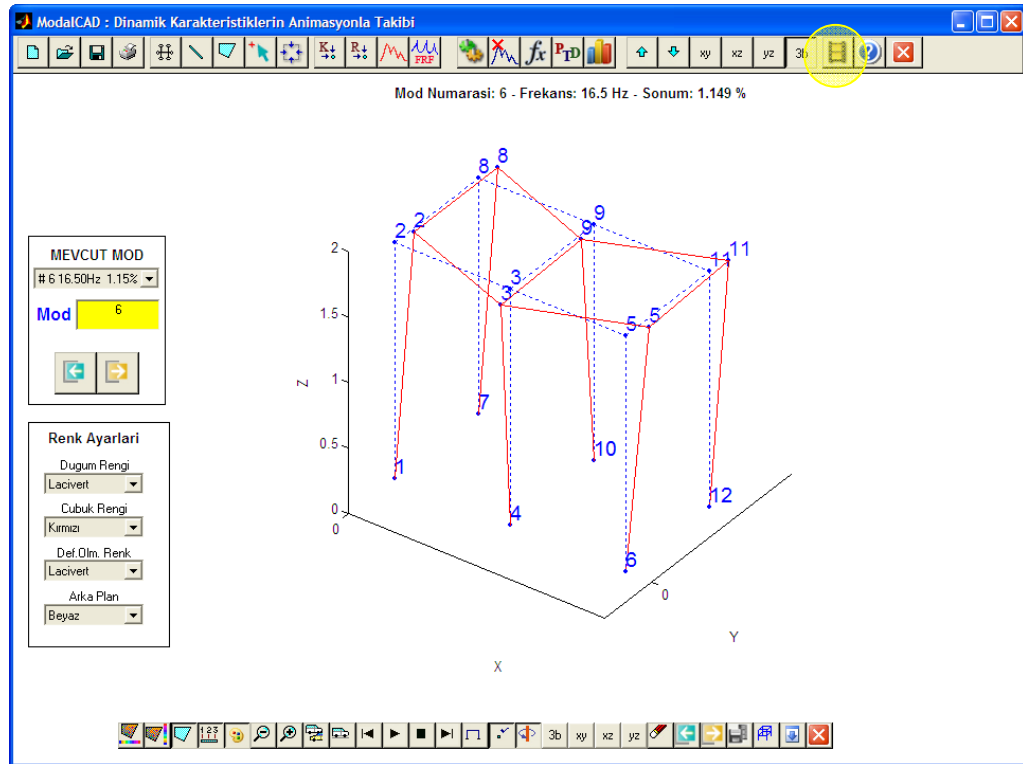


Şekil 2.88. OV Yöntemi ile belirlenen 1. modal vektör için MPC grafiği

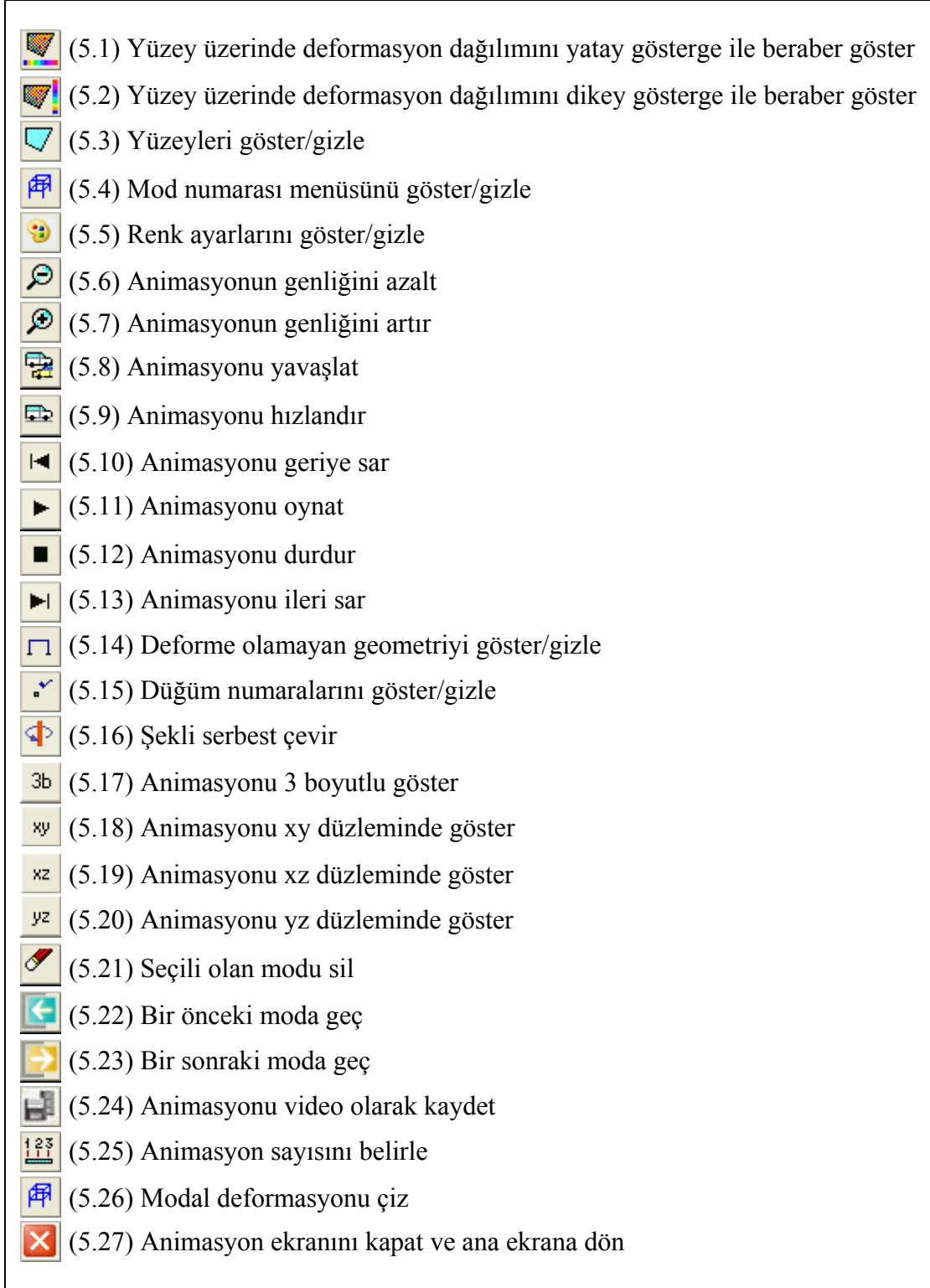
2.2.2.7. Belirlenen Dinamik Karakteristiklerinin Animasyon Takibi

Dinamik karakteristikler belirlendikten sonra bunların görsel olarak takip edilebilmesi için ModalCAD programında bir animasyon ekranı hazırlanmıştır. (25) numaralı düğmeye basılması ile açılan animasyon ekranı Şekil 2.89’da görüldüğü gibidir. Bu animasyon ekranında şekilde görüldüğü gibi büyük bir eksen üzerinde, analiz edilen modelin geometrisi ile beraber mod şekli gösterilmektedir. Mod şeklinin hemen üzerinde, bu mod şekline ait mod numarası, doğal frekans ve sönüm oranı gösterilmektedir. Sol tarafta mevcut modun parametreleri ile ilgili bilgiler, onun hemen altında ise çizim ve renk ayarları yer almaktadır. En altta yatay doğrultuda sıralanmış olan düğmeler ise animasyon ekranının yönetim düğmeleridir. Bu düğmelerin ne anlama geldikleri Şekil 2.90’da açıklanmaktadır.

Animasyon ekranındaki düğmelerin kullanımı pek çok avantaj sağlar. Her türlü bakış açısı ile modların takibi, renk skalası ile deformasyon dağılımının izlenmesi, animasyonun hızlandırılıp yavaşlatılması, genliğinin azaltılıp artırılması, ileri geri sarma gibi pek çok özellik vardır.

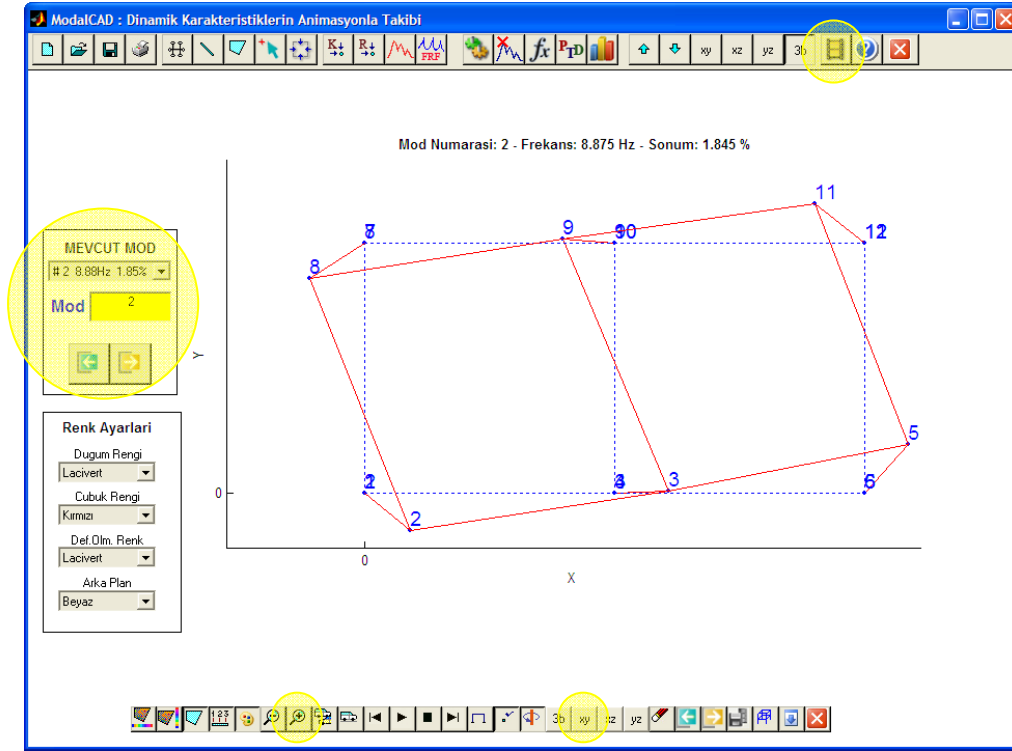


Şekil 2.89. ModalCAD programı modal animasyon ekranı



Şekil 2.90. Animasyon ekranı yönetim düğmeleri

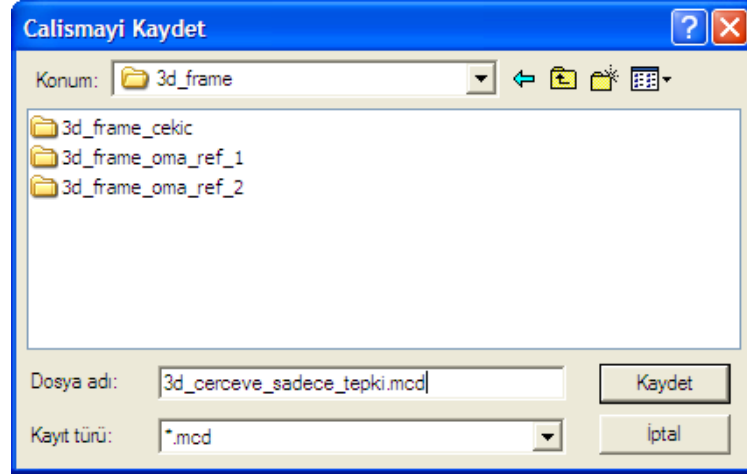
Modelin ikinci modu burulma modudur. Bu moda, tepeden xy düzleminde bakılırsa ve mod şeklinin genliğini bir miktar artırılırsa, burulma olayı ve modal vektörlerin yönleri Şekil 2.91’de görüldüğü gibi çok daha net olarak takip edilebilir.



Şekil 2.91. Animasyon ekranında farklı bakış açıları ve artırılmış genlikle modların takibi

2.2.2.8. Yapılan Çalışmanın Kaydedilmesi

ModalCAD programı ile sistem analizi yapıldıktan ve modal parametreler üretildikten sonra, programdan çıkmadan evvel yapılan çalışmalar kaydedilir. Bunun için, (3) numaralı kayıt düğmesine basılır ve Şekil 2.92’de görüldüğü gibi bir kayıt penceresi açılır. Bu pencerede, yapılan çalışmanın kaydedilmek istendiği yer seçilerek dosya ismi yazılır ve kaydet düğmesine basılır. ModalCAD programı ile yapılan çalışmalar (.mcd) uzantısı ile kaydedilirler. Böylelikle modal parametre belirleme işlemi başarıyla sonlandırılmış olur. Kaydedilen dosyanın içerisinde yapı modelinin geometrisi, kanal bilgileri, spektrum bilgileri ve dinamik karakteristiklere ait bilgiler yer almaktadır. Kullanıcı daha sonradan programa bu dosyayı yüklediğinde, çalışmaya kaldığı yerden devam edebilir.



Şekil 2.92. ModalCAD programı kayıt penceresi

2.2.3. FemUP Programı

Ölçüm deneyleri, bir yapının dinamik davranışı hakkında daha iyi bir bilgi sahibi olmak amacıyla gerçekleştirilirler. Bu, bilinen koşullarda bir yapının davranışının gözlemlenmesi ile başılır. En yaygın olan dinamik deney tekniği zorlanmış ya da çevresel titreşim deneyleridir. Deneysel modal analiz, bir yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranlarından oluşan dinamik karakteristiklerini tespit etmek için yapılır. Bunun için yapının titreştirilmesi ve birtakım sensörler ile tepkisinin ölçülmesi gerekmektedir.

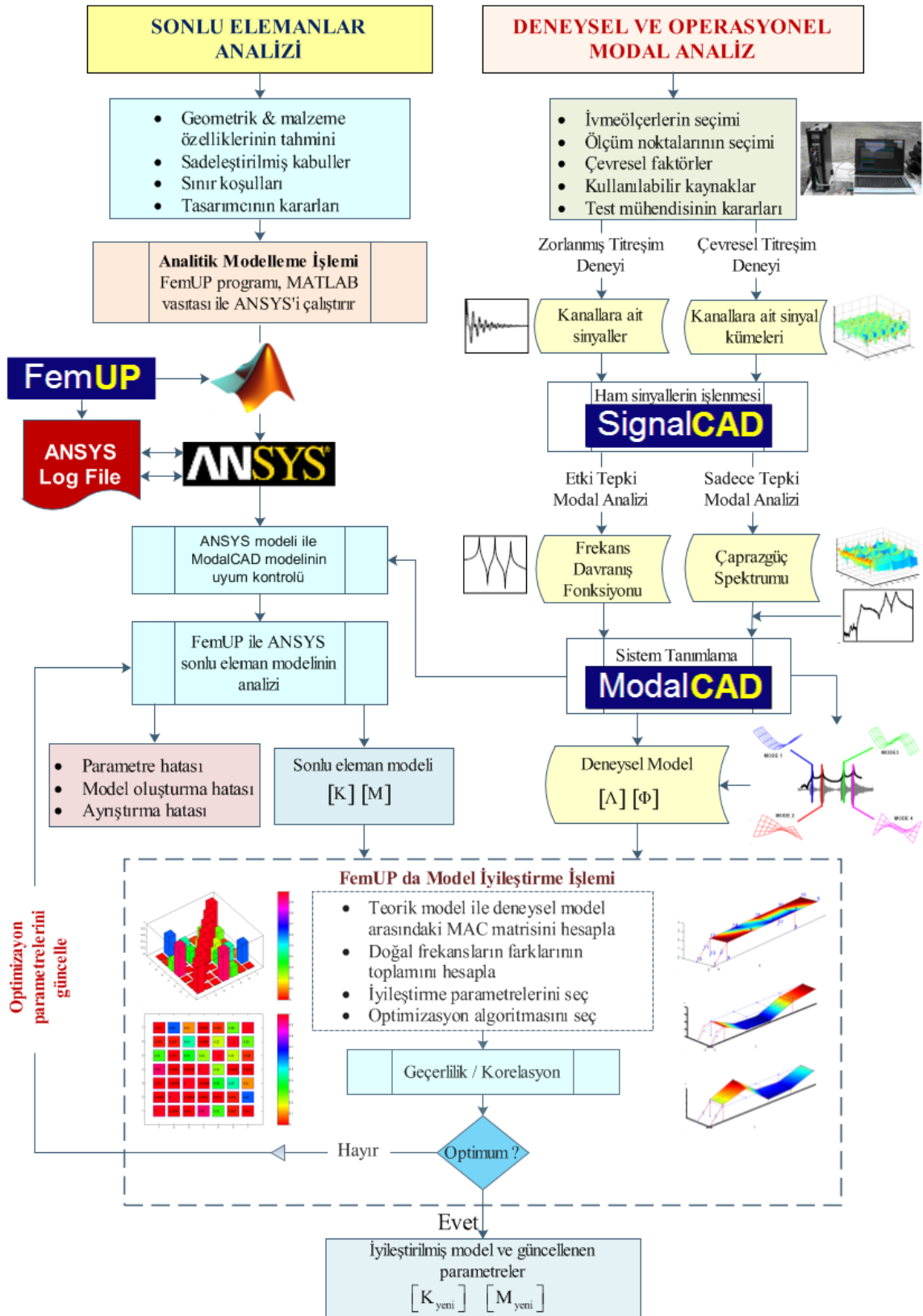
Titreşim ölçümleri doğrudan doğruya fiziksel bir yapı sisteminden alınır. Yapı ile ilgili herhangi bir kabul yapılmaz ve bu deney sonuçları sonlu eleman modellerinden daha güvenilirlerdir. Ancak, aşağıdaki bazı sebeplerle deneysel yaklaşımda birtakım kısıtlamalar ve hatalar oluşur:

- Maksimum ölçüm noktası sayısı sınırlıdır ve deneysel modelin boyutu her zaman analitik modelin boyutundan daha küçüktür.
- Genellikle, dönme yönündeki serbestlik yönlerinde ölçüm yapmak mümkün değildir.
- Belirlenen modların sayısı frekans alanı ile sınırlıdır.
- Ölçülen veriler belirli bir gürültü seviyesinde bozulurlar.
- Deney sırasında yapının bazı modları titreştirilemeyebilirler veya titreştirilse bile bazı modlar tanımlanamayabilir.

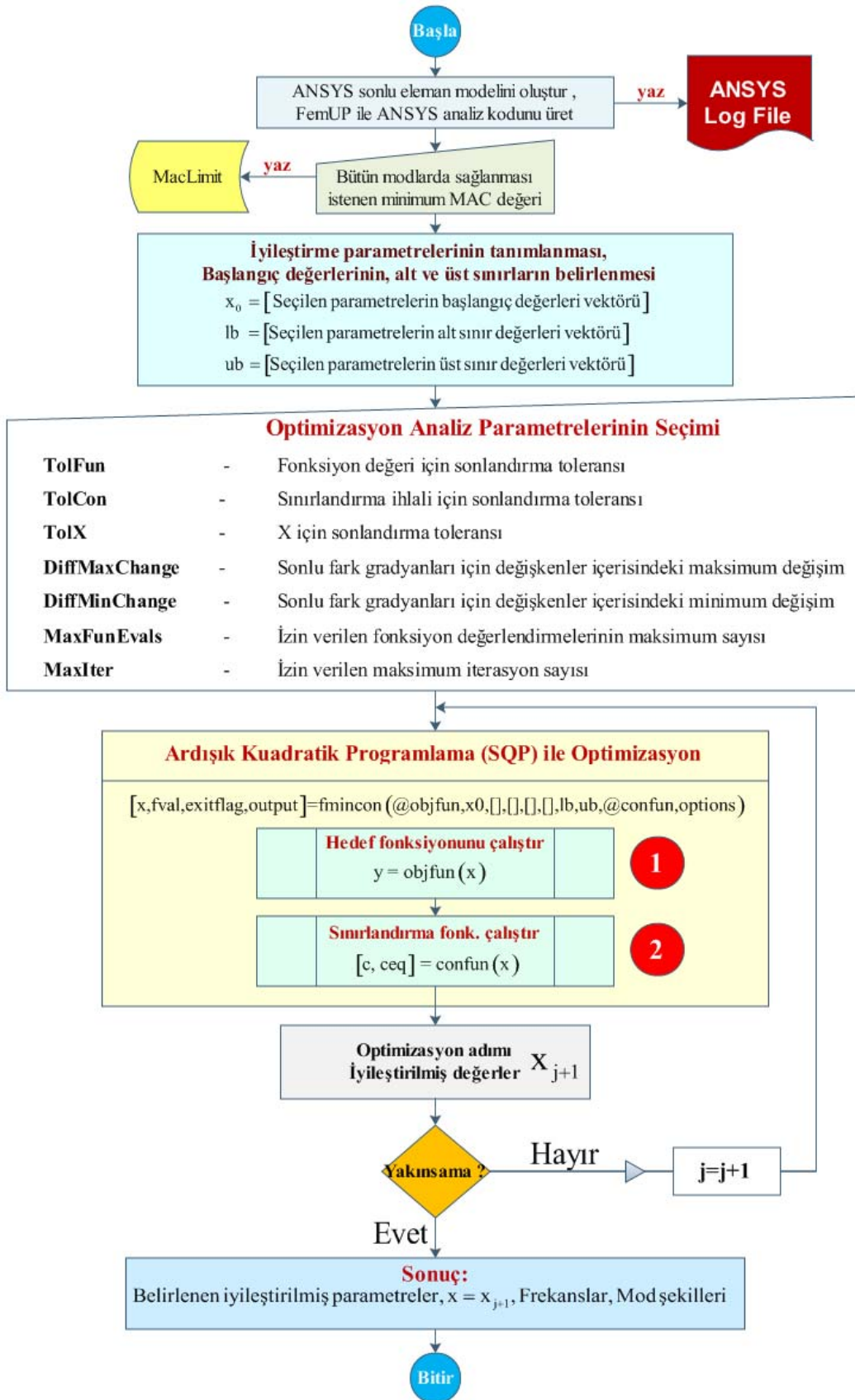
Bu tez çalışmasında, yapılan titreşim deneyleri sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler referans alınarak, sonlu eleman modellerinde iyileştirmeler yapılması

amaçlanmıştır. Sonlu eleman model iyileştirilmesi, oldukça güncel bir konudur ve bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır. Bununla beraber, özellikle büyük ve kompleks yapı sistemlerinde sonlu eleman model iyileştirmesi yapmak mühendisler için külfetli olmakta ve optimal sonuca ulaşmakta zorluk çekilmektedir. Bu sebeple, model iyileştirmenin bilgisayarlar tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmesi konusunda önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bununla beraber, bu alanda çok fazla geliştirilmiş bilgisayar programı olduğunu söylemek mümkün değildir. Mevcut programların kodlarının kapalı olmasının yanında yüksek maliyetlerinin olması, bu konuda da bir program geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Tez çalışması kapsamında sayısal sinyal işleme, dinamik karakteristik belirleme ve sonlu eleman model iyileştirme çalışmaları arasında kurulan ilişki Şekil 2.93'de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği gibi, bu ilişkinin sağlanabilmesi için üç tane yeni program geliştirilmiştir. Bunlar, SignalCAD, ModalCAD ve FemUP programlarıdır. SignalCAD programı daha önce açıklandığı üzere yapı sisteminden alınan sinyallerin işlenmesi ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan spektrumların üretimi amacıyla yazılmıştır. ModalCAD programı, dinamik ölçümlerden elde edilen ve SignalCAD tarafından işlenen spektrumların kullanılarak, sistem tanımlanması amacıyla yazılmıştır. FemUP programı ise sonlu eleman modeli ile deneysel model arasındaki farkları minimuma indirmeyi amaçlayan otomatik bir model iyileştirme yazılımıdır.

FemUP programı içerisinde MATLAB optimizasyon araçları kullanılmaktadır. Optimizasyon probleminin çözümünde Ardışık Kuadratik Programlama (Sequential Quadratic Programming – SQP) Yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon algoritması başlangıç değerleri, alt ve üst sınırlar, sınırlandırmalar ve optimizasyon kriterleri ile desteklenmiştir. Minimize edilmesi için seçilen optimizasyon kriteri, bağlantılı her bir moddaki doğal frekansların farklarının toplamıdır. Sınırlandırma fonksiyonu, MAC matrisinin diyagonal değerleri kullanılarak deneysel ve teorik mod şekilleri arasındaki korelasyona bağlı olarak kurulmuştur. MAC kriteri mod şekilleri arasındaki uyumu hesaplayan bir tekniktir. Bu sınırlandırma fonksiyonu, optimizasyon kriterinin hesaplanması sırasında programı mod şekilleri arasındaki uyumu gözetme konusunda zorlar. Yani, deneysel ve teorik frekanslar arasındaki farkın minimum olduğu teorik model, MAC kriterini sağlama koşulu altında aranır. Böylelikle, model iyileştirme sonunda hem doğal frekanslarda hem de modal vektörlerde iyi bir uyum elde edilebilir. FemUP programında uygulanan sonlu eleman model iyileştirme işleminin akış diyagramı Şekil 2.94'de gösterilmektedir.



Şekil 2.93. Tez çalışması kapsamında geliştirilen SignalCAD, ModalCAD ve FemUP programları arasında kurulan ilişki



Şekil 2.94. FemUP programı ile uygulanan sonlu eleman model iyileştirme yöntemine ait genel akış diyagramı

Şekil 2.93'de görüldüğü gibi, deneysel ölçüm alınan modelin, ilk önce ANSYS (2007) programında bir sonlu eleman modeli oluşturulur ve bu modelin ANSYS kodu (Log File) kaydedilir. Daha sonra FemUP programı içerisinde iyileştirme uygulanacak başlangıç parametreleri, bu parametrelerin sınır değerleri ve MAC grafiğinde diyagonal üzerindeki elemanların sağlanması istenen minimum değer belirlenir.

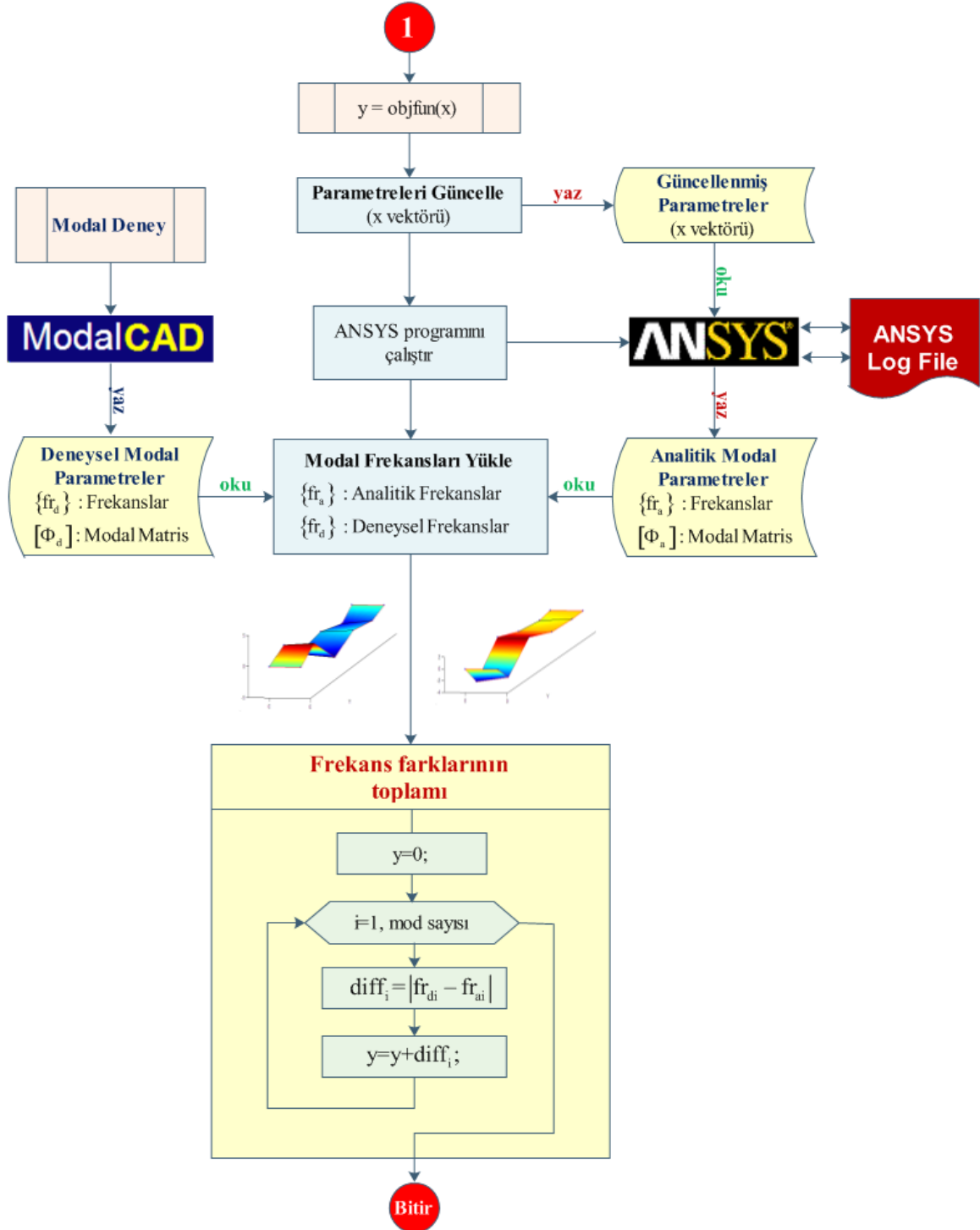
Ayrıca şekilde görüldüğü gibi optimizasyon tolerans parametreleri belirlenmelidir. Optimizasyon çözümü içerisinde arama algoritması için uygun toleransların seçilmesi önemli bir konudur. Çoğunlukla özel problemler için değiştirilmelidirler. Tolerans değerlerinin sıklaştırılması programı büyük miktarda fonksiyon değerlendirmeleri yapmaya zorlar. Diğer yandan tolerans seçenekleri gevşek tutulduğunda, arama algoritması doğru optimumu bulamayabilir. Optimizasyon algoritması için tolerans değerlerini doğru ve basit bir şekilde kurmak için, bütün parametrelerin 0 ile 1 arasında belirlenmesi uygundur.

Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir durum, SQP' nin gradyan tabanlı bir optimizasyon rutini olduğudur. Bu yalnızca lokal optimumların bulunduğu anlamına gelmektedir. Yani, başlangıç değerlerine bağlı olarak farklı optimumlar bulunabilir.

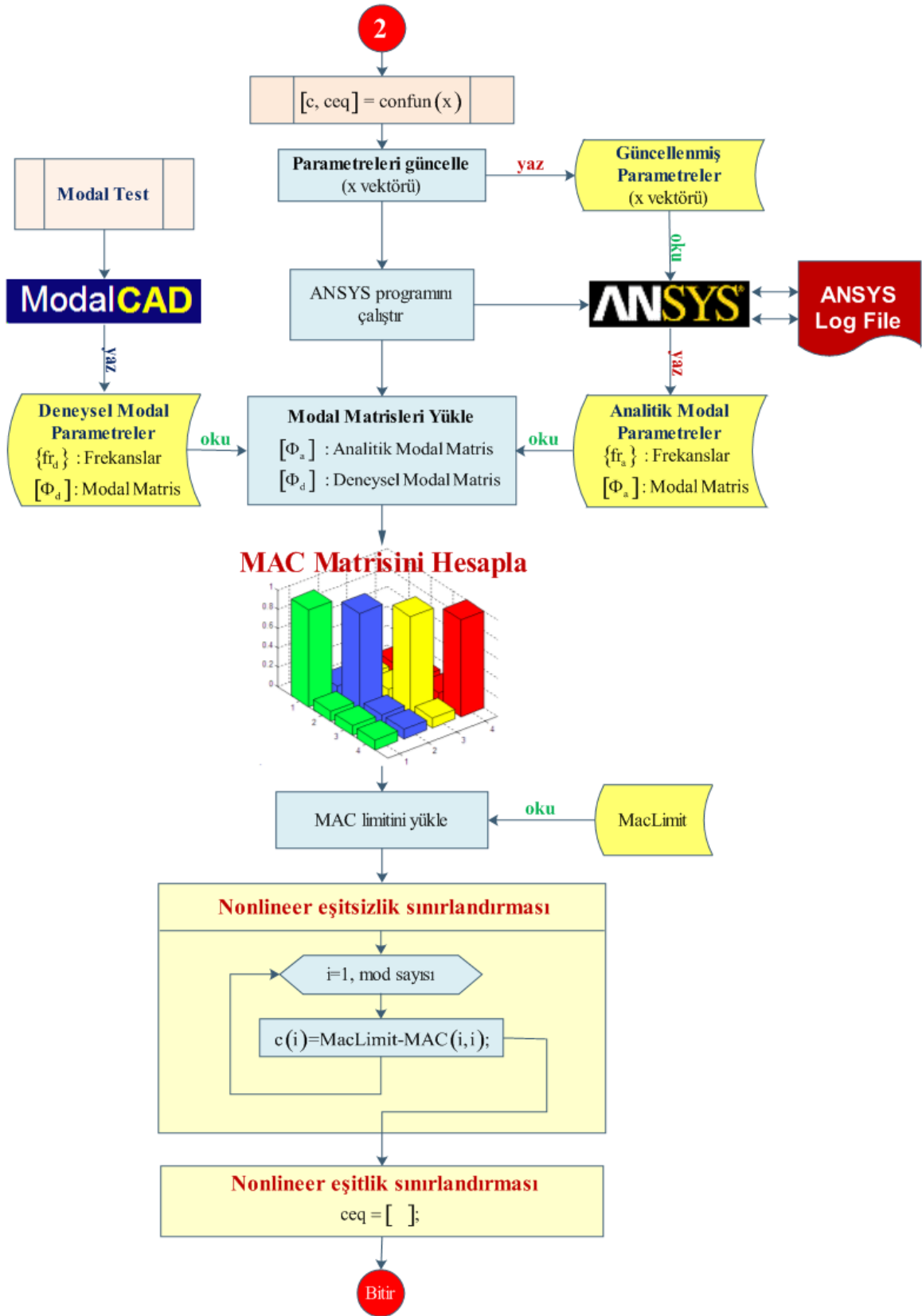
Optimum sonlu eleman model iyileştirilmesi yapılırken, doğal frekanslar ve mod şekillerinin sürekli olarak hesaplanması gerektiğinden, ANSYS ve MATLAB programları birbirleri ile etkileşim halindedirler. Optimizasyon algoritması içerisinde yer alan hedef fonksiyonu ve sınırlandırma fonksiyonu, iki farklı bilgisayar programı arasında veri transferinde kullanılırlar.

FemUP programının hedef fonksiyonu Şekil 2.95'te görüldüğü gibi deneysel ve teorik modellerin frekansları arasındaki farkların toplamı olarak tanımlanır. Optimizasyon analizi ile hedef fonksiyonunun minimum değerini verecek olan parametreler araştırılırken, modal vektörler arasındaki uyumun da sağlanması amacıyla oluşturulan sınırlandırma fonksiyonu Şekil 2.96'da görüldüğü gibidir. Sınırlandırma fonksiyonu sayesinde hedef fonksiyonunun minimum değeri, bu fonksiyonunun çizdiği sınırlar içerisinde belirlenen şartları sağlayarak bulunacaktır. Şekil 2.96'da görülen sınırlandırma fonksiyonu, kullanıcı tarafından her bir mod için sağlanması istenen MAC limiti ile deneysel ve teorik modellerin mod şekilleri arasındaki uyumu gösteren MAC değerleri arasındaki farklardan meydana gelen bir vektör üretir. Optimizasyonun başarılı bir şekilde sonlandırılabilmesi için üretilen bu vektörün her bir elemanının sıfır değerinden küçük veya eşit olması gerekmektedir. Yani her bir mod için MAC limitinin üzerinde bir uyumun sağlanmış

olması gerekmektedir. Bu sınırlandırma, nonlinear eşitsizlik sınırlandırması olarak adlandırılır.



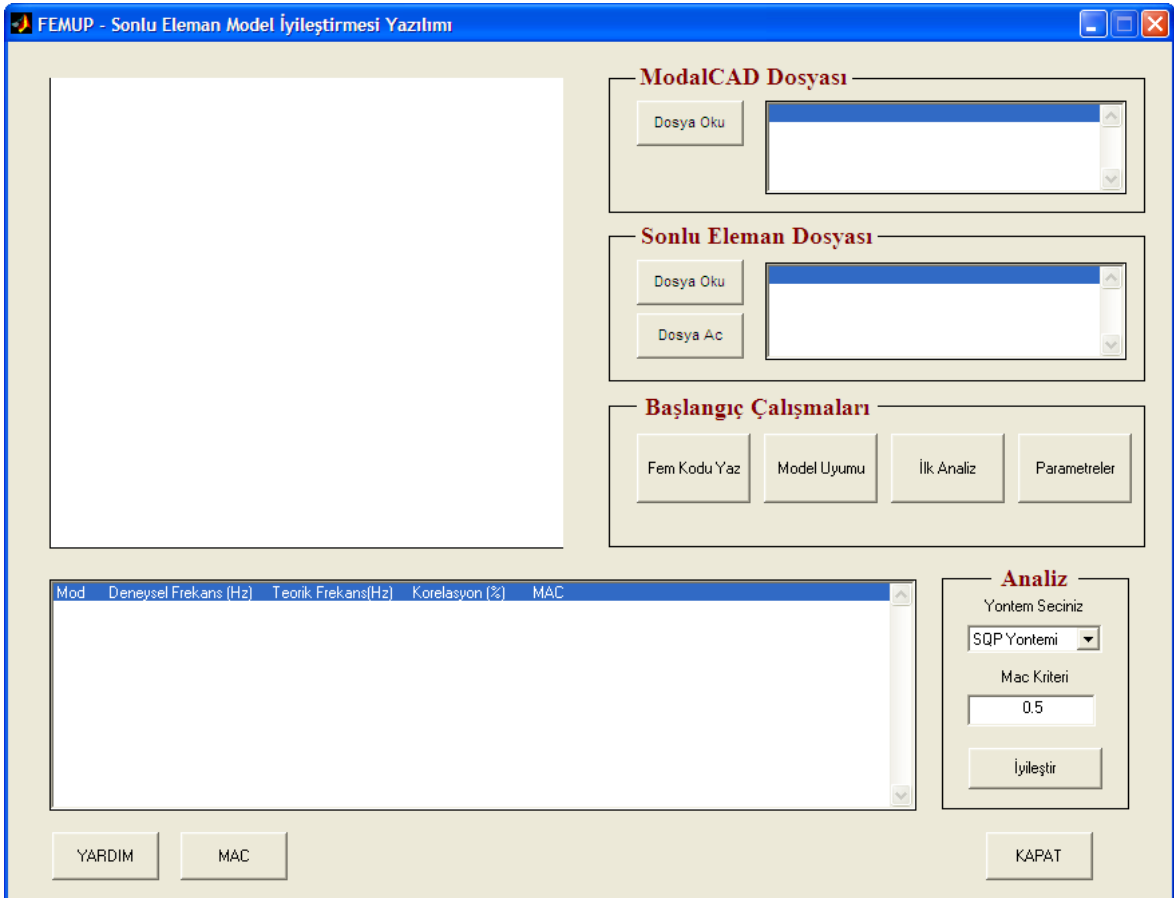
Şekil 2.95. FemUP programı optimizasyon algoritmasının hedef fonksiyonu akış diyagramı



Şekil 2.96. FemUP programı optimizasyon algoritmasının sınırlandırma fonksiyonu akış diyagramı

FemUP programı içerisinde yer alan hedef ve sınırlandırma fonksiyonları, model iyileştirmede yakınsama olana kadar her döngü içerisinde yeniden çağrılırlar. Her çağrıldıklarında, parametreleri güncellerler, ANSYS programı ile güncellenen modeli yeniden analiz ederler ve sonuçları kaydederler. Teorik ve deneysel sonuçlar her aşamada tekrar karşılaştırılır, yakınsama olmamış ise aynı işlemler tekrar tekrar devam eder. Burada hedef ve sınırlandırma fonksiyonları güncellenirken, başlangıçta verilen alt ve üst sınırlar tarafından çizilen limitler aşılmamaktadır. Böylelikle, mühendis tarafından belirlenen anlamlı sınırların dışına çıkılma ihtimali ortadan kalkar. Belirlenen iyileştirilmiş sonlu eleman modeli anlamlı sınırlar içerisinde kalır.

FemUP programı bir ana pencere üzerine kurulmuştur Şekil 2.97'de görüldüğü gibi 6 ana bölüme ayrılmıştır. Bunlar, deneysel modelin sisteme tanıtılma alanı (ModalCAD programı ile uyumludur), teorik modelin sisteme tanıtılma alanı (ANSYS programı ile uyumludur), başlangıç analizleri ve iyileştirme parametrelerinin seçilmesi bölümü, modeller arası korelasyonun gösterim tablosu, MAC grafik eksenini ve analiz bölümleridir.

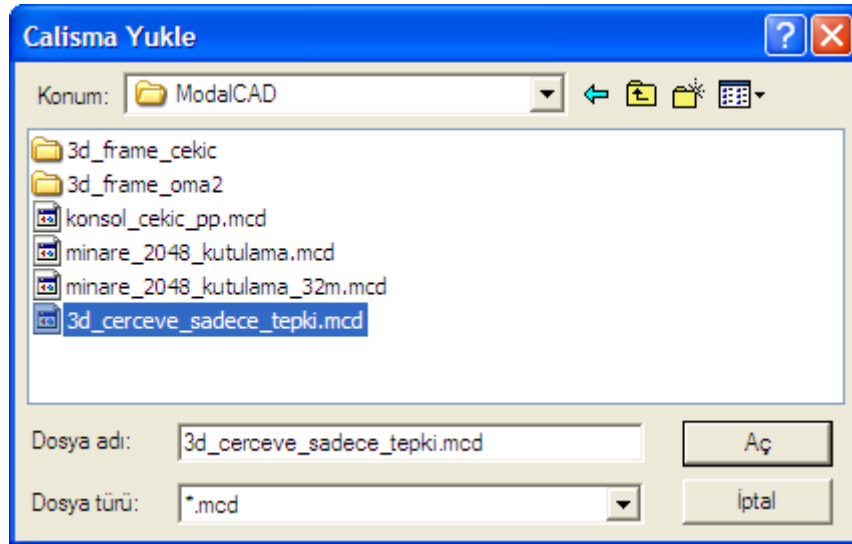


Şekil 2.97. FemUP programı ana ekranı

2.2.3.1. FemUP Programı ile Optimum Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

2.2.3.1.1. Deneysel Modelin Sisteme Yüklenmesi

FemUP programı ile optimum sonlu eleman model iyileştirilmesi yapmak için ilk yapılması gereken, deneysel modelin sisteme tanıtılmasıdır. ModalCAD programı ile dinamik karakteristikler belirlendikten sonra mcd uzantılı olarak kaydedilirler. Burada yapılması gereken “ModalCAD Dosyası” başlıklı bölümde “Dosya Yükle” yazan düğmeyi tıklayarak Şekil 2.98’de görüldüğü gibi açılan pencereden ModalCAD analiz dosyasını seçmektir.



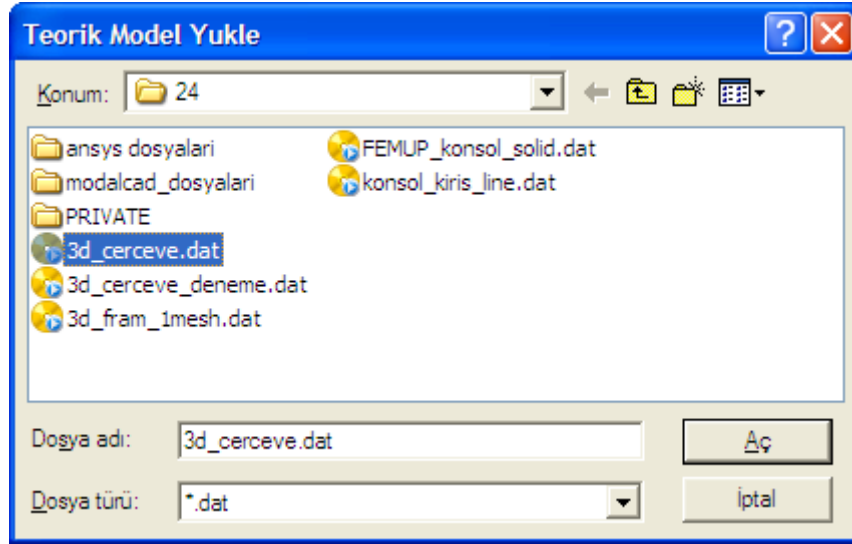
Şekil 2.98. FemUP programına ModalCAD dosyasının yüklenmesi penceresi

Deneysel model sisteme yüklendikten sonra, “ModalCAD Dosyası” başlıklı bölümde yer alan ekranda deneysel model dosyasının adresi görülmektedir. Buradan, dosyanın yerinin kontrolü yapılabilir, ayrıca eğer yanlış dosya adreslenmiş ise “Dosya Yükle” düğmesine yeniden tıklanarak, farklı dosyalar sisteme yüklenebilirler.

2.2.3.1.2. Teorik Modelin Sisteme Yüklenmesi

Deneysel model sisteme tanıtıldıktan sonra sıra teorik modelin sisteme tanıtılmasına gelir. “Sonlu Eleman Dosyası” başlıklı bölümde yer alan düğmelerden “Dosya Yükle”

yazan düğmeye tıklanması ile Şekil 2.99’da görüldüğü gibi bir pencere açılır. Bu pencereden, deney yapılan sistemin ANSYS programında oluşturulmuş olan sonlu eleman modelinin, APDL (ANSYS Parametric Design Language) diline ait kodlarının bulunduğu kayıt dosyası seçilir. Bu dosya seçilerek onaylanırsa, sonlu eleman model dosyası da sisteme yüklenmiş olur.



Şekil 2.99. FemUP programına ANSYS dosyasının yüklenmesi penceresi

Teorik model sisteme yüklendikten sonra, “Sonlu Eleman Dosyası” başlıklı bölümde yer alan ekranda, teorik model dosyasının adresi görülmektedir. Buradan, dosyanın yerinin kontrolü yapılabilir. Ayrıca eğer yanlış dosya adreslenmiş ise “Dosya Yükle” düğmesi yeniden tıklanarak, farklı dosyalar sisteme yüklenebilirler.

Sisteme yüklenmiş olan ANSYS veri dosyası, “Sonlu Eleman Dosyası” başlıklı bölümde yer alan ekranda “Dosya Aç” yazan düğmeye tıklanarak açılabilir ve burada kaynak dosya üzerinde yapılması gerekli olan düzeltmeler yapılarak kaydedilebilir.

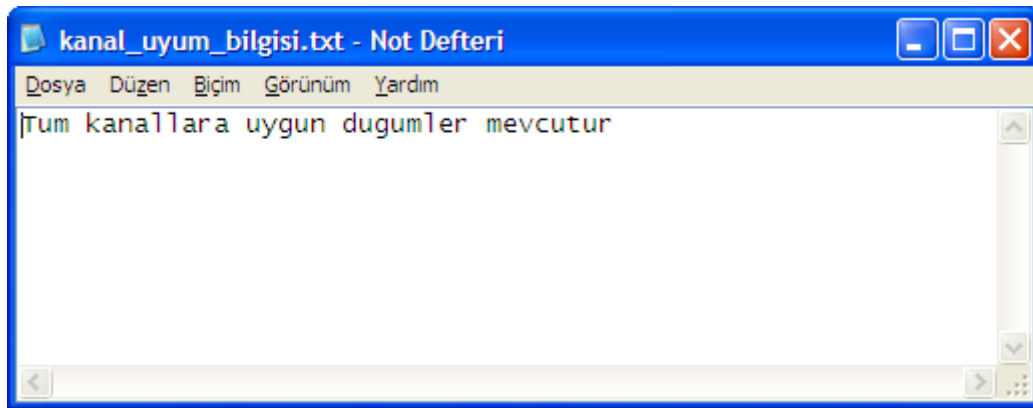
ANSYS dosyasının sisteme tanıtılması, model iyileştirmede kullanılması için yeterli değildir. Sisteme yüklenen ANSYS veri dosyası, MATLAB ile etkileşimli hale getirilmeli, ayrıca içerisinde yaptığı analiz sonucunda ürettiği frekans değerleri ile modal matrisleri sistem dışında dosyalar içerisinde kaydetmelidir. Bunun yanında deneysel ölçüm sırasında ivmeölçerlerin yerleştirildiği noktalara karşılık gelen düğüm noktalarını sonlu eleman modeli içerisinde tespit ederek, ayrı bir dosyaya yazmalıdır. Bütün bunların yapılmasını sağlayacak olan APDL kodları, FemUP programı tarafından bu veri dosyasının içerisine,

başlangıçtaki yapısını muhafaza ederek yerleştirilir. Bu iş için FemUP ana ekranındaki “Başlangıç Çalışmaları” başlıklı bölümde yer alan “FEM Kodu Yaz” isimli düğmeye tıklanır ve böylece model iyileştirmeye uygun ANSYS kodu üretilmiş olur.

2.2.3.1.3. Deneysel ve Teorik Modeller Arasındaki Uyumun İncelenmesi

Teorik ve deneysel modeller sisteme tanıtıldıktan sonra, hemen model iyileştirme aşamasına geçilmez. Modeller arasında dinamik davranışlar açısından bir uyumun olup olmadığının kontrol edilebilmesi için, öncelikle modellerin geometrisinde bir uyum olmalıdır. Gerçek yapı modeline uygun olmayan teorik modeller analizde kabul edilemezler. Bunun yanında model doğru üretilmiş olabilir, ancak yapılan sonlu eleman ağı sonucunda oluşturulan düğüm noktaları, deney sırasında ölçümlerin alındığı bazı kanalların koordinatlarına karşılık gelmeyebilir. Böyle bir durumda zaten sağlıklı bir tarama yapılmasından söz edilemez.

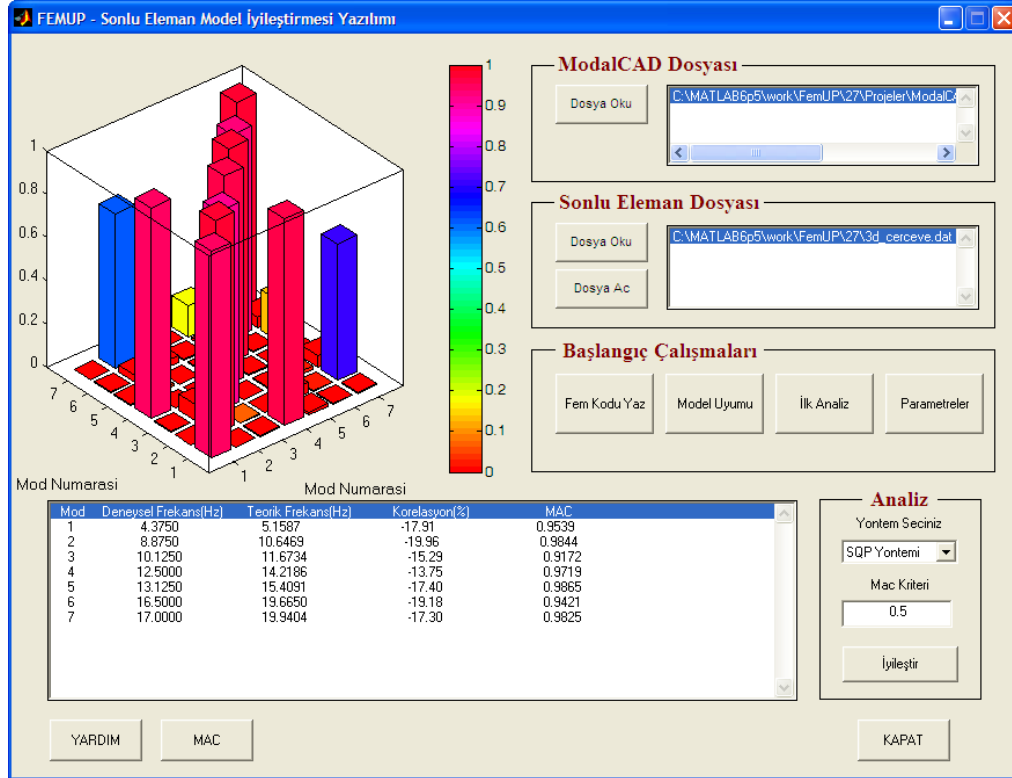
Bu sebeple FemUP programında model uyumunu denetleyen fonksiyonlar yazılmıştır. FemUP programı ana ekranında “Başlangıç Çalışmaları” başlıklı bölümde yer alan “Model Uyum” isimli düğmeye tıkladığı zaman, deneysel ve teorik modellerin geometri ve kanalların konumu açısından kontrolü yapılır. Bu kontrolün sonucunda açılan not defterinde Şekil 2.100’de görüldüğü gibi “Tüm kanallara uygun düğümler mevcuttur” yazısı görüldüğü zaman modellerin uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Modeller arasında uyum olduğu tespit edildikten sonra model iyileştirme aşamalarına devam edilir.



Şekil 2.100. Model uyum kontrolü sonrası verilen rapor

2.2.3.1.4. Deneysel ve Teorik Modellerin Başlangıç Korelasyon Analizi

FemUP ana ekranında “Başlangıç Çalışmaları” başlıklı bölümde yer alan “İlk Analiz” isimli düğmeye basılarak teorik ve deneysel modellerin dinamik karakteristikleri arasındaki uyum Şekil 2.101’de görüldüğü gibi belirlenir.



Şekil 2.101. FemUP programı ile deneysel ve teorik modellerin korelasyon analizi

Analiz sonuçları incelendiğinde, MAC grafiğinde uyum görülmekle beraber, frekanslar arasında önemli farklılıklar görülmektedir. MAC değerlerinin tamamı 0.9 değerinden büyüktür. Ancak doğal frekanslar arasındaki farklar oldukça büyük değerlere ulaşmaktadır. Buradan sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

2.2.3.1.5. İyileştirme Parametrelerinin Belirlenmesi

FemUP ana ekranında “Başlangıç Çalışmaları” başlıklı bölümde yer alan “Parametreler” isimli düğmeye basılarak iyileştirme yapılacak parametrelerin alt ve üst limitleri belirlenir ve hangi parametrelerin optimizasyon algoritmasına dahil edileceğine

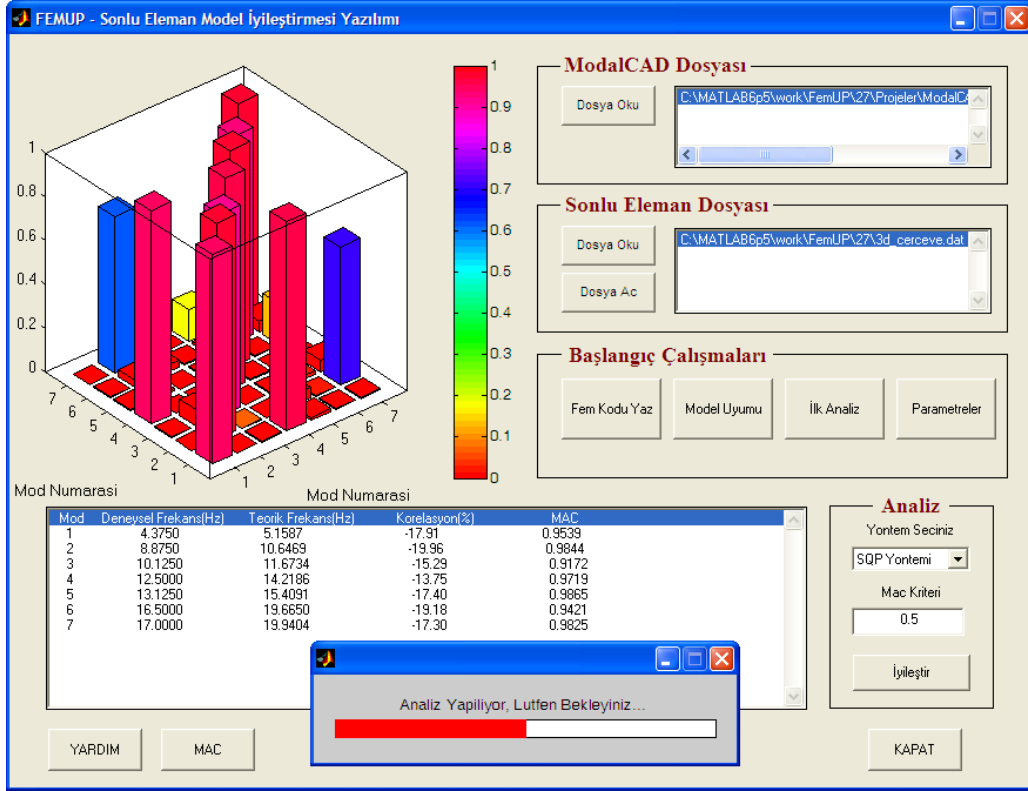
karar verilir. Mevcut model için belirsiz parametreler olarak malzeme özelliklerinin optimizasyon algoritmasına katılması yeterli görülmektedir. Şekil 2.102’de modelin iyileştirme analiz parametrelerinin seçim penceresi görülmektedir. Burada malzeme parametrelerinin alt ve üst limitleri belirlenir ve optimizasyon çalışması sırasında hedef fonksiyonunun minimum değeri bu sınırlar içerisinde aranır.

Malzeme Turu	Değeri	Alt Sınır	Üst Sınır	Optimizasyon Durumu
EX	2.75e11	0	inf	<input checked="" type="checkbox"/> Ekle / Çıkart
PRXY	0.3	0	inf	<input checked="" type="checkbox"/> Ekle / Çıkart
DENS	7800	0	inf	<input checked="" type="checkbox"/> Ekle / Çıkart
				<input type="checkbox"/> Ekle / Çıkart
				<input type="checkbox"/> Ekle / Çıkart
				<input type="checkbox"/> Ekle / Çıkart

Şekil 2.102. Sonlu eleman model iyileştirme analizi için optimizasyon parametrelerinin seçim penceresi

2.2.3.1.6. Sonlu Eleman Model İyileştirme Analizi

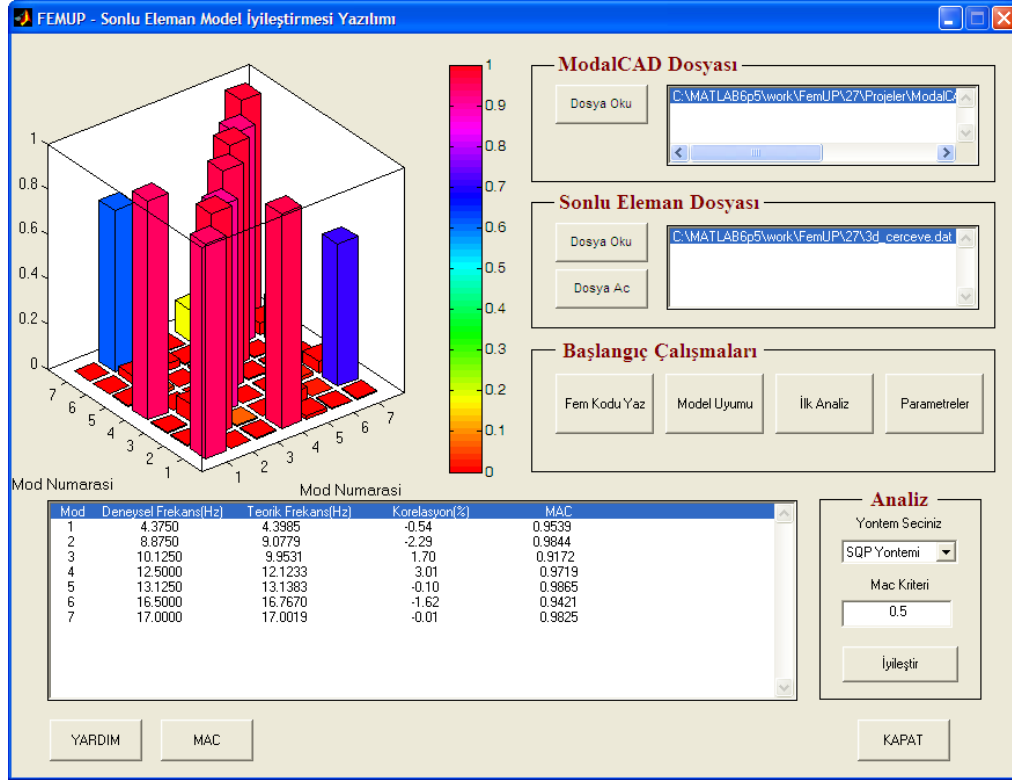
Başlangıç değerlendirmeleri ve hazırlıkları yapıldıktan sonra geriye analizin yapılması kalır. Analize başlamadan önce, “Analiz” başlıklı bölümde analizde kullanılacak algoritma ile sınırlandırma fonksiyonunda kullanılacak olan MAC limiti belirlenmelidir. Burada, sadece SQP algoritması programa yüklenmiş olduğundan başka seçenek sunulmamaktadır. MAC limiti olarak ta 0.5 yazıp, “Model İyileştir” düğmesine basılırsa, Şekil 2.103’de görüldüğü gibi analiz başlar.



Şekil 2.103. Model iyileştirme analiz ekranı

Optimizasyon analizi tamamlandıktan sonra, FemUP programının ana ekranı Şekil 2.104'de görüldüğü gibi olur. Optimizasyondan sonra frekanslar hemen hemen birbirleri ile aynı seviyeye getirilmiştir. En yüksek fark % 2.29 gibi düşük bir rakamdır. MAC değerlerinde ise sadece malzeme özelliklerindeki değişim dikkate alındığından dolayı başlangıçta elde edilen değerlere göre herhangi bir değişiklik görülmemiştir.

MAC grafiği incelendiği zaman, ModalCAD programında çizilen MAC grafiğinde olduğu gibi birinci mod ve dördüncü mod sanki aynıymış gibi bir sonuç görülmektedir. Bu modlarda son katta hareket yakın olmasına rağmen, ara katta tam tersi hareket vardır. Veri toplama ünitesindeki kanal sayısı sınırlamasından dolayı sadece üst kattan ölçüm alınmış olduğu için bu görüntü problemi oluşmaktadır. Ancak bunun sonuçlara hiçbir etkisi yoktur. Burada MAC değerlerinin sadece diyagonal değerleri optimizasyonda dikkate alınmaktadır. Model iyileştirmeden sonra elde edilmiş olan model özellikleri program tarafından dosyaya kaydedilir.



Şekil 2.104. Model iyileştirme tamamlandıktan sonra FemUP ana ekranı

2.3. Geliştirilen Bilgisayar Programlarının Kontrolü

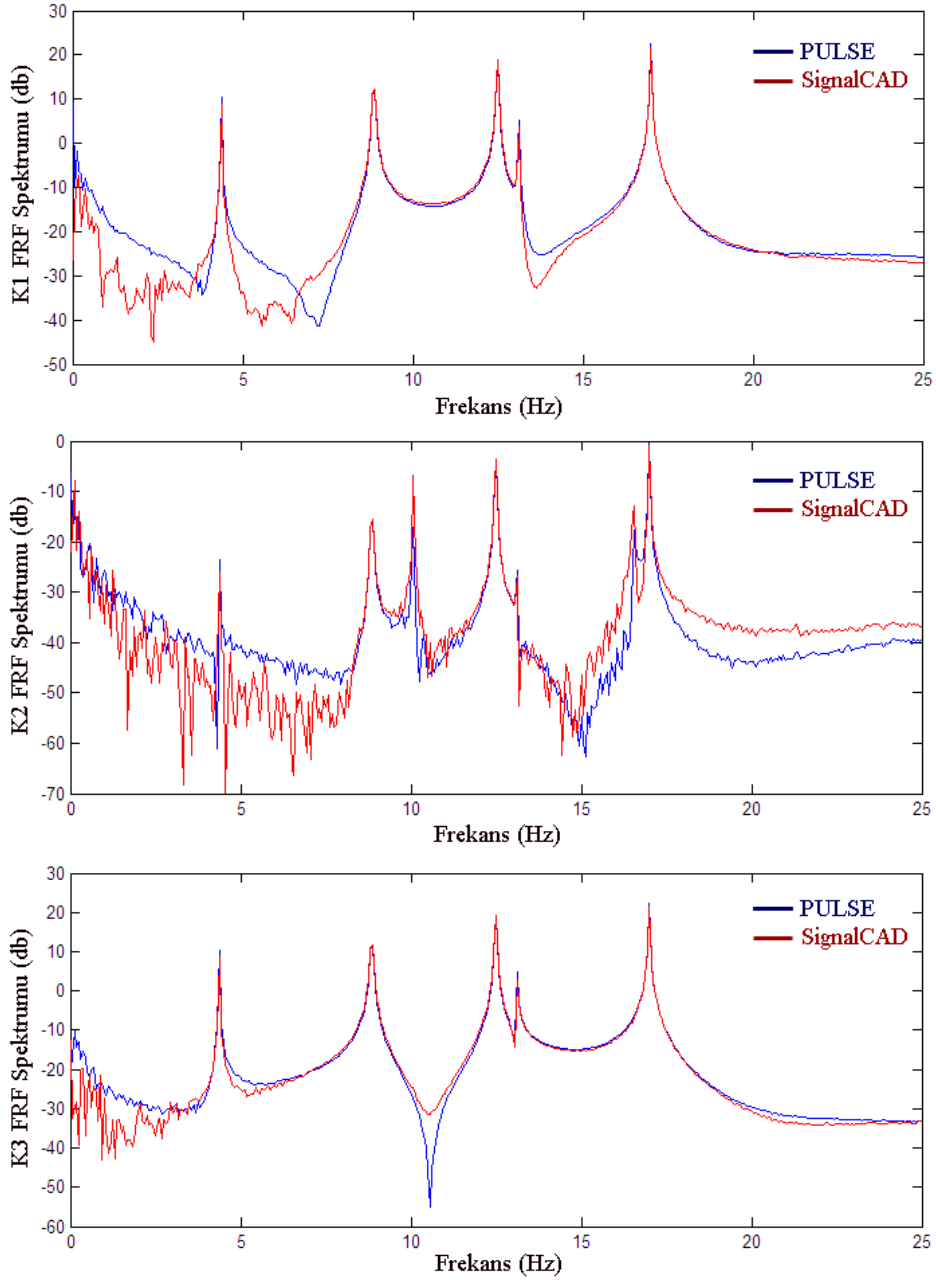
Deneysel ve operasyonel modal analiz için sinyallerin toplanması ve analizi amacıyla PULSE (2006) ve operasyonel modal analiz ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla OMA (2006) programları çalışma grubumuzda bulunmaktadır. Bu bölümde, PULSE ve OMA programları kullanılarak üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri sonucunda elde edilmiş olan verilerin analiz sonuçları değerlendirilecektir.

2.3.1. SignalCAD Programı ile PULSE Programı Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

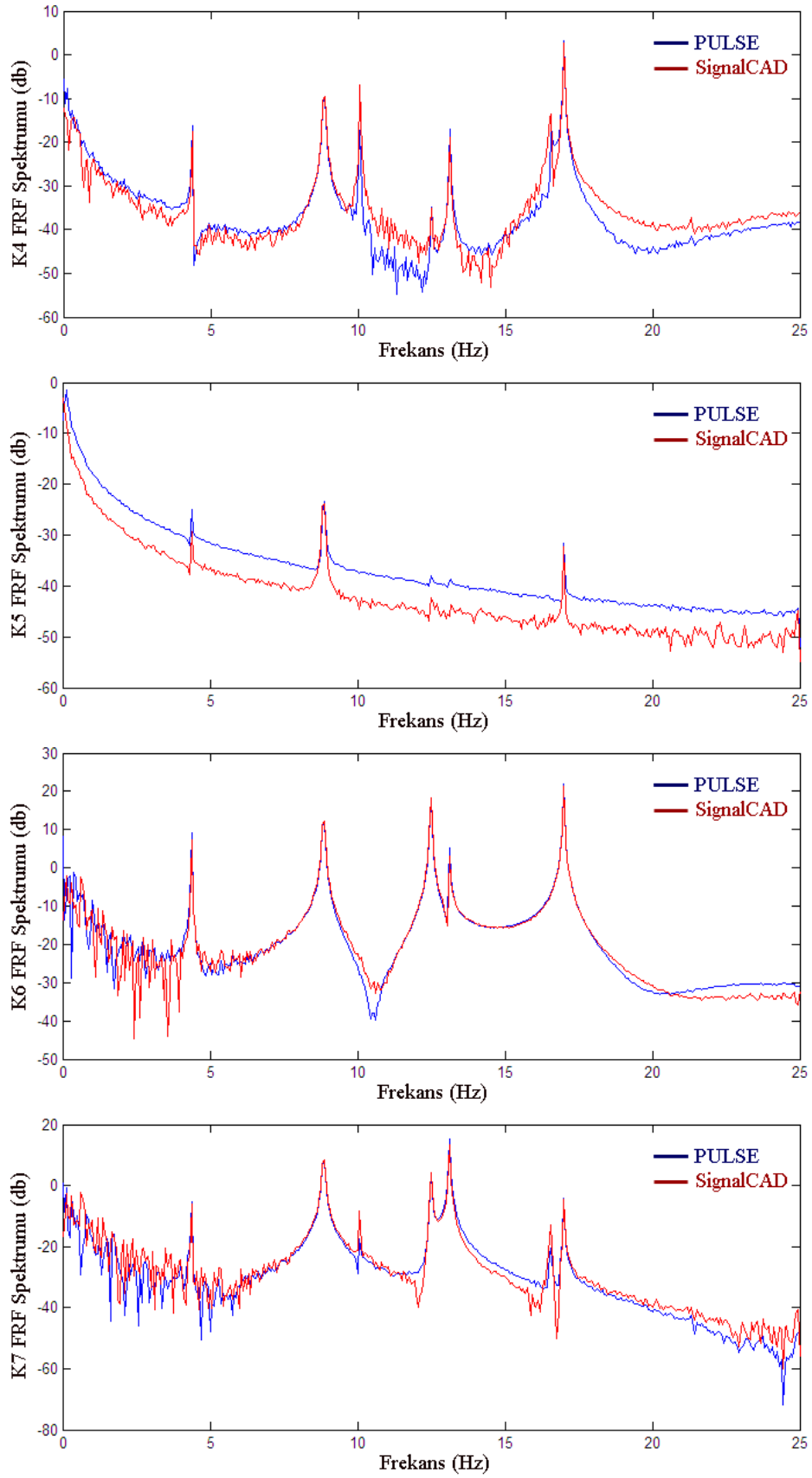
2.3.1.1. Çerçeve Modelinin Zorlanmış Titreşim Verilerinin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinden elde edilen sinyallerin SignalCAD ve PULSE programları ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen frekans davranış fonksiyonları şekil 2.105-2.109'da görüldüğü gibidir. Buradaki grafikler

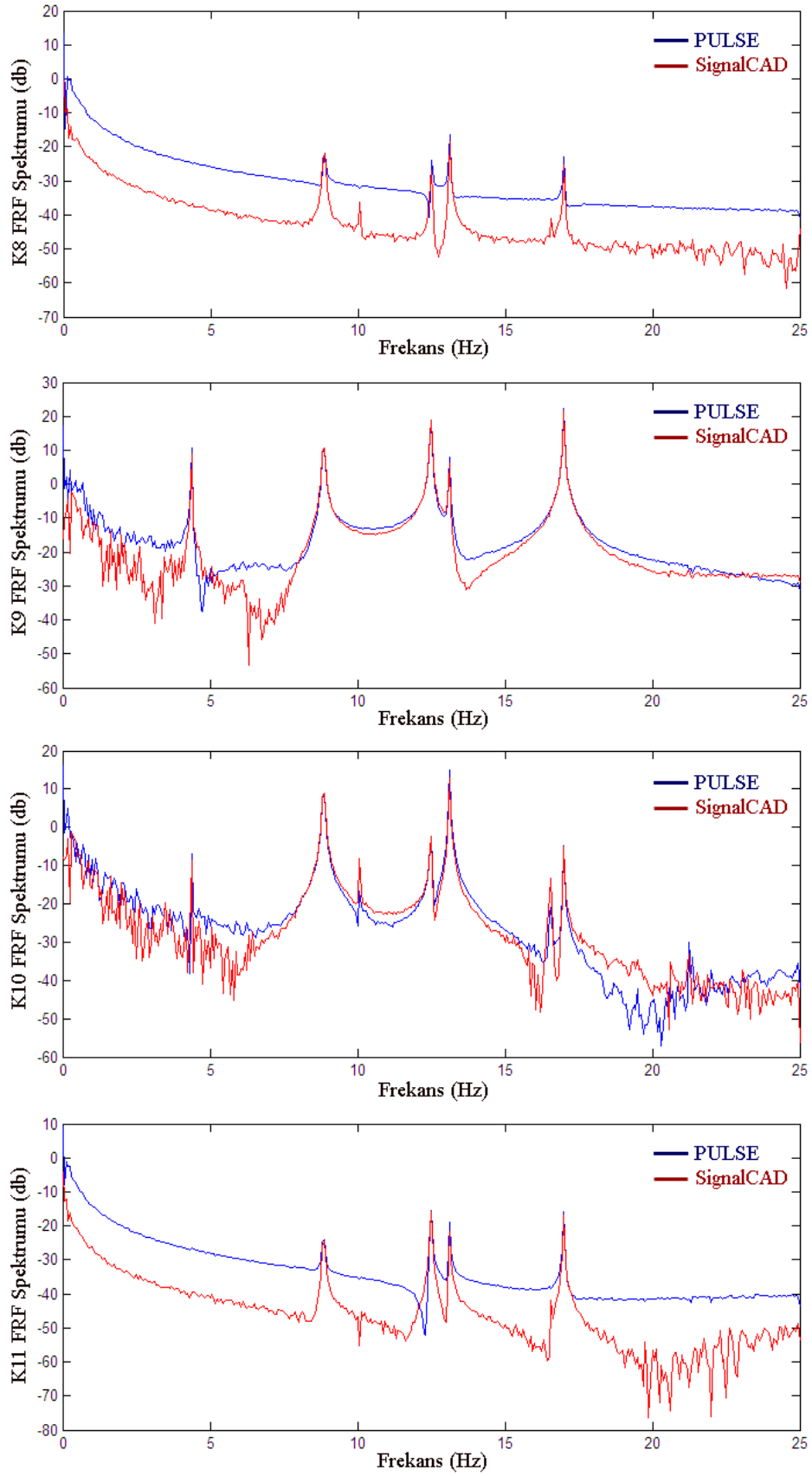
incelendiğinde SignalCAD programı kullanılarak elde edilen FRF grafikleri ile PULSE programı kullanılarak elde edilen FRF grafiklerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



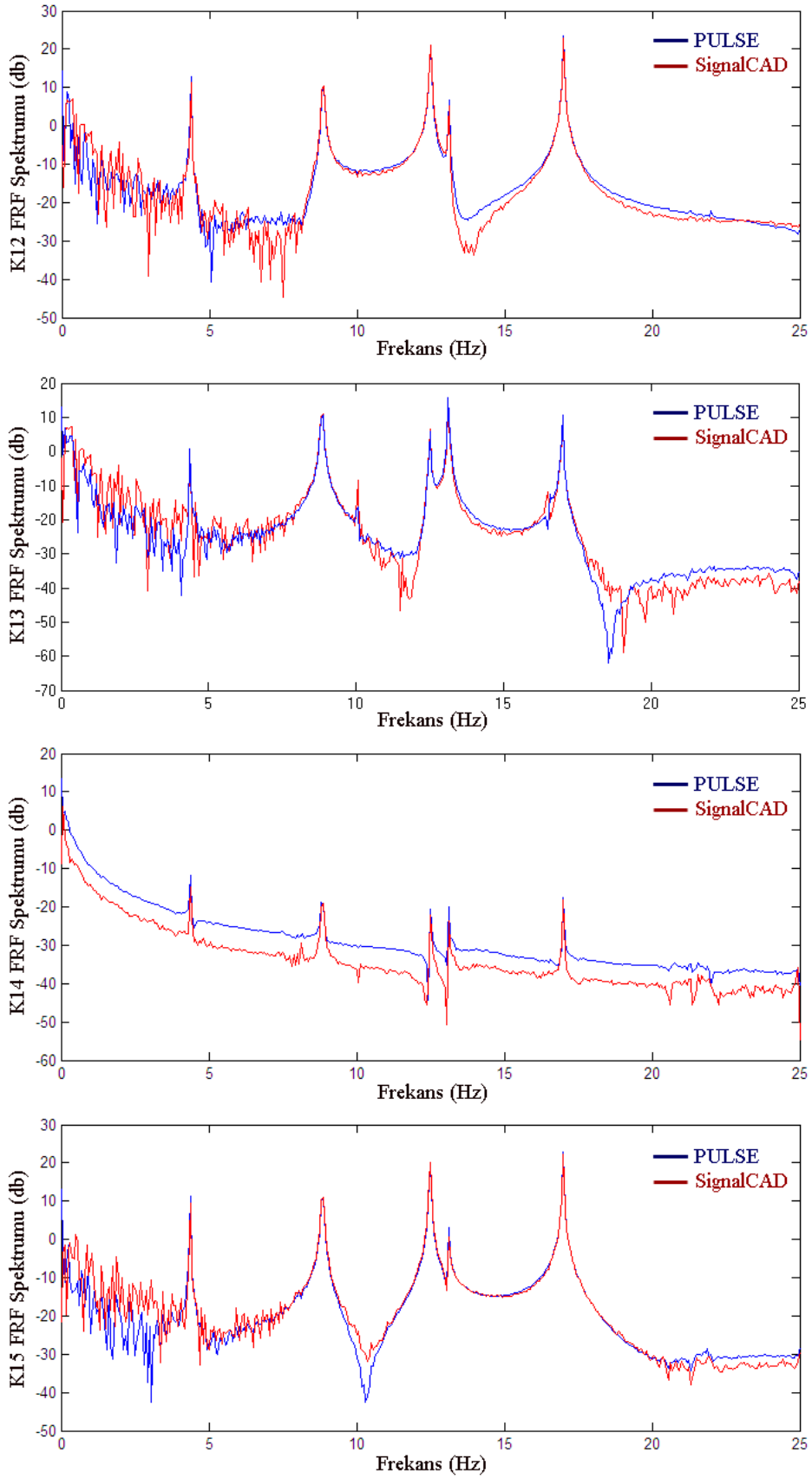
Şekil 2.105. Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 1., 2. ve 3. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri



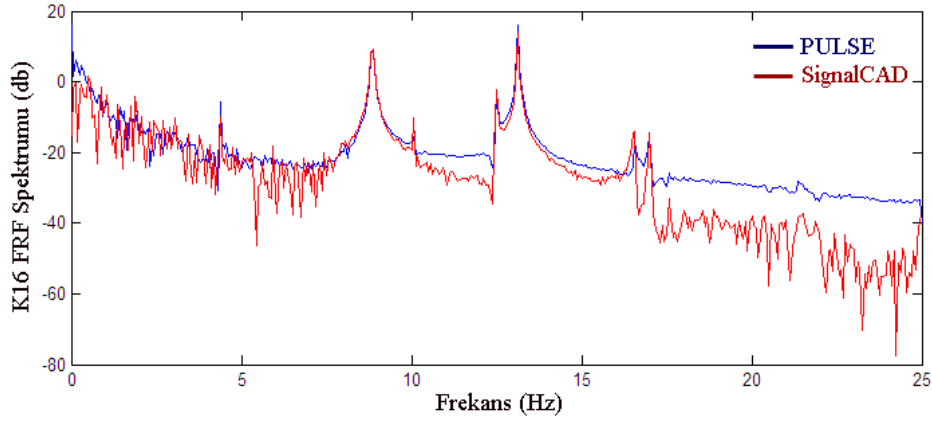
Şekil 2.106. Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 4., 5., 6. ve 7. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri



Şekil 2.107. Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 8., 9., 10. ve 11. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri



Şekil 2.108. Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 12., 13., 14. ve 15. tepki kanalları için bulunan FRF grafikleri

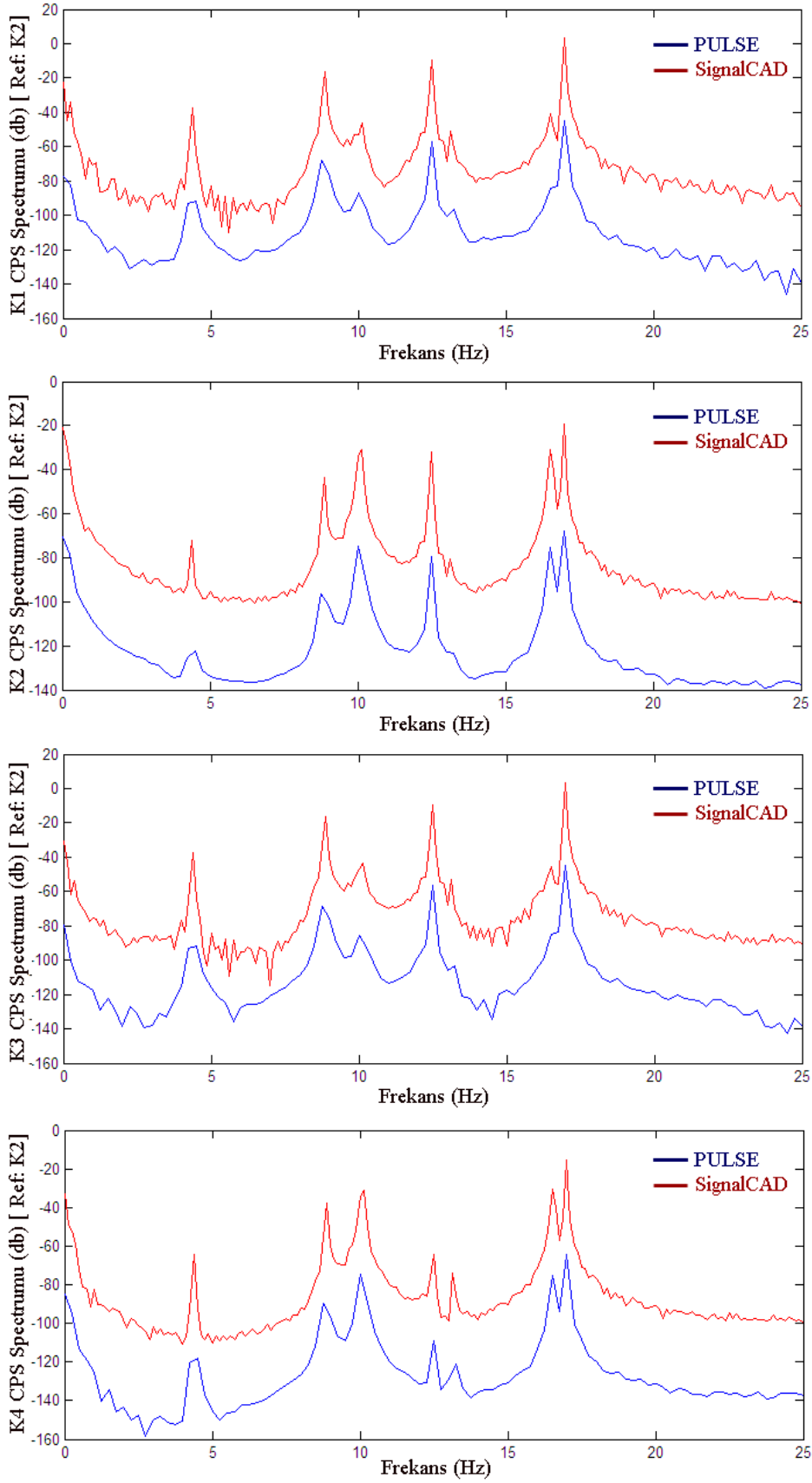


Şekil 2.109. Zorlanmış titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 16. tepki kanalı için bulunan FRF grafikleri

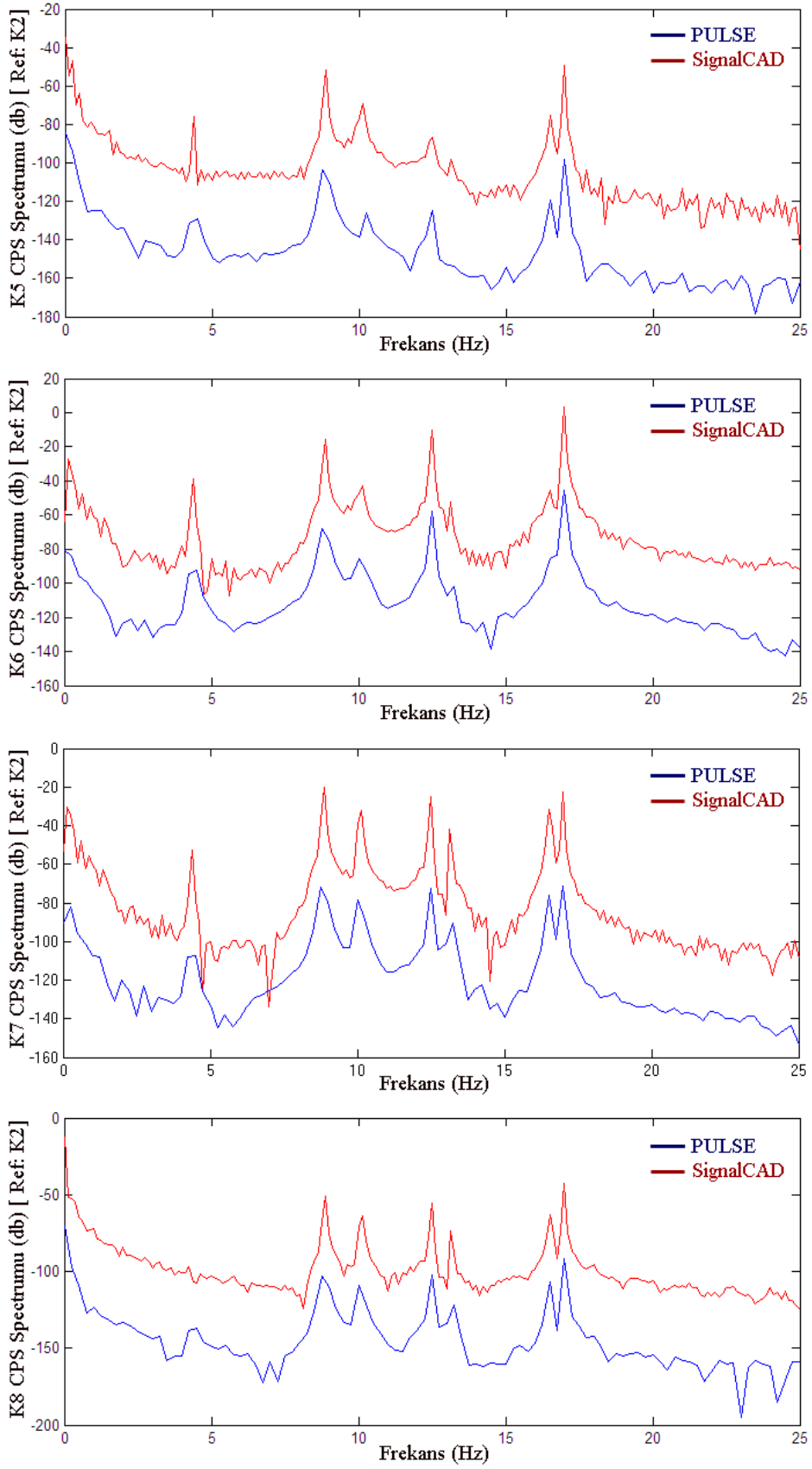
2.3.1.2. Çerçeve Modelinin Çevresel Titreşim Verilerinin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinden elde edilen sinyallerin SignalCAD ve PULSE programları ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen çaprazgüç spektrumları şekil 2.110-2.113’de görüldüğü gibidir. Buradaki grafikler incelendiğinde SignalCAD programı kullanılarak elde edilen CPS grafikleri ile PULSE programı kullanılarak elde edilen CPS grafiklerinin davranışlarının aynı olduğu fakat değer olarak iki spektrum grubu arasında sabit bir farkın olduğu görülmektedir. Burada spektrumlar arasında farkın sabit olmasından ve spektrumların davranışı aynı görüldüğünden, bu spektrumlar kullanılarak hesaplanan dinamik karakteristiklerin yaklaşık olarak aynı sonuçları vermesi beklenmektedir. Spektrumlar incelendiğinde, tepe noktalarının aynı frekanslar üzerinde olduğu görülmektedir. Bunun yanında, mod şekillerinin hesabında spektrumlar arasındaki rölatif ilişki göz önüne alındığından, spektrumlarda meydana gelen toplu öteleme hareketi sonuçları etkilemeyecektir.

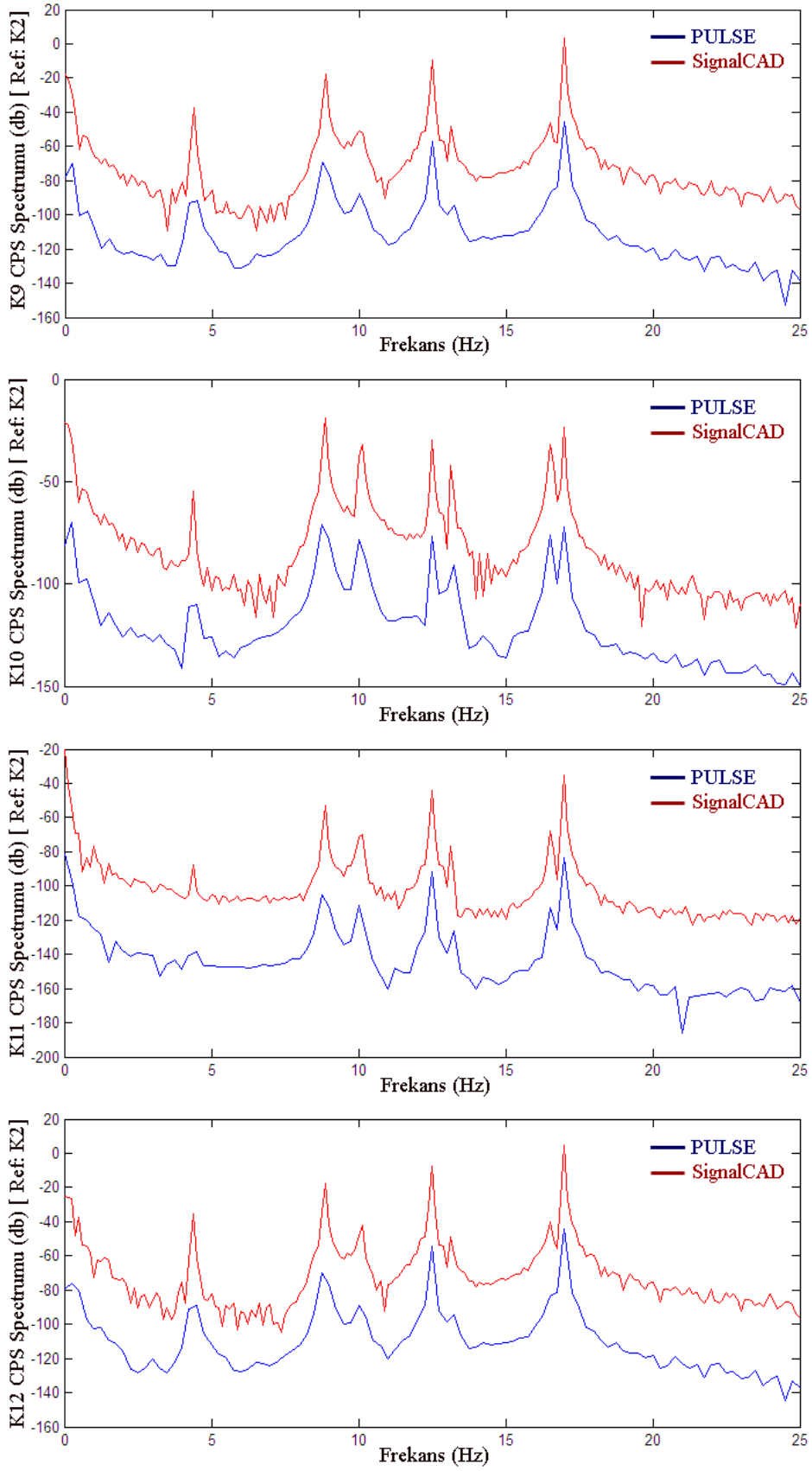
SignalCAD programı ile filtreleme seçenekleri bilinmekle beraber PULSE programında sinyal kümeleri içerisinde yer alan sinyallerden hangilerinin filtrelemeye takıldığı ve bunun sebepleri konusunda bilgi alınamamaktadır. Spektrum grupları arasında görülen öteleme farkının muhtemel sebepleri arasında bu filtreleme sonuçlarında görülen farklılıkların olduğu düşünülmektedir. Ancak, az öncede bahsedildiği gibi bu farklılıklar sonuçları etkilemeyeceğinden kabul edilir görülmektedir.



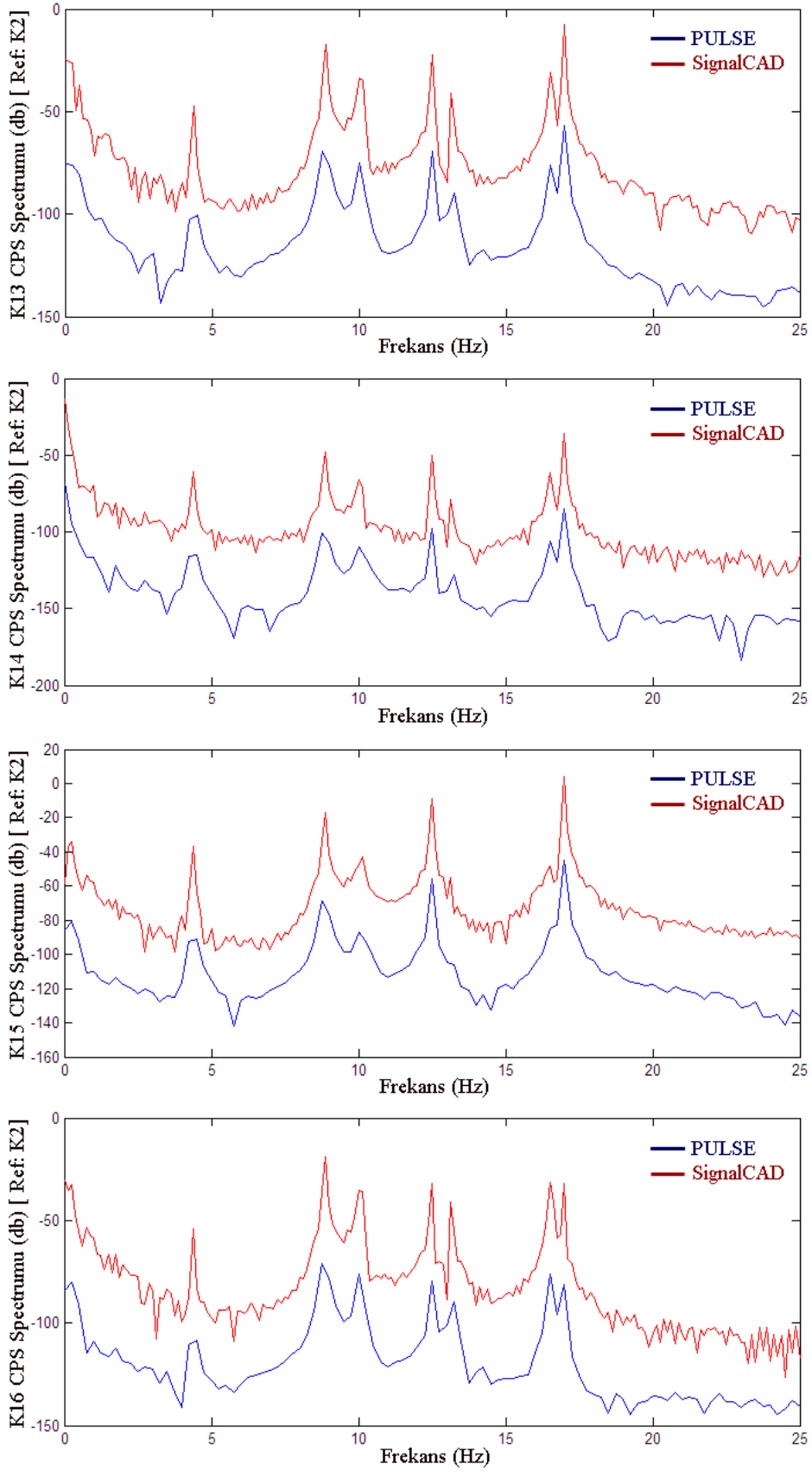
Şekil 2.110. Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 1., 2., 3. ve 4. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri



Şekil 2.111. Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 5., 6., 7. ve 8. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri



Şekil 2.112. Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 9., 10., 11. ve 12. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri



Şekil 2.113. Çevresel titreşim deneyine göre SignalCAD ve PULSE programları ile 13., 14., 15. ve 16. tepki kanalları için bulunan CPS grafikleri

2.3.2. ModalCAD Programı Analiz Sonuçlarının OMA Programı Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Etki tepki modal analizine göre dinamik karakteristiklerin belirlenmesi konusunda gerekli program çalışma grubumuzda bulunmadığından, zorlanmış titreşim deney sonuçlarına bağlı olarak frekans, sönüm oranı ve mod şekillerinin karşılaştırmaları konusunda bir sonuç verilememiştir. Bu bölümde çevresel titreşim deneyi sonuçlarına göre belirlenen dinamik karakteristiklerin karşılaştırması yapılacaktır.

2.3.2.1. Çerçeve Modelinin Sadece Tepki Modal Analizine Göre Belirlenen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deney sonuçlarına bağlı operasyonel modal analizi için kullanılan OMA programında iki adet yöntem bulunmaktadır. Bunlar frekans ortamında çözüm yapan Geliştirilmiş Frekans Ortamlı Ayrıştırma Yöntemi (Enhanced Frequency Domain Decomposition – EFDD) ve Stokastik Altalan Tanımlama (Stochastic Subspace Identification – SSI) yöntemleridir. Bu yöntemlerde spektrum verisi olarak güç spektral yoğunlukları kullanılır.

ModalCAD programında kullanılan OV, CE ve PTD yöntemleri ile OMA programında kullanılan EFDD ve SSI yöntemleri kullanılarak belirlenen doğal frekanslar Tablo 2.2’de, sönüm oranları ise Tablo 2.3’de görüldüğü gibidir.

Tablo 2.2. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen doğal frekanslar

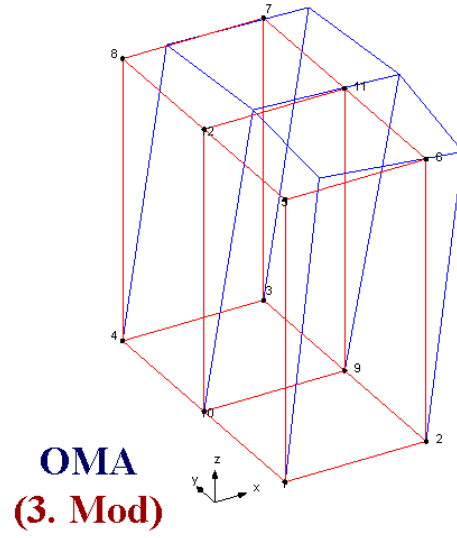
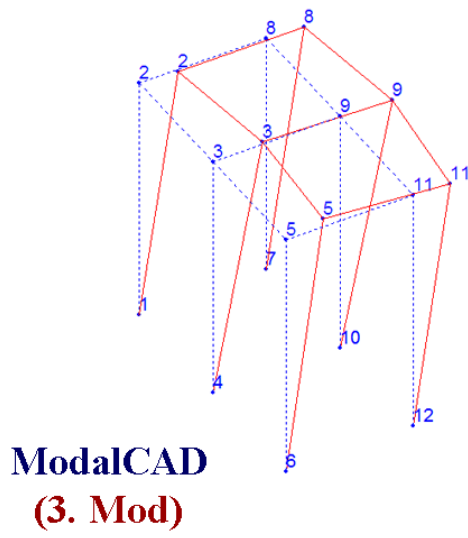
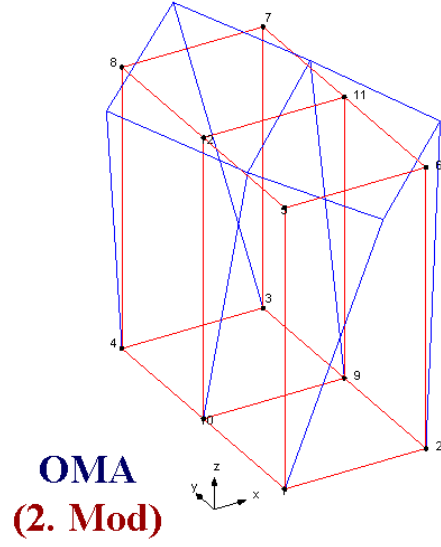
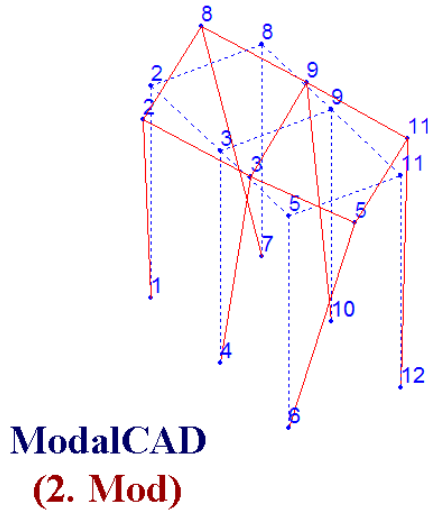
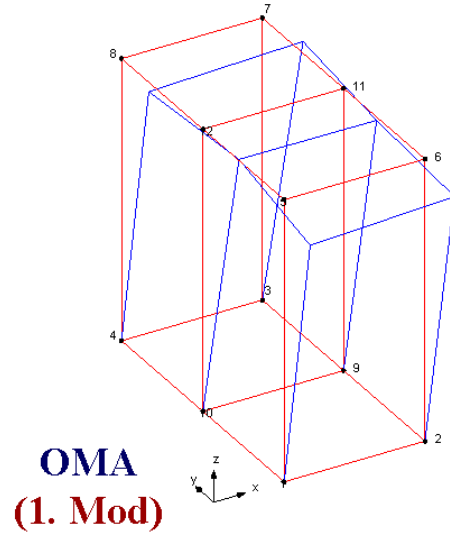
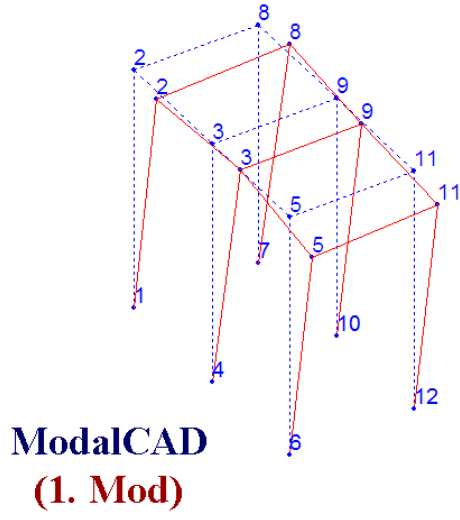
MOD NUMARASI	ModalCAD Frekanslar (Hz)			OMA Frekanslar (Hz)	
	OV	CE	PTD	EFDD	SSI
1	4.375	4.373	4.373	4.368	4.295
2	8.875	8.861	8.872	8.843	8.842
3	10.125	10.105	10.076	10.070	10.060
4	12.500	12.493	12.499	12.480	12.480
5	13.125	13.107	13.120	13.130	13.210
6	16.500	16.481	16.511	16.550	16.540
7	17.000	17.002	16.999	17.000	17.000

Tablo 2.3. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen sönüm oranları

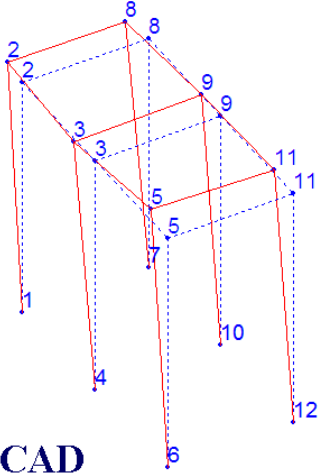
MOD NUMARASI	ModalCAD Sönüm Oranları (%)			OMA Sönüm Oranları (%)	
	OV	CE	PTD	EFDD	SSI
1	3.496	0.041	0.199	0.414	4.317
2	1.845	0.096	0.262	0.187	0.047
3	3.304	0.371	0.847	0.204	0.055
4	1.237	0.127	0.084	0.139	0.040
5	1.266	0.031	0.193	0.184	4.818
6	1.149	0.105	0.225	0.104	0.044
7	0.885	0.057	0.036	0.104	0.037

Tablo 2.2 incelendiğinde belirlenen doğal frekansların ModalCAD ile OMA programlarında yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Tablo 2.3’de görülen sönüm oranları incelendiğinde ise sönüm oranlarının ModalCAD programında yöntemler arasında fark gösterdiği gibi, OMA programında da kullanılan yöntemler arasında farklı sonuçlar aldığı görülmektedir.

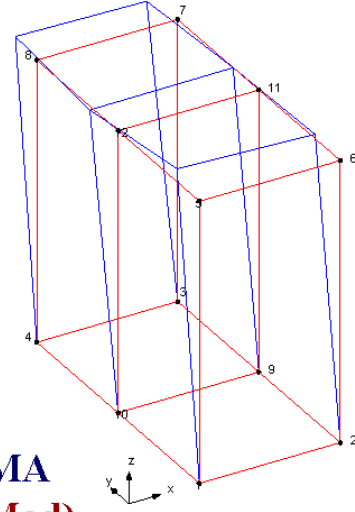
ModalCAD programı kullanılarak hesaplanan mod şekilleri ile OMA programı kullanılarak hesaplanan mod şekilleri, Şekil 2.114-2.116’da görüldüğü gibi karşılaştırılmaktadırlar. Programlar içerisindeki yöntemlerden yaklaşık olarak aynı mod şekilleri alındığından, ModalCAD programında İşletim vektörleri Yöntemi’nden elde edilen mod şekilleri ile OMA programında Stokastik Altalan Tanımlama Yöntemi’nden elde edilen mod şekilleri karşılaştırma için kullanılmıştır. Şekiller incelendiğinde, ModalCAD ve OMA programları ile elde edilen mod şekilleri arasında tam bir uyum olduğu görülmektedir.



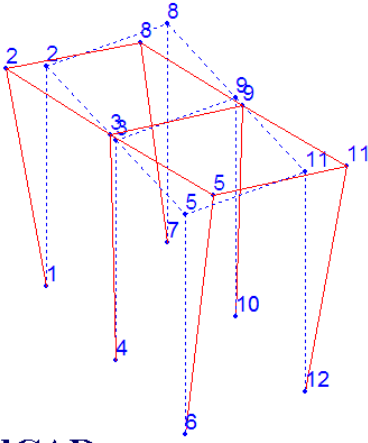
Şekil 2.114. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen 1., 2. ve 3. mod şekilleri



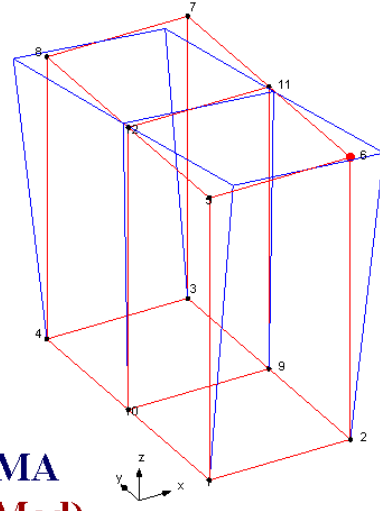
ModalCAD
(4. Mod)



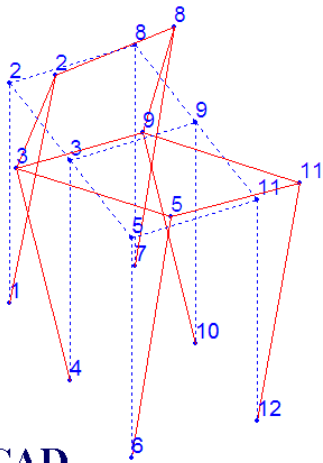
OMA
(4. Mod)



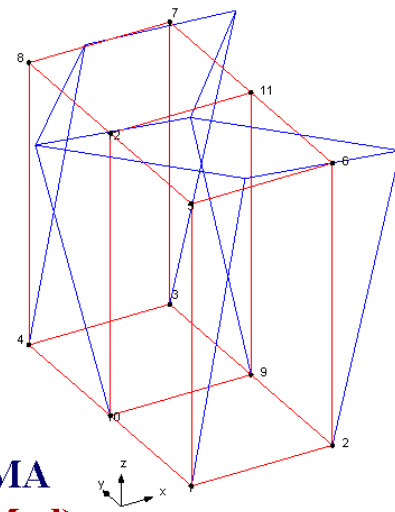
ModalCAD
(5. Mod)



OMA
(5. Mod)

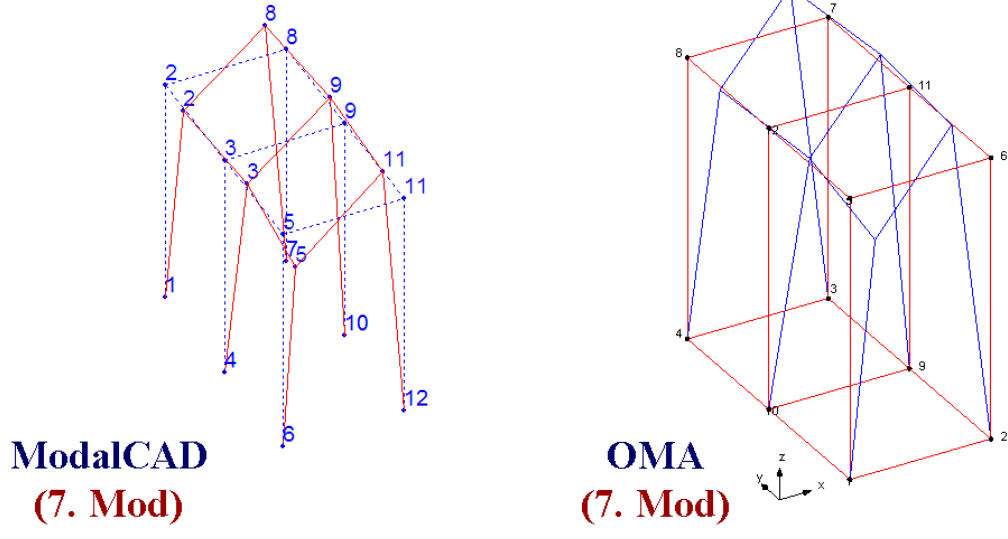


ModalCAD
(6. Mod)



OMA
(6. Mod)

Şekil 2.115. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen 4., 5. ve 6. mod şekilleri



Şekil 2.116. ModalCAD ve OMA programları ile belirlenen 7. mod şekilleri

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Geliştirilen Bilgisayar Programlarının Laboratuvar Modeline Uygulanması

Laboratuvarında oluşturulmuş üç boyutlu çerçeve modeline zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri uygulanmış ve bu deneylerden elde edilen veriler, geliştirilmiş olan bilgisayar programları ile analiz edilmişlerdir. Bu bölümde zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri sonucunda elde edilen sinyaller kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları detaylı olarak sunulmaktadır. Modelin sırasıyla sayısal sinyal işleme, sistem tanımlama, sonlu eleman analizi ve sonlu eleman model iyileştirme analizleri yapılmıştır.

3.1.1. Modelin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

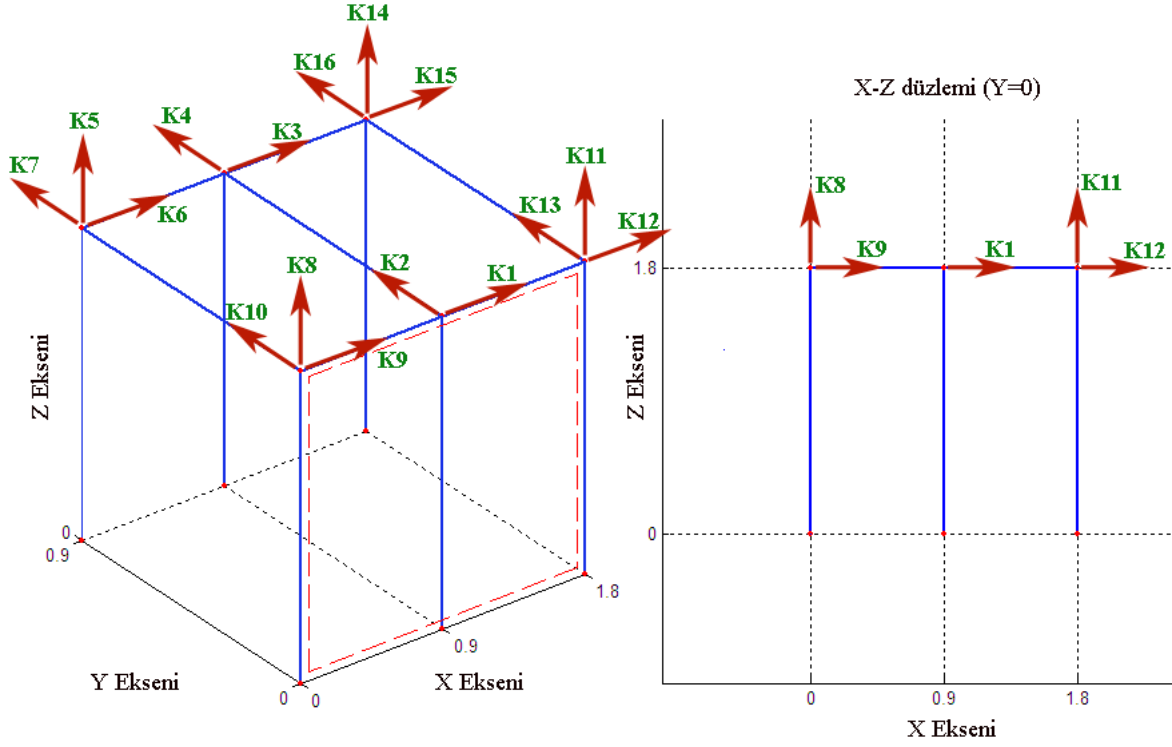
Üç boyutlu çerçeve modeli üzerinde hem zorlanmış hem de çevresel titreşim deneyleri yapılmıştır. Her iki deney sonuçlarına göre belirlenen dinamik karakteristiklerin sonuçları karşılaştırılmış, bunlardan çevresel titreşim deney sonuçları referans kabul edilerek sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir.

3.1.1.1. Modelin Deneysel (Etki Tepki) Modal Analizi

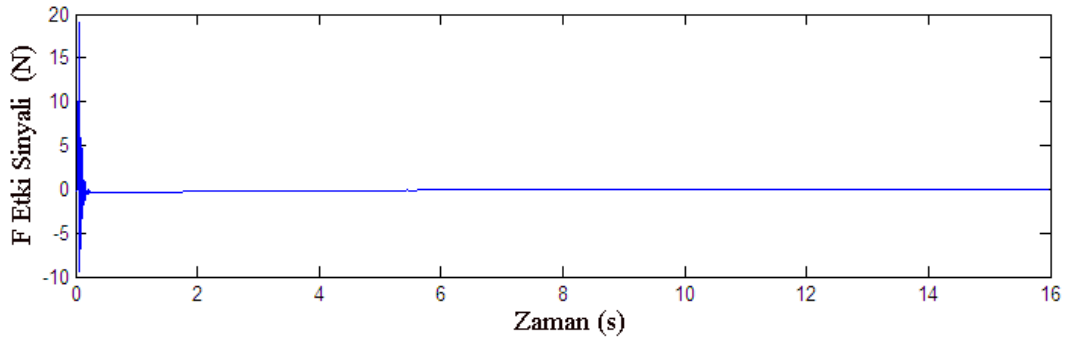
3.1.1.1.1. Model Üzerinde Çekiç Deneyi Yapılması ve Sinyallerin Toplanması

Çerçeve modeline yerleştirilmiş olan ölçüm kanallarının kayıt numaraları Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir. Modele uygulanan etkiden alınan sinyal Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bu etki sinyaline karşılık olarak model üzerine yerleştirilmiş olan ivmeölçerlerden alınan tepki sinyalleri Şekil 3.3-Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Bu sinyaller incelendiğinde, x eksenini doğrultusundaki kanallardan alınan sinyallerin en kuvvetli sinyaller olduğu, y doğrultusundaki kanallardan alınan sinyallerin kuvvetli olmakla beraber belirli bölümlerde doğrultu değiştirdikleri, z doğrultusundaki kanallardan alınan sinyallerin ise kısmen zayıf ve değişken hareket içerisinde oldukları görülmektedir. Bunun sebebinin etki sinyalinin sisteme x doğrultusunda uygulanmasından ve sistemin hakim modal

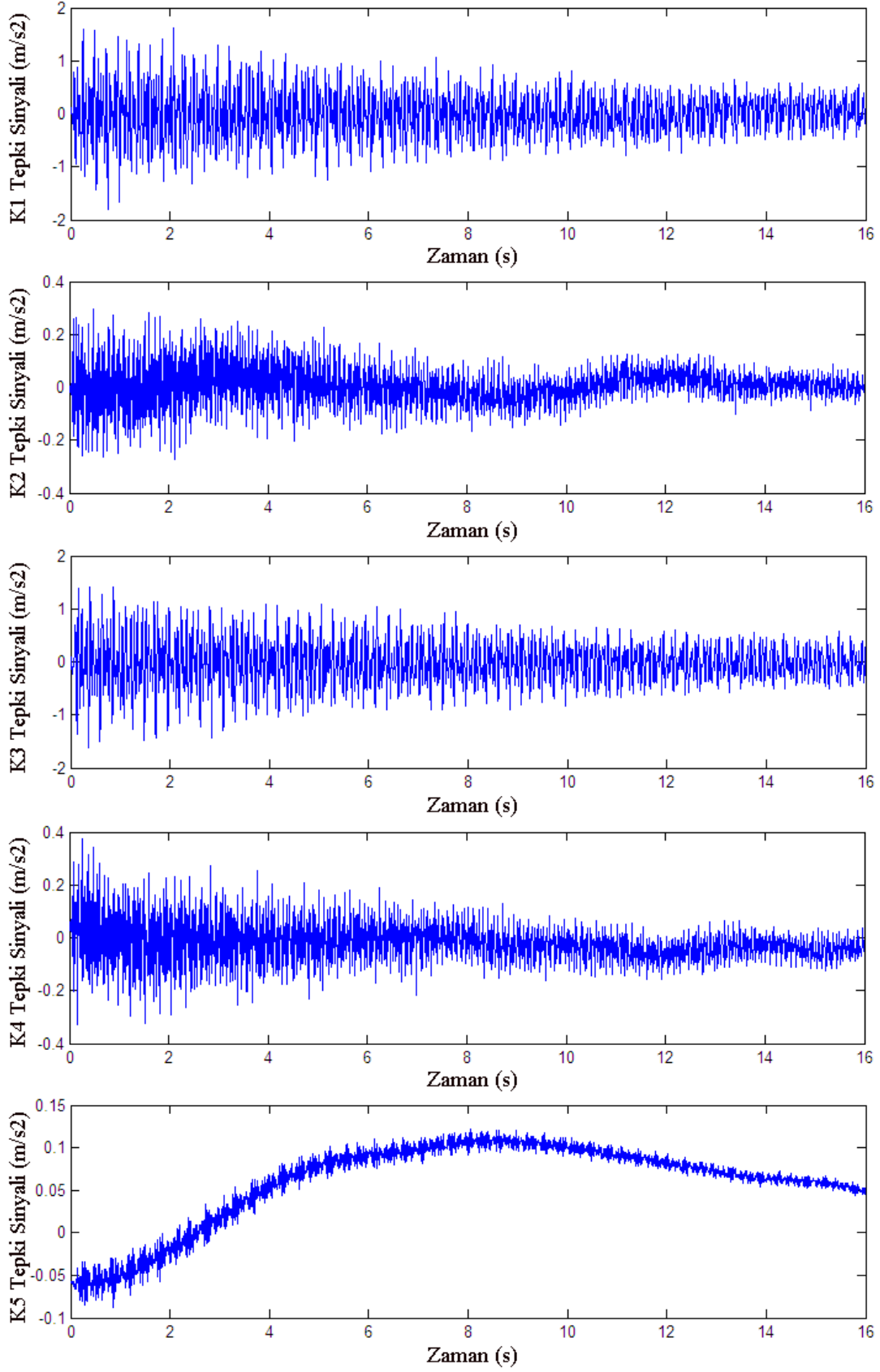
hareketlerinin ölçüm alınan frekans aralığı içerisinde yatay doğrultularda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



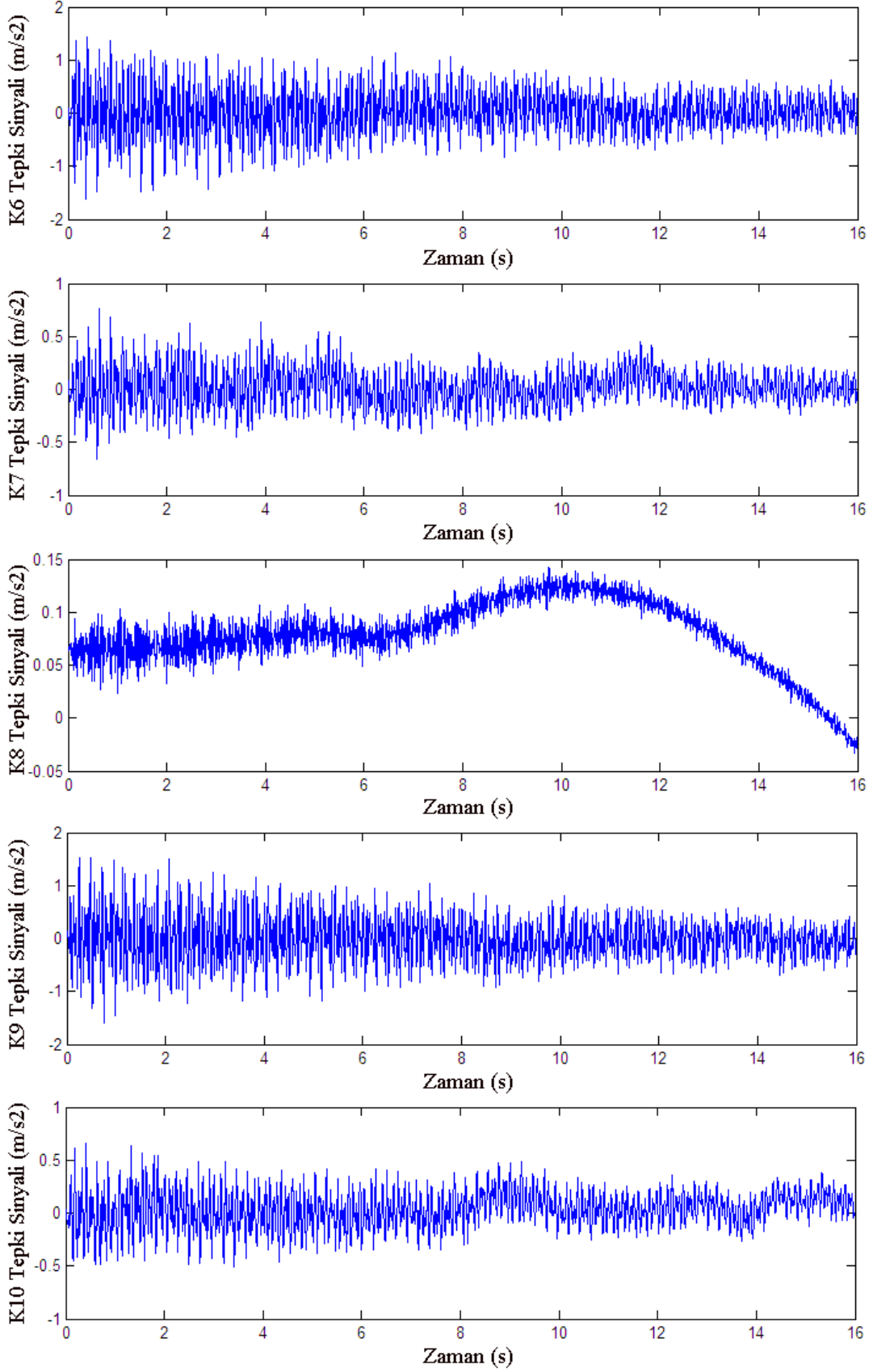
Şekil 3.1. Model üzerinde yapılan zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri için sisteme yerleştirilen kanalların numaraları ve yönler



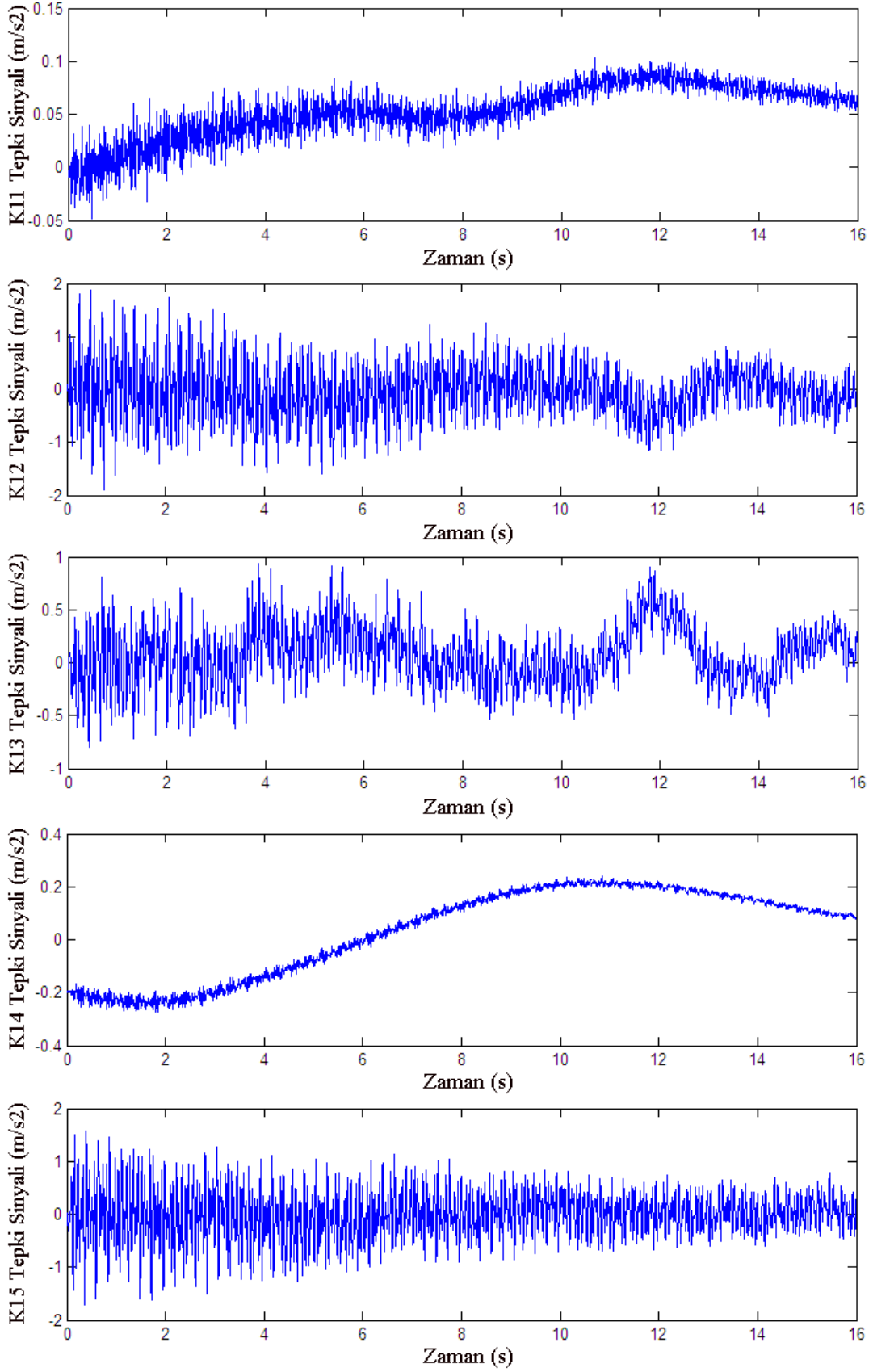
Şekil 3.2. Modelinin zorlanmış titreşim deneyinde çekiçten alınan etki sinyali



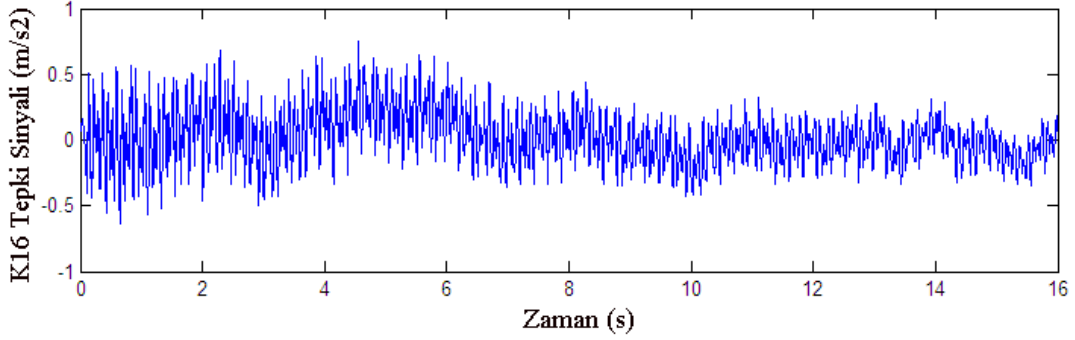
Şekil 3.3. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



Şekil 3.4. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



Şekil 3.5. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



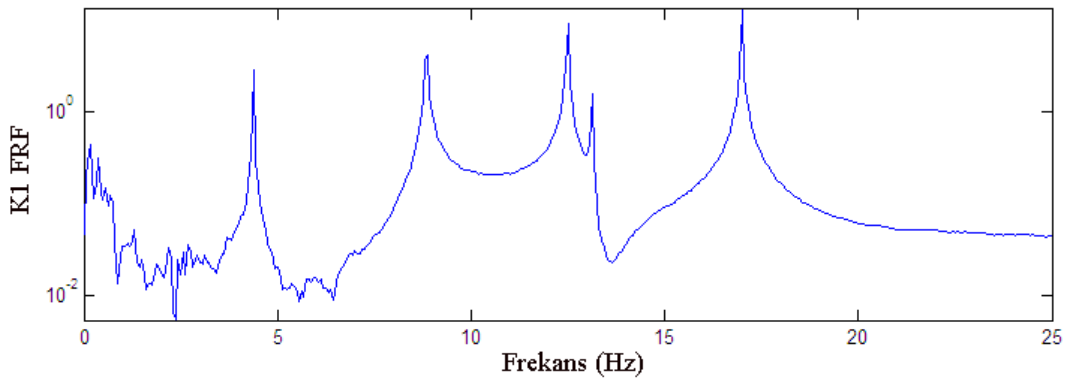
Şekil 3.6. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 16 numaralı kanaldan alınan sinyal kaydı

3.1.1.1.2. SignalCAD Programı ile Ham Sinyal Verilerinin İşlenmesi ve Spektrumların Üretimi

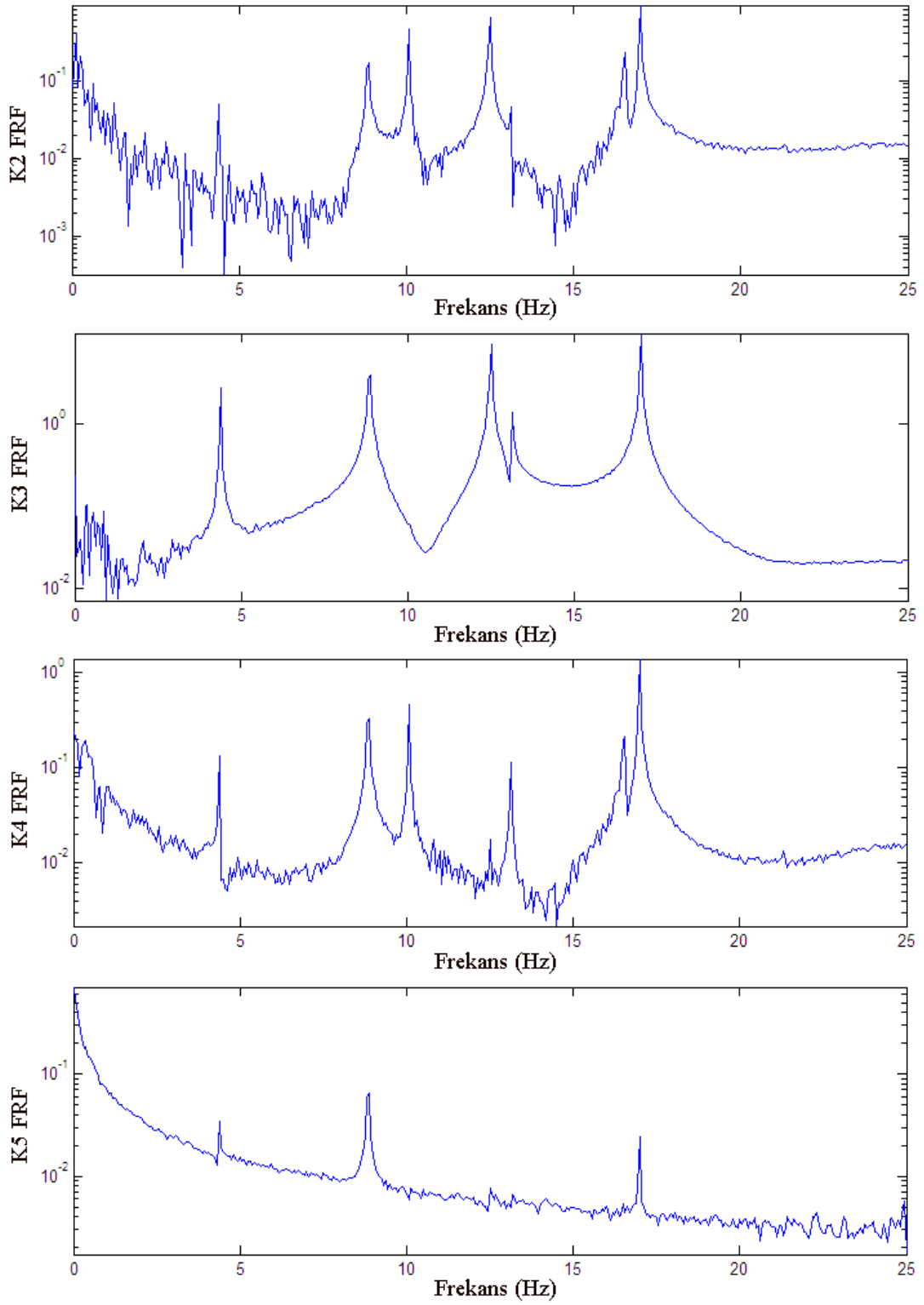
3.1.1.1.2.1. Frekans Davranış Fonksiyonları

Şekil 3.1’de gösterilen ölçüm kanallarının her birine ait frekans davranış fonksiyonları (FRF), sırasıyla Şekil 3.7-Şekil 3.11’de gösterilmektedir. FRF’ler, kanallardan alınan sinyaller ile çekiçten alınan etki sinyali kullanılarak hesaplanmıştır.

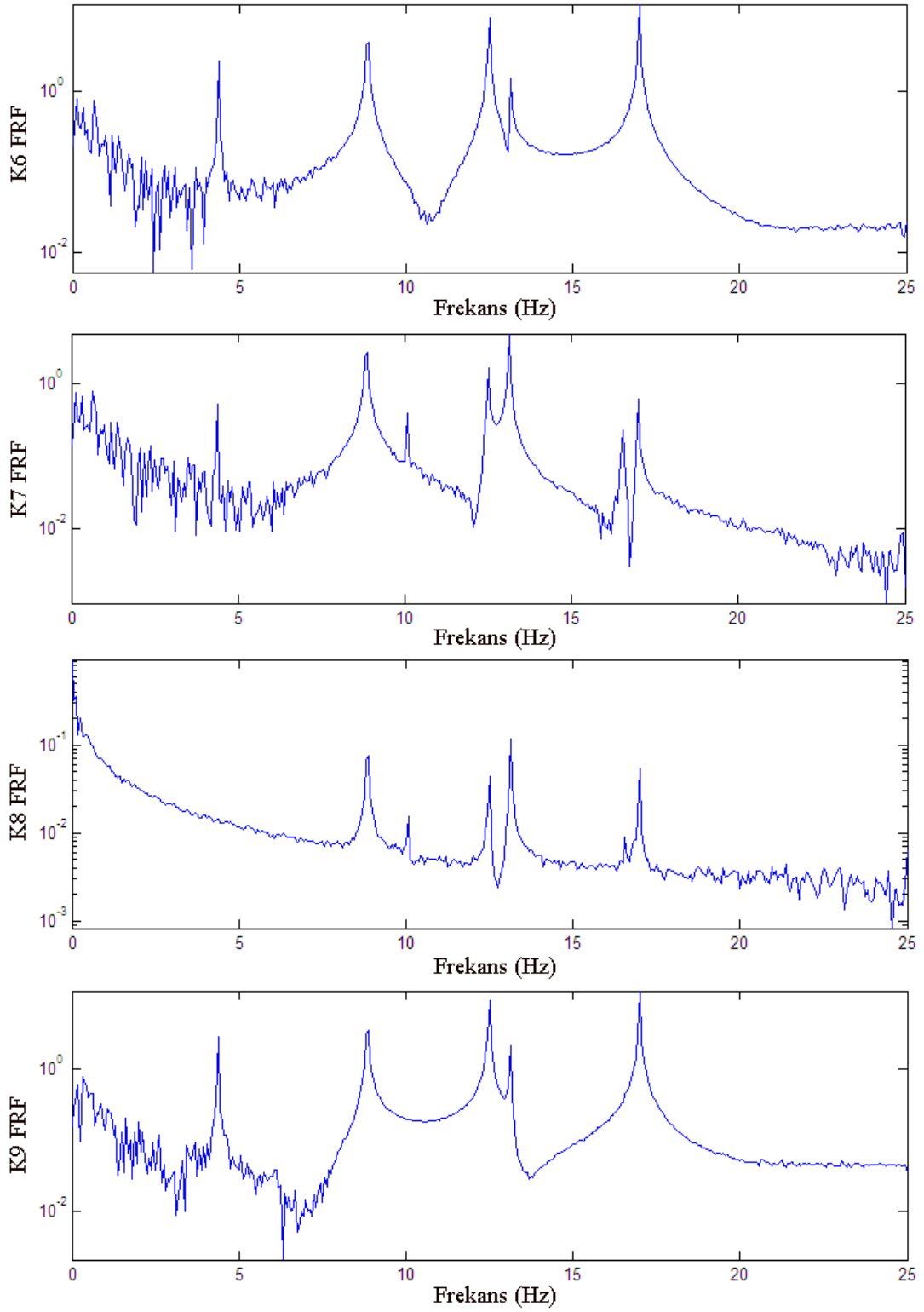
Ölçüm yapılan sistemin dinamik davranışı değerlendirilirken kanallara ait spektral fonksiyonların incelenmesinin yanında bütün spektrumların davranışı içeren mod gösterge fonksiyonlarının kullanılması da oldukça yararlı olmaktadır. Üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinden elde edilen sinyaller kullanılarak hesaplanan frekans davranış fonksiyonlarının kompleks mod gösterge fonksiyonu Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



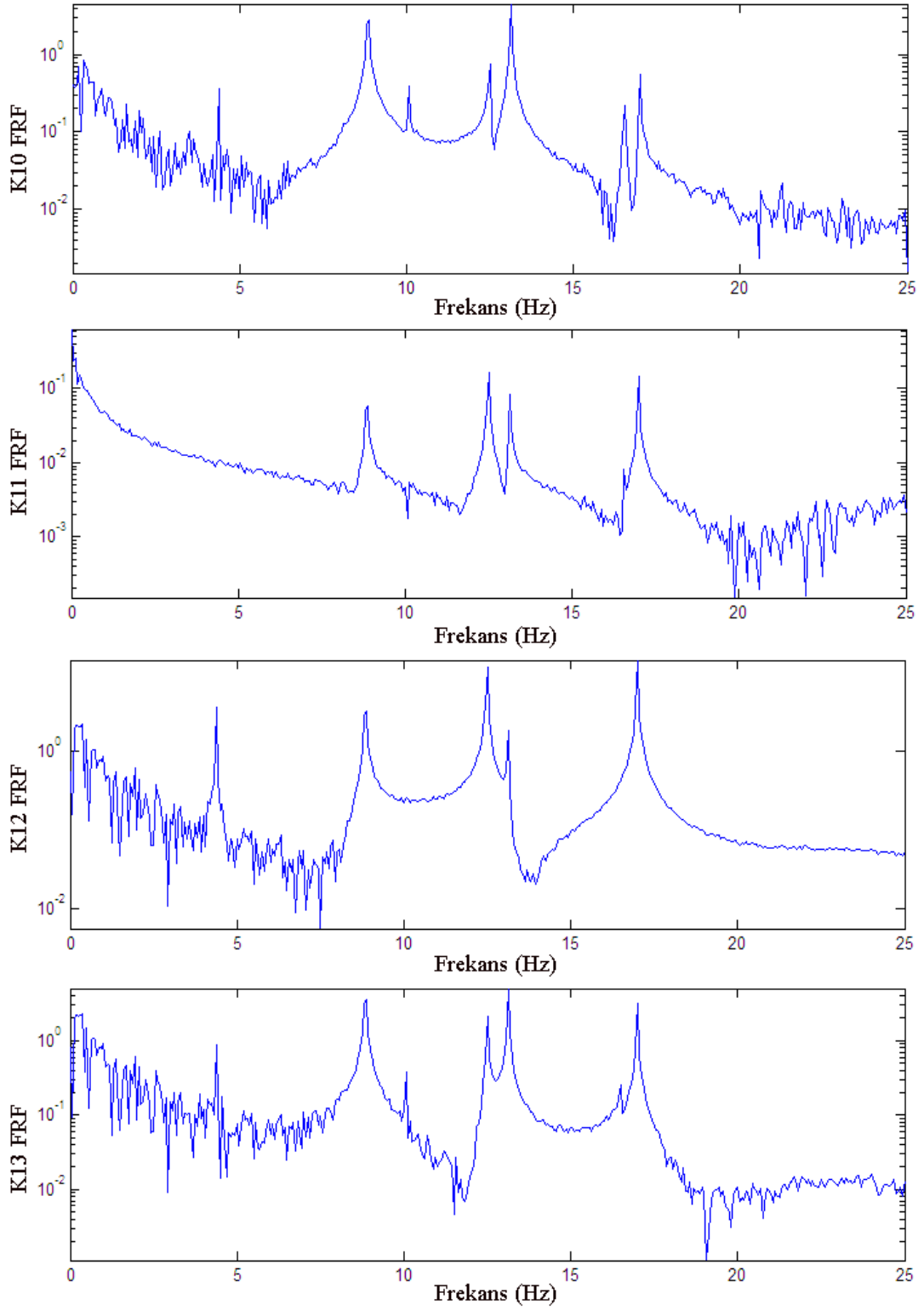
Şekil 3.7. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 1 numaralı kanal için hesaplanan frekans davranış fonksiyonu



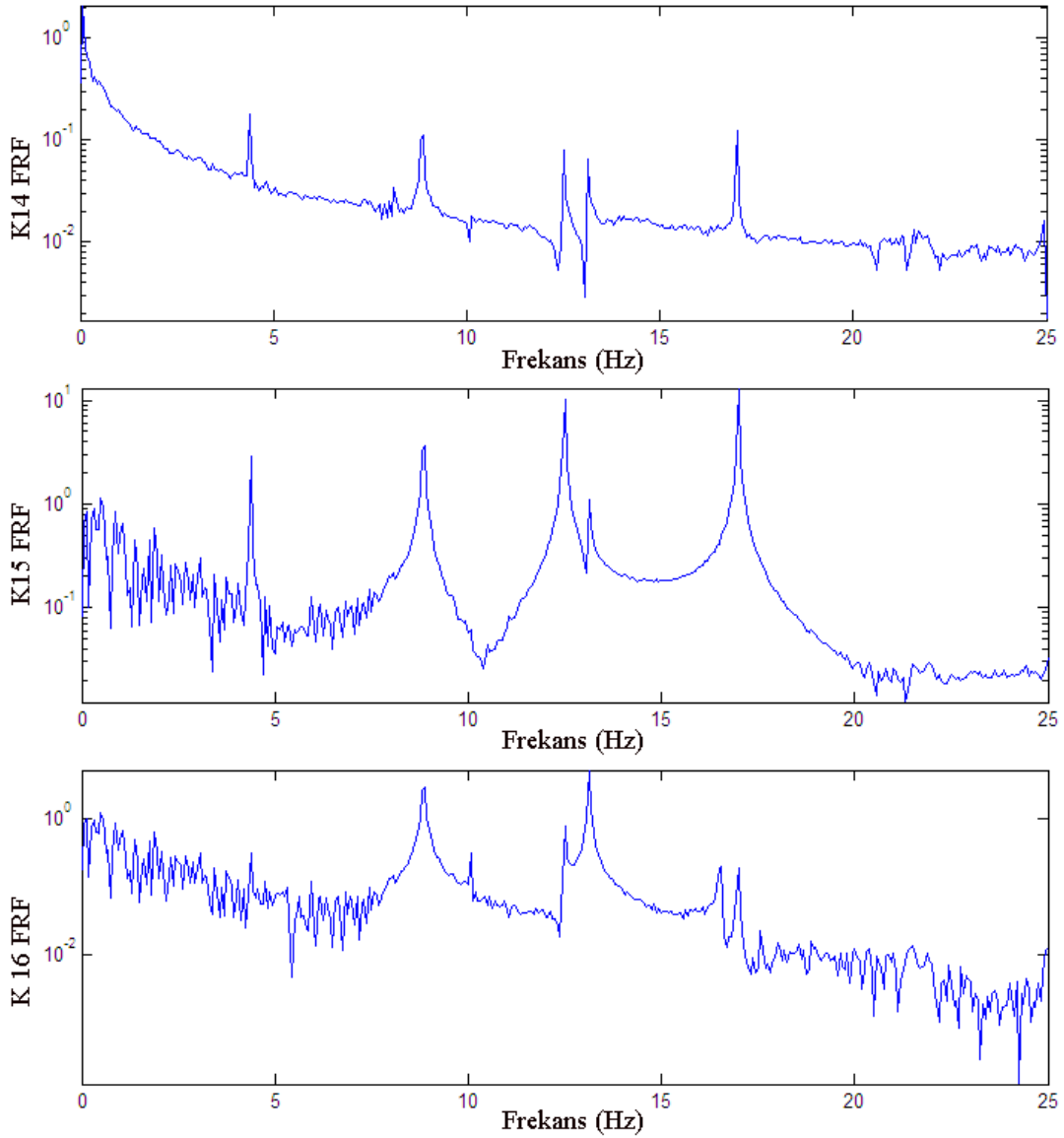
Şekil 3.8. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 2, 3, 4 ve 5 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları



Şekil 3.9. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 6, 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları

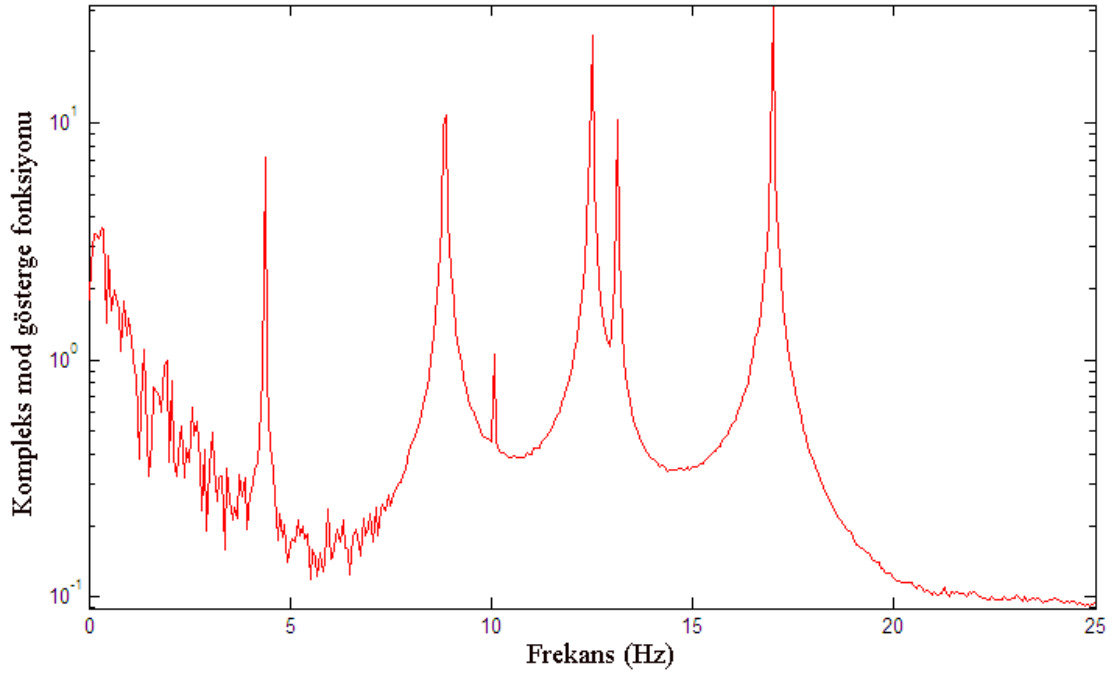


Şekil 3.10. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 10, 11, 12 ve 13 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları

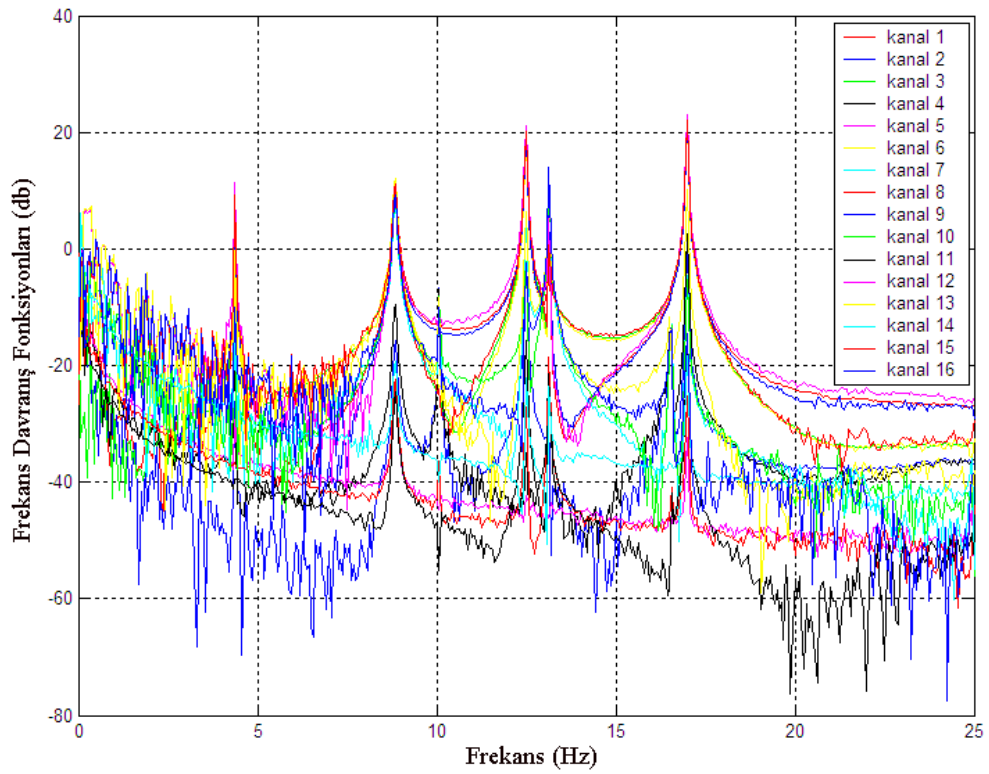


Şekil 3.11. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucuna bağlı olarak 14, 15 ve 16 numaralı kanallar için hesaplanan frekans davranış fonksiyonları

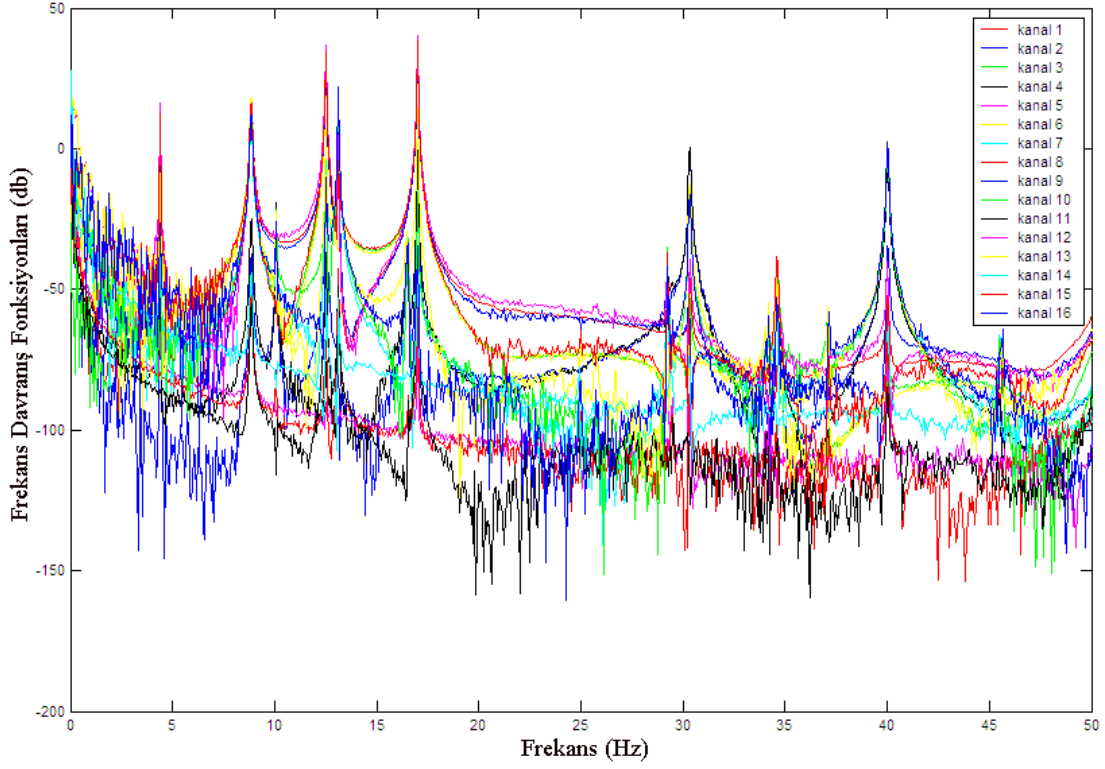
Üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyi sonucunda üretilmiş olan frekans davranış fonksiyonlarının tamamı Şekil 3.13'te görüldüğü gibi bir eksen üzerinde gösterilebilir. Eğer frekans hesap aralığı 0-25 Hz'dan 0-50 Hz'a genişletilirse, Şekil 3.14'te görüldüğü gibi 0-50 Hz arasındaki spektral davranış değerlendirilebilir. Şekil 3.15'te bu frekans aralığında üretilmiş olan frekans davranış fonksiyonlarının tümünün davranışını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonunun grafiği görülmektedir. Grafikler incelendiğinde 0-50 Hz aralığında çerçeve modeli için 14 adet hakim modal davranış görülmektedir. Burada, çerçeve modelinin davranışının takip edilmesinde ilk 7 mod yeterli görüldüğünden hesap aralığı 0-25 Hz ile sınırlı tutulacaktır.



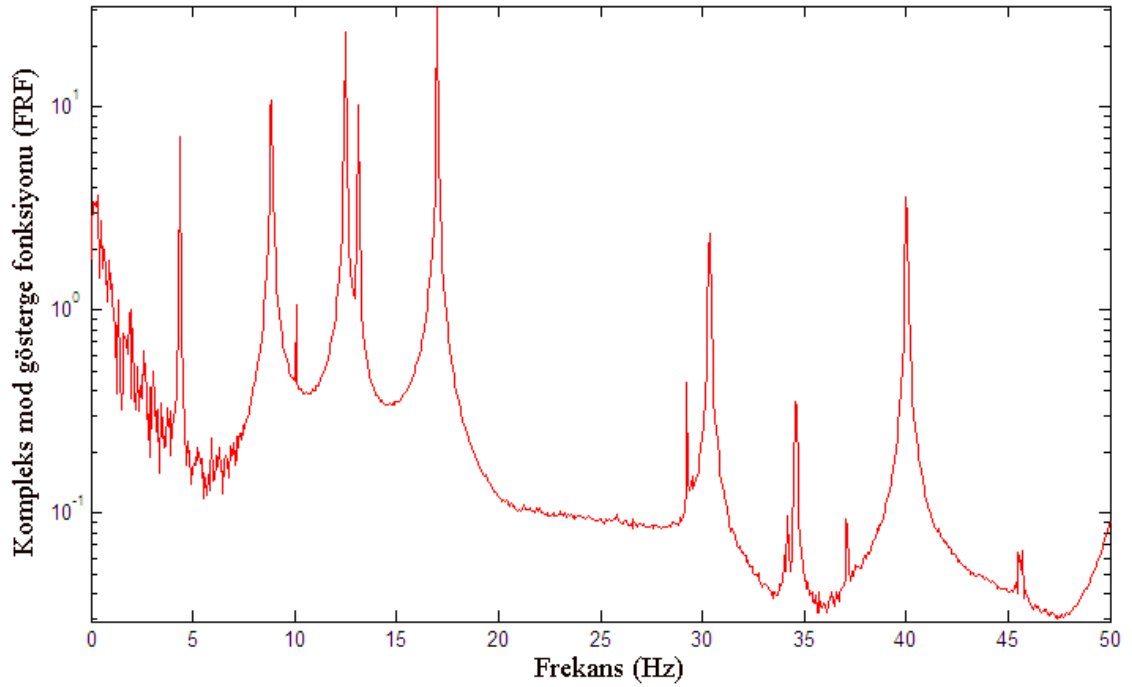
Şekil 3.12. Frekans davranış fonksiyonlarından hesaplanan kompleks mod gösterge fonksiyonu



Şekil 3.13. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucunda 0-25 Hz aralığında yapılan hesap sonucu elde edilen FRF grafikleri



Şekil 3.14. Modelin zorlanmış titreşim deneyi sonucunda 0-50 Hz aralığında yapılan hesap sonucu elde edilen FRF grafikleri

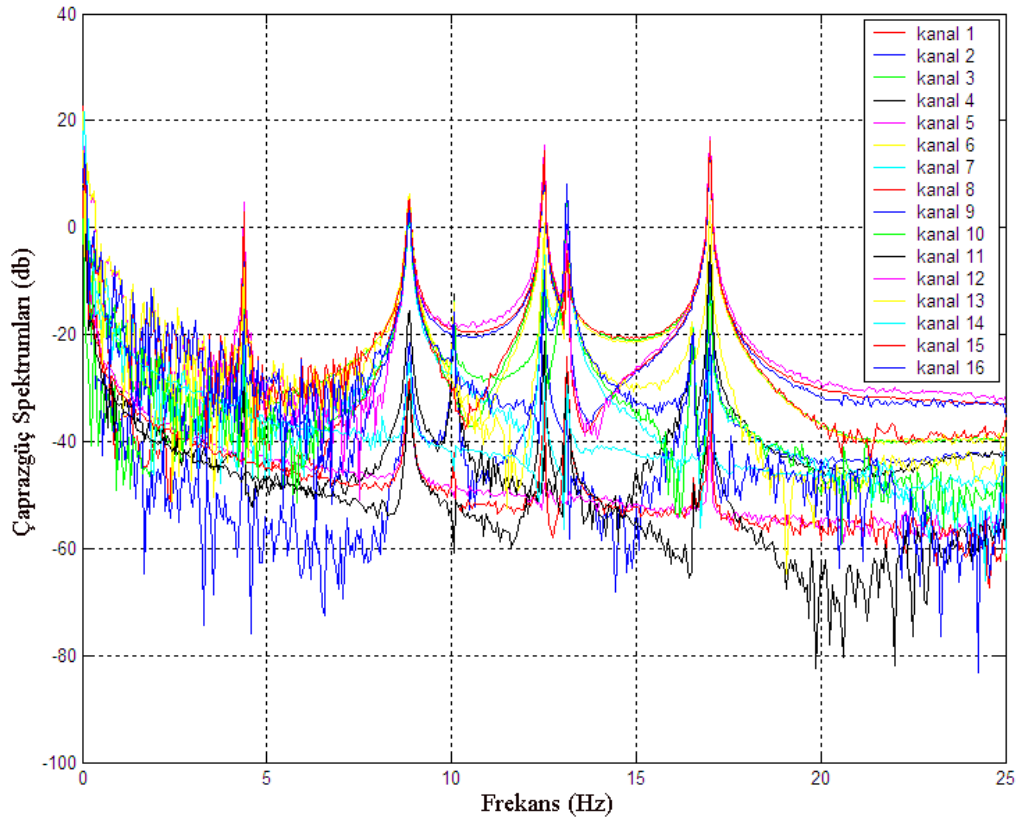


Şekil 3.15. Modelin 0-50 Hz arasında hesaplanan frekans davranış fonksiyonlarından meydana gelen kompleks mod gösterge fonksiyonu

Hesap aralığı, örnekleme frekansının yarı değerine kadar genişletilebilir. Modelimizde gelen sinyallere bağlı olarak hesaplanan örnekleme frekansı 128 olduğundan, spektral çözümlemelerde 0-64 Hz arasına kadar hesap aralığı genişletilebilir.

3.1.1.1.2.2. Çaprazgüç Spektrumları

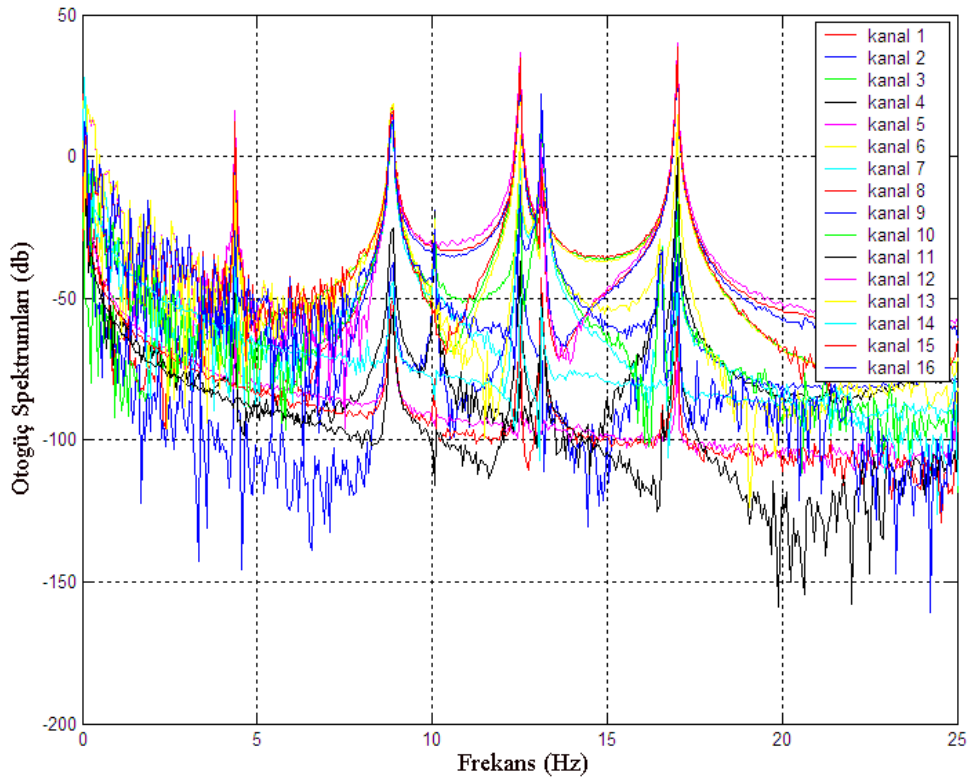
Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinden alınan sinyaller kullanılarak her bir kanal için hesaplanan çaprazgüç spektrumlarının tümü Şekil 3.16'da bir arada gösterilmektedir. Çaprazgüç spektrum (Crosspower Spectrum - CPS) grafikleri modal parametrelerin belirlenmesinde frekans davranış fonksiyonları ile beraber giriş verisi olarak kullanılırlar. Elde edilen CPS grafikleri incelendiğinde FRF grafikleri ile aynı davranışa sahip oldukları, tepe noktalarının da aynı frekans değerleri üzerinde meydana gelmiş oldukları görülmektedir.



Şekil 3.16. Zorlanmış titreşim deney verilerinden hesaplanan CPS grafikleri

3.1.1.1.2.3. Otogüç Spektrumları

Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinde, model üzerindeki tepki ölçüm kanallarından toplanan sinyaller kullanılarak hesaplanan otogüç spektrumlarının (Autopower spectrum – APS) tümü Şekil 3.17’de gösterildiği gibidir. Burada spektrumların davranışı incelendiği zaman, daha önceden elde edilmiş olan frekans davranış fonksiyonları ve çapraz güç spektrumlarının davranışlarına paralel bir yapıda oldukları görülmektedir. Tepe noktaları aynı frekans değerleri üzerinde yer almaktadırlar. Otogüç spektrumları modal parametrelerin belirlenmesinde doğrudan doğruya kullanılmazlar. Bu spektrumlar, frekans davranış fonksiyonları ve çaprazgüç spektrumlarının hesaplarında kullanılan spektral fonksiyonlardır.

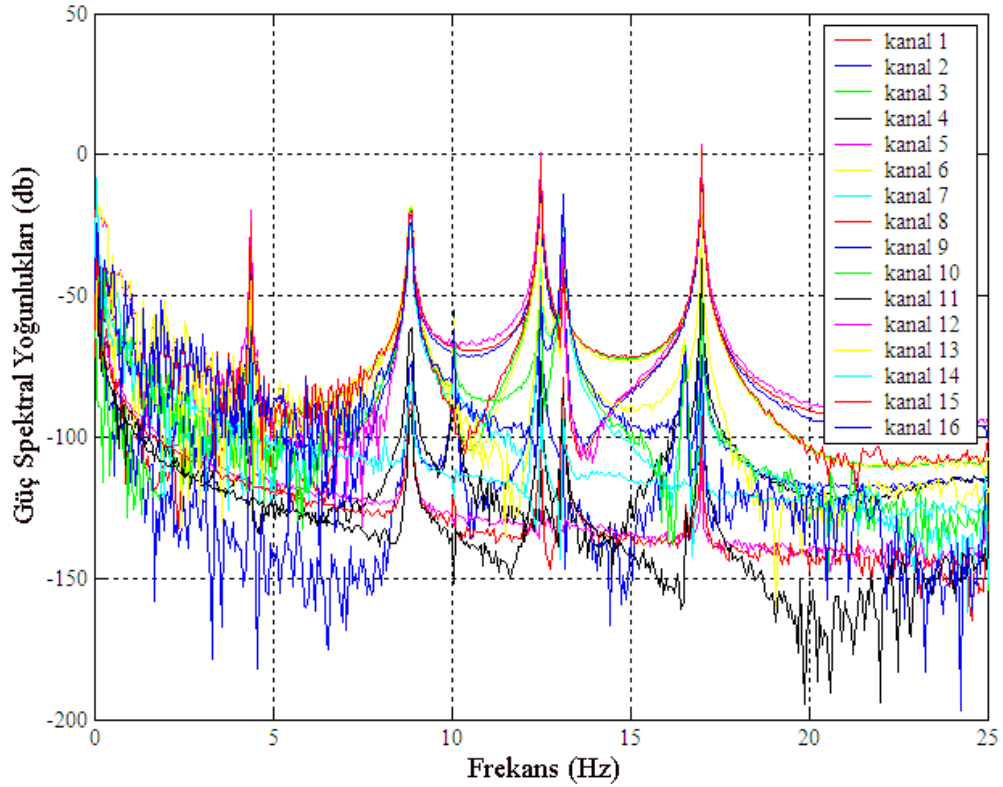


Şekil 3.17. Zorlanmış titreşim deney verilerinden hesaplanan APS grafikleri

3.1.1.1.2.4. Güç Spektral Yoğunlukları

Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinde sistem üzerine yerleştirilmiş olan ölçüm kanallarından alınan sinyallerin işlenmesi ile elde edilen güç

spektral yoğunluklarının (Power Spectral Densities - PSD) tümü, Şekil 3.18’de görüldüğü gibi tek bir eksen üzerinde görülmektedir. Burada, güç spektral yoğunluklarının hesabında Periodogram yöntemi, spektrum üretiminde oluşacak sızma hatalarının filtrelenmesinde de pencereleme yöntemi kullanılmıştır.

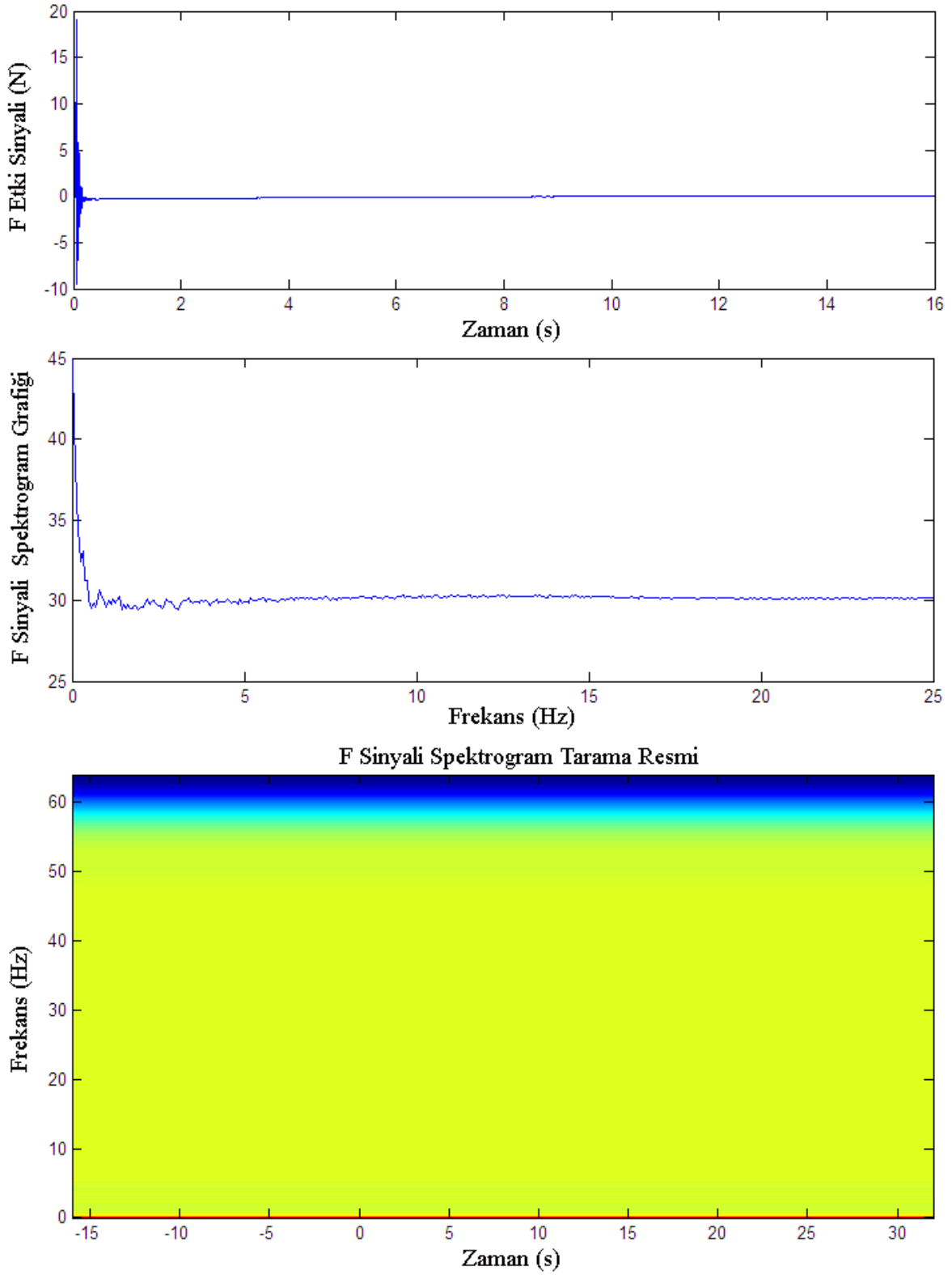


Şekil 3.18. Zorlanmış titreşim deney verilerinden hesaplanan PSD grafikleri

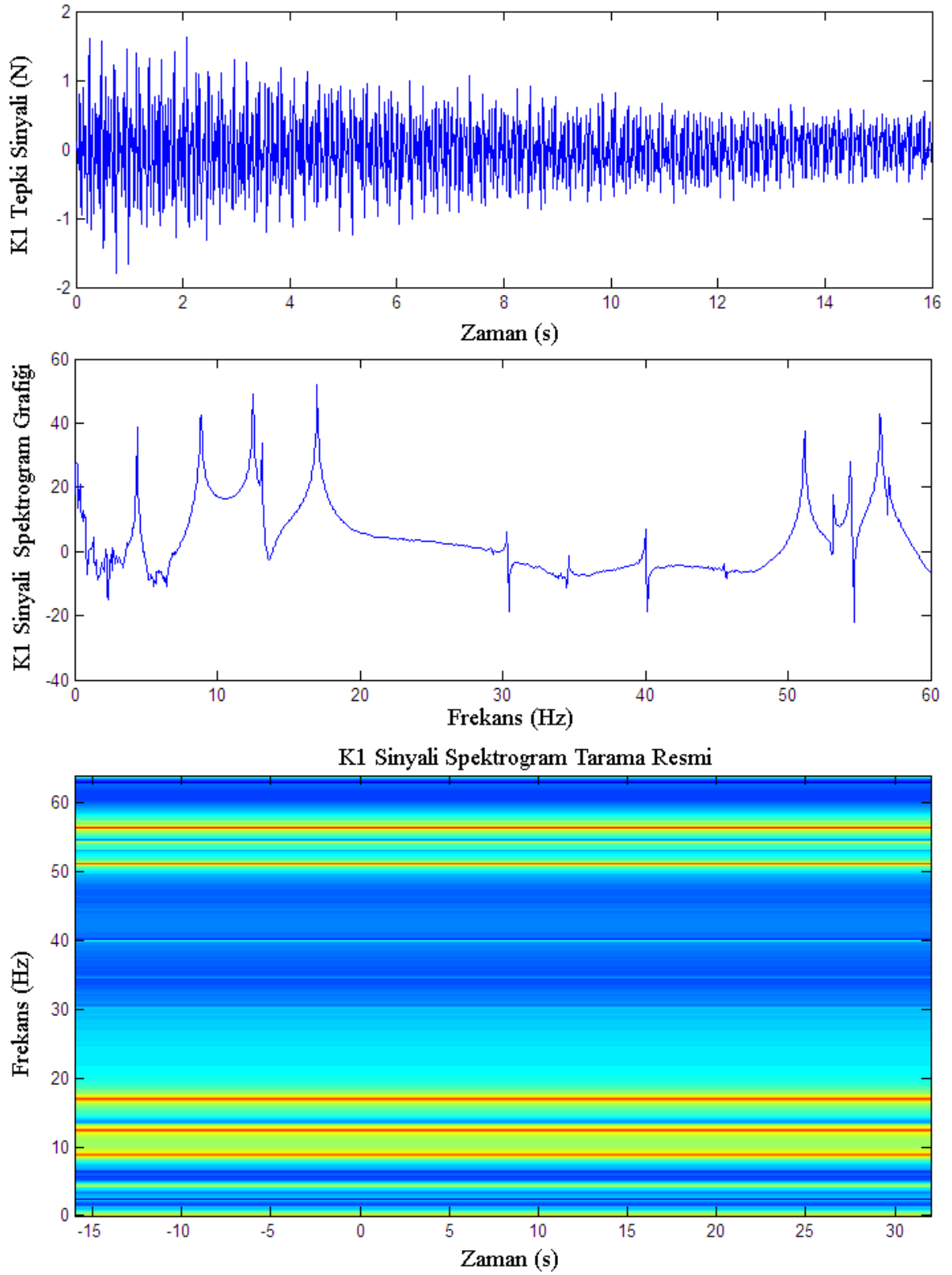
3.1.1.1.2.5. Spektrogram Grafikleri

Spektrogram analizi ile sinyal ayrık Fourier dönüşümü kullanılarak sütunları sıfırla doldurulmuş matris içerisinde birbirlerine geçmiş parçalara bölünür. Üretilen spektrumun her bir sütunu, dikkate alınan sinyalin kısa süreli, zaman sınırlamalı frekans içeriğinin bir hesabıdır. Üretilen spektrumun sütunları arasında zaman soldan sağa doğru lineer olarak artar. Frekans yukarıya doğru sıfırdan başlayarak lineer bir şekilde artar.

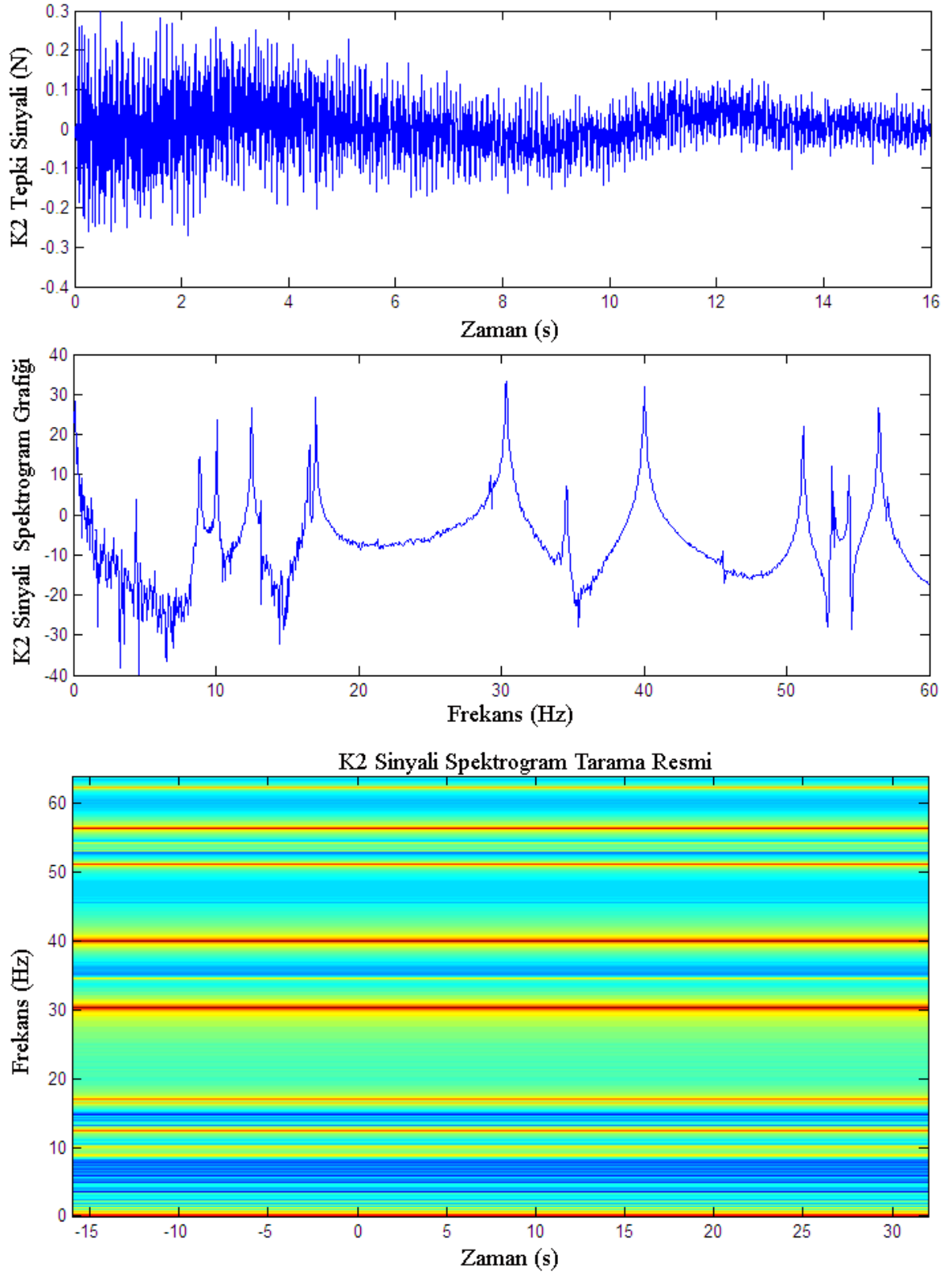
Üç boyutlu çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen zorlanmış titreşim deneyinde modelin titreştirilmesinde kullanılan etki sinyalinden üretilen spektrogram grafik ve resimleri Şekil 3.19’da, ilk dört kanaldan alınan tepki sinyallerinden üretilen spektrogram grafik ve resimleri ise Şekil 3.20-Şekil 3.23’te gösterilmektedir.



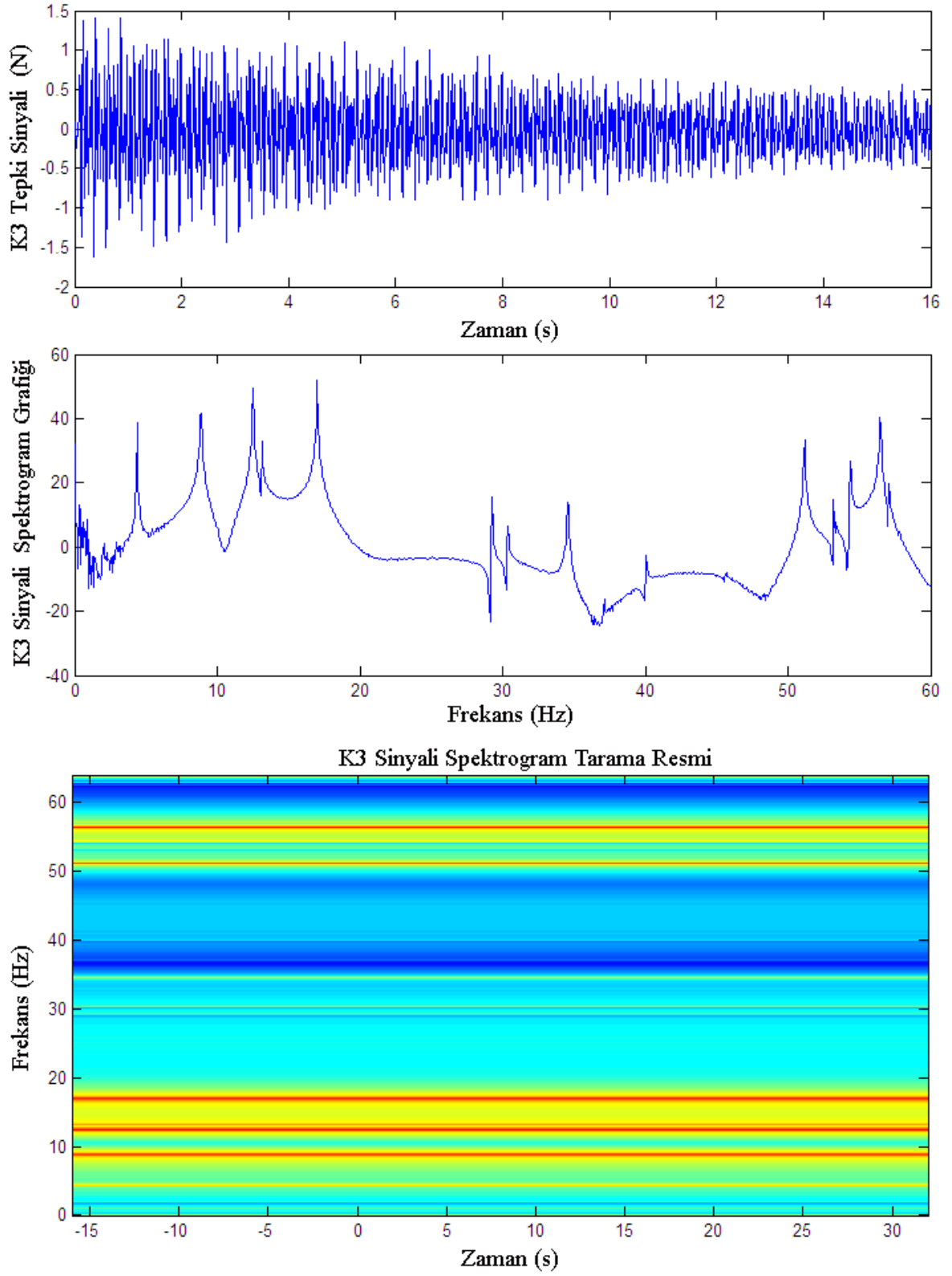
Şekil 3.19. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde etki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



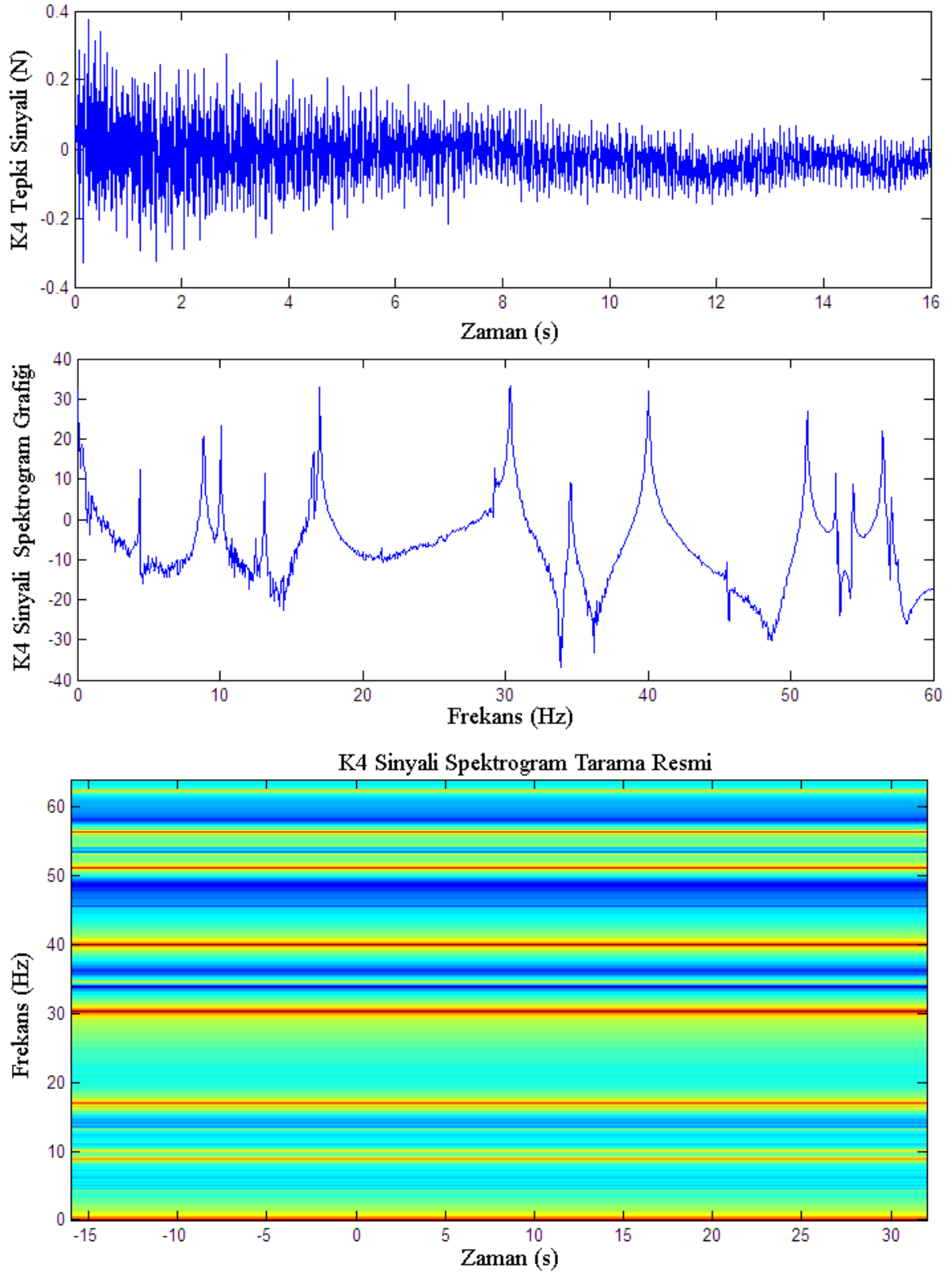
Şekil 3.20. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 1 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



Şekil 3.21. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 2 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



Şekil 3.22. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 3 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



Şekil 3.23. Modelin zorlanmış titreşim deneyinde 4 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi

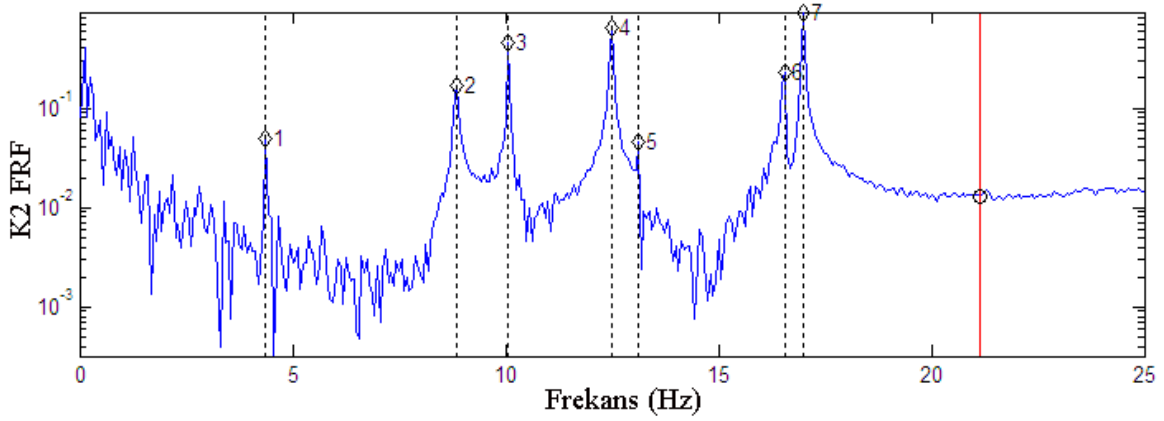
3.1.1.1.3. Zorlanmış Titreşim Deneyi Yapılan Modelin ModalCAD Programı Kullanılarak Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Bir önceki aşamada, SignalCAD programı kullanılarak, üç boyutlu çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinden elde edilen ham veriler işlenmiş ve anlamlı spektrumlar elde edilmiştir. Bu spektrumlar kullanılarak modelin dinamik karakteristikleri belirlenecektir. Zorlanmış titreşim deneylerinden elde sinyallerden üretilen spektrumlar kullanılarak yapılan etki tepki modal analizinde, frekans davranış fonksiyonları, modal parametre belirleme algoritmalarının giriş verisini oluştururlar.

3.1.1.1.3.1. İşletim Vektörleri (OV) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Etki tepki modal analizi ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, frekans davranış fonksiyonlarının kullanıldığı bilinmektedir. Şekil 3.12’de görülen modelin bütün kanallarına ait FRF’lerin davranışını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonunda toplam 6 tane tepe noktası görülmektedir. Ancak, Şekil 3.13’te görülen sistemin ölçüm kanallarına ait frekans davranış fonksiyonlarının tümü incelendiği zaman, kompleks mod gösterge fonksiyonunda bir tane tepe noktasının yer almadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, bu tepe noktasının zayıf bir şekilde tetiklenmesinden ve yanında yer alan kuvvetli modal hareketin etkisi altında kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, tepe noktalarının seçilmesi işlemi, Şekil 3.24’te görülen 2 numaralı kanala ait frekans davranış fonksiyonu üzerinden yapılmıştır. Bu FRF grafiği üzerinde, sistemin tetiklenmiş olan bütün tepe noktaları görülmektedir. Bu tepe noktalarına karşılık gelen dinamik karakteristikler Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Modelin, etki tepki deneysel modal analizi sonucunda İşletim Vektörleri Yöntemi kullanılarak belirlenen mod şekilleri Şekil 3.25’de gösterilmektedir.

Burada hesaplanan mod şekillerinin birbirleri ile uyumunu gösteren üç boyutlu ve iki boyutlu MAC grafikleri Şekil 3.26’da verilmektedir. MAC grafikleri, İşletim Vektörleri Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin kendi içerisinde karşılaştırmasının yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Hesaplanan her bir modun farklı davranış göstermesi gerekmektedir. Modal vektörler içerisinde bu davranışların sayısal olarak kontrolü MAC grafikleri ile yapılmaktadır.



Şekil 3.24. Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen modların kanal 2 FRF spektrumu üzerindeki konumları

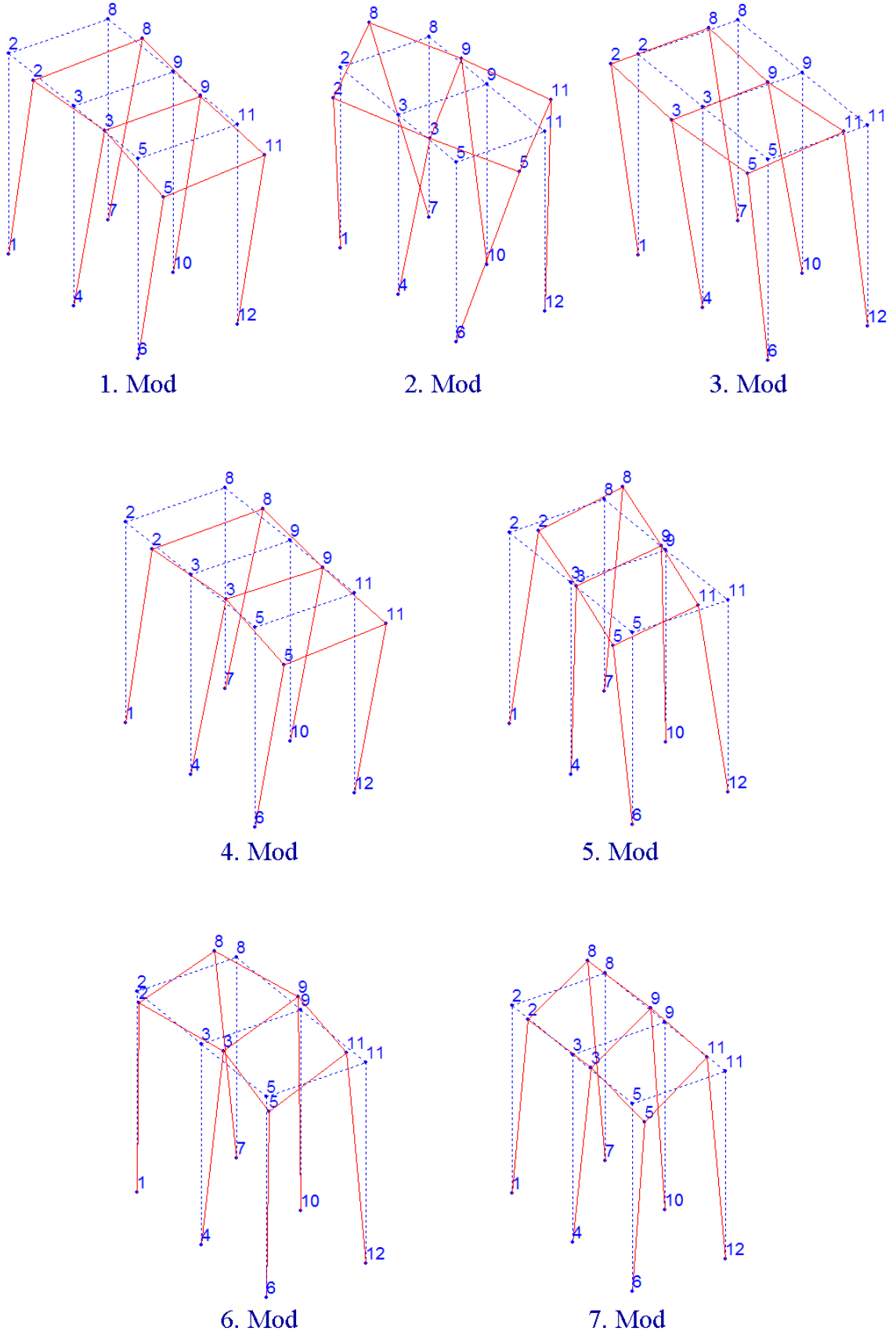
Tablo 3.1. Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı	Yöntem
1	4.375	1.891	OV
2	8.875	2.561	OV
3	10.063	0.861	OV
4	12.500	0.819	OV
5	13.125	0.729	OV
6	16.563	12.678	OV
7	17.000	0.558	OV

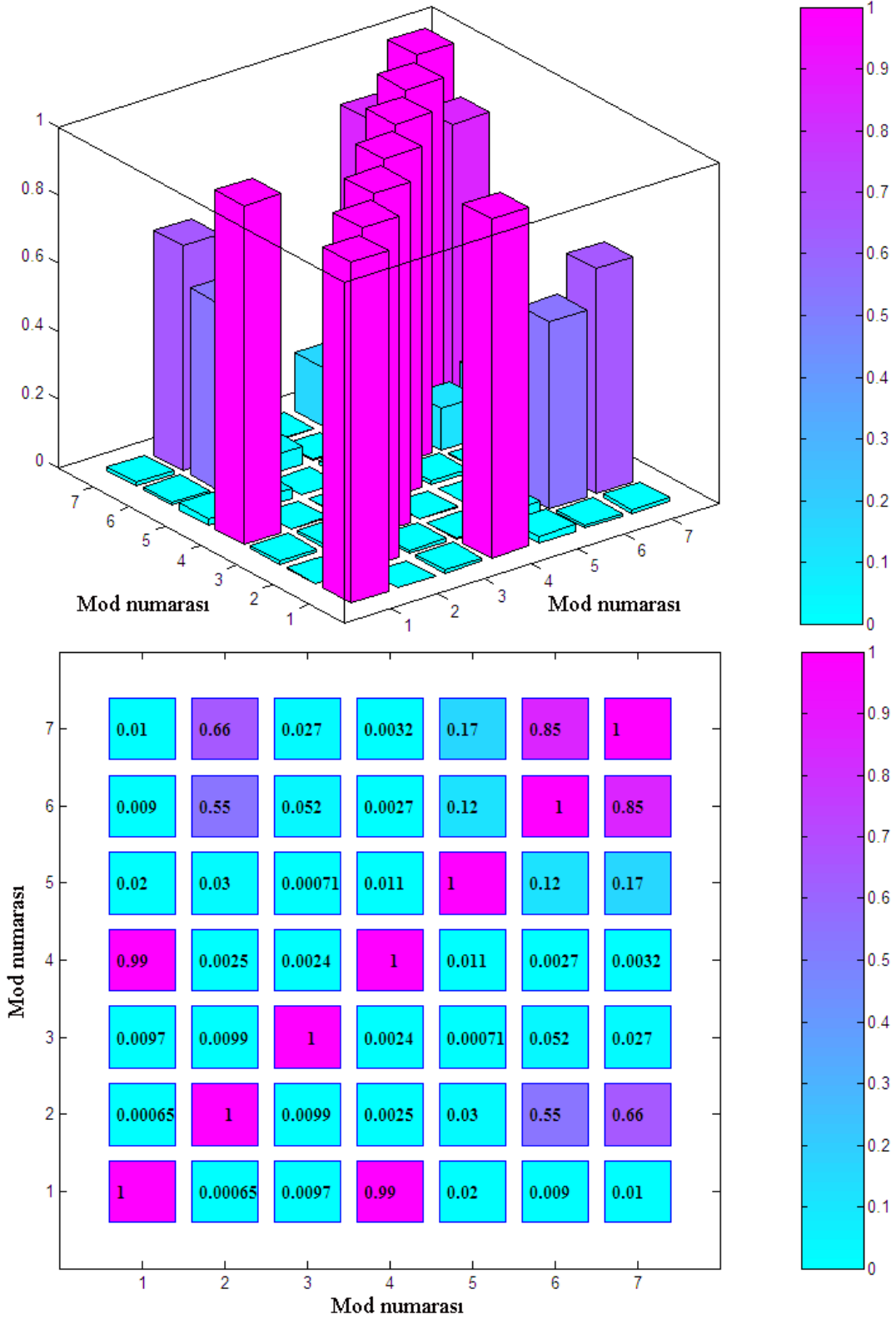
Şekil 3.26'da görülen MAC grafikleri incelendiğinde beklenilenin dışında bir durum dikkat çekmektedir. Burada normalde tam olarak başarı ile gerçekleştirilen bir analiz sonucunda hesaplanan modal vektörler değerlendirildiğinde, köşegenlerin 1 değerini almasının yanında köşegen dışındaki elemanların sıfıra yakın değerler alması beklenmektedir. Mevcut çözümde bazı köşegen olmayan matris değerlerinin oldukça yüksek değerli çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi, 1. ve 4. mod ile 2. ve 7. modların sanki benzer davranışlar gösteriyormuş gibi algılanmalarındandır. Veri toplama ünitesinde 17 kanallı ölçüm yapılabildiğinden dolayı tek ölçüm yapılmış ve sadece modelin en tepe seviyesindeki düğüm noktalarından ölçüm alınmıştır. Gerçekte, modelin 1. ve 4. modlarındaki davranış ile 2. ve 7. modlarındaki davranış tamamen farklıdır. Tepe

noktasında yakın davranış söz konusu olduğu halde ara kattaki düğümler oldukça farklı davranış göstermektedirler. Sadece tepe noktasından ölçüm alındığından dolayı MAC grafiklerinde bu modların çakışma noktalarında yüksek değerler çıkacaktır. Ancak, bu modların çakışma noktalarının dışındaki satır ve sütunlardaki değerlerin sifıra yakın olması bu modal vektörlerin hesabının doğruluğunu açık bir şekilde göstermektedir. Bunun yanında, hesaplanan 6. mod zayıf olarak tetiklendiğinden, 7. modun etkisi altında kalmıştır. Dolayısıyla, bu modun 7. ve 2. mod ile çakışma noktalarında yüksek MAC değerleri elde edilmiştir.

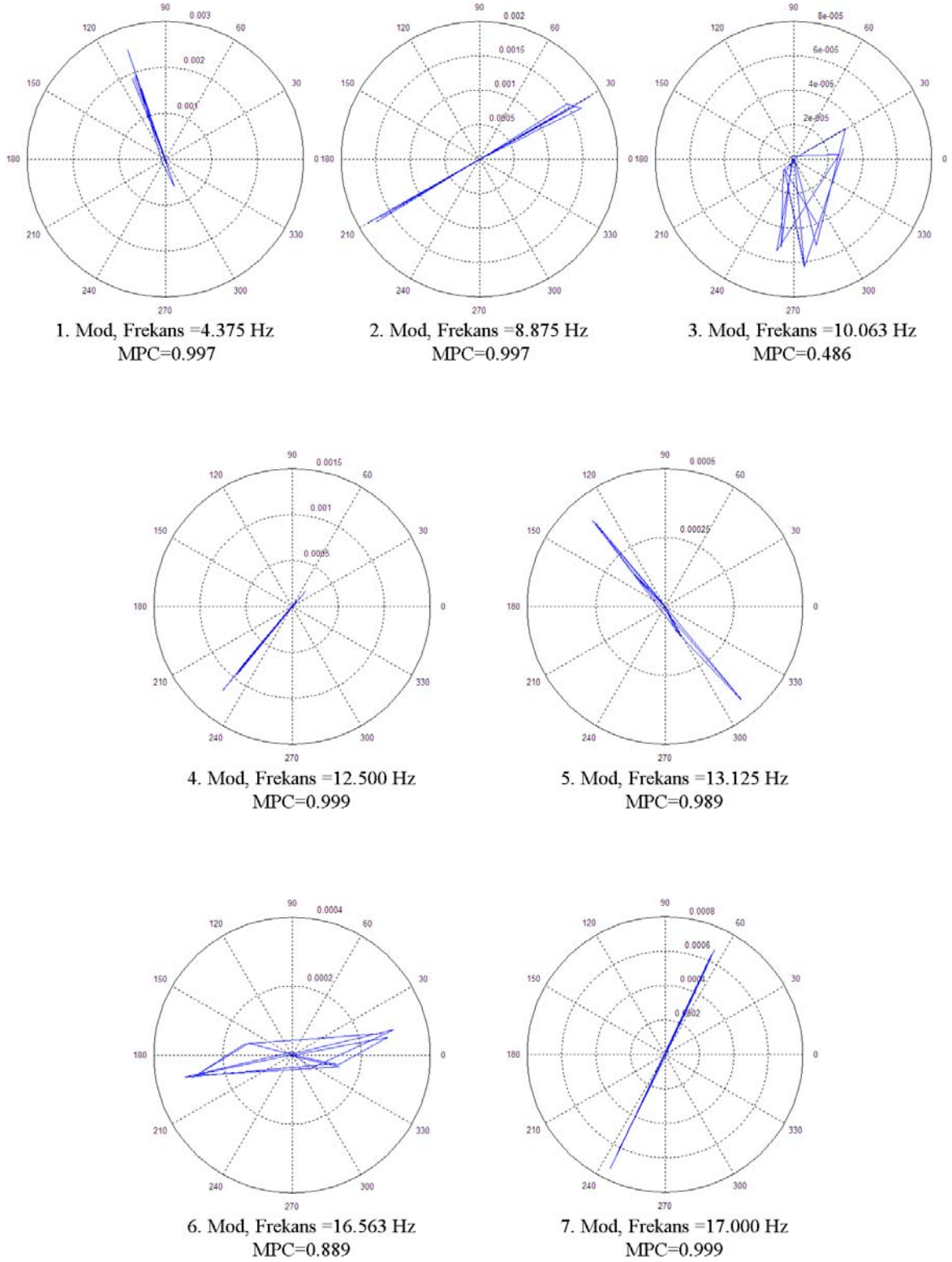
Üretilen modal vektörlerin doğruluğunu kontrol eden bir diğer parametre modal faz doğrudaşlık (Modal Phase Collinearity – MPC) grafiğidir. Şekil 3.27’de her bir modal vektörün modal faz doğrudaşlık grafikleri gösterilmektedir. Bu gösterge her bir mod için mod şeklinin gerçek ve sanal kısımları arasındaki lineer fonksiyonel ilişkinin kuvvetini ölçmektedir. Lineer olan hatlar modal vektörün kalitesini göstermektedir. Burada 3. ve 6. modal vektörlerin MPC grafiklerinin lineerlikten uzak bir davranış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi söz konusu modların zayıf bir şekilde tetiklenmiş olmalarından kaynaklanmaktadır. 3. moda ait tepe noktası kompleks mod gösterge fonksiyonunda zorlukla görünür iken, 6. modun tepe noktası görülememektedir. Ancak, bu tür zayıf tetiklemeler olsa bile ModalCAD programında kullanılan çeşitli çözümleme teknikleri ile bu modlar kolaylıkla sinyallerden ortaya çıkarılabilmektedir.



Şekil 3.25. Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri



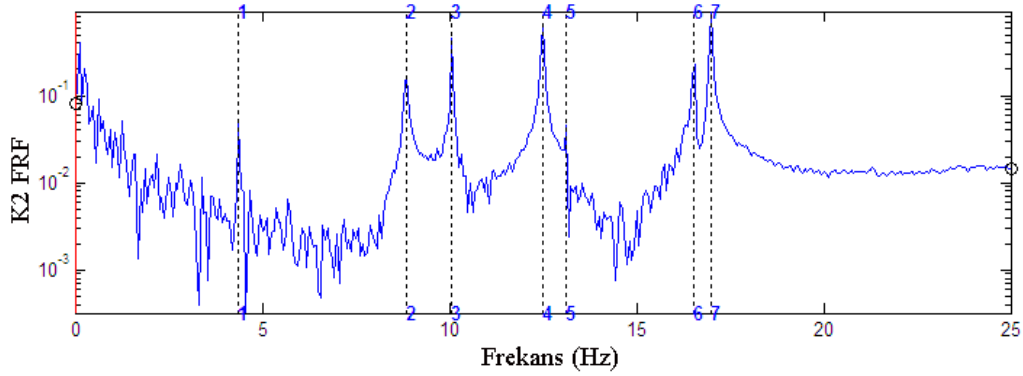
Şekil 3.26. Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri



Şekil 3.27. Modelin etki tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri

3.1.1.1.3.2. Kompleks Eksponansiyel (CE) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Kompleks Eksponansiyel (CE) yöntemi ile analiz yapılırken öncelikle sistemin maksimum model derecesi seçilir. Burada yapılan ön değerlendirmelerde, stabilite diyagramlarında model derecesi 50'den sonrası için tepe noktalarının olduğu noktalarda dengenin sağlandığı görülmüştür. Buna bağlı olarak bu model derecesinin üzerinde bir seçim ile analiz yapıldığında sonuçlar arasında yaklaşık olarak çok fazla değişiklik görülmeyecektir. Model derecesi 200 olarak seçildikten sonra, Şekil 3.28'de görülen 2 numaralı kanala ait frekans davranış fonksiyonu üzerinde tepe noktaları seçilerek analiz yapılır. Bu şekilde hesaplanan dinamik karakteristikler Tablo 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Modelin etki tepki modal analizine göre CE yöntemi ile belirlenen modların kanal 2 FRF spektrumu üzerindeki konumları

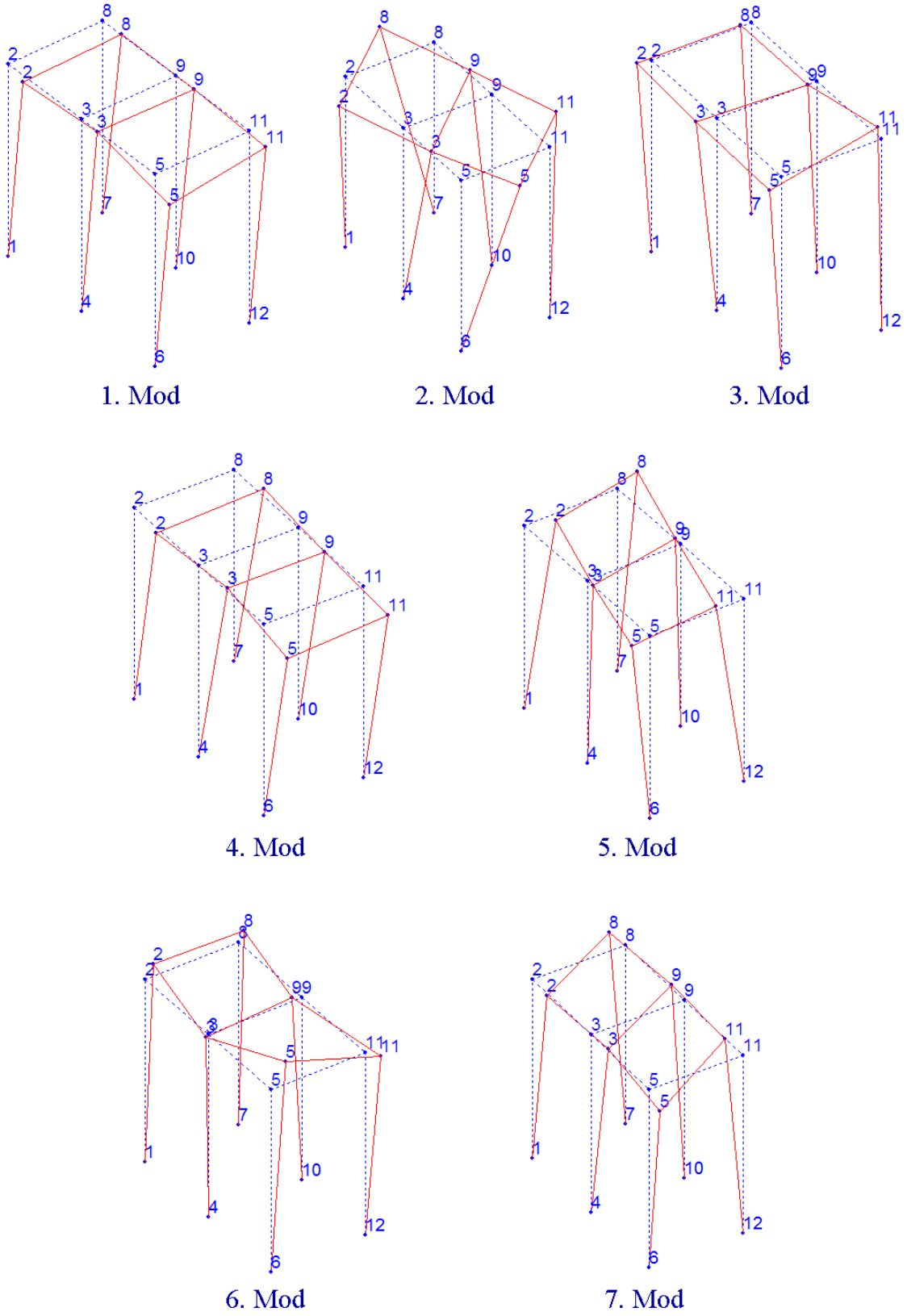
Tablo 3.2. Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Yöntem
1	4.372	0.126	CE
2	8.845	0.111	CE
3	10.059	0.097	CE
4	12.487	0.085	CE
5	13.137	0.066	CE
6	16.539	0.037	CE
7	16.992	0.068	CE

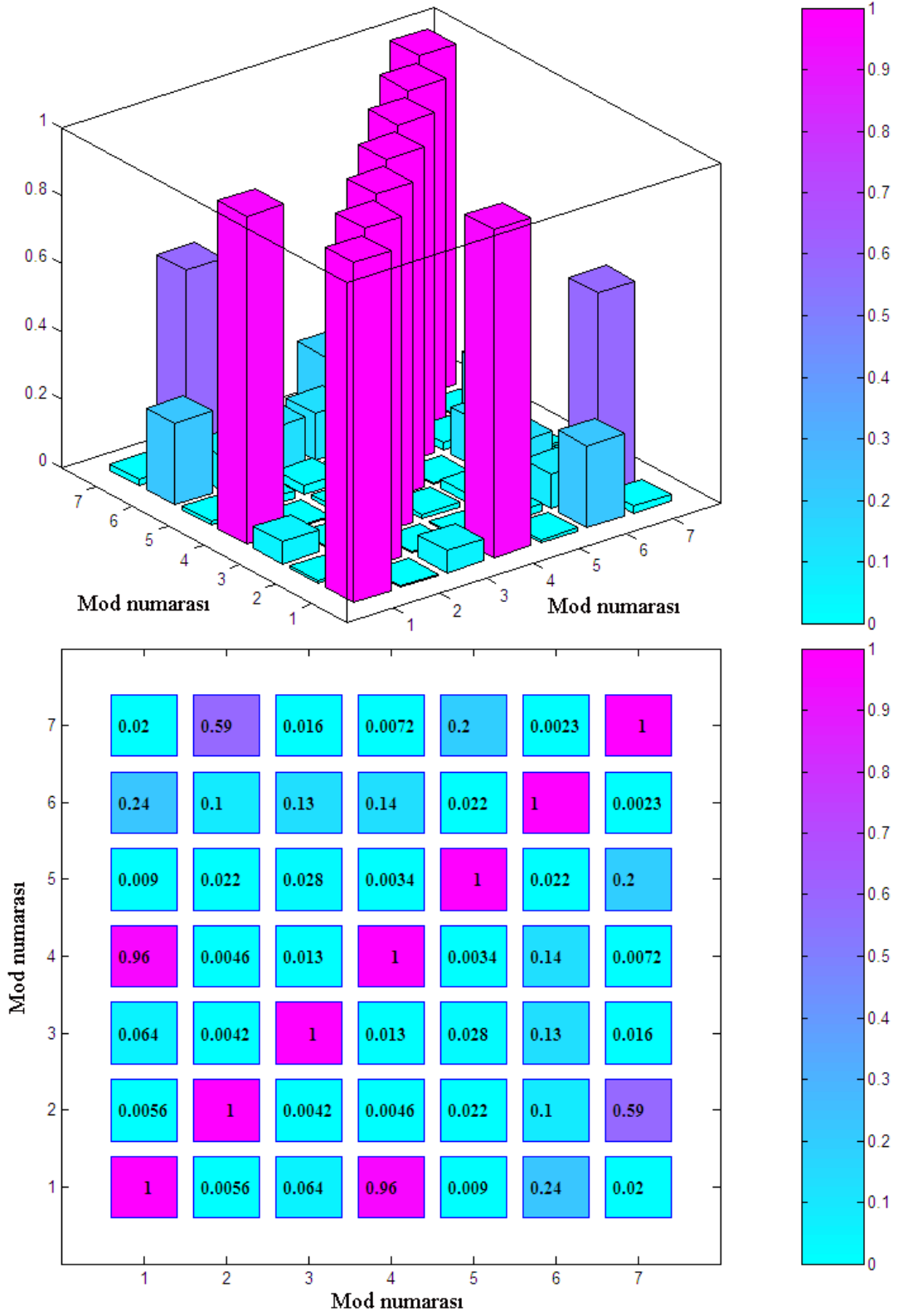
Üç boyutlu çerçevenin, etki tepki modal analizi sonucunda Kompleks Eksponansiyel Yöntemi kullanılarak belirlenen mod şekilleri Şekil 3.29'da gösterildiği gibi olur. Burada hesaplanan mod şekillerinin birbirleri ile uyumunu gösteren üç boyutlu ve iki boyutlu MAC grafikleri Şekil 3.30'da verilmektedir. Şekil 3.31'de ise her bir modal vektörün modal faz doğruduşluk grafikleri gösterilmektedir. Burada 3. ve 6. moda ait MPC grafiklerinde doğrusallıktan sapmalar görülmekte, MPC değerlerinin de sayısal olarak düşük oldukları görülmektedir.

Kompleks eksponansiyel yönteminde, hesaplanan modal parametrelerin kontrolünde, bilinen yöntemlerin dışında, modların stabilitesini gösteren stabilite diyagramları kullanılmaktadır. Kompleks Eksponansiyel Yönteminde spektral mod gösterge fonksiyonu üzerinde model derecesine kadar tarama yapılır ve başlangıçtan itibaren stabil olan ve olmayan noktalar belirlenir. Mavi renkler stabil olan frekans ve modal vektörleri, kırmızı renkler ise stabil olmayan frekans ve modal vektörleri göstermektedir. Stabil olan noktaların düzgün bir hat oluşturduğu yerlerde modlar bulunmaktadır. Stabilite diyagramlarında maksimum model derecesi artırıldıkça nokta tarama hassasiyeti artar. Şekil 3.32'de model derecesi 25, 50 ve 100 için üretilmiş olan stabilite diyagramları gösterilmektedir. Stabilite diyagramlarının olduğu eksene frekans davranış fonksiyonlarından hesaplanan sistemin kompleks mod gösterge fonksiyonu çizilmiştir. Stabilite diyagramları incelendiği zaman 7 ana mod belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu da Kompleks Eksponansiyel Yöntemi ile belirlenen modların doğruluğunu göstermektedir. Model derecesi artırıldıkça stabilite diyagramları karmaşık hale gelmektedir. Modların olduğu hatlar üzerinde ara sıra görülen stabil olmayan simgeler, ölçüm sırasındaki ses ve parazitlerden kaynaklanmaktadır.

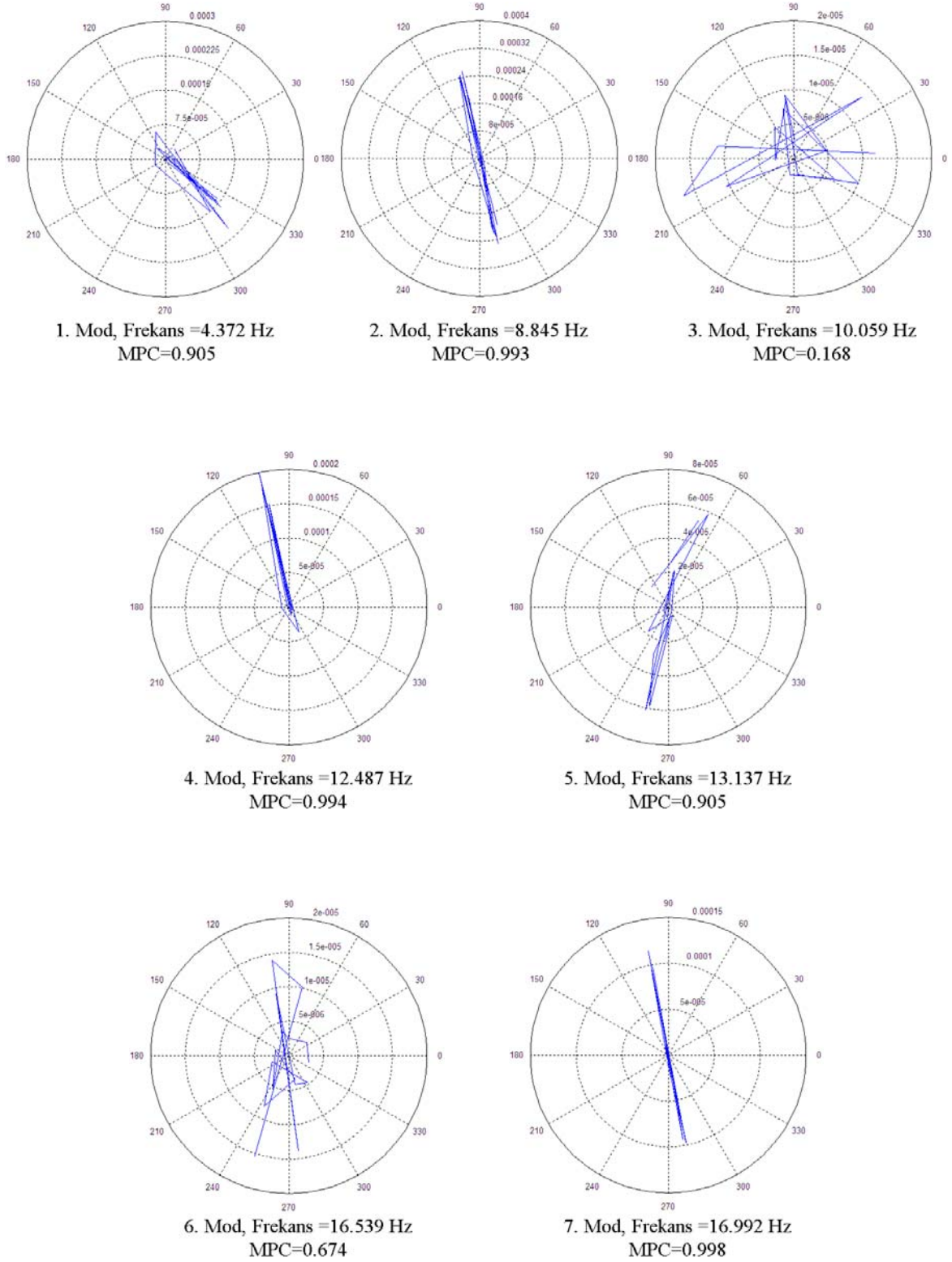
Kompleks Eksponansiyel Yönteminde, yapılan hesapların kontrolünde kullanılan bir diğer yöntem, frekans davranış fonksiyonlarının karşılaştırmalı analizleridir. Ölçümlerden elde edilen ham verilerin işlenmesi ile elde edilen deneysel FRF'ler ile hesaplar sonucu bulunan kalıntı ve kutuplardan geri dönüşüm yapılarak üretilmiş olan teorik FRF'ler arasındaki tutarlılık ve uyum, sonuçların doğruluğu ile beraber yapılan ölçümün kalitesi hakkında bizlere bir fikir verir. Şekil 3.33-Şekil 3.38'de, üç boyutlu çelik çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinden alınan sinyallere bağlı olarak her bir kanal için hesaplanan deneysel frekans davranış fonksiyonlarının, belirlenen kalıntı ve kutuplar kullanılarak sentezlenen frekans davranış fonksiyonları ile karşılaştırmaları yer almaktadır.



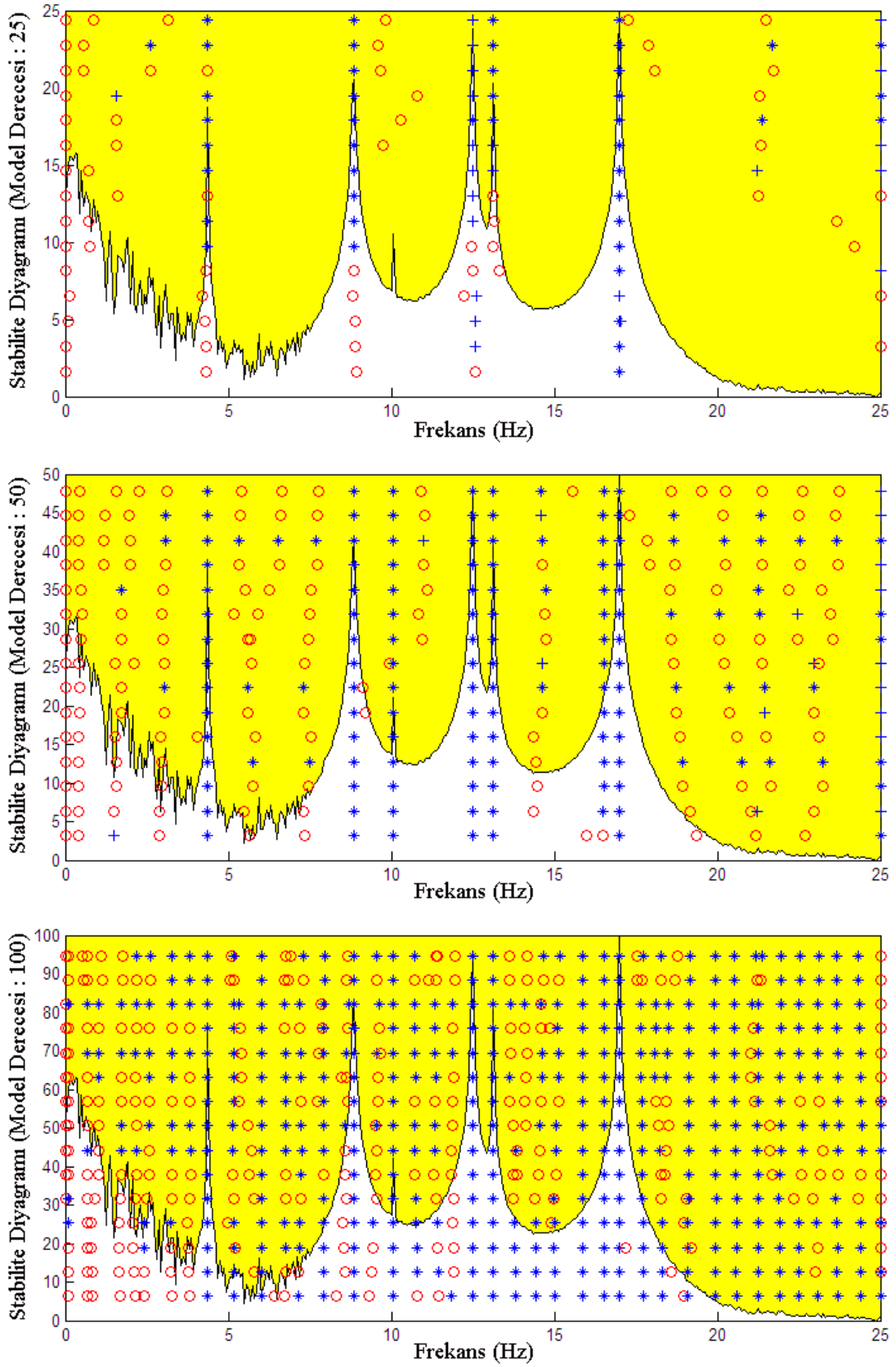
Şekil 3.29. Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri



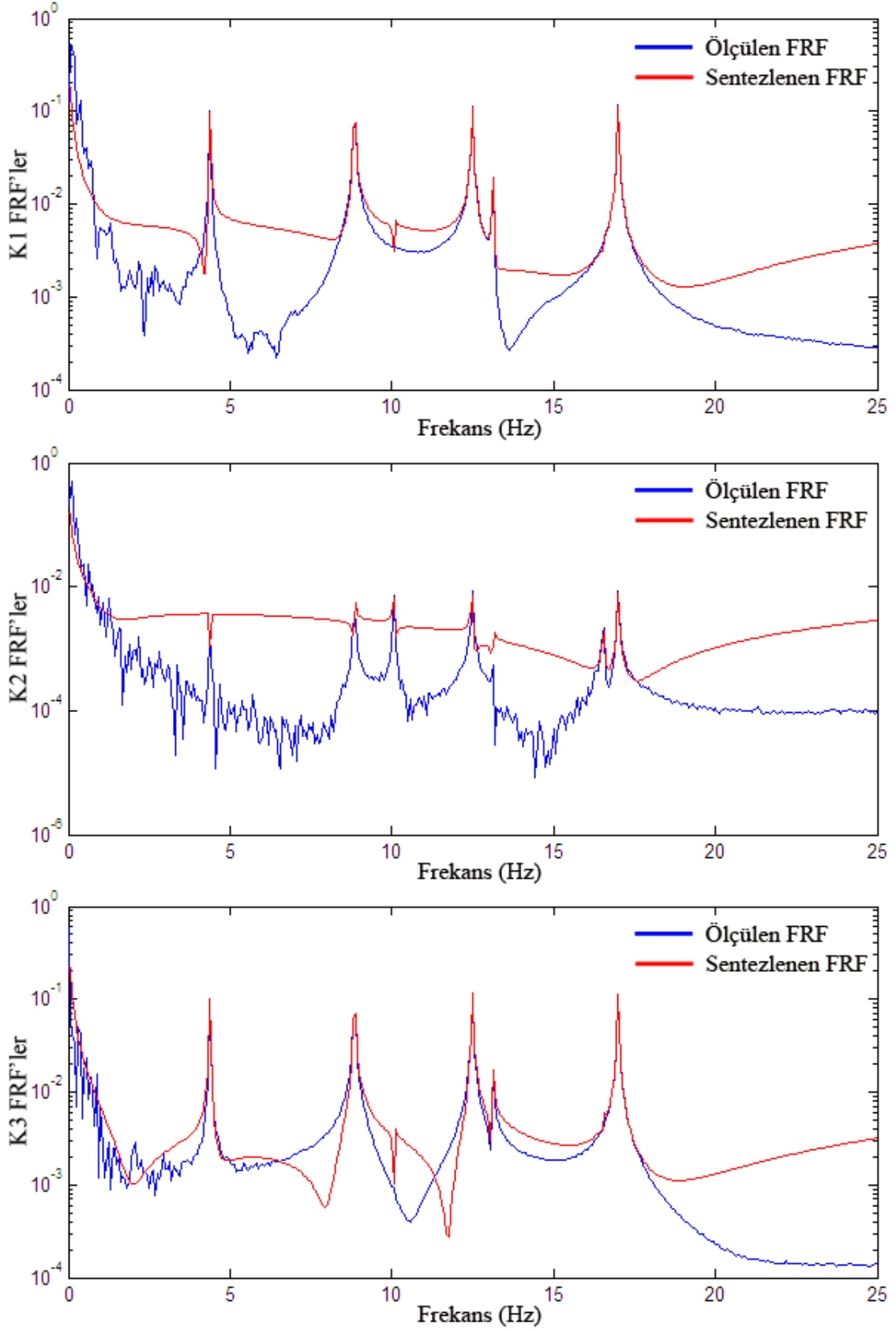
Şekil 3.30. Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri



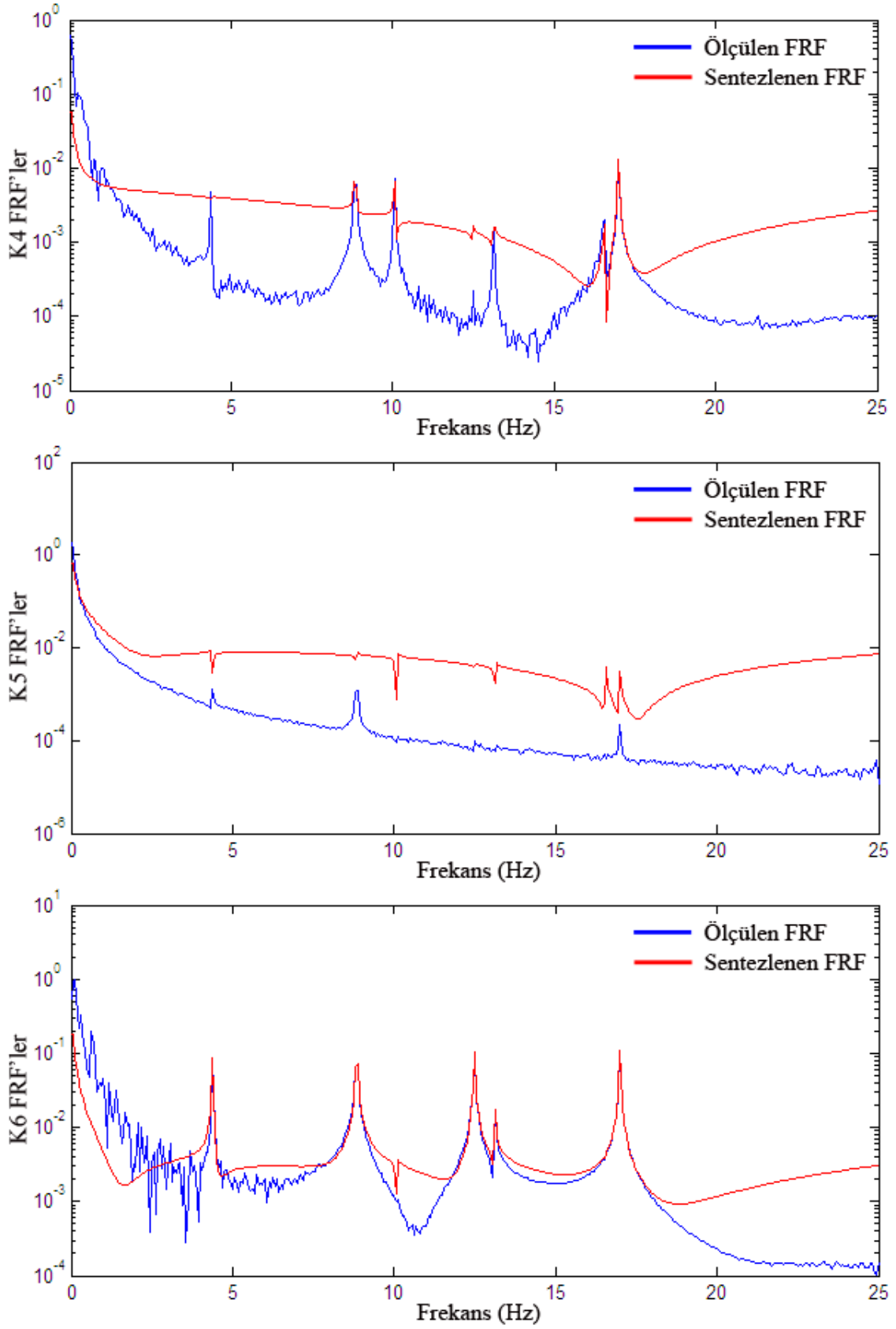
Şekil 3.31. Modelin etki tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri



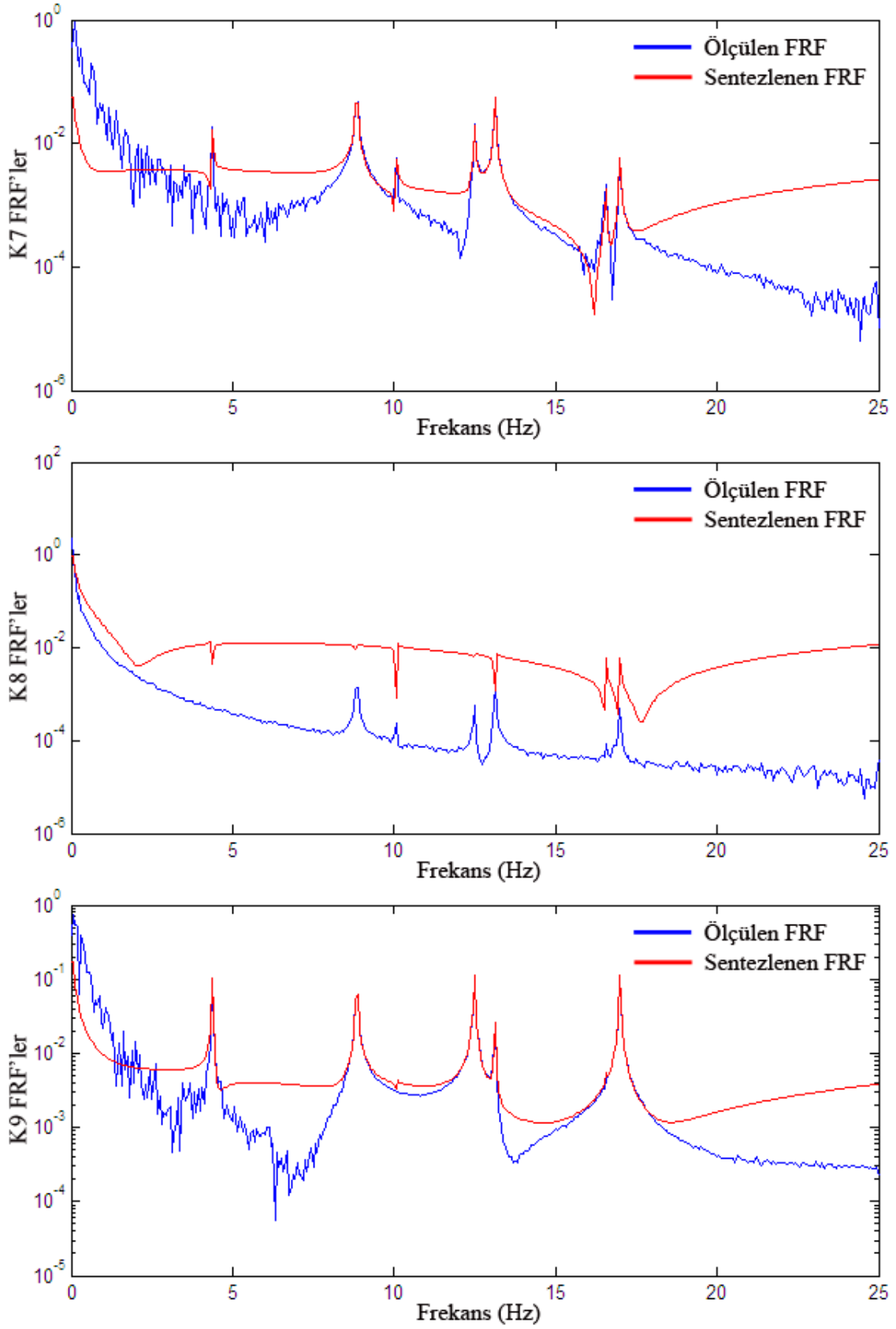
Şekil 3.32. Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 100 olması durumunda CE Yöntemi ile elde edilen stabilite diyagramları



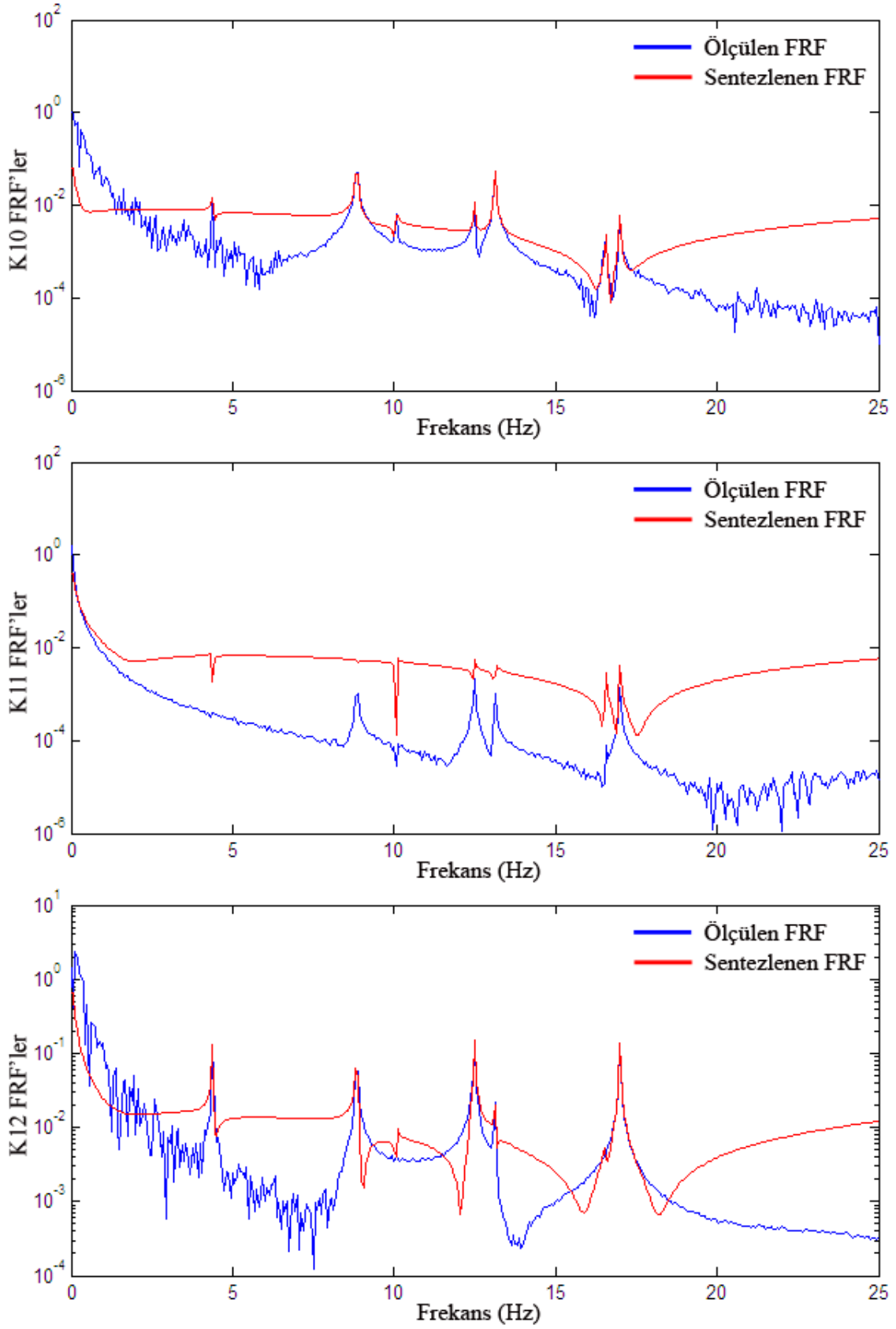
Şekil 3.33. Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 1, 2 ve 3 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



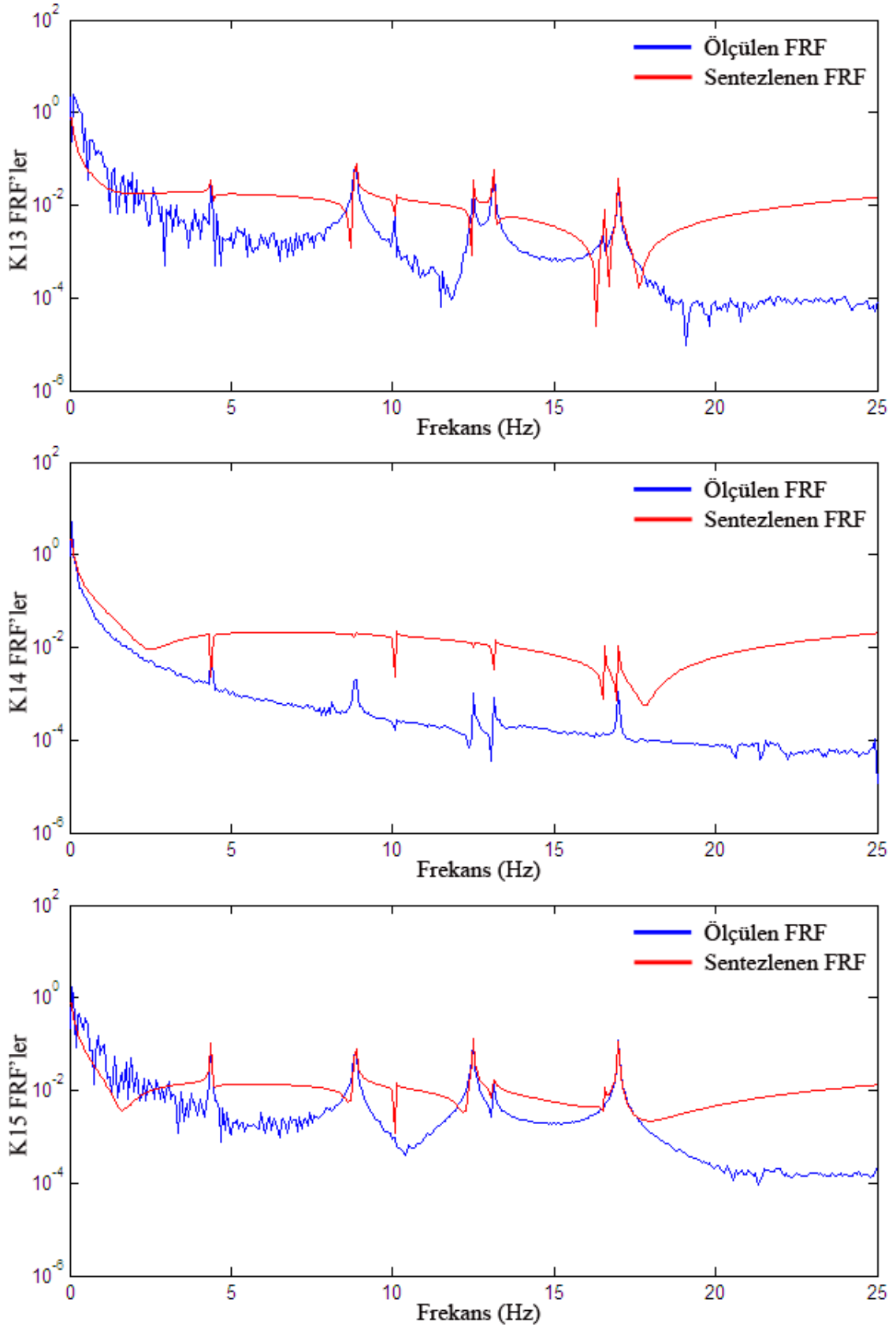
Şekil 3.34. Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 4, 5 ve 6 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



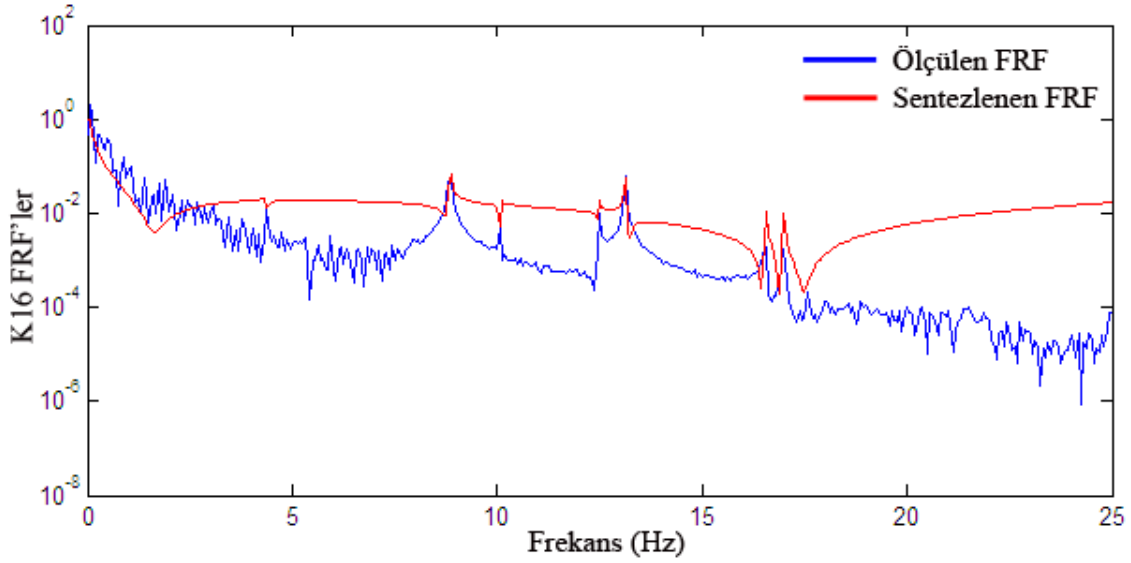
Şekil 3.35. Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



Şekil 3.36. Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 10, 11 ve 12 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



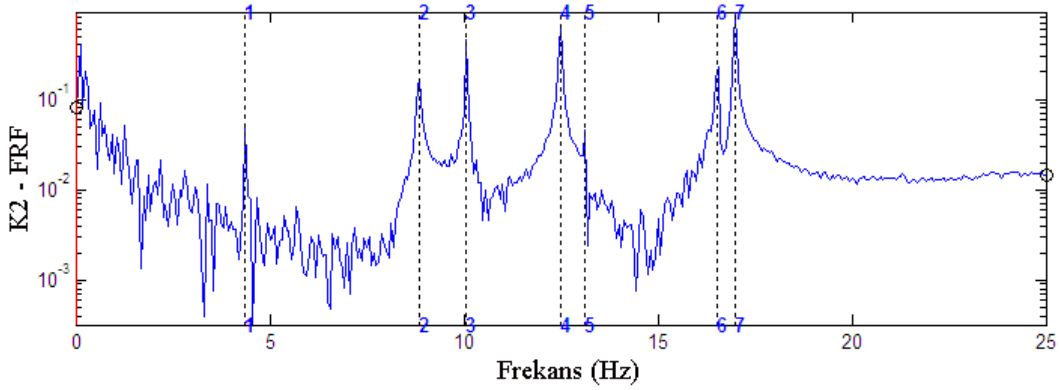
Şekil 3.37. Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 13, 14 ve 15 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



Şekil 3.38. Modelin CE Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 16 numaralı kanal için üretilen teorik FRF ile deney sonucu elde edilen FRF

3.1.1.1.3.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi ile analiz yapılırken Kompleks Eksponansiyel Yönteminde olduğu gibi öncelikle sistemin maksimum model derecesi seçilir. Burada yapılan ön değerlendirmelerde, stabilite diyagramlarında model derecesi 50'den sonrası için tepe noktalarının olduğu noktalarda dengenin sağlandığı görülmüştür. Buna bağlı olarak bu model derecesinin üzerinde bir seçim ile analiz yapıldığında sonuçlar arasında çok fazla değişiklik görülmeyecektir. Model derecesi 200 olarak seçildikten sonra, bütün modların yer aldığı FRF grafiklerinden birisi üzerinde tepe noktalarının seçimi yapılır. Şekil 3.39'da, 2 numaralı kanala ait frekans davranış fonksiyonu gösterilmektedir. Burada hesaplanan dinamik karakteristiklere karşılık gelen frekans ve bu frekansların spektrumdaki konumları gösterilmektedir. Zorlanmış titreşim deneyi yapılan üç boyutlu çerçevenin Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi kullanılarak hesaplanan dinamik karakteristikleri Tablo 3.3'de gösterilmektedir. Üç boyutlu çerçevenin, etki tepki deneysel modal analizi sonucunda Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi kullanılarak belirlenen mod şekilleri Şekil 3.40'da gösterildiği gibidir. Burada hesaplanan mod şekillerinin birbirleri ile uyumunu gösteren üç boyutlu ve iki boyutlu MAC grafikleri Şekil 3.41'de verilmektedir. Şekil 3.42'de ise her bir modal vektörün MPC grafikleri gösterilmektedir. Burada görülen 3. ve 6. modlara ait MPC değerleri diğer modlara göre düşüktürler.

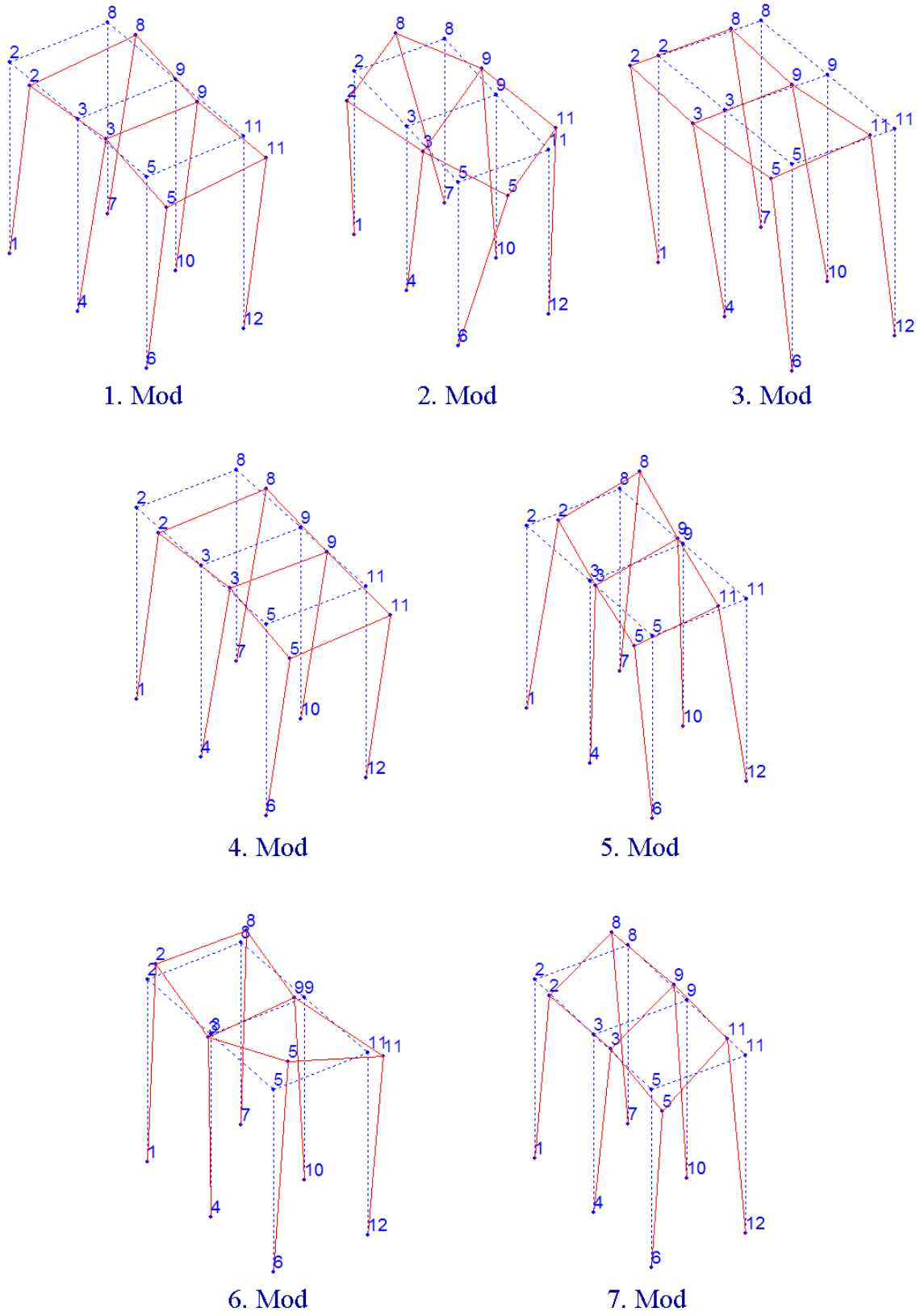


Şekil 3.39. Modelin etki tepki modal analizine göre PTD yöntemi ile belirlenen modların kanal 2 FRF spektrumu üzerindeki konumları

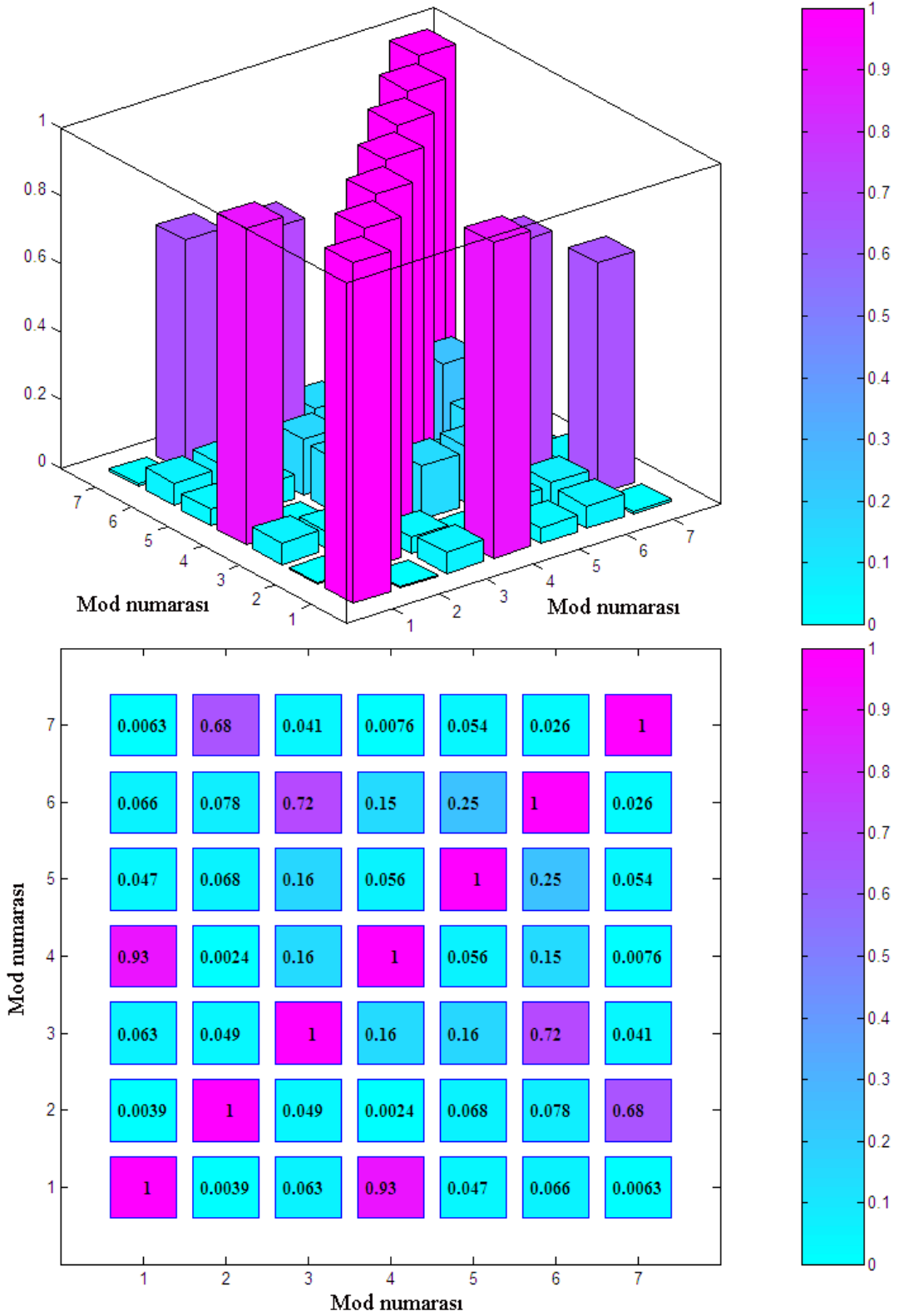
Tablo 3.3. Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Yöntem
1	4.368	0.176	PTD
2	8.845	0.143	PTD
3	10.069	0.049	PTD
4	12.487	0.091	PTD
5	13.135	0.062	PTD
6	16.539	0.026	PTD
7	16.991	0.069	PTD

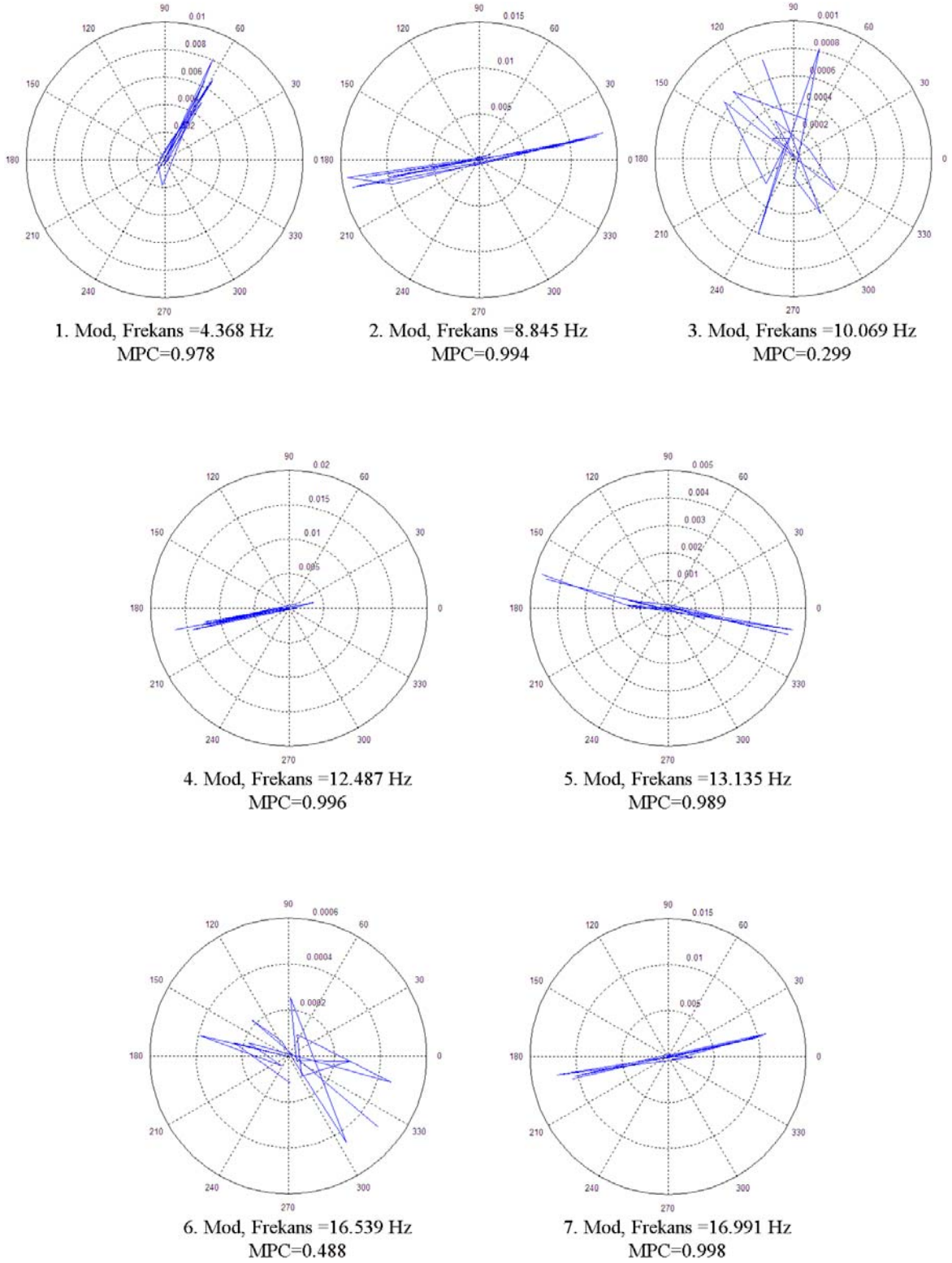
Çokreferanslı zaman ortamı yönteminde, hesaplanan modal parametrelerin kontrolünde modların stabilitesini gösteren stabilite diyagramları kullanılmaktadır. Spektral mod gösterge fonksiyonu üzerinde model derecesine kadar tarama yapılır ve başlangıçtan itibaren stabil olan ve olmayan noktalar belirlenir. Mavi renkli simgeler stabil olan frekans ve mod şekli, kırmızı renkli olanlar ise stabil olmayan frekans ve mod şekillerini göstermektedir. Stabil olan noktaların düzgün bir hat oluşturduğu yerlerde modlar bulunmaktadır. Stabilite diyagramlarında maksimum model derecesi artırıldıkça nokta tarama hassasiyeti artar. Şekil 3.43’de model derecesi 25, 50 ve 75 için, Şekil 3.44’de model derecesi 100, 150 ve 200 için stabilite diyagramları çizilmiştir. Stabilite diyagramları incelendiği zaman yedi mod belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Buda PTD Yöntemi ile belirlenen modların doğruluğunu göstermektedir.



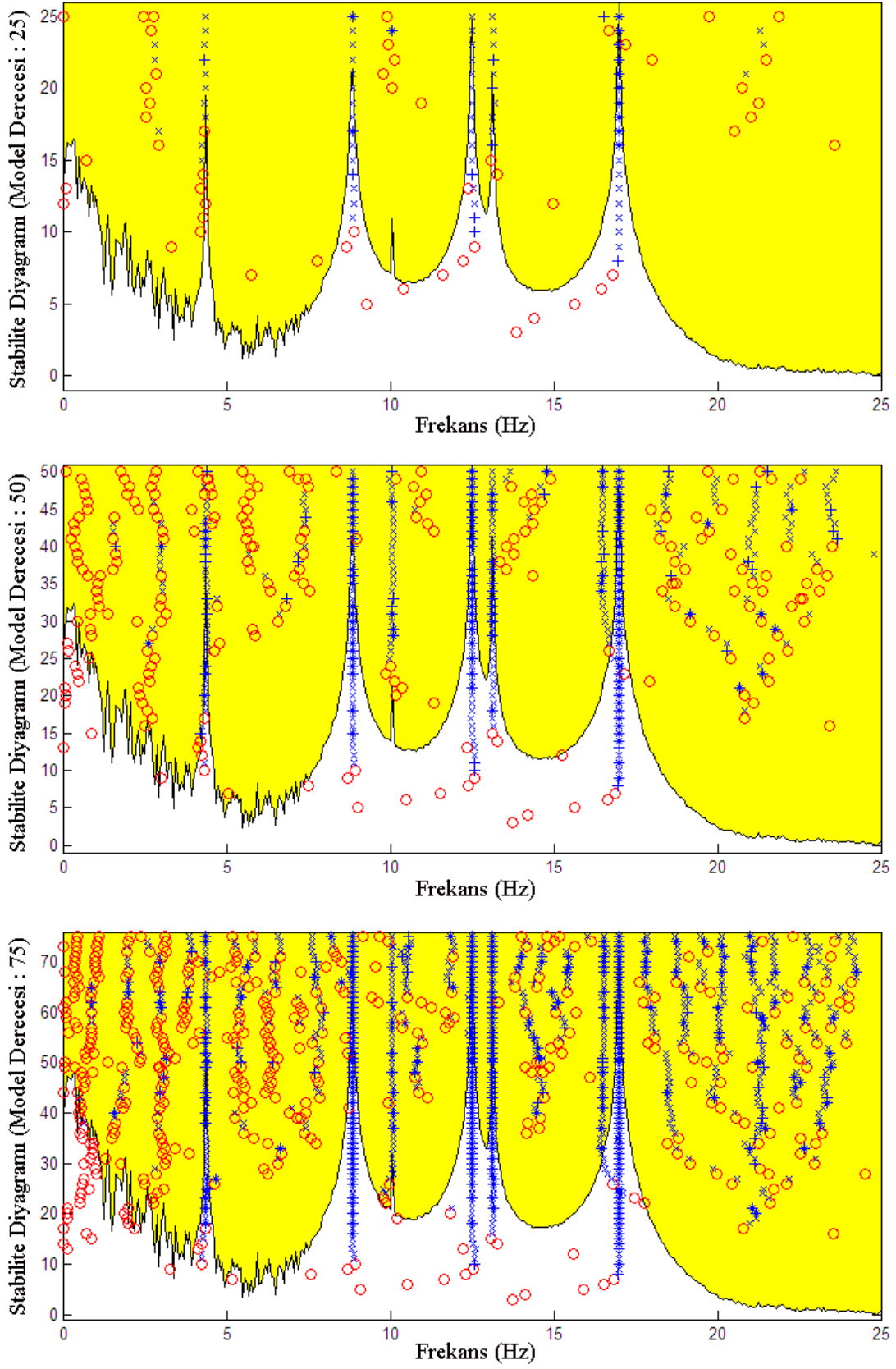
Şekil 3.40. Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri



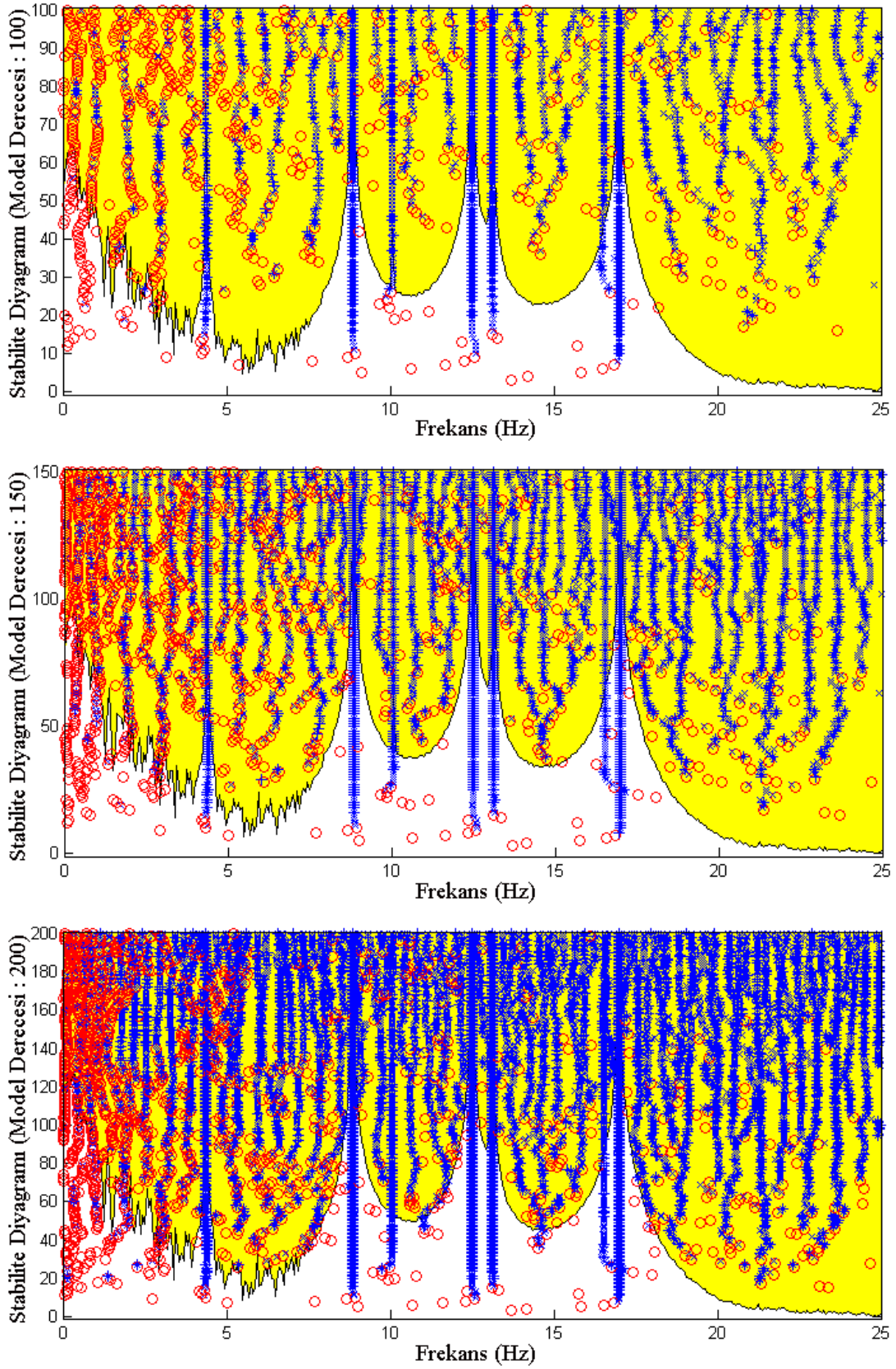
Şekil 3.41. Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri



Şekil 3.42. Modelin etki tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri

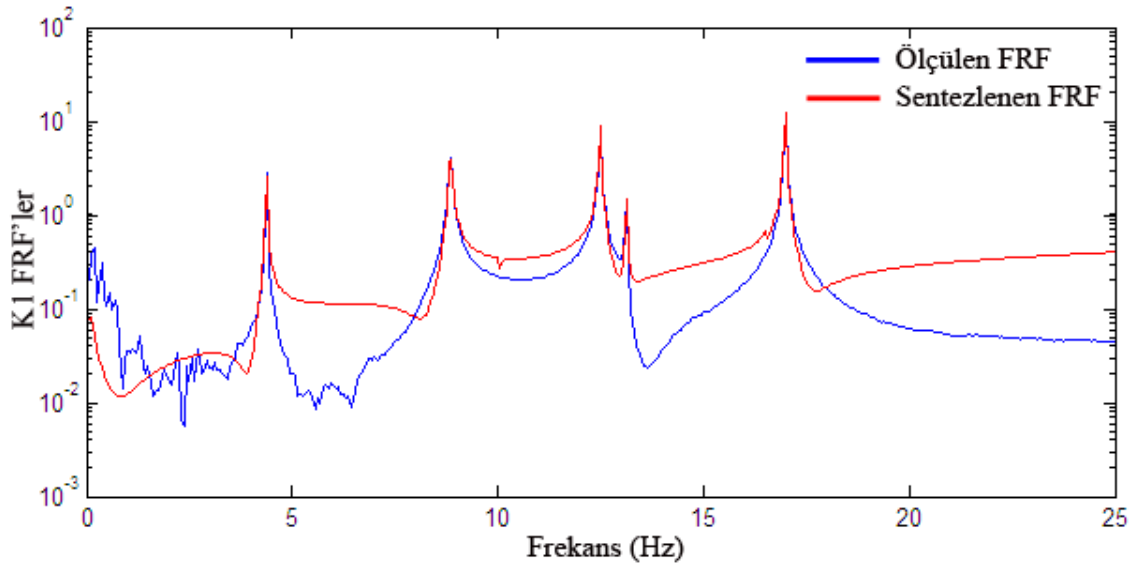


Şekil 3.43. Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 100 olması durumunda PTD Yöntemi ile elde edilen stabilite diyagramları

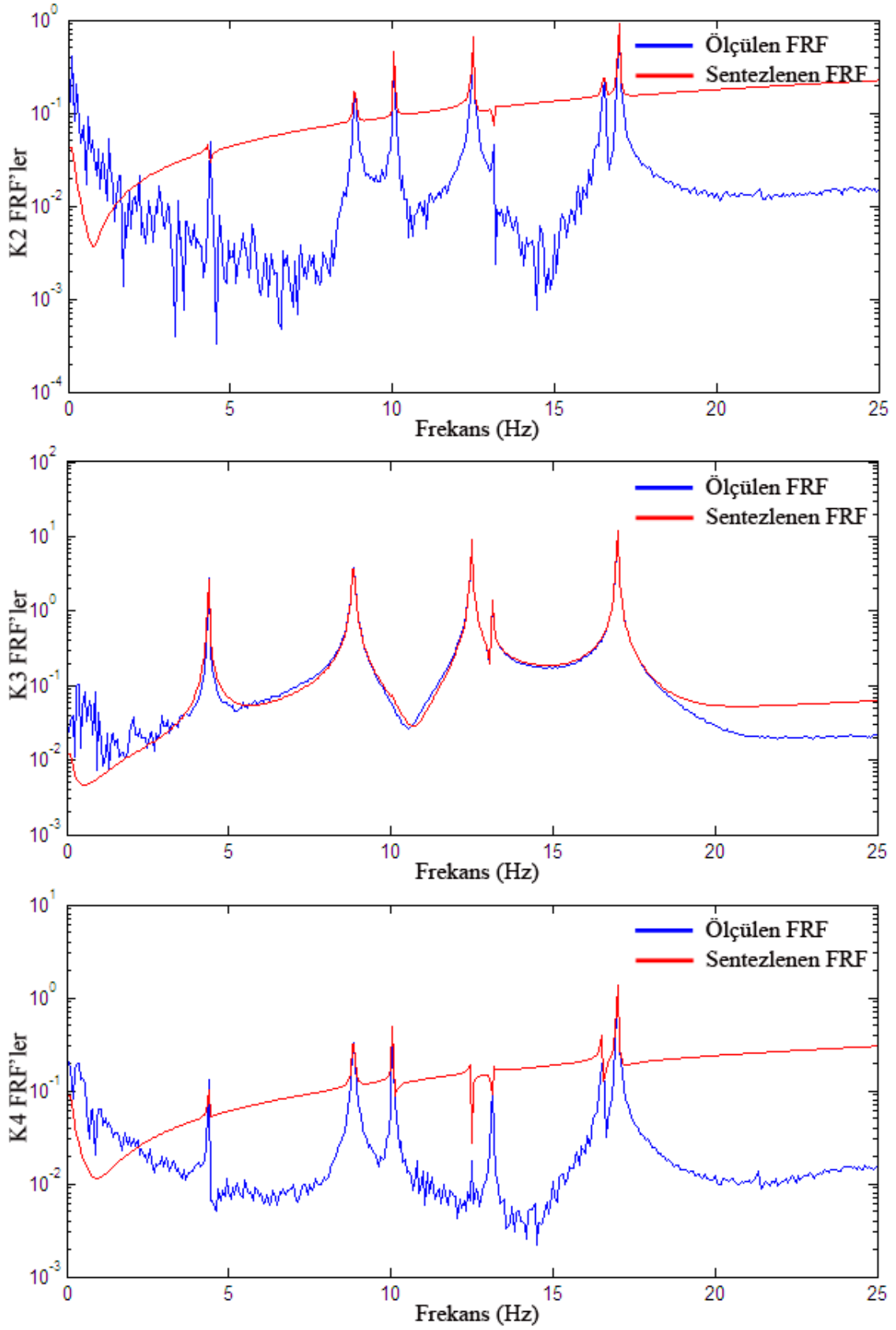


Şekil 3.44. Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 100, 150 ve 200 olması durumunda PTD Yöntemi ile elde edilen stabilite diyagramları

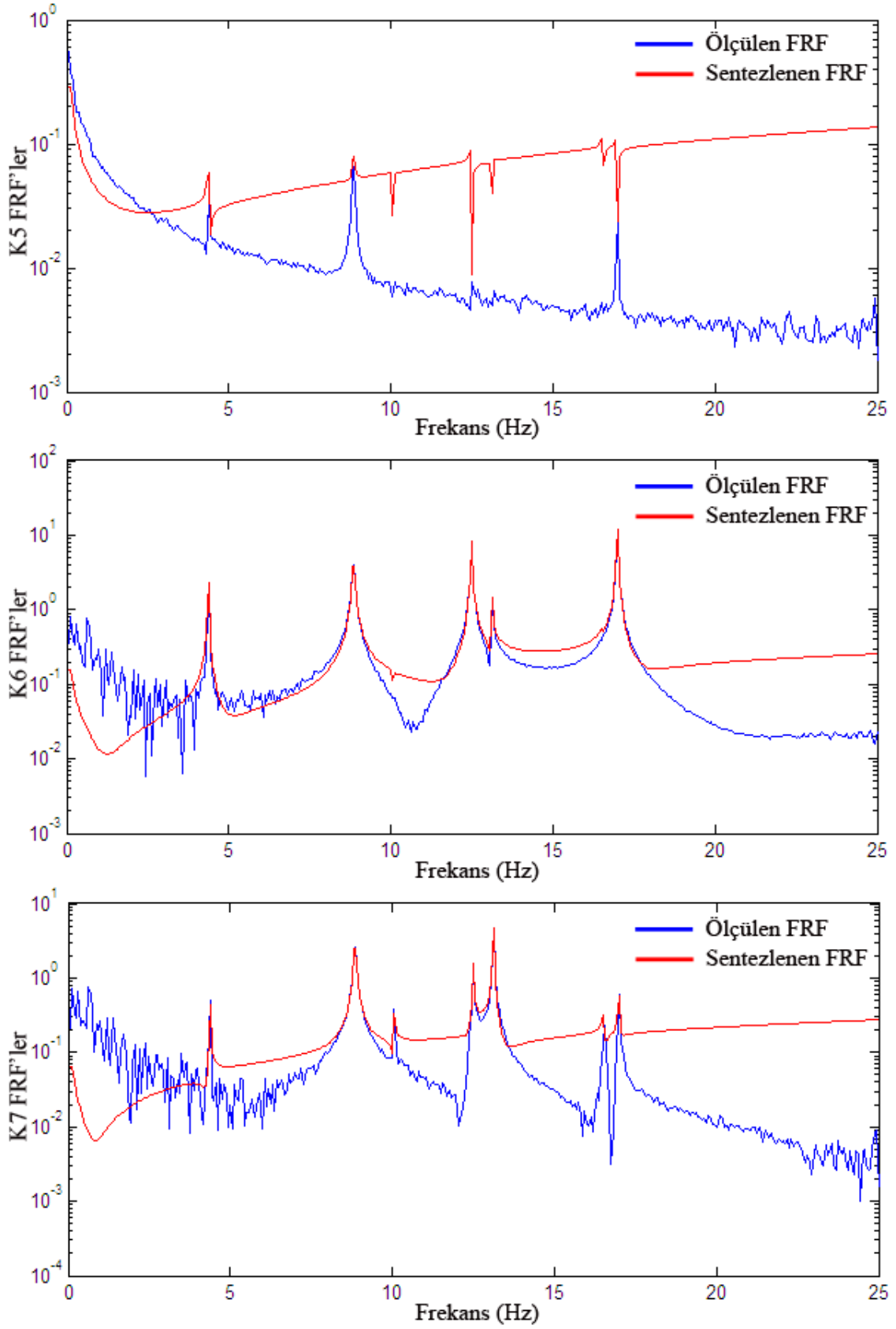
Çokreferanslı Zaman Ortamı Yönteminde yapılan hesapların kontrolünde kullanılan bir diğer yöntem, FRF'lerin karşılaştırmalı analizleridir. Ölçümlerden elde edilen ham verilerin işlenmesi ile elde edilen deneysel FRF'ler ile Çokreferanslı Zaman Ortamı Yönteminde hesaplanan kutup ve kalıntıların analizi ile üretilmiş olan teorik FRF'ler arasındaki tutarlılık ve uyum, sonuçların doğruluğu ve ölçüm sonuçlarının hassasiyeti hakkında bir fikir verir. Şekil 3.45-Şekil 3.50'de, üç boyutlu çelik çerçeve modelinin zorlanmış titreşim deneyinde ölçümlerin alınmasında kullanılan her bir kanala ait deneysel FRF'lerin, Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi kullanılarak sentezlenen frekans davranış fonksiyonları ile karşılaştırmaları yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde sonuçlar arasındaki bir uyum görülmektedir. Spektrumlar arasında belirli farklılıklar olmasına rağmen tepe noktalarının aynı konumlarda olmaları, frekansların aynı şekilde bulunacağını göstermektedir. Spektrumların rölatif davranışlarının benzerliği de mod şekillerinin aynı şekilde bulunacağını göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir ayrıntı, FRF'lerin ivme kayıtlarına göre değil, hız kayıtlarına göre karşılaştırılmasıdır. Deneysel olarak bulunan FRF ivme formatından hız formatına dönüştürülür, teorik olarak üretilen FRF ise doğrudan hız formatında hesaplanır.



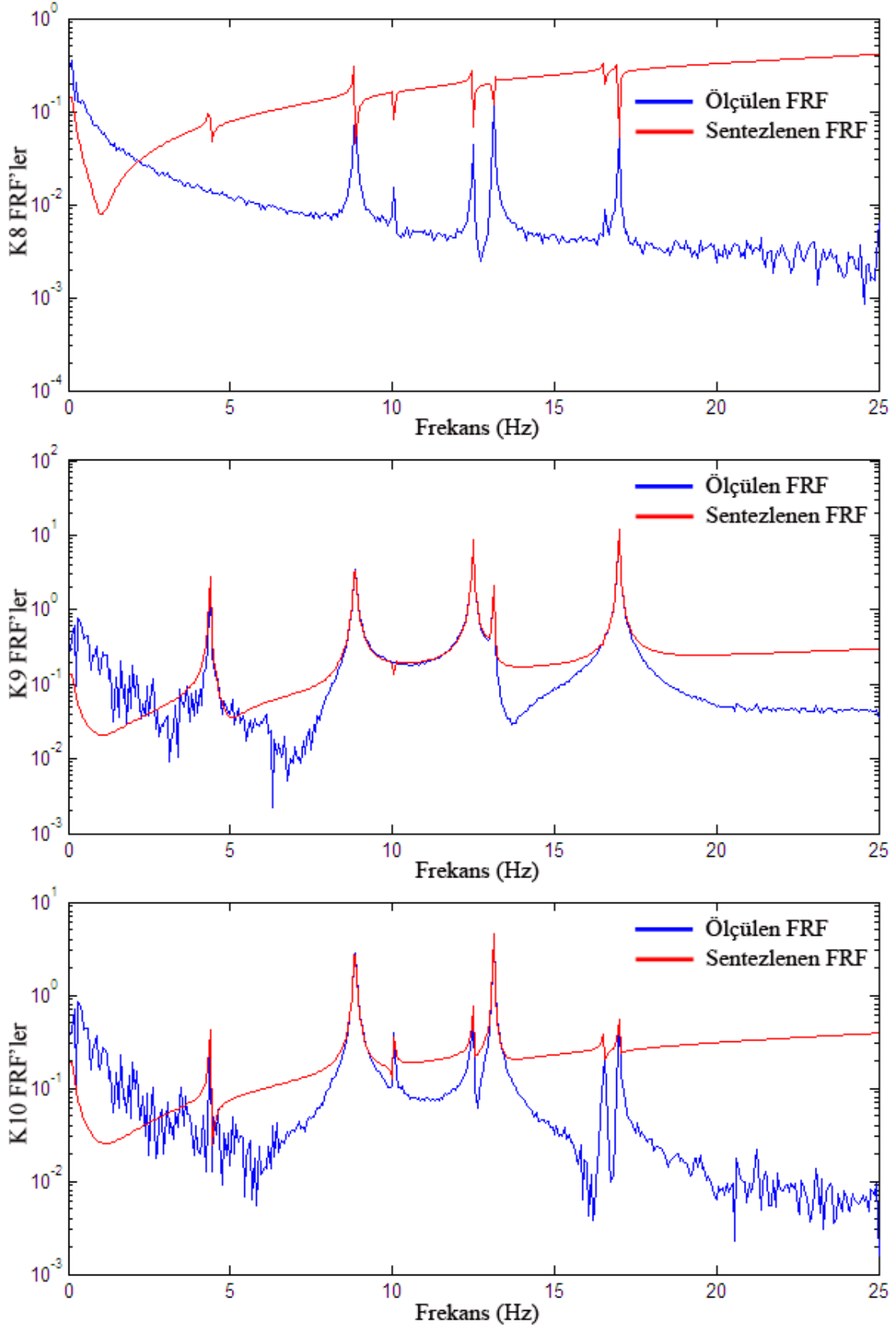
Şekil 3.45. Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 1 numaralı kanal için üretilen teorik FRF ile deney sonucu elde edilen FRF



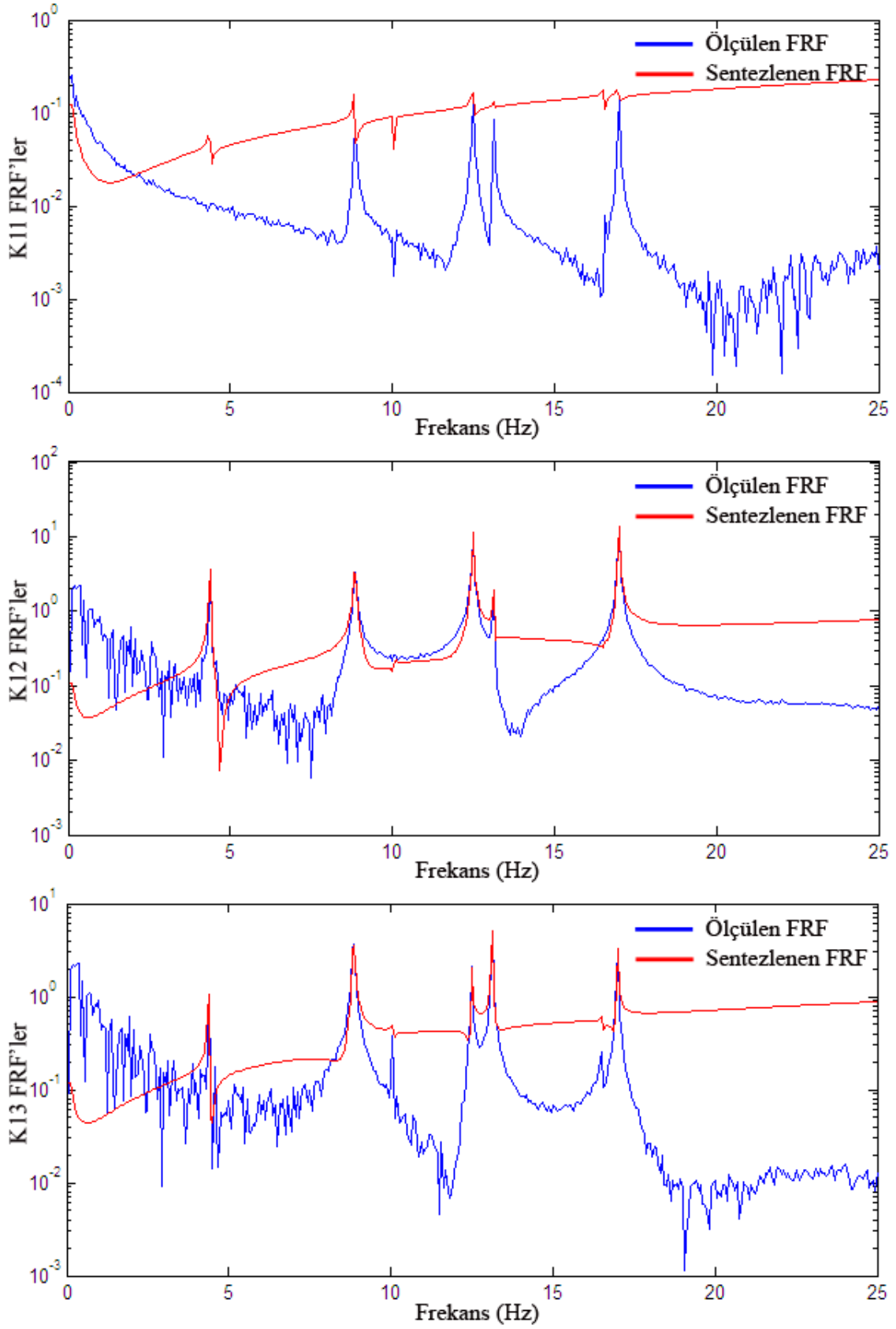
Şekil 3.46. Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 2, 3 ve 4 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



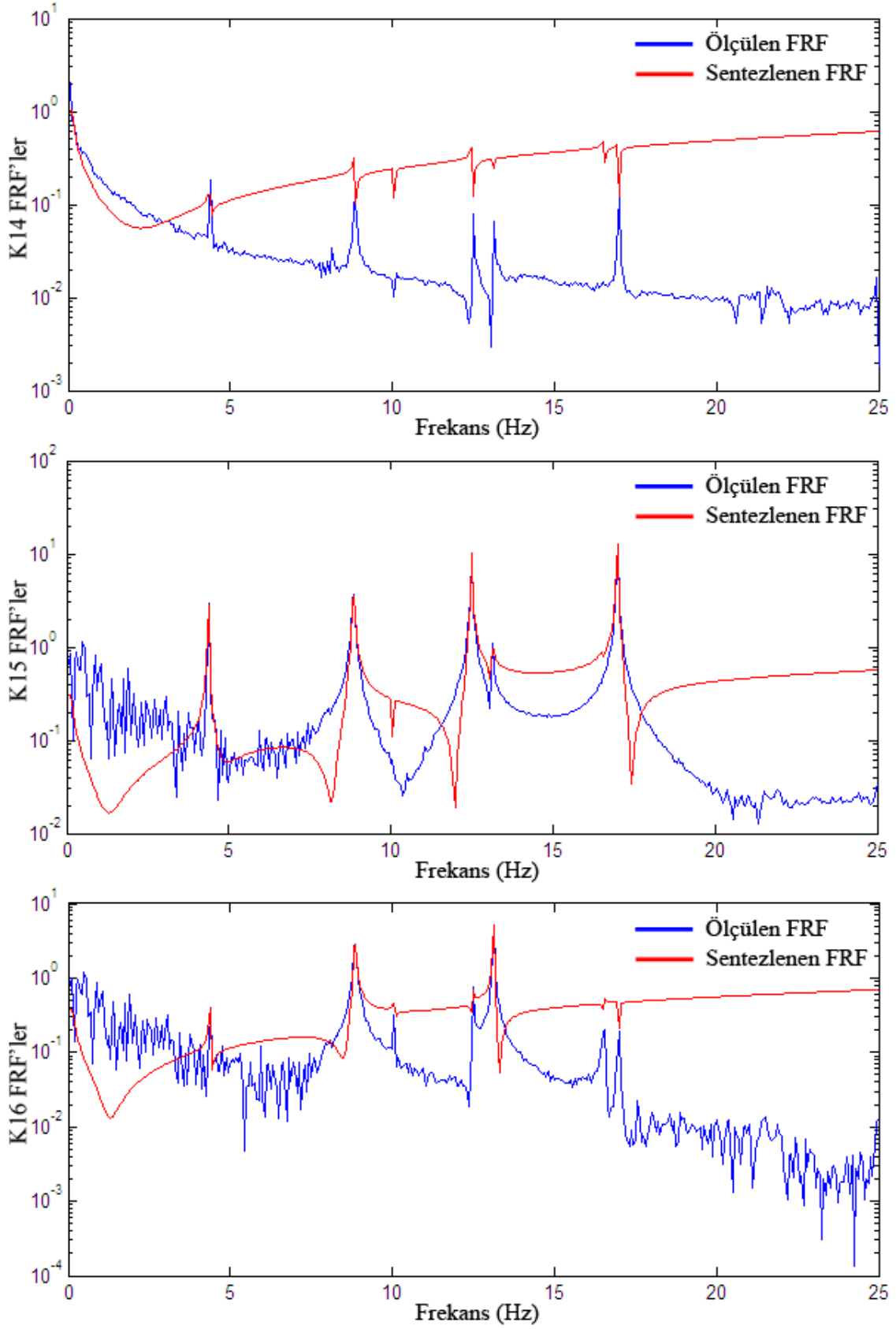
Şekil 3.47. Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 5, 6 ve 7 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



Şekil 3.48. Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 8, 9 ve 10 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler



Şekil 3.49. Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 11, 12 ve 13 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler

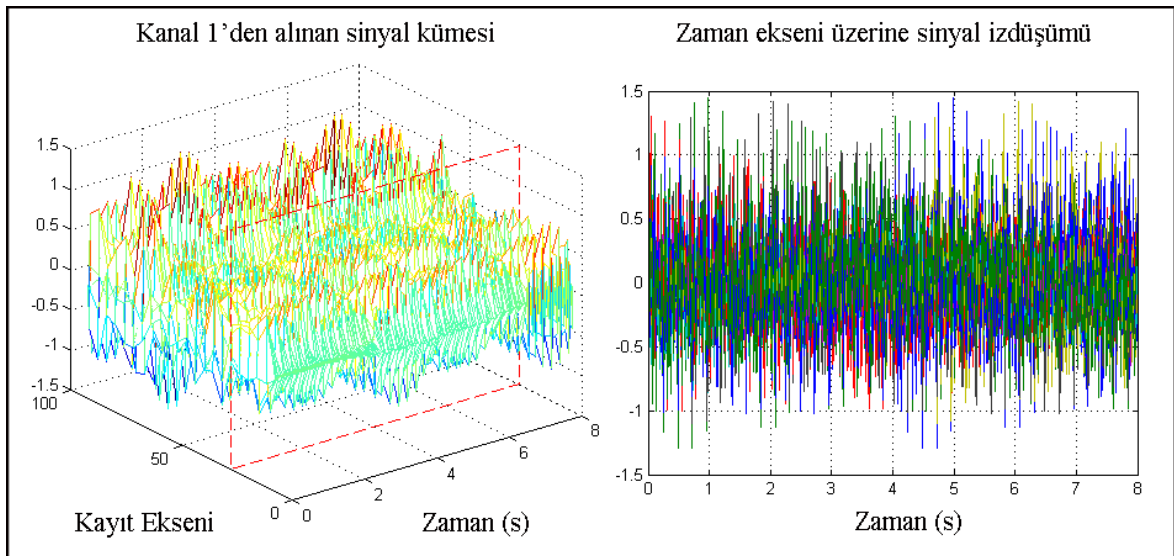


Şekil 3.50. Modelin PTD Yöntemi ile etki tepki modal analizinde 14, 15 ve 16 numaralı kanallar için üretilen teorik FRF'ler ile deney sonucu elde edilen FRF'ler

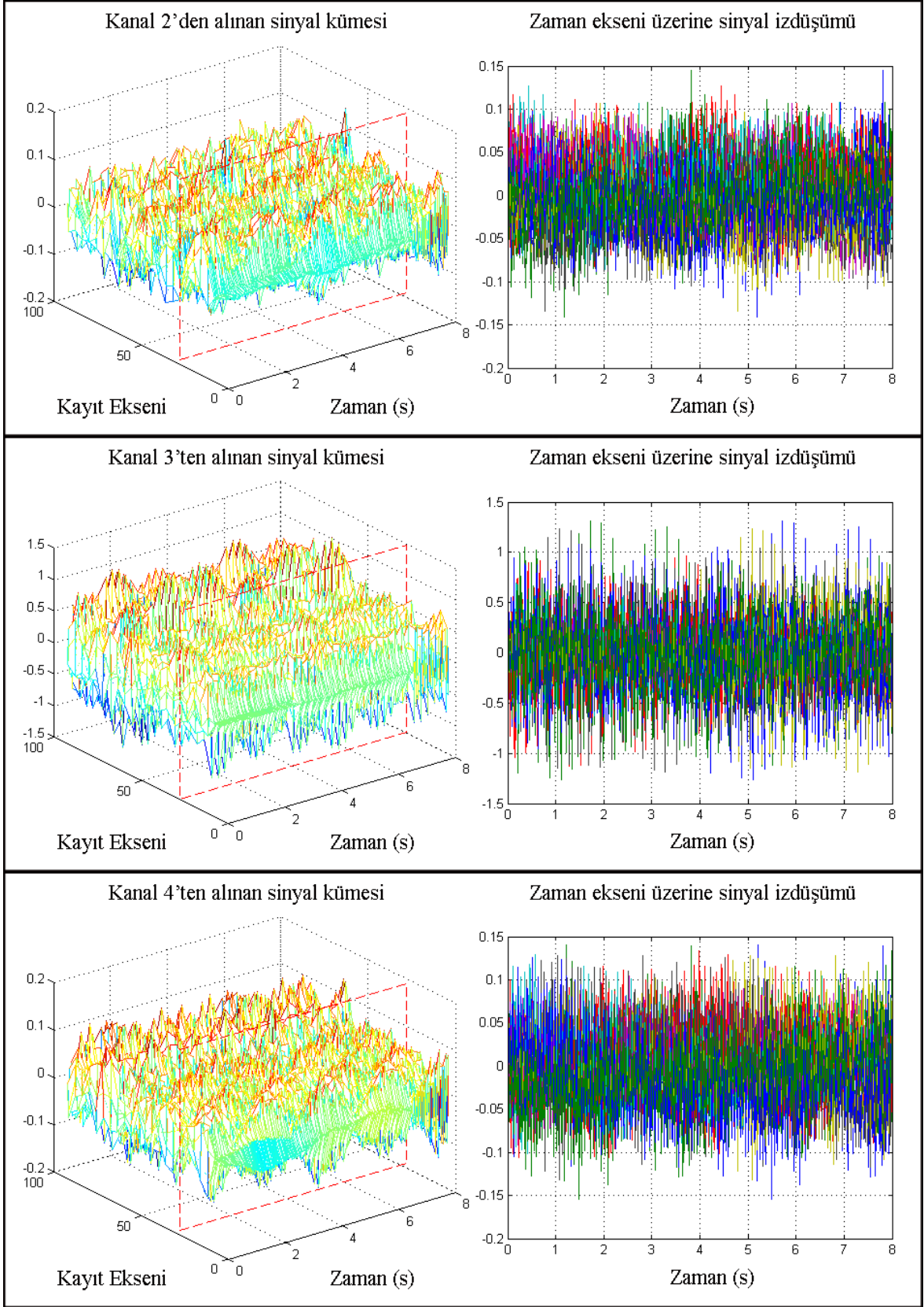
3.1.1.2. Modelin Operasyonel (Sadece Tepki) Modal Analizi

3.1.1.2.1. Model Üzerinde Çevresel Titreşim Deneyi Yapılması ve Sinyallerin Toplanması

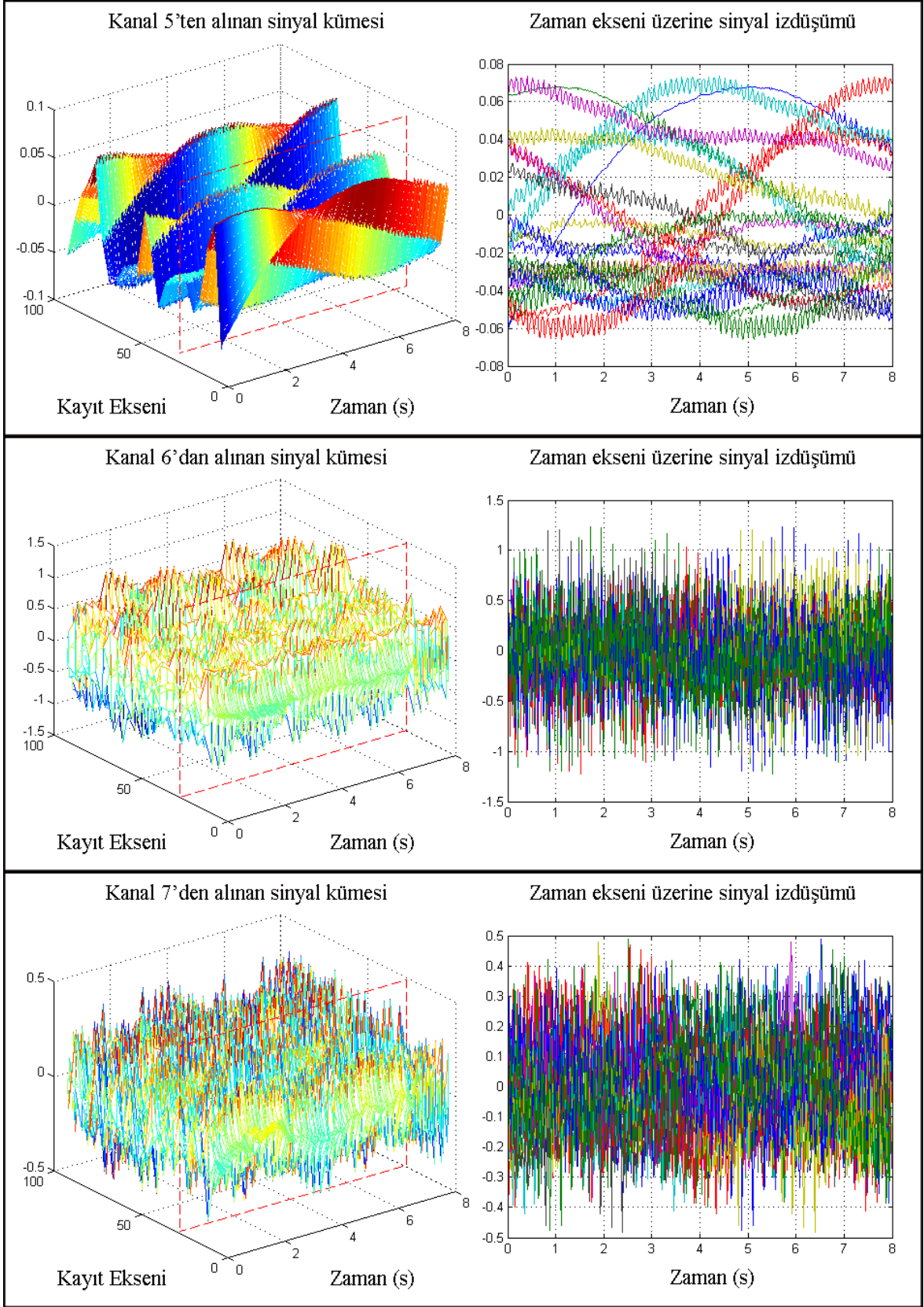
Üç boyutlu çerçeve modelinin üzerine yerleştirilmiş olan ölçüm kanallarının kayıt numaraları Şekil 3.1’de görüldüğü gibidir. Sadece tepki modal analizinde, etki tepki modal analizinde kullanılan aynı kanallar ve numaralar kullanılmıştır. Etki tepki modal analizi ile sadece tepki modal analizi arasındaki fark, birinde etki ölçülürken diğerinde etki ölçülmemekte ya da ölçülememektedir. Sadece tepki modal analizinde bir diğer deyişle çevresel titreşim deneyi ile yapılan deneysel modal analizde, belirli bir süre boyunca çevreden gelen her türlü titreşim, ses, gürültü vb. den dolayı ivmeölçerlerde meydana gelen titreşimler kayıt altına alınır. Bu kayıt süresi boyunca, her kanal için zamana bağlı spektrum serileri oluşturulur. Şekil 3.51 - Şekil 3.56’da üç boyutlu çelik çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinde ölçüm kanallarından alınan sinyal kayıtları üç boyutlu ve iki boyutlu olarak gösterilmektedir. Çevresel titreşim deneyinde, belirsiz etkiler altında kayıt yapıldığından dolayı kayıt süresi uzatılır ve sürekli kayıt alınır. Böylelikle toplanan kayıtlardan olumsuz etkiye sahip olanlar çıkarılır, geriye kalan sinyal kümelerine Tekil Değer Ayırıştırması uygulanarak kanalları temsil eden spektrumlar elde edilir.



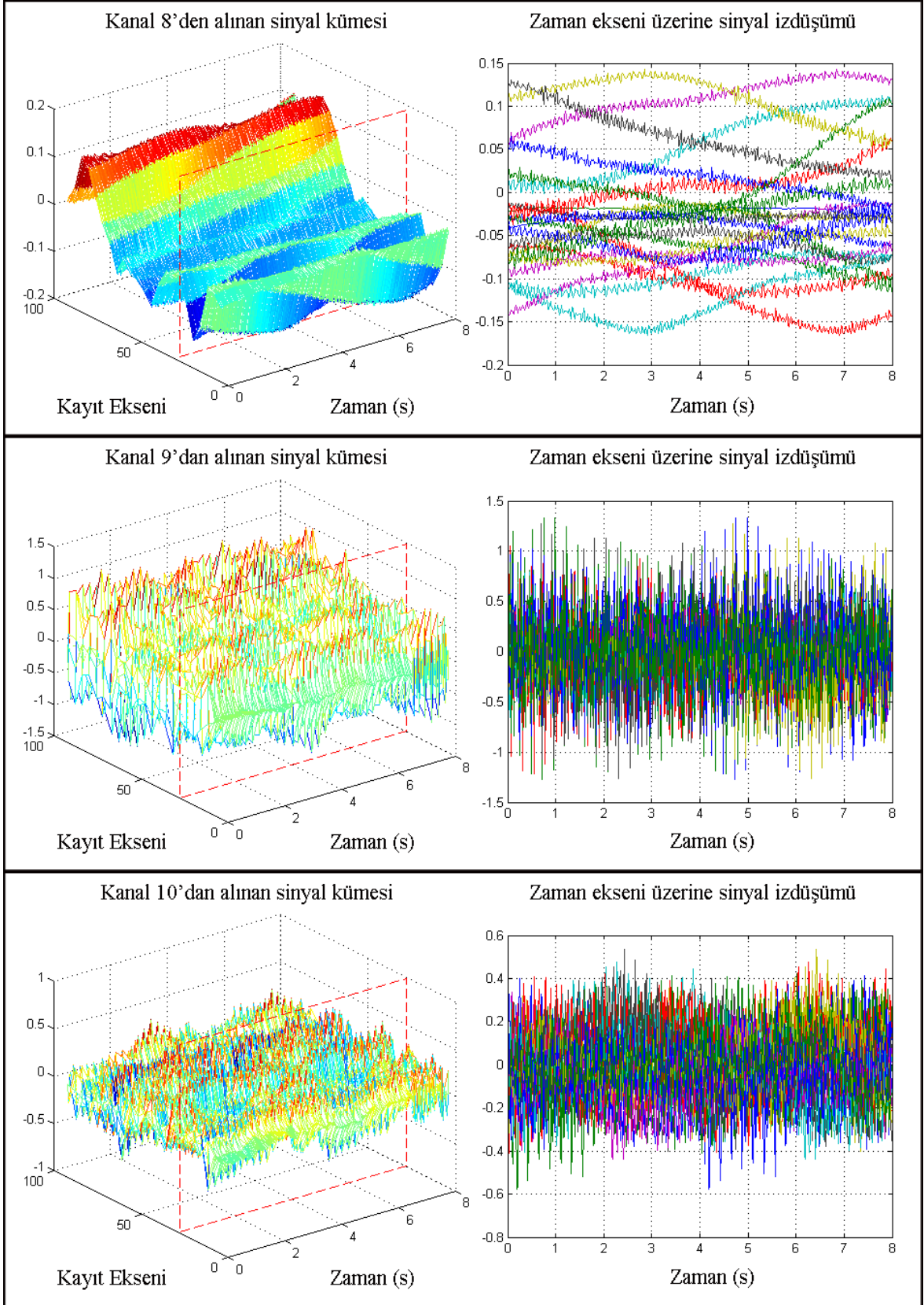
Şekil 3.51. Modelin çevresel titreşim deneyinde 1 numaralı kanaldan alınan sinyal kayıtları



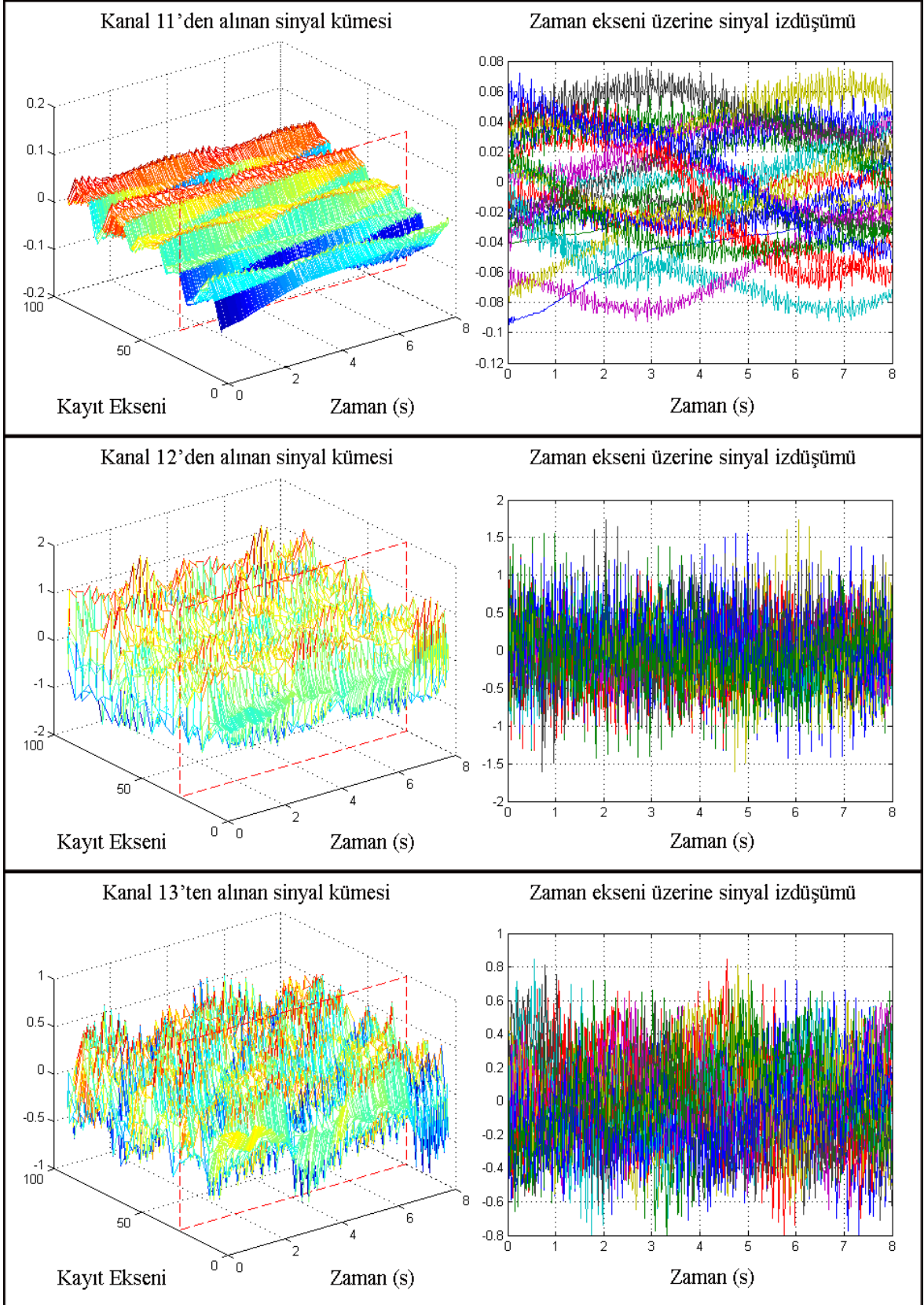
Şekil 3.52. Modelin çevresel titreşim deneyinde 2, 3 ve 4 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



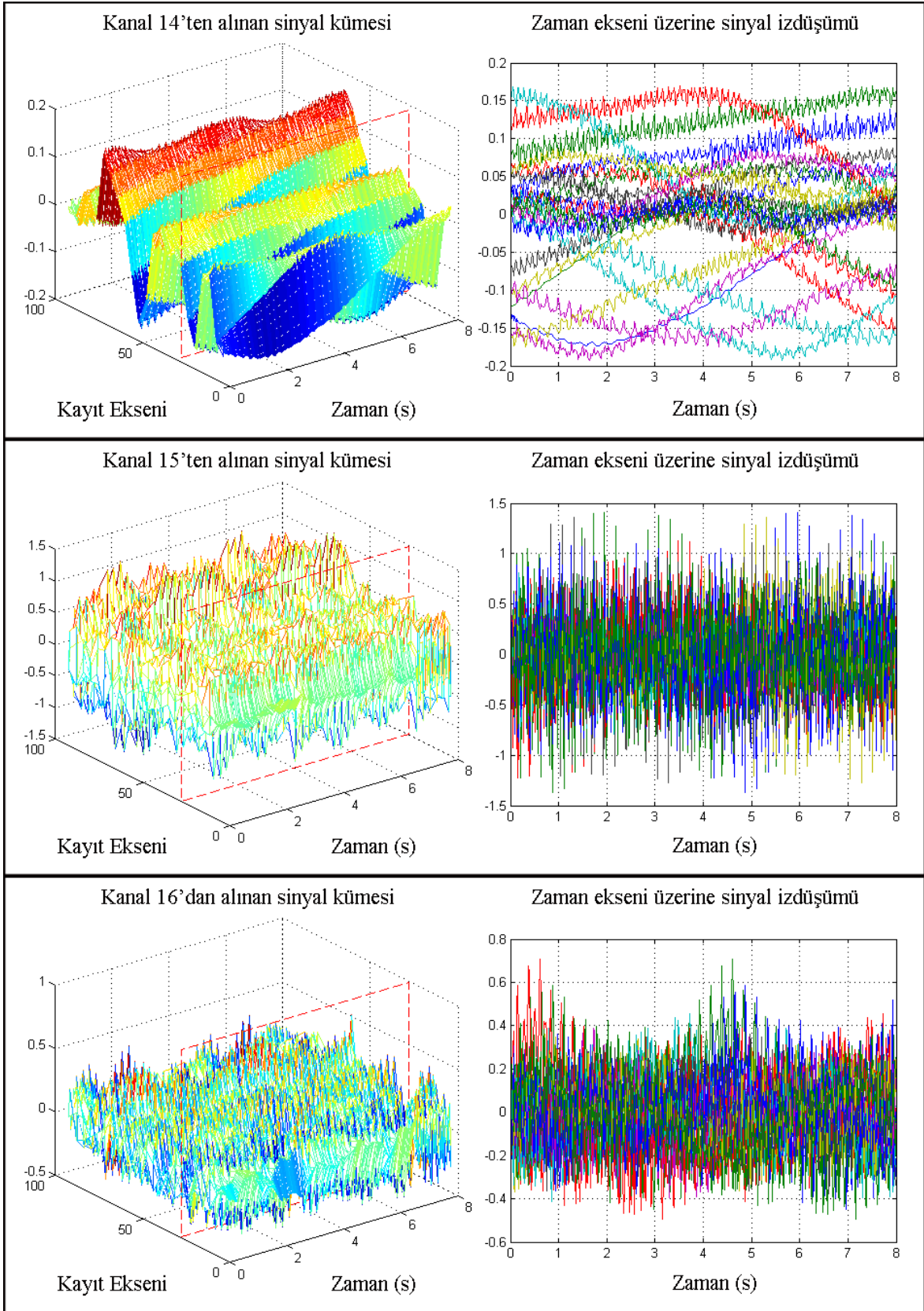
Şekil 3.53. Modelin çevresel titreşim deneyinde 5, 6 ve 7 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



Şekil 3.54. Modelin çevresel titreşim deneyinde 8, 9 ve 10 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



Şekil 3.55. Modelin çevresel titreşim deneyinde 11, 12 ve 13 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları



Şekil 3.56. Modelin çevresel titreşim deneyinde 14, 15 ve 16 numaralı kanallardan alınan sinyal kayıtları

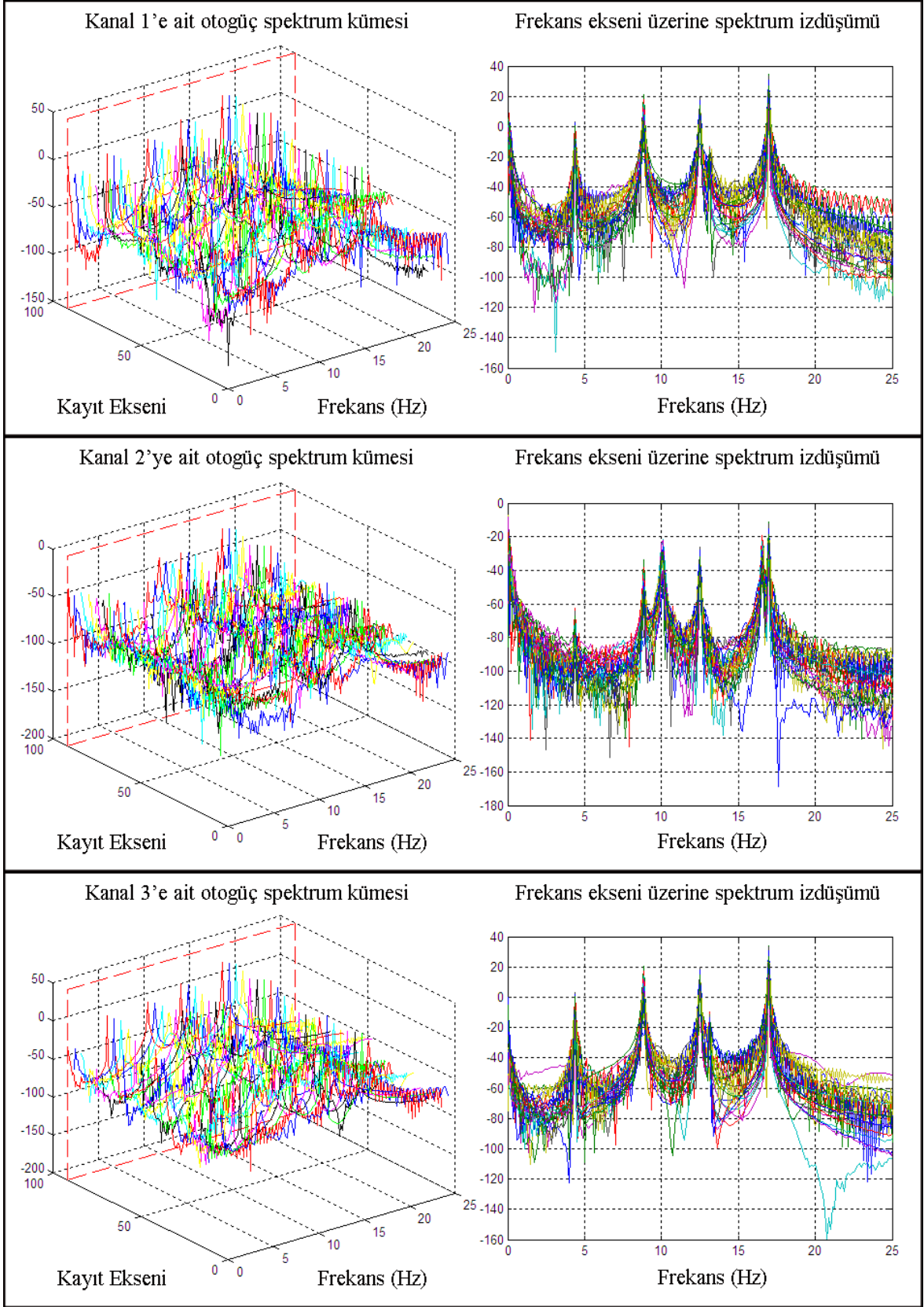
Üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyi sırasında toplanan sinyal kayıtları incelendiğinde, kayıt eksenini doğrultusunda görülen maksimum kayıt sayısının 100 olduğu görülmektedir. Bu sayı artırılabilir ya da azaltılabilir. Burada daha belirleyici olan faktör kayıt süresidir. Kayıt süresinin daha da uzatılması elde edilen sonuçlardaki hassasiyeti artıracaktır. Çünkü sistemin titreştirilememiş olan bazı modlarının daha geniş süre zarfında titreştirilme ihtimali vardır. Bu durum, titreştirilmesi zor olan büyük mühendislik yapıları için önemlidir. Üç boyutlu çelik çerçeve modelinde çevresel etkilerin yanında rastgele çekiç darbeleri de modele uygulandığından, bütün modları kolaylıkla tetiklenmiştir.

3.1.1.2.2. SignalCAD Programı ile Ham Sinyal Verilerinin İşlenmesi ve Spektrumların Üretimi

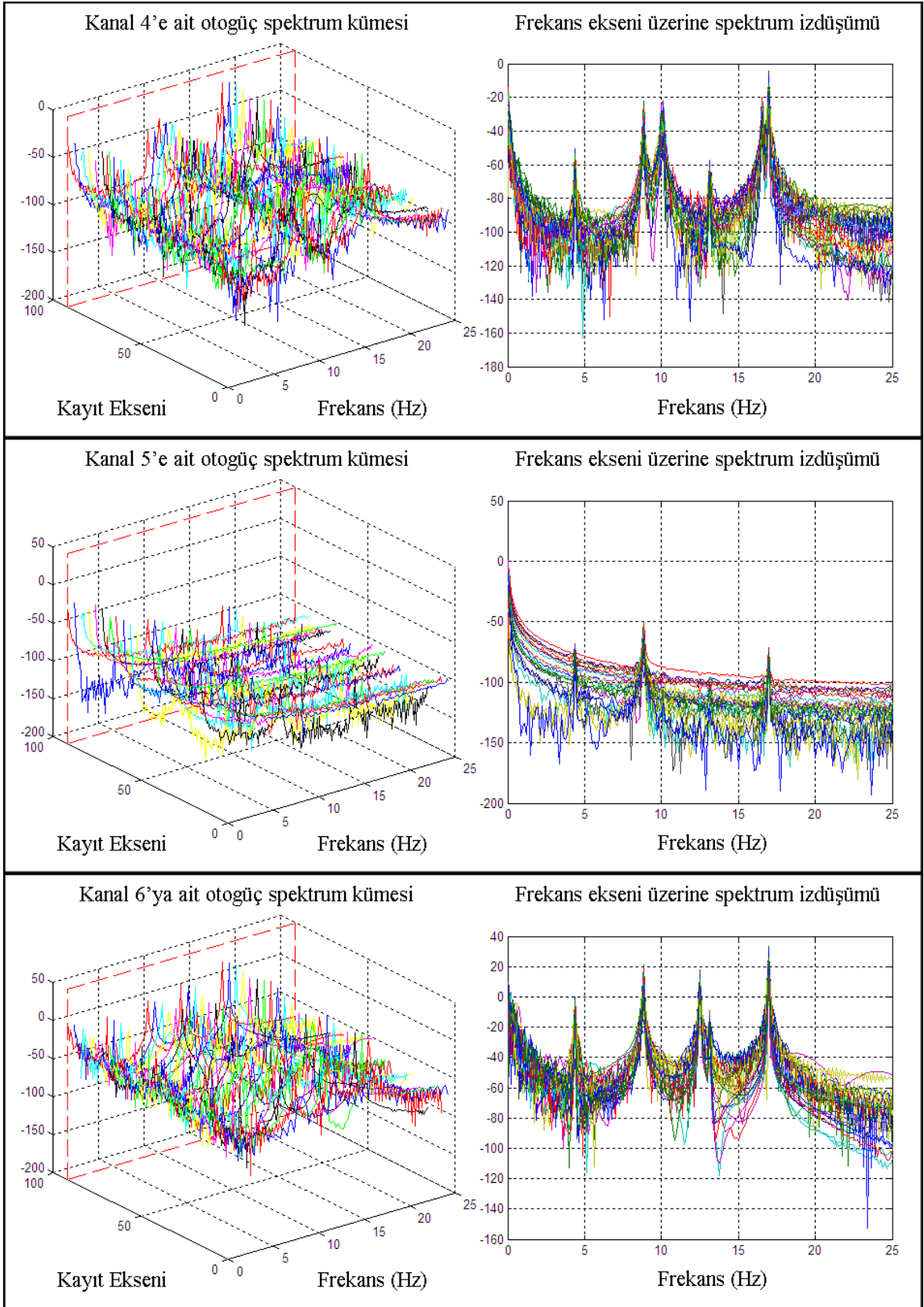
3.1.1.2.2.1. Otogüç Spektrumları

Daha önce de belirtildiği üzere, çevresel titreşim deneyinden elde edilen sinyaller zorlanmış titreşim deneyinden elde edilen sinyallerden tamamen farklıdır. Bu sinyaller belirli bir zaman sınırlaması içerisinde, pek çok sinyal kaydını içerisinde toplarlar ve sinyal kümesi ya da serisi haline gelirler. Her bir kanalın bu şekilde sinyal kümeleri olur. Spektrumların hesaplanmasında da öncelikle bu sinyal kümelerinin bütün elemanlarının spektrumları hesaplanır ve her bir kanala ait spektrum kümeleri oluşturulur. Her bir kanalın tek bir sinyali olmadığı gibi, tek bir spektrumu da olmayacaktır. Kanalları temsil eden spektrumlar ise, Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemi ya da ortalamalarının alınması ile bütün sistemi temsil eden tek bir spektruma dönüştürülür.

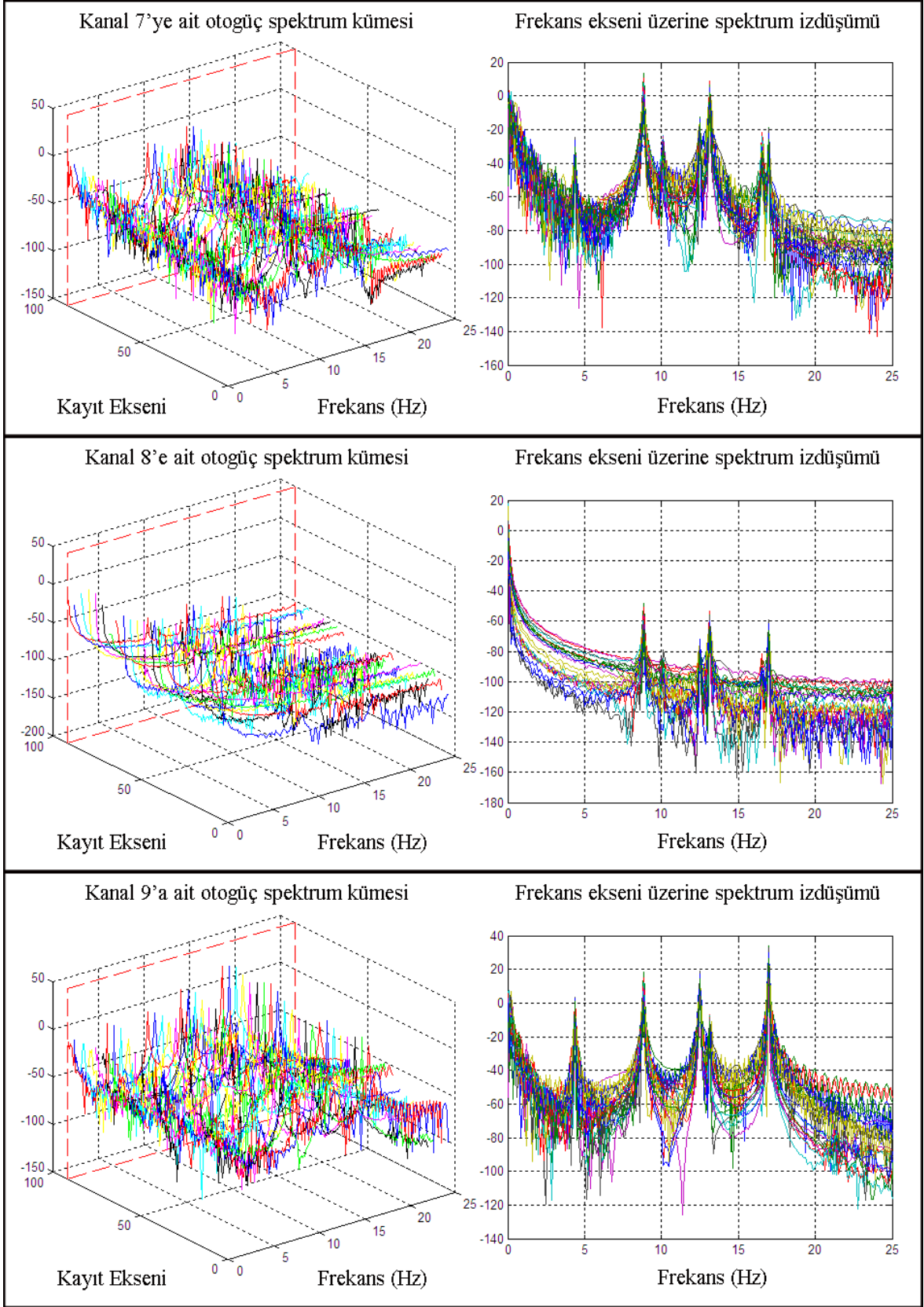
Otogüç spektrum serilerinin hesabında, spektrumlarda oluşacak sızma hatalarının filtrelenmesi için Dikdörtgen Pencereleme Yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.57-Şekil 3.62'de, üç boyutlu çelik çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinde ölçüm kanalları tarafından toplanan sinyal kümelerinin analizi sonucu elde edilen otogüç spektrum serileri görülmektedir. Şekillerde, üretilen spektrum kümelerinin üç boyutlu gösteriminin yanında, frekans eksenindeki izdüşümleri de sunulmaktadır. Burada filtreleme yapılmaksızın, elde edilen bütün sinyal kayıtları değerlendirilerek spektrum grubu içerisinde gösterilmektedir.



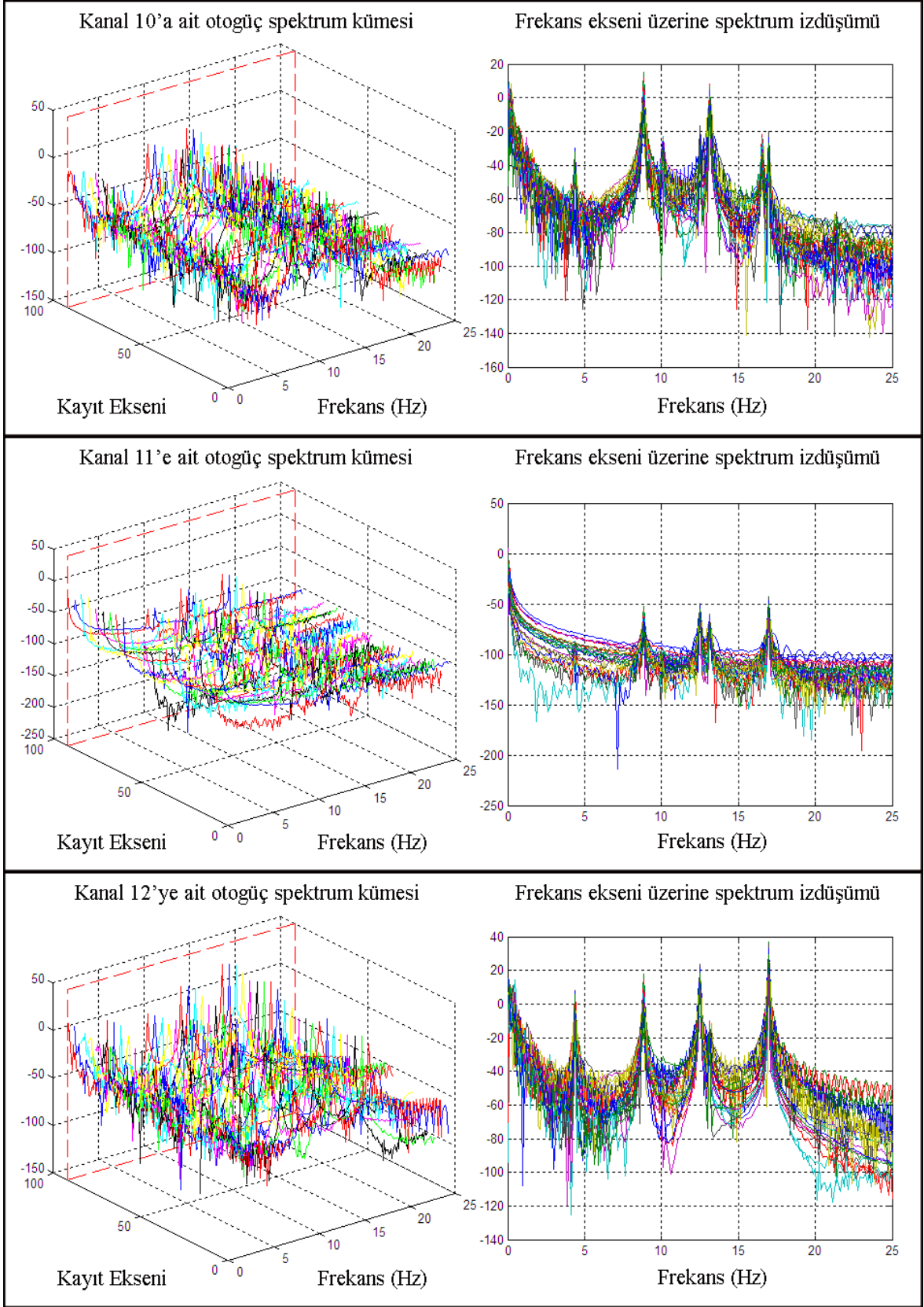
Şekil 3.57. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 1, 2 ve 3 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri



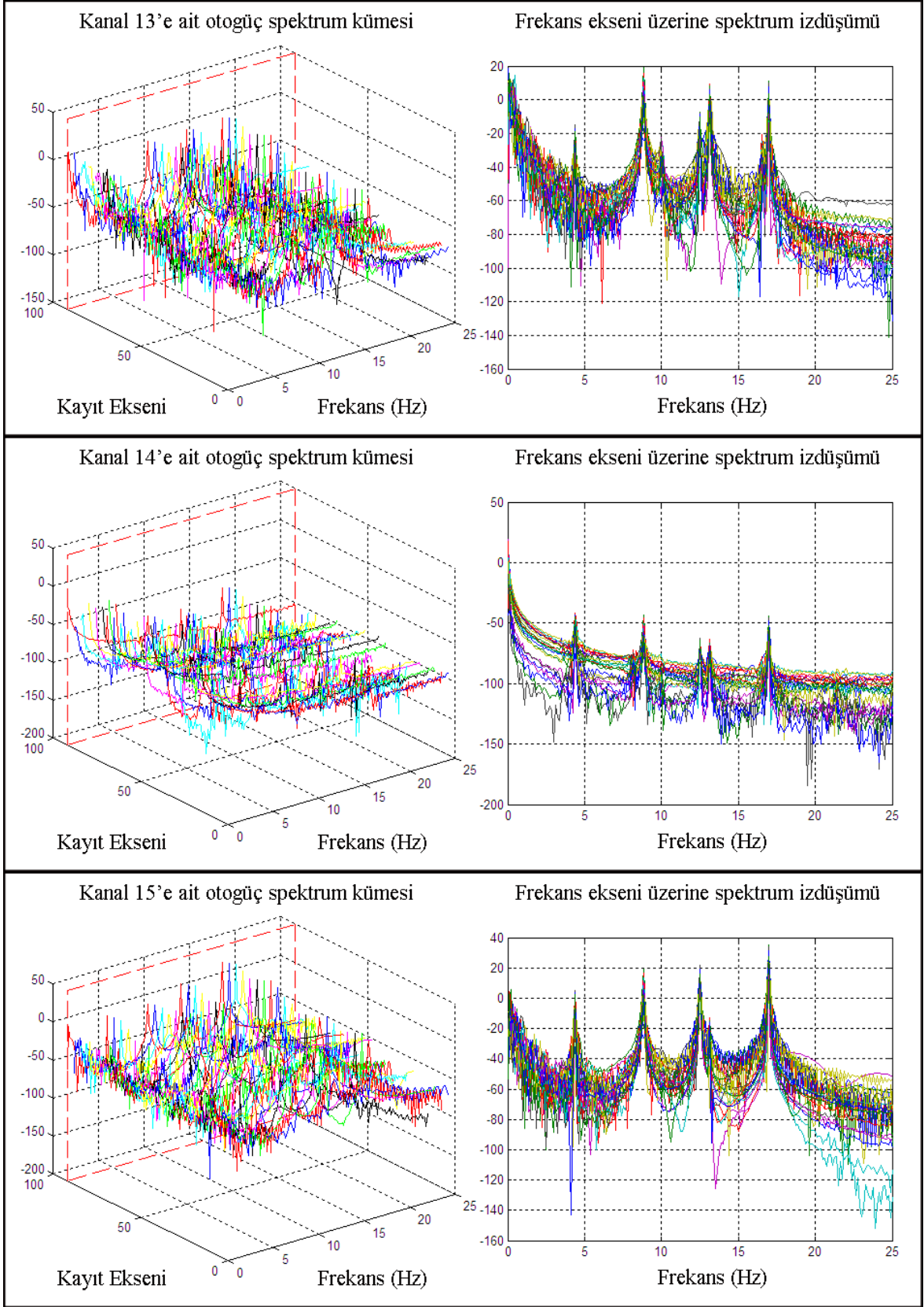
Şekil 3.58. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 4, 5 ve 6 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri



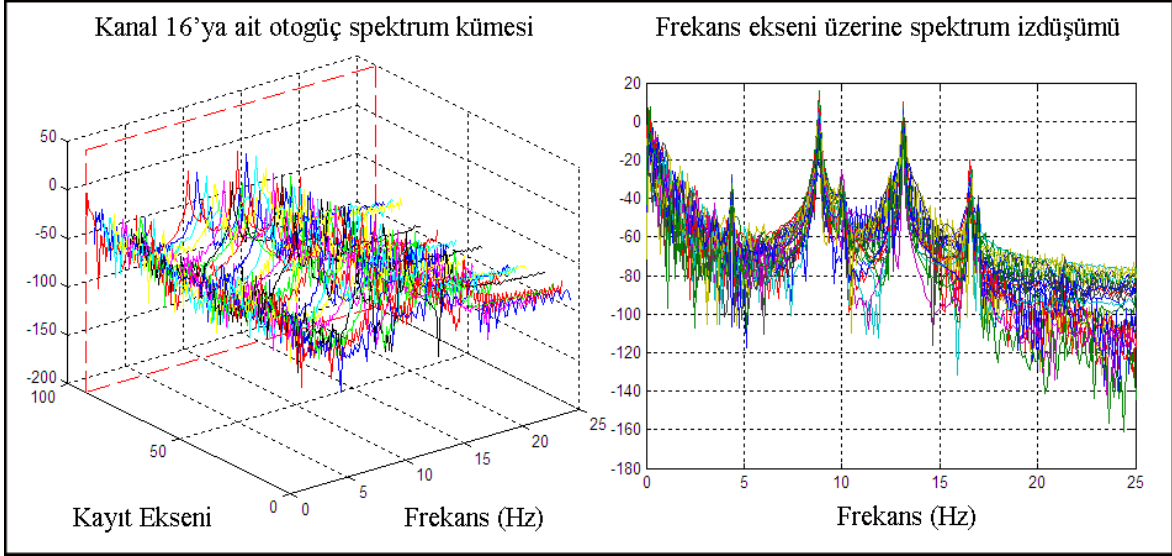
Şekil 3.59. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri



Şekil 3.60. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 10, 11 ve 12 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri



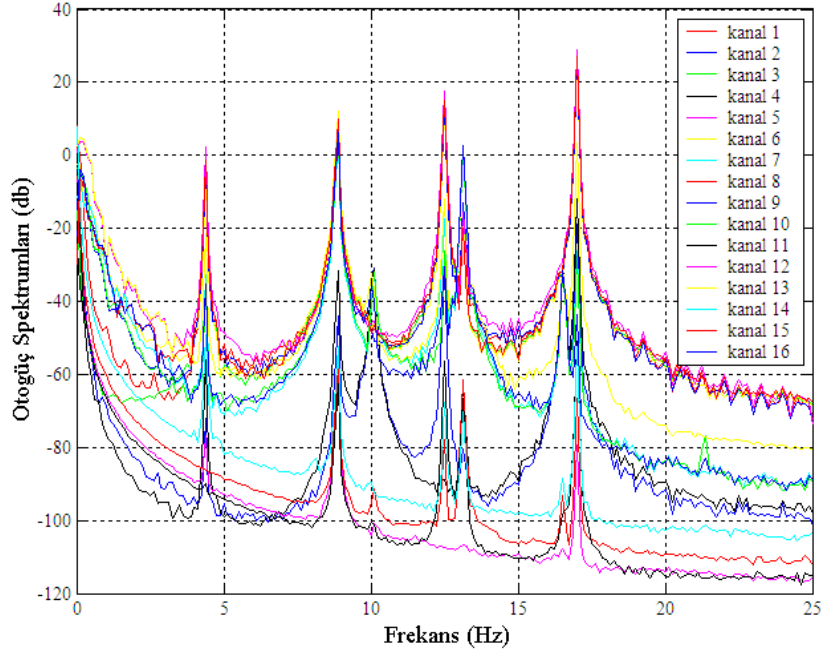
Şekil 3.61. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 13, 14 ve 15 numaralı kanallar için hesaplanan APS serileri



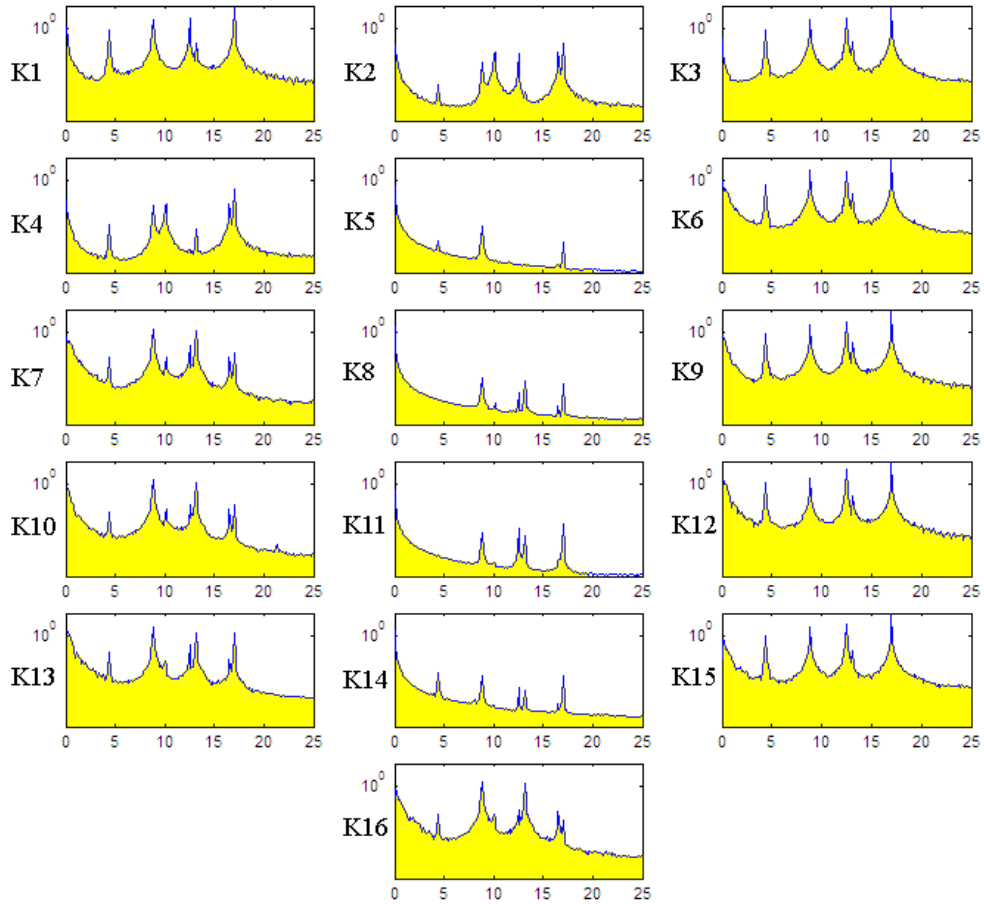
Şekil 3.62. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 16 numaralı kanal için hesaplanan APS serisi

Üretilen otogüç spektrum kümeleri incelendiği zaman, kanallara ait sinyal kümeleri içerisinde yer alan bütün sinyal kayıtlarının otogüç spektrumlarının hesaplandığı ve elde edilen spektrum kümeleri içerisinde yer aldıkları görülmektedir. Her bir kanal için hesaplanan otogüç spektrum kümeleri Tekil Değer Ayrıştırma işlemine tabi tutularak, ait olduğu kanalı temsil eden tek bir spektruma indirgenir. Bu işlem yapılmadan önce spektrum kümesi içerisindeki yer alan hatalı spektrumlar filtreden geçirilmelidir. Üç boyutlu çerçeve modeli üzerinde bulunan kanallardan alınan sinyal kümelerinin analizi ile elde edilmiş olan otogüç spektrum kümelerine Tekil Değer Ayrıştırma yönteminin uygulanması sonucunda her bir kanal için elde edilmiş olan otogüç spektrumlarının tümü, Şekil 3.63'de aynı eksen üzerinde, Şekil 3.64'de ise ayrı ayrı eksenler üzerinde gösterilmektedir.

Tekil Değer Ayrıştırma Yöntemi ile bir matris diyagonal olan olası en basit şekline ayrıştırılır. Bu ayrıştırma işlemi her zaman matrisin rankından ya da boyutundan bağımsız olarak yapılabilmektedir. Tekil Değer Ayrıştırma Yöntemi ile ilgili detaylı bilgiler Noble ve Daniel (1977) tarafından hazırlanan kaynakta ayrıntılı olarak yer almaktadır.



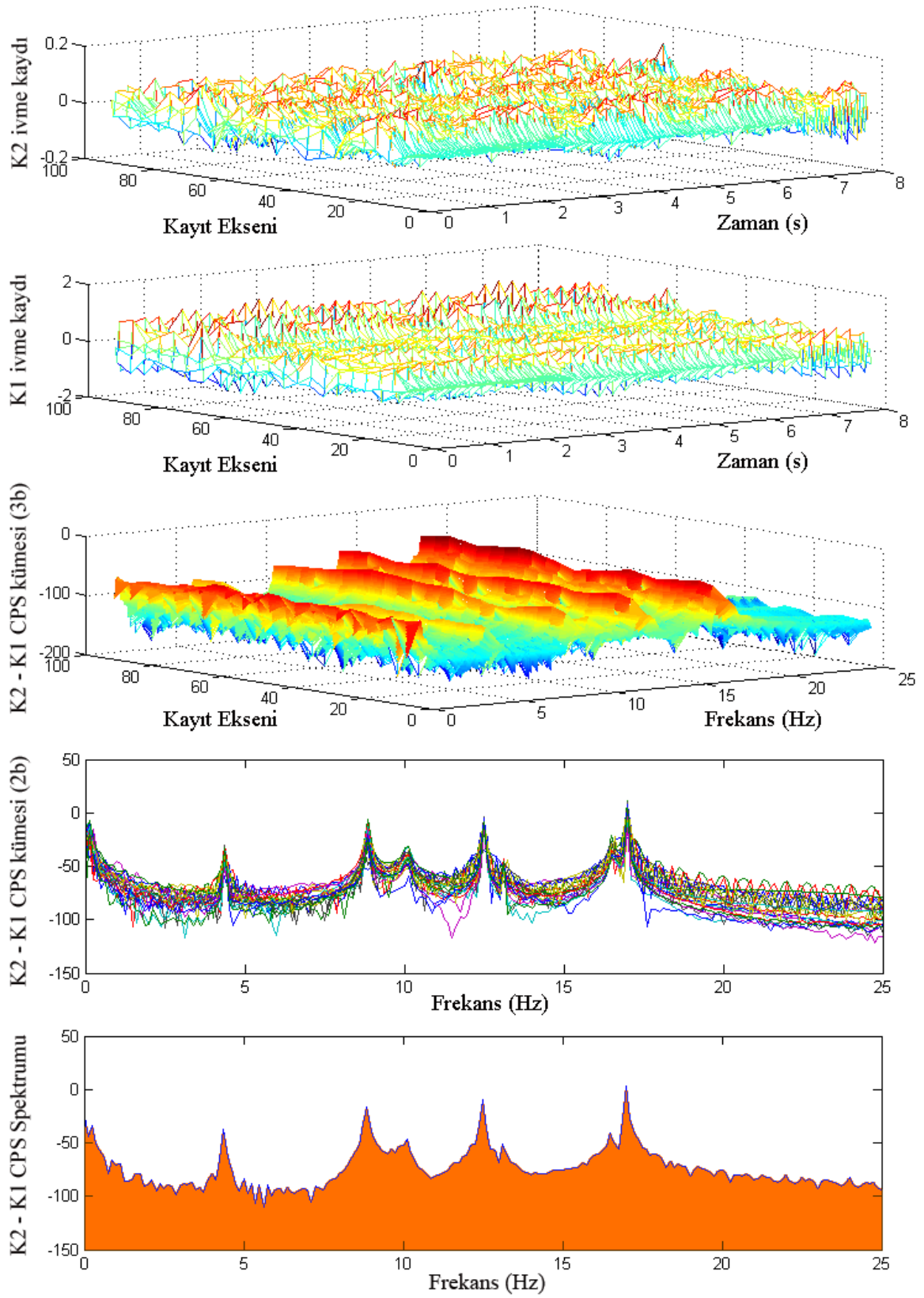
Şekil 3.63. Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan APS grafikleri



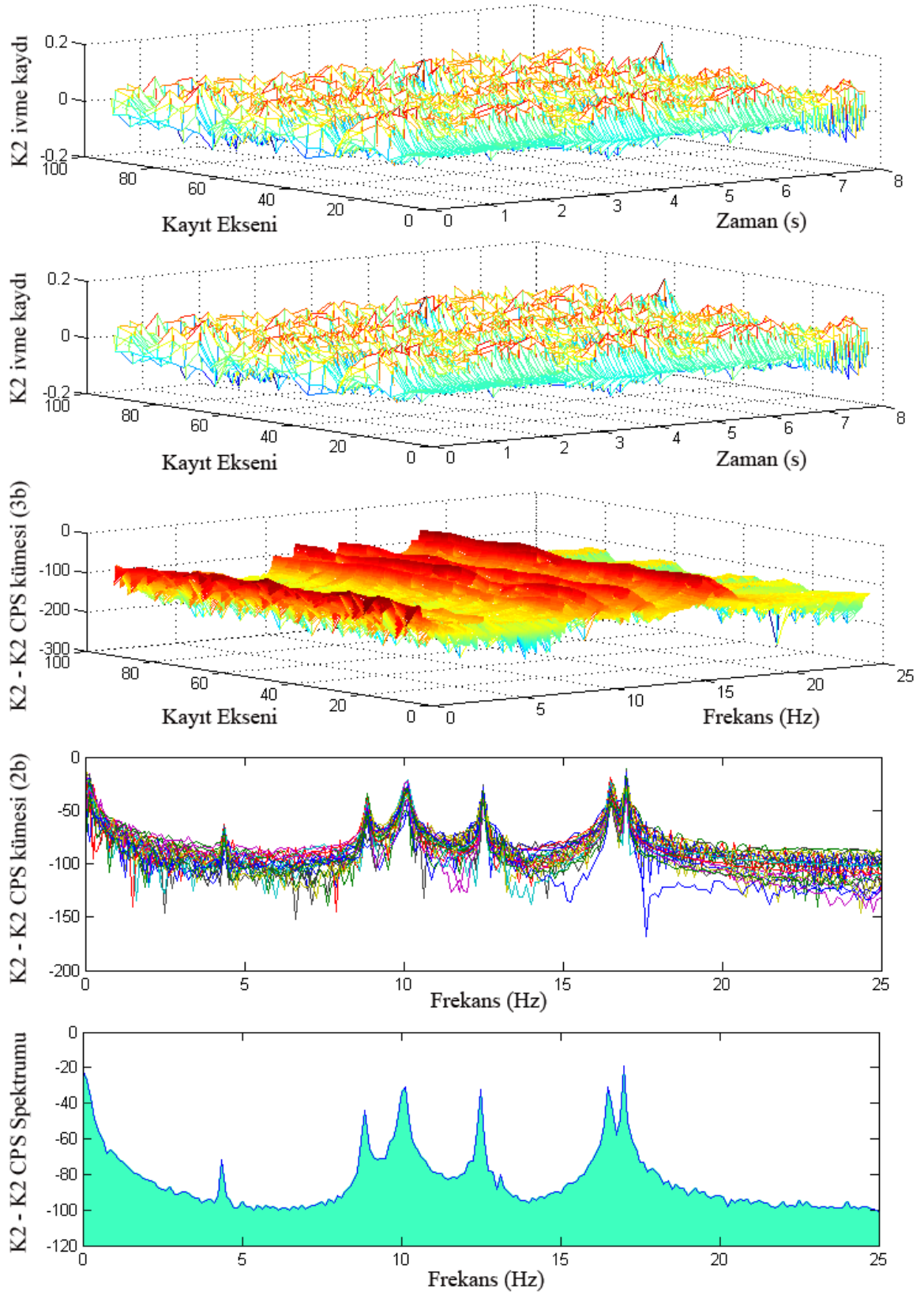
Şekil 3.64. Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan APS grafiklerinin ayrı eksenler üzerinde gösterimi

3.1.1.2.2.2. Çaprazgüç Spektrumları

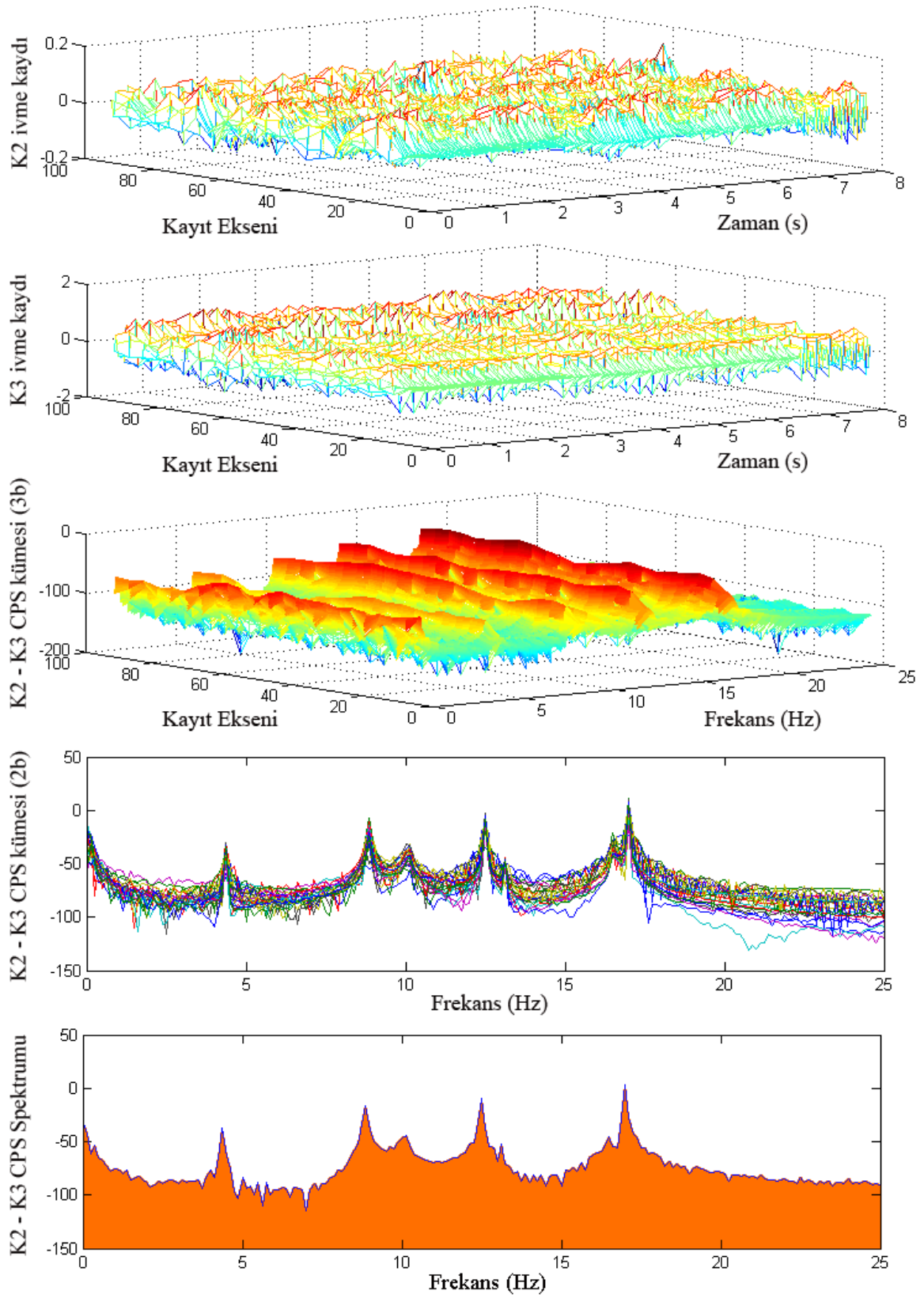
Çevresel titreşim deneyi yapılan sistemlerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan en önemli spektrumların başında çaprazgüç spektrumları gelmektedir. Çevresel titreşim deneylerinde etki kayıt altına alınmadığından dolayı frekans davranış fonksiyonları hesaplanamazlar. Dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, frekans davranış fonksiyonu ile benzer yapısı olan ve tepkinin ölçüldüğü kanallardan birisi referans alınarak diğer kanalların bu referans kanal ile çapraz korelasyon ilişkilerine bağlı olarak hesaplanan çaprazgüç spektrumları, kompleks değerli spektral fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar hem etki tepki modal analizinde hem de sadece tepki modal analizinde modal parametrelerin belirlenmesi için geliştirilen çözüm algoritmalarının giriş verisi olarak kullanılabilirler. Çevresel titreşim deneyinde, kanallardan alınan sinyaller seriler halinde toplandığından, üretilen çaprazgüç spektrumları da her bir kanal için seriler halinde olacaktır. Hesaplanan bu serilerin ortalamaları alınarak kanalları temsil eden çapraz güç spektrumları üretilmiş olur. Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyi sonucunda, kanallara ait çaprazgüç spektrumları hesaplanmadan önce, hangi tepki kanalının referans olarak alınacağı belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için daha önce yapılan spektral analiz sonuçlarını incelemek gerekir. Şekil 3.64’de görülen otogüç spektrum grafikleri incelendiğinde, bazı kanalarda daha fazla tepe noktası görülürken bazılarında daha az sayıda görülmektedir. Bununla beraber bazı modlara karşılık gelen tepe noktaları bazı spektrumlarda oldukça kuvvetli iken bazılarında ise zayıf görülmektedir. Etki tepki modal analiz sonuçlarına bakıldığında özellikle 6. moda ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde sıkıntı oluştuğundan, bu moda ait tepe noktasının en kuvvetli olduğu 2 numaralı kanalın hesaplarda referans olarak alınması uygun görülmektedir. Böylelikle 6 numaralı modun etki tepki modal analizine göre çok daha net bir şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında bu amaca başarıyla ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 3.65-Şekil 3.80’de model üzerindeki ölçüm kanallarının 2 numaralı kanal referans alınarak çaprazgüç spektrumlarının hesaplanması aşaması grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekillerde sırasıyla hesapta referans alınan 2 numaralı kanala ait sinyal kümesi, çapraz güç spektrumu hesaplanacak kanala ait sinyal kümesi, hesaplanan çaprazgüç spektrum kümesinin 3 boyutlu gösterimi ile iki boyutlu izdüşüm görüntüsü ve son olarak çaprazgüç spektrum serisinin ortalamasının alınması ile elde edilen kanala ait çaprazgüç spektrumu gösterilmektedir.



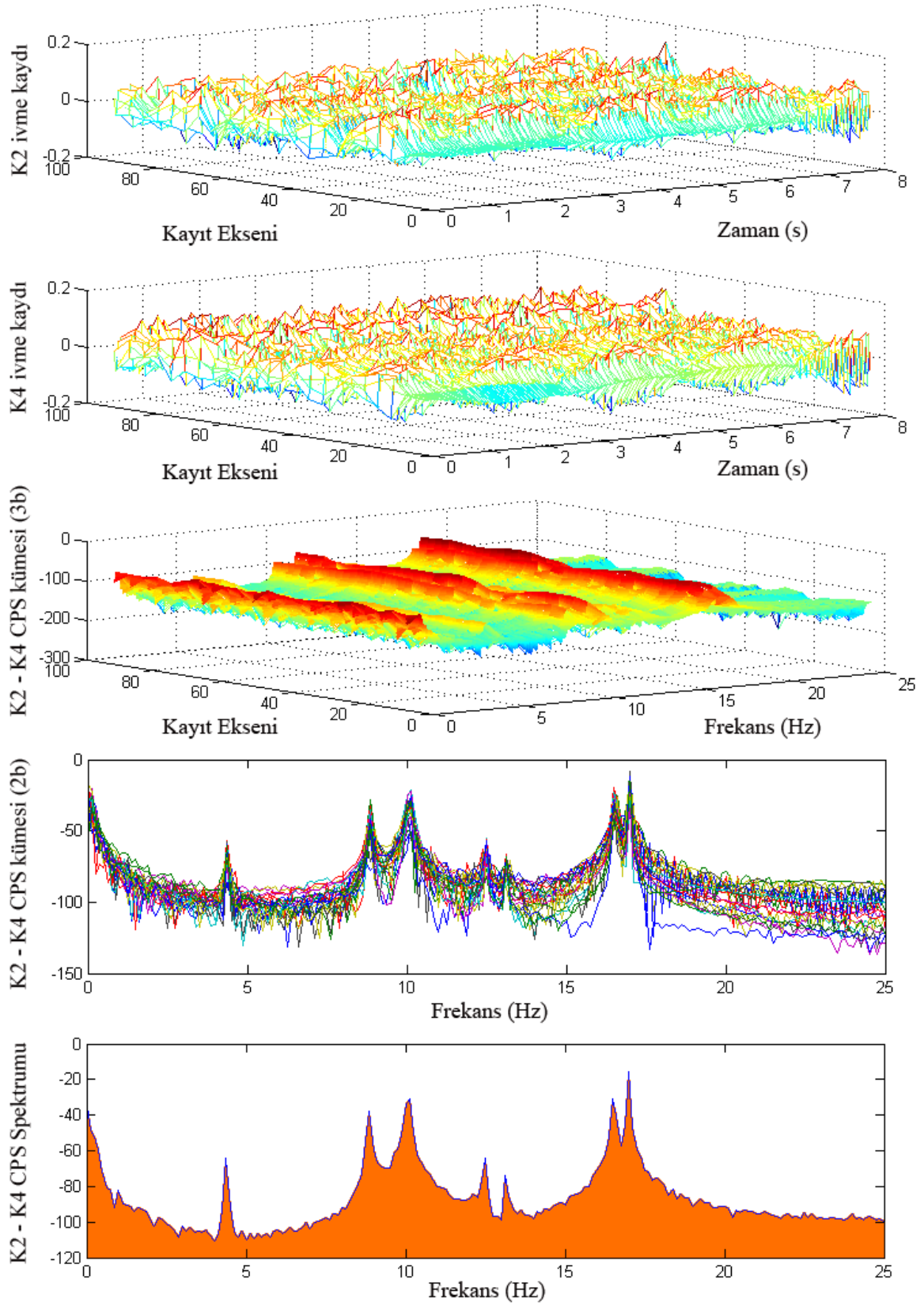
Şekil 3.65. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 1 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



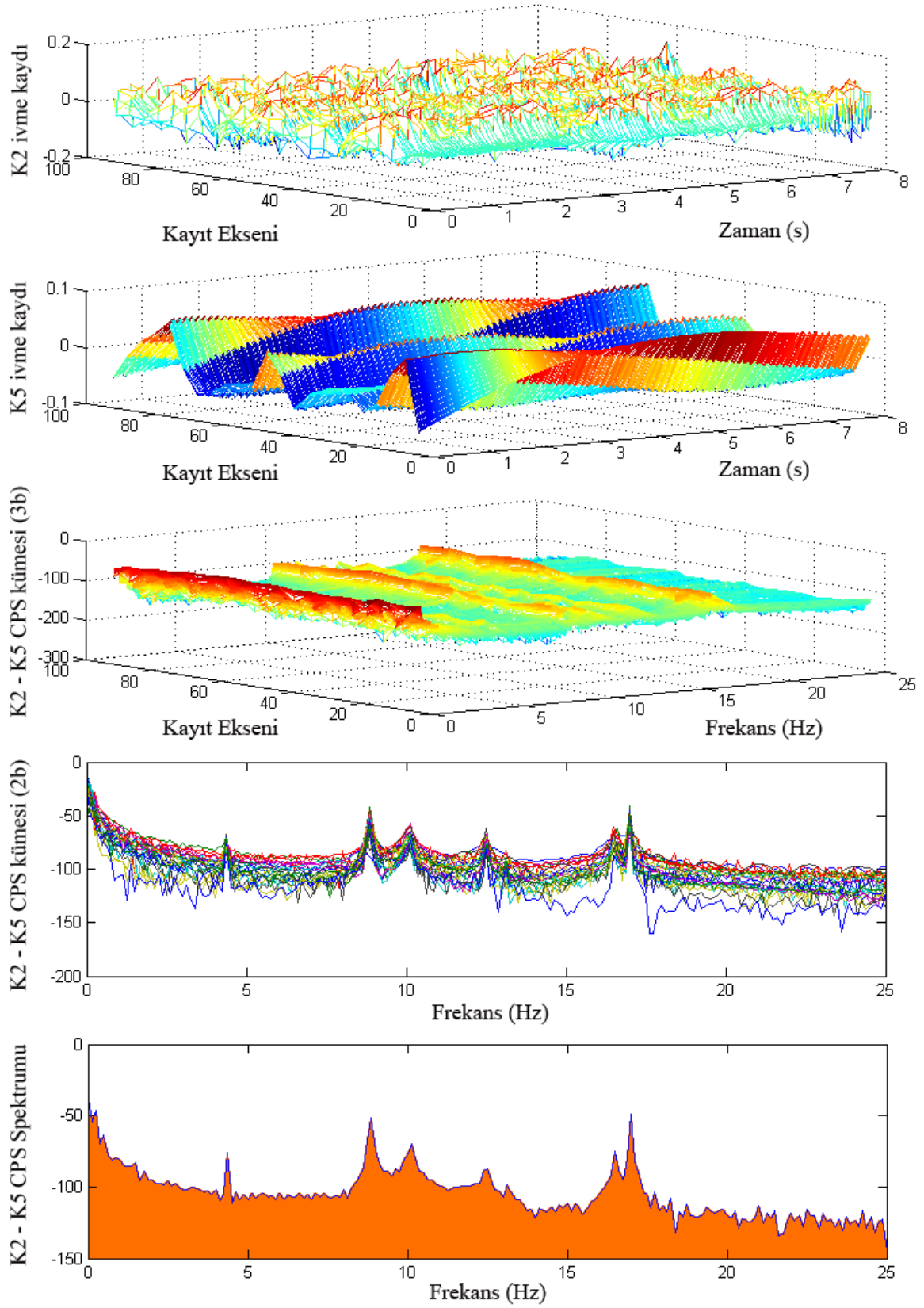
Şekil 3.66. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 2 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



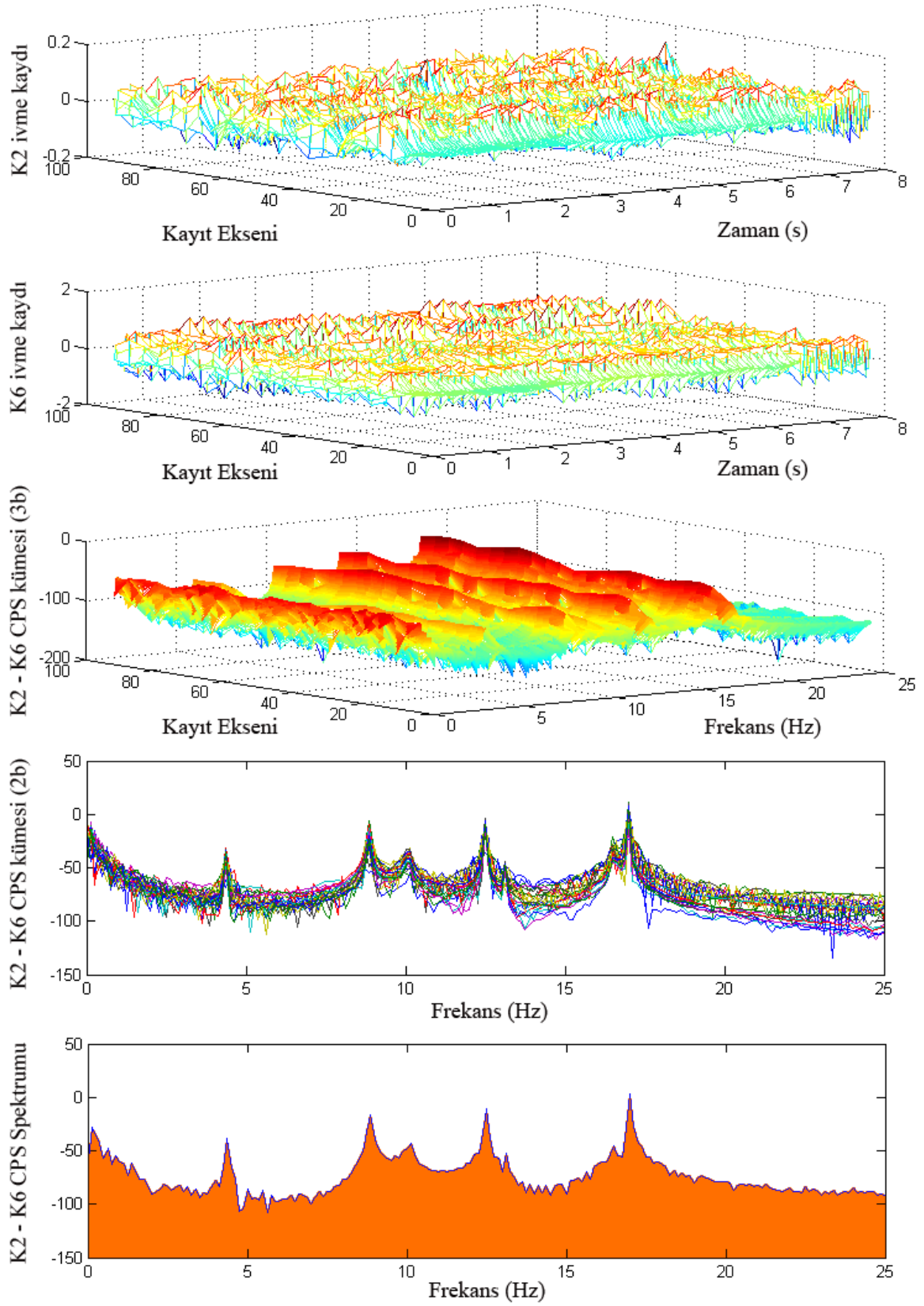
Şekil 3.67. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 3 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



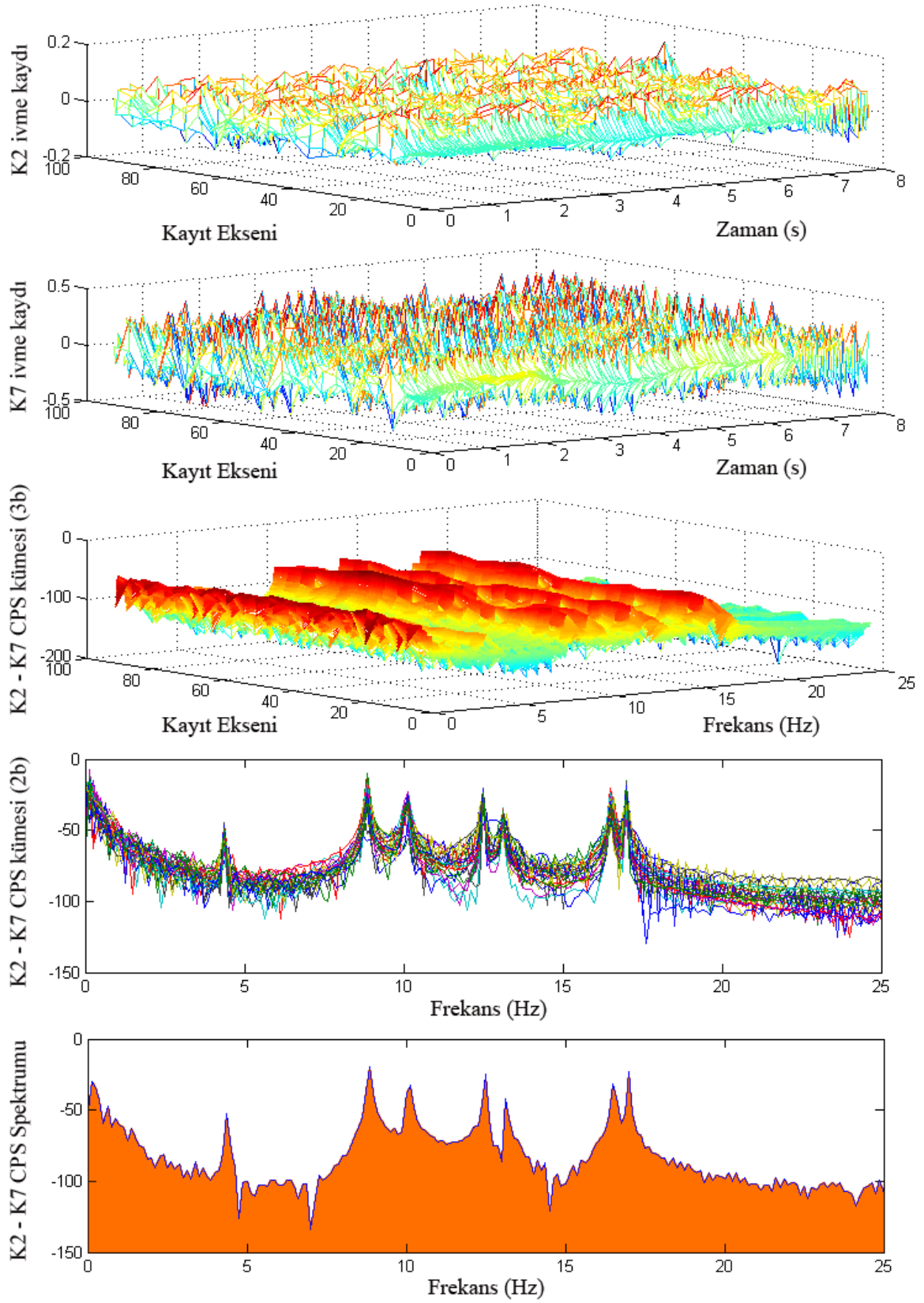
Şekil 3.68. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 4 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



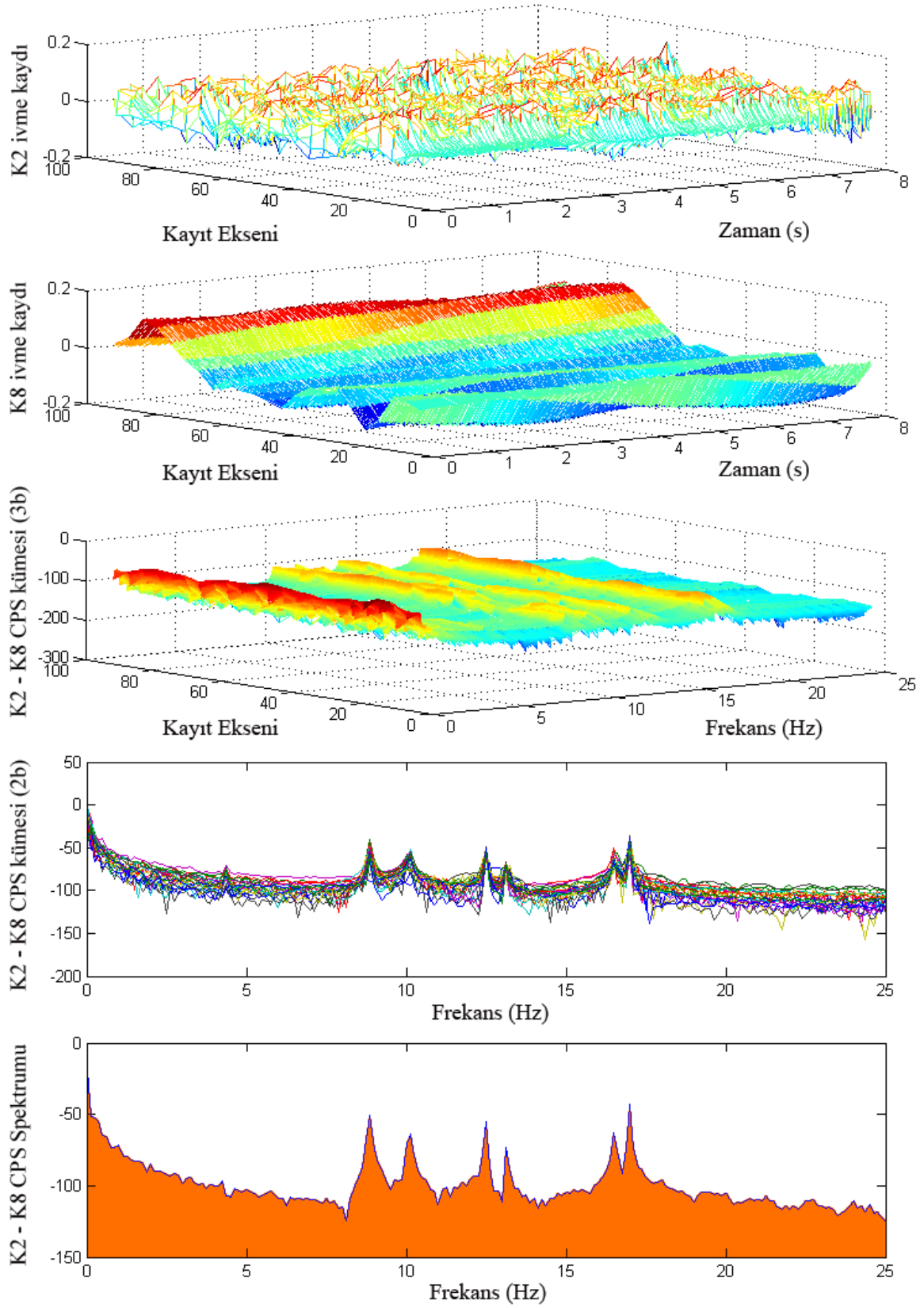
Şekil 3.69. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 5 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



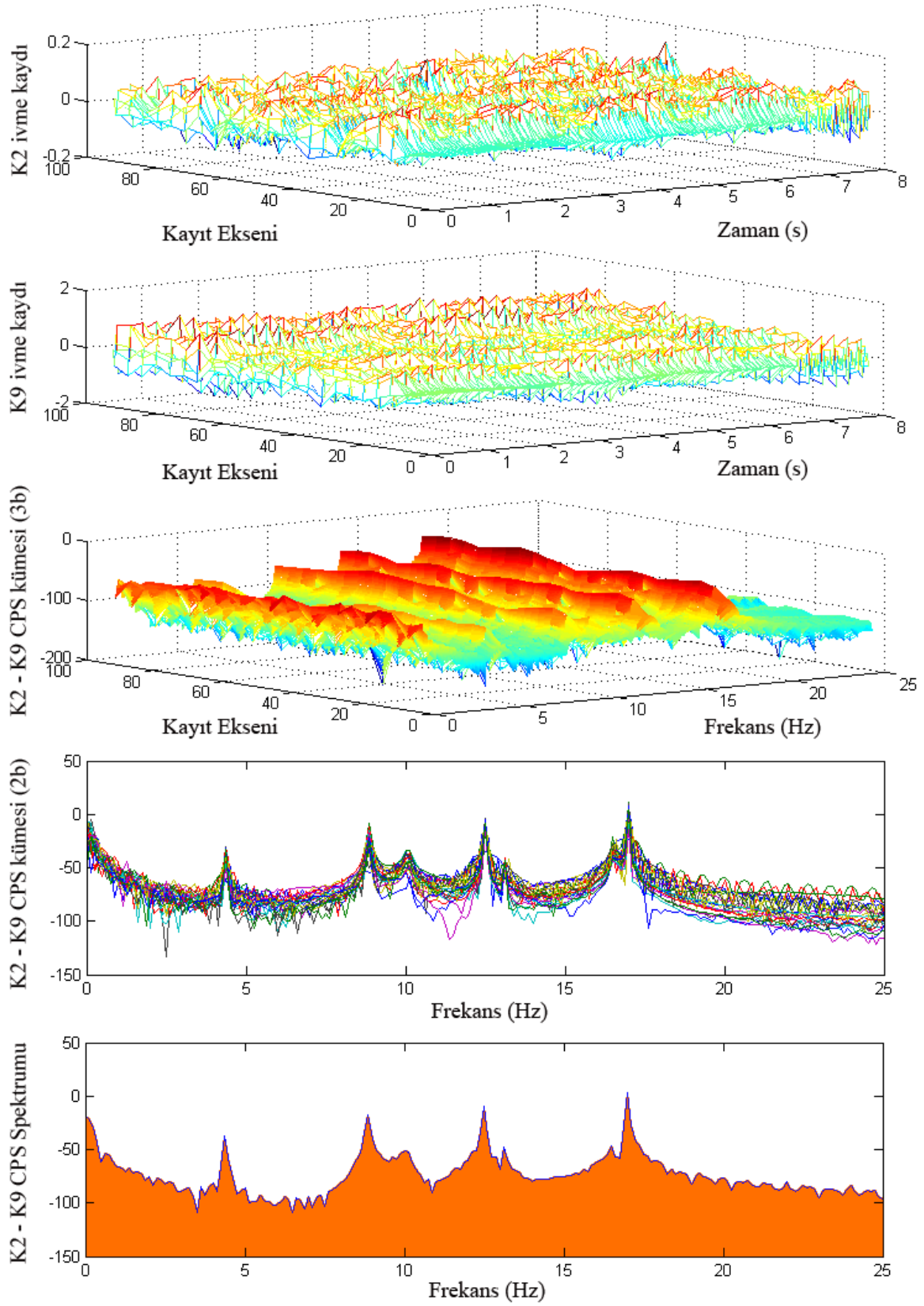
Şekil 3.70. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 6 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



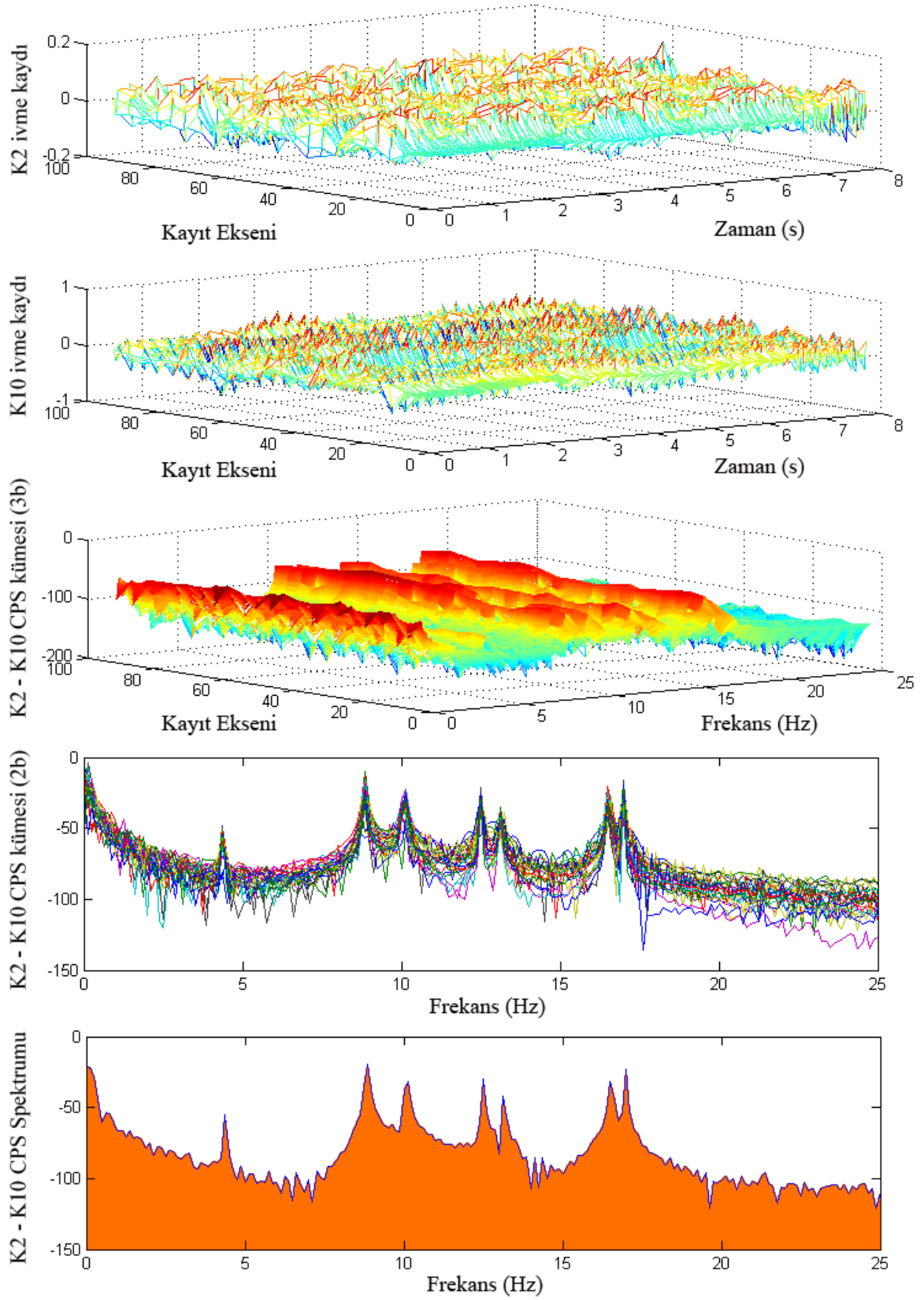
Şekil 3.71. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 7 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



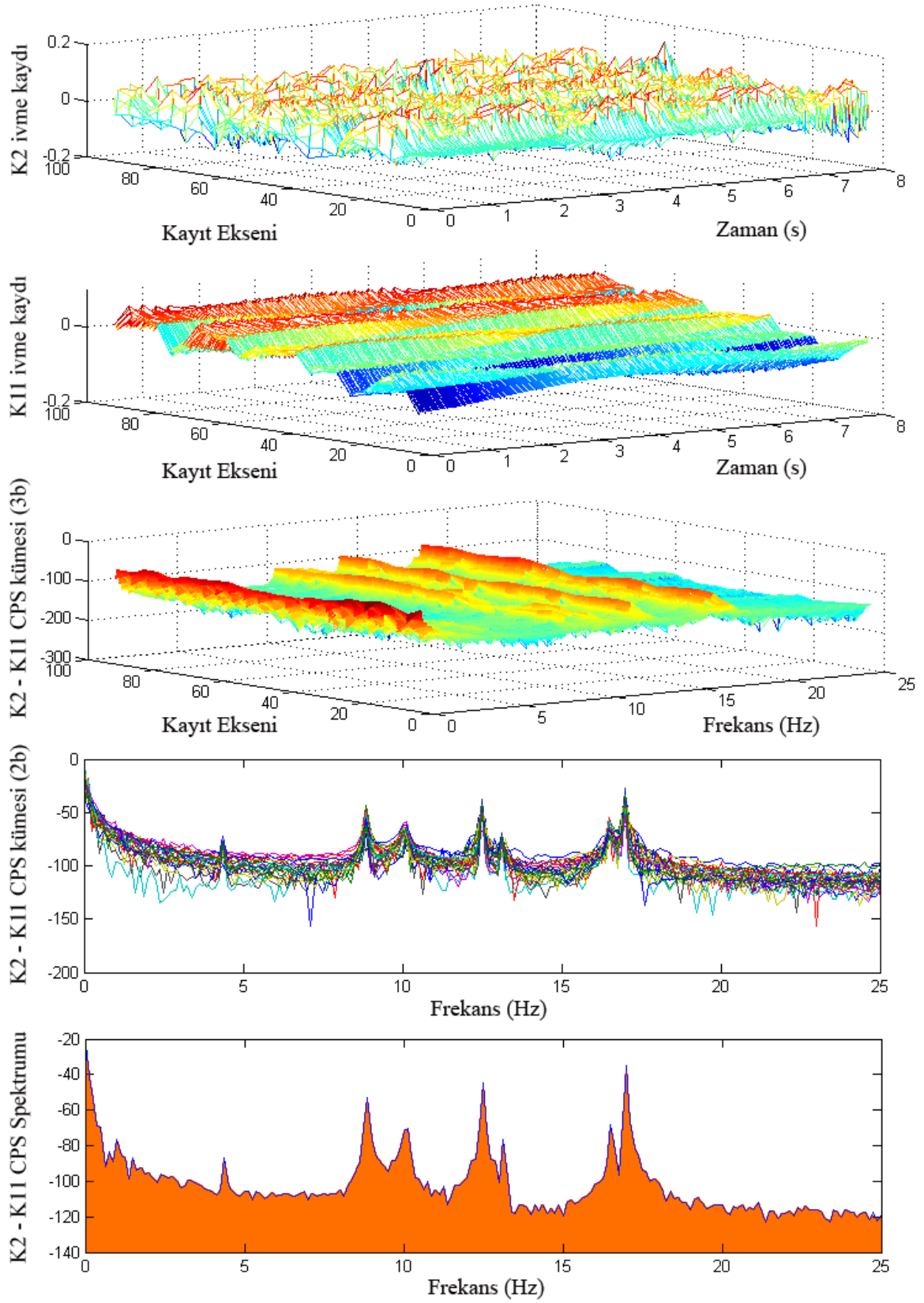
Şekil 3.72. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 8 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



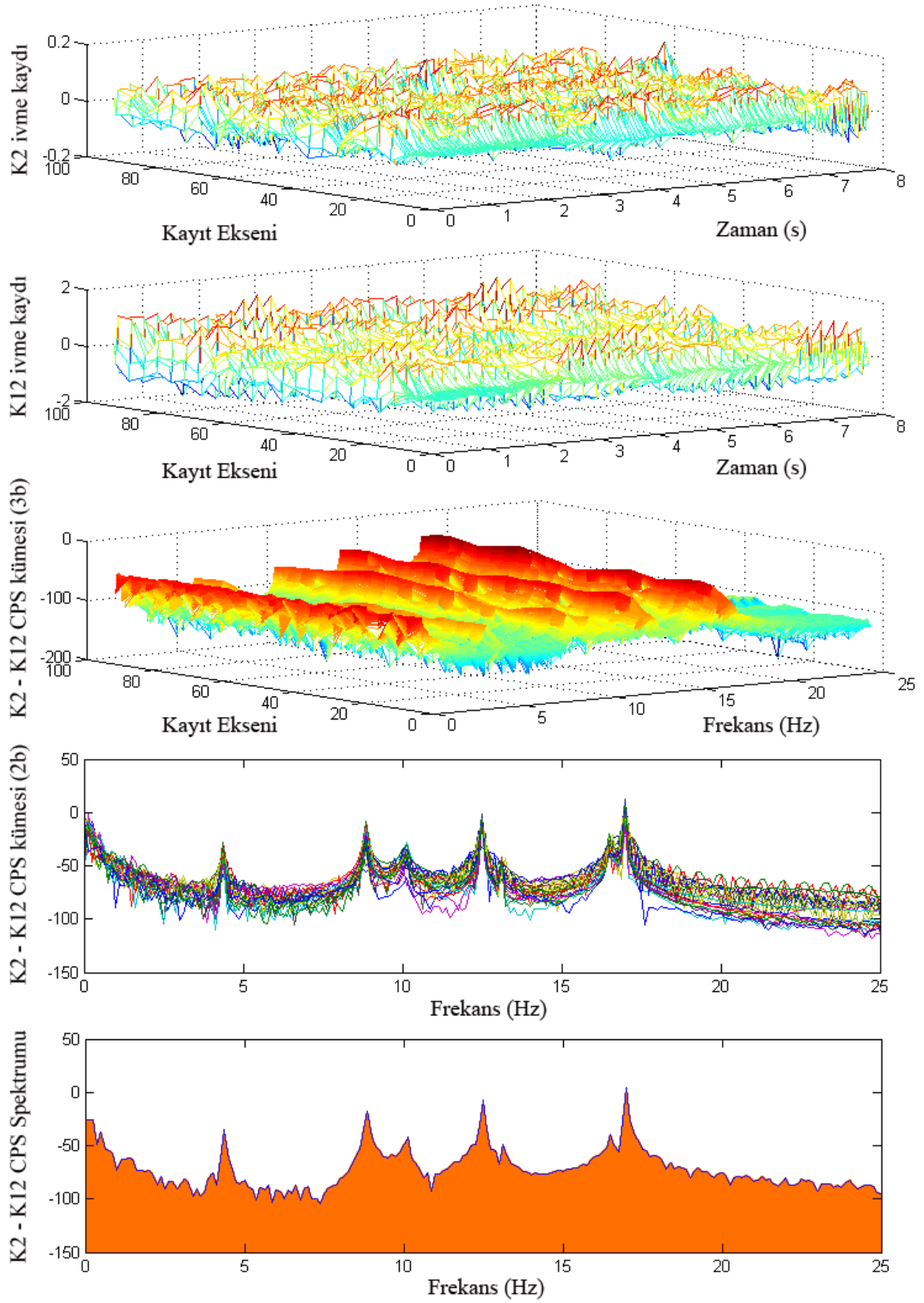
Şekil 3.73. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 9 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



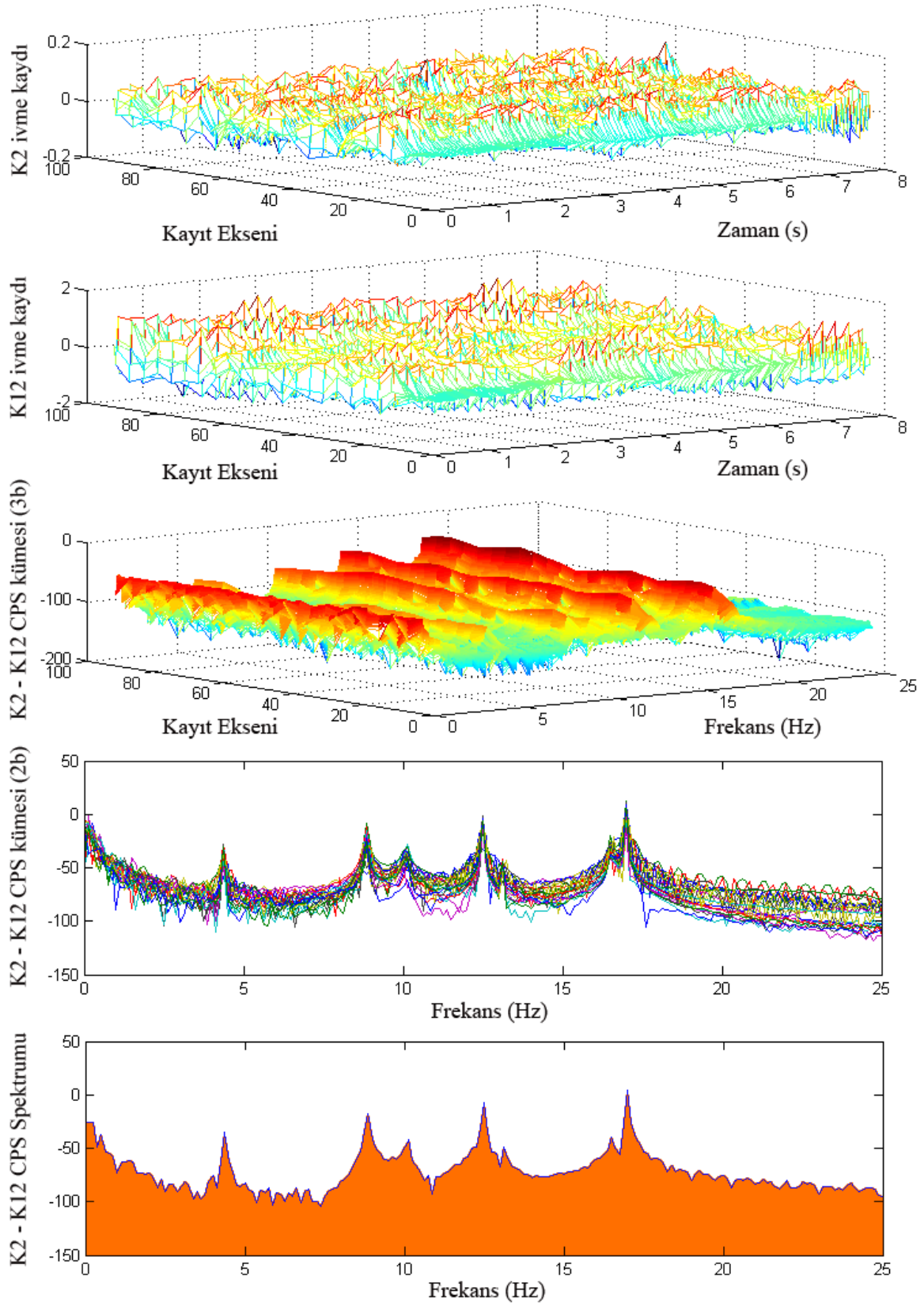
Şekil 3.74. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 10 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



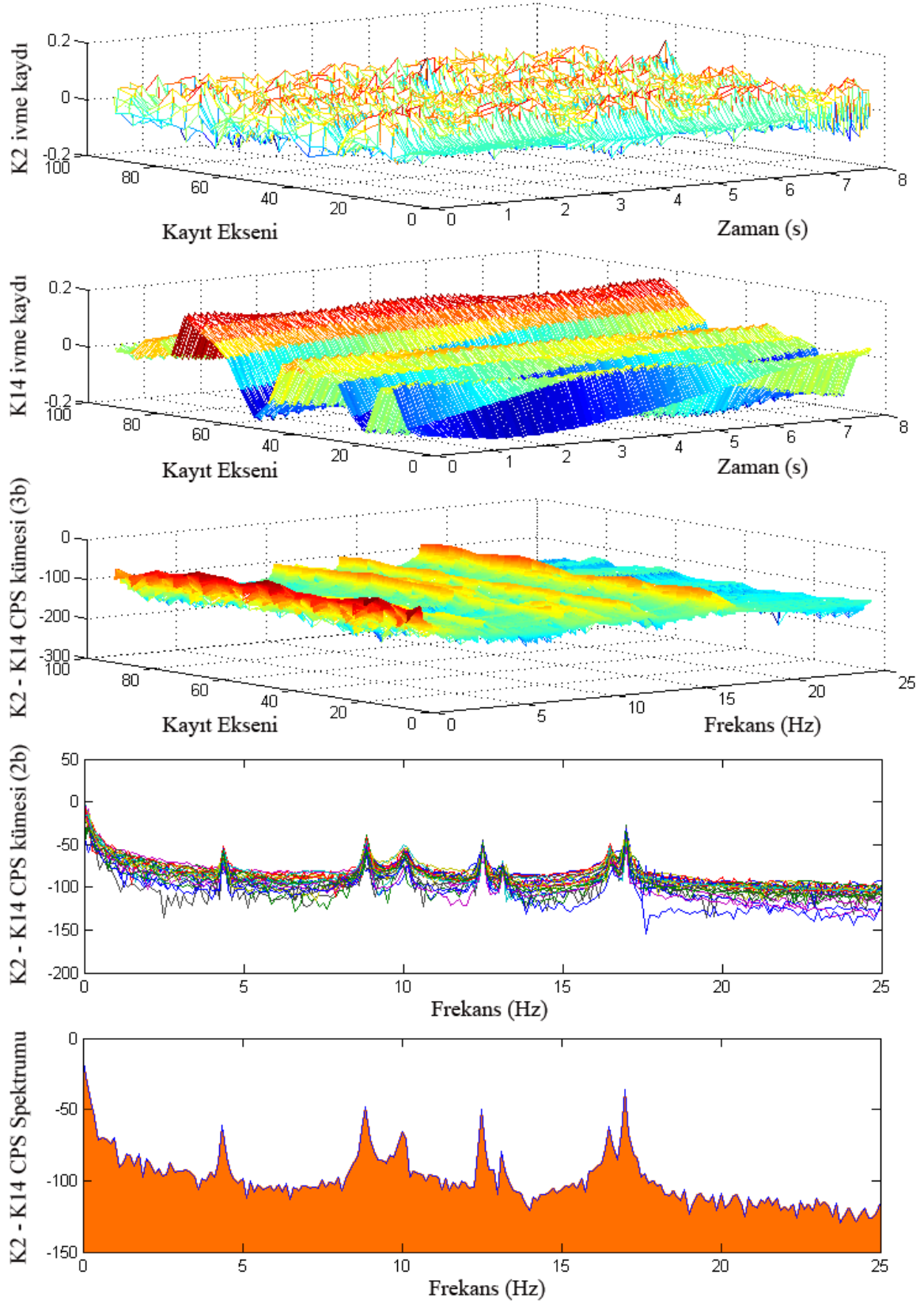
Şekil 3.75. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 11 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



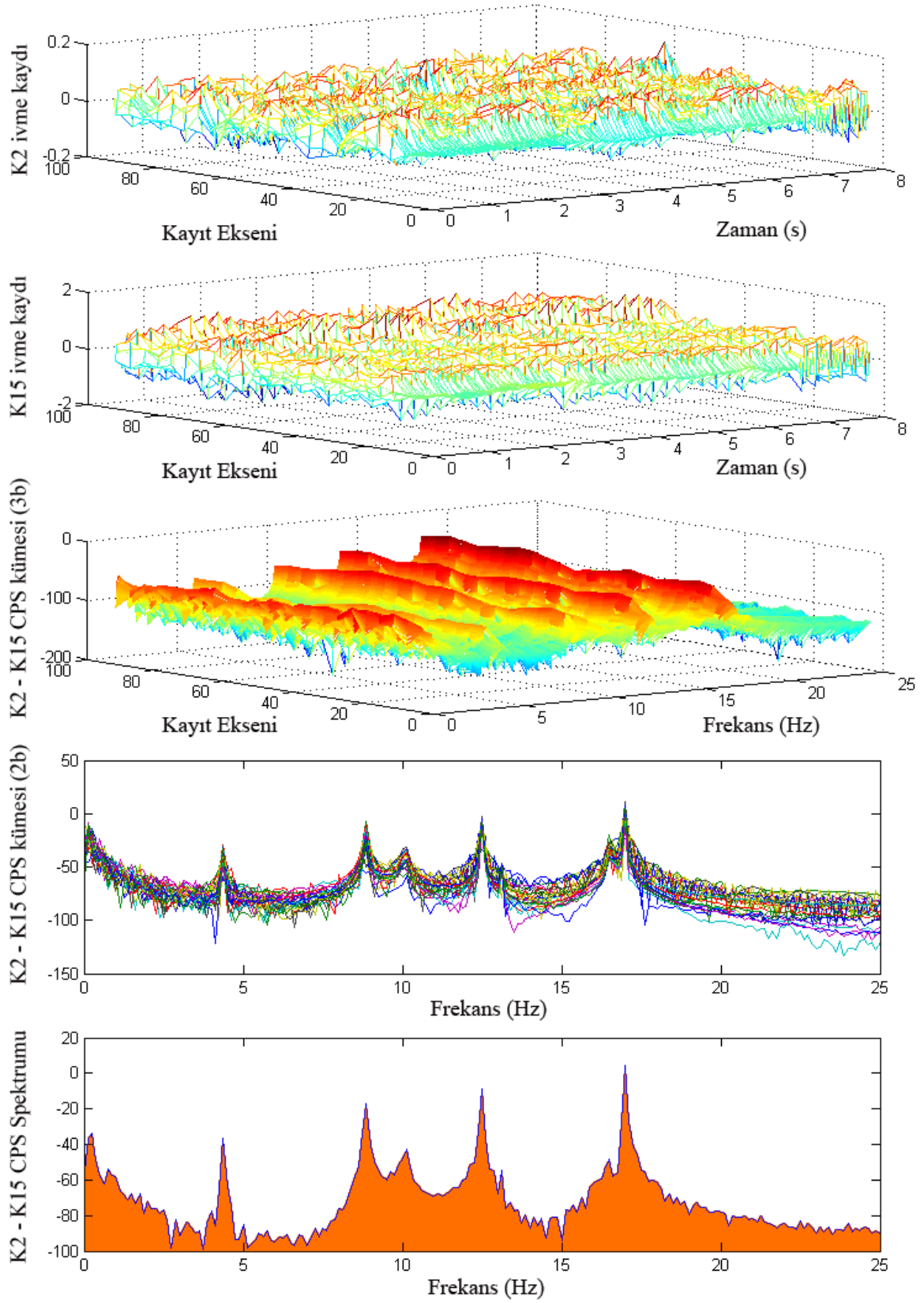
Şekil 3.76. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 12 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



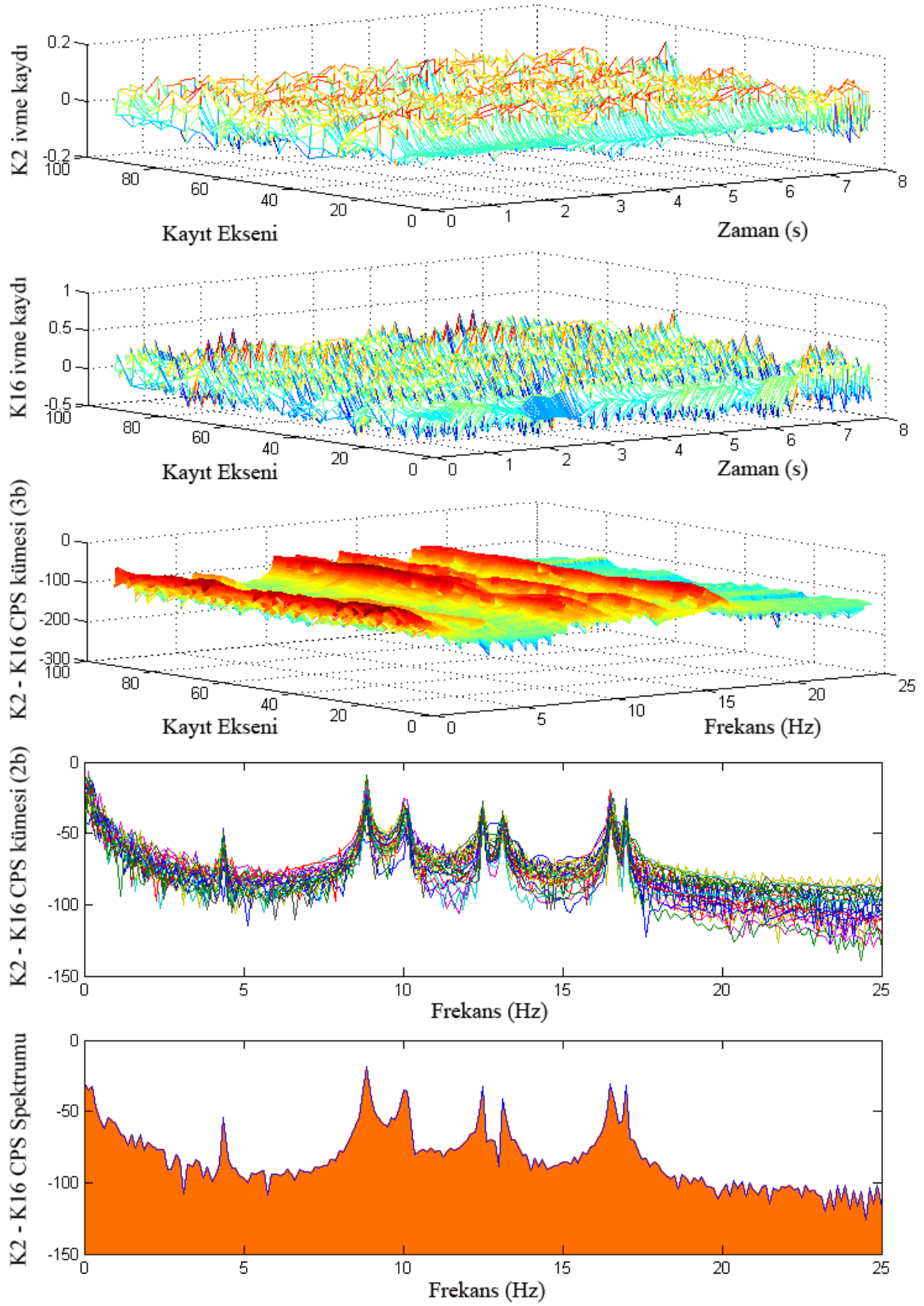
Şekil 3.77. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 13 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi



Şekil 3.78. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 14 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi

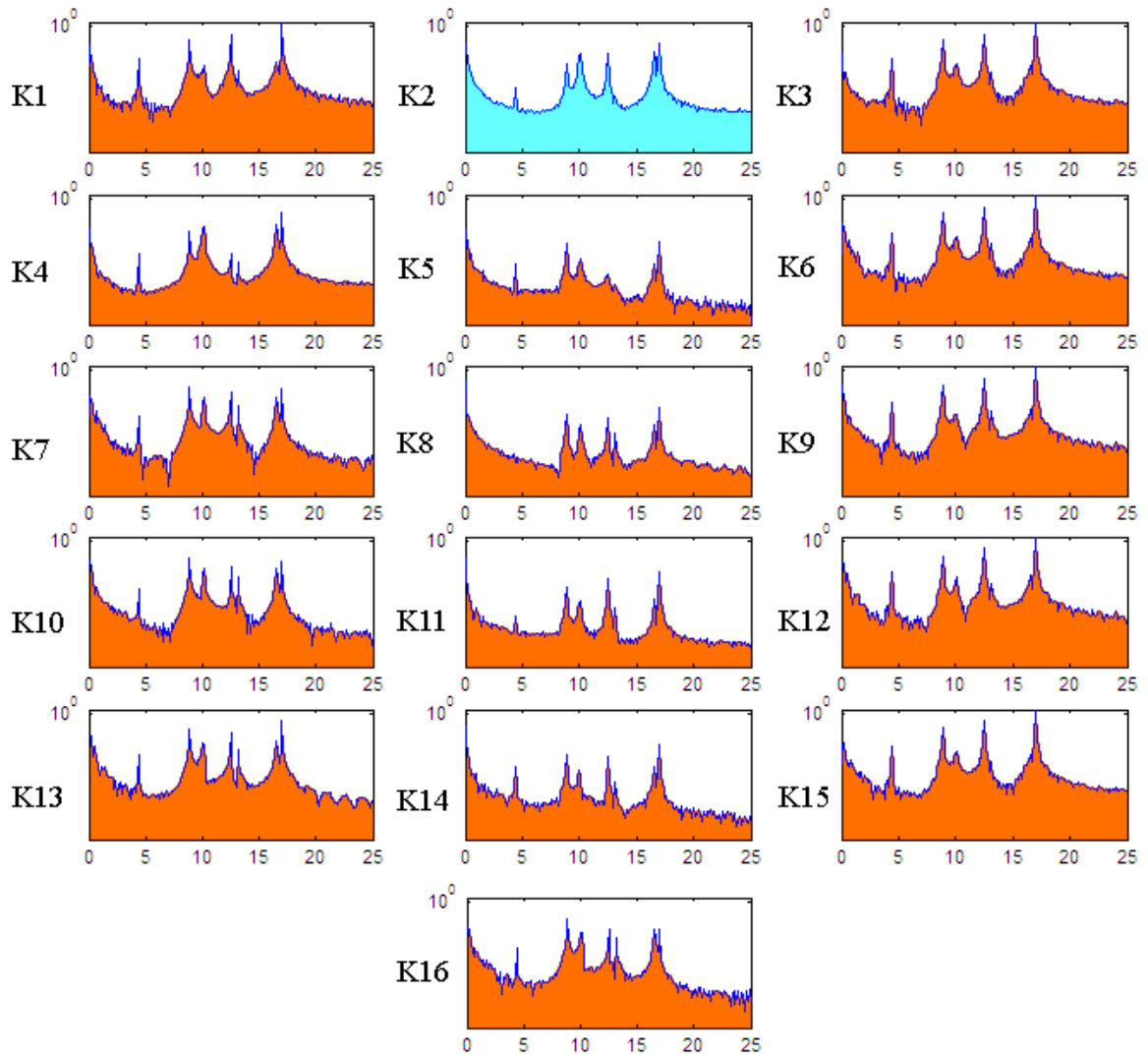


Şekil 3.79. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 15 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi

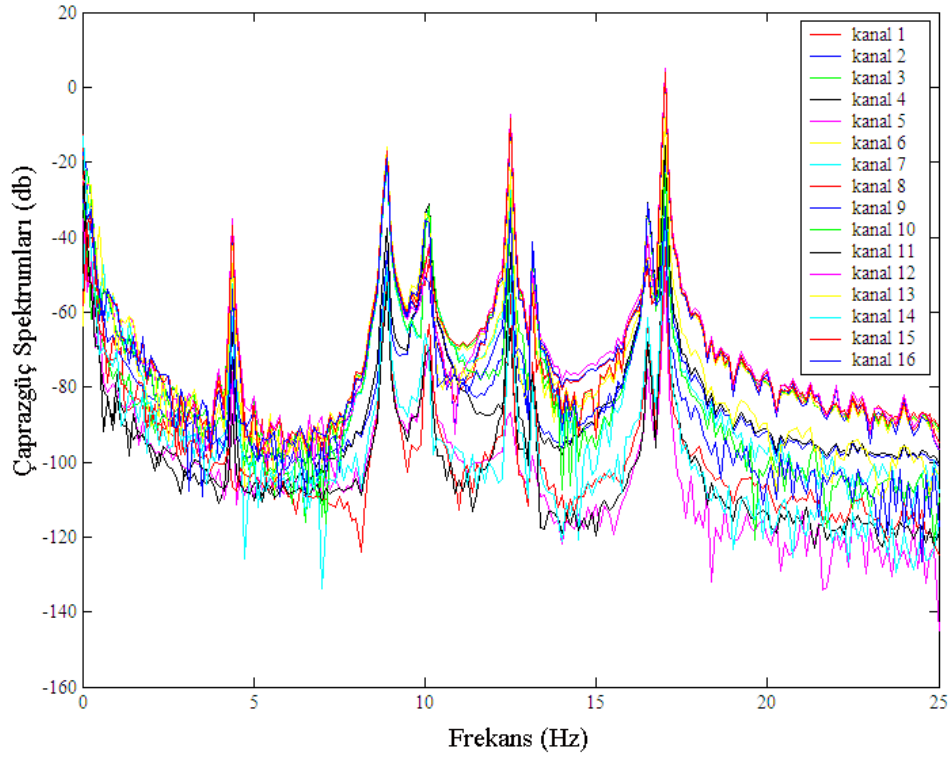


Şekil 3.80. Çevresel titreşim deneyi yapılan model için 2 numaralı kanal referans alınarak 16 numaralı kanala ait CPS'nin üretilmesi

Her bir kanal için hesaplanmış olan spektrum serilerinin ortalamalarının alınması ile elde edilen çaprazgüç spektrumları, modal parametrelerin belirlenmesinde giriş verisi olarak kullanılacaktır. Elde edilen çaprazgüç spektrumların tümünün bir arada çizimi Şekil 3.81’de ayrı eksenler üzerinde ve Şekil 3.82’de tek bir eksen üzerinde gösterilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, 2 numaralı kanal referans alınarak çaprazgüç spektrumları hesaplandığından dolayı, 0-25 Hz frekans aralığında beklenen 7 modun tamamına ait tepe noktaları net bir şekilde ortaya çıkartılmıştır. Böylelikle, etki tepki modal analizine göre çok daha başarılı bir dinamik karakteristik belirleme çalışması yapılabilecektir.



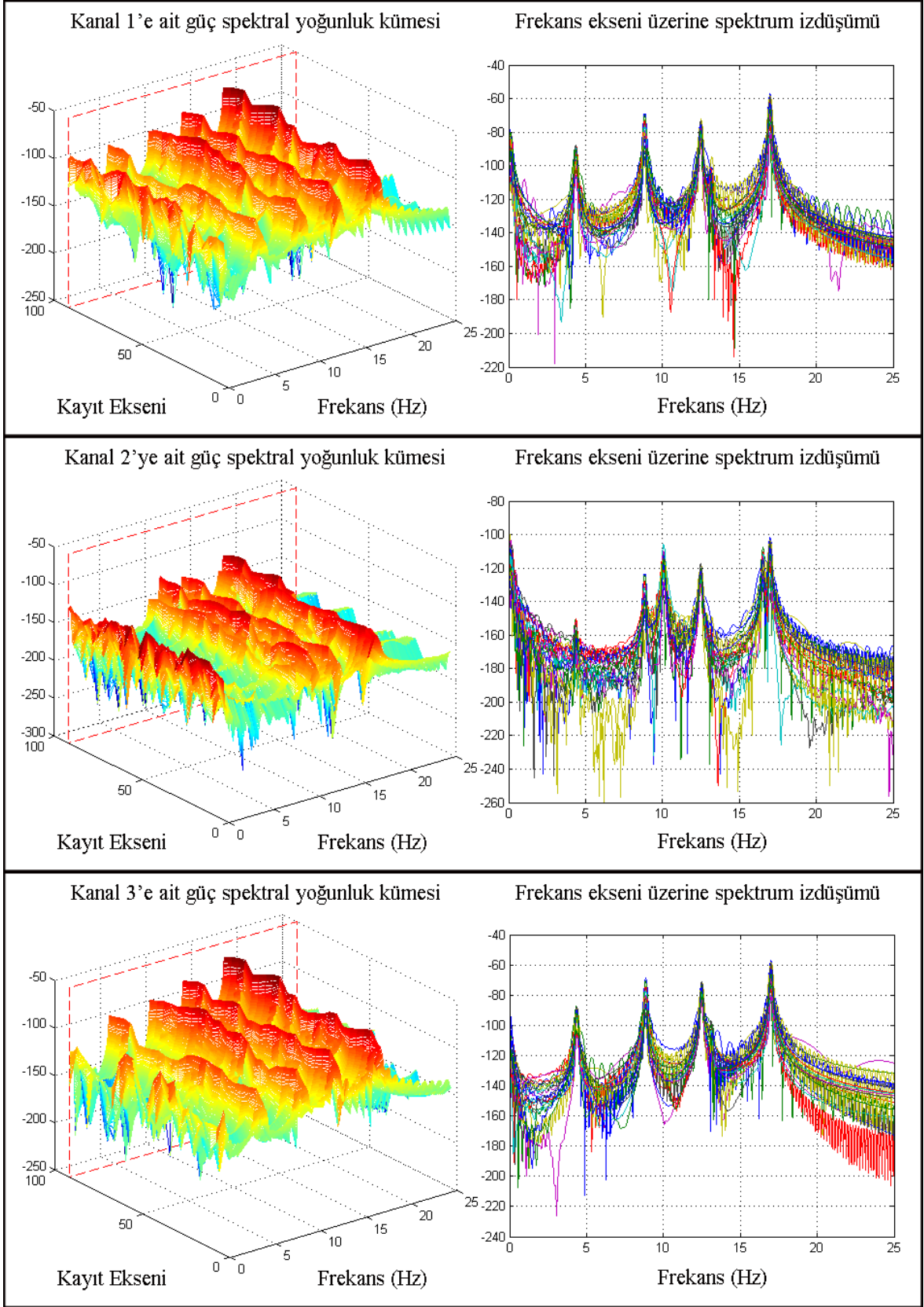
Şekil 3.81. Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan CPS grafiklerinin ayrı eksenler üzerinde gösterimi



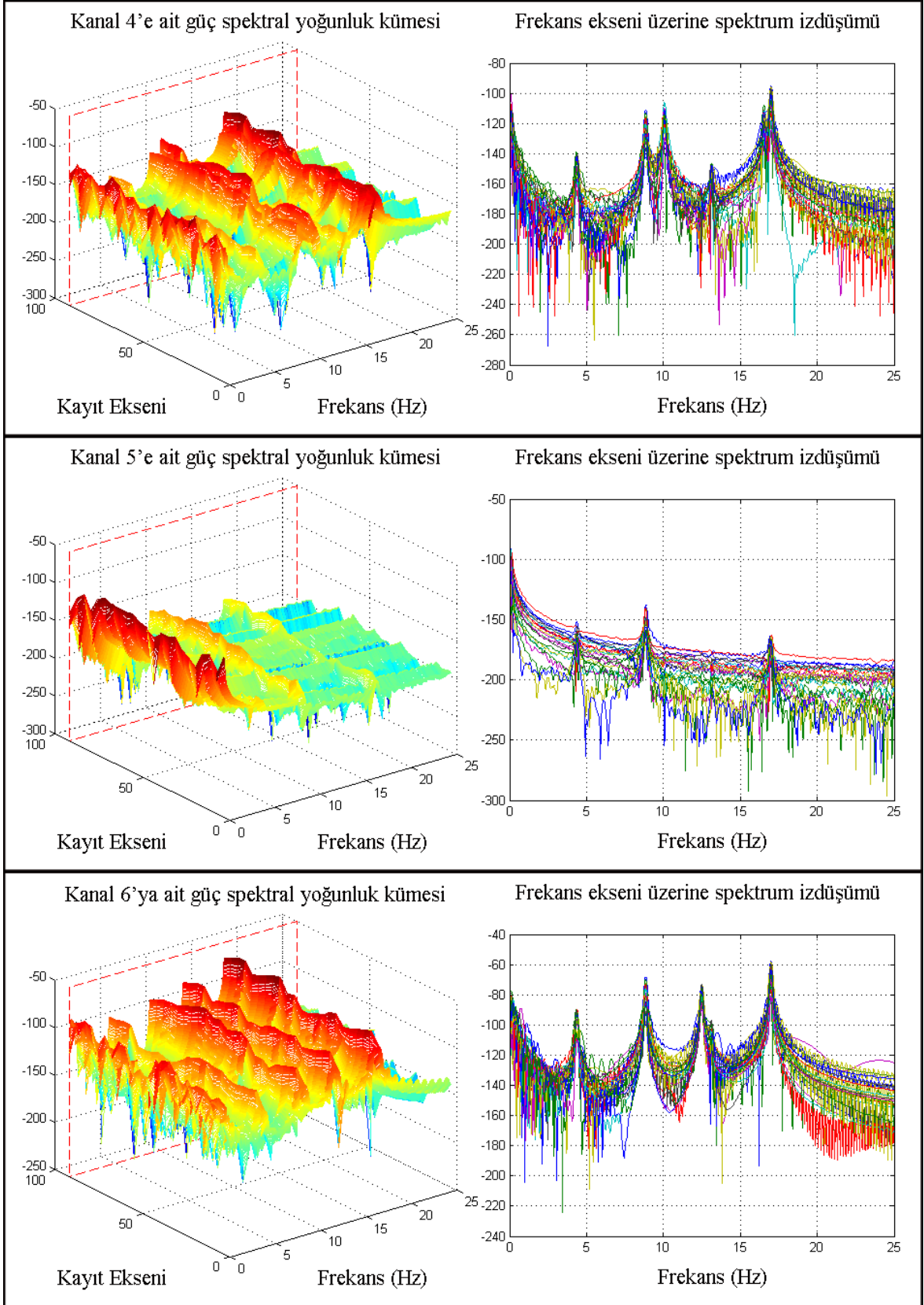
Şekil 3.82. Çevresel titreşim deney verilerinden hesaplanan CPS grafikleri

3.1.1.2.2.3. Güç Spektral Yoğunlukları

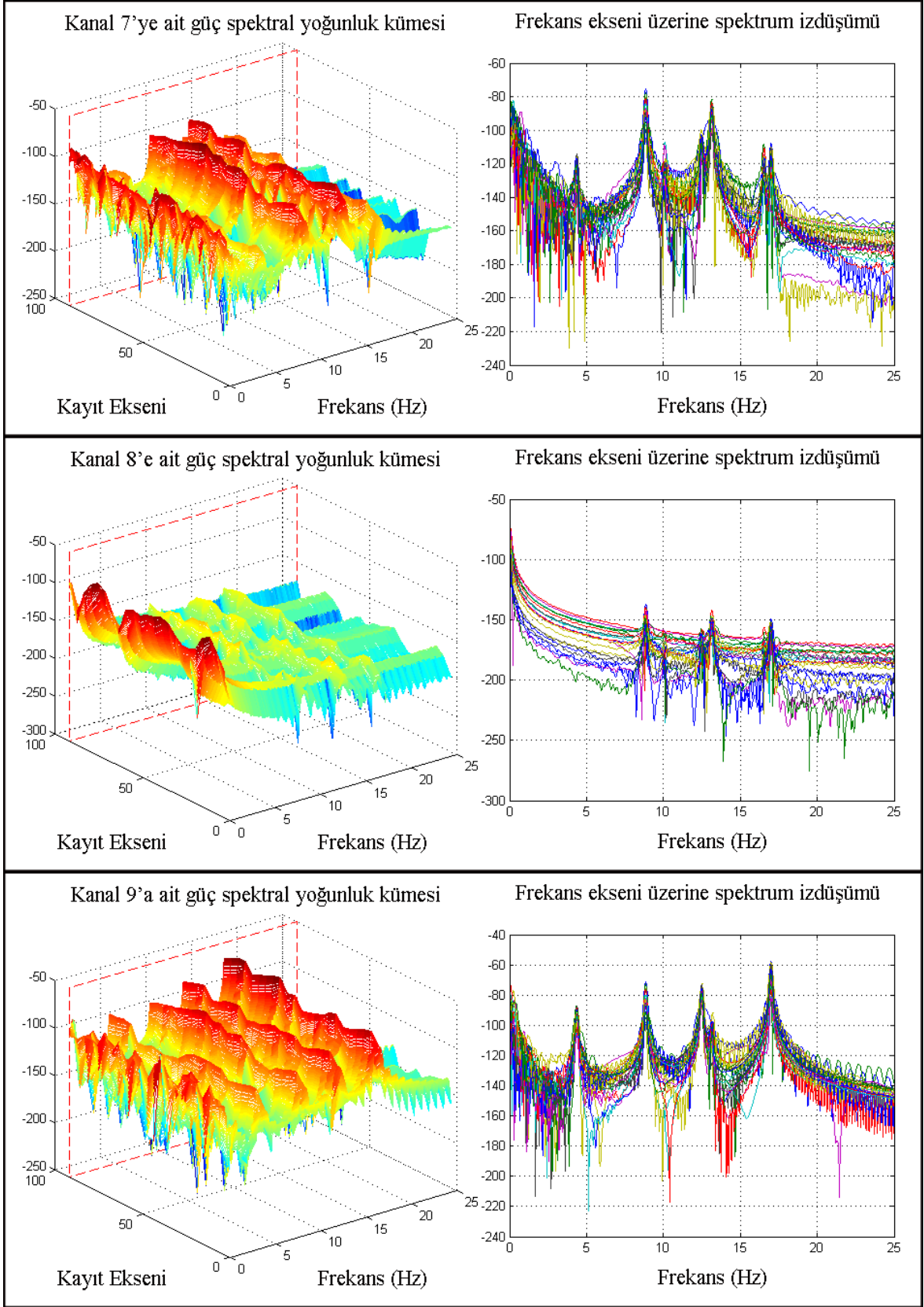
Üç boyutu çelik çerçeve modelinin güç spektral yoğunluk (PSD) serilerinin hesabında, daha hassas bir çözüm elde edebilmek amacıyla Fourier dönüşümünde kullanılacak verilerin sayısı artırılmıştır. Elde edilen spektrumlarda oluşacak sızma hatalarının filtrenmesi için Dikdörtgen Pencereleme Yöntemi kullanıldığında spektrumlar oldukça girintili hale geldiklerinden, Hanning Pencereleme Yönteminin kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür. Hesap yöntemi olarak ise Welch yöntemi dikkate alınmıştır. Şekil 3.83-Şekil 3.88’de, çevresel titreşim deneyinde ölçüm kanalları tarafından toplanan sinyal kümelerinin analizi sonucu elde edilen güç spektral yoğunluk kümeleri görülmektedir. Şekillerde üretilen spektrum kümelerinin üç boyutlu gösteriminin yanında, frekans eksenini üzerindeki izdüşümleri de sunulmaktadır.



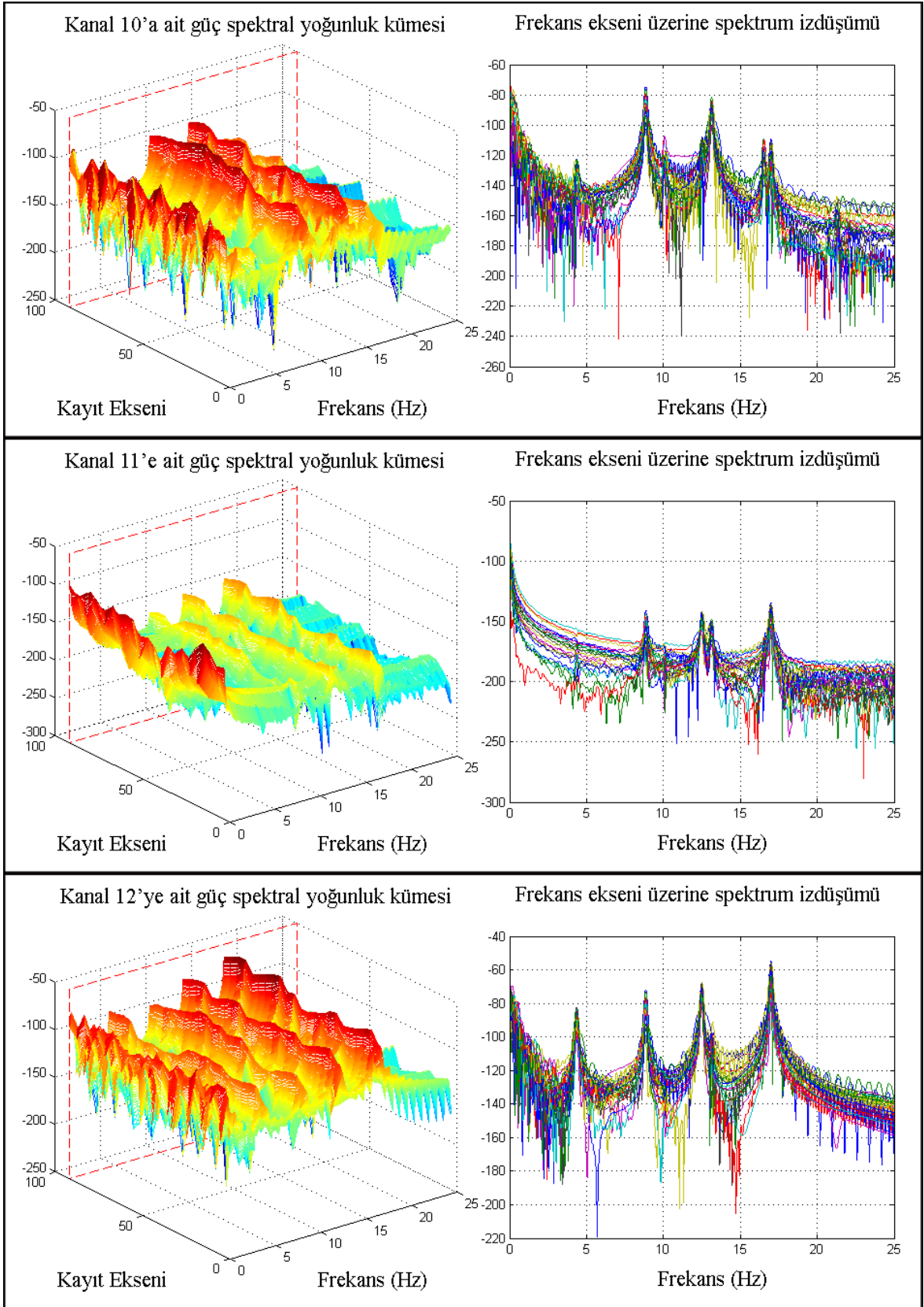
Şekil 3.83. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 1, 2 ve 3 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri



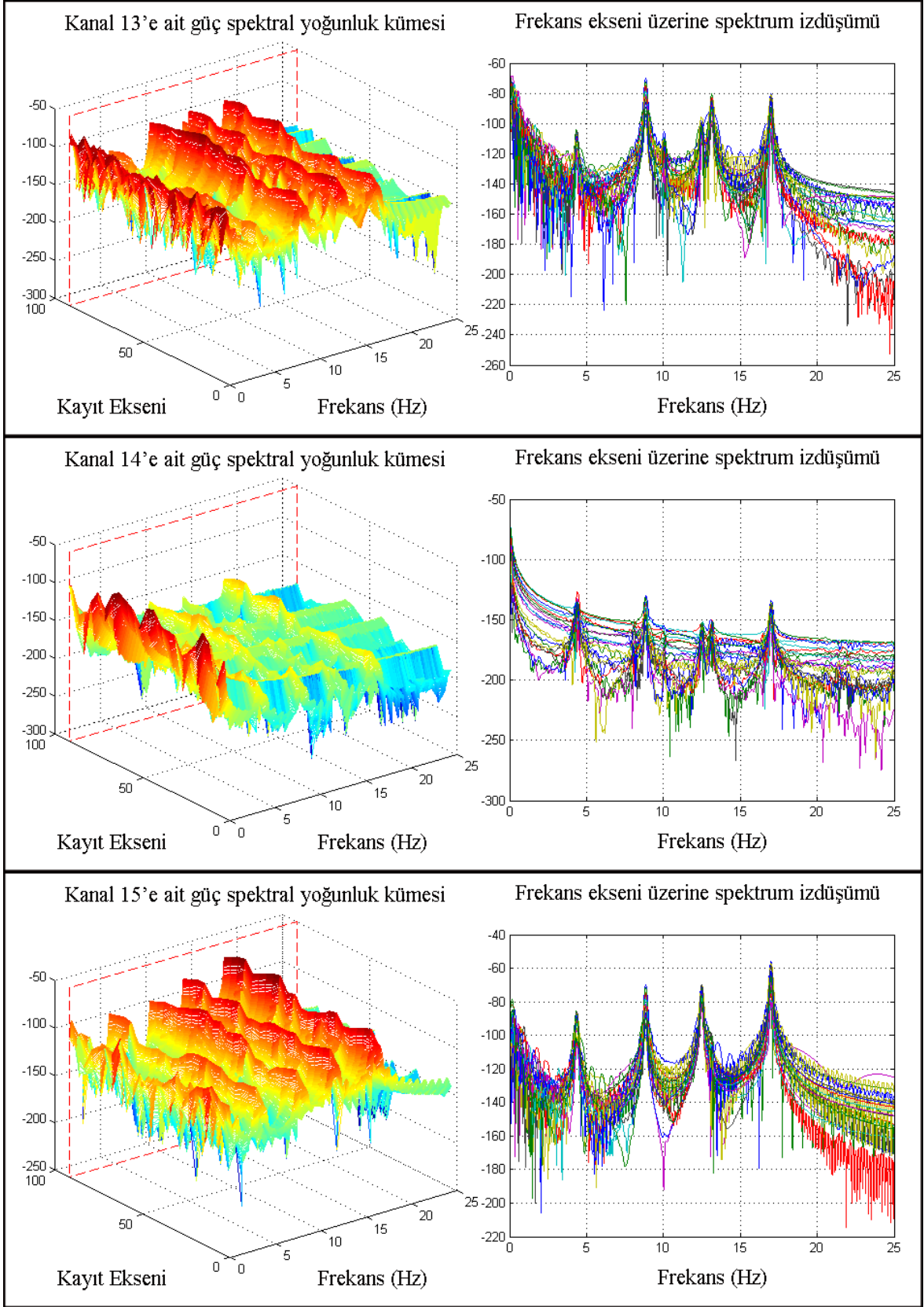
Şekil 3.84. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 4, 5 ve 6 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri



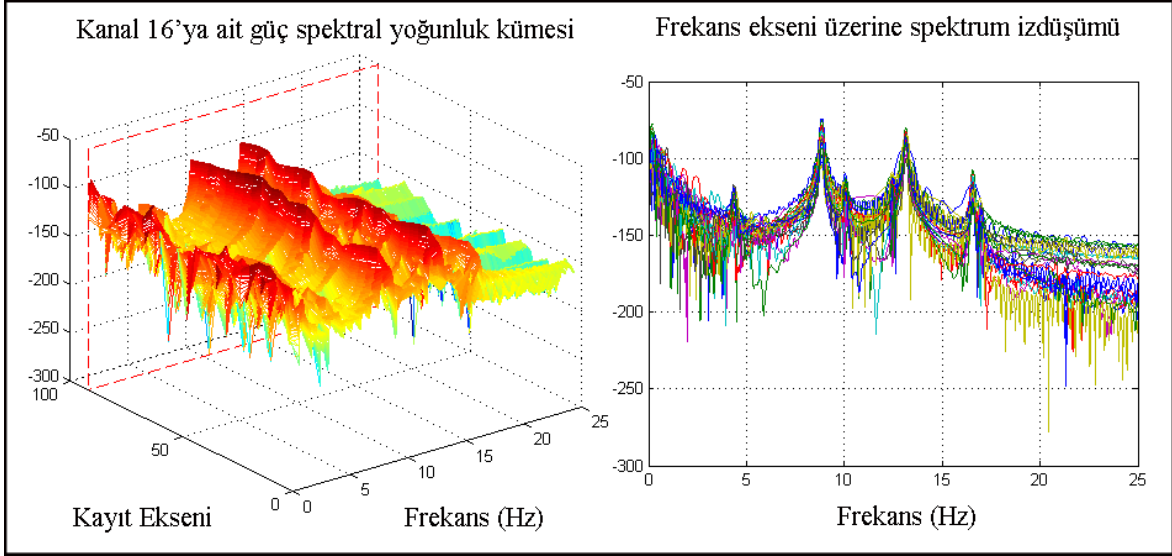
Şekil 3.85. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 7, 8 ve 9 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri



Şekil 3.86. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 10, 11 ve 12 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri



Şekil 3.87. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 13, 14 ve 15 numaralı kanallar için hesaplanan PSD serileri

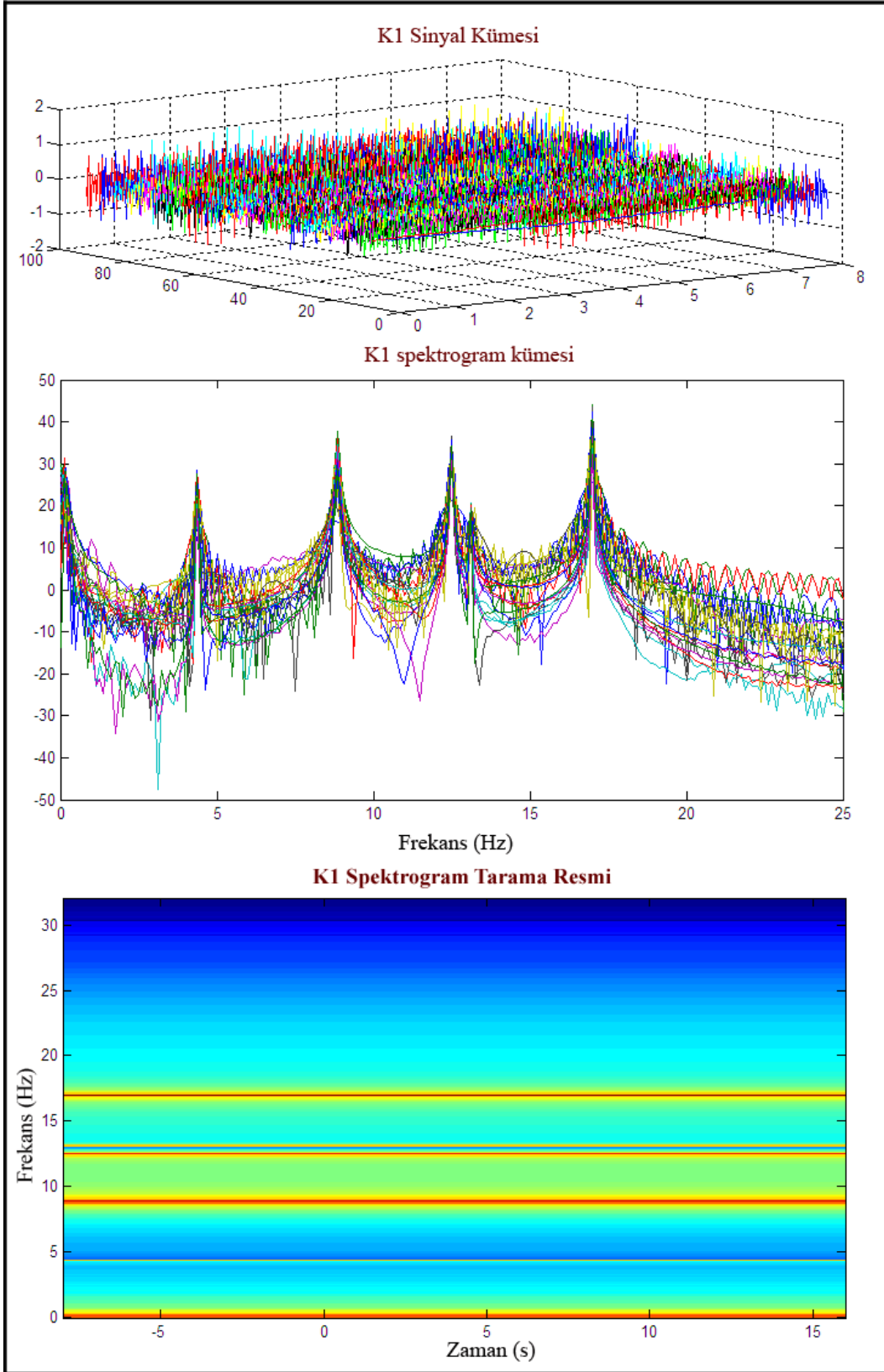


Şekil 3.88. Modelin çevresel titreşim deneyi sonucunda 16 numaralı kanal için hesaplanan PSD serisi

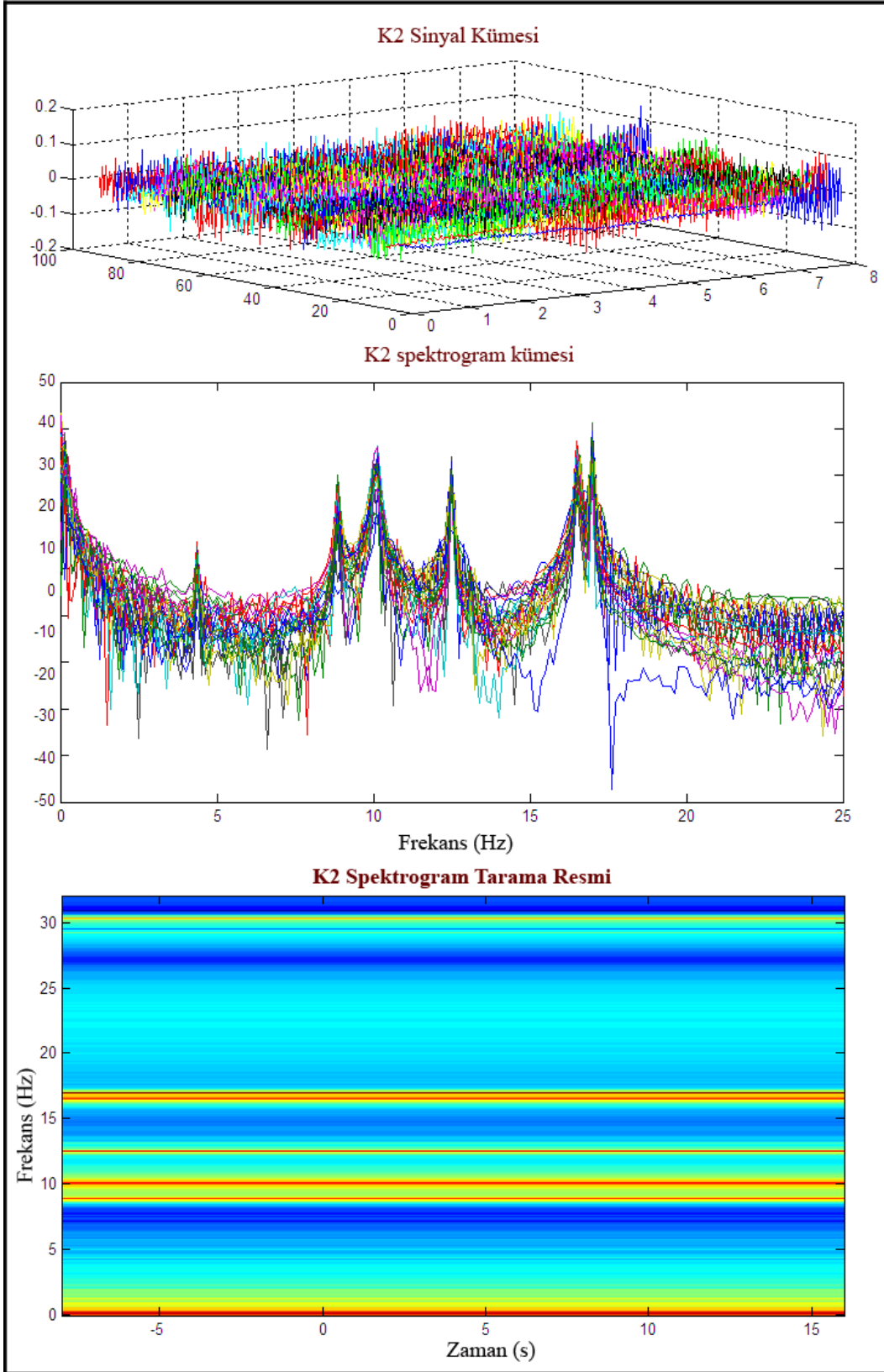
Üretilen güç spektral yoğunluk kümeleri incelendiği zaman, her bir kanalın sinyal kümesi içerisinde yer alan verilerin güç spektral yoğunluk serilerinin oluşturulmuş olduğu görülmektedir. Bu spektrum kümelerinin Tekil Değer Ayırıştırması yapıldığında veya ortalamaları alındığında, her bir kanalın güç spektral yoğunluğu bulunabilir. Kanallara ait güç spektral yoğunlukları, yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin sadece tepki modal analizi ile belirlenmesi algoritmalarında giriş verisi olarak kullanılabilirler. Bu sebeple bu spektrum analizi de diğer spektral analizler kadar önem arz etmektedir. OMA programında kullanılan EFDD ve SSI yöntemlerinde, spektral analiz fonksiyonu olarak güç spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılmaktadır.

3.1.1.2.2.4. Spektrogram Grafikleri

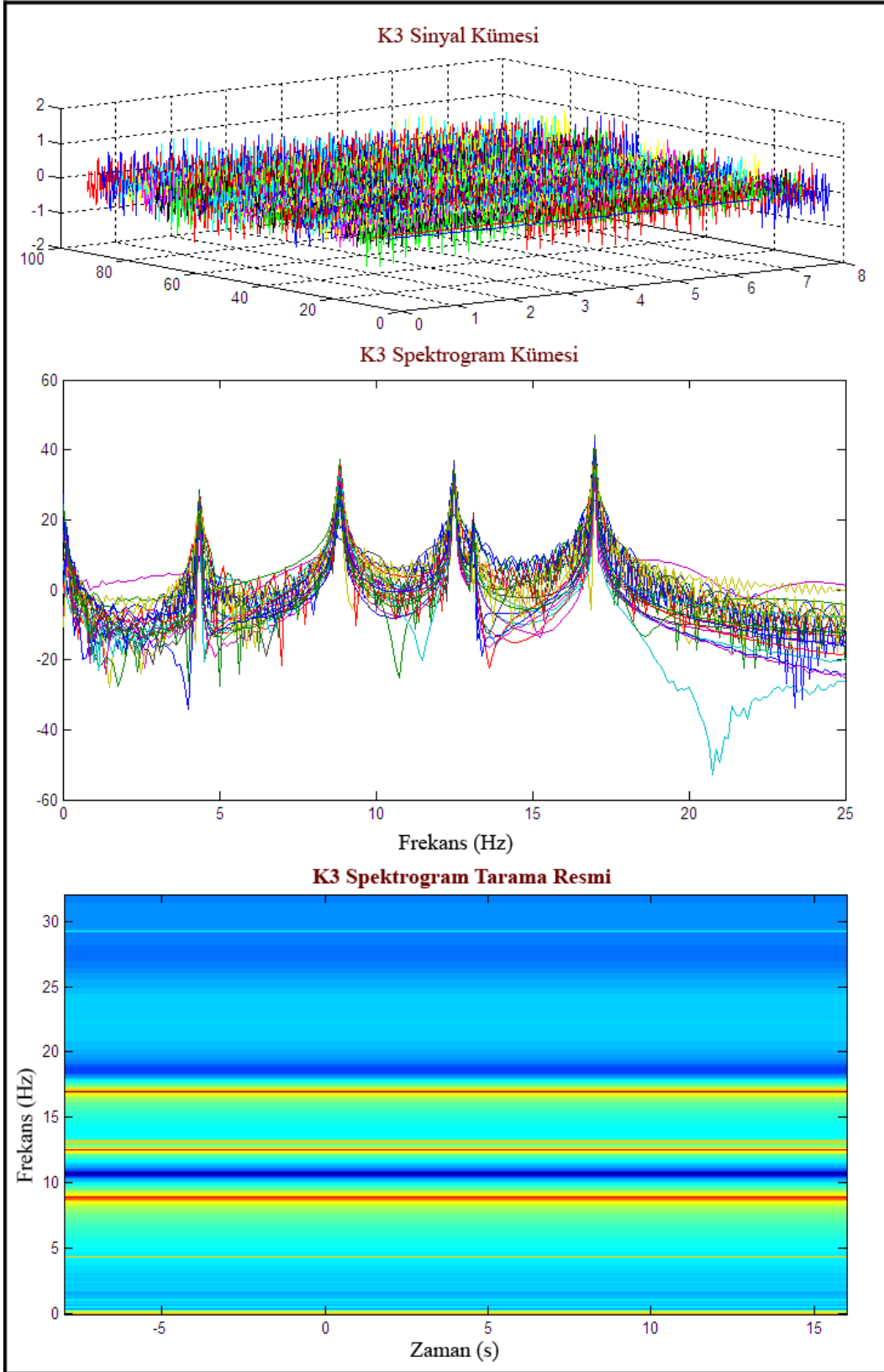
Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinde, ilk dört kanaldan alınan sinyallere bağlı olarak hesaplanan spektrogram grafikleri Şekil 3.89-Şekil 3.92'de gösterilmektedir. Bu şekillerde kanallardan toplanan sinyal serilerindeki her bir zaman kaydına uygun olarak hesaplanan spektrogram eğrileri ve kanalların spektrogram tarama resimleri görülmektedir. Spektrogram tarama resimleri, sinyal kayıtlarına Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemi uygulanarak tek bir sinyale indirgenen ivme spektrumuna göre hesaplanmıştır.



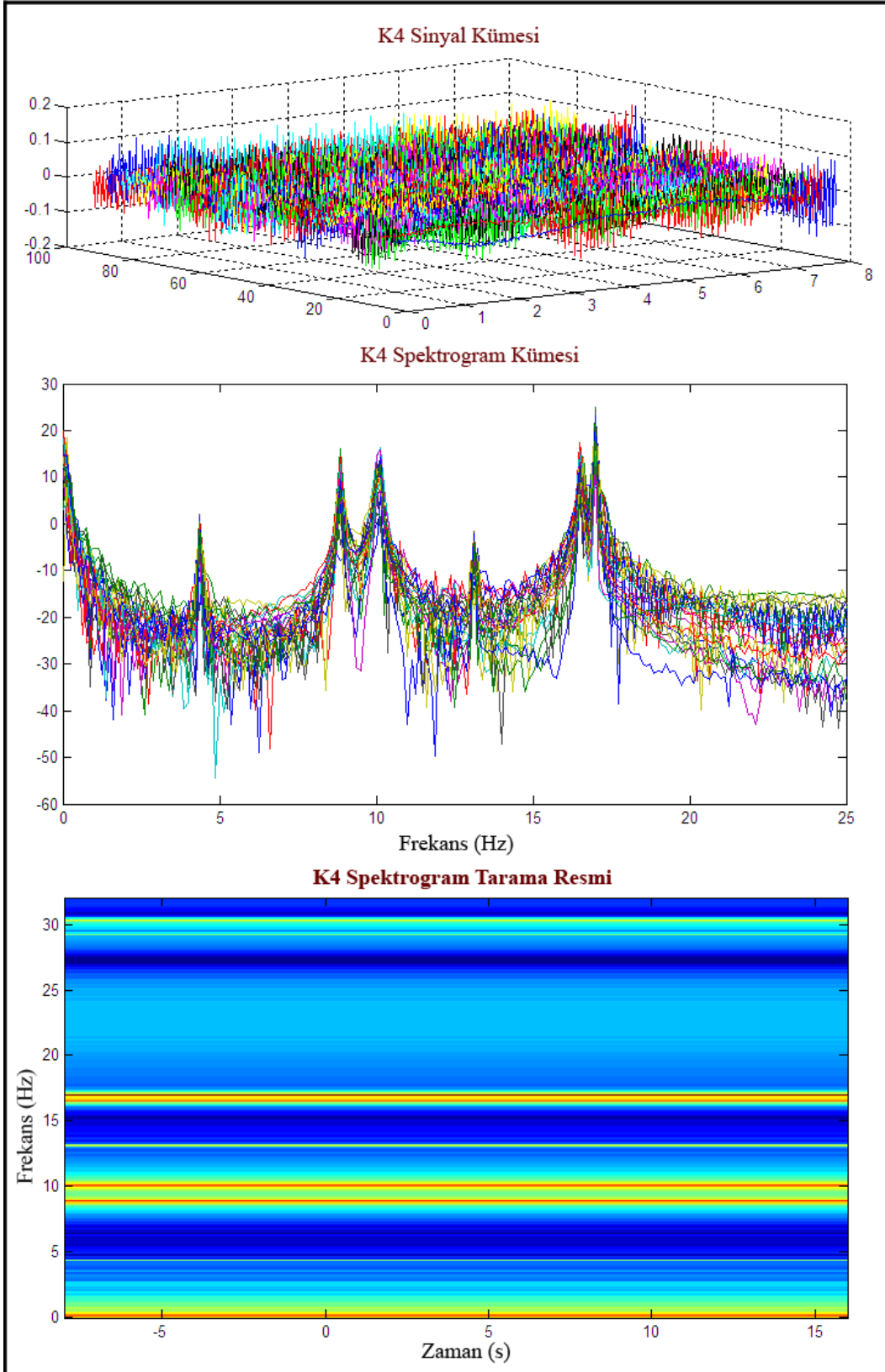
Şekil 3.89. Modelin çevresel titreşim deneyinde 1 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



Şekil 3.90. Modelin çevresel titreşim deneyinde 2 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



Şekil 3.91. Modelin çevresel titreşim deneyinde 3 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi



Şekil 3.92. Modelin çevresel titreşim deneyinde 4 numaralı tepki kanalından alınan sinyalin spektrogram grafiği ve resmi

3.1.1.2.3. Çevresel Titreşim Deneyi Yapılan Modelin ModalCAD Programı Kullanılarak Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Bir önceki aşamada, SignalCAD programı kullanılarak, üç boyutlu çerçeve modelinin çevresel titreşim deneyinden elde edilen ham veriler işlenmiş ve spektrum serileri elde edilmiştir. Üretilen spektrum serilerinin ortalamaları alınarak ölçüm kanallarına ait hesap spektrumları bulunmuştur. Bu spektrumlar kullanılarak modelin dinamik karakteristikleri belirlenecektir. Çevresel titreşim deneylerinden elde sinyallerden üretilen spektrumlar kullanılarak yapılan sadece tepki modal analizinde çaprazgüç spektrumları, modal parametre belirleme algoritmalarının giriş verisini oluştururlar.

3.1.1.2.3.1. İşletim Vektörleri (OV) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

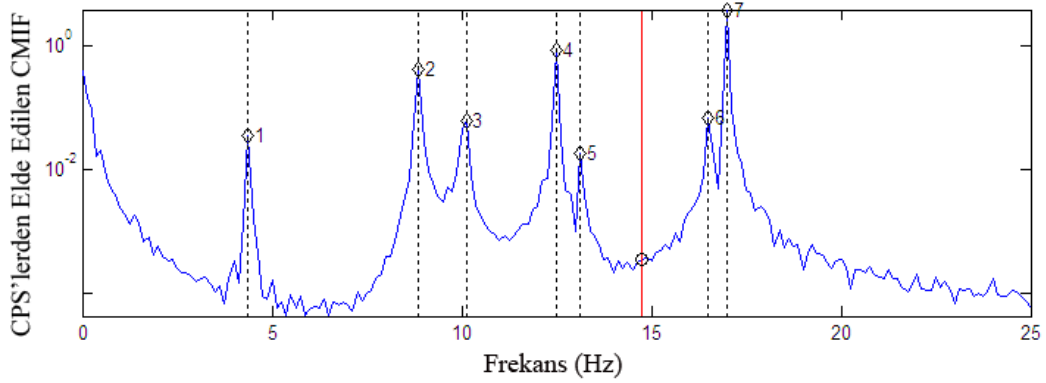
ModalCAD programında sadece tepki modal analizi ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, çaprazgüç spektrumları kullanılmaktadır. Modelin bütün kanallarına ait CPS'lerin davranışını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonu (CMIF), tepe noktalarının seçilmesinde kullanılır. Şekil 3.93'te, CMIF spektrumu üzerinde tepe noktalarının ait oldukları mod numaraları gösterilmektedir. Her bir tepe noktası esas alınarak, bu noktaya uygun dinamik karakteristikler hesaplanmıştır. Bu tepe noktalarına karşılık gelen dinamik karakteristikler Tablo 3.4'de sunulmaktadır.

Üç boyutlu çerçeve modelinin, sadece tepki deneysel modal analizi sonucunda İşletim Vektörleri Yöntemi kullanılarak belirlenen mod şekilleri Şekil 3.94'te gösterildiği gibidir. Burada hesaplanan mod şekillerinin birbirleri ile uyumunu gösteren üç boyutlu ve iki boyutlu MAC grafikleri Şekil 3.95'te görüldüğü gibidir. MAC grafikleri burada İşletim Vektörleri Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin kendi içerisinde karşılaştırmasının yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Hesaplanan her bir modun farklı davranış göstermesi gerekmektedir. Modal vektörler içerisinde bu davranışların sayısal olarak kontrolü MAC grafikleri ile yapılmaktadır.

Şekil 3.95'te görülen MAC grafikleri incelendiğinde tıpkı etki tepki modal analizinde olduğu gibi bazı köşegen olmayan matris değerlerinin oldukça yüksek değerli çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi, 1. ve 4. mod ile 2. ve 7. modların sanki benzer davranışlar gösteriyormuş gibi algılanmalarındandır. Veri toplama ünitesinde 17 kanallı ölçüm yapılabildiğinden ve referanslı ölçüm tercih edilmediğinden, tek ölçüm yapılmış ve sadece

modelin en tepe seviyesindeki düğüm noktalarından ölçüm alınmıştır. Gerçekte, modelin 1. ve 4. modlarındaki davranış ile 2. ve 6. modlarındaki davranış tamamen farklıdır. Tepe noktasında yakın davranış söz konusu olduğu halde ara kattaki düğümler farklı davranış göstermektedirler. Sadece tepe noktasından ölçüm alındığından, MAC grafiklerinde bu modların çakışma noktalarında yüksek değerler çıkacaktır. Ancak, bu modların çakışma noktalarının dışındaki satır ve sütunlardaki değerlerin sıfıra yakın olması, modal vektörlerin hesabının doğruluğunu açık bir şekilde göstermektedir.

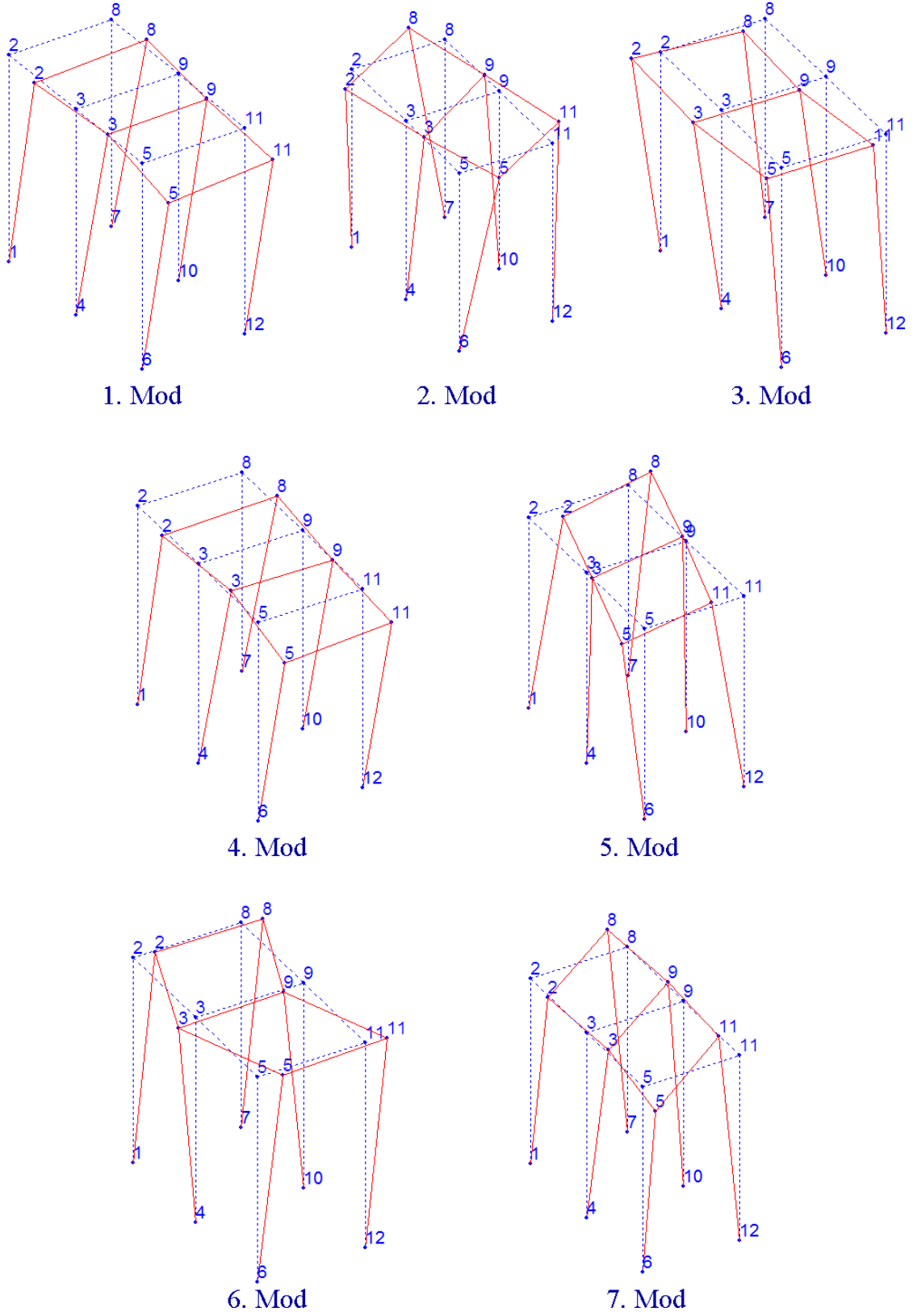
Şekil 3.96'da her bir modal vektörün modal faz doğruduşluk grafikleri gösterilmektedir. Burada bütün modal vektörler için MPC değerlerinin 0.9'dan büyük olması ve grafik üzerinde görülen lineer davranışlar sonuçların doğruluğu hakkında fikir vermektedir.



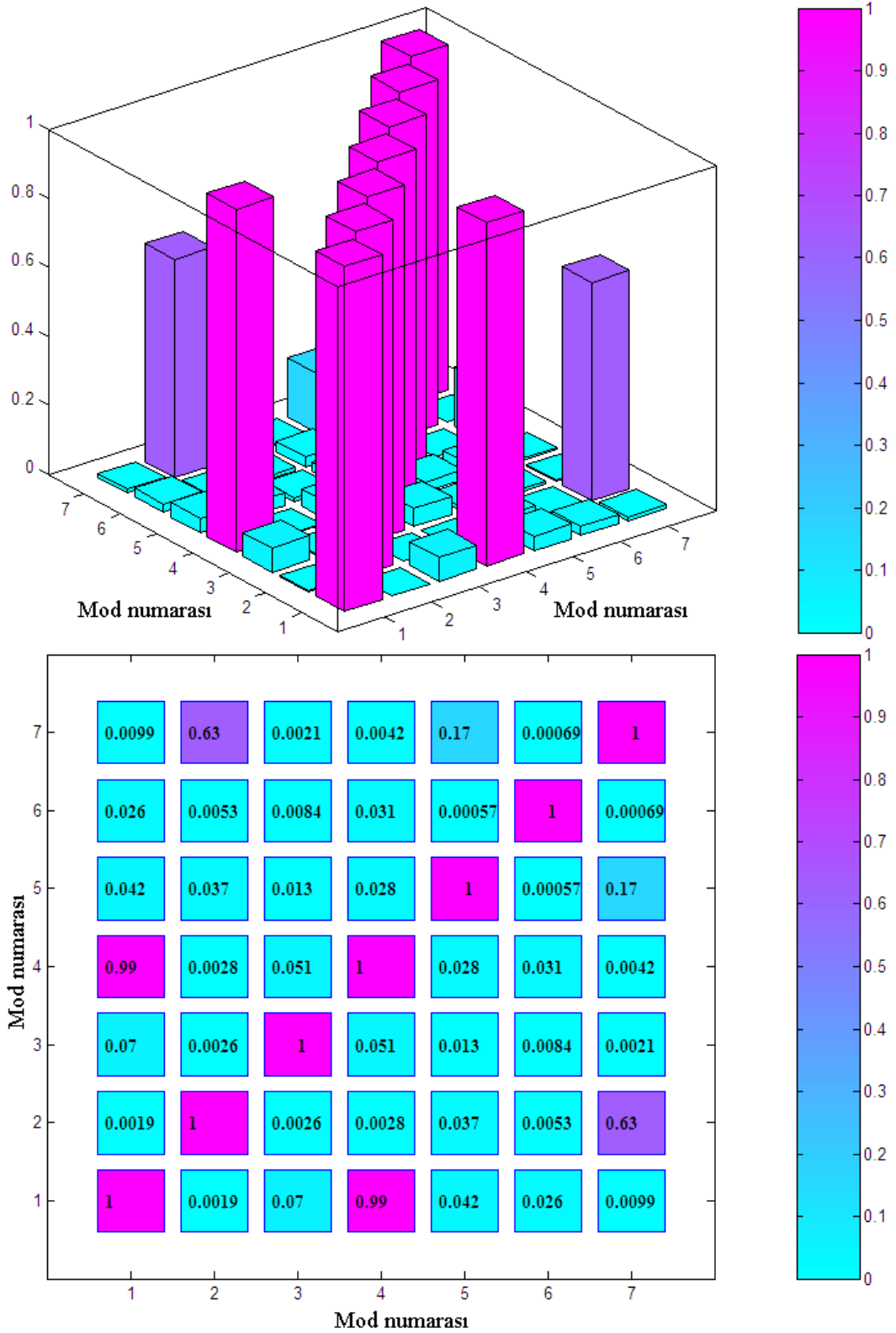
Şekil 3.93. Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen modların CMIF spektrumu üzerindeki konumları

Tablo 3.4. Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri

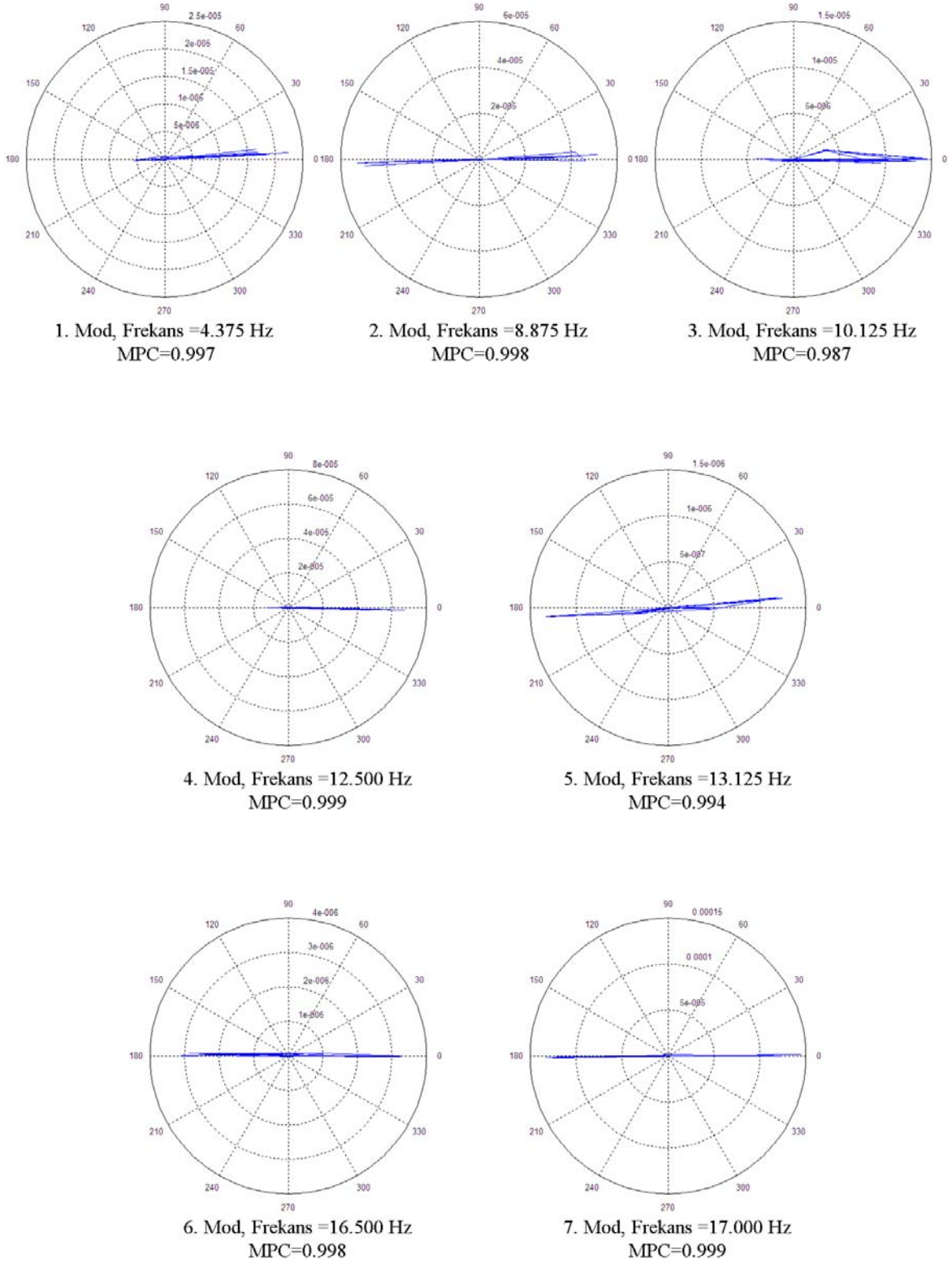
Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı	Yöntem
1	4.375	3.496	OV
2	8.875	1.845	OV
3	10.125	3.304	OV
4	12.500	1.237	OV
5	13.125	1.266	OV
6	16.500	1.149	OV
7	17.000	0.885	OV



Şekil 3.94. Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri



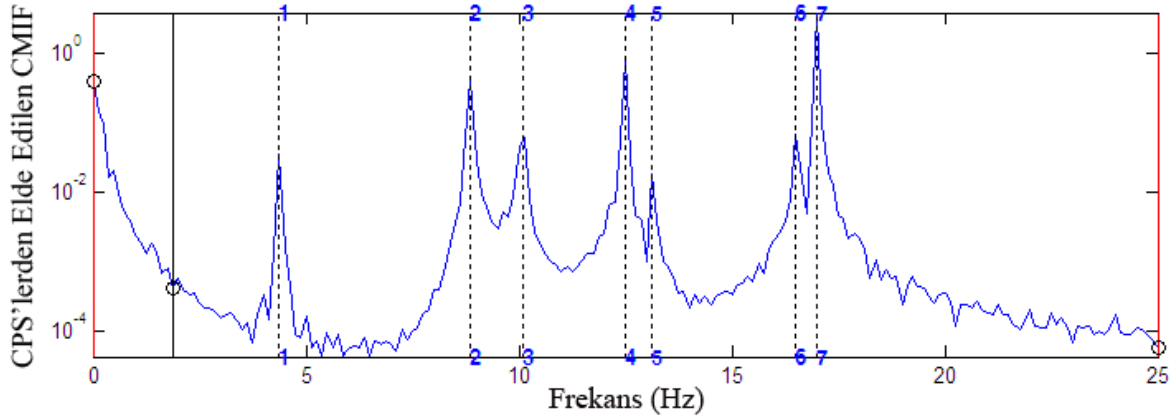
Şekil 3.95. Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri



Şekil 3.96. Modelin sadece tepki modal analizine göre OV Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri

3.1.1.2.3.2. Kompleks Eksponansiyel (CE) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Kompleks Eksponansiyel (CE) yöntemi ile analiz yapılırken öncelikle sistemin maksimum model derecesi seçilir. Burada yapılan ön değerlendirmelerde, stabilite diyagramlarında model derecesi 50'den sonrası için tepe noktalarının olduğu noktalarda dengenin sağlandığı görülmüştür. Buna bağlı olarak bu model derecesinin üzerinde bir seçim ile analiz yapıldığında sonuçlar arasında yaklaşık olarak çok fazla değişiklik görülmeyecektir. Model derecesi 100 olarak seçildikten sonra, bütün kanallara ait CPS'lerin davranışını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonu (CMIF) üzerinde tepe noktaları seçilerek analiz yapılır. Şekil 3.97'de, bütün kanallara ait çaprazgüç spektrumlarını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonu gösterilmektedir. Burada hesaplanan dinamik karakteristiklere karşılık gelen frekanslar ve bu frekansların spektrumdaki konumları verilmektedir.



Şekil 3.97. Modelin sadece tepki modal analizine göre CE yöntemi ile belirlenen modların CMIF spektrumu üzerindeki konumları

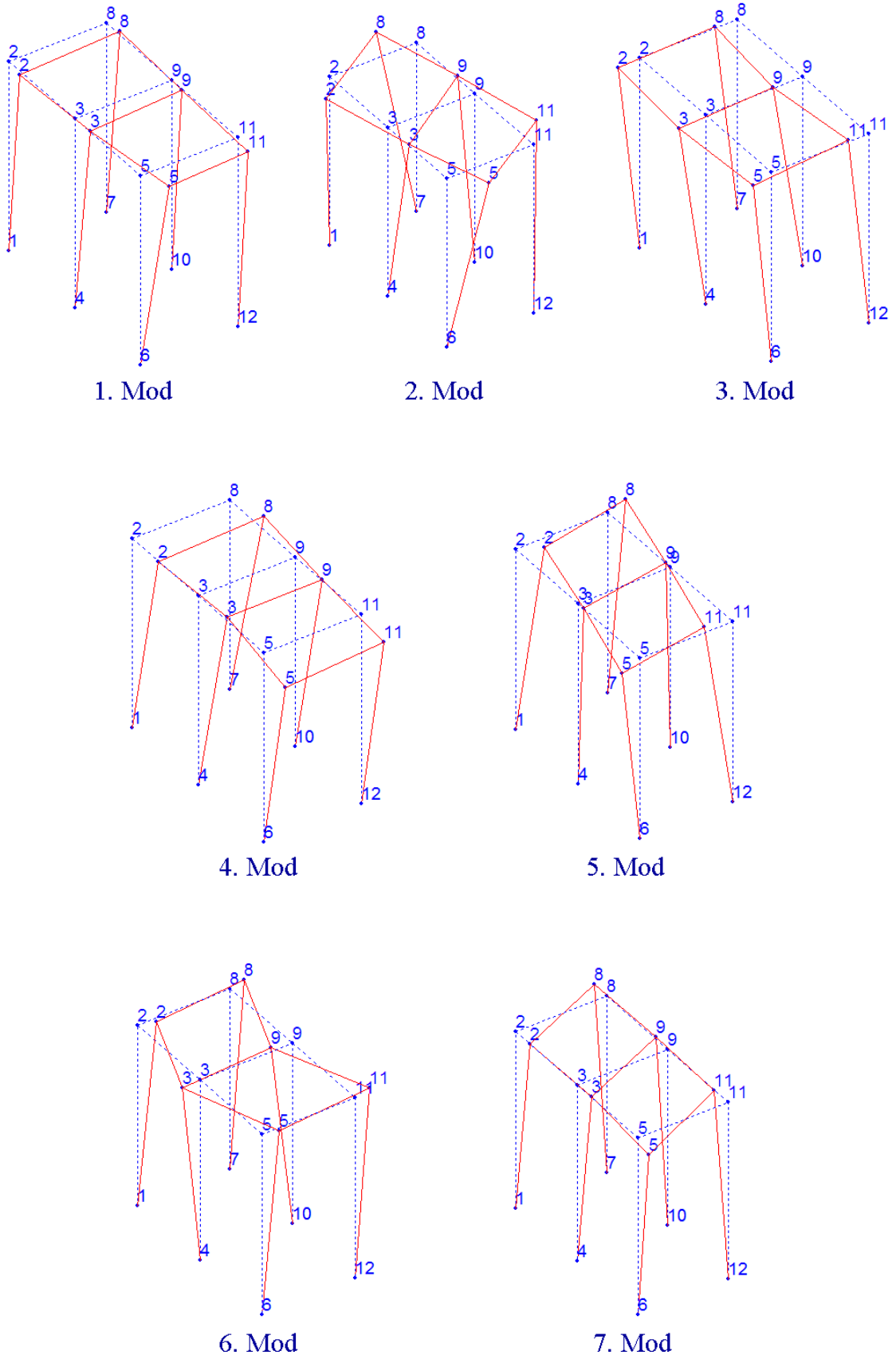
Çevresel titreşim deneyi yapılan üç boyutlu çerçevenin Kompleks Eksponansiyel Yöntemi kullanılarak hesaplanan dinamik karakteristikleri Tablo 3.5'de gösterilmektedir. Modelin sadece tepki modal analizi sonucunda Kompleks Eksponansiyel Yöntemi kullanılarak belirlenen mod şekilleri Şekil 3.98'de verilmektedir. Burada hesaplanan mod şekillerinin birbirleri ile uyumunu gösteren üç boyutlu ve iki boyutlu MAC grafikleri Şekil 3.99'da görüldüğü gibidir. Şekil 3.100'de her bir modal vektörün modal faz doğrudanlık grafikleri sunulmaktadır. Linear olan hatlar modal vektörün kalitesini göstermektedir.

MPC grafikleri incelendiği zaman, özellikle 3. ve 6. modda lineerliğin yaklaşık olarak sağlandığı ve 0.9 değerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Etki tepki modal analizi ile karşılaştırıldığında burada bulunan sonuçların çok daha başarılı olduğu söylenebilir. Bunun sebebi, etki tepki modal analizinde 3. ve 6. moda ait hareketin darbe yönüne dik doğrultuda olmasından dolayıdır. Sadece tepki modal analizde çaprazgüç spektrumlarının hesabında bu modların hareket doğrultusunda yerleştirilmiş olan 2 numaralı kanal referans alındığından bu yöndeki modal hareketler rahatlıkla elde edilmiştir.

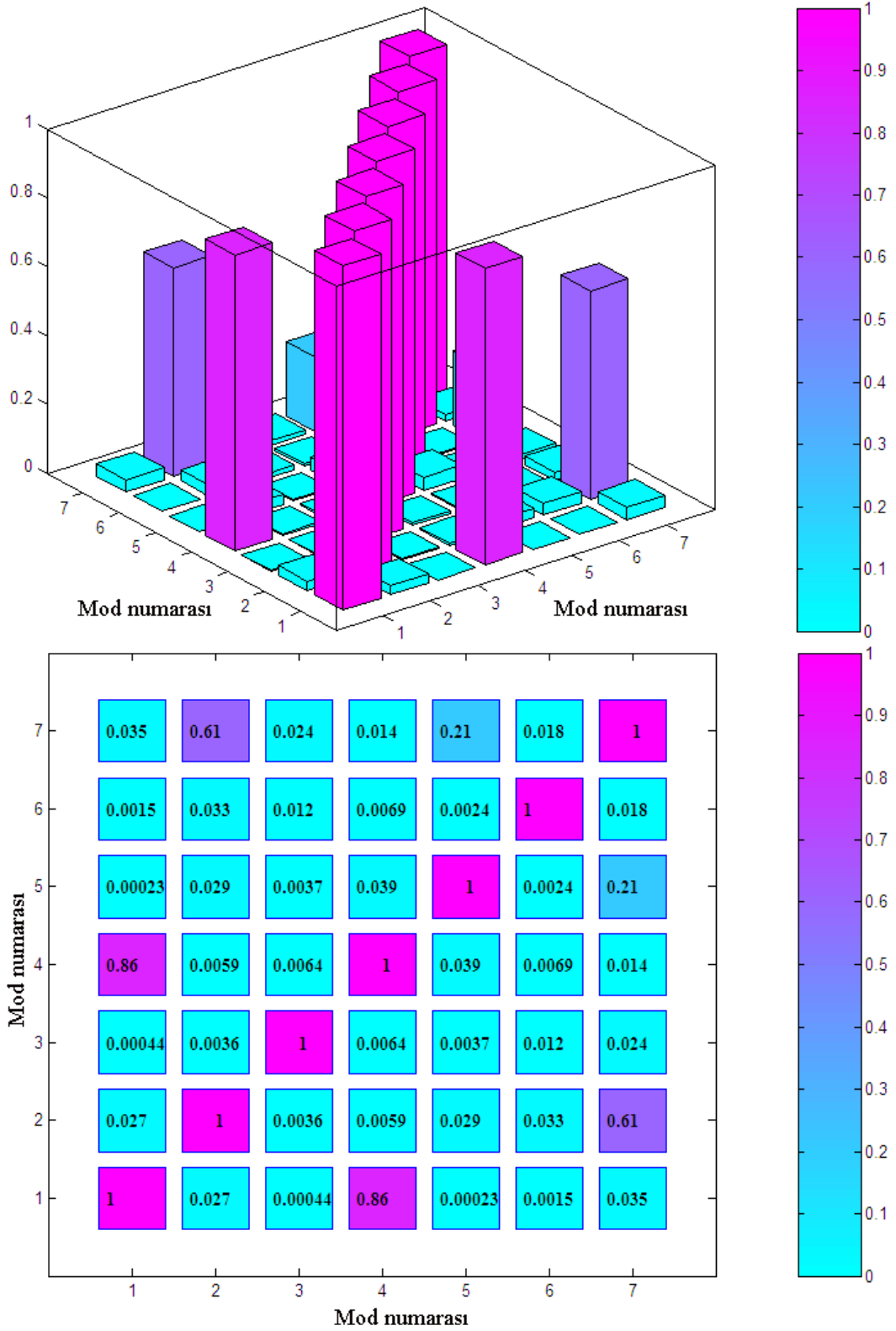
Tablo 3.5. Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Yöntem
1	4.373	0.041	CE
2	8.861	0.096	CE
3	10.105	0.371	CE
4	12.493	0.127	CE
5	13.107	0.031	CE
6	16.481	0.105	CE
7	17.002	0.057	CE

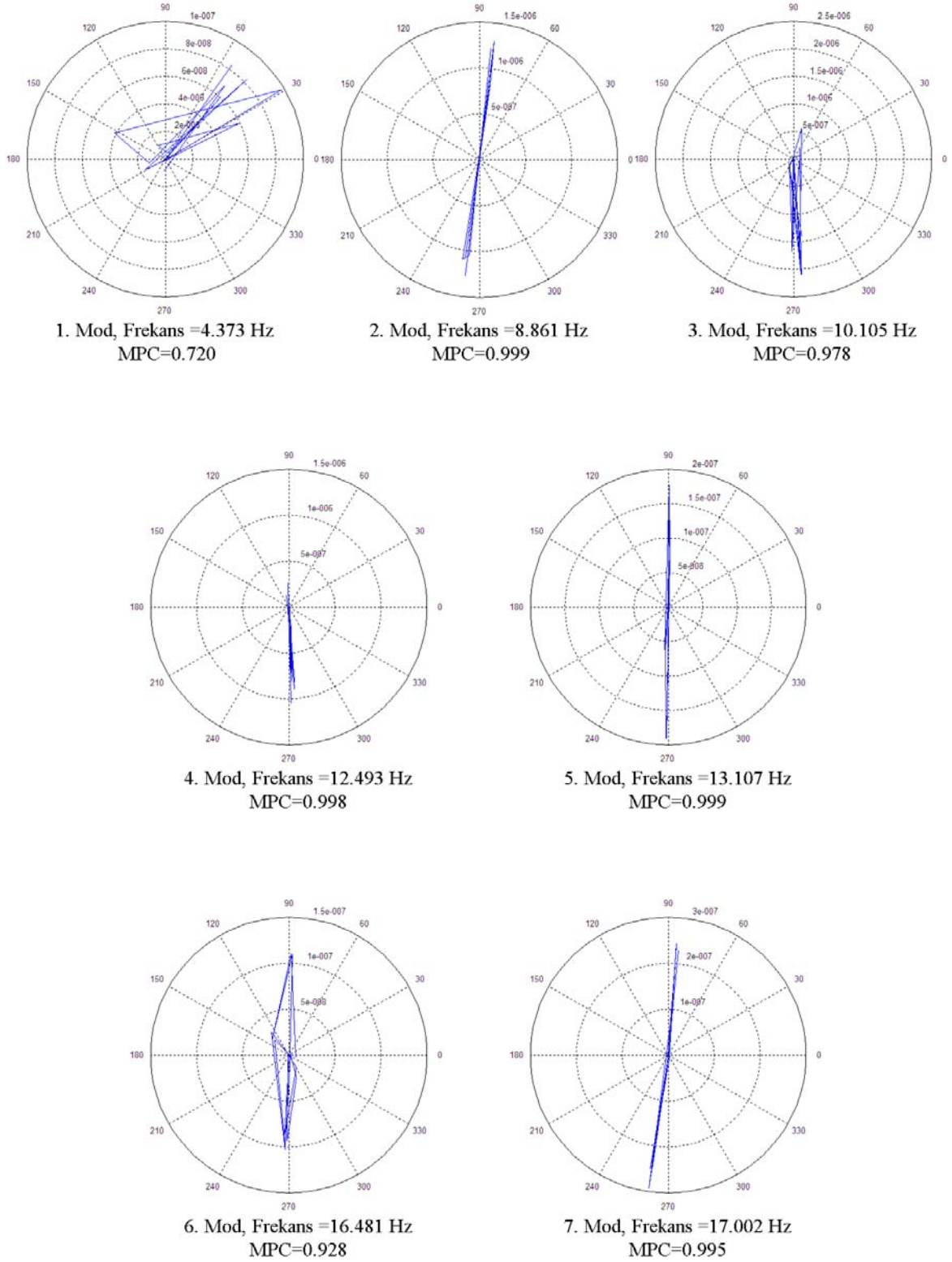
Kompleks Eksponansiyel Yöntemi ile analizde modların yerlerini tespit edebilmek amacıyla stabilite diyagramları kullanılmaktadır. Spektral mod gösterge fonksiyonu üzerinde maksimum model derecesine kadar tarama yapılır ve başlangıçtan itibaren stabil olan ve olmayan noktalar belirlenir. Mavi renkler stabil olan frekans ve mod şekillerini, kırmızı renkler ise stabil olmayan frekans ve mod şekillerini göstermektedir. Stabil olan noktaların düzgün bir hat oluşturduğu yerlerde modlar bulunmaktadır. Stabilite diyagramlarında maksimum model derecesi artırıldıkça nokta tarama hassasiyeti artar. Şekil 3.101’de model derecesi 25, 50 ve 100 için stabilite diyagramları çizilmiştir. Stabilite diyagramlarının olduğu eksene çaprazgüç spektrumlarından hesaplanan sistemin kompleks mod gösterge fonksiyonu çizilmiştir. Stabilite diyagramları incelendiğinde, model derecesi 50 olduktan sonra, tepe noktalarının olduğu yerlerde modların dengelendikleri görülmektedir. Modların belirlendiği konumlarda görülen stabil hatlar, sonuçların doğruluğu hakkında bir fikir verirler.



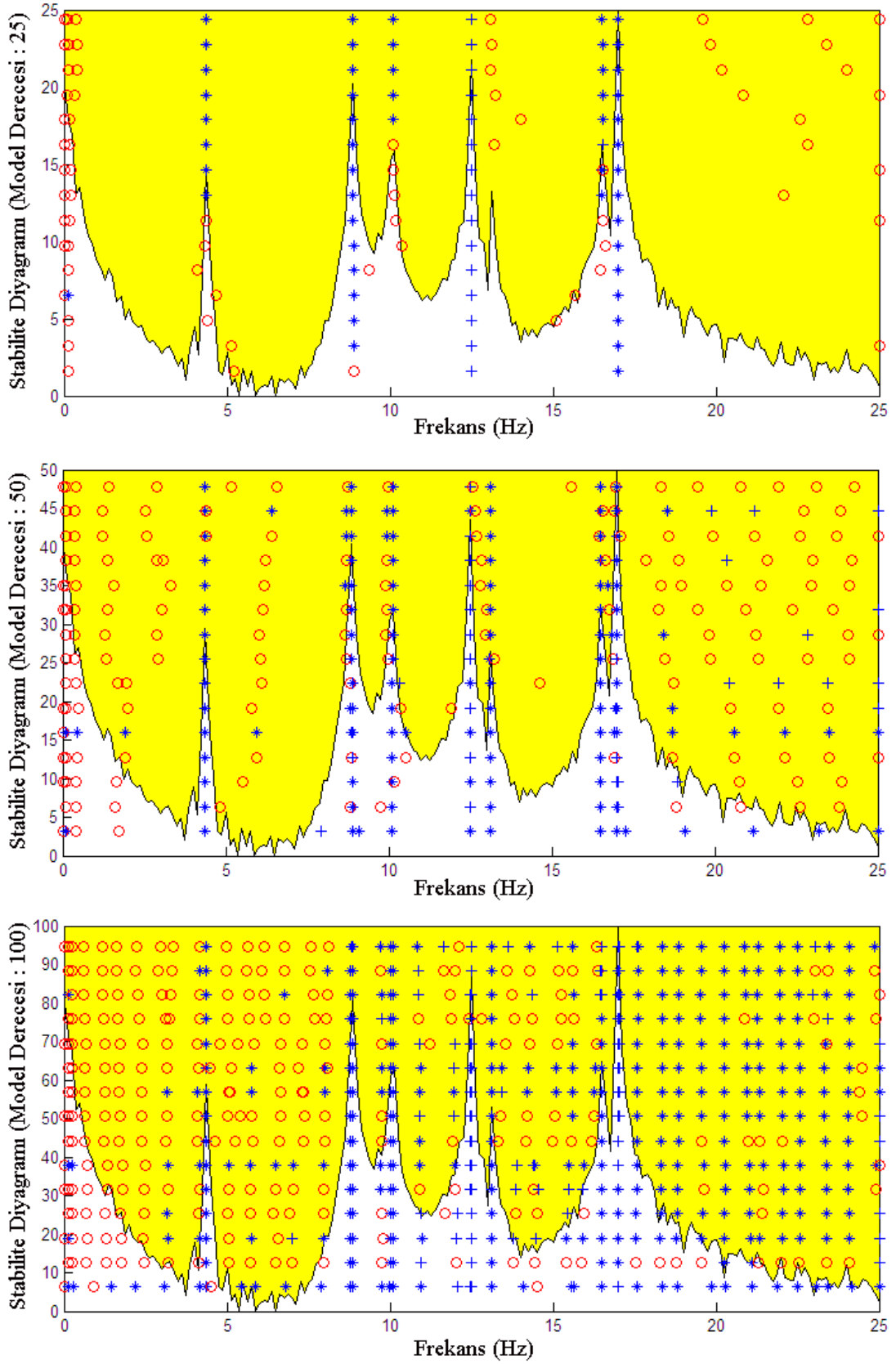
Şekil 3.98. Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri



Şekil 3.99. Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri



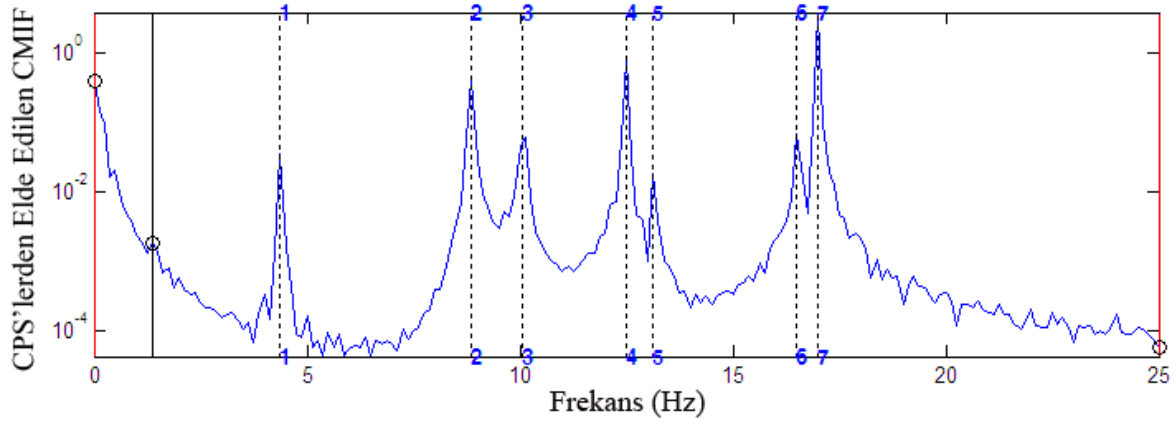
Şekil 3.100. Modelin sadece tepki modal analizine göre CE Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri



Şekil 3.101. Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 100 olması durumunda CE Yöntemi ile edilen stabilite diyagramları

3.1.1.2.3.3. Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Çokreferanslı Zaman Ortamı (PTD) yöntemi ile analiz yapılırken öncelikle sistemin maksimum model derecesi seçilir. Burada yapılan ön değerlendirmelerde, stabilite diyagramlarında model derecesi 50'den sonrası için tepe noktalarının olduğu noktalarda dengenin sağlandığı görülmüştür. Buna bağlı olarak bu model derecesinin üzerinde bir seçim ile analiz yapıldığında sonuçlar arasında çok fazla değişiklik görülmeyecektir. Model derecesi 100 olarak seçildikten sonra modelin bütün kanallarına ait CPS'lerin davranışını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonu üzerinde tepe noktaları seçilerek analiz yapılır. Şekil 3.102'de, bütün kanallara ait çaprazgüç spektrumlarını temsil eden kompleks mod gösterge fonksiyonu (CMIF) verilmektedir. Burada hesaplanan dinamik karakteristiklere karşılık gelen frekanslar ve bu frekansların spektrumdaki konumları gösterilmektedir.



Şekil 3.102. Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD yöntemi ile belirlenen modların CMIF spektrumu üzerindeki konumları

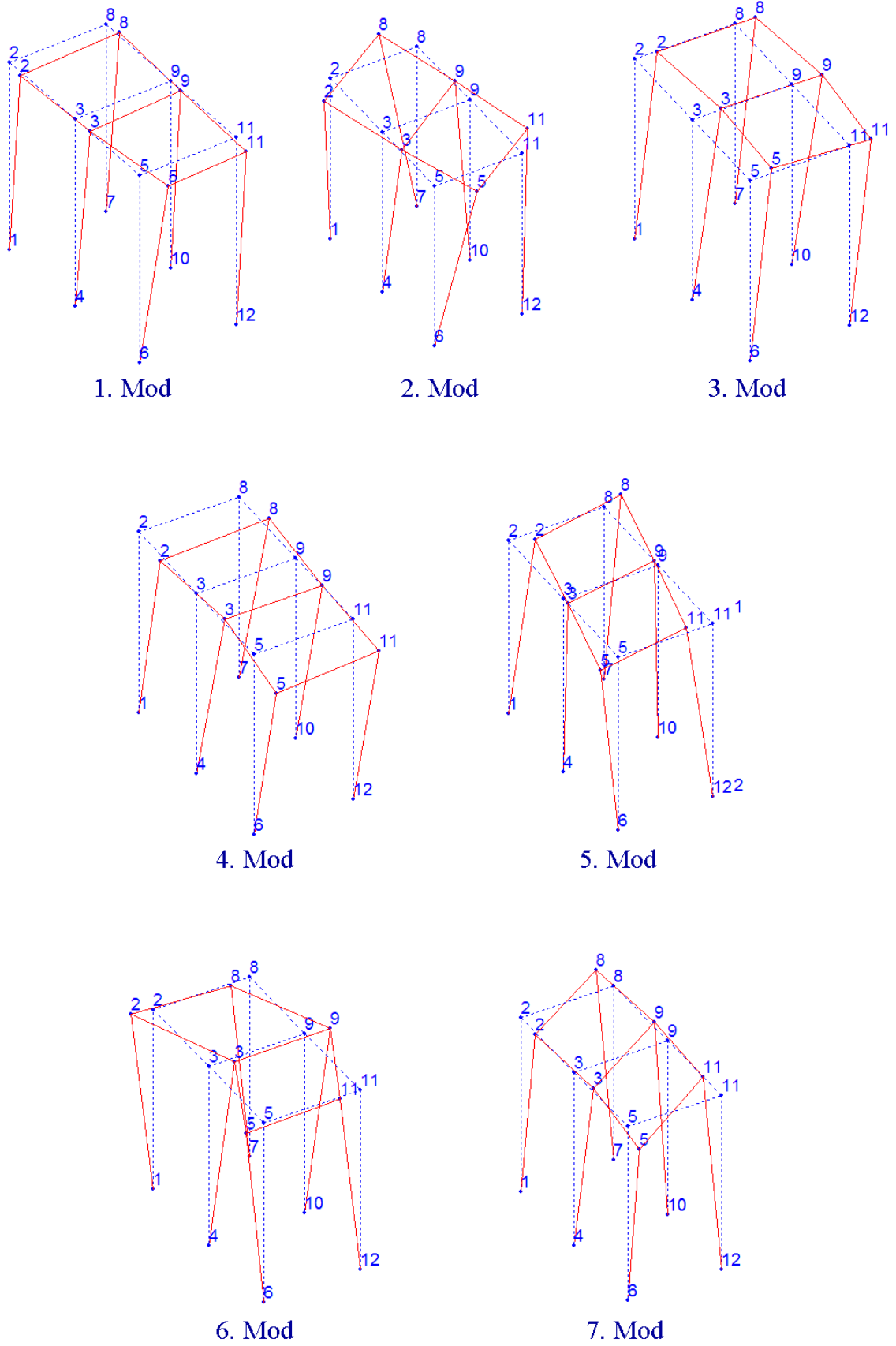
Çevresel titreşim deneyi yapılan üç boyutlu çerçevenin Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi kullanılarak hesaplanan dinamik karakteristikleri Tablo 3.6'da verilmektedir. Modelin, sadece tepki deneysel modal analizi sonucunda Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi kullanılarak belirlenen mod şekilleri Şekil 3.103'te gösterildiği gibidir. Burada hesaplanan mod şekillerinin birbirleri ile uyumunu gösteren üç boyutlu ve iki boyutlu MAC grafikleri Şekil 3.104'te verilmektedir. Şekil 3.105'te her bir modal vektörün modal faz doğruduşluk grafikleri gösterilmektedir. Lineer olan hatlar modal vektörün kalitesini

ifade etmektedir. MPC grafikleri incelendiği zaman bütün modlar için lineerliğin yaklaşık olarak sağlandığı ve 0.9 değerinin üzerinde çıktığı görülmektedir. Özellikle 3. ve 6. modlarda elde edilen değerlerin yüksekliği ve sağlanan lineerlik, SignalCAD programı ile yapılan sayısal sinyal işleme aşamasında kullanıcının tercihinin önemini göstermektedir. Bu modların hareket doğrultusunda yerleştirilmiş olan 2 numaralı kanalın çaprazgüç spektrumlarının hesabında referans olarak alınması sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olmuştur.

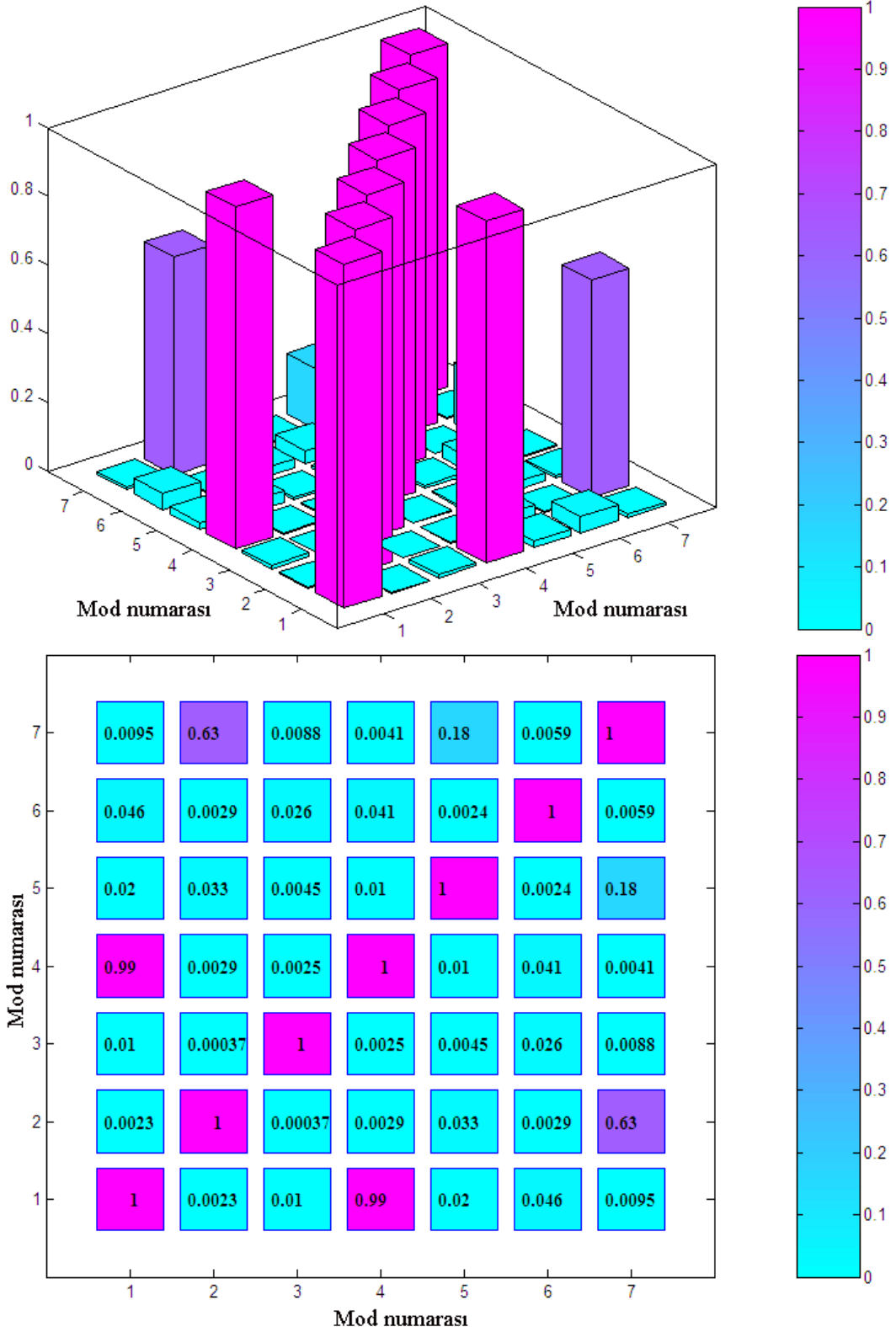
Tablo 3.6. Üç boyutlu çerçevenin sadece tepki modal analizine göre Çokreferanslı Zaman Ortamı yöntemi ile belirlenen dinamik karakteristikleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Yöntem
1	4.373	0.199	PTD
2	8.872	0.262	PTD
3	10.076	0.847	PTD
4	12.499	0.084	PTD
5	13.120	0.193	PTD
6	16.511	0.225	PTD
7	16.999	0.036	PTD

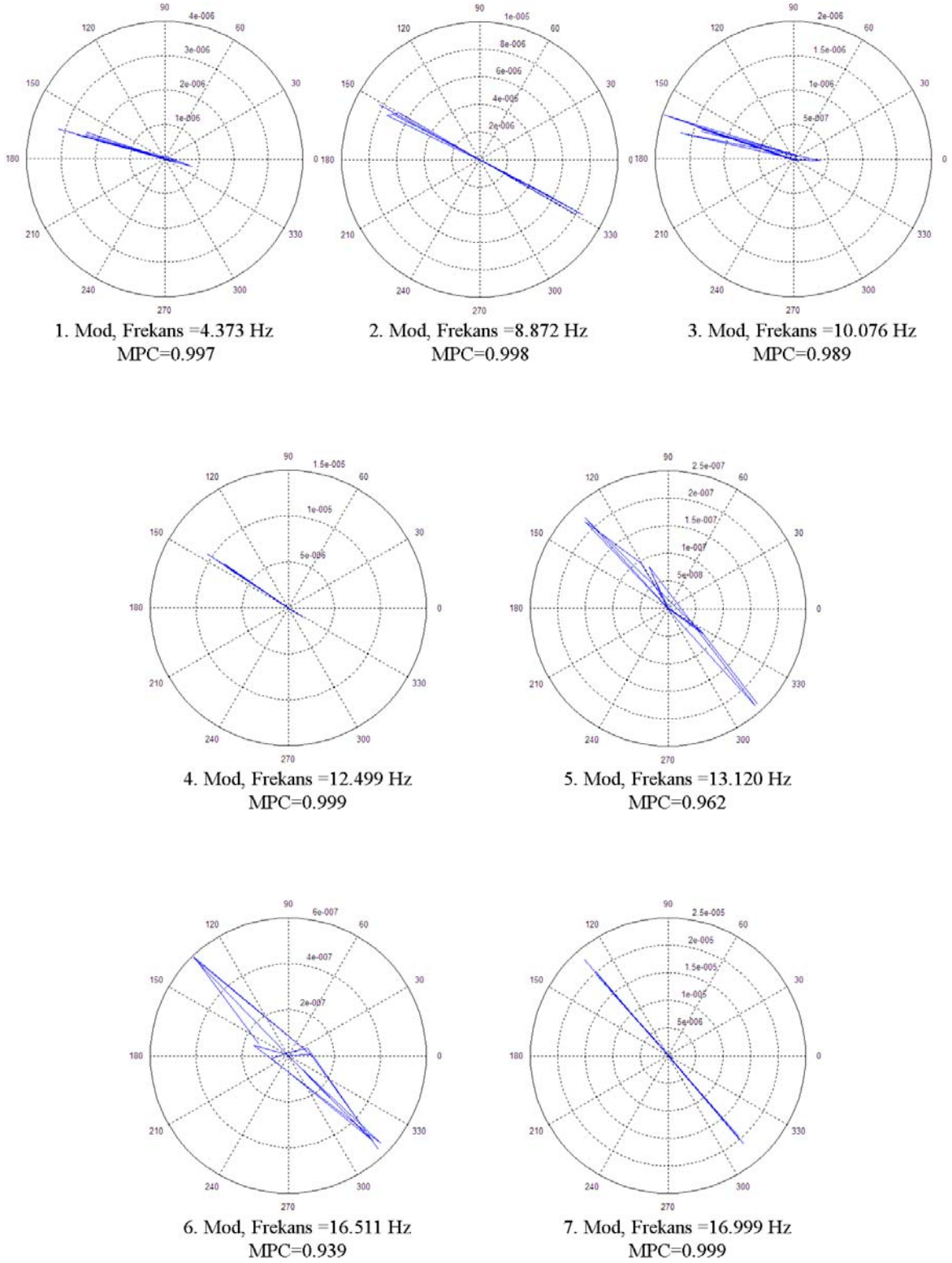
Çokreferanslı Zaman Ortamı Yönteminde modların yerlerini tespit etmek amacıyla stabilite diyagramları kullanılmaktadır. Spektral mod gösterge fonksiyonu üzerinde maksimum model derecesine kadar tarama yapılır ve başlangıçtan itibaren stabil olan ve olmayan noktalar belirlenir. Mavi renkli simgeler stabil olan frekans ve mod şekillerini, kırmızı renkli simgeler ise stabil olmayan frekans ve mod şekillerini göstermektedir. Stabil olan noktaların düzgün bir hat oluşturduğu yerlerde modlar bulunmaktadır. Stabilite diyagramlarında maksimum model derecesi artırıldıkça nokta tarama hassasiyeti artar. Şekil 3.106'da model derecesi 25, 50 ve 75 için, Şekil 3.107'de model derecesi 100, 150 ve 200 için stabilite diyagramları çizilmiştir. Stabilite diyagramları incelendiği zaman yedi ana mod belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu da Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi ile belirlenen modların doğruluğunu göstermektedir. Model derecesi artırıldıkça stabilite diyagramları karmaşık hale gelmektedir. Modların olduğu hatlar üzerinde nadiren görülen stabil olmayan simgeler, ölçüm sırasında oluşan parazitlerden kaynaklanmaktadır.



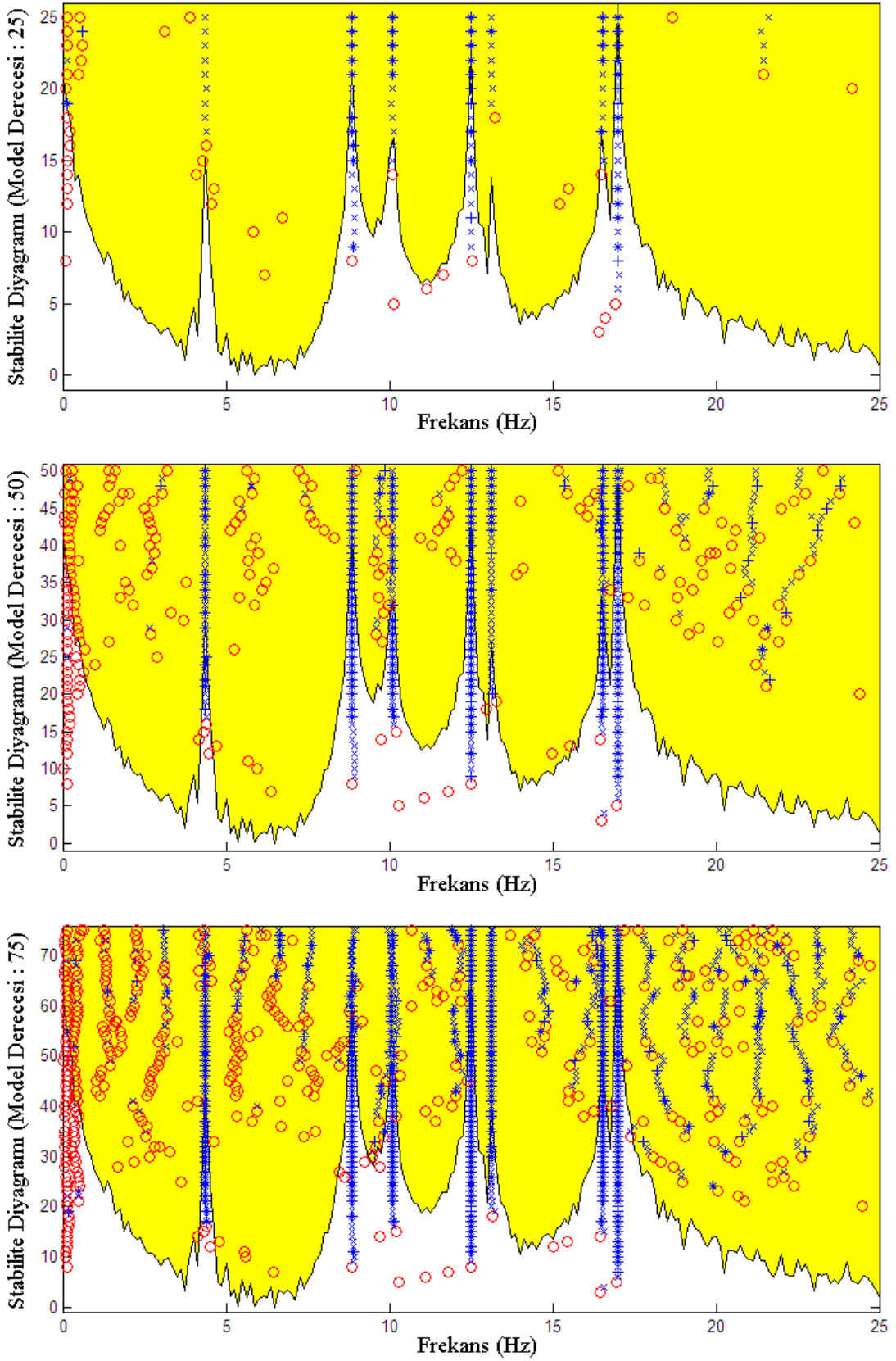
Şekil 3.103. Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan mod şekilleri



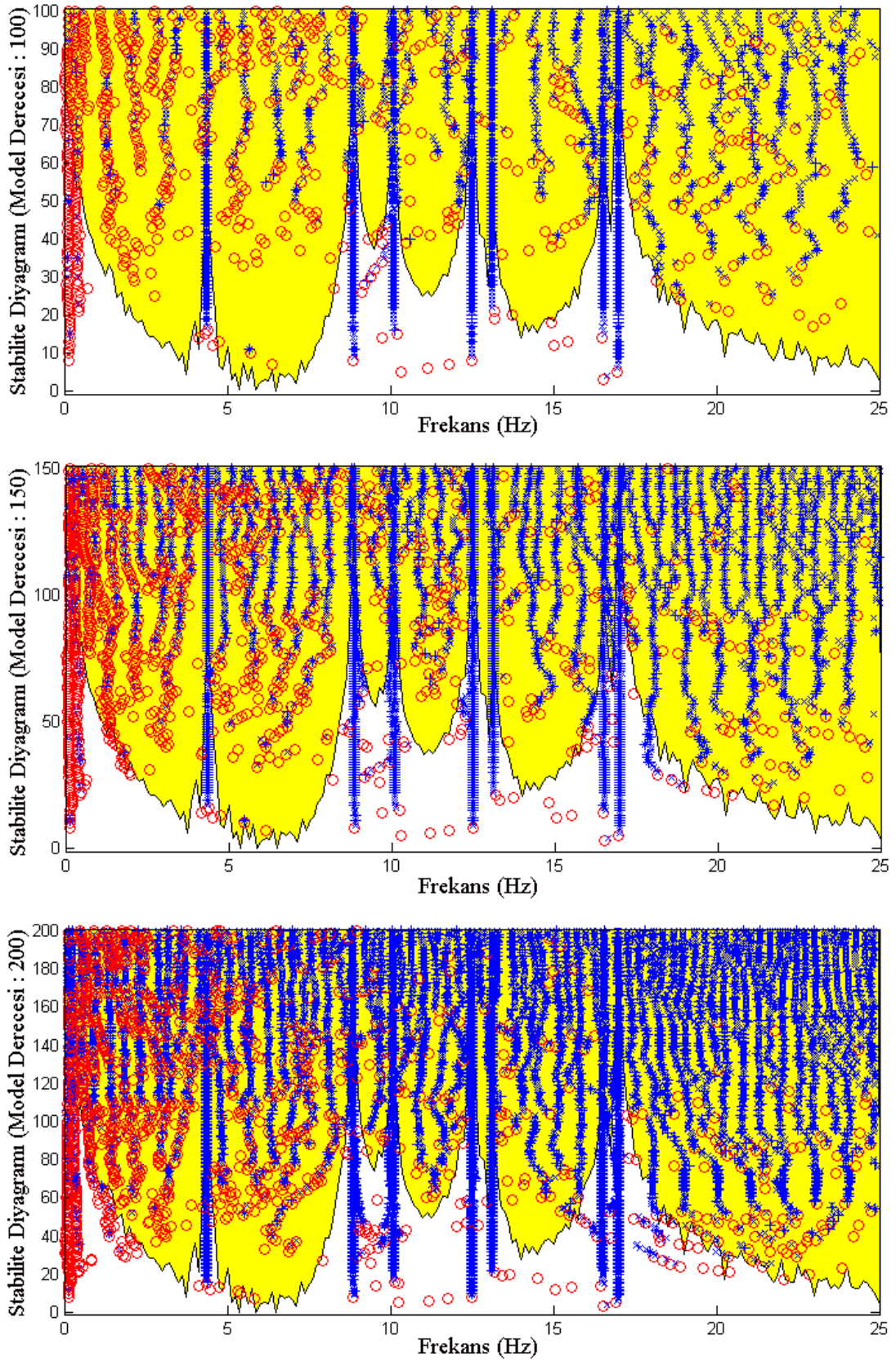
Şekil 3.104. Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MAC grafikleri



Şekil 3.105. Modelin sadece tepki modal analizine göre PTD Yöntemi ile hesaplanan modal vektörlerin MPC grafikleri



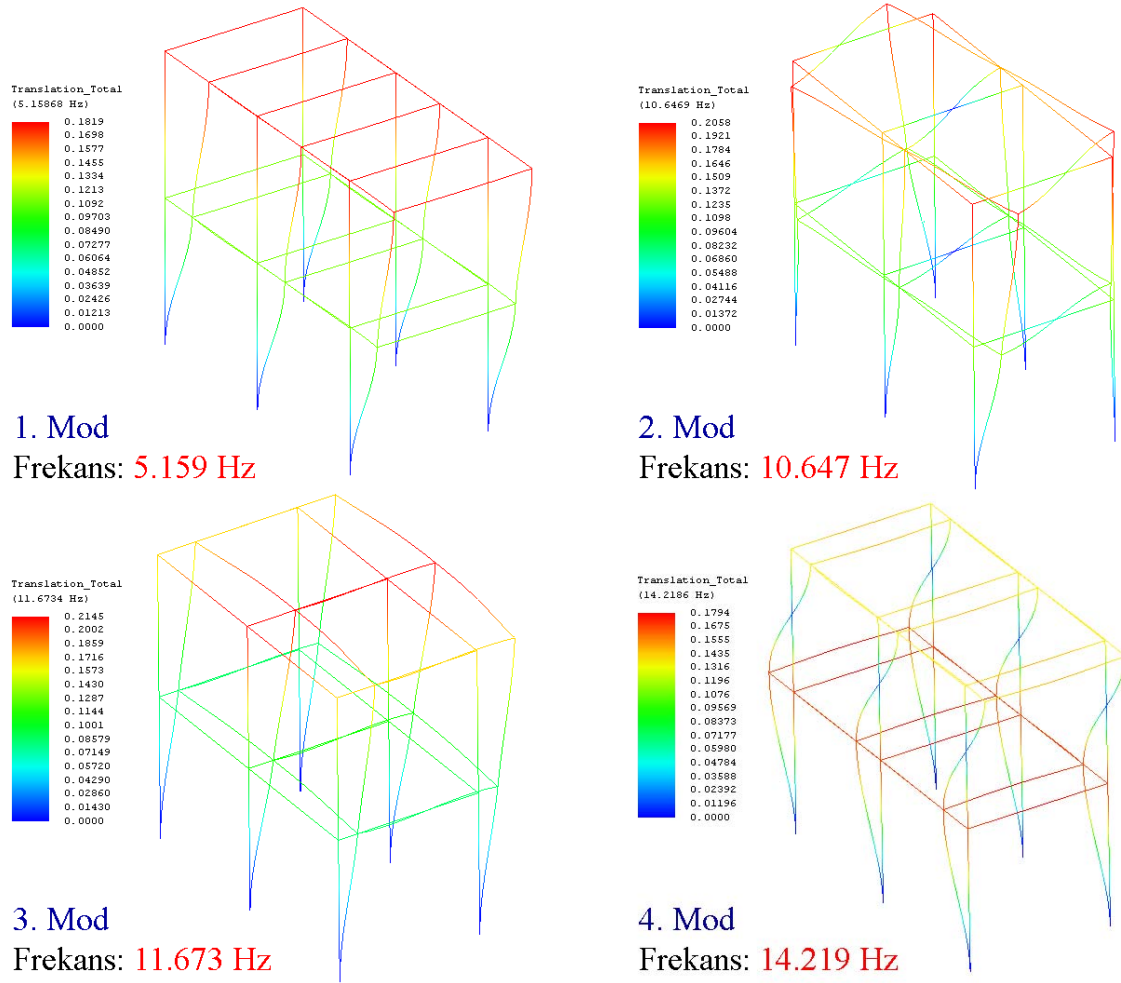
Şekil 3.106. Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 25, 50 ve 75 olması durumunda PTD Yöntemi ile edilen stabilite diyagramları



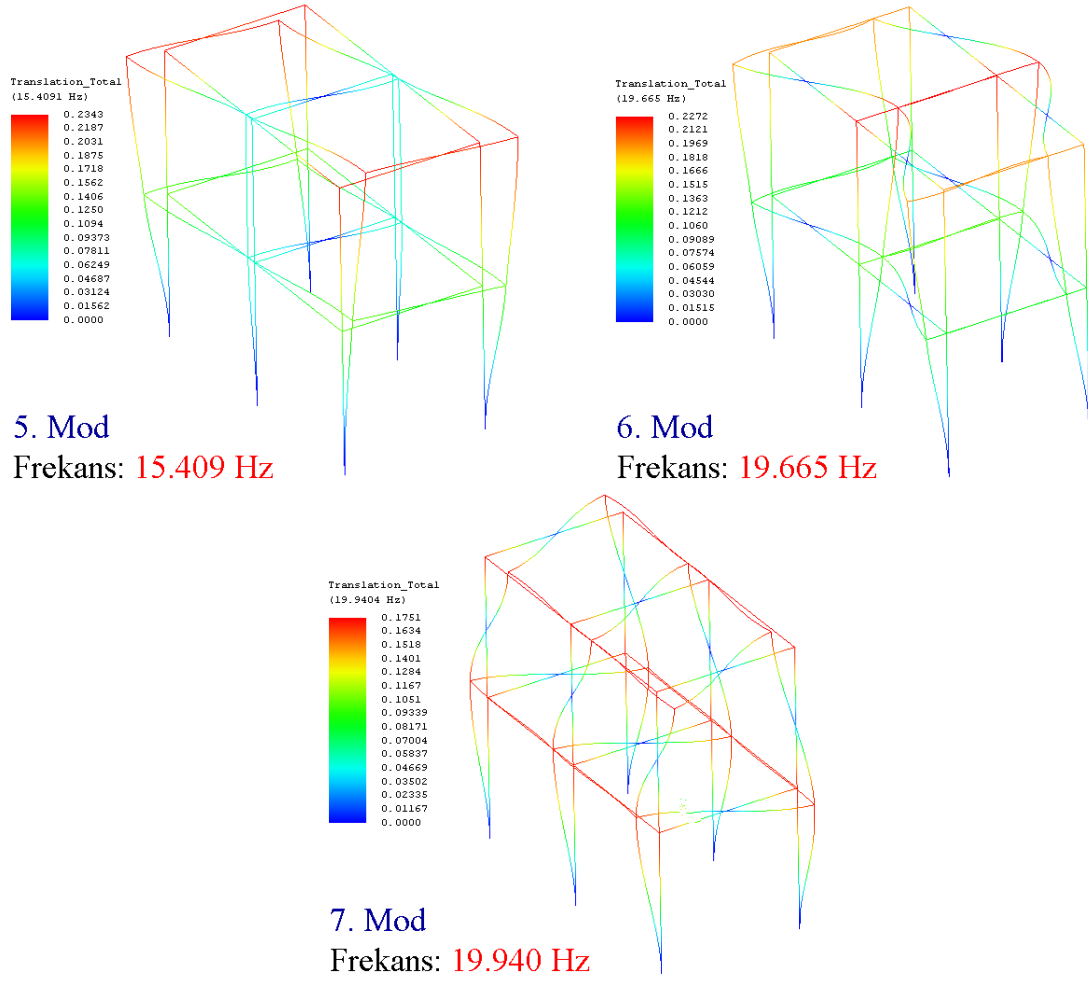
Şekil 3.107. Çerçeve modelinin maksimum model derecesinin 100, 150 ve 200 olması durumunda CE Yöntemi ile edilen stabilite diyagramları

3.1.1.3. FemUP Programı ile Üç Boyutlu Çelik Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Deneysel Sonuçları Referans Alınarak İyileştirilmesi

Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin teorik sonlu eleman modeli ANSYS (2007) programında oluşturulmuştur. Modelin doğal frekansları ve mod şekilleri Lanczos Yöntemi ile çözülmüştür. Teorik model başlangıç sonlu eleman analiz sonuçları Şekil 3.108-Şekil 3.109'da gösterilmektedir. Sonlu eleman modeli ile karşılaştırılacak olan deneysel model için birçok alternatif vardır. Üç boyutlu çerçevenin etki tepki modal analizi ile sadece tepki modal analizi yapılmış, her iki analizde de toplam 3 yöntem kullanılmıştır. Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de bu analizlerin sonuçları verilmektedir. Sonlu eleman modeli ile karşılaştırmada bu sonuçlardan herhangi birisi kullanılabilir. Tablolardan görülebileceği gibi sonuçlar yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 3.108. Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin başlangıç kabulleri ile ANSYS programı ile bulunan 1., 2., 3. ve 4. mod şekilleri



Şekil 3.109. Üç boyutlu çelik çerçeve modelinin başlangıç kabulleri ile ANSYS programı ile bulunan 5., 6. ve 7. mod şekilleri

Tablo 3.7. Modelin etki tepki modal analizine göre hesaplanan doğal frekans değerleri

Mod	İşletim Vektörleri Yöntemi	Kompleks Ekspansiyel Yöntemi	Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi
1	4.375	4.372	4.368
2	8.875	8.845	8.845
3	10.063	10.059	10.069
4	12.500	12.487	12.487
5	13.125	13.137	13.135
6	16.563	16.539	16.539
7	17.000	16.992	16.991

Tablo 3.8. Modelin sadece tepki modal analizine göre hesaplanan doğal frekans değerleri

Mod	İşletim Vektörleri Yöntemi	Kompleks Ekspansiyel Yöntemi	Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemi
1	4.375	4.373	4.373
2	8.875	8.861	8.872
3	10.125	10.105	10.076
4	12.500	12.493	12.499
5	13.125	13.107	13.120
6	16.500	16.481	16.511
7	17.000	17.002	16.999

Sonlu eleman modelinin iyileştirilmesinde referans olarak, üç boyutlu çerçevenin sadece tepki modal analizinde kullanılan İşletim Vektörleri Yöntemi ile yapılan analiz sonuçları kullanılacaktır. Deneysel model ile sonlu eleman modelinin başlangıçta yapılan korelasyon analiz sonuçları Tablo 3.9’da görüldüğü gibidir. Tablodan görüldüğü gibi frekansla arasında %15-20 civarında farklılıklar görülmektedir. Bununla beraber MAC değerlerinin tamamının 0.9 değerinden büyük olduğu görülmektedir. Buradan mod şekilleri arasında mükemmel bir uyum olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.9. Deneysel model ile teorik modelin başlangıç korelasyon analiz sonuçları

Mod Numarası	Deneysel Frekanslar (Hz)	Teorik Frekanslar (Hz)	Hata (%)	MAC
1	4.375	5.159	17.91	0.95
2	8.875	10.647	19.96	0.98
3	10.125	11.673	15.29	0.92
4	12.500	14.219	13.75	0.97
5	13.125	15.409	17.40	0.99
6	16.500	19.665	19.18	0.94
7	17.000	19.940	17.30	0.98

Üç boyutlu çerçevenin sonlu eleman model iyileştirme parametreleri olarak malzeme bilgileri ve sonlu eleman ağı seçilmiştir. Modal vektörler arasında uyum görüldüğünden sınır koşulları ve mesnet bağlantılarındaki rijitlik katsayıları üzerinde bir optimizasyon çalışmasına gerek görülmemiştir. Buna göre, deneysel model referans alınarak, sonlu eleman modelinin optimum malzeme ve sonlu eleman ağı bulunmaya çalışılmıştır.

FemUP programı ile sonlu eleman model iyileştirmesi yapıldıktan sonra, teorik model ile referans alınan deneysel model arasındaki korelasyon analiz sonuçları Tablo 3.10'da verilmektedir. Sonlu eleman model iyileştirme analizi sonucunda iyileştirme yapılan malzeme özellikleri Tablo 3.11'de görüldüğü gibidir. Tablo incelendiğinde, model iyileştirme yapılırken sadece elastisite modülünde değişiklik yapıldığı görülmektedir.

Tablo 3.10. Model iyileştirmeden sonra deneysel model ile teorik modelin korelasyon analiz sonuçları

Mod Numarası	Deneysel Frekanslar (Hz)	Teorik Frekanslar (Hz)	Hata Oranı (%)	MAC
1	4.375	4.399	0.54	0.95
2	8.875	9.078	2.29	0.98
3	10.125	9.953	1.70	0.92
4	12.500	12.123	3.01	0.97
5	13.125	13.138	0.10	0.99
6	16.500	16.767	1.62	0.94
7	17.000	17.002	0.01	0.98

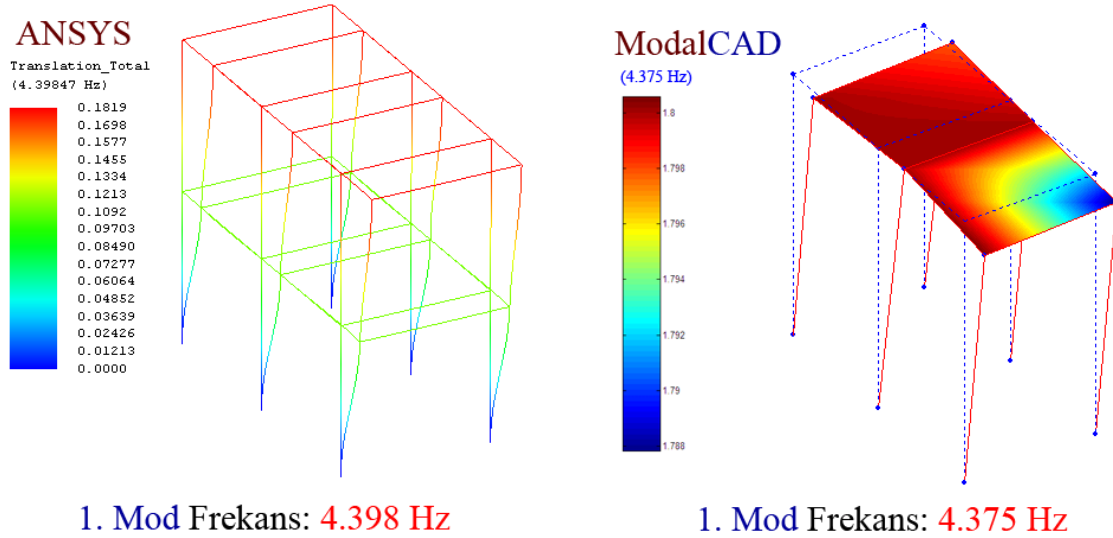
Tablo 3.11. Sonlu eleman model iyileştirmeden önce ve sonraki malzeme ve geometri özellikleri

Parametre	İyileştirmeden Önce	İyileştirmeden Sonra
Elastisite Modülü	$2.75 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	$1.99921 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Yoğunluk	7800 kg/m^3	7800 kg/m^3
Poison Oranı	0.3	0.3

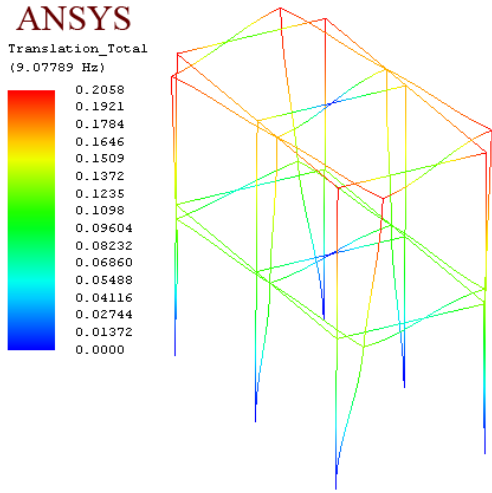
Sonlu eleman model iyileştirmeden sonra, teorik modelin analizi sonucu elde edilen mod şekilleri ile bunlara karşılık gelen deneysel mod şekilleri, Şekil 3.110-Şekil 3.112'de

gösterilmektedir. Mod şekillerinin birbirleri ile tam olarak uyum içerisinde olduğu şekillerden rahatlıkla görülmektedir.

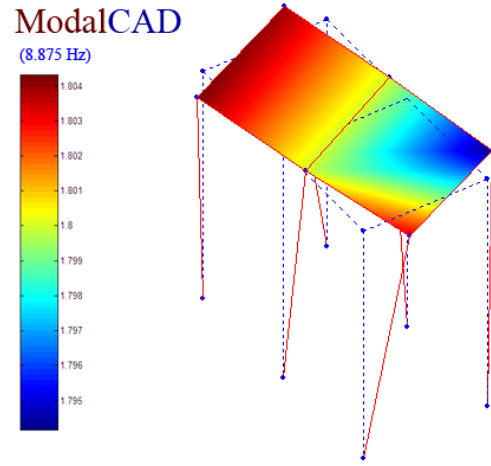
Deneysel ve teorik mod şekillerinin birbirleri ile uyumunun sayısal olarak kontrolü MAC grafikleri ile yapılır. Şekil 3.113'te, deneysel model ile sonlu eleman modelinden elde edilen modal vektörler arasındaki uyumu gösteren MAC grafiklerinin üç boyutlu ve iki boyutlu görüntüleri yer almaktadır. Bu grafikler incelendiğinde modeller arasındaki mükemmel uyum görülmektedir. Modeller arasında sayısal olarak tam bir uyumdan söz edilebilmesi için, MAC grafiğinin köşegen değerlerinin 0.9'dan büyük ve köşegen dışındaki elemanlarının değerlerinin de sıfıra yakın olması gerekmektedir. MAC grafikleri incelendiğinde bu durumun sağlanmış olduğu görülmektedir. Bununla beraber, daha öncede karşılaştığı üzere 1 ve 4 numaralı modların kesişme noktaları ile 2 ve 7 numaralı modların kesişme noktalarında yüksek değerler görülmektedir. Bu durumun sebebi daha öncede açıklandığı gibi, deneysel model üzerinde sadece tepe noktasındaki düğümlerden ölçüm alındığından dolayı, bu modlardaki davranışın sanki benzer davranış gibi algılanmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.110-Şekil 3.112'de gösterilen mod şekillerine bakıldığında bu numaralara karşılık gelen mod şekillerinde, son katta yakın davranış varken ara katta tamamen farklı davranış olduğu görülmektedir.



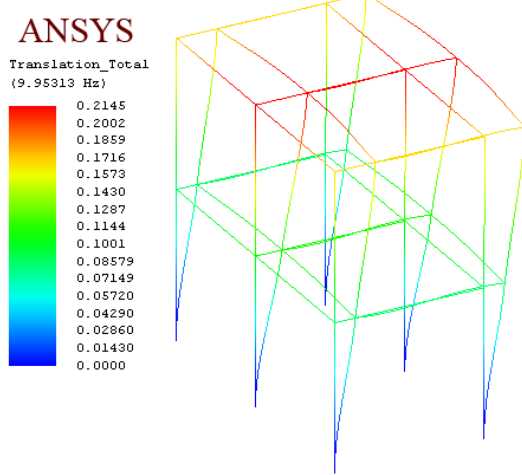
Şekil 3.110. İyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen 1. mod şeklinin karşılaştırılması



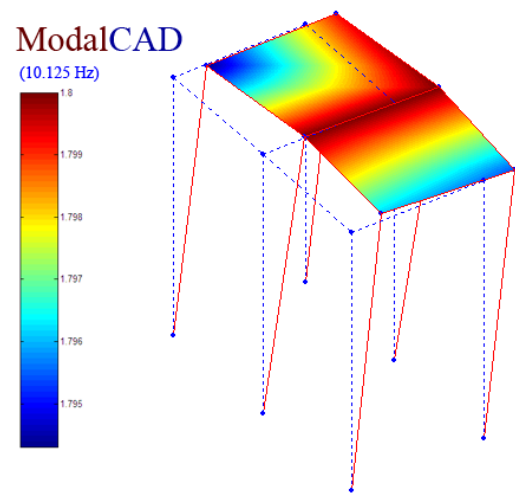
2. Mod Frekans: **9.078 Hz**



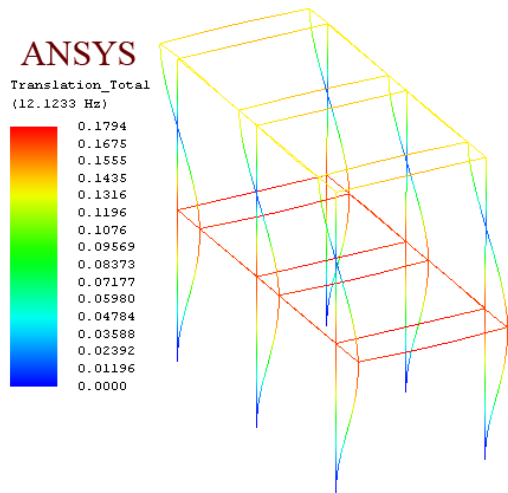
2. Mod Frekans: **8.875 Hz**



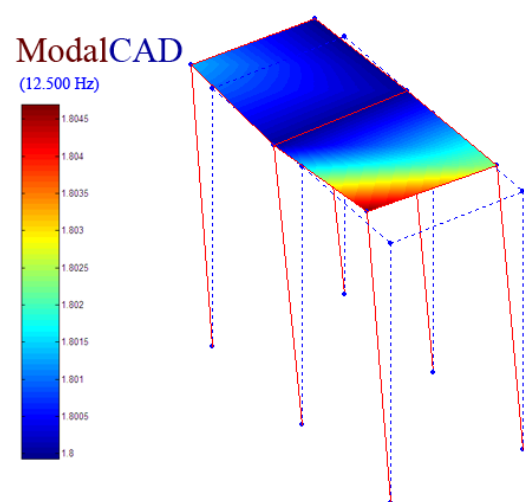
3. Mod Frekans: **9.953 Hz**



3. Mod Frekans: **10.125 Hz**

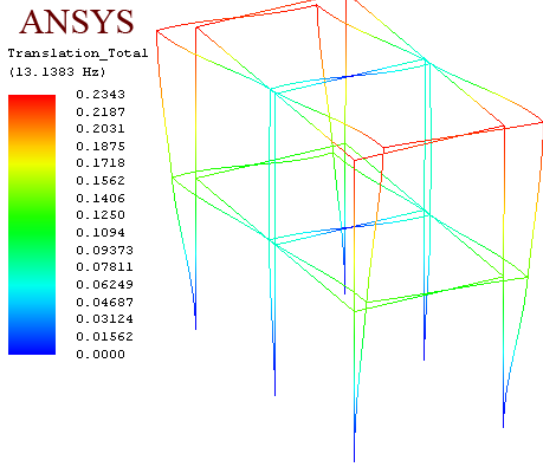


4. Mod Frekans: **12.123 Hz**

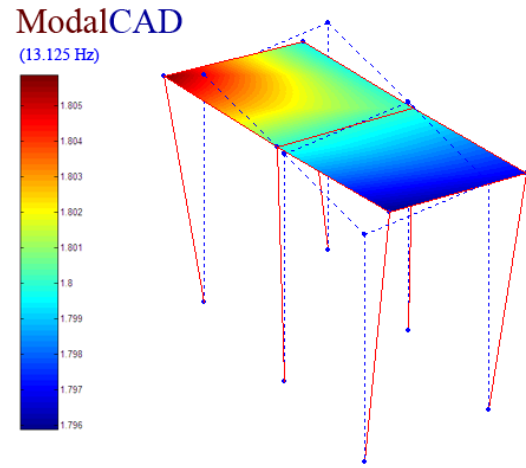


4. Mod Frekans: **12.500 Hz**

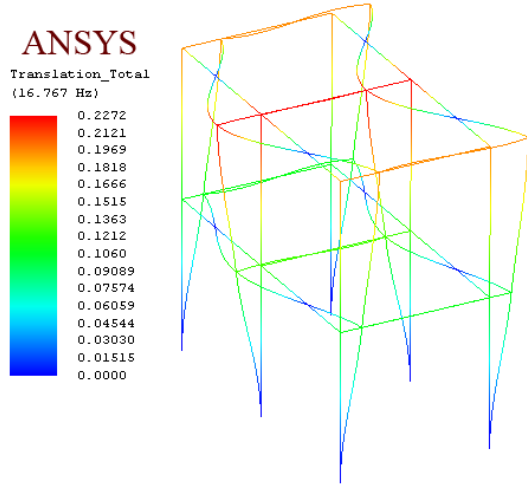
Şekil 3.111. İyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen 2., 3. ve 4. mod şekillerinin karşılaştırılması



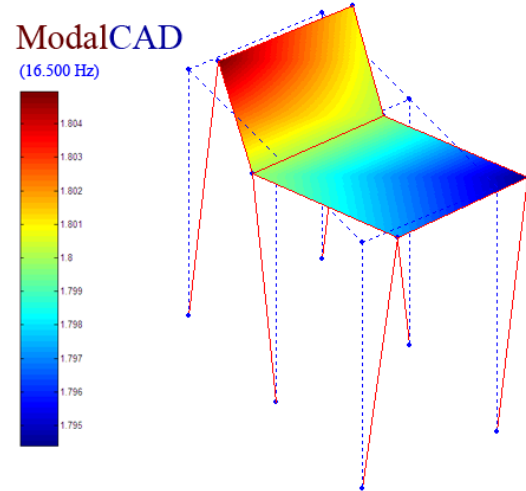
5. Mod Frekans: 13.138 Hz



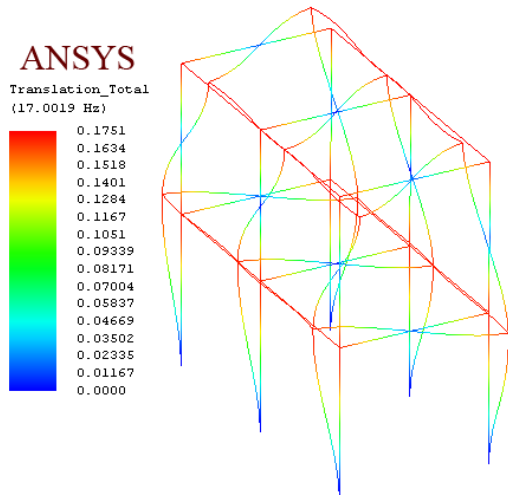
5. Mod Frekans: 13.125 Hz



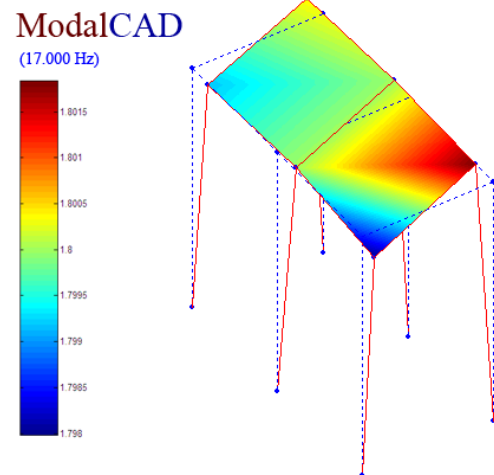
6. Mod Frekans: 16.767 Hz



6. Mod Frekans: 16.500 Hz

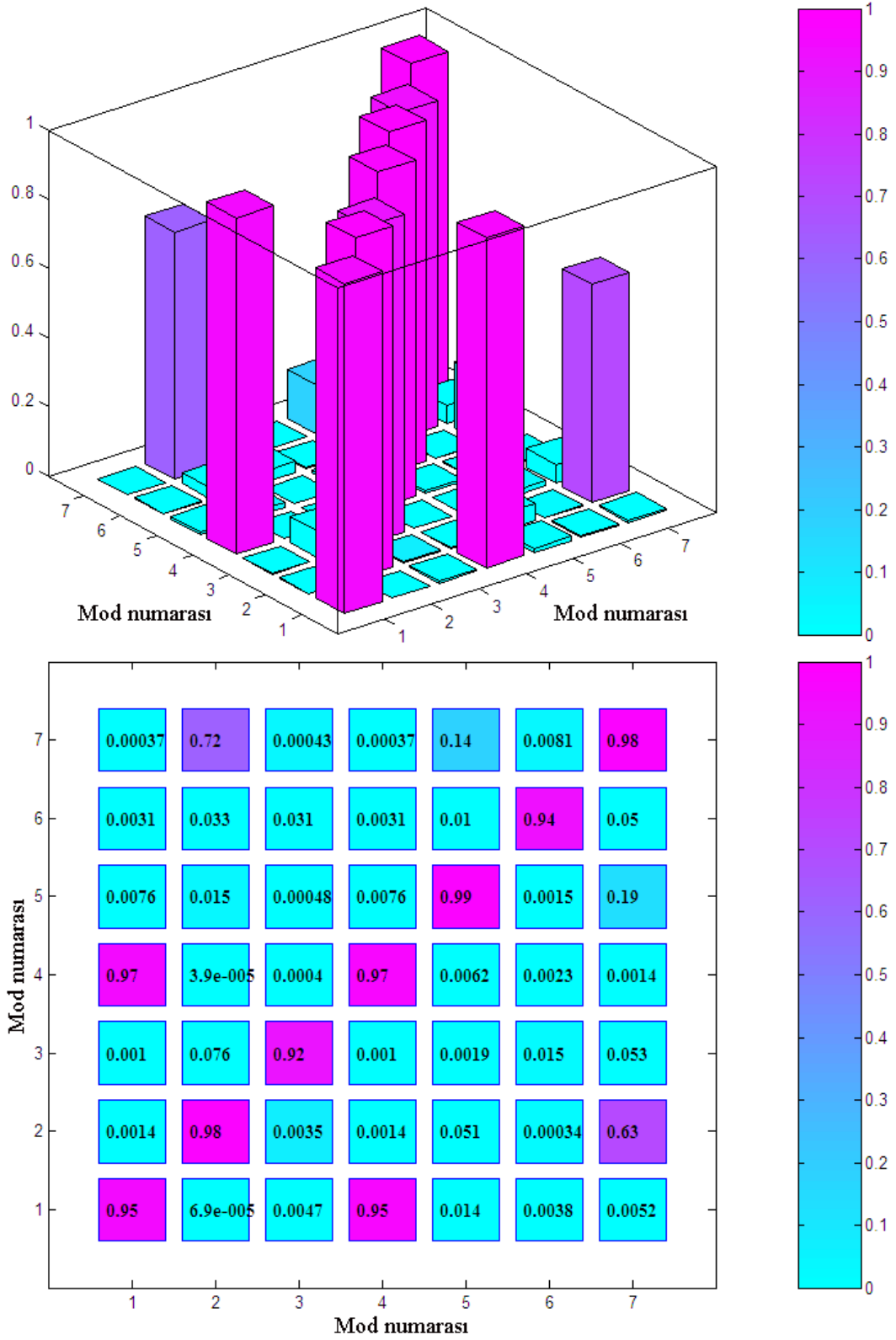


7. Mod Frekans: 17.002 Hz



7. Mod Frekans: 17.000 Hz

Şekil 3.112. İyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel modelden elde edilen 5., 6. ve 7. mod şekillerinin karşılaştırılması



Şekil 3.113. Deneysel model ile analitik model arasındaki uyumu gösteren MAC grafikleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının konusu, zorlanmış ya da çevresel titreşim deneyi yapılan herhangi bir yapı sisteminin dinamik karakteristiklerinin ve davranışının belirlenmesini ve modal ölçüm deneylerine bağlı olarak hesaplanan parametrelere göre bu yapı sisteminin analitik modelinin optimum seviyede iyileştirilmesini sağlayacak yazılımların üretilmesi ve üretilen yazılımların model üzerinde uygulamalarının yapılmasıdır.

Öncelikle zorlanmış ve çevresel titreşim deneylerinden elde edilen işlenmemiş sinyallerin analiz edilerek, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için geliştirilmiş olan algoritmaların giriş verilerini oluşturan spektrumların üretilmesi amacıyla MATLAB platformu üzerinde SignalCAD programı hazırlanmıştır. SignalCAD programı ile sinyal kümelerinin içerisinde bulunan hatalı kayıtlar filtrelenebilmekte, bununla beraber spektral fonksiyonların üretilmesi aşamasında Fourier dönüşümünden kaynaklanan sızıntı hatalarını filtrelemek için geliştirilmiş olan pencereleme yöntemlerinin tümü kullanılabilir. SignalCAD programı kullanılarak frekans davranış fonksiyonları, çaprazgüç spektrumları, otogüç spektrumları, güç spektral yoğunluk grafikleri, spektrogram grafikleri ve diğer gerekli spektrum grafikleri üretilmektedir. Spektrumların hesabında, literatürde geliştirilmiş olan pek çok alternatif hesap tekniği kullanılmaktadır. Bütün bu hesaplamalar tamamen grafik ekranlı ve interaktif bir kullanıcı arayüzüne sahip SignalCAD programı ile yapılabilmektedir. SignalCAD programında, bilinen spektral analizlerin yanında, deneysel modal analiz tekniklerine paralel olarak geliştirilmiş olan spektral fonksiyonlar da kodlanarak sisteme dahil edilmişlerdir. Bu özel fonksiyonlar, kompleks mod gösterge fonksiyonu, mod gösterge fonksiyonu, çokdeğişkenli mod gösterge fonksiyonu vb. dir. Bu fonksiyonların amacı, bütün spektral fonksiyonları temsil eden tek bir spektral fonksiyon üretilmesini sağlamaktır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bu fonksiyonlar, alternatif olarak kullanıcıya sunulmaktadır.

İkinci aşamada, SignalCAD ile üretilen spektrumların analiz edilerek yapı sistemlerinin dinamik davranışlarını belirleyebilmek amacıyla MATLAB platformu üzerinde ModalCAD programı geliştirilmiştir. Literatürde yer alan en yaygın dinamik karakteristik belirleme algoritmalarından İşletim Vektörleri Yöntemi, Kompleks Eksponansiyel Yöntemi ve Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemleri fonksiyonel bir

yapıda kodlanmış ve ModalCAD programının içerisine aktarılmıştır. Bu yöntemler en ince detaylarına kadar incelenmiş olup, yöntemlerin kendi içlerinde kullandıkları stabilite diyagramları, spektrum sentez çizimleri gibi kontrol mekanizmaları da ayrı ekranlar ve düğmeler kullanılarak sisteme dahil edilmişlerdir. Dinamik karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş olan algoritmalar ile yapılan hesaplarda kullanılan giriş parametreleri sonuçlar üzerinde etkilidirler. Bundan dolayı, ModalCAD programında, bir yönteme göre hesap yapılırken, gerekli bütün bilgilerin tek bir ekran içerisinde görülebilmesi için özellikle gayret edilmiştir. Bir hesap sonucunda, oluşan mod şekli, elde edilen doğal frekans değeri ile sönüm oranı ve spektral fonksiyon üzerindeki modun konumu tek bir ekran içerisinde kullanıcı tarafından kontrol edilebilmektedir. Böylelikle, beklenmedik sonuçlarda, başlangıç parametreleri üzerinde değişikliklere gidilerek en uygun sonuca ulaşılabilir. Burada, kullanıcının tecrübesi oldukça önem kazanmaktadır. ModalCAD programında, oldukça gelişmiş grafiksel özellikler kullanılarak, mod şekillerinin animasyonlu olarak izlenebilmesi sağlanmıştır. Çizgisel elemanların yanında yüzeysel elemanlar da ModalCAD kütüphanesine eklenmiştir. Böylelikle üç boyutlu yüzey elemanlara sahip yapı modellerinin de simülasyonu başarı ile gerçekleştirilebilmektedir. Modal davranışlar gösterilirken, renkli deformasyon dağılımı da ekranda gösterilerek, en çok zorlanan bölgelerin tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. ModalCAD programında dinamik karakteristikler belirlendikten sonra, bunların doğruluğunu denetleyen algoritmalar da literatürden taranarak sistem içerisine kodlanmışlardır. Bunlardan en önemlileri olan MAC ve MPC grafikleri ile denetleme yapılarak, üretilen dinamik karakteristiklerin doğruluk ve tutarlılıkları, henüz sistemin içerisinde iken kontrol edilebilmektedir. Tutarsız ya da yetersiz bulunan parametreler anında program içerisinde geri dönülerek tekrar hesaplanabilmektedir.

Dinamik karakteristikleri belirleyecek program hazırlandıktan sonra, son aşama olan analitik modellerin, deneysel modeller referans alınarak iyileştirilmelerini sağlamak amacıyla yine MATLAB platformu üzerinde FemUP programı geliştirilmiştir. FemUP programı, ModalCAD ve ANSYS programları ile birlikte kullanılmak üzere tasarlanmış bir programdır. Deneysel model için ModalCAD programı tarafından üretilen sonuç dosyası, analitik model için ise ANSYS parametrik tasarım dili (Ansys Parametric Design Language - APDL) kullanılarak hazırlanan dosya kullanılmaktadır. ANSYS programında herhangi bir analiz yapıldığında bu dosya zaten otomatik olarak üretilmektedir (ANSYS Log File). Bu dosyanın ANSYS programı ile model oluşturulduktan sonra herhangi bir

müdahalede bulunulmadan direk olarak FemUP programına tanıtılması yeterli olmaktadır. FemUP programı bu dosyayı okuduktan sonra, içerisine APDL dilinde yeni kodlar ekler ve analize hazır hale getirir. Model iyileştirmede deneysel ve teorik modelin doğal frekansları ile mod şekilleri arasındaki farka bakılır. Model iyileştirmede Ardışık Kuadratik Programlama Algoritması (Sequential Quadratic Programming - SQP) kullanılır. Buna göre hedef fonksiyonu olarak teorik ve deneysel modeller arasındaki farkın minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu hedef için tarama yapılırken, mod şekilleri arasındaki farkı kullanıcı tarafından belirlenen sınırdaki tutmak amacı ile sınırlandırma fonksiyonu üretilmiştir. Sonuçlar MAC grafikleri ve sonuç bilgi ekranı ile kullanıcıya sunulur.

Belirlenen amaca yönelik olarak yazılımlar geliştirildikten sonra, laboratuarda geliştirilmiş olan üç boyutlu çelik çerçeve modeli üzerinde zorlanmış ve çevresel titreşim deneyleri yapılmıştır. Zorlanmış titreşim deneyinde, model darbe çekici ile titreştirilmiş ve çekiç ile ölçüm kanallarından eşzamanlı olarak kayıt alınmıştır. Çevresel titreşim deneyinde ise, aynı ölçüm düzenekleri ile belirli bir süre boyunca çevreden gelen bilinmeyen ya da ölçülemeyen etkilere bağlı olarak ölçüm kanallarından kayıt alınmıştır. Zorlanmış titreşim deneyi ile çevresel titreşim deneylerinden alınan sinyallerin farklı yapıları vardır ve bunlar için SignalCAD programında ayrı analiz ekranları ve menüleri geliştirilmiştir. Modellerden alınan sinyaller, SignalCAD programında işlenerek zorlanmış titreşim deneyi yapılan modeller için frekans davranış fonksiyonları, çevresel titreşim deneyi yapılan modeller için de çaprazgüç spektrumları üretilmiş, daha sonra üretilen bu spektrumlar ModalCAD programında analiz edilerek modelin dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Modelin ANSYS programında oluşturulan sonlu eleman modeli ile ModalCAD programında elde edilen deneysel modeli FemUP programında karşılaştırılmış ve sonlu eleman modeli üzerinde model iyileştirme çalışması yapılarak optimum sonlu eleman modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, iyileştirilmiş sonlu eleman modeli ile deneysel model arasında oldukça yüksek derecede bir uyum sağlanmıştır.

Yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve sonlu eleman modellerinin optimum seviyede iyileştirilmelerini gerçekleştirmek amacıyla hazırlanan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmaktadır:

- SignalCAD programı ile ilgili olarak elde edilen sonuçlar ve öneriler
 - ✓ SignalCAD programı sayısı sürekli olarak artmakla beraber toplam 7 adet grafik dosyası (.fig file) ve 108 adet fonksiyon dosyasından (.m file) meydana gelmektedir. Üretilen bu fonksiyonlar ile beraber MATLAB Signal Processing

Toolbox'da yer alan fonksiyonlar SignalCAD programı tarafından kullanılmaktadırlar.

- ✓ SignalCAD programı ile kullanıcıya sinyal içerisindeki kayıtların ayrı ayrı incelenebilmesi imkanı sunulmuş, böylelikle hatalı olan sinyalin otomatik olarak filtrelenmesinin yanında kullanıcı tarafından tecrübeye bağlı olarak istenilmeyen kayıtların sinyal kümesinden çıkartılabilmesi imkanı sağlanmıştır.
- ✓ Hazırlanan laboratuvar modeli üzerinde yapılan zorlanmış titreşim deneyi sonucunda SignalCAD programı kullanılarak elde edilen frekans davranış fonksiyonları ile PULSE programı kullanılarak elde edilen frekans davranış fonksiyonlarının birbirleri ile hemen hemen çakıştığı ve aynı sonuçlara ulaşılmış olduğu görülmektedir.
- ✓ Hazırlanan laboratuvar modeli üzerinde yapılan çevresel titreşim deneyi sonucunda SignalCAD programı kullanılarak elde edilen çaprazgüç spektrumları ile PULSE programı kullanılarak elde edilen çaprazgüç spektrumları arasında sabit bir farkın olduğu gözlemlenmiştir. Aradaki sabit fark ile beraber çaprazgüç spektrumlarında görülen paralel davranış, spektral fonksiyonlar arasında bir ötelenme olduğunu göstermektedir. Bu durumda dinamik karakteristikler açısından elde edilen sonuçların aynı olması beklenmektedir. Çünkü dinamik karakteristiklerin hesabında spektrumların kendi içerisindeki rölatif farkları dikkate alınmaktadır.
- ✓ SignalCAD programı ile sinyaller analiz edilirken, spektral fonksiyonların hesabında meydana gelebilecek sızma hatalarının filtrelenmesinde en etkili pencereleme tekniğinin Dikdörtgen Pencereleme Tekniği olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber, hızlı Fourier dönüşümünde kullanılacak olan veri sayısı başlangıçta kabul edilenin üzerinde alınacağı durumlarda, Dikdörtgen Pencereleme Tekniği, spektral fonksiyonu oldukça girintili hale getirdiğinden dolayı bu tür durumlarda Hanning Pencereleme Tekniğinin kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.
- ✓ Sadece tepki modal analizinde kullanılmak üzere çaprazgüç spektrumları üretilirken, ölçüm kanallarına ait olarak hesaplanan spektrum serilerinin tek bir spektruma indirgenmesi işleminde, filtrelenmiş spektrum serisinin ortalamasının alınmasının dinamik karakteristiklerin analizinde Tekil Değer Ayırıştırması işlemine göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüş, bu yüzden çaprazgüç

spektrumu analizlerinde Tekil Değer Ayırıştırması yerine ortalama alma yoluna gidilmiştir.

- ✓ Çevresel titreşim deneyi yapılan yapı sistemlerinde, sadece tepki modal analizinde kullanılmak üzere çaprazgüç spektrumları üretilirken, özellikle bazı tepe noktalarının zayıf olarak ortaya çıktığı ya da hiç çıkmadığı, ya da sistemin modal hareketinin beklendiği ancak analiz sonucunda beklenen yönde hareketin görülmediği doğrultularda yerleştirilmiş olan kanallardan alınan sinyaller çaprazgüç spektrum hesabında referans alınırsalar, o doğrultudaki hareketi gösteren spektral fonksiyonların üretilmesi sağlanacaktır. Örneğin, üç boyutlu çelik çerçeve modelinin etki tepki modal analizinde 6 numaralı moda ait tepe noktası, frekans davranış fonksiyonlarının pek çoğunda oluşmamış, bunun sonucu olarak ta kompleks mod gösterge fonksiyonunda da bu moda ait tepe noktası görülmemiştir. Bunun sebebi, bu moda karşılık gelen dinamik hareketin, darbe çekicinin sisteme vurulduğu yöne dik doğrultuda olmasıdır, yani sistem o doğrultuda zayıf olarak tetiklenmiştir. Burada yapılması gereken zayıf olarak tetiklenmiş olan doğrultudaki kanallardan birisinin referans alınarak çaprazgüç spektrumlarının buna göre hesaplanmasıdır. Bu çalışmada, sadece tepki modal analizi için çaprazgüç spektrumları üretilirken 2 numaralı kanal referans alınmış, böylelikle, etki tepki modal analizine nazaran çok daha net olarak 6. mod şekli elde edilmiştir. Burada belirtilmesi gereken önemli bir ayrıntı, etki tepki modal analizinde de, herhangi bir kanal referans alınarak çaprazgüç spektrumlarının hesaplanabileceği ve ModalCAD programında frekans davranış fonksiyonları yerine çaprazgüç spektrumlarının da alternatif olarak analiz edilebileceğidir. Ancak, etki tepki modal analizinde frekans davranış fonksiyonları ile analiz yeterli görüldüğünden bu yola başvurulmamıştır.
- ✓ Güç spektral yoğunluk fonksiyonlarının hesabında kullanılan alternatif yöntemler içerisinde Periodogram Yöntemi ile Welch Yönteminin en etkili ve verimli yöntemler oldukları gözlemlenmiştir. Diğer yöntemlerin bazılarında birtakım sapmaların yanında, beklenenden fazla ya da az tepe noktası oluşumu gözlemlenmiştir.
- ✓ SignalCAD programında spektral analizler, hızlı Fourier dönüşümü esas alınarak yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, çok daha gelişmiş bir teknik olan

dalgacık dönüşümü (wavelet transform) tekniği kullanılarak sisteme dahil edilebilir.

- ModalCAD programı ile ilgili olarak elde edilen sonuçlar ve öneriler
 - ✓ ModalCAD programı sayısı sürekli olarak artmakla beraber toplam 6 adet grafik dosyası (.fig file) ve 211 adet fonksiyon dosyasından (.m file) meydana gelmektedir. Üretilen bu fonksiyonlar ile beraber MATLAB System Identification Toolbox'da yer alan fonksiyonlar ModalCAD programı tarafından kullanılmaktadır.
 - ✓ Hazırlanan laboratuvar modelleri üzerinde yapılan modal ölçüm deneylerine bağlı olarak, modellerin OMA programı ile bulunan frekans değerleri ve modal vektörleri ile ModalCAD programıyla bulunan frekans değerleri ve modal vektörleri yaklaşık olarak aynıdır.
 - ✓ Analiz edilen modellerin sönüm değerleri, tıpkı OMA programında görüldüğü gibi kullanılan algoritmaya bağlı olarak farklı sonuçlar vermektedir. Bununla beraber, sonuçlar algoritmaların giriş verileri ve analiz seçeneklerine bağlı olarak ta değişiklik göstermektedir. Burada algoritmalar arasındaki uyum takip edilerek belirli bir sonuca ulaşılabilmektedir.
 - ✓ ModalCAD programı ile dinamik karakteristiklerin hesabında, spektral fonksiyon üzerindeki tepe noktalarının yanı sıra, modların yeri hakkında görsel açıdan fikir veren birtakım yardımcı araçlar vardır. Bunlar, Kompleks Eksponansiyel ve Çokreferanslı Zaman Ortamı Yöntemlerinde stabil olan ve olmayan frekans ve mod şekil noktalarının taramasının yapıldığı stabilite diyagramlarıdır. Bazı modlar spektral fonksiyonda tetiklenmemiş olsalar dahi bu analiz araçları ile kolaylıkla tespit edilebilirler, ancak spektral fonksiyondaki zayıflık mod şekline yansıtacak ve model o modun yakınlarında yer alan kuvvetli modların etkisini gösterecektir.
 - ✓ ModalCAD programında yer alan stabilite diyagramları, spektral fonksiyonlarda görülen tepe noktalarının gürültü modu olup olmadığının anlaşılmasına da yardımcı olduğundan oldukça önem arz etmektedirler.
 - ✓ ModalCAD programında kullanılan zaman ortamlı çözüm yöntemleri en köklü ve geçerliliğini sürdüren yöntemlerdir. Bu yöntemler özellikle inşaat mühendisliğinde sıkça rastlanan yüksek sönümlü sistemlerde çok daha başarılı

sonuçlar verdiğinden tercih edilmişler ve ModalCAD programında kullanılmışlardır.

- ✓ Zaman ortamlı modal parametre belirleme algoritmalarında, sistemin başlangıçta kullanıcı tarafından belirlenecek olan maksimum model derecesi oldukça etkileyici bir faktördür. Model derecesinin doğru bir şekilde belirlenmesi sonuçların hassasiyeti üzerinde oldukça etkilidir. Uygun model derecesinin belirlenebilmesi için stabilite diyagramlarından yararlanır. Buna göre model derecelerinin stabilite diyagramlarının modlar üzerinde dengeye ulaştıkları değerler civarında ve üzerinde seçilmesi uygun görülmektedir.
- ✓ ModalCAD programında literatürde kullanılan en yaygın teknikler kodlanarak sisteme dahil edilmişlerdir. Sistem tamamen fonksiyonel yapıda olduğundan yeni çözüm tekniklerinin programa dahil edilmesi için sisteme müdahale edilmesine gerek yoktur. Yeni yöntemler fonksiyonlar halinde kodlanarak sisteme eklenebilirler ve sistemden bu fonksiyona bağlantılar kurulabilir. Bu özelliğİ sayesinde ModalCAD programı bundan sonra yeni algoritma geliştirecek ya da mevcut algoritmayı sisteme dahil etmek isteyecek olan araştırmacılar için oldukça verimli bir ortam sunmaktadır.
- FemUP programı ile ilgili olarak elde edilen sonuçlar ve öneriler
 - ✓ FemUP programı sayısı sürekli olarak artmakla beraber toplam 3 adet grafik dosyası (.fig file) ve 43 adet fonksiyon dosyasından (.m file) meydana gelmektedir. Üretilen bu fonksiyonlar ile beraber MATLAB Optimization Toolbox'da yer alan fonksiyonlar FemUP programı tarafından kullanılmaktadır.
 - ✓ FemUP programı ile elik çerçevenin sonlu eleman modelinin iyileştirmesi çalışmasında optimizasyon parametreleri olarak malzeme bilgileri ve sonlu eleman ağı kullanılmıştır. Bunlara ilaveten, model iyileştirmede düşünölebilecek olan her türlü parametre optimizasyon algoritmasının içerisine giriş verisi olarak tanıtılabilmektedir. Burada değışecek olan tek şey, optimizasyonda kullanılacak olan veri sayısı ve çözüm süresidir.
 - ✓ FemUP programı ile sonlu eleman model iyileştirilmesinde, sonlu eleman analiz programı olarak ANSYS programı ile bağlantı kurulmuştur. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda araştırmacılar tarafından kullanılabilir benzer özellikli sonlu eleman programları ile bağlantı kurularak programın etki alanı genişletilebilir.

- ✓ FemUP programı ile sonlu eleman model iyileştirilmesinde, optimizasyon yöntemi olarak Ardışık Kuadratik Programlama yöntemi kullanılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, Monte Carlo Simülasyonu gibi optimizasyonda kullanılan pek çok farklı teknik sisteme eklenerek alternatifli ve zengin bir analiz kütüphanesi oluşturulabilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen SignalCAD, ModalCAD ve FemUP programları, tahribatsız yapı sağlık taraması (Structural Health Monitoring – SHM) çalışmasını yapmak isteyen mühendislerin, sayısal sinyal işleme, dinamik karakteristik belirleme ve sonlu eleman model iyileştirme çalışmalarına yönelik ihtiyaçlarını karşılayacak düzeyde hazırlanmışlardır. Bu çalışmanın bir ileri aşaması, sistemlerde gözle görülen ya da görülmeyen hasar durumlarının, yapıdan alınan sinyallerin analiz edilerek tespit edilmesidir. Bundan sonraki çalışmalar, özellikle bu konu üzerinde yoğunlaştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Allemang, R. J. ve Brown, D. L., 1982. A Correlation for Modal Vector Analysis, In Proceedings of IMAC I: 1st International Modal Analysis Conference, 110-116.
- Allemang, R. J. ve Brown, D. L., 1987. Experimental Modal Analysis and Dynamic Component Synthesis, Vol. III: Modal Parameter Estimation, Report AFWAL-TR-87-3069, University of Cincinnati, Ohio.
- Allemang, R. J., Brown, D. L. ve Rost, R. W., 1987. Experimental Modal Analysis and Dynamic Component Synthesis, Vol.II: Measurement Techniques for Experimental Modal Analysis, Report AFWAL-TR-87-3069, University of Cincinnati, Ohio.
- Allemang, R. J., 1994. Vibrations: Analytical and Experimental Modal Analysis, UC-SDRL-CN-20-263-662.
- Allemang, R. J., 1999. Vibrations: Experimental Modal Analysis, UC-SDRL-CN-20-263-663/664.
- ANSYS Finite Element Analysis System, 2007. SAS IP, Inc., ABD.
- ARTEMIS Extractor, 2009. Structural Vibration Solutions A/S, NOVI Science Park, Niels Jernes Vej 10, DK-9220 Aalborg East, Danimarka.
- Baptista, M. A., Mendes, P., Afilhado, A., Agostinho, L., Lagomarsino, S. ve Mendes, L., 2004. Ambient Vibration Testing at N. Sra. do Carmo Church in Lagos, International Seminar Structural Analysis of Historical Constructions, Padova.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007a. Elektrik İletim Kablolarının Çelik Direklerin Dinamik Karakteristiklerine Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, Eskişehir, Bildirler Kitabı, 58-65.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C. ve Sevim, B., 2007b. Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, Eskişehir, Bildirler Kitabı, 273-281.
- Bayraktar A., Türker T., Sevim B. ve Altunışık A. C., 2007c. Evaluation of Blasting Effects on Masonry Buildings by Operational Modal Analysis, International Colloquium on Seismic Design and Retrofit of Masonry Structures, Istanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T., Ateş, Ş. ve Adanur, S., 2007d. Determination of Earthquake Behaviour of Highway Bridges by Operational Modal Analysis, International Earthquake Symposium, Kocaeli, Türkiye.

- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C. ve Sevim, B., 2007e. The Determination of Model Updating Effects on Earthquake Behaviour of Masonry Buildings, International Earthquake Symposium, Kocaeli, Türkiye.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B. ve Türker, T., 2007f. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6, 487-502.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007g. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu - 1, Ankara, Bildiriler Kitabı, 429-440.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T., Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2007h. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, Bildiriler Kitabı, 355-364.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C. ve Türker, T., 2008a. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style RC Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33 , 2, 65 - 75
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T. ve Adanur, S., 2008b. Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway Bridges using Modal Testing, Eighth International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, KKTC (ACE08-158), 3, 557-565.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008c. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation , 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T., Adanur, A. ve Akköse, M., 2008d. Finite Element Model Updating of Fluid-Structure Interaction Systems using Operational Modal Analysis, 5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5), Irvine, ABD.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009a. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim B., Altunışık, A. C. ve Yıldırım, F., 2009b. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
- Beardsley, P. J., Hemez, F. M. ve Doebling, S. W., 1999. Updating Nonlinear Finite Element Models in the Time Domain, Structural Health Monitoring: Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Technomic Publishing, Lancaster, PA, 774-783.

- Bendat, J. S. ve Piersol, A. G., 1971. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Bendat, J. S. ve Piersol, A. G., 1980. *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Brownjohn, J. M. W., 1997. Vibration Characteristics of a Suspension Footbridge, Journal of Sound and Vibration, 202, 1, 29-46.
- Brownjohn, J. M. W. ve Xia, P.-Q., 2000. Dynamic Assessment of Curved Cable-Stayed Bridge by Model Updating, Journal of Structural Engineering, 126, 2, 252-260.
- Broyden, C. G., 1970. The convergence of a class of double rank minimization algorithms, IMA Journal of Applied Mathematics , 6, 1 , 76-90
- Chang, C. C. ve Chang, T. Y. P., 2001. Ambient Vibration of Long-Span Cable-Stayed Bridge, Journal of Bridge Engineering, 6, 1, 46-53.
- Chattopadhyay, A., Dragomir-Daescu, D. ve Gu, H., 1997. Dynamic Response of Smart Composites with Delaminations, *Structural Health Monitoring, Current Status and Perspectives*, Stanford University, Palo Alto, California, 729–740.
- Chen, G. ve Ewins, D. J., 2000. Verification of FE Models for Model Updating, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, İspanya, 709-720.
- Christensen C. D., Halling M. W. ve Womack, K. C., 2001. Dynamic properties of a full-scale bridge using forced vibration testing, *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 4359, 1, 14-17.
- Craig, R. R., 1981. *Structural Dynamics: An Introduction to Computer Methods*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Dally, J. W., Riley, W. F. ve McConnell, K. G., 1984. *Instrumentation for Engineering Measurements*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S. ve Ghrairi, A., 2004. Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, Emirates Journal for Engineering Research, 9, 2, 29-34.
- Ewins, D. J., 1995. *Modal Testing: Theory and Practice*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Farrar, C. R., Cornwell, P. J., Doebling, S. W. ve Prime, M. B., 2000. *Structural Health Monitoring Studies of the Alamosa Canyon and I-40 Bridges*, LA-13635-MS, Los Alamos, New Mexico.

- Felber, A., 1997. Practical Aspects of Testing Large Bridges for Structural Assessment, Structural Health Monitoring, Current Status and Perspectives, Stanford University, Palo Alto, California, 577-588.
- Fletcher, R., 1970. A new approach to variable metric algorithms. Computer Journal, 13, 3, 317-322.
- Friswell, M. I. ve Mottershead, J. E., 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda.
- Gentile, C. ve Saisi, A., 2007. Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, Construction and Building Materials, 21, 6, 1311-1321.
- Gohberg, I., Lancaster, P. ve Rodman, L., 1982. Matrix Polynomials, New York : Academic Press.
- Goldfarb, D., 1970. A family of variable metric updates derived by variational means, Mathematics of Computing, 24, 23-26.
- Gottipati, A., 2002. Finite Element Modeling of a Six-Span Bridge, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, ABD.
- Görl, E. ve Link, M., 2001. Identification of Damage Parameters of a Full-scale Steel Structure Damaged by Seismic Loading, Smart Materials and Structures, 10, 3, 459-465.
- Han, S. P., 1977. A globally convergent method for nonlinear programming. Journal of Optimization Theory and Applications, 22, 3, 297-309
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belçika.
- Jaishi, B., 2005. Finite Element Model Updating of Civil Engineering Structures Under Operational Conditions, Doktora Tezi, Fuzhuo University, College of Civil Engineering and Architecture, Çin.
- Jaishi, B. ve Ren, W. -X., 2005. Structural Finite Element Model Updating Using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structural Engineering, 131, 4, 617-628.
- Jaishi, B. ve Ren, W. -X., 2006. Damage Detection by Finite Element Model Updating Using Modal Flexibility Residual, Journal of Sound and Vibration, 290, 1-2, 369-387.
- Jaishi, B. ve Ren, W.-X., 2007. Finite Element Model Updating Based on Eigenvalue and Strain Energy Residuals Using Multiobjective Optimisation Technique, Mechanical Systems and Signal Processing, 21, 5, 2295-2317.

- Jolliffe, I. T., 1986. *Principal Component Analysis*, Springer-Verlag New York, Inc.
- Juang, J. N. ve Pappa, R. S., 1985. An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, *AIAA, Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 8, 5, 620-627.
- Jun, T., Hiroshi, K., Haruhiko, K., Takeshi, S., Masao, S. ve Fukashi, M., 2002. Forced Vibration Test of an 11-storey Building with Semi-active Switching Oil Damper, Annual Report, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, 50, 67-68.
- Lawson, C. L. ve Hanson, R. J., 1974. *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Lee, J. J. ve Yun, C. B., 2006. Damage Diagnosis of Steel Girder Bridges Using Ambient Vibration Data, *Engineering Structures*, 28, 6, 912-925.
- Link, M., 1993. Updating of analytical models - Procedures and experience, In *Proceedings of Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis*, Sheffield, İngiltere, 35-52.
- Link, M., Rohrmann, R. G. ve Pietrzko S., 1996. Experience with the automated procedure for adjusting the finite element model of a complex highway bridge to experimental modal data, In *Proceedings of IMAC XIV: 14th International Modal Analysis Conference*, Dearborn, Michigan.
- Link, M., 1999a. *Updating of Analytical Models - Basic Procedures and Extensions, Modal Analysis and Testing*, Nato Science Series, Kluwer Academic Publication, Dordrecht.
- Link, M., 1999b. Updating of Analytical Models - Review of numerical procedures and application aspects, In *Proceedings of the Structural Dynamics Forum SD2000*, Los Alamos.
- Ljung, L., 1987. *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- LMS CADA-X, 1998. *Modal Analysis Manual, Revision 3.5*. LMS International, Leuven, Belçika.
- Lopez-Diez, J., Cuerno-Rejado, C., Luengo, P., Alexiou, K., Garcia de Paredes, S. ve Torrealba, M, 2000. Error Localisation in Mass and Stiffness Distribution for Finite Element Models of Spacecraft Structures, *F3-2000*, 699-708.
- Macdonald, J. H. G. ve Daniell, W. E., 2005. Variation of Modal Parameters of a Cable-Stayed Bridge Identified from Ambient Vibration Measurements and FE Modelling, *Engineering Structures*, 27, 13, 1916-1930.

- Maia, N. M. M. ve Silva, J. M. M., 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, İngiltere.
- MATLAB, 2009a. The MathWorks, Natick, MA, ABD.
- MATLAB, 2009b. Signal Processing Toolbox User's Guide, The MathWorks, Natick, MA, ABD.
- MATLAB, 2009c. System Identification Toolbox User's Guide, The MathWorks, Natick, MA, ABD.
- MATLAB, 2009d. Optimization Toolbox User's Guide, The MathWorks, Natick, MA, ABD.
- Mottershead, J. E., Mares, C., Friswell, M. I. ve James S., 2000. Selection and Updating of Parameters for an Aluminium Space-Frame Model, Mechanical Systems and Signal Processing, 14, 6, 923-944.
- Noble, B. ve Daniel J. W., 1977. Applied Linear Algebra, Prentice-Hall, Inc., 323-337.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Danimarka.
- Otnes, R. K. ve Enochson, L., 1972. Digital Time Series Analysis, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Peeters, J. M. B. ve De Roeck, G., 2000. Damage Identification on the Z24-Bridge Using Vibration Monitoring, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, İspanya, 233-242.
- Powell, M. J. D., 1978. A fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations, Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics, Springer Verlag, 630.
- Prony, R., 1995. Essai expérimental et analytique: Sur les lois de la dilatabilité de fluides élastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alkool, à différentes températures, Jour. de L'Ecole Polytechnique, 1, 24-76.
- PULSE LabShop, 2006. Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S.
- Ren, W. -X., Harik, I. E., Lenett, M. ve Baseheart, T., 2001. Modal Properties of the Roebling Suspension Bridge FEM Modelling and Ambient Testing, Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 4359, 2, 1139-1145.
- Ren, W. -X., Zhao, T. ve Harik, I. E., 2004a. Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge, Journal of Structural Engineering, 130, 7, 1022-1031.

- Ren, W. -X., Harik, I. E., Blandford, G. E., Lenett, M. ve Baseheart, T. M., 2004b. Roebling Suspension Bridge. II: Ambient Testing and Live-Load Response, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 9, 2, 119-126.
- Ren, W. -X., Zatar, W. ve Harik, I. E., 2004c. Ambient Vibration-Based Seismic Evaluation of a Continuous Girder Bridge, Engineering Structures, 26, 5, 631-640.
- Ren, W. -X., Peng, X. -L. ve Lin, Y. -Q., 2005. Experimental and Analytical Studies on Dynamic Characteristics of a Large Span Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, 27, 4, 535-548.
- Ruotolo, R., Sorohan, S. ve Surace, C., 2000. Analysis of the Behavior of a Three-Dimensional Truss Structure, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, İspanya, 169-178.
- Rytter, A. ve Kirkegaard, P., 1997. Vibration Based Inspection Using Neural Networks, Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures, Proceedings of DAMAS '97, University of Sheffield, İngiltere, 97-108.
- Salawu O. S. ve Williams, C., 1995. Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing, Journal of Structural Engineering, 121, 2, 161-173.
- Schittowski, K., 1985. NLQPL: A FORTRAN subroutine solving constrained nonlinear programming problems, Annals of Operations Research, 5, 485-500.
- Shanno, D. F., 1970. Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization, Mathematics of Computing, 24, 647-656.
- Skjaerbaek, P. S., Kirkegaard, P. H. ve Nielsen, S. R. K., 1997. Shaking Table Tests of Reinforced Concrete Frames, Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures, Proceedings of DAMAS '97, University of Sheffield, İngiltere, 441-450.
- Strang, G., 1988. Linear Algebra and Its Applications, Third Edition, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, San Diego.
- Teughels, A. ve De Roeck, G., 2003. Damage Assessment of the Z24 Bridge by FE Model Updating, Key Engineering Materials, 245, 2, 19-26.
- Tse, F. S., Morse, I. E. ve Hinkle, R. T., 1978. Mechanical Vibrations: Theory and Applications, Second Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Türker, T., 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Vold, H., Kundrat, J., Rocklin, T. ve Russell, R., 1982. A Multi-Input Modal Estimation Algorithm for Mini-Computers, SAE Technical Papers Series, 91, 1, 815-821.

- Wilcox, P. D., Dalton, R. P., Lowe, M. J. S. ve Cawley, P., 1999. Mode Selection and Transduction for Structural Monitoring Using Lamb Waves, *Structural Health Monitoring 2000*, Stanford University, Palo Alto, California, 703-712.
- Yu, E., Skolnik, D., Whang, D. H. ve Wallace, J. W., 2006. Forced Vibration Testing of a Four Story RC Building Utilizing the nees@UCLA Mobile Field Laboratory, *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, ABD, 1566.
- Zak, A., Krawczuk, M. ve Ostachowicz, W., 1999. Vibration of a Laminated Composite Plate with Closing Delamination, *Structural Damage Assessment Using Advanced Signal Processing Procedures*, *Proceedings of DAMAS '99*, University College, Dublin, İrlanda, 17-26.
- Zhang, Q. W., Chang, T. Y. P. ve Chang, C. C., 2001. Finite Element Model Updating for the Kap Shui Mun Cable-Stayed Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 6, 4, 285-293.
- Zimmerman, D. C., 1999. Looking into the Crystal Ball: The Continued Need for Multiple Viewpoints in Damage Detection, *Damage Assessment of Structures*, *Proceedings of the International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 99)*, Dublin, İrlanda, 76-90.
- Zivanovic, S., Pavic, A. ve Reynolds, P., 2006. Modal Testing and FE Model Tuning of a Lively Footbridge Structure, *Engineering Structures*, 28, 857-868.

ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman ŞAHİN, 1980 yılında Erzurum'da dünyaya geldi. İlk ve orta öğrenimini Amasya'nın Merzifon İlçesinde tamamladı. Liseyi Ankara Anadolu Meteoroloji Meslek Lisesi'nde yatılı olarak okudu. 1998 yılında liseden mezun olarak Sinop Meteoroloji İstasyon Müdürlüğünde göreve başladı. Aynı yıl Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandığından dolayı, Samsun Meteoroloji Bölge Müdürlüğüne tayin oldu. 2002 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümünden bölüm birincisi olarak ve üstün başarı ödülü alarak mezun oldu. Aynı yıl Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek Lisans eğitimi sırasında TÜBİTAK Yurt İçi Yüksek Lisans bursunu kazandı. 2004 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Aynı yıl Trabzon Meteoroloji Bölge Müdürlüğüne tayin oldu. Doktora eğitimi başladıktan sonra TÜBİTAK Yurt İçi Doktora Bursunu kazandı. Halen Trabzon Meteoroloji Bölge Müdürlüğüne bağlı Havalimanı Meteoroloji Meydan Müdürlüğünde mühendis olarak görev yapmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.