

**Modal Deney Yöntemi ile Betonarme Yapılarda Taşıyıcı
Çerçeve Bölme Duvar Etkileşiminin İncelenmesi**

Proje No: 104I107

Yrd. Doç.Dr. Cemalettin DÖNMEZ
Yrd. Doç.Dr. Mustafa ALTINKAYA
Yrd. Doç.Dr. Engin AKTAŞ
Yrd. Doç.Dr. Serdar ÖZEN

AĞUSTOS 2010
İZMİR

ÖNSÖZ: Bu projede betonarme yapılarda taşıyıcı çerçeve dolgu duvar etkileşimi incelenmiştir. Bu amaçla dolgu duvarlı ve duvarsız betonarme çerçevelerin artan hasar altında dinamik değişkenleri modal analiz yöntemleri ile belirlenmiş ve hasarla birlikte çerçevelerin davranışlarındaki aşamalar ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca mevcut bir yapıdan sahada alınan veriler vasıtası ile yapının dinamik değişkenleri belirlenmiştir. Proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiş ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde yürütülmüştür.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLolar LİSTESİ	v
KISALTMALAR LİSTESİ	vi
DEĞİŞKEN İNDEKSİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1: Giriş	
1.1 Amaç ve Kapsam	1
1.2 Organizasyon	2
BÖLÜM 2: Modal Analiz ve Deney Teknikleri	
2.1 Giriş	4
2.2 Modal Değişken Kestirimi	4
2.2.1 Temel Titreşim Denklemi ve Frekans Yanıt Fonksiyonu	5
2.2.2 En Küçük Kareler Üstel Karmaşık (EKÜK) Yöntemi	9
2.2.3 Öz Sistem Gerçekleştirme Algoritması (ÖGA) Yöntemi	15
2.2.4 Karmaşık Mod Gösterge Fonksiyonu (KMGF)	19
2.3 Deneysel Modal Analiz	20
2.3.1 Modal Deney Tasarımı	20
BÖLÜM 3: Basit Sistem Deneyleri	
3.1 Giriş	23
3.2 Çalışma Kapsamında İncelenen Doğrusal Sistemler	24
3.3 Basit Kiriş	25
3.3.1 Basit Kirişin Analitik ve Sayısal Çözümleri	30
3.3.2 Basit Kirişin Modal Analiz Yöntemleri ile Tanılanması	31
3.3.3 EKÜK ve ÖGA Yöntemlerinin Basit Kiriş Verileri ile Karşılaştırılması	33
3.4 H-Çerçeve	35
3.5 Kare Plaka	45
3.6 Düzlem Çerçeve	53
BÖLÜM 4 : Betonarme Çerçeveler Deney Düzenegi ve Statik Veriler	
4.1 Giriş	70
4.2 Deney Düzenegi ve Elemanlarının Tasarımı	70
4.2.1 Yükleme Sistemi Tasarım ve İmalatı	71
4.2.2 Çerçevelerin Askı Düzenegi Tasarım ve İmalatı	74
4.2.3 Ölçüm Sistemi Tasarımı	74
4.2.4 Betonarme Çerçevelerin Tasarım ve İmalatı	75
4.3 Çerçeve Deneyleri	78
4.3.1 Malzeme Dayanımları	78
4.3.2 Alıcılar ve Kayıt Sistemi	78
4.3.3 Yüklemede İzlenen Yol	79
4.3.4 Birinci Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar	86
4.3.5 İkinci Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar	90
4.3.6 Üçüncü Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar	96
4.3.7 Dördüncü Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar	106
BÖLÜM 5: Betonarme Çerçeveler Dinamik Veriler	
5.1 Giriş	113

5.2 Çerçevelerin Darbe Çekici ve Çek Bırak Uyarıları Altındaki Tipik Davranışı	113
5.3 Betonarme Çerçevelerde Dinamik Değişken Kestirimi	125
5.4 Dürtü Uyarı Yanıtları ile Sistem Kestirimi	126
5.5 Çek Bırak Uyarı Yanıtları ile Sistem Kestirimi	137
BÖLÜM 6: Mevcut Yapıdan Elde Edilen Veriler ile Dinamik Değişken Kestirimi	
6.1 Giriş	143
6.2 Seçilen Yapı ve Veri Kayıt Sistemi	143
6.3 Yapıdan Alınan Veriler ve İrdelenmesi	147
BÖLÜM 7: Özet, Sonuç ve Öneriler	
7.1 Giriş	157
7.2 Basit Sistemler	158
7.3 Betonarme Çerçeve Deneyleri	159
7.4 Mevcut Yapı Çalışmaları	162
7.5 Sonuçlar	163
7.6 Öneriler	164
REFERANSLAR	165
EK A: Modal Analiz Yöntemlerinin Yazılımları	
Yazılım 1. EKÜK Yazılımı	168
Yazılım 2. ÖGA Yazılımı	170
EK B: İmalat Detayları	
B.1 Düzlem Çerçeve	172
B.2 Betonarme Çerçeve Yükleme ve Askı Sistemleri	176
B.3 Betonarme Çerçeve Detayları	195
EK C: Alıcıların Teknik Özellikleri	
C.1 Yük Hücreleri	201
C.2 İvmeölçerler	201
C.3 Doğrusal Yer Değiştirme Ölçerler	201
C.4 Gerinim Pulları	201
EK D: Malzeme Dayanımları	
D.1 Beton Basınç Deneyi Sonuçları	203
D.1.1 Çerçeve 1	203
D.1.2 Çerçeve 2	204
D.1.3 Çerçeve 3	205
D.1.4 Çerçeve 4	205
D.2 Beton Çeliği Çekme Deneyi Sonuçları	206
D.3 Dolgu Duvar Dayanımları	207

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1: Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri	33
Tablo 3.2 EKÜK ve ÖGA algoritmaları tarafından 450Hz' kadar bulunan modal frekanslar	34
Tablo 3.3 EKÜK Algoritmasının Farklı SNR Değerlerindeki Performansı	35
Tablo 3.4 Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri	40
Tablo 3.5 Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri	50
Tablo 3.6 Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri	59
Tablo 3.7 Dolgulu çerçeve için kullanılan çekiç kütle ve uçları	61
Tablo 5.1 Birinci çerçevenin hakim frekansları	129
Tablo 5.2 İkinci çerçevenin hakim frekansları	132
Tablo 5.3 Üçüncü çerçevenin hakim frekansları	133
Tablo 5.4 Dördüncü çerçevenin hakim frekansları	133
Tablo 5.5 Birinci çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen sürekliliğe sahip hakim frekanslar	138
Tablo 5.6 İkinci çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen hakim frekanslar	140
Tablo 5.7 Üçüncü çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen hakim frekanslar	141
Tablo 5.8 Dördüncü çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen hakim frekanslar	142
Tablo D.1 Çerçeve beton dayanım ortalamaları	203
Tablo D.2 1. Çerçeve beton numuneleri	203
Tablo D.3 2. Çerçeve beton numuneleri	204
Tablo D.4 3. Çerçeve beton numuneleri	205
Tablo D.5 4. Çerçeve beton numuneleri	206
Tablo D.6 Dolgu duvar malzeme test sonuçları	207

KISALTMALAR LİSTESİ

ADC	Analog/Sayısal Dönüştürücü
ÇSD	Çok Serbestlik Derecesi
EKÜK	En Küçük Kareler Üstel Karmaşık
FYF	Frekans Yanıt Fonsiyonu
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
KMGF	Karmaşık Mod Gösterge Fonksiyonu
ÖGA	Öz Sistem Gerçekleştirme Algoritması
TDA	Tekil Değer Ayrıştırması
TGÇÇ	Tek Giriş Çok Çıkış
TGTÇ	Tek Giriş Tek Çıkış
TSD	Tek Serbestlik Derecesi
VI-ÖGA	Veri İlintili ÖGA

DEĞİŞKEN İNDEKSİ

A	sistem matrisi (durum geçiş matrisi)
${}_r A_{ij}$ ve ${}_r A_{ij}^*$	sistemin r modunun kalıntıları, eşleniktirler
B	girdi matrisi
$B(s)$	sistem empedansı
C	çıkıktı matrisi
C	sistemdeki ağıdalı sönüm
C_c	kritik sönüm miktarı
K	sistemin sıklılığı
$H(s)$	transfer fonksiyonu
M	sistemin kütlesi
N	sistemin serbestlik derecesi
N_e	etkili mod sayısı
V_ξ	gözlemlenebilirlik matrisi
W_η	denetlenebilirlik matrisi
i	girdi indisi
j	çıkıktı noktası indisi
$f(t)$	genel kuvvet fonksiyonu
s_r	karmaşık doğal frekanslar
$x(t)$	serbestlik derecesinin yer değiştirme vektörü,
$\dot{x}(t)$	serbestlik derecesinin hız vektörü,
$\ddot{x}(t)$	serbestlik derecesinin ivme vektörü'dür.
$[U(\omega)]$	$N_o \times N_e$ boyutlarına sahip sol tekil birimcil matrisi
$[\Lambda(\omega)]$	$N_d \times N_e$ boyutlarına sahip köşegen özdeğer matrisi,
$[\Sigma(\omega)]$	$N_e \times N_e$ boyutlarına sahip köşegen tekil değer matrisi
$[V(\omega)]$	$N_d \times N_i$ boyutlarına sahip sağ tekil birimcil matrisidir.
Ω_1	sönümsüz sistem doğal frekansı
ζ	sönüm oranı
ζ_r	sönüm katsayıları
σ_1	sönüm faktörü (rad/sn)
ω_1	sönümlü sistem frekansı
ω_r	sönümlenmemiş doğal frekanslar
ω_r	sistemin sönümlenmemiş doğal frekansları

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Tek serbestlik dereceli bir kütle	5
Şekil 2.2 Yaratılan sentetik fonksiyonunun dürtü ve frekans yanıtları	12
Şekil 2.3 Durum-uzay formülasyonu ile yaratılan sistemin yanıt grafikleri	14
Şekil 3.1 Projede bugüne kadar çalışılan basit sistemler	23
Şekil 3.2 Basit giriş geometrisi, alıcı bilgileri ve ön deneyler sırasında kullanılan alıcı yerleşimi	25
Şekil 3.3 Basit giriş mesnet durumu	26
Şekil 3.4 Basit giriş uyarı ve okuma noktaları	26
Şekil 3.5 Sisteme verilen dürtünün frekanslar üzerindeki tipik etkinliği	27
Şekil 3.6 Basit girişin frekans yanıt fonksiyonları toplu görünüşü	27
Şekil 3.7 Doğrusallık kontrolü için sisteme verilen dürtülerin büyüklüğü	28
Şekil 3.8 Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları	29
Şekil 3.9 Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları	29
Şekil 3.10 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okumalara karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları	30
Şekil 3.11 Basit girişin ilk 4 modal şekli	31
Şekil 3.12 ÖGA yöntemi ile bulunan basit giriş frekans ve modal şekilleri	32
Şekil 3.13 Basit girişin modal analiz ve sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekans ve modal şekillerinin karşılaştırılması	33
Şekil 3.14 H-çerçevenin fiziksel boyutları ve yerinde görünümü	36
Şekil 3.15 Okuma ve vuruş noktaları	37
Şekil 3.16 Sisteme verilen dürtünün frekanslar üzerindeki tipik etkinliği	37
Şekil 3.17 Sistemin frekans yanıt fonksiyonları toplu halde	38
Şekil 3.18 Sistemin doğrusallık doğrulaması	39
Şekil 3.19 Sistemin tersinirlik doğrulaması	40
Şekil 3.20 H-çerçevenin modal analiz ve sonlu elemanlar sonucu elde edilen frekans ve şekilleri	42
Şekil 3.21: Sistem okumalarının birleştirilmesinde kullanılan bileşenler	45
Şekil 3.22: Sistem verilerinin birleştirilmesinde kullanılan FYF'ların karşılaştırılması	45
Şekil 3.23 Kare plakanın boyutları ve görünüm	47
Şekil 3.24 Kare plaka için ivmeölçer ve vuruş noktaları	47
Şekil 3.25 Sisteme verilen dürtünün frekanslar üzerinde tipik etkinliği	48
Şekil 3.26 Kare plakanın frekans yanıt fonksiyonlarının toplu görünüşü	48
Şekil 3.27 Tersinirlik kontrolü için sisteme verilen dürtülerin büyüklüğü	49
Şekil 3.28 Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları	49
Şekil 3.29 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okuma noktaları	49
Şekil 3.30 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okumalara karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları	50
Şekil 3.31: Kare plakanın modal analiz ve sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekans ve modal şekillerinin karşılaştırılması	51
Şekil 3.32 Düzlem çerçevenin boyutları	54
Şekil 3.33 Düzlem çerçeve modal deney okuma noktaları ve uyarıların etkinliği	56
Şekil 3.34 Çerçevelerin görünüşleri	57
Şekil 3.35 Moment-Çerçevesi frekans yanıt fonksiyonlarının toplu görünüşü	57
Şekil 3.36 Doğrusallık kontrolü	58

Şekil 3.37 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okumalara karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları	59
Şekil 3.38 Moment-çerçevesinin modal analiz ve sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekans ve modal şekillerinin karşılaştırılması	60
Şekil 3.39 Dolgulu-Çerçeve frekans yanıt fonksiyonlarının toplu görünüşü	62
Şekil 3.40 Dolgu çerçeveyi uyarmakta kullanılan yapma çekiçler	62
Şekil 3.41 PCB çekiç orta sertlikte uç	64
Şekil 3.42 PCB çekiç sert uç, metal	65
Şekil 3.43 Balyoz orta sertlikte uç, sıcak silikon	66
Şekil 3.44 Balyoz sert uç, metal	67
Şekil 3.45 Plaka çekiç sert uç, metal	68
Şekil 3.46 Olası gürültü kaynaklarına müdahaleden sonra, plaka çekiç sert uç ...	69
Şekil 4.1 Betonarme çerçevelerin boyutları	71
Şekil 4.2 Yükleme sisteminin sözde statik ve modal deneyler için şematik pozisyonları	72
Şekil 4.3 Yükleme sisteminin ters üçgen yük dağılımını sağlaması	73
Şekil 4.4 Yükleme sistemi yük dağıtım kirişleri çerçeveye bağlı halde	73
Şekil 4.5 Çek bırak düzeneği	74
Şekil 4.6 Düzlem içi askı sistemi (üstte) ve yükleme sistemi silindir yatağı (altta) ..	75
Şekil 4.7 Düzlem dışı askı sistemi (solda) ve çerçeve taban bağlantı sistemi (sağda)..	76
Şekil 4.8 Ölçüm düzenekleri, en alt kat kolonlarındaki gerinim pulları gösterilmemiştir.	77
Şekil 4.9 Dolgu olarak kullanılacak delikli tuğla boyutları	77
Şekil 4.10 LVDT ve ivmeölçerlerin yerleşimi	79
Şekil 4.11. Birinci ve ikinci çerçeve kat seviyelerinde okunan ötelenmeler ve yükleme grupları	80
Şekil 4.12. Üçüncü ve dördüncü çerçeve kat seviyelerinde okunan ötelenmeler ve yükleme grupları	81
Şekil 4.13 Birinci ve ikinci çerçeveler kat arası ötelenme döngüleri	82
Şekil 4.14 Üçüncü ve dördüncü çerçeve kat arası ötelenme döngüleri	83
Şekil 4.15 Birinci ve ikinci çerçeve için kat seviyelerinde uygulanan yükler	84
Şekil 4.16 Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde kat seviyelerinde uygulanan yükler (devamı sonraki sayfada)	84
Şekil 4.17 Birinci ve ikinci çerçevelerde düzgelemlili yük dağılımı	85
Şekil 4.18 Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde düzgelemlili yük dağılımı	86
Şekil 4.19 Birinci çerçeve 1. kat zarf eğrileri ve toplu histeresis eğrileri	86
Şekil 4.20 Birinci çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri ..	87
Şekil 4.21 Grup 2 döngüleri sonrası 1. kat kolonu	88
Şekil 4.22 Grup 3 döngüleri sonrası 1. kat kolonu, yüklemeye dik yüz	89
Şekil 4.23 Birinci kat 4.grup ötelenme yanal yük eğrileri	89
Şekil 4.24 Grup 4 döngüleri sonrası 1. kat doğu kolonu	90
Şekil 4.25 İkinci çerçeve 1. kat zarf eğrileri ve toplu histeresis eğrileri	91
Şekil 4.26 İkinci çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri	91
Şekil 4.27 Grup 2 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu	93
Şekil 4.28 Grup 3 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu, güney yüzü	94
Şekil 4.29 Grup 4 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu, güney yüzü	94
Şekil 4.30 Grup 5 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu, güney yüzü	95
Şekil 4.31 Grup 6 döngüleri dışında çerçeve ötelenmeleri çıplak gözle görülür halde	96
Şekil 4.32 Üçüncü çerçeve 1. kat zarf ve toplu histeresis eğrileri	97
Şekil 4.33 Üçüncü çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri	98
Şekil 4.34 Grup 1 yüklemeleri sonrası oluşan hasarlar	99
Şekil 4.35 Grup 2 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	100

Şekil 4.36 Grup 2 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	101
Şekil 4.37 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat batı kolonu güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	101
Şekil 4.38 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	102
Şekil 4.39 Grup 3 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	102
Şekil 4.40 Grup 4 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	103
Şekil 4.41 Grup 4 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	104
Şekil 4.42 Grup 5 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	104
Şekil 4.43 Grup 5 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	105
Şekil 4.44 Grup 6 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	105
Şekil 4.45 Grup 6 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	106
Şekil 4.46 Dördüncü çerçeve 1. kat zarf ve toplu histeresis eğrileri	.....	107
Şekil 4.47 Dördüncü çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri	.....	108
Şekil 4.48 Grup 2 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	108
Şekil 4.49 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat kolonları düğüm noktalarında oluşan hasarlar	.....	110
Şekil 4.50 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	111
Şekil 4.51 Grup 4 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	111
Şekil 4.52 Grup 5 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar	.....	112
Şekil 4.53 Grup 6 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar ve deney sonu	.....	112
Şekil 5.1 Tipik darbe çekici dürtüsü	.....	114
Şekil 5.2 Tipik ivme-zaman tarihçesi ve Fourier dönüşümü	.....	114
Şekil 5.3 Birinci çerçeve hasarsız hali, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri	.....	115
Şekil 5.4 Birinci çerçeve hasarsız hali FYF grafikleri	.....	115
Şekil 5.5 Birinci çerçeve dördüncü döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri	.....	116
Şekil 5.6 Birinci çerçeve dördüncü yükleme grubu sonrası FYF grafikleri	.....	116
Şekil 5.7 İkinci çerçeve altıncı döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri	.....	117
Şekil 5.8 İkinci çerçeve altıncı yükleme grubu sonrası FYF grafikleri	.....	117
Şekil 5.9 Üçüncü çerçeve altıncı döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri	.....	118
Şekil 5.10 Üçüncü çerçeve altıncı yükleme grubu sonrası FYF grafikleri	.....	118
Şekil 5.11 Dördüncü çerçeve altıncı döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri	.....	119
Şekil 5.12 Dördüncü çerçeve altıncı yükleme grubu sonrası FYF grafikleri	.....	119
Şekil 5.13 Birinci çerçeve ikinci yükleme grubu çek bırak ivme yanıtı karşılaştırması	.....	121
Şekil 5.14 Birinci çerçeve ikinci yükleme grubu çek bırak Şekil 5.13'da sunulan kayıtlar için sözde FYF, dolu çizgi 6mm kesik çizgi 12mm öteleme karşılığı	.....	121
Şekil 5.15 Birinci çerçeve ikinci yükleme grubu çek bırak ivme yanıtı karşılaştırması	.....	122
Şekil 5.16 Birinci çerçeve ikinci yükleme grubu çek bırak Şekil 5.15'de sunulan kayıtlar için sözde FYF	.....	122
Şekil 5.17 İkinci çerçeve altıncı yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar	.....	123
Şekil 5.18 Üçüncü çerçeve altıncı yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar	.....	123
Şekil 5.19 Dördüncü çerçeve altıncı yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar	.....	124
Şekil 5.20 Dördüncü çerçeve birinci yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar	.....	124
Şekil 5.21 İkinci çerçeve altıncı yükleme grubu dördüncü kat çek bırak ivme sinyalinin kayar HFD penceresi altında frekans eğrileri	.....	125
Şekil 5.22 Birinci çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları	.....	126

Şekil 5.23 İkinci çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları	127
Şekil 5.24 Üçüncü çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları	128
Şekil 5.25 Dördüncü çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları	129
Şekil 5.26 İkinci çerçeve dördüncü kat sinyalinin bütün döngüler için geri çatılması....	131
Şekil 5.27 Birinci ve ikinci çerçevelerin 1. kat ötelenmelerindeki hakim frekans değişimleri	132
Şekil 5.28 Üçüncü ve dördüncü çerçevelerin 1. kat ötelenmelerindeki hakim frekans değişimleri	133
Şekil 5.29 Birinci çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 4'e sırayla	134
Şekil 5.30 İkinci çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 4'e sırayla	135
Şekil 5.31 Üçüncü çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 3'e sırayla	135
Şekil 5.32 Dördüncü çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 2'ye sırayla	136
Şekil 5.33 Birinci ve üçüncü çerçeveler birinci mod modal şekil karşılaştırılması, sırası ile birinci katta hasarsız durum, 4mm ve 11mm ötelenmeler sonrası(kesik çizgi üçüncü çerçeveyi gösterir)	137
Şekil 5.34 Birinci çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen hakim frekanslar	138
Şekil 5.35 Birinci çerçeve 2. döngü çek bırak verilerinden elde edilen hakim frekansların modal şekilleri	139
Şekil 5.36 Birinci çerçeve 2. döngü hakim modal şekillerin değişime uğramış tipleri	139
Şekil 5.37 İkinci çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen hakim frekanslar	140
Şekil 5.38 Üçüncü çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen birinci mod frekansları	141
Şekil 5.39 Dördüncü çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen birinci mod frekansları	142
Şekil 6.1 İYTE Minarlık A-Blok coğrafik pozisyonu	144
Şekil 6.2 İYTE Minarlık A-Blok temel kolon ve perde uygulama planı	145
Şekil 6.3 Güralp yapı gözlem, ölçüm ve kayıt sisteminin ana parçaları	145
Şekil 6.4 Mimarlık A-bloğa darbe uyarısı vermekte kullanılan 92.6 kgf'luk darbe çekici	146
Şekil 6.5 Kat seviyelerindeki ivmeölçerlerin yerleşim ve yönleri	146
Şekil 6.6 Mimarlık A-bloktan alınan şiddetli rüzgar altında çevre gürültüsü kaydı örneği	147
Şekil 6.7 1024 verilik (~5sn) tek bir bloktan elde edilen güç spektrumu	148
Şekil 6.8 10 ayrı veri bloğundan (~50sn veri) elde edilen güç spektrumu	148
Şekil 6.9 500 ayrı veri bloğundan (~2500sn veri) elde edilen güç spektrumu	149
Şekil 6.10 Güçlü rüzgar altındaki çevresel gürültüden elde edilen verilerin güç spektrum eğrileri	150
Şekil 6.11 Mimarlık A-blok sayısal modeli görüntüsü	151
Şekil 6.12 Mimarlık A-blok analizden elde edilen ilk üç modu	151
Şekil 6.13 Mimarlık A-blok'ta 22 Mart 2009 tarihinde kaydedilendüşük şiddetteki depremin kayıtları	153
Şekil 6.14 Mimarlık A-Blok 22 Mart 2009 tarihli deprem akabinde kat seviyelerinde alınan verilerin güç spektrum eğrileri	154
Şekil 6.15 Mimarlık A-blok'da kaydedilen depremin açık zeminde kaydedilen bileşenlerinin Fourier dönüşümleri	155
Şekil 6.16 Mimarlık A-blok'da darbe çekici dürtüsü sonucu alınan ivme kayıtları	156

Şekil 6.17 Mimarlık A-blok'da darbe çekici dürtüsü sonucu alınan ivme kayıtlarının Fourier dönüşümleri	156
Şekil B.1 Düzlem çerçeve detayları	172
Şekil B.2 Düzlem çerçeve detayları (İhtiyaç duyulan buyutta I-kesitler bulunamadığından kolonlar ve kirişler 4mm kalınlığında plakalardan imal edilmiştir.)	173
Şekil B.3 Dolgu paneller ve bağlantı detayları	174
Şekil B.4 Dolgu çerçeve taban mesnet detayları	175
Şekil B.5 Betonarme çerçeve planda yerleşim	176
Şekil B.6 Betonarme çerçeve boyutları ve taban bağlantısı	177
Şekil B.7 Betonarme çerçeve taban mesnet detayları	178
Şekil B.8 Betonarme çerçeve yükleme düzlem içi askı sistemleri	179
Şekil B.9 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi ve parçaları	180
Şekil B.10 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi parçaları	181
Şekil B.11 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi parçaları (devam)	182
Şekil B.12 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi parçaları (devam)	183
Şekil B.13 Betonarme çerçeve yükleme sistemi parçaları	184
Şekil B.14 Betonarme çerçeve yükleme sistemi parçaları (devam)	185
Şekil B.15 Betonarme çerçeve düzlem içi askı sistemi parçaları	186
Şekil B.16 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları	187
Şekil B.17 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)	188
Şekil B.18 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)	189
Şekil B.19 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)	190
Şekil B.20 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)	191
Şekil B.21 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)	192
Şekil B.22 Betonarme çerçeve gergi alt destek detayları	193
Şekil B.23 Betonarme çerçeve gergi üst deste detayları	194
Şekil B.24 Betonarme çerçeve geometri ve taban mesneti	195
Şekil B.25 Betonarme çerçeve kolon detayları	196
Şekil B.26 Betonarme çerçeve zayıf giriş detayları	197
Şekil B.27 Betonarme kuvvetli çerçeve giriş detayları	198
Şekil B.28 Betonarme çerçeve taban bağlantı tablası detayları	199
Şekil B.29 Betonarme çerçeve ek kütle plakaları	200
Şekil D.1 F8 nervürlü beton çeliği için testlerden elde edilen tipik birim yük-uzama eğrisi	206
Şekil D.2 F5 soğuk çekilmiş tel için testlerden elde edilen tipik birim yük-uzama eğrisi	207
Şekil D.3 Dolgu duvar malzeme test numuneleri	208

ÖZET: Bu çalışmada ana amaç betonarme çerçeve dolgu duvarlı sistemlerde çerçeve dolgu duvar etkileşimiyle sistemin dinamik değişkenlerinin nasıl değiştiğini ortaya koymaktır. Bu amaçla modal analiz yöntemleri kullanılmıştır. Ülkemizdeki mevcut yapı stokunun çok büyük bir kısmı betonarme çerçeve ve delikli kil tuğladan yapılmış dolgu duvarlara sahip yapılardan oluşmaktadır. Günümüze kadar olan depremler bu yapıların tipik olarak deprem yükleri altında yetersiz olduklarını göstermiştir. Bu sebeple mevcut yapıların nasıl güçlendirileceği konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda bu yapıları mevcut dolgu duvarları kullanarak güçlendirme konusunda artan bir ilgi oluşmuş ve bir grup yöntem şartnameye kadar girmiştir. Konu hakkında alternatif yöntemler geliştirme çabaları sürmektedir. Sunulan çalışmada ilk olarak modal analiz yöntemlerine hakimiyet sağlamak amacıyla bir grup modal analiz yöntemi üzerine çalışılmıştır. Akabinde modal deney tasarımı ve uygulaması konusunda tecrübe elde etmek için dört farklı basit sistemin ilk kısımda çalışılan modal analiz yöntemlerini kullanarak dinamik değişkenleri belirlenmiştir. Asıl hedef olan betonarme çerçeve dinamik değişkenlerinin izlenmesi amacıyla dört adet tek açıklıklı, dört katlı, 1/5 ölçekli çerçeve imal edilmiştir. Çerçeveler kat seviyelerinde uygulanan yükler vasıtasıyla ters üçgen yüklemeye maruz tutulmuş ve kademeli olarak önceden hedeflenen ötelenme seviyelerinde hasarlar verilmiştir. Her hasar seviyesinde modal deneyler yapılmış ve sistem dinamik değişkenlerinin kestirilmesi için gerekli veriler alınmıştır. Verilerin işlenmesi sonucu dolgu duvarların çerçevelerin hakim frekanslarını çok yükseltmekle kalmayıp hasar sonrası davranışı da ciddi şekilde değiştirdiği gözlenmiştir. Dolgu duvarlı sistemlerde artan hasarla birlikte ötelenmeler ilk kata yoğunlaşmakta ve bu katta ağır hasara sebep olmaktadır. Çerçevelerin frekanslarının artan hasar ile birlikte düştüğü fakat özellikle moment çerçevelerinde modal şekillerin ciddi bir değişikliğe uğramadığı gözlenmiştir. Dolgulu çerçevelerde birinci mod harici görece ciddi bir değişim gözlenmiştir. Çalışmada ayrıca modal yöntemleri kullanarak mevcut bir yapının dinamik değişkenleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Çerçeve, Modal Analiz, Dolgu Duvar, Dinamik Değişkenler

ABSTRACT: The main purpose of the study is to investigate the dynamic parameters of reinforced concrete frames with and without infill walls. Modal analysis methods are utilized for the purpose. Majority of the existing structures in Turkey have reinforced concrete frames with clay tile infill walls as their structural system. Earthquakes have proven many times that these type of structures are vulnerable to the earthquake loading. There is an intense research about how to mitigate these type of structures. Some of the recent studies concentrate on how to use the infill walls for strengthening purposes and even one method is entered to Turkish Earthquake Code. Current study starts with the derivation of the selected modal analysis methods. Afterwards to get the experimental and analysis experience, four simple system are designed, tested and their dynamic parameters are identified. In line with the main purpose of to study four reinforced concrete frames are designed and built. These are 1/5 scaled, single bay, four story systems. Reinforced concrete frames are loaded at floor levels with a design to have an inverted triangular shape loading profile. The loading program is designed and applied with the purpose of creating damage stages at selected drift levels of the system. Modal tests are done for every frame at every selected damage level. Analysis of the data reveal that infill walls are not only increasing the frequency of the systems but also effecting the damaged behavior of the system. Drift is observed to concentrate to the first story with the increasing level of damage. The natural frequencies of the frames is observed to decrease with the increasing damage level. On the other side, specifically the moment frames, mode shapes do not change dramatically. The modal shapes of the frames with infill walls change relatively more except the first mode. The dynamic parameters of an existing structure is also identified to experience the operational details of such a study.

Keywords: Reinforced Concrete Frames, Modal Analysis, Infill Wall, Dynamic Parameters

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Ülkemizdeki yapıların büyük bir kısmında taşıyıcı sistem olarak betonarme çerçeve kullanılmıştır. Mevcut analiz ve tasarım tekniklerinde bu tip yapıların sadece betonarme kısımlarının sistemde yük taşıyıcı oldukları varsayıp mevcut diğer kısımlar ihmal edilmektedir. Taşıyıcı kapasiteleri ihmal edilen bu kısımların en önemlisi bölme amaçlı olarak inşa edilen dolgu duvarlardır. Bölme duvarlar ile ilgili yapılan varsayım düzey yükler altında tipik olarak herhangi bir sorun çıkarmamak ile birlikte yatay yükler, özellikle de deprem yükleri, altında tam olarak geçerli değildir (EERI 1993, EERI 2000, EERI web, Hashemi ve Mosalam 2006, Dolsek ve Fajfar 2008, Oliveira ve Navarro 2010). Bu çalışmada betonarme yapılarıdaki taşıyıcı çerçeve-dolgu duvar etkileşiminin sistemin dinamik özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Taşıyıcı çerçeve/dolgu duvar etkileşimi konusunda yapılan gözlemler ışığında betonarme çerçeve yapıların depreme karşı tasarım ve güçlendirilmesi konusunda temel bilgilere ulaşılmış ve öneriler sunulmuştur.

Ekonomi, yaygınlık ve uygulanma kolaylığı sebepleri ile dolgu duvarlar ile yapıların depreme karşı güçlendirilmesi araştırmacıların ilgisini çekmekte (Özcebe 2003, Baran 2003, Tumilian 2003, Perera 2005, Hashemi ve Mosalam 2006, Erdem ve diğ. 2006, Altın ve diğ. 2008, Dolsek ve Fajfar 2008, Köse 2009, Pujol ve Fick 2010, Mohammadi ve Akrami 2010) ve bir kısım teknikler şartnamelerde yerini almaktadır (TDY 2007). Dolgu duvarların asli taşıyıcı sistem ile etkileşip sistemin bütünüdürün davranışını nasıl etkiledikleri ve bu etkileşimi sistemin toplamdaki davranışı iyileştirme yönünde nasıl katkıda bulunabilecek hale getirebileceği büyük ekonomik öneme haiz, çözüm bekleyen, zor bir problemdir.

Dolgu duvarların betonarme çerçevelerin davranışını nasıl etkilediği konusunda deneysel ve sayısal çok sayıda çalışma vardır. Konu hakkında detaylı literatür dökümü için bakınız Griffith 2008 ve Pujol ve Fick 2010. Araştırmacılar halen konu üzerine tam olarak fikir birliği sağlamamışlardır. Bazı araştırmacılar dolgu duvarların betonarme çerçevelerin dinamik davranışına yıkıcı veya kötü yönde etkisi olduğunu savunurken diğer bir grup iyi yönde etkisi olduğunu savunmaktadır (Pujol ve Fick 2010). Buradaki çelişki Dolsek ve Fajfar'ın (2008) yaptığı gözlemlerle uyushmaktadır. Bu araştırmacılar dolgu duvarların yapı içinde düzgün dağıtılıp kolonlarda kesme göçmesine sebep olmadıkları sürece davranışa iyi yönde etki ettiğini belirtmişlerdir.

Geçmişte moment çerçevesi ve dolgu duvarlı çerçevelerin ötelenme, sıklık, yük dağılımı, dolgu duvar yerleşimi ve dolgunun şekli üzerine yapılmış çok sayıda araştırma olmasına rağmen doğrudan dinamik parametrelerin kestirilmesine yönelik sınırlı sayıda çalışma vardır (Zarnic ve diğ. 2001, Zembaty ve diğ. 2006, Hashemi ve Mosalam 2006, Zonta ve diğ. 2008). Yapılan çalışmalar dolgu duvarların yapıların sıklığını arttırarak periyodlarını düşürdüğünü, enerji emme kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Söz konusu etkiler genellikle yapıya gelen yük taleplerini de düşürmektedirler. Bu faydalarının yanında yerel olaral dolguya komşu elemanlardan kapasite talepleri artmaktadır.

Literatürde çok katlı betonarme çerçeve ve betonarme dolgulu çerçevelerin dinamik değişkenlerini saptamaya yönelik çok sınırlı çalışma vardır. Bu boşluğu doldurmak amacı ile sunulan çalışmada çerçeve dolgu duvar etkileşimi laboratuvar yöntemleri ile incelenmiş ve dinamik değişkenleri kestirilmiştir. Bu amaçla modal deney/analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntem son otuz yıldır, özellikle hesap gücünün arttığı ve alıcı/kayıt teknolojilerinin sıçrama gösterdiği 1980'lerden itibaren, sistemlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır (UC-SDRL, Aktan ve diğ. 1997, Allemang 1999, Ewins00, He ve

Fu 2001, Çatbaş ve Aktan 2002, Çatbaş ve diğ. 2004) . Modal deney/analiz yöntemlerinde sistemlerin doğal titreşim frekansları, her bir frekansa karşılık gelen modal şekilleri ve modal sönüm miktarları sistem üzerindeki ölçümlerin analizi sonucu tespit edilebilmektedirler. Modal deney/analiz yöntemleri inşaat mühendisliğinde sistem tanılama, yapısal modelleri düzeltme/ilintilendirilme, yapısal sistemlerin durumunu izleme, mevcut yapıların durum tespiti ve aktif titreşim kontrolü konularında önemli bir araçtır.

Sunulan çalışmadaki ana amaç betonarme çerçeve dolgu duvar etkileşiminin dinamik değişkenler üzerindeki etkisini belirlemek olmak ile beraber diğer bir amaç da modal analiz ve deney tekniklerinin özümsemesidir.

Çalışma kapsamında iki grup laboratuvar deneyi yapılmıştır. Birinci grupta modal deney ve analiz yöntemlerinin özümsemesi amacı ile bir grup doğrusal sistem tasarlanıp imal edilerek teste tabii tutulmuşlardır. Bu grup deneyler sonucunda modal analiz ve deney yöntemlerinde tecrübe kazanılmıştır. İkinci grupta ise betonarme çerçeveleri temsilen boş ve dolgu duvarlı deney çerçeveleri tasarlanıp, bu sistemler sözde statik (İng. pseudo-static) yükleme döngüleri sonrası hasara tabii tutularak her bir döngü sırasındaki modal değişkenleri belirlenmiştir.

Birinci grup deneylerde tamamı çelikten imalat dört tip basit sistem incelenmiştir. Bu sistemler basit bir kiriş, kare bir plaka, ayak uçlarında ağır plakalar olan bir H-çerçeve ve tek açıklık ve dört kata sahip olan bir düzlem çerçevedir. Seçilen sistemler verilen sıra ile basitten karmaşığa doğru incelenmişlerdir.

İkinci grup deneylerde dört adet betonarme düzlem çerçeve incelenmiştir. Her bir çerçeve temelde geometrik olarak eş olmak ile beraber donatı detaylandırılması ve dolgu duvar içeriği ile dört tip çerçeve test edilmiştir. Her bir çerçeve tek açıklık ve dört kata sahiptir. Çerçeveler laboratuvar olanakları içinde test edilebilmek amacı ile 1/5 ölçeklendirilmiş ve ölçeklendirmede ana değişken olarak sistemin frekansları alınmıştır. Çerçeve betonları 250 ile 400 kgf/cm² (deney günlerinde ölçülmüş) ortalama beton dayanımlarına sahiptir. Çerçeve ana donatıları S420, etriyeler ise soguk çekilmiş telden imal edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak dolu alanı %50 civarında olan kil tuğlalar kullanılmıştır. Çerçeveler sözde statik yüklemelerinde her bir kat döşeme seviyesinde olmak üzere dört noktadan yüklenen ters üçgen yüke tabii tutulmuş ve yük miktarları hedeflenen birinci kat katarası öteleme miktarlarına karşılık olarak çerçeve kapasitesi tarafından belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında son olarak mevcut bir betonarme binaya sistem kestirimi yapmak amacı ile üçü açık sahada, diğerleri her bir katta üçer adet olmak üzere 15 adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Yapıdan rüzgar altındaki çevre gürültüsü, düşük şiddette bir deprem ve darbe çekici ile verilen dürtüye karşılık veriler alınmış ve sistem dinamik değişkenleri kestirilmiştir.

1.2 Organizasyon

Sunuş yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amaç ve kapsamı verilip, mevcut çalışmalara değinilmiş ve sunuş organizasyonu anlatılmıştır. İkinci kısımda modal deney ve analiz yöntemlerine genel bir giriş yapılarak çalışma kapsamında incelenen teknikler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde incelenen basit sistemler tanıtılıp, uygulanan modal deney ve analiz sonuçları sergilenmiş ve çıkarımlar yapılmıştır. Dördüncü bölümde betonarme çerçevelerin geometri, malzeme, imalat detayları ve deney düzeneği sunulmuş ve sözde statik deney sonuçları sunulduktan sonra sonuçlar irdelenmiştir. Beşinci bölümde betonarme çerçevelerden elde edilen dinamik veriler sunulmuş ve irdelenmiştir. Altıncı bölümde yerinde ölçüm alınan yapı tanıtılmış, ne tip ölçümler alındığı, ölçüm sonuçları ve analizleri ile birlikte sonuçlar irdelenmiştir. Yedinci ve son bölümde ise çalışmanın tamamı

özetlemiş ve sonuçlar toplu olarak olarak sunulduktan sonra gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

MODAL ANALİZ VE DENEY TEKNİKLERİ

2.1 Giriş

Mevcut modal analiz tekniklerinin özümsebilmesi amacıyla yapılacak olan deney verilerini işleyebilecek modal analiz teknikleri seçilmiş, irdelenmiş ve Matlab (2007) yazılımları haline getirilmiştir. Bu kısımda ilk olarak söz konusu tekniklerin teorisi anlatılacaktır. Bu amaçla aşağıda modal analiz konusuna giriş yapıldıktan sonra, modal değişken kestirimi konusu irdelenecek ve seçilen teknikler detaylandırılacaktır. Daha sonra ise modal deney yapılabilmesi için gerekli temel sinyal işleme bilgileri verilip deney tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar tartışılacaktır.

Modal analiz bir sistemin kendine has dinamik özellikleri olan frekans, sönüm ve modal vektörlerini belirleyip bu özellikleri kullanarak sistemin matematiksel bir modelinin kurulması işlemidir. Kurulan matematik model *modal model* ve dinamik özellikler de *modal değişkenler* diye adlandırılır.

Modal analiz temelde doğrusal ve zamanda değişmez sistemlerin (İng., Linear Time Invariant) dinamik tepkilerinin doğal titreşim modları diye adlandırılan bir grup basit harmonik tepkinin doğrusal birleşimi şeklinde gösterilebileceği gözlemine dayanır. Sistemin doğal titreşim modları tamamı ile sistem özelindeki kütle, sıklık (ing. Stiffness), sönme özellikleri ve bunların dağılımı ile şekillenir. Modlar modal değişkenleri ile tanımlanır. Bu değişkenler her bir moda ait modal frekans, sönüm ve karakteristik ötelenme şekli, diğer bir deyişle modal şekildir. Her bir modun toplam titreşime olan katkısı sistemi uyanan yüklemenin özellikleri ve o modun yüklemeye karşı olan tepkisine bağlı olarak ortaya çıkar.

Modal analiz teorik ve deneysel teknikleri içerir. Teorik modal analiz dinamik sistemlerin türevsel denklemlerle tanımlanabilen ve kütle, sıklık, sönüm özelliklerini içeren fiziksel modeller ile hayat bulur (Craig 1981, Clough ve Penzien 1993, Chopra 1995). Denklemlerin çözümleri sistemin frekansları, modal şekilleri, sönüm miktarları ve sistemin dinamik yükleme altındaki tepkisini verir. Sistemlerin karmaşıklığı arttıkça sistemi tanımlayan dinamik denklemleri kurmak imkansız hale gelmese de zorlaşır. Bu noktada sonlu elemanlar yöntemi sistemi tanımlamakta güçlü bir alternatiftir. Bu yöntemde sistemin fiziksel özellikleri ayrıklaştırılıp kütle, sıklık ve sönüm matrisleri haline getirilip, bu matrisler faydası ile sistemi tanımlayan bir türevsel denklemler kümesi meydana getirilir. Doğrusal sistemlerdeki üstdüşüm (İng. superposition) özelliği sayesinde kurulan denklemler kümesi tipik bir özdeğer problemine dönüştürülerek sistem çözülür. Diğer yanda son yirmi yıldır çok büyük gelişmelere sahne olan veri toplama ve işleme becerileri sayesinde dinamik sistemleri modellemek deneysel modal analiz teknikleri ile de mümkün hale gelmiştir.

2.2 Modal Değişken Kestirimi

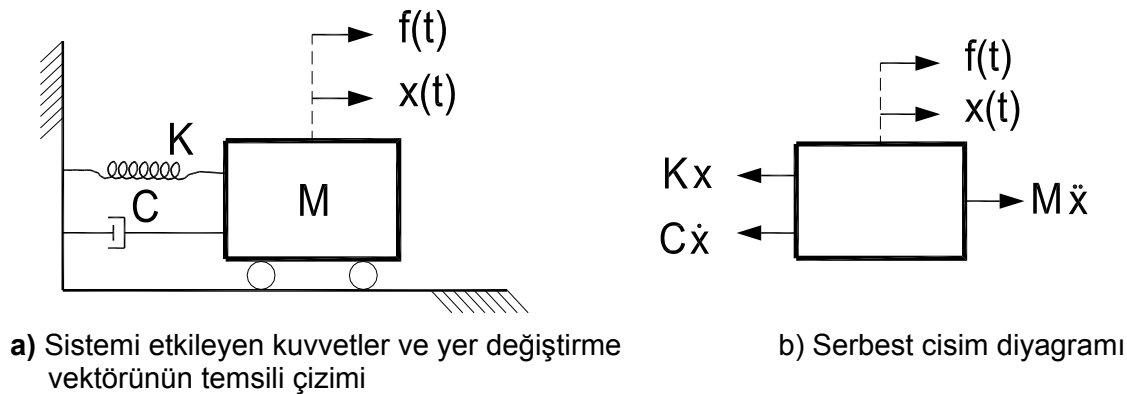
Modal değişken kestirimi incelenen sistemin modal değişkenler tarafından oluşturulan ön bir modelinin bulunduğu özel bir sistem tanımlama vakasıdır. Sistem modeli ölçülen girdi ve çıktılardan etkilenmeden deneysel verileri betimleyen bir model şeklinde; zaman/frekans ve mekansal (girdi ve çıktı serbestlik dereceleri) bilgileri kullanan bir modal model ile tanımlanır. Tipik olarak modal değişken kestiriminde kurulabilen denklem sayısı bilinmeyenlerden çok daha fazla olduğu için her yöntemde kullanılan modal modeli, verilerin nasıl yoğunlaştırıldığı ve ağırlıklandırıldığı, ve kullanıcının becerilerine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Modal deney sonucu kaydedilen veriler frekans tepki ve dürtü yanıt fonksiyonları şeklinde olabileceği için bu verilerin analizi de frekans veya zaman bölgesinde olabilir. Tarihsel olarak modal analiz tekniklerinin gelişimi basit analizlerden karmaşık analizlere doğru bir gelişim göstermiştir. İlk olarak tek serbestlik derecesine (TSD) yönelik çözümler üretilmiştir. Bu yöntemler arasında işleyen vektörler (İng. operating vectors), daire oturtma (İng. circle fit), iki nokta sonlu fark (İng. Two point finite difference), yerel ve genel tek serbestlikli en küçük kareler oturtma ve rasgele azaltım (İng. random decrement) sayılabilir (Allemang III 1999). TSD sistemlere yönelik çözümler eğer sistemin birbirine çok yakın iki kökü yoksa çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümlerinde de aktif olarak kullanılabilirler. TSD'ne yönelik kestirim yöntemleri hakkında detaylı bilgi literatürde mevcut olup bu rapor kapsamında bu yöntemlerine girilmeyecektir. Çok serbestlik derecesine (ÇSD) sahip sistemlerin çözümlerine yönelik yöntemlere de üstel karmaşık (İng. complex exponential), en küçük kareler üstel karmaşık (İng. least squares complex exponential), çok referanslı zaman bölgesi (İng. polyreference time domain), İbrahim zaman bölgesi (İng. İbrahim time domain), özsystem gerçekleştirme algoritması (İng. eigensystem realization algorithm), çok referanslı frekans bölgesi (İng. polyreference frequency domain) ve karmaşık mod gösterge fonksiyonu (İng. complex mod indication function) yöntemleri sayılabilir. ÇSD sistemlere yönelik gelişmiş yöntemler analiz edilen sistemin komple modelini kurdukları için daha derli toplu bir yaklaşım sunar ve aynı zamanda kullanıcı hatalarını en aza indirirler. Birden çok girdi ile çalışabilmeleri sayesinde çok yakın kökleri ayırt edilebilir. Ayrıca gelişmiş yöntemler sistemlerin serbestlik derecesini tanımlama konusunda alternatif araçları bünyelerinde barındırırlar. Bu yöntemler ile ilgili daha detaylı bilgi literatürde mevcuttur (Allemang II 1999, Allemang III 1999, Ewins 2000, He and Fu 2001).

Kestirim algoritmalarını tanıyabilmek ve kullanabilmek amacı ile analiz yöntemlerinden seçilmiş bir kısmı aşağıda tartışılmıştır. Bu amaçla en küçük kareler üstel karmaşık, özsystem gerçekleştirme algoritması ve karmaşık mod gösterge fonksiyonu yöntemleri incelenecektir. Bu kısımda incelenen yöntemlerin işlevlerini doğrulamak amacı ile özellikleri bilinen sentetik veriler ile uygulamaları da yapılacaktır. Üçüncü kısımda aynı yöntemler test verileri içinde uygulanıp sonraki aşamalarda hangi yöntemin kullanılacağı kararlaştırılacaktır.

2.2.1 Temel Titreşim Denklemi ve Frekans Yanıt Fonksiyonu

Bir cismin titreşimini sayısal olarak izleyebilmek için temelde iki farklı yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda sistemin dinamik denge, ikinci durumda da sistemin enerji denklemleri kurularak sistem tanımlanmaktadır. Bu yöntemler ile ilgili detaylı bilgi literatürde (Meirovitch 1967, Craig 1981, Clough ve Penzien 1993, Chopra 1995) mevcuttur. Modal değişken kestirimine esas olan denklemleri ortaya koymak amacı ile bu kısımda sadece dinamik denge denklemi en temel hali ile kurulacaktır.



Şekil 2.1 Tek serbestlik dereceli bir kütle

Tek serbestlik dereceli bir kütlenin hareketini ele alırsak, kütlenin üzerine etkiyen kuvvetler Şekil 2.1.a'da gösterildiği üzere temelde dört farklı temsili kuvvet ile gösterebilir. Bunları cisme dışarıdan etkileyen kuvvetler, kütle sebebi ile oluşan atalet kuvvetleri, sistemi statik denge konumuna taşımaya çalışan dirençler ve hareket dolayısı ile enerji tüketimine yol açan kuvvetler olarak gruplayabiliriz. Şekil 2.1.b'deki kütlenin serbest cisim diyagramını çizer ve buradan denge denklemini yazarsak:

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = f(t) \quad (2.1)$$

burada;

M = Sistemin kütlesi,
 C = Sistemdeki ağıdalı sönüm (İng. viscous damping),
 K = Sistemin sıkılığı,
 $f(t)$ = Genel kuvvet fonksiyonu,
 $x(t)$ = Serbestlik derecesinin yer değiştirme vektörü,
 $\dot{x}(t)$ = Serbestlik derecesinin hız vektörü,
 $\ddot{x}(t)$ = Serbestlik derecesinin ivme vektörü'dür.

Denk. 2.1'den görüldüğü üzere dinamik denge denklemini ikinci dereceden bir diferansiyel denklemdir. Denklem M , C , K değerlerinin sabit olması halinde doğrusal ve zamanda değişmez bir şekil alır.

Yer değiştirme ve hız başlangıç değerleri sıfır olan bir sistem için Denklem 2.1'e Laplace dönüşümü uygulanırsa:

$$[Ms^2 + Cs + K] X(s) = F(s) \quad (2.2)$$

şekline ulaşılır. Burada s kompleks değişkendir, $s = \sigma + j\omega$. Eğer $B(s) = [Ms^2 + Cs + K]$ olarak kabul edilirse Denklem 2.2

$$B(s)X(s) = F(s) \quad (2.3)$$

halini alır. Burada $B(s)$ sistem empedansı olarak adlandırılır. Denklem 2.3 sistem yanıtının, $X(s)$, sistem yük fonksiyonuna, $F(s)$, doğrudan $B(s)$ ile bağlı olduğunu göstermektedir. Eğer sisyem yanıtı ve yük fonksiyonları biliniyorsa $B(s)$ değeri hesap edilebilir.

$$B(s) = \frac{F(s)}{X(s)} \quad (2.4)$$

Daha çok sistemin bir yük fonksiyonu altındaki davranışı hesaplanmak istendiğinden ilişki

$$X(s) = \frac{F(s)}{B(s)} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılır. Eğer $H(s) = \frac{1}{B(s)}$ tanımı kullanılırsa sistemin bir yük fonksiyonuna karşı davranışı:

$$X(s) = H(s)F(s) \quad (2.6)$$

şeklinde yazılır ve burada $H(s)$ transfer fonksiyonu olarak adlandırılır. Başka bir gözle bakılırsa transfer fonksiyonu sisteme verilen dürtünün Laplace dönüşümü ile sistemin yanıtının Laplace dönüşümü arasındaki ilişkidir. Denklem 2.2 ve 2.6 kullanılarak transfer fonksiyonu

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + \left(\frac{C}{M}\right)s + \left(\frac{K}{M}\right)} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Burada oluşturulan kesirin paydası sistem karakteristik denklemi olarak adlandırılır. Bu denklemin kökleri ise aşağıda sunulduğu gibidir.

$$\lambda_{1,2} = -\left(\frac{C}{2M}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \left(\frac{K}{M}\right)} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklem yoluyla transfer fonksiyonu skalar katsayılı iki polinomun birbirine oranı olacak şekilde analitik bir model tanımlanabilir. Tek serbestlik dereceli bir sistem pay da sıfır dereceli payda da ise ikinci dereceden bir polinom ile tanımlanabilir. Burada karakteristik denkleme geri dönerek bir takım tanımlar yapılacaktır. Denklem 2.8'deki karakökün içindeki kısmı sıfır yapan sönüm miktarı kritik sönüm, C_c , olarak tanımlanırsa:

$$\left(\frac{C_c}{2M}\right)^2 - \left(\frac{K}{M}\right) = 0$$

$$\left(\frac{C_c}{2M}\right) = \sqrt{\frac{K}{M}} = \Omega_1 : \text{Sönümsüz sistem doğal frekansı (rad/sn)} \quad (2.9)$$

$$C_c = 2M \Omega_1 : \text{Kritik sönüm katsayısı} \quad (2.10)$$

Sistemlerin sönüm miktarları Denk. 2.10'da tanımlanan sönüm üzerinden yazılırsa kritik sönüm miktarının kesiri veya sönüm oranına, ζ , ulaşılır.

$$\zeta_1 = \frac{C}{C_c} \quad (2.11)$$

Bu son tanımla sistem karakteristik denkleminin kökleri:

$$\lambda_{1,2} = \left(-\zeta_1 \pm j\sqrt{1-\zeta_1^2} \right) \Omega_1 \quad (2.12)$$

olur. Sönüm oranı, ζ , birin altında olan sistemler hafif sönümlü, bir olan sistemler kritik sönümlü, birden büyük olan sistemler ise ağır sönümlü sistemler olarak adlandırılır. Tipik olarak inşaat yapıları hafif sönümlü sistemlerdir. Bu sebeple buradan sonraki kısımlarda hafif sönümlü sistemler göz önüne alınacaktır. Hafif sönümlü sistemler için karakteristik denklemin kökleri aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\lambda_{1,2} = \sigma_1 \pm j\omega_1 \quad (2.13)$$

burada σ_1 : sönüm faktörü (rad/sn) ve ω_1 : sönümlü sistem frekansdır. İlişkide λ_2 'nin λ_1 'in karmaşık eşleniği olduğu gözden kaçmamalıdır. Bu sayede λ_2 'nin yerine λ_1^* 'nin kullanılmasının yolu açılır. Bu son hali ile tek serbestlik dereceli ve hafif sönümlü bir sistem için transfer fonksiyonu

$$H(s) = \frac{1}{\frac{M}{(s-\lambda_1)(s-\lambda_1^*)}} \quad (2.14)$$

şeklini alır.

Transfer fonksiyonu kompleks düzlemde bir yüzey oluşturur, bu yüzeyin $j\omega$ aksında aldığı değerler ise frekans yanıt fonksiyonu (FYF) olarak adlandırılır. Deneysel olarak sistemlerden aslen FYF kayıt edilir. Denk. 2.14 kısmi kesirleri cinsinden yazılırsa

$$H(s) = \frac{A_1}{(s-\lambda_1)} + \frac{A_1^*}{(s-\lambda_1^*)} \quad (2.15)$$

şekline ulaşılır. $F(s)=1$ olan bir sistem için FYF'nuna ters Laplace dönüşümü uygulanırsa sistem dürtü yanıtı (tepki) fonksiyonu elde edilir.

$$\begin{aligned} X(s) &= \frac{A_1}{(s-\lambda_1)} + \frac{A_1^*}{(s-\lambda_1^*)} \\ x(t) &= L^{-1}\{X(s)\} \\ x(t) &= A_1 e^{\lambda_1 t} + A_1^* e^{\lambda_1^* t} = h(t) : \text{Sistem dürtü tepki fonksiyonu} \\ h(t) &= e^{\sigma_1 t} \left[A_1 e^{j\omega_1 t} + A_1^* e^{-j\omega_1 t} \right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

Dürtü tepki fonksiyonunda kalıntı, A_1 , fonksiyonun başlangıç büyüklüğünü, reel üstel fonksiyon sönüm oranını, kompleks üstel fonksiyon ise sistemin titreşim frekansını tanımlar.

2.2.2 En Küçük Kareler Üstel Karmaşık (EKÜK) Yöntemi

Bu teknik ÇSD bir sistemin dürtü tepki fonksiyonu ile karmaşık kutup ve kalıntılarının (İng. poles and residues) üstel karmaşıklar yardımıyla ilişkilendirildiği bir zaman bölgesi çözüm yöntemidir. Sistemin modal değişkenleri ve dürtü tepki fonksiyonu arasında kurulan bağlantı sayesinde bir oto-bağlanım (İng. auto-regressive) modeli kurulur. Bu modelin çözümü kökleri sistemin karmaşık kökleri olan bir polinomun kurulmasını sağlar. Sistemin kökleri (doğal frekansları ve sönüm değerleri) bulunduktan sonra modal vektörlerin tanımlanabilmesi amacı ile sistemin kalıntıları da modal vektörlerin oto-bağlanım modelinden elde edilir. Aşağıda sunulan EKÜK türetiminde He ve Fu'dan (2001) faydalanılmıştır.

EKÜK yöntemi ÇSD bir sistemin transfer fonksiyonu ile başlar:

$$\alpha_{ij}(s) = \sum_{r=1}^N \left(\frac{{}_r A_{ij}}{s - s_r} + \frac{{}_r A_{ij}^*}{s - s_r^*} \right) \quad (2.17)$$

$$\text{veya } \alpha_{ij}(s) = \sum_{r=1}^N \frac{{}_r A_{ij}}{s - s_r} \quad r > N : {}_r A_{ij}^* ; s_r = s_r^* \quad (2.18)$$

burada α_{ij} transfer fonksiyonu, ${}_r A_{ij}$ ve s_r ise sistemin kalıntı ve kutuplarıdır. Görüldüğü üzere transfer fonksiyonu sistemin kutuplarının ve kalıntılarının birleşiminden oluşmaktadır. Transfer fonksiyonunun ters Laplace dönüşümü yapılırsa dürtü tepki fonksiyonu sistemin kutuplarının ve kalıntılarının fonksiyonu olarak elde edilir.

$$h_{ij}(t) = \sum_{r=1}^N {}_r A_{ij} e^{s_r t} \quad (2.19)$$

Eğer dürtü tepki fonksiyonu eş zaman aralıklarına sahip veriler olarak örneklense $k\Delta$ ($k = 0, 1, \dots, 2N$) dürtü tepki fonksiyonu serileri elde edilir.

$$h(k\Delta) = \sum_{r=1}^{2N} {}_r A_{ij} e^{s_r k\Delta} \quad (k = 0, 1, \dots, 2N) \quad (2.20)$$

$$\text{veya } h_k = \sum_{r=1}^{2N} {}_r A_{ij} z_r^k \quad (k = 0, 1, \dots, 2N), \quad z_r^k = e^{s_r k\Delta} \quad (2.21)$$

Dürtü tepki fonksiyonunun bu şekilde sistemin kutupları s_r ve kalıntıları ${}_r A_{ij}$ 'nin karmaşık sayılar olmasına rağmen örnekler h_k reel sayılar şeklindedir. s_r ve ${}_r A_{ij}$ 'nin karmaşık eşleniklerinin birbirlerini götürüleceği göz önüne alındığında bu durum bir çelişki oluşturmaz. Yöntemdeki bir sonraki basamak sistemin kutuplarının ve kalıntılarının örneklenmiş veriden hesaplanmasıdır. Çözüm kutupların s_r (aynı zamanda z_r) eşlenikli olmasının yardımıyla bulunur. Matematiksel olarak z_r 'ler sadece reel katsayılı bir polinomun kökleri olabilirler.

$$\beta_0 + \beta_1 z_r + \beta_2 z_r^2 + \dots + \beta_{2N-1} z_r^{2N-1} + \beta_{2N} z_r^{2N} \quad (2.22)$$

Bu denklem Prony denklemi olarak bilinir. Katsayılar dürtü tepki fonksiyonu örneklerinden elde edilebilir. Denk. 2.21'de $2N+1$ eşitlik olmasından faydalanarak her bir eşitliği karşılık gelen β katsayısı ile çarpar ve bu eşitlikleri toplarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$\sum_{k=0}^{2N} \beta_k h_k = \sum_{k=0}^{2N} \beta_k \sum_{r=1}^{2N} A_{ij} z_r^k \quad (2.23)$$

$$\text{veya } \sum_{k=0}^{2N} \beta_k h_k = \sum_{r=1}^{2N} A_{ij} \sum_{k=0}^{2N} \beta_k z_r^k \quad (2.24)$$

Denk. 2.22'deki polinomda z_r 'ların polinomun kökleri olması durumunda polinomun değerinin sıfıra eşit olacağı açıktır. Bu durum β katsayıları ile sistem dürtü tepki örnekleri arasındaki bağlantıyı verir.

$$\sum_{k=0}^{2N} \beta_k h_k = 0 \quad (2.25)$$

Bu denklem β katsayılarını kestirecek bir yol sağlar. Denk. 2.22'de β_{2N} katsayısının değeri bir olarak tanımlanabilir. Bu durumda $2N$ örneğe sahip bir dürtü tepki fonksiyonu alınarak denklem 2.25 vasıtası ile β katsayıları için doğrusal bir denklem kurulabilir. Eğer $2N$ takım $2N$ dürtü tepki fonksiyonu örneği alınırsa $2N$ doğrusal denklem elde edilir. Böylece β katsayıları bu denklemler takımından elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & \cdots & h_{2N-1} \\ h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{2N-1} & h_{2N} & h_{2N+1} & \cdots & h_{4N-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{2N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h_{2N} \\ -h_{2N+1} \\ \vdots \\ -h_{4N-1} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Ardışık ve eşit aralıklarla örneklenmiş olmak şartı ile dürtü tepki fonksiyonu örnekleri istenilen şekilde alınabilir. Denklem sistemindeki hiç bir satır aynı h değerlerine sahip olmamalıdır. En küçük kareler çözümü yapabilmek için gerekenden fazla sayıda denklem takımı kullanılabilir.

β değerleri bulunduktan sonra Denk. 2.22 z_r değerlerini bulabilmek amacıyla çözülebilir. Bu değerler üzerinden sistemin karmaşık doğal frekansları s_r Denk. 2.21 vasıtası ile çözülür. Sistemin karmaşık doğal frekansları s_r ile sönümlenmemiş doğal frekanslar ω_r ve sönüm oranları arasındaki ilişki aşağıda verildiği gibidir.

$$s_r = -\zeta_r \omega_r + j\sqrt{1-\zeta_r^2} \omega_r \quad (2.27)$$

$$s_r^* = -\zeta_r \omega_r - j\sqrt{1-\zeta_r^2} \omega_r \quad (2.28)$$

Bu ilişkilerden sistemin sönümlenmemiş doğal frekansını ve sönüm oranını türetebilir:

$$\omega_r = \frac{1}{\Delta} \sqrt{\ln(z_r) \ln(z_r^*)} \quad (2.29)$$

$$\zeta_r = \frac{-\ln(z_r z_r^*)}{2\omega_r \Delta} \quad (2.30)$$

Sistemin modal şekilleri kalıntıları kullanarak tanımlanır (Allemang-1,99). Sistem kalıntıları bulabilmek amacı ile Denk. 2.21 yeniden düzenlenerek aşağıdaki şekilde kullanılır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & z_3 & \cdots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{2N-1} & z_2^{2N-1} & z_3^{2N-1} & \cdots & z_{2N}^{2N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_1 A_{ij} \\ {}_2 A_{ij} \\ \vdots \\ {}_{2N} A_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{2N-1} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

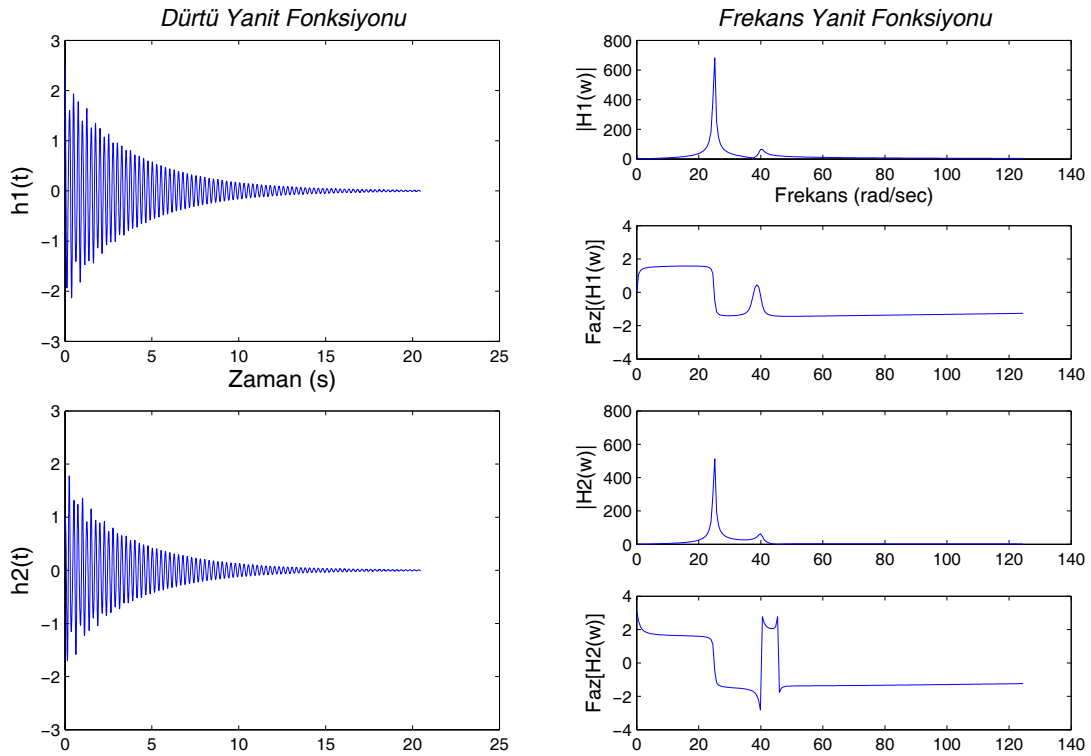
EKÜK türetiminin Matlab yazılımına dökülmüş hali Ek A.1: Yazılım 1'de sunulmuştur. Yöntemi sınavabilmek amacı ile aynı yazılımın içinde 2 serbestlik dereceli bir sistemin de tanımı yapılmıştır. Sentetik sistemi tanımlayabilmek amacıyla doğrusal ve zamanla değişmez sistemlerin zaman uzayında üstel olarak sönümlenen harmoniklerin toplamı olarak tanımlanabildiği gerçeği kullanılmıştır. Sistemdeki serbestlik derecesi sayısında harmonik kullanılması gerekmektedir. Bu sayede sistemlerin dürtü yanıtları doğrudan zaman uzayında tanımlanabilir. Dürtü yanıtlarına doğrudan erişilmesi ile gürültüsüz sentetik veriler ile zaman uzayı bilgilerini kullanan EKÜK algoritması sınavabilir. r serbestlik dereceli bir sistem için dürtü yanıtı Denk. 2.32 ile tanımlanır.

$$h_{ij}(t) = \sum_r {}_r A_{ij} e^{s_r t} + {}_r A_{ij}^* e^{s_r^* t} \quad r = 1, \dots, N \quad (2.32)$$

${}_r A_{ij}$ ve ${}_r A_{ij}^*$ sistemin r modunun kalıntıları olup birbirlerinin eşleniğidirler. N sistemin serbestlik derecesidir. i indisi girdi, j indisi ise çıktı noktasıdır. Sistemin kökleri ise,

$$s_r = -\zeta_r \omega_r + j\sqrt{1 - \zeta_r^2} \omega_r; \quad s_r^* = -\zeta_r \omega_r - j\sqrt{1 - \zeta_r^2} \omega_r. \quad (2.33)$$

Burada ω_r sistemin sönümlenmemiş doğal frekansları, ζ_r ise sönüm katsayılarıdır. Keyfi bir seçimle doğal frekansları $\omega_1=25$ rad/sec ve $\omega_2=40$ rad/sec, sönüm katsayılarını $\zeta_1=0.01$ ve $\zeta_2=0.02$, modal vektörleri ise $\psi_1^T=(1.0 \ 0.75)$ ve $\psi_2^T=(.25 \ -0.25)$ olan bir sistem kurarsak dürtü ve frekans yanıtları Şekil 2.2 deki gibi olan bir sistem elde etmiş oluruz.



Şekil 2.2 Yaratılan sentetik fonksiyonunun dürtü ve frekans yanıtları

Yazılım 1'in işletilmesi sonucu:

```

Frekanslar =
25.0000 25.0000 40.0000 40.0000

SonumOranlari =
0.0100
0.0100
0.0200
0.0200

ModalSekilBuyuk =
1.0000 0.7500
1.0000 0.7500
0.2500 0.2500
0.2500 0.2500

ModalSekilFaz =
0.0001 0.0001
-0.0001 -0.0001
-0.0000 180.0000
0.0000 -180.0000

```

sonuçları elde edilerek sistemin değişkenleri doğru olarak tanımlanmaktadır. EKÜK algoritmasının kullanılması sırasında dikkatli olunması gereken bazı noktalar vardır. Algoritmanın hassasiyetini arttırmak amacı ile sisteme beslenen verilerin zaman aralığının sistemin köklerinin birden fazla döngü yapmasına fırsat verecek uzunlukta olması gerekmektedir. Ayrıca tek girdi çok çıktı verilerini sisteme beslemek de hassasiyeti arttırmaktadır. Elde edilen sonuçlar EKÜK yönteminin gürültüsüz sentetik veriler ile başarılı olarak işlediğini göstermiştir.

Yöntemin gürültülü bir sentetik veri ile nasıl çalıştığını sınamak amacı ile durum-uzay formülasyonu kullanılarak yeni bir sentetik veri seti hazırlamak için ilk olarak durum-uzay formülasyonu türetilecek ve daha sonra değişkenlere keyfi değerler seçilerek yeni veri seti oluşturulacaktır.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \ddot{h}(t) \\ \dot{h}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_1 & -A_0 \\ I & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} M^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.34)$$

burada $A_1=M^{-1}C$ ve $A_0=M^{-1}K$ 'dır. M , C , K sırası ile doğrusal mekanik bir sistemin kütle, sönüm ve sıkılık matrisleridir.

$$y = h(t) = [0 \quad I]x \quad (2.35)$$

Çıktı olarak yer değiştirme vektörü alınmıştır. Durum-uzay denklemi, gözlem denkleminin de eklenmesi sonucu, Denk. 2.36'da verilen durumu alır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.36)$$

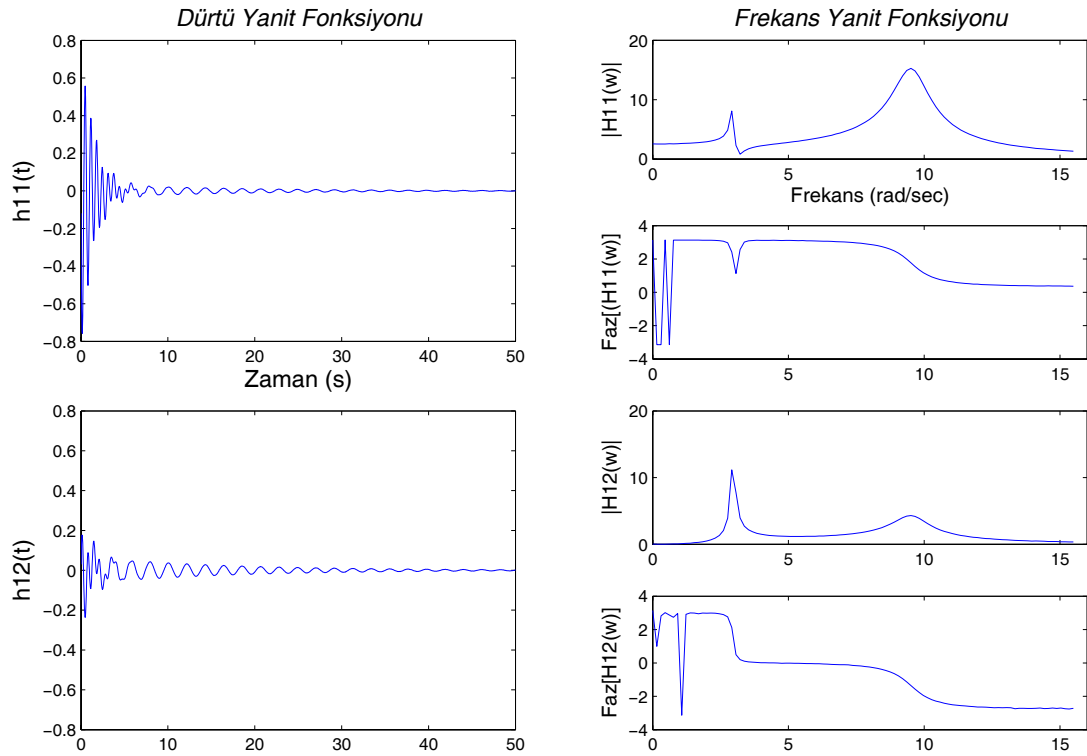
Durum-uzay denkleminin çözülmesi ile denklem 2.37'de verilen transfer fonksiyonu elde edilir.

$$H(s) = C[sI - A]^{-1} B \quad (2.37)$$

Durum-uzay formülasyonunu kullanarak algoritmalarda kullanılacak veriler yaratmak için M , C ve K matrisleri aşağıda verildiği şekilde tanımlanırsa,

$$M = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 12 & -6 \\ -6 & 6 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 800 & -400 \\ -400 & 400 \end{bmatrix}$$

doğal frekansları $\omega_1=2.96$ rad/sec ve $\omega_2=9.55$ rad/sec, sönüm katsayıları $\zeta_1=0.022$ ve $\zeta_2=0.072$, modal vektörleri ise $\psi_1=(0.56 \quad 1.0)^T$ ve $\psi_2=(1.0 \quad -0.28)^T$ olan bir sistem elde edilir. Bu sisteme ayrıca dürtü yanıtının en büyük değerinin %1 rasgele gürültü eklenirse dürtü ve frekans yanıtı grafikleri Şekil 2.3'deki sunulan sistem elde edilir.



Şekil 2.3 Durum-uzay formülasyonu ile yaratılan sistemin yanıt grafikleri

Oluşturulan yeni sistemin EKÜK yöntemi ile çözülmesi sonucu elde edilen sistem değişkenleri:

```

Frekanslar =
  2.9618  2.9618  9.5504  9.5504

Sonum_Oran =
  0.0231  0.0231  0.0717  0.0717

ModalSekilBuyuk =
  0.5621  1.0000
  0.5621  1.0000
  1.0000  0.2813
  1.0000  0.2813

ModalSekilFaz =
  92.3329  92.4087
 -92.3329 -92.4087
  98.3328 -81.7573
 -98.3328  81.7573
  
```

Elde edilen değişkenler sisteme katılan gürültü sebebi ile gürültüsüz sentetik sistemdeki gibi sistemin modal değişkenleri için tam uyumlu rakamlara ulaşılmamış, beklenen şekilde sonuçlarda ufak sapmalar oluşmuştur.

2.2.3 Öz Sistem Gerçekleştirme Algoritması (ÖGA) Yöntemi

ÖGA yönteminde temel düşünce kontrol kuramının en küçük gerçekleştirme konseptini bir deneysel yapının öz analiz parametrelerini kendisinin dürtü yanıtından elde etmek için kullanmaktır (Lu 1999, Juang 1985). Tekil Değer Ayrıştırması (TDA, İng. Singular Value Decomposition) yöntemiyle sistem değişkenleri gürültüden arındırılarak daha doğru kestirim yapılmaktadır. Öz analizin yapılmasından sonra, buna uyumlu olarak modal değişkenler bulunabilmektedir. Ho-Kalman yöntemini geliştiren bu yaklaşımla birim dürtü girişi uygulandığında sistemin çıkışını taklit eden en küçük gerçekleştirme yapılmaktadır. Daha sonra ÖGA da geliştirilerek gürültü ve yapısal doğrusal-olmayan unsurlarla daha üstün başarımlar gösteren veri ilintili ÖGA (Vİ-ÖGA, İng. ERA with Data Correlations, ERA/DC) önerilmiştir (Juang 1988).

ÖGA'da izlenen yöntem kısaca ölçülen sistem dürtü yanıtı verisine TDA uygulayarak bir test yapısının başlıca serbestlik dereceleri ile yapının durum-uzam gösterimindeki sistem matrisi (durum geçiş matrisi) A 'yı, girdi matrisi B 'yi ve çıktı matrisi C 'yi belirlemeye çalışmaktadır. Daha sonra sistem matrisi A , yapının modal değişkenleri bir özdeğer çözümüyle bulunurken kullanılmaktadır. Enküçük gerçekleştirme ise A , B ve C olabilecek en küçük boyutlarıyla oluşturulduğunda sağlanmaktadır. Böylece gerçekleştirilen sistem ise kontrol edilir ve gözlemlenir olmaktadır.

Vİ-ÖGA ve ÖGA yöntemlerini açıklamak için ÖGA'nın ilkinin özel bir durumu olarak gösterilebileceğini de bildiren ve Vİ-ÖGA yönteminin önerildiği (Juang 1988)'deki anlatımı yakın olarak takip edilmiştir.

Verilen durum denklemlerinin özel bir çözümü Markov değişkeni olarak da bilinen dürtü yanıtı fonksiyonudur (sıfır başlangıç durumu):

$$Y(k) = CA^{k-1}B, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.38)$$

Burada $Y(k)$, kolonları m adet girişin dürtü yanıtları olan $(l \times m)$ boyutlu bir matrisdir. Benzer şekilde başlangıç durumu yanıtı için de bir çıkış ifadesi yazılabilir. Verilen sistemin enküçük gerçekleştirme $Y(k)$ sistem çıkışı gözlemlendiğinde A 'nın derecesi en küçük olacak şekilde durum denklemleri matrisleri A , B ve C 'nin oluşturulmasıdır. Hem ÖGA, hem de Vİ-ÖGA yönteminde ilk olarak $(\xi + 1) \times (\eta + 1)$ boyutlu genelleştirilmiş Hankel matrisi, gözlemlenen veri kullanılarak oluşturulur (Juang88):

$$H(k+1) = \begin{bmatrix} Y(k) & Y(k+t_1) & \dots & Y(k+t_\eta) \\ Y(s_1+k) & Y(s_1+k+t_1) & \dots & Y(s_1+k+t_\eta) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y(s_\xi+k) & Y(s_\xi+k+t_1) & \dots & Y(s_\xi+k+t_\eta) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Burada $\{s_j, j = 1, 2, \dots, \xi\}$ ve $\{t_i, i = 1, 2, \dots, \eta\}$ herhangi tamsayılarıdır.

$$V_\xi = \begin{bmatrix} C \\ CA^{s_1} \\ \vdots \\ CA^{s_\xi} \end{bmatrix} \quad W_\eta^T = \begin{bmatrix} B \\ A^{t_1}B \\ \vdots \\ A^{t_\eta}B \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

şeklinde $(\xi + 1)l \times n$ boyutlu gözlemlenebilirlik matrisi V_ξ 'yi ve $\eta \times (\eta + 1)m$ boyutlu denetlenebilirlik matrisi W_η 'yi tanımladığımız takdirde, 2.39'deki blok veri matrisini

$$H(k) = V_\xi A^k W_\eta \quad (2.41)$$

şeklinde gösterebiliriz. Burada $(.)^T$ operatörü matrisin devriğini almaktadır. Bu aşamadan sonra standart ÖGA yöntemi blok veri matrisi $H(0)$ 'ı kullanmakta iken Vİ-ÖGA yönteminde $\gamma = (\xi + 1)l$ kerteli kare ilinti matrisi

$$R(q) = H(q)H^T(0) = V_\xi A^q W_\eta W_\eta^T V_\xi^T = V_\xi A^q W_c \quad (2.42)$$

oluşturulmaktadır. Daha sonra $(\alpha + 1) \times (\beta + 1)$ blok ilinti matrisi

$$\begin{aligned} U(q) &= \begin{bmatrix} R(q) & R(q+r) & \cdots & R(q+\beta r) \\ R(q+r) & R(q+2r) & \cdots & R(q+(1+\beta)r) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R(q+\alpha r) & R(q+(\alpha+1)r) & \cdots & R(q+(\alpha+\beta)r) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} V_\xi \\ V_\xi A^r \\ \vdots \\ V_\xi A^{\alpha r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_q W_c & A^{q+r} W_c & \cdots & A^{q+\beta r} W_c \end{bmatrix} \\ &= V_\alpha W_\beta \end{aligned} \quad (2.43)$$

şeklinde oluşturulur. Burada q tamsayısı veri gürültülü olduğunda yanlılığa yol açmayacak ve r tamsayısı ise komşu R bloklarının önemli ölçüde örtüşmemesini sağlayacak şekilde seçilir. V_α ve W_β , $(\alpha + 1)\gamma \times n$ ve $n \times (\beta + 1)\gamma$ boyutlu blok ilinti gözlemlenebilirlik ve denetlenebilirlik matrisleridir. Daha sonra Vİ-ÖGA yönteminde blok ilinti matrisi $U(q)$ 'ya (ÖGA'da ise $H(0)$ 'a)

$$U(q) = PDQ^T \quad (2.44)$$

şeklinde TDA uygulanır. Burada $(\alpha + 1)\gamma \times n$ boyutlu P 'nin ve $(\beta + 1)\gamma \times n$ boyutlu Q 'nun kolonları birimdik olup tekil vektörleri, $n \times n$ boyutlu köşegen matris D ise $U(q)$ 'nin n adet tekil değerini içermektedir. $U(q)$ matrisinin sözde evriği ise

$$U^\otimes = QD^{-1}P^T \quad (2.45)$$

şeklinde bulunur ve

$$W_\beta U^\otimes V_\alpha = I_n \quad (2.46)$$

olur . Burada I_n , n boyutlu birim matrisi göstermektedir. (Juang 1985)'tekine benzer bir türetim sonucunda, 2.42-2.46 kullanılarak enküçük (ya da indirgenmiş) kerteli n boyutlu bir gerçekleştirme şu şekilde yapılabilir (Juang 1988):

$$\begin{aligned} R(q+j) &= E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} U(q+j) E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma}^T = E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} V_\alpha A^j W_\beta E_{\gamma,(\beta+1)\gamma}^T \\ &= E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} V_\alpha [W_\beta U^\otimes V_\alpha] A^j [W_\beta U^\otimes V_\alpha] W_\beta E_{\gamma,(\beta+1)\gamma}^T \\ &= E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} P D^{\frac{1}{2}} \left[D^{-\frac{1}{2}} P^T V_\alpha A^j W_\beta Q D^{-\frac{1}{2}} \right] D^{\frac{1}{2}} Q^T E_{\gamma,(\beta+1)\gamma}^T \\ &= E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} P D^{\frac{1}{2}} \left[D^{-\frac{1}{2}} P^T U(q+1) Q D^{-\frac{1}{2}} \right]^j D^{\frac{1}{2}} Q^T E_{\gamma,(\beta+1)\gamma}^T \end{aligned} \quad (2.47)$$

Burada, $\theta_{n,m}$ ile $n \times m$ boyutlu sıfır matrisinin gösterilmesiyle $E_{n,n+m} = [I_n \ \theta_{n,m}]$ şeklinde tanımlanmıştır. Vi-ÖGA gerçekleştirilmesinin temelini 2.47 oluşturmaktadır. 2.42'den yararlanarak $R(q+j)$ 'yi

$$R(q+j) = V_\xi A^j (A^q W_c) \quad (2.48)$$

şeklinde yazarsak 2.47'de bulunan

$$\left[D^{-\frac{1}{2}} P^T U(q+1) Q D^{-\frac{1}{2}}; D^{\frac{1}{2}} Q^T E_{\gamma,(\beta+1)\gamma}^T; E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} P D^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.49)$$

üçlününün $[A; A^q W_c; V_\xi]$ 'nin bir en küçük gerçekleştirilmesi olduğunu görebiliriz. 2.40 ve 2.41'deki tanımlamalarla son ifadeler karşılaştırıldığında, çıkış matrisi C 'nin V_ξ 'nin ilk l satırını, giriş matrisi B 'nin ise W_η 'nin ilk m kolonunu oluşturduğu görülebilir. Böylece $[A; B; C]$ üçlüsü

$$\left[D^{-\frac{1}{2}} P^T U(q+1) Q D^{-\frac{1}{2}}; D^{-\frac{1}{2}} P^T E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma}^T H(0) E_{m,(\eta+1)m}; E_{l,(\alpha+1)\gamma} P D^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.50)$$

olarak yazılabilir. Burada gerçekleştirilen durum geçiş matrisi A 'nın özanalizi

$$\Psi^{-1} \left[D^{-\frac{1}{2}} P^T U(q+1) Q D^{-\frac{1}{2}} \right] \Psi = Z$$

şeklinde gösterildiğinde sistemin modal sönüm oranları ve sönümlü doğal frekanslar (Juang85)'te olduğu gibi z-uzamından s-uzamına

$$s_n = [\ln z_n + i2\pi k] / \Delta; \quad i = \sqrt{-1} \quad (2.51)$$

bağıntısıyla geçiş sonrasında özdeğerlerin gerçel ve sanal kısımlarından oluşurlar. Burada Δ örnekleme aralığı, k bir tamsayıdır, z_n ise \mathbf{Z} özdeğer matrisinin köşegeni üzerindeki n 'inci elemandır. 2.47'nin incelenmesiyle modal şekiller ve modal genliklerin başlangıç değerleri,

$$E_{\gamma,(\alpha+1)\gamma} PD^{\frac{1}{2}} \Psi \text{ ve } \Psi^{-1} D^{\frac{1}{2}} Q^T E_{\gamma,(\beta+1)\gamma}^T \text{ olarak bulunur.}$$

Ana hatlarıyla anlattığımız ÖGA'nın özünde sistemin dürtü yanıtı ölçümlerine bir en küçük karelerle uydurma, Vİ-ÖGA'nın ise verinin ilinti dizisine uydurma olduğunu söyleyebiliriz. Vİ-ÖGA, $q=\alpha=\beta=0$ olarak seçildiği ve $(\xi+1) \geq n$ koşulu sağlandığında ÖGA'ya indirgenmektedir. Çünkü ÖGA gösterimi $\mathbf{H}(0)$ matrisi yerine $\mathbf{R}(0) = \mathbf{H}(0) \mathbf{H}(0)^T$ ilinti matrisi ile de yapılabilir.

ÖGA türetiminin Matlab yazılımına dökülmüş hali Ek A.1: Yazılım 2'de sunulmuştur. Bölüm 2.2.2 yaratılan sentetik verilerin ÖGA yöntemi ile işlenmesi sonucu, gürültüsüz veriler için:

Frekanslar =			
25.0000			
25.0000			
40.0000			
40.0000			
SonumOran =			
0.0100			
0.0100			
0.0200			
0.0200			
ModalSekilBuyuk =			
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.7500	0.7500	1.0000	1.0000
ModalSekilFaz =			
0	0	0	0
-0.0000	0.0000	-180.0000	180.0000

sonuçları elde edilmiştir. Yöntem sistem değişkenliklerini doğru olarak hesaplamaktadır. Gürültü eklenmiş ikinci sentetik sistem için yöntem kullanıldığında:

Frekanslar =			
2.9618	2.9618	9.5504	9.5504
Sonum_Oran =			
0.0231	0.0231	0.0717	0.0717
ModalSekilBuyuk =			
0.5621	1.0000		
0.5621	1.0000		
1.0000	0.2813		
1.0000	0.2813		

ModalSekilFaz =
92.3329 92.4087
-92.3329 -92.4087
98.3328 -81.7573
-98.3328 81.7573

sonuçları elde edilmiştir. Sistemin değişkenleri faz değerleri hariç doğru olarak tanımlanmaktadır. Faz değerlerinin işaretleri doğru olmak ile beraber açılarda tanımlanan oranlı sönümlü (*İng.* Proportional Damping) sistemin sahip olması gereken 0, 90 veya 180 dereceden bir miktar sapma vardır.

2.2.4 Karmaşık Mod Gösterge Fonksiyonu (KMGF)

Çalışmamızda KMGF yöntemi EKÜK ve ÖGA yöntemleri gibi yazılım haline getirilmeyip Cincinnati Üniversitesi'nden elde edilen yazılım (X-Modal) doğrudan kullanılmıştır. Bu kısımda yöntemin teorik tabanı incelenecek, uygulama detaylarından nasıl ve hangi durumlarda işlediği açıklanacak ve hazır yazılımın kullanımına bir taban oluşturulacaktır. Devamda sunulacak olan bilgiler (Allemang-II 1999)'den uyarlanmıştır.

KMGF yöntemi oluşumunun başlangıcında çok yakın köklere sahip sistemlerin yeterli mod sayısını tanımlamak amacı ile türetilmiştir. KMGF yöntemi ile reel veya karmaşık modlar ve her bir modun göreceli büyüklükleri, modal vektörü ve katılım katsayıları hesaplanabilir. Bu yöntemin esası sistemin FYF'lerinin her bir spektral çizgisine karşılık oluşturulan normal matrislerin özdeğerlerinin bulunmasına dayanır. Normal matris FYF matrisinin kendisinin Hermit matrisi ile $[H(\omega)]^H [H(\omega)]$ şeklinde çarpımı ile bulunur. KMGF her bir normal matrisden elde edilen özdeğerlerinin her bir frekans değerine karşılık logaritmik ölçek ile çizdirilmesi ile elde edilir. KMGF çizimlerindeki zirve değerleri bir modun varlığını ve zirvenin frekans değeri ise o modun sönümlü frekans değerini verir. KMGF analizinde tanımlanan modlar işlenen sistemin algoritma için gerekli olan minimum sistem serbestlik derecesini tanımlar. Kalıntı ve gürültülerin icabına bakmak için fazladan bir kaç serbestlik derecesine de gerek duyulabilir. Normal matris

$$[H(\omega)]^H [H(\omega)] = [V(\omega)] [\Lambda(\omega)] [V(\omega)]^H \quad (2.52)$$

şekinde yazılabilir. Ayrıca FYF matrisinin her bir değerdeki tekil değer ayrışımı yapılarak 2.52'ye benzer şekilde bir ifade elde edilir:

$$[H(\omega)] = [U(\omega)] [\Sigma(\omega)] [V(\omega)]^H \quad (2.53)$$

burada;

$[U(\omega)]$ $N_o \times N_e$ boyutlarına sahip sol tekil birimcil matrisi (*İng.* left singular unitary matrix),

$[\Lambda(\omega)]$ $N_d \times N_e$ boyutlarına sahip köşegen özdeğer matrisi,

$[\Sigma(\omega)]$ $N_e \times N_e$ boyutlarına sahip köşegen tekil değer matrisi,

$[V(\omega)]$ $N_d \times N_i$ boyutlarına sahip sağ tekil birimcil matrisidir.

N_e etkili mod sayısı ve etkili modlar ise söz konusu ω değeri için sistemin tepkisine katkıda bulunan modlardır.

Genellikle uyarı noktalarının (referans noktaları) sayısı, N_i , yanıt noktalarının sayısından, N_o , azdır. Denklem 2.53'de, eğer etkili modların sayısı FYF matrisinin en küçük buyutuna eş yada küçükse, $N_e \leq N_i$, tekil değer ayrışımı yaklaşık modal şekil ve katılım katsayılarına ulaşılır. Bu durumda tekil değer ölçek katsayısının, Q , ayırık frekans ve modal frekansın farkına, $j\omega - \lambda_r$, bölünmesine eşittir. Ölçek katsayısı sabit olduğu için herhangi bir modal frekansa karşılık gelen frekans değeri ayırık frekansa yaklaştıkça tekil değerlerin büyüklüğü artacaktır. Bu sebeple herhangi bir moda karşılık gelen frekans değeri tekil değerlerin en yüksek değerine karşılık gelecektir. Farklı modlar karşılaştırıldığında tekil değeri büyük olan modun modal katkısı da daha büyük olacaktır.

2.3 Deneysel Modal Analiz

Başarılı bir modal değişken kestirimi için öncelikli şartlardan birisi dikkatli tasarlanmış bir deney sistemidir. Elde edilecek sonuçların sinyal işleme, kalibrasyon, elektronik gürültü ve ölçüm hatalarına olan hassasiyetinden dolayı deneyin uygun şekilde tasarlanıp uygulanması çok önemlidir. Modal deneylerin tasarımında beş önemli kısım vardır. Bunlar test ekipmanlarının seçimi, veri edinim değişkenleri, sisteme girdi ve çıktılarının (çalışma dahilindeki uygulamalarda ivmeölçer ve darbe uyarılarının) yeri ve sayısı, algılayıcıların kalibrasyonu ve modal analizin temel varsayımlarının kontrol edilmesidir.

Deney tasarımı amacı ile ölçüm yapılacak sistemin bir takım özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla ön ölçümler yapılır. En başta sistemin temel modal analiz varsayımlarına uygunluğunun belirlenmesi amacı doğrusallık ve zamanda değişmezlik hakkında karar verilir. Yine ön ölçümleri kullanarak tetikleme şiddeti, ortalama sayıları, kayıt süreleri, frekans çözünürlükleri ve aralıkları saptanır. En son olarak ise ölçüm yapılacak noktaların yeri ve sayısı saptanır. Bu amaçla farklı bir kaç noktadan ön ölçüm yapılması gerekir.

Bu kısımda deney tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar anlatılacaktır.

2.3.1 Modal Deney Tasarımı

Bu başlık altında aktarılacak olan bilgiler ağırlıklı olarak Allemang (1999), Ewins (2000) ve Fe ve Yu (2001) kaynaklarından derlenerek oluşturulmakla birlikte çalışma kapsamındaki deneyler sırasında yapılan gözlemleri de içermektedir. Sırasıyla algılayıcılar, veri edinim sistemi, ölçüm yapılacak noktaların yerinin ve sayısının saptanması, algılayıcıların kalibrasyonu ve modal analizin temel varsayımlarının kontrol edilmesi konuları irdelenecektir.

Algılayıcılar: Sistemlerin fiziksel tepkileri algılayıcılar tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülerek ölçülebilecek hale getirilir. Çalışma kapsamındaki deneylerde iki tip fiziksel tepki ölçülmektedir: İvme ve kuvvet. Bu amaçla kullanılacak olan algılayıcıların ölçümü yapılacak olan sisteme uygun olması gerekir. Algılayıcıların modal deneyler için en önemli özellikleri hassasiyet, kütle ve ölçüm yapabildiği frekans aralığıdır. Yapılan deneye bağlı olarak başka bir takım özellikler de önem kazanabilir. Algılayıcı ölçüm yapılacak sistemin özelliklerine büyük bir etki yapmadan üzerine bağlanabilecek ve okuma kapsamı sistemin özelliklerini içerecek şekilde seçilmelidir. Çalışma kapsamındaki deneyler tipik olarak düşük ve orta büyüklükte frekanslarda ölçümler ihtiva ettiği için ölçümlerde genel amaçlı, piezoelektrik kristalli ivmeölçerler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üç çeşit ivmeölçer kullanılmıştır. Bunlar PCB-333B42, PCB-356A16 ve PCB-393B04 ivmeölçerlerdir. Bu cihazlar 0.05Hz-5000Hz frekans aralığında 100mV/g-1000mV/g hassasiyetlerinde ölçümlere izin vermektedirler. A16 ve B42'i 7.5 gr B04 ise 50 gram ağırlığındadır. Bu cihazlar hafiflikleri sayesinde ölçüm yapılacak sistemde kayda değer değişiklikler yaratmamaktadırlar. Sisteme dürtüyü verebilmek amacı ile deneylerde darbe çekici kullanılmıştır. Bu amaçla hafif sistemlerde PCB-086C04 darbe çekici kullanılmıştır. Normal kütlesi 160 gr'dır. İstenilmesi

durumunda 75 gr'lık ek kütlesi mevcuttur. Çekiç dört değişik uç vasıtası ile 8kHz'e kadar olan aralıkta 1.1mV/N hassasiyetinde ölçümler yapabilmektedir. Ağır sistemlerde ise kendi imalatımız olan seçilen bir kütle ve ona bağlı bir ivmeölçerden oluşan darbe kütleleri kullanılmıştır. Bu amaçla 12 kgf ve 92.6 kgf ağırlıklarında kütleler oluşturulmuş ve bu kütlelere 100mV/g hassasiyete sahip +/- 50g kapasitesinde bir ivmeölçer bağlanmıştır. Ağır çekiçler için 0-300Hz ve 0-100Hz aralığını uyarabilen plastik uçlar kullanılmıştır.

Veri Edinim Sistemi: Algılayıcılar ile uyumlu olarak deneylerde NI-SCXI veri edinim modülleri kullanılmıştır. Bu amaçla 16 bitlik çözünürlüğe ve 200 kS/s multiplex veri kayıt hızına sahip SCXI-1600 analog/sayısal dönüştürücü (ADC) ve algılayıcıları besleyebilen ve geri gelen sinyalleri 1,10 ve 100 kazançlar sağlayarak ADC'ye yönlendiren SCXI-1531 ivmeölçer sinyal düzenleyicisi kullanılmıştır. Bu sistemin seçiminde kritik olan noktalar ADC'nin hız ve çözünürlüğü, sinyal düzenleyicisinin kazanç oranlarıdır. En küçük ayarlanabilir kesim frekansı sinyal düzenleyicideki alçak geçiren filtrelerde önemli olan diğer bir özelliktir. Elimizdeki sistemde alçak geçiren filtrenin ayarlanabilir en küçük kesim frekansı 2.5 kHz'dir. Bu değer ölçüm çalışmanın tipik ölçüm aralığı olan 0-1kHz aralığından büyük olduğu için alınan veriler sinyal işleme sırasında sayısal bir alçak geçiren filtreye tabii tutulmuştur. Veri edinim sisteminin kontrolü ve sayısal hale getirilen verilerin kayıt edilmeden önce istenilen şekilde işlenmesi LABVIEW 8.0 (2005) programı ile yapılmıştır. LABVIEW bir takım sinyal işleme kapasitelerine sahip olmak ile beraber deneysel veriler ham olarak kayıt edilip modal analiz çalışması MATLAB (2007) programı vasıtası ile yürütülmüştür.

Ölçüm Yapılacak Noktaların Yerinin ve Sayısının Saptanması: Deney tasarımının en önemli kısımlardan biridir. Öncelikli olarak sistem ve ölçüm serbestlik dereceleri kavramlarının anlaşılması gerekir. Bir sistemin serbestlik derecesi sistemin herhangi bir anda kütlelerinin tamamının pozisyonunu tanımlamaya yetecek bağımsız koordinat sayısı olarak tanımlanır. Teorik olarak yayılı bir kütleyle sahip bir sistemin sonsuz sayıda serbestlik derecesi vardır. Pratikte bir ölçüm yapabilmek için teorik olarak sonsuz olan serbestlik derecesi için bir sınırlama getirmek gerekir. İlk sınırlama ölçüm yapılacak frekans aralığının belirlenmesi ile getirilir. Yapılan ölçüm sadece bu frekans aralığındaki sistem modlarını tanımlayabilecektir. Bu aralık iki türlü tanımlanabilir. Birinci yöntemde frekans aralığının belirlenmesi için frekans yanıt fonksiyonundaki (FYF) zirve sayısı (olası mod frekansları) baz alınır ve bu sayede ölçülmek istenilen tahmini mod sayısı tanımlanır. İkinci yöntemde ise sistemin sonlu elemanlar modeli kurulup elde edilmek istenilen modların tahmini frekans aralığı saptanır.

Ölçüm ile ilgili diğer bir sınırlama sayısal çevrimcinin çözüm adımı ile ilgilidir. Örnek olarak çalışmada kullanılan 16 bitlik çevrimci 90dB'lik bir dinamik ölçüm aralığına sahiptir. Fiziksel olarak bu durum ölçüm büyüklüğüne bağlı olarak 90dB dışında kalan büyüklüklerin ayırt edilemediği anlamına gelir. Deneylerde bu durum frekans ölçümlerine yani doğrudan fiziksel sistemin serbestlik derecesine bir sınırlama olarak yansır.

Diğer bir konu algılayıcıların istenen sayıda modun ölçülmesine izin verecek şekilde yerleştirilmesi gerekliliğidir. Başlangıçta modal şekiller tam olarak bilinmediğinden algılayıcıların düğüm noktalarının üzerine gelme riski vardır. Böyle bir durumda düğüm noktası üzerinden ölçüm alınan mod görülmeyebilir. Uygulanan deney yöntemine göre bu konudaki risk değişir. Tek girdi çok çıktılı yöntem bu açıdan görece riskli bir yöntemdir. Çok girdi çok çıktılı ölçüm yöntemlerinin kullanılması riski azaltır. Ayrıca tipik olarak güvenli tarafta kalabilmek amacı ile ölçülmek istenen mod sayısından daha fazla sayıda ölçüm noktası kullanılır. Fakat bu durumda dahi istenilen modların tamamının yakalanacağına bir garantisi yoktur. Ölçülemeyen mod konusunda çekinceleri iyice hafifletmenin en iyi yolu sistemin sonlu elemanlar modelini kurarak, modal şekiller hakkında deney tasarımı yapılmadan fikir sahibi olmaktır. Modal şekillerin bilinmesi sayesinde düğüm noktalarından ölçüm yapılmasının önüne geçilebilir.

Algılayıcıların Kalibrasyonu: Deneylede yapılan ölçümlerin doğru olması en öncelikli konulardan birisidir. Bu amaçla araştırmacılar tarafından ivmeölçer ve darbe çekicinin her deney öncesi ve sonrası kalibrasyonlarının kontrol edilmesi önerilmektedir. Çalışmada alıcıların kalibrasyonlarını yapmak amacı ile bir kalibrasyon düzeneği imal edilmiş ve kullanılmıştır. Bu düzende ivmeölçerler yer çekimi veya kalibre bir darbe çekici ile darbe çekici ise kalibre bir ivmeölçer ile kalibre edilebilecektir. Bu amaçla bir kütlein hem sarkaç hareketine hem de serbest düşmesine izin veren bir düzenek imal edilmiştir.

Modal Analizin Temel Varsayımlarının Kontrol Edilmesi: Deneysel modal analizin iki temel varsayımı vardır. Bunlar zamanda değişmezlik ve doğrusallık varsayımlarıdır.

Zamanda değişmezlik varsayımına göre ölçüm yapılan sistemin özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmediği kabul edilmektedir. Böylelikle sistemden alınan ölçümlerden hep aynı sonuçların alınması beklenir. Bu varsayımı kontrol etmenin bir yolu farklı zamanlarda aynı sistemden ölçümler alıp dinamik değişkenlerin karşılaştırılmasıdır. Bu varsayım sayesinde ölçüm ve analizden kaynaklanan hatalar hariç teorik olarak aynı sonuçlara ulaşılması gerekir. Sistemde bu varsayımdan sapmaya sebep olabilecek etkenlere çevre ısısı ve neminin değişmesi, doğrusal olmayan davranış, meydana gelebilecek hasarlar ve kütle miktarında olabilecek değişimler örnek verilebilir.

Doğrusallık varsayımı ise modal analizin temelini oluşturur. Modların üste üste bindirilerek sistemin davranışının tanımlanabilmesi bu sayede mümkün olmaktadır. Doğrusallığı kontrol etmek için iki yöntem vardır. Birinci yöntem farklı şiddetlerdeki uyarılar ile oluşturulan FYF'lerinin karşılaştırılması, diğeri ise doğrusallık varsayımının beraberinde getirdiği tersinirliğin kontrolüdür. Bu ilişki Maxwell'in tersinirlik ilkesi tarafından tanımlanır. İlkeye göre doğrusal bir sistem için q noktasındaki birim yüklemeden (F_q) dolayı p noktasındaki yer değiştirme (X_p), p noktasındaki birim yüklemeden (F_p) dolayı q noktasında oluşan yer değiştirmeye (X_q) eşittir. Bu ilkeyi kontrol etmek amacı ile girdi ve çıktıların sistem üzerindeki yerlerinin karşılıklı olarak yer değiştirilmeleri ile oluşturulan FYF'ları (H_{pq} ve H_{qp}), Denk. 2.54, karşılaştırılır. Eğer sistem doğrusal ise oluşturulan FYF'larının eş olması beklenir.

$$H_{pq} = \frac{X_p}{F_q} = H_{qp} = \frac{X_q}{F_p} \quad (2.54)$$

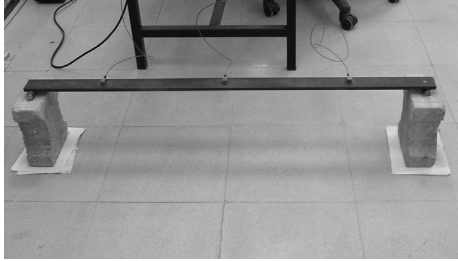
BÖLÜM 3

Basit Sistem Deneyleri

3.1 Giriş

Basit sistemler ile veri kayıt sistemlerinin işletilmesi, dinamik deney sistemlerinin planlanması ve kurulması, modal deney ve analiz tekniklerinin irdelenmesi ve yapı modellerinin ölçülmüş sistem değişkenleri ile ilintilendirilmesi amacıyla çalışılmıştır. Deneysel bazda dört ayrı fiziksel sistem, modal analiz bazında ise üç ayrı yöntem uygulanmıştır.

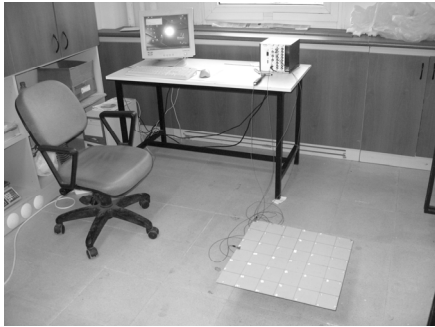
Seçilen fiziksel sistemler analitik çözümü de bulunan düzgün kesite sahip bir çelik kiriş, kutu profillerden oluşturulan ve ayaklarının uçlarında ağırlıklar bulunan H şeklinde bir çerçeve, simetrik bir çelik plaka ve tek açıklık ve dört kata sahip bulunan bir düzlem çelik çerçevedir, Şekil 3.1.



a) Basit kiriş



c) H-çerçeve



b) Kare plaka



d) Çelik çerçeve; dolgusuz ve dolgulu

Şekil 3.1 Projede bugüne kadar çalışılan basit sistemler

Modal analizde özellikle sahada yapılan ölçümlerde kendisinden ve sinyal işleme yöntemlerindeki hatalardan dolayı sonuçlarda %90'dan daha fazla bir güven seviyesi beklenemeyeceği rapor edilmiştir (Aktan ve diğ. 1997). Bu veriden hareketle yapılan çalışmalarda modal ve yapısal analiz sonuçlarında %10'a varan farklar kabul edilebilir sınır olarak tanımlanabilir. Modal analiz ile sistem tanılamada hatalar sistem, deneysel yöntem ve tanılama kaynaklı olabilmektedir. Tipik modal analiz hataları değişinti (İng. variance), örnek olarak elektronik gürültü, yanlılık (İng. bias), örnek olarak örtüşme (İng. aliasing), kaçak (İng. leakage), kırıntı (İng. clipping) ve kalibrasyon kaynaklıdır. Başka bir hata kategorisi sinyal işlemedeki ve yöntem seçimindeki kullanıcı hatalarıdır. Ayrıca yapı sistemlerinin karmaşıklığı ve boyutu arttıkça çoğalabilen doğrusallıktan sapma, belirsizlikler, malzeme özelliklerindeki yerel sapsmalar, engel olunamayan taban gürültüleri ve sınır şartlarında çevresel etkilere bağlı gerçekleşen sapsmalarda diğer olası hata kaynaklarıdır (Aktan ve diğ. 97, Allemang III 1999, Ewins 2000).

Çalışılan basit sistemlerin dinamik değişkenleri modal ve yapısal analiz yöntemleri ile elde edilip sonuçların karşılaştırılması ile yöntemlere güvenilirlik kontrol edilmiştir. Basit giriş için analitik çözüm mevcut olduğundan sonuçlar ayrıca bu yöntemle de doğrulama yoluna gidilmiştir.

Bu bölümüm devamında incelenen basit sistemler tanıtılıp, uygulanan modal deney ve analizler sonuçları sergilenecek ve irdelemeler yapılacaktır.

3.2 Çalışma Kapsamında İncelenen Doğrusal Sistemler

Çalışmamızda kullanılan doğrusal sistemler özellerinde aşağıdaki sebepler ile seçilmiştir:

1. Basit Giriş: Deneysel amaç ile kullanılacak en basit sistem olup başlangıç aşamasında temel ilkeler haricinde deneysel bir sorun yaratmadığından sadece temel ilkelere odaklanma fırsatı sağlamıştır.
2. H- Çerçeve: Kütlesinin ve rigidliğinin dağılımı itibari ile sistemin modları üç boyutlu ve bağımlıdır (İng. coupled). Deneysel ve analiz yöntemlerimizin görece karmaşık bir sistemde uygulanması amacı ile seçilmiştir.
3. Kare Plaka: Sistem sahip olduğu simetri sebebi ile çakışık köklere sahiptir. Bu sayede çakışık köklere sahip sistemlerin çalışması hedeflenmiştir.
4. Düzlem Çerçeve: Tek açıklıklı dört katlı bir çerçeve sistemidir. Projenin sonraki aşamalarında çalışılacak olan betonarme çerçevelere fiziksel benzerliği sebebi ile sonraki aşamalar için hem deney düzeneği hem de ölçümle ilgili sistemler konusunda bir ön çalışma olması amacı ile seçilmiştir.

Deney sonuçlarının analiz sonuçları ile uyumlu olduğunun gösterilmesi amacı ile her sistem için ilk olarak modal deneyin yapılması için gerekli şartlar sınanacak ve bu şartların kontrolleri sunulacaktır. Daha sonra deney sonuçları ve analiz sonuçları karşılaştırılacak ve benzeri olan sistemler literatürden sonuçlar ile irdelenecektir.

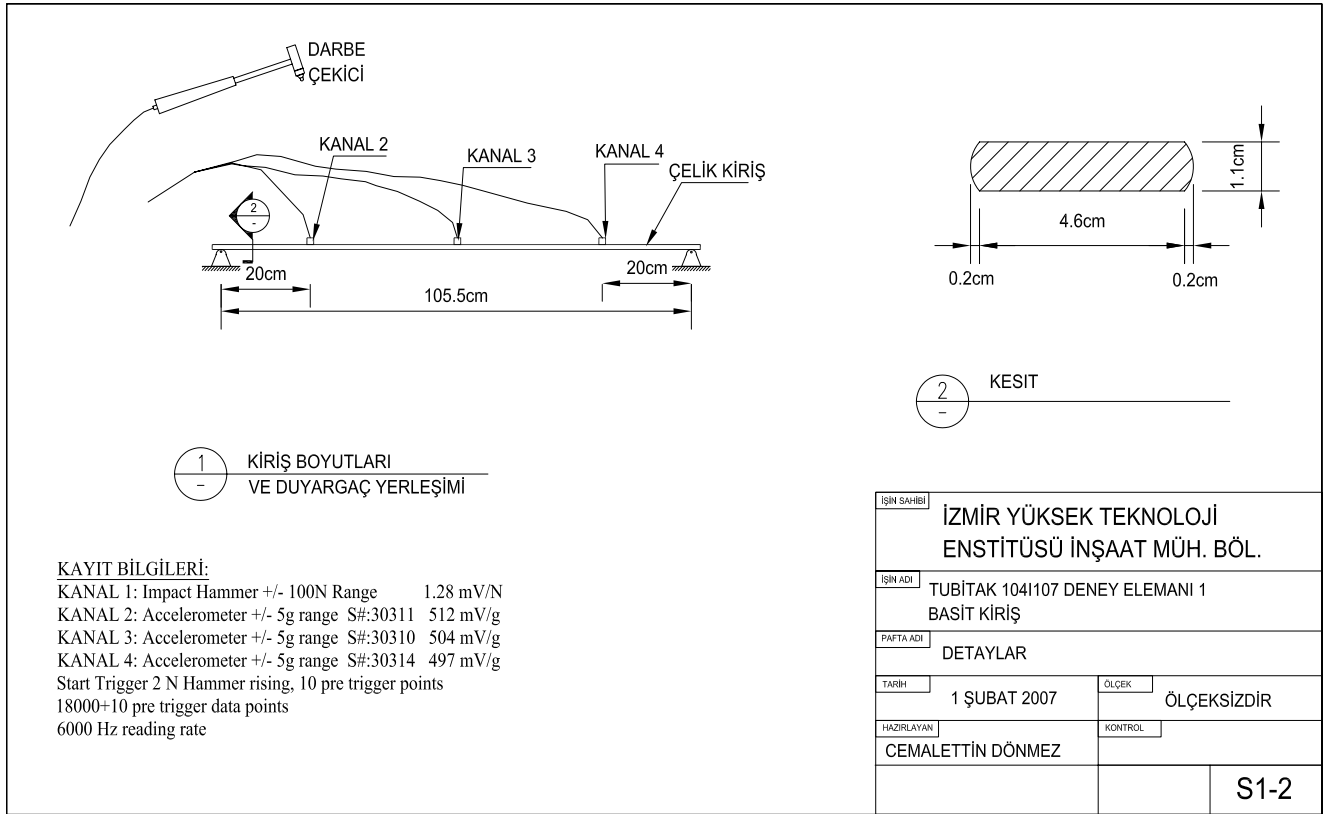
Bir sistemin dinamik değişkenlerinin modal analiz yöntemi ile belirlenebilmesi için sistemin *doğrusallık ve zamanda değişmezlik* (Allemang III 1999, Aktan ve diğ. 1997) özellikleri gösterdiği varsayılır. Bu varsayımları doğrulamak amacıyla sistem topyekün modal deneye tabii tutulmadan önce bir takım ön ölçümler yapılır. Bu temel varsayımlar iki temel ihtiyaçtan doğarlar. Zamanda değişmezlik en azından deney süresince sağlanmalıdır. Aksi takdirde alınan veriler bütünlük içinde değerlendirilemez. Deney sürelerinde zamanda değişmez ama farklı ölçümler arasında değişimler olması durumunda ölçülen sistemin bu iki zaman arasındaki değişimlerini gözlemlemek için bir olanak elde edilir. İki ölçüm arasında hasar gören bir sistem bu duruma örnek olarak verilebilir. Bu tip ölçümlerde özellikle de bu iki durum arasındaki farkları kullanarak sistemin değişimi hakkında bilgi edinilmesi hedeflenir. Doğrusallık ise modal analizin temelini oluşturan mod birleştirme yönteminin işletilebilmesi için gereklidir. Deneylerimizde zamanda değişmezlik konusunda doğrudan kabul yolu

seçilmiştir. Zira kurulan sistemler belirli mesnet şartlarına sahip çelik malzemeden imal edilmiş yapılardır. Deneylerde sistemlere verilen dürtüler malzemenin elastik sınırlarının çok çok altında olduğundan dürtü sebebi ile malzemede herhangi bir değişiklik beklenmemektedir. Keza malzemenin kütleinde ve rigitliğinde zamana bağlı (en azından deneyler süresince) bir bozulma beklenmemektedir. Farklı zamanlarda yapılan ölçüm sonuçları bu kabullerin doğruluğunu teyit etmiştir.

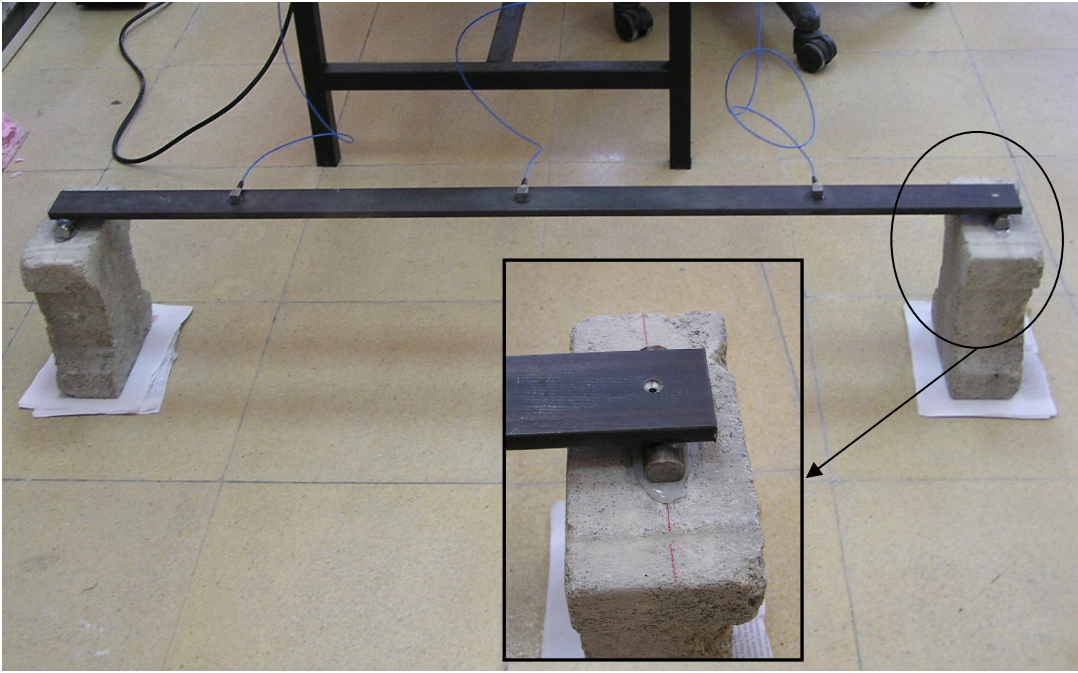
Özet olarak basit sistem analizlerinin doğruluğunu kontrol etmek için ilk olarak sistemlerin modal analizin temel varsayımlarına uygunluğu kontrol edilecektir. Bu konuda kanaat sağlandıktan sonra deneysel verilerden yola çıkan modal analiz ve ayrıca geometri ve malzeme verilerinden yola çıkan yapısal analiz yöntemleri ile elde edilen sonuçların birbirlerine uygunluğu kontrol edilecektir. Elde edilen değerlerin en fazla %10 farka sahip olmaları durumunda yapılan analizlerin doğru olduğuna kanaat getirilecektir. İncelenen sistemlerin literatürde benzerleri olması durumunda ayrıca karşılaştırma yapılacaktır.

3.3 Basit Kiriş

Sistem basit mesnetli düzgün kesite sahip çelik bir kiriştir. Boyut ve alıcı yerleşim bilgileri Şekil 3.2'de verilmiştir. Elemanda basit mesnet durumunu sağlayabilmek için Şekil 3.3'de görüleceği üzere yuvarlak kesitli bir çubuk ve elemanda buna uygun bir yuva yapılmıştır. Mesnet yuvası ve çubuk arasındaki hafif uyumsuzluğu çözmek amacı ile sınırlı miktarda sıcak tutkal kullanılmıştır.

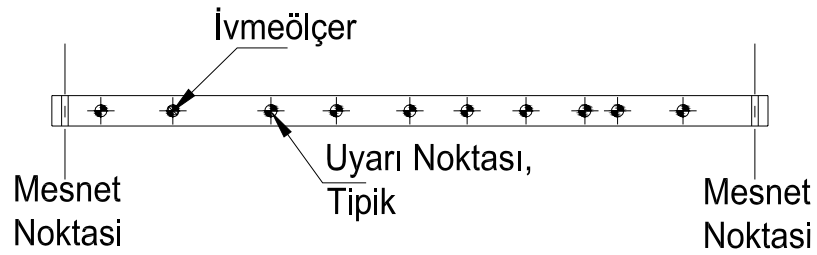


Şekil 3.2 Basit kiriş geometrisi, alıcı bilgileri ve ön deneyler sırasında kullanılan alıcı yerleşimi

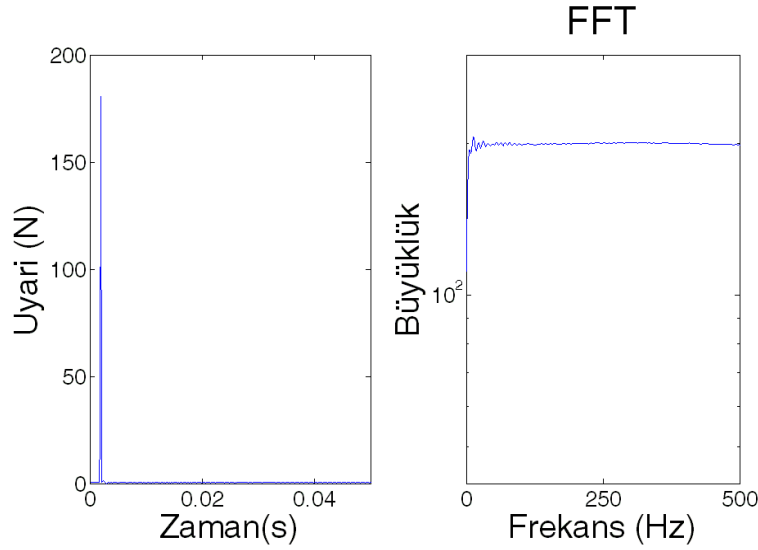


Şekil 3.3 Basit kiriş mesnet durumu

Sistemin modal deneyleri Şekil 3.4'de verildiği üzere darbe çekici ile on noktadan dürtü verilip bir adet ivmeölçerden kayıt alınarak yapılmıştır. Bu sayede sistemin modal şekilleri yüksek çözünürlükte elde edilmiştir. Alınan ön ölçümlerde yönler arasında bağlaşım (İng. coupling) gözlenmediğinden analizlerde ivmeölçerin kiriş kesitinin uzun kenar düzlemine dik bileşeni kullanılmıştır. Modal analiz tek giriş tek çıkış (TGTÇ) verilerinin tersinirlik ilkesi ile tek giriş çok çıkış (TGÇÇ) gibi kullanılması ile yapılmıştır. Bu amaçla darbe çekici ve üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçer PCB-356A16 modeli olup 100 mV/g hassasiyete, 1-5000 Hz frekans aralığına ve 7.4 gr ağırlığa sahiptir. İstenilen frekans aralığını doğru şekilde uyarabilmek için sert çekiç ucu (metal) kullanılmıştır. Bu uç ile uyarılan frekans aralığı Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



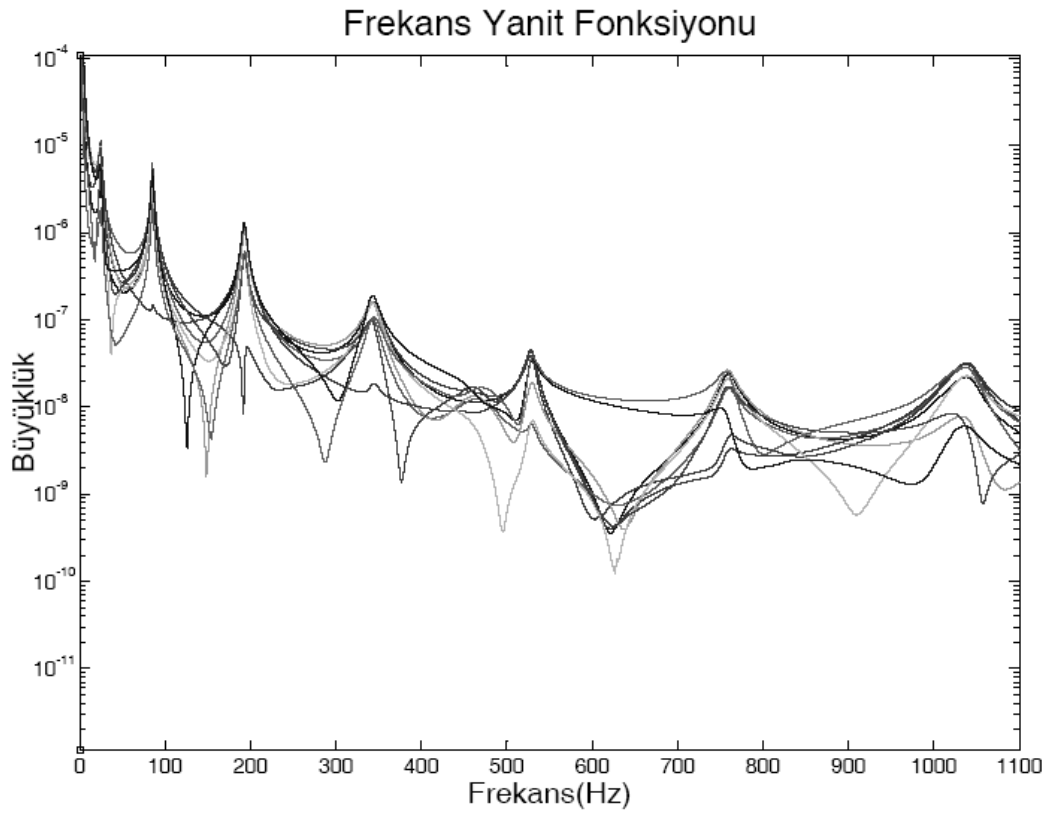
Şekil 3.4 Basit kiriş uyarı ve okuma noktaları



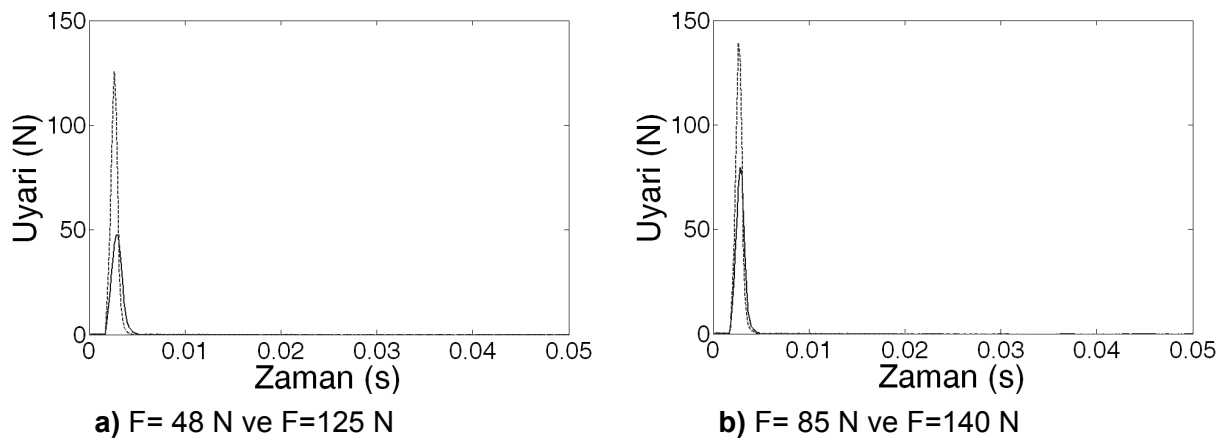
Şekil 3.5 Sisteme verilen dürtünün frekanslar üzerindeki tipik etkinliği

Kiriş üzerinde yapılan ön ölçümlerden ilk dört frekansın 350Hz'in altında olduğu görülmüş ve ölçüm hedefi olarak ilk dört frekans seçilmiştir. Veri edinim sistemi 3 saniyelik kayıtlar alacak şekilde düzenlenmiş ve 6kHz'lik kayıt hızı ve 2.5 kHz'lik analog alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Veriler yüksek frekanslardan kurtulmak için ayrıca 1.5kHz Butterworth sayısal alçak geçiren filtreye tabii tutulmuştur. İvme kayıtlardan ilk üç saniyede dalganın tamamı ile sönümlenmediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple oluşacak katlanma (İng. Aliasing) hatasına engel olmak amacı ile de kayıtlar üstel pencerelemeye tabii tutulmuştur. Ayrıca darbe çekici verileri darbe süresi dışındaki gürültünün etkisini yok etmek amacıyla, dörtgen pencerelemeye tabii tutulmuştur. Her bir FYF için beşer kayıt kullanılarak rastgele hataların azaltılması amacı ile ortalama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş veriler kullanılarak oluşturulan FYF'ları Şekil 3.6'de sergilenmiştir.

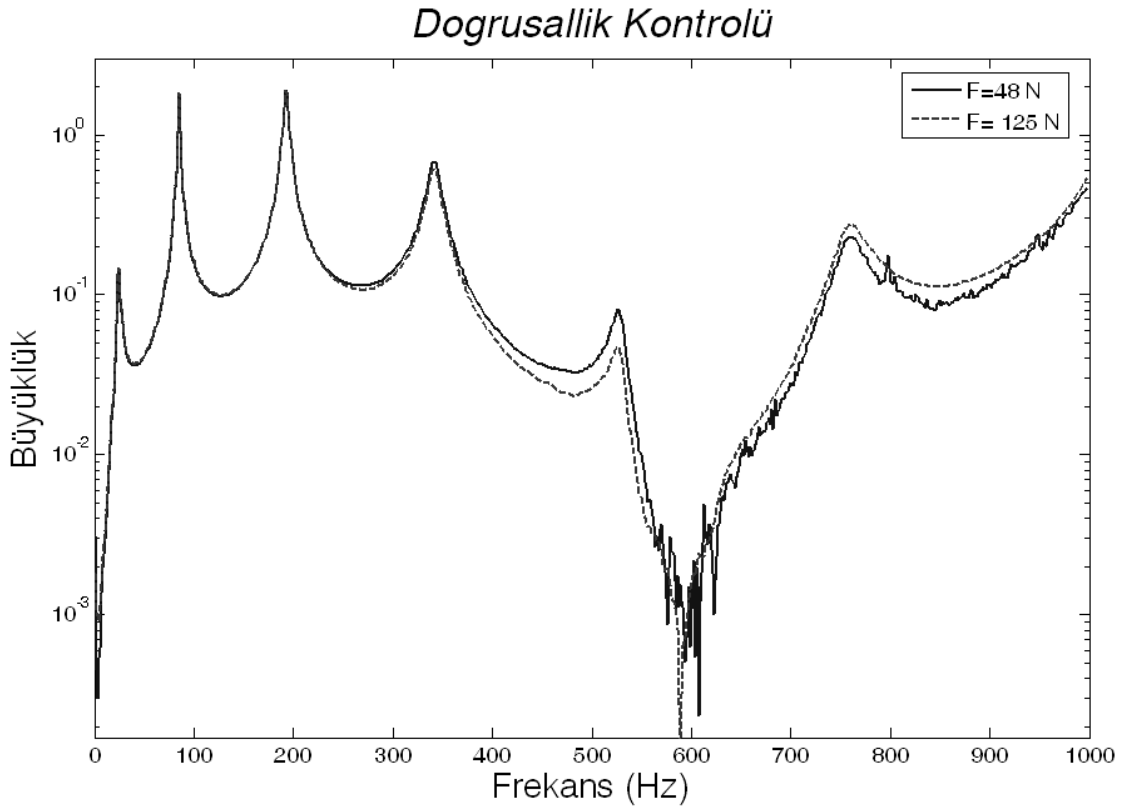
Sistem modal analizinin temel varsayımlarına uygunluğunun kontrol edilmesi amacı ile doğrusallık ve tersinirlik testlerine tabii tutulmuştur. Doğrusallığın kontrolü amacı ile iki farklı karşılaştırma yapılmıştır. Birinci karşılaştırmada uyarı büyüklükleri 48 N ve 125 N olan iki okuma karşılaştırılmıştır, Şekil 3.7a ve 3.8. FYF'larının karşılaştırılması ile 400Hz'in üzerinde doğrusallıktan sapma gözlemlenmiştir. Sapmanın nedeni 85 N ve 140 N'luk uyarılarının FYF'larının karşılaştırılması, Şekil 3.7b ve 3.9, ile ortaya çıkmıştır. Bu FYF'ları ile yüksek enerjili uyarıların sistemin üst modlarını tamamı ile uyararak sapmayı engellediğini ortaya koymuştur. İlk okumadaki sorun 48 N'luk uyarının sistemi 400Hz'in üstü için yeterli enerji sağlayamamasıdır. Bu sebeple sistemin 400 Hz üzerini de kapsayan bölgesinin modal analizini yapmak için daha yüksek enerjili uyarılara ihtiyacı vardır. Tersinirlik kontrolü için Şekil 3.10'de gösterildiği şekilde karşılıklı iki noktadan uyarı ve tepkiler kaydedilmiş ve 5 ayrı okuma setinin ortalamaları alınarak FYF'lar oluşturulmuştur. Sonuçlar sistemin Maxwell tersinirlik ilkesine uyduğunu göstermektedir.



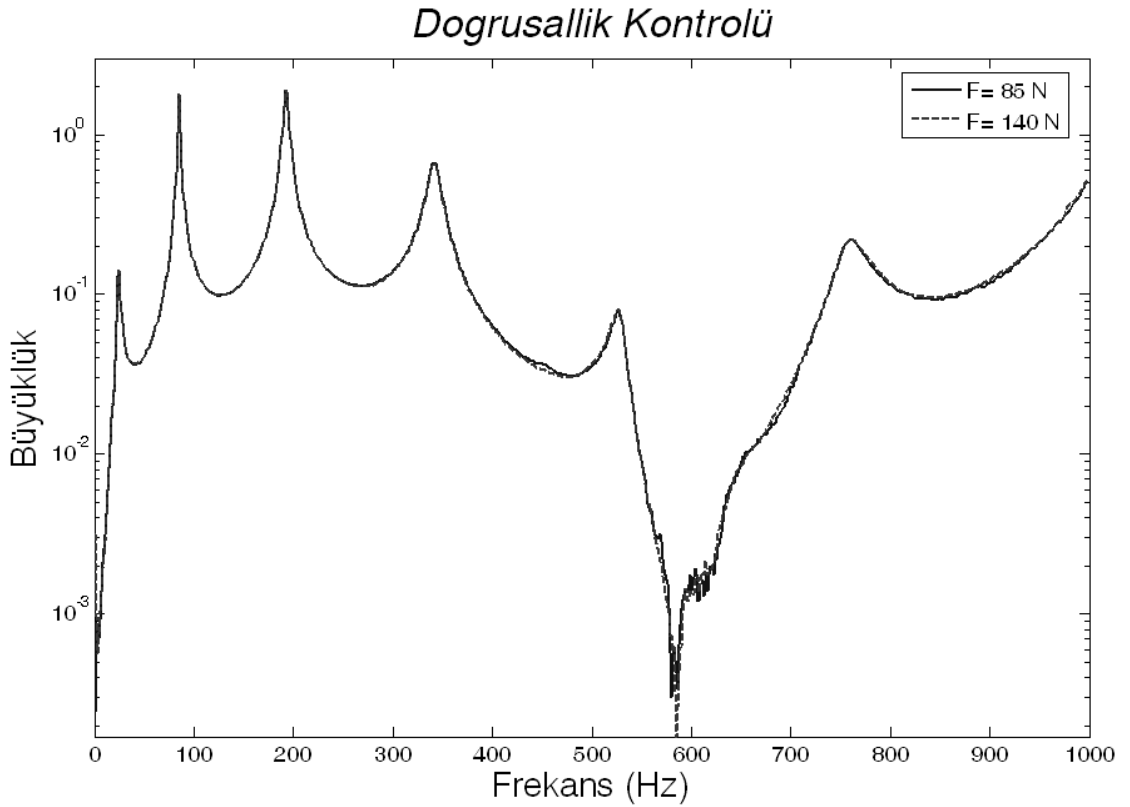
Şekil 3.6 Basit kirişin frekans yanıt fonksiyonları toplu görünüşü



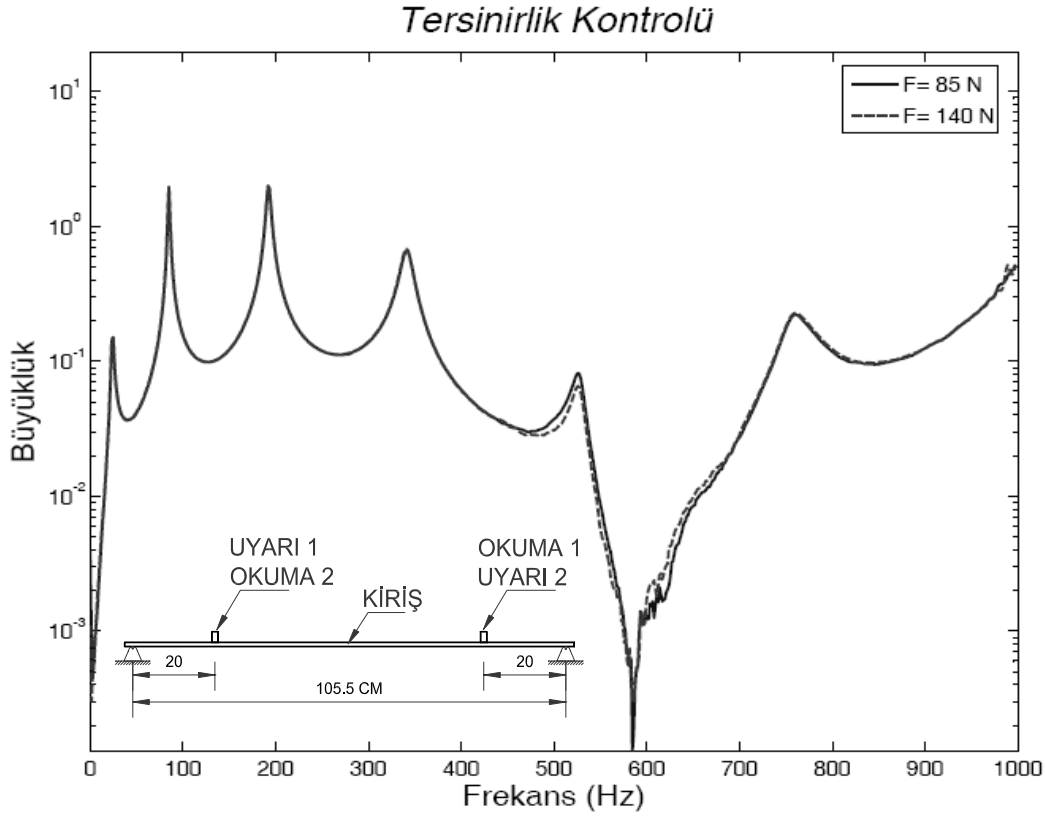
Şekil 3.7 Doğrusallık kontrolü için sisteme verilen dürtülerin büyüklüğü



Şekil 3.8 Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları



Şekil 3.9 Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları



Şekil 3.10 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okumalara karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları

Sistemin basit olmasından dolayı analitik ve sayısal çözümler kolaylıkla yapılabileceğinden istifade ile basit kirişlerdeki sinyal işleme araçlarının sınırdığı bir platform olarak kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak sistemin analitik ve sayısal çözümleri sunulacak, daha sonra sayısal analiz ve modal analiz yöntemlerinin sonuçları sergilenecektir.

3.3.1 Basit Kirişin Analitik ve Sayısal Çözümleri

Doğrusal işleyen bir malzemeden imal düzgün kesite sahip basit mesnetli bir kiriş için doğal frekansları ve modal şekilleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Clough 1993).

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} \quad (3.1)$$

burada ω_n = n'inci doğal frekans, n=1, 2, 3 ...

E =Malzemenin elastisite modülü

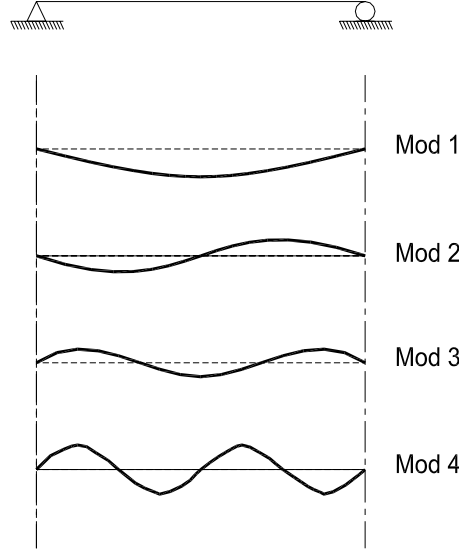
I = Kirişin ikinci ataletsizlik momenti

\bar{m} =Birim boya karşılık kütle,

L = Kirişin serbest açıklığıdır.

Teste tabii tutulan kiriş için, $E=2.0 \times 10^{11}$ N/m², $I=5.21 \times 10^{-9}$ m⁴, $\bar{m}=4.16$ kg/m ve $L=1.05$ m alınması durumunda ilk 4 doğal frekans $\omega_1=22.5$ Hz, $\omega_2=90.2$ Hz, $\omega_3=202.9$ Hz ve $\omega_4=360.8$ Hz olarak bulunur. Ayrıca bu frekanslara karşılık gelen modal vektörlerde Şekil 3.9'da verildiği gibidir.

Yukarıdaki hesap yöntemi ile hesaplanan modal şekiller ve frekanslar kullanılan değişkenlerin ve sınır durumlarının doğruluğu ölçüsünde geçerlidirler. Fiziksel sistemde imalat ve malzemeye bağlı bir takım sapmalar olacağı için ölçüm sonuçlarında da bir miktar sapma beklenmelidir.



Şekil 3.11 Basit kirişin ilk 4 modal şekli

Basit kiriş dört serbestlik dereceli çerçeve elemanları kullanılarak SAP2000, (Computers and Structures, 2004, programı ile analiz edilmiş ve modal değişkenleri bulunmuştur. Bu analizden elde edilen sistem değişkenleri Şekil 3.13'da gösterilmiş ve Tablo 3.1'de listelenmiştir.

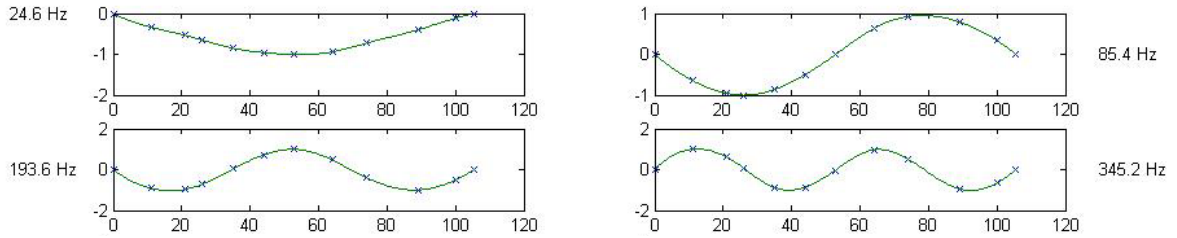
3.3.2 Basit Kirişin Modal Analiz Yöntemleri ile Tanınması

Tanımlanan FYF'ları modal analiz yöntemleri ile işlenecek şekle sokularak EKÜK, ÖGA ve KMGF yaklaşımları ile sistem tanılama çalışılmıştır. EKÜK yöntemi ikinci kısımda belirtildiği üzere sentetik veriler ile çok güzel sonuçlar vermiş olmak ile beraber elektronik ve/veya çevresel gürültüye sahip gerçek veriler ile kararlı sonuçlar vermemiştir. Yöntemde analize sokulan veri miktarına ve öngörülen polinom derecelerine göre kararsızlık gösteren ve sistem köklerini kısmi olarak yakalayan bir davranış gözlenmiştir.

ÖGA yönteminde basit kirişten elde edilen ham veriler giriş ve çıkış verilerinin tümünün üstel pencerelenmesi yerine yalnızca çıkış verilerine, ilgilendiğimiz düşük frekanstaki modları öne çıkarmak üzere orta düzeyde kazançlı bir alçak geçiren süzgeç uygulanmıştır. Bu orta düzeyde kazançlı süzgeçleme FYF'nin en yüksek frekans değerlerinde 50 dB civarında bir zayıflamaya karşılık gelmektedir. Kullanılan analog sayısal dönüştürücünün örnekleme frekansı 6000 Hz olduğu ve bu frekans bizim kestirmeye çalıştığımız sistem modlarından çok yüksek olduğundan bilgisayarın işlem yükünün azaltılması amacıyla desimasyon uygulanarak daha az miktarda veriyle çalışmak mümkün olabilmektedir. Bu yüzden 3 saniye süresinde alınan 18000 örneklilik ham verinin desimasyonu ile verinin uzunluğunun azaltılması denenmiştir. Ancak bunun yerine eldeki ham verinin 6000 Hz ile örneklenmiş baştaki, diğer bir deyişle çok sönümlenmemiş bölümdeki bir alt kümesinin kullanımıyla daha başarılı sonuç alındığı görülmüştür. Örnek olarak 8192 örneklilik 3000 Hz örnekleme frekanslı veriyle sağlanan başarımla, 8192 örneklilik 6000 Hz ile örneklenmiş veriyle sağlanan başarımdan daha kötü olmuştur. Bu sonuç ilk durumdaki veri 2 katı uzunlukta bir gözlem

süresine karşılık gelmekle birlikte bu verinin bir kısmının sinyal bileşeninin iyice zayıfladığı ve sinyal gürültü oranının (SGO) iyice düştüğü bir zaman aralığında alınmasıyla açıklanabilir. Böylece örnekleme sıklığını 6000 Hz olarak bırakıp başlangıç verisinin kullanımının desimasyon seçeneğine karşı tercih edilmesinin daha faydalı olabileceği fikri ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşımın dezavantajı sinyallerin tamamı ile sönmediği bölgedeki verilerin kullanılması olduğu için sızıntı etkisinin dönüşümleri etkilemesidir.

ÖGA için oluşturulan Hankel veri matrisinin boyutları algoritmaların çalışmasını zorlaştırmadığı sürece FYF üretiminde daha uzun bir gözlem dizisi kullanılmasının ÖGA'nın sistem modlarını bulmasını güçleştirmede gözlenmiştir. Örnek olarak basit kiriş verisi için 2048, 4096, 8192 ve hatta 16384 uzunluğunda veri kullanımının hepsinde 4 sistem modu başarılı olarak kestirilmiştir. Yukarıda anlatıldığı şekilde FYF'ler elde edilip, bunlar ÖGA'ya girdi olarak verildiğinde kullanıcı müdahalesi olmaksızın 2048 örneklilik veri kullanılarak bulunan modal şekiller ve kestirilen frekanslar Şekil 3.12'de gösterilmekte ve Tablo 3.1'de listelenmektedir. Yine ham verinin farklı uzunluktaki bölümlerinin kullanımıyla yapılan kestirimlerde önemli bir değişim gözlenmiştir.



Şekil 3.12 ÖGA yöntemi ile bulunan basit kiriş frekans ve modal şekilleri

Son sistem tanılama yöntemi olarak KMGF yöntemi X-modal programı vasıtası ile kullanılmıştır. Bu amaçla hazırlanan FYF'leri programa yüklenmiş ve Şekil 3.13'da gösterilen ve Tablo 3.1'de listelenen sistem değişkenleri elde edilmiştir. Sönüm oranları üstel fonksiyonun etkisini yok edecek şekilde düzeltilmiştir (Fladung ve Rost, 1997).

Modal ve sayısal analizin ham sonuçları karşılaştırıldığında, modal analiz sonuçlarının daha sıkı bir sisteme işaret edildiği görülmüştür. Sonuçları uyumlu hale getirmek amacı ile kirişin mesnetlerinde 50 kgf.m/rad dönme direnci sağlanmıştır. Mafsal noktalarının gerçek mafsallar olmayıp mesnetler silindirik metal üzerine sıcak tutkal ile yapıştırıldığından yapılan değişiklik beklenen yönde bir değişikliklerdir. Mesnetlere sağlanan dönme direnci ilk modu oldukça uyumlu hale getirmek ile beraber diğer modlardaki sapma miktarı istenilen seviyelere gelmemiştir. Üst modlardaki uyuma dönme direncine ek olarak eğilme sıklığının %7 azaltılması ile ulaşılmıştır. Elastisite modülünün nominal değerler baz alınarak kullanılıyor olması sebebi ile bu miktar bir oynama kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Tablo 3.1 ve Şekil 3.13'da sunulan sayısal analiz verileri bu değişiklikler sonucu elde edilen sonuçlardır.

Modal analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olup ÖGA ve KMGF'lerinin deneysel verilerden benzer sistem değişkenleri tanıladığı sonucuna ulaşılmıştır. Sayısal analiz sonuçları analize girdi olarak alınan geometrik ve malzeme verilerindeki kesinlik göz önüne alındığında kabul edilebilir sapmalar içermektedir. Analitik sonuçlarda yukarıda belirtilen mafsal noktalarındaki zayıf dirençleri ve eğilme rigidliğindeki azaltmayı içermediğinden daha büyük bir sapmaya sahiptir. Analitik çözümlere eğilme rigidliğindeki azaltma dahil edildiğinde ilk 4 doğal frekans $\omega_1=21.8\text{Hz}$, $\omega_2=87.0\text{Hz}$, $\omega_3=195.7\text{Hz}$ ve $\omega_4=347.9\text{Hz}$ olarak elde edilmekte ve sapma miktarı azalmaktadır.

Tablo 3.1: Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri

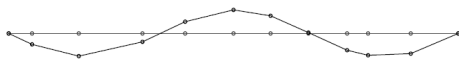
Mode #	Modal Analiz (Hz)		Sayısal Analiz(Hz)	Analitik Çözüm (Hz)	Sönüm (%),Modal Analizden
	ÖGA	KMGF			
1	24.6	24.0	23.5	21.8	3.2
2	85.4	85.1	87.7	87.0	0.7
3	193.6	192.3	194.5	195.7	1.1
4	345.2	341.7	343.7	347.9	1.8

Modal Analiz Sonuçları:

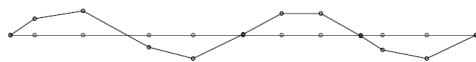
22.6Hz

Mod 1

85.1Hz

Mod 2

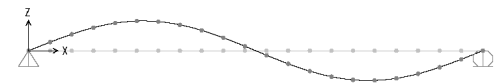
192.9Hz

Mod 3

342.7Hz

Mod 4**SAP Analizi Sonuçları:**

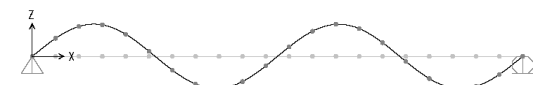
23.5Hz



87.7Hz



194.5Hz



343.7Hz

Şekil 3.13 Basit kirişin modal analiz ve sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekans ve modal şekillerinin karşılaştırılması**3.3.3 EKÜK ve ÖGA Yöntemlerinin Basit Kiriş Verileri ile Karşılaştırılması**

EKÜK yöntemi önceki kısımlarda belirtildiği üzere başarılı bulunmamıştır. Yöntemin gözlenen problemleri şu şekilde özetlenebilir:

1. Alınan örnek sayısı belirli bir oranın altındaysa yöntem kararsızlık göstermektedir.
2. Tanılanan sistemin frekansları, kayıt süresi ve kayıt hızı ile bağlantılı olarak yöntem kararsızlık göstermektedir.

3. Varsayılan kök sayısı eğer sistemde gerçekte var olan kök sayısından fazla ise, ki genelde bütün sistem tanılması tekniklerinde kök adedinin olduğundan fazla olarak varsayılması “over-estimation” yapılması çok normal bir yaklaşım olmasına rağmen, yöntem tamamen kararsız hale gelmekte ve elde edilen kökler sistemin köklerinden ilgisiz yerlerde oluşmaktadır.

ÖGA ve EKÜK algoritmalarını karşılaştırma amacı ile bu yöntemlere kullanıcı müdahalesi olmaksızın 2048 örneklik veri kullanılarak bulunan modal frekanslar aşağıdaki Tablo 3.2’deki gibidir.

Tablo 3.2 EKÜK ve ÖGA algoritmaları tarafından 450Hz’ kadar bulunan modal frekanslar

EKÜK (Hz)	ÖGA (Hz)
30.6	24.6
43.1	
87.8	85.4
125.6	
128.5	
174.3	
192.4	193.6
231.1	
256.4	
307	
314.7	
320.2	
360.1	345.2
379.9	
412	
448.3	

Görüldüğü üzere ÖGA yöntemi sistem köklerini Literatürde Prony yöntemi [Scharf 91] olarak da bilinen EKÜK yöntemiyle elde edilen ve deney sonucunda tabloda görüldüğü gibi elde edilen *kararsız frekans kestirim sonuçları* [Sharf 91] ve [Marple 88] de verilen yorumlar ile de aynen örtüşmektedir.

Ayrıca Prony yöntemi yani EKÜK yönteminin kararsızlık sınırlarını tanımlama amacı ile sentetik verilerle çalıştırılabildiği en yüksek SNR seviyesi (gürültünün en düşük olduğu) olan sonuçlar Tablo 3.3’de sunulmuştur.

Tablo 3.3 EKÜK Algoritmasının Farklı SNR Değerlerindeki Performansı

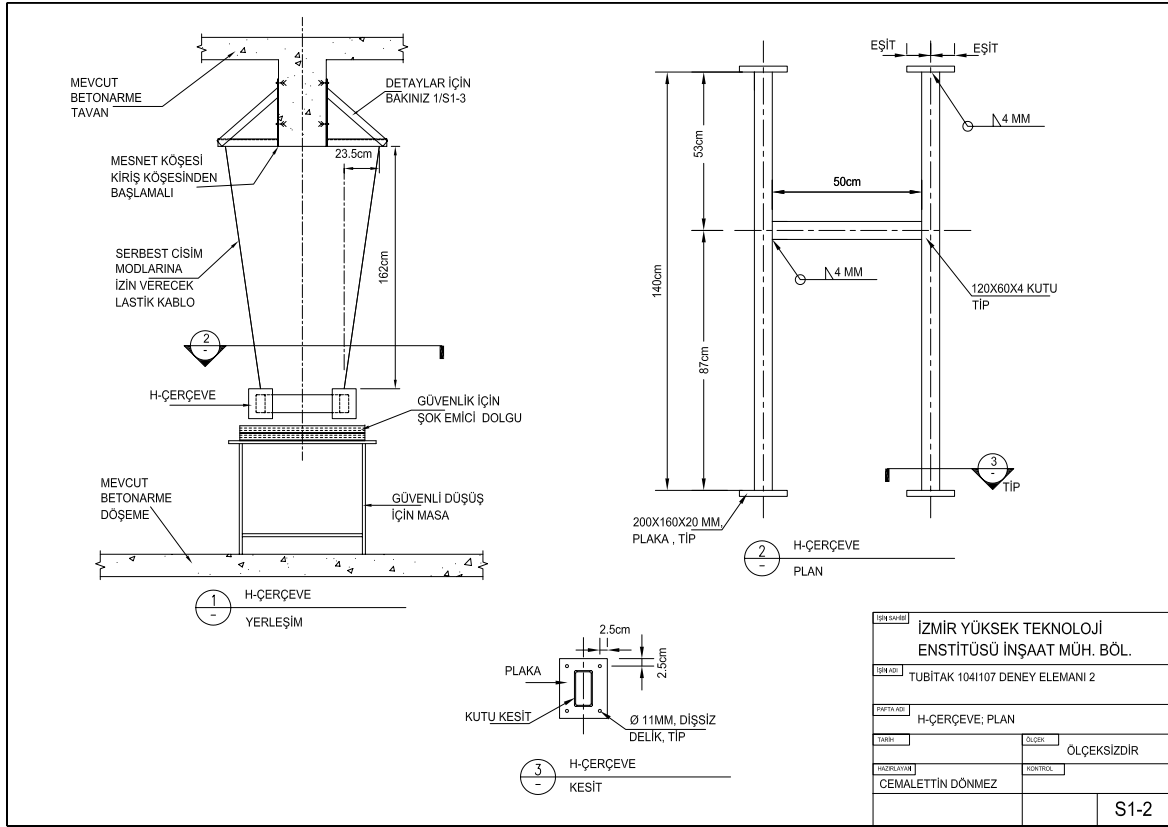
SNR=100 dB;		
	EKÜK Kestirimi (Hz)	Gerçek değer (Hz)
	5.9142	5.9285
	14.3168	14.3127
SNR=70 dB;		
	EKÜK Kestirimi (Hz)	Gerçek değer (Hz)
	2.3232	5.9285
	14.4712	14.3127

70dB SNR seviyesi civarlarında ve daha altında, ki bu durum gürültünün yükselmesi anlamına gelir, algoritma kararsızlaşmaya başlamakta ve kestirilen frekanslar bilinen sistem frekanslarından kabul edilemeyecek kadar uzaklaşmaktadır. Son tahlilde EKÜK algoritması kararsız frekanslar kestirimleri yapması ve gerçek ölçümlerde rastlanabilecek SNR seviyelerinde çalışmaması sebebi ile terkedilmiştir.

3.4 H-Çerçeve

Sistem ayaklarının uçlarına 20x16x2 (cm) plakalar monteli 12x6x0.24 (cm) kutu profillerden boyutları Şekil 3.14'de verilen H-şeklinde bir çerçevedir. Sistem mesnetlerden bağımsız bir şekilde ölçüm yapabilmek için elastik kablolarla askıya alınmış ve 46 noktadan uyarı verilip bir noktadan üç eksenli bir ivmeölçer ile okuma alınarak test edilmiştir, Şekil 3.15. Alınan ön ölçümlerde yönler arasında bağlaşım gözlenmiştir. Bu sebeple analizlerde ivmeölçerin üç bileşeni de kullanılmıştır. Modal analiz TGTÇ verilerinin tersinirlik ilkesi ile çok girdi çok çıktı (ÇGÇÇ) olarak kullanılması ile yapılmıştır. Kullanılan ivmeölçer PCB-356A16 modeli olup 100mV/g hassasiyetle, 1-5000Hz frekans aralığına ve 7.4 gr ağırlığa sahiptir. Sisteme uyarı darbe çekici ile verilmiştir. İstenilen frekans aralığını uyarabilmek için orta sert çekiç ucu (mavi uç) kullanılmıştır. Bu uç ile hangi frekansların uyarıldığı Şekil 16'da sunulmuştur.

Sistem üzerinden alınan ön ölçümlerden ilk dokuz frekansın 250Hz'in altında olduğu görülmüş ve 0-250Hz frekans aralığı ölçüm aralığı olarak tanımlanmıştır. Veri edinim sistemi basit kırışte olduğu gibi 3 saniyelik kayıtlar alacak şekilde düzenlenmiş ve 6 kHz'lik kayıt hızı ve 2.5kHz analog alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Hedef bölgesi 0-250Hz frekans aralığı olduğu için kayıtlar ayrıca 350Hz Butterworth sayısal alçak geçiren filtreye tabii tutulmuştur. Basit kırışe benzer şekilde, ivme kayıtlarından ilk üç saniyede dalganın tamamı ile sönümlenmediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple oluşacak katlanma hatasına engel olmak amacı ile de kayıtlar üstel pencerelemeye tabii tutulmuştur. Darbe çekici verileri, darbe bölgesi dışındaki gürültünün etkisini yok etmek amacıyla, dörtgen pencerelemeye tabii tutulmuştur. Her bir FYF için beşer kayıt kullanılarak rastgele hataların azaltılması amacı ile ortalama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş veriler kullanılarak oluşturulan FYF'ları Şekil 3.17'da sergilenmiştir.

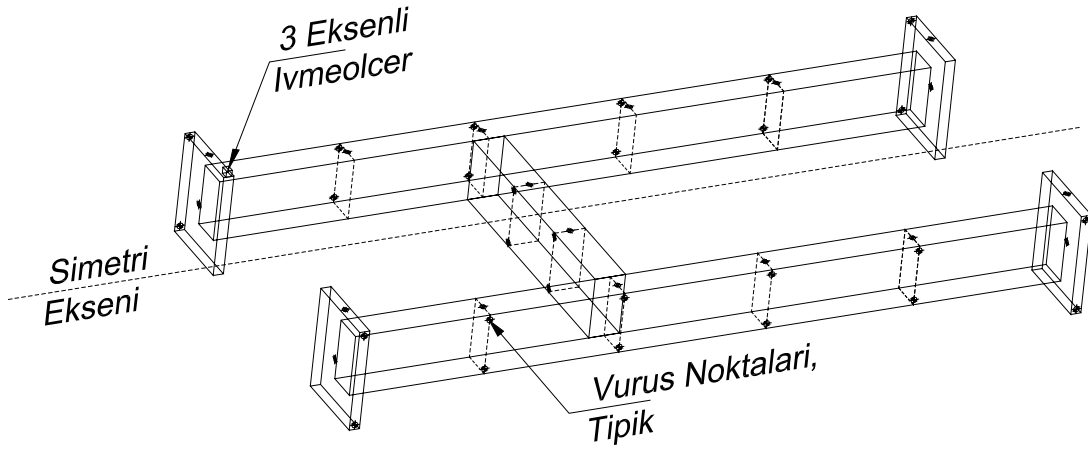


a) H-çerçevenin boyutları

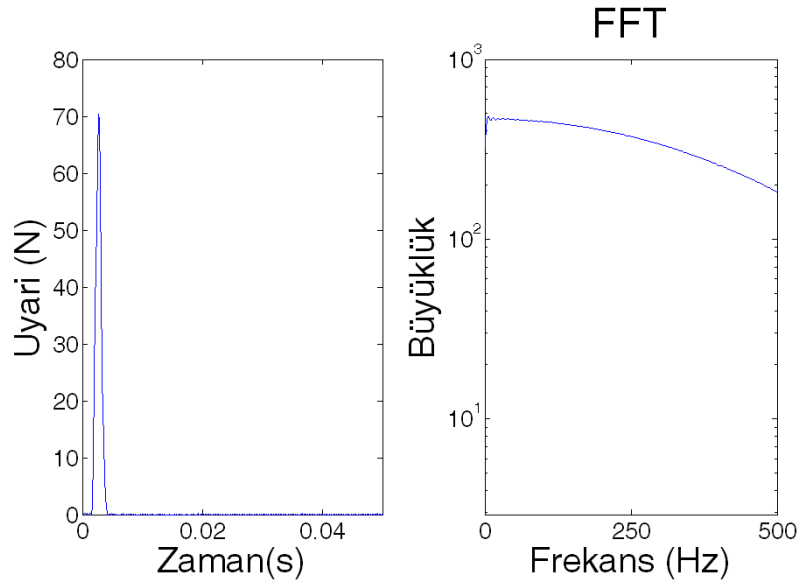


b) H-çerçevenin görünümü

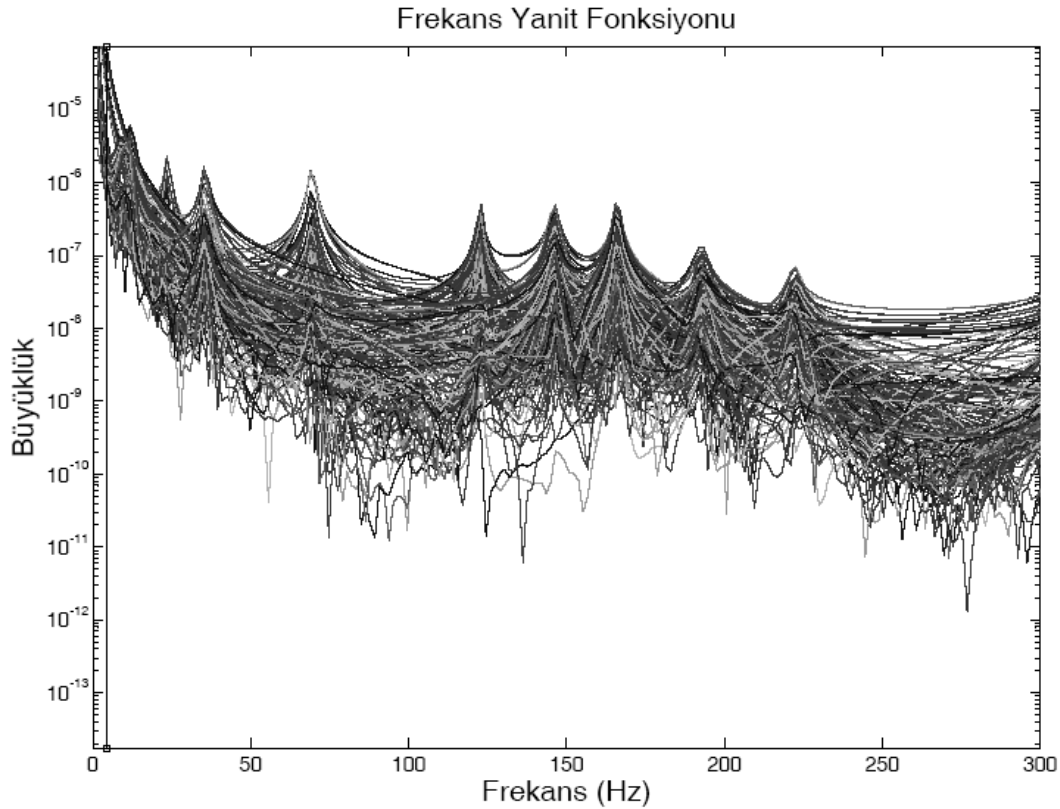
Şekil 3.14 H-çerçevenin fiziksel boyutları ve yerinde görünümü



Şekil 3.15 Okuma ve vuruş noktaları

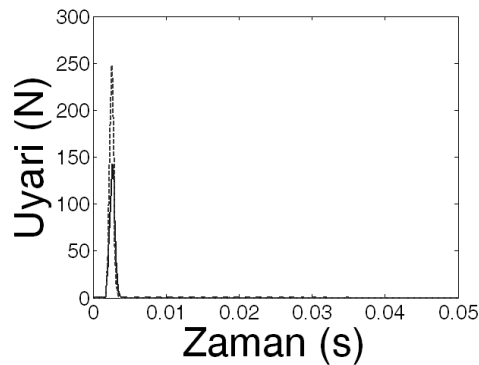


Şekil 3.16 Sisteme verilen dürtünün frekanslar üzerindeki tipik etkinliği



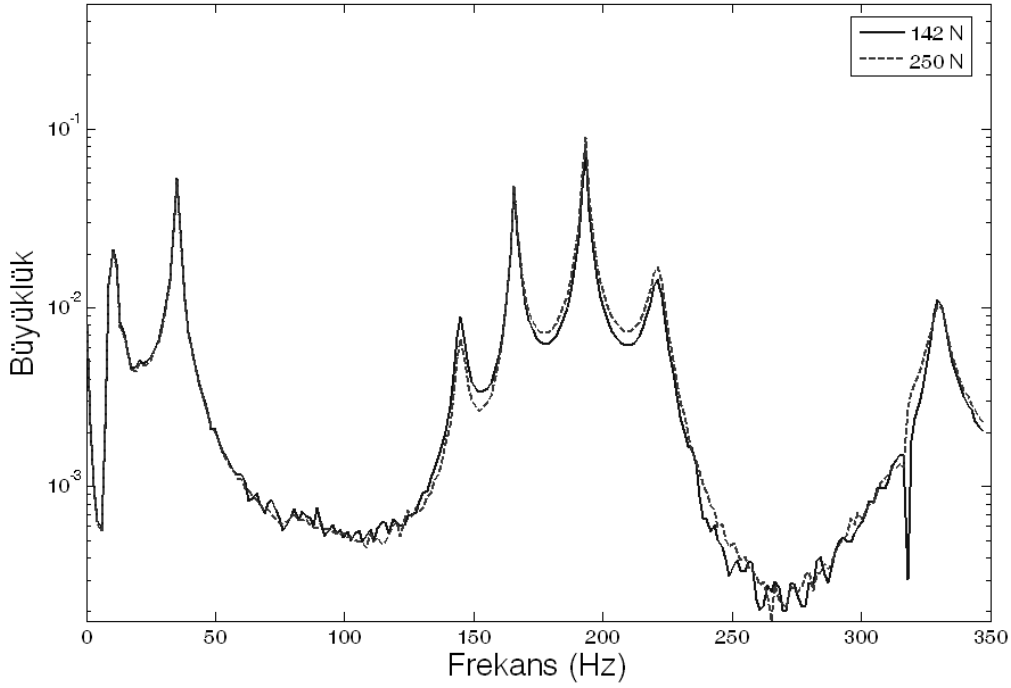
Şekil 3.17 Sistemin frekans yanıt fonksiyonları toplu halde

Sistemin modal analiz temel varsayımlarına uygunluğunun kontrol edilmesi amacı ile doğrusallık ve tersinirlik testleri uygulanmıştır. Doğrusallığın kontrolü amacıyla aynı noktaya farklı şiddetlerde uyarılar verilmiştir. Bu uyarılar ve karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Sistemin analiz edileceği frekans aralığında bu teste kontrol edilen en düşük 140N kuvvetindeki uyarılar için varsayım işlemektedir. Tersinirlik kontrolü için Şekil E3.19a'da gösterildiği şekilde karşılıklı iki noktadan uyarı ve tepkiler kaydedilmiş ve 5 ayrı okuma setinin ortalamaları alınarak FYF'lar oluşturulmuştur, Şekil 3.19b. Sonuçlar Maxwell tersinirlik ilkesinin işlediğini göstermektedir.



a) Doğrusallık için kullanılan uyarıların göreceli büyüklükleri

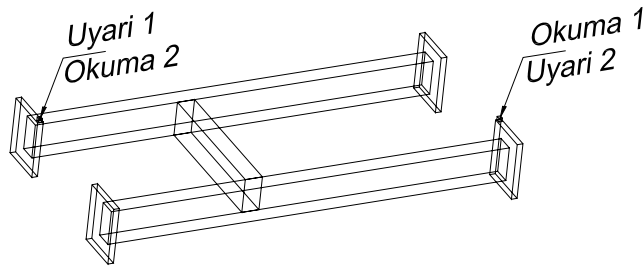
Doğrusallık Kontrolü



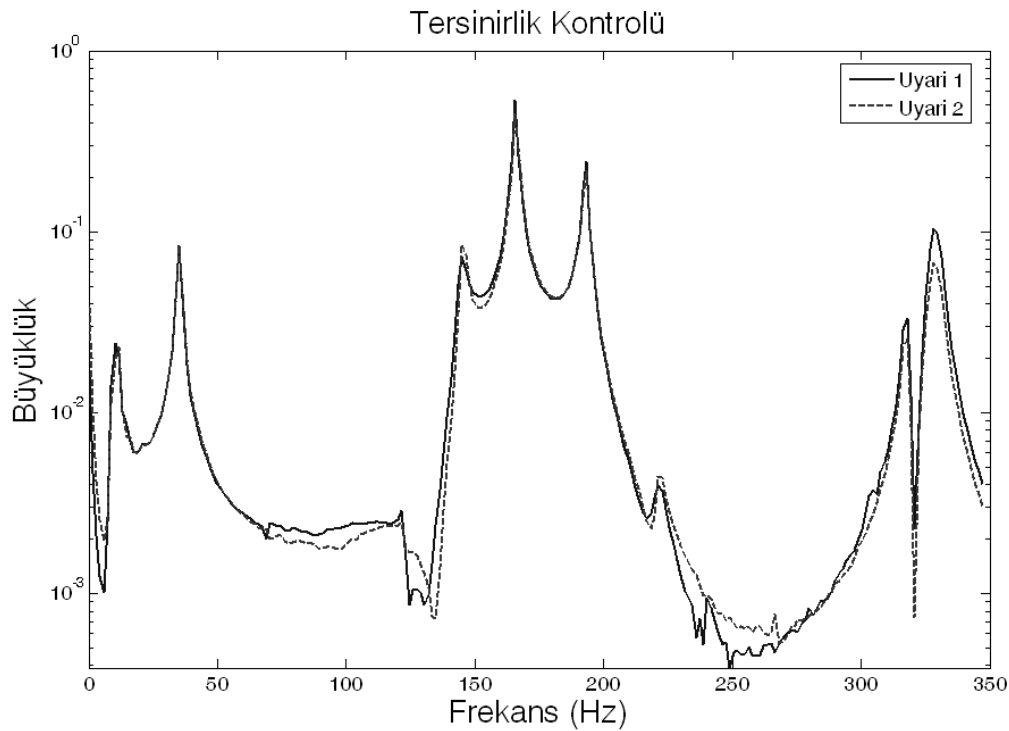
b) Frekans yanıt fonksiyonları

Şekil 3.18 Sistemin doğrusallık doğrulaması

Tanımlanan FYF'lara KMGF ile modal analiz yapılmıştır. Şekil 3.20'de gösterilen ve Tablo 3.4'de listelenen doğal frekanslar, sönüm oranları ve modal şekiller elde edilmiştir. Sunulan sönüm oranları üstel fonksiyonun etkisini yok edecek şekilde düzeltilmiştir (Fladung ve Rost 1997). H-çerçeve ayrıca 4 düğüm noktalı kabuk elemanları kullanılarak SAP2000 programı ile analiz edilmiş ve modal değişkenleri bulunmuştur. Çerçevenin fiziksel özellikleri kutu profillerin et kalınlığı ve uç plakaların boyutlarında ufak sapmalar dışında Şekil 3.14'de verildiği gibidir. Sistem üzerinde yapılan ölçümler imal edilmiş çerçevenin et kalınlığının tasarımda öngörüldüğü gibi 4 mm değil 2.4 mm olduğunu ortaya çıkarmıştır. Uç plakalarda ise imal edilmiş kalınlık ve boyutlardaki sapmalardan dolayı plaka kütlelerinin tasarımdan %5 daha fazla olduğu saptanıp sayısal modele işlenmiştir. Bu değişiklikler ile beraber çeliğin elastisite modülünde nominal 200 000MPa değerinden %2.5 daha küçük alınması ile SAP modelinden elde edilen modal değişkenler modal analiz sonuçları ile uyumlu hale gelmiştir. Sistemden elde edilen bütün modal şekiller sırası ve frekansları ile sonlu elemanlar modelinden de elde edilmiştir. X-modal tarafından üretilen modal şekillerde çerçevenin bacaklarının ucunda üçgen prizma şeklinde oluşumlar görünmesi fiziksel bir durum değildir. Bu oluşumlar kullanılan çözünürlük ile çerçevenin X-modal programında ancak bu şekilde çizilebilmesi sebebi ile oluşmuştur.



a) Seçilen karşılıklı uyari ve kayıt noktaları



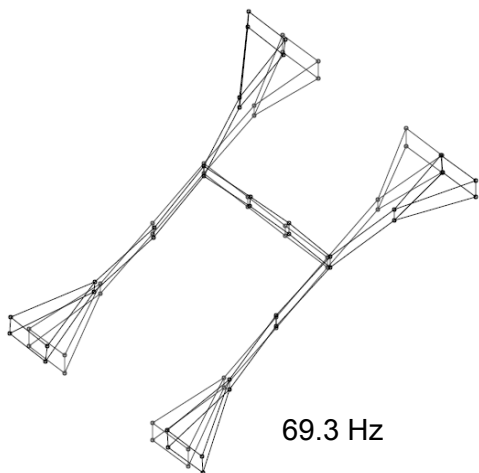
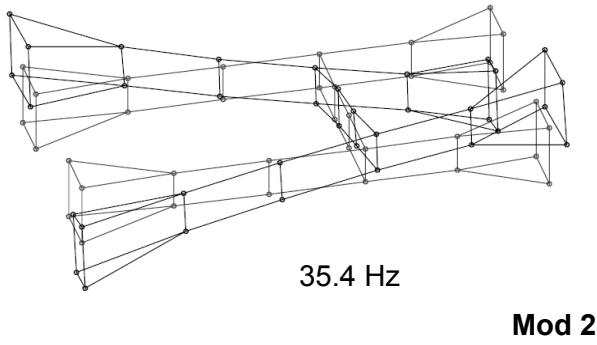
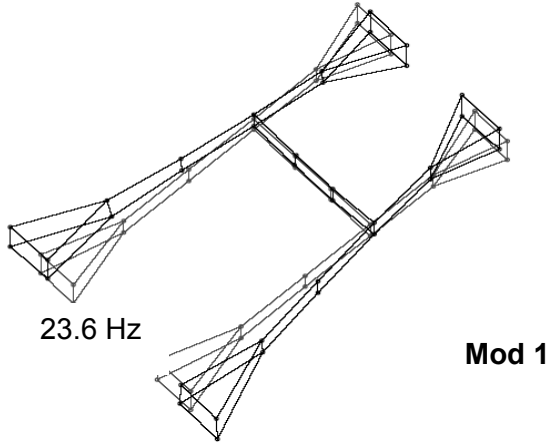
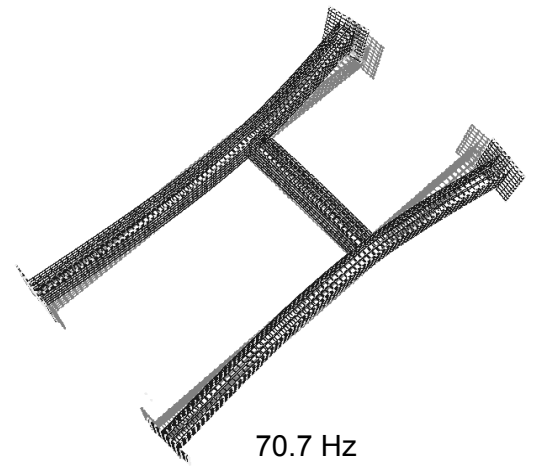
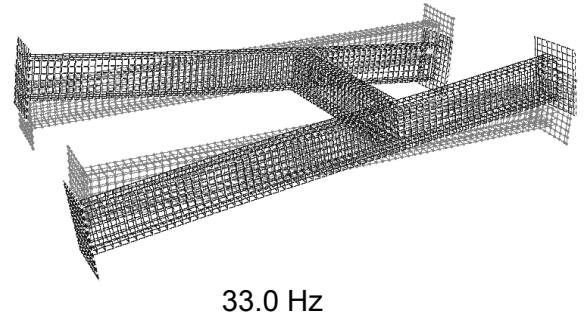
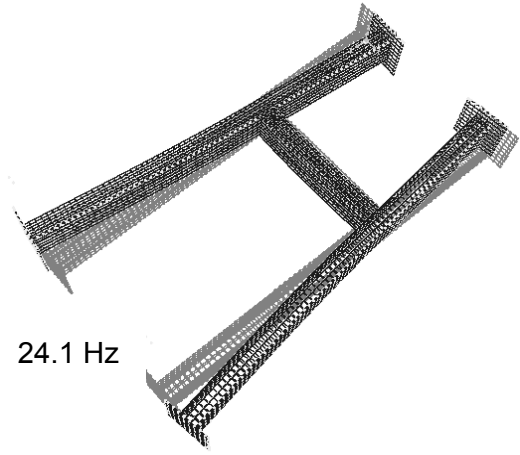
b) Frekans yanıt fonksiyonları
Şekil 3.19 Sistemin tersinirlik doğrulaması

Tablo 3.4 Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri

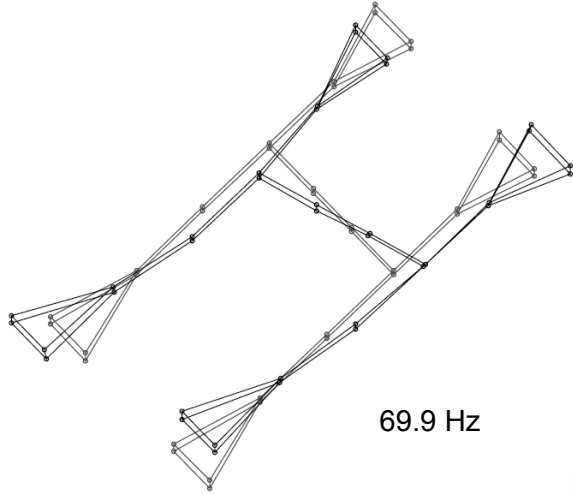
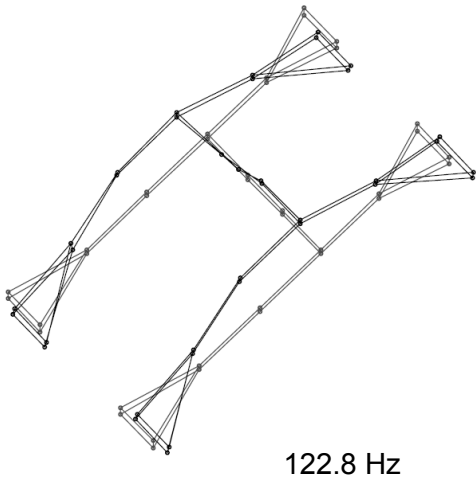
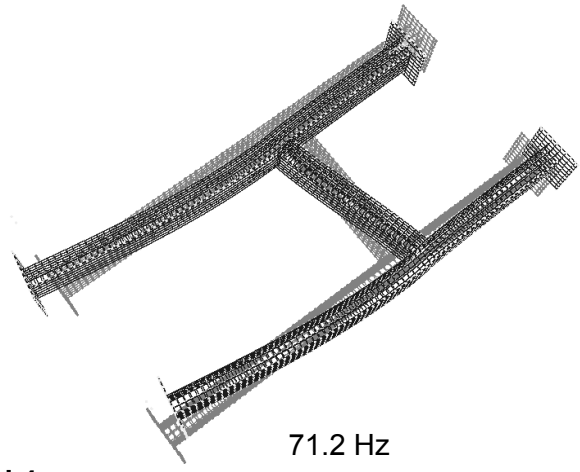
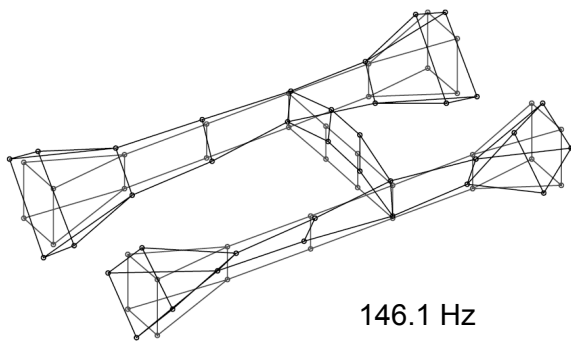
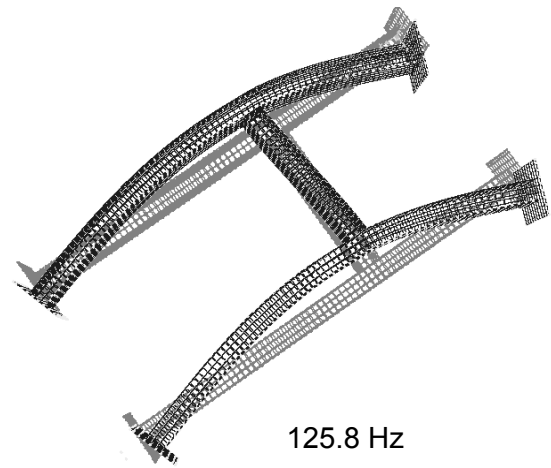
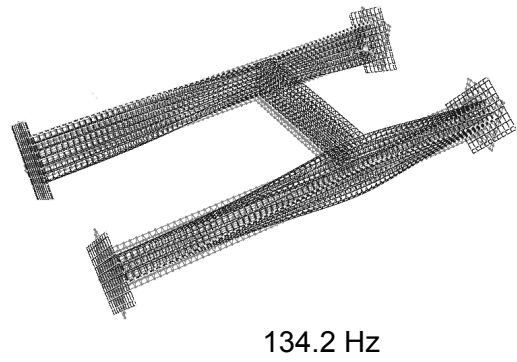
Mode #	Modal Analiz Frekans(Hz)	Sap Modeli Frekans(Hz)	Frekans Farkı (%)	Modal Analizden Elde Edilen Sönüm (%)
1	23.6	24.3	3.0	1.1
2	35.4	33.0	6.8	1.0
3	69.3	70.7	2.0	0.4
4	69.9	71.2	1.8	0.2
5	122.8	125.8	2.4	0.2
6	146.1	134.2	8.1	0.4
7	166.0	157.6	5.1	0.2
8	192.5	194.5	1.0	0.7
9	222.2	220.1	1.0	0.6

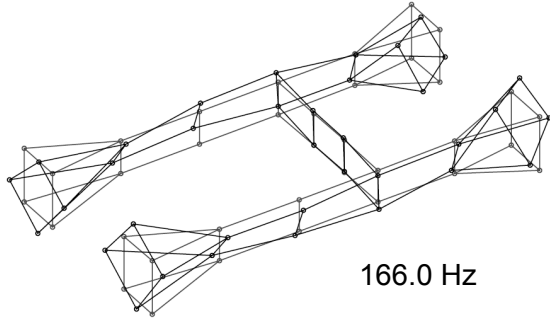
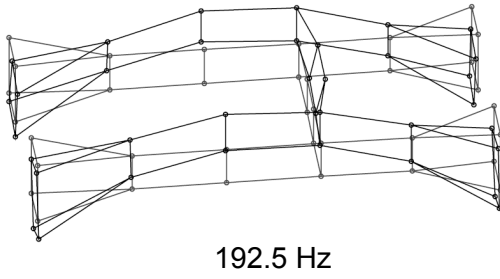
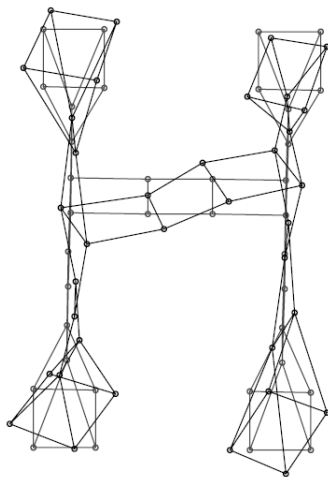
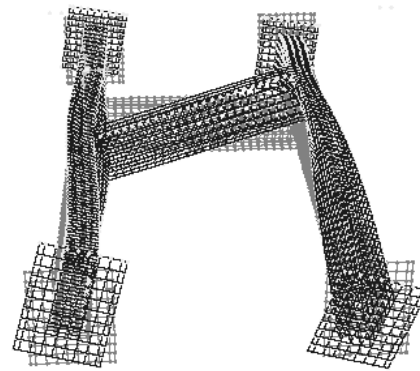
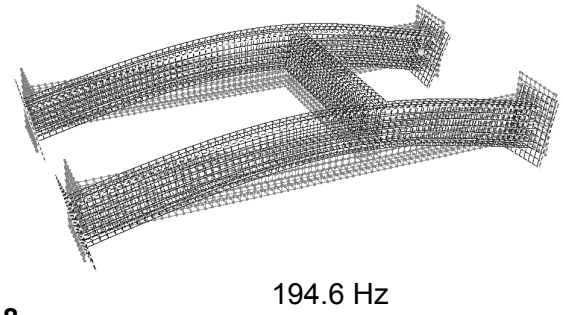
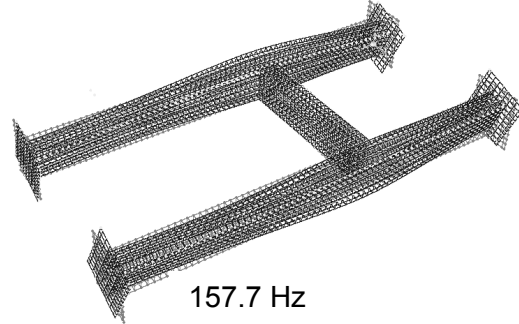
Çerçevadaki bağlaşım etkisi sebebi ile analiz yapılabilmesi için her bir noktadan birbirine dik üç yönde okuma alınması gerekmiştir. İstenilen çözünürlüğe ulaşmak için gerekli kayıt noktaları göz önüne alındığında gerekli okuma sayısı iki yüz mertebelerine çıkmaktadır. Bu şekilde yapılacak bir analiz ihtiyaç olmayan bir detay sağlamakla birlikte hem deney anlamında hemde analiz anlamında pahalya mal omaktadır. Bu sorunun önüne geçmek maksadı ile malzemenin aksenal uzama ve kısalmaya bağlı modlarının yüksek frekanslarda olacağı bilgisinden hareketle sistem, kutu profil boylarında ve uç plakalarda 2 boyutlu bir plaka gibi birleştirilmiştir. Örnek olarak Şekil 3.21'de uyarının tanımlanacağı noktayı ele alırsak, bu nokta için X-yönü uyarı kayıdı için uç plakasının orta noktasında yapılan vuruş, Y-yönü uyarısı için noktanın üzerine yapılan vuruş, Z-yönü uyarısı için ise noktanın bulunduğu düzlem üzerinde kutu profil yanağında nokta hizasında bulunan noktaya yapılan vuruş esas alınmıştır. Bu şekilde düşünüldüğünde örnek olarak sözü edilen bacak üzerindeki bütün X-yönü uyarıları esas olarak aynı vuruş karşılığıdır. Bu kabülün kontrolü amacı ile bacağın

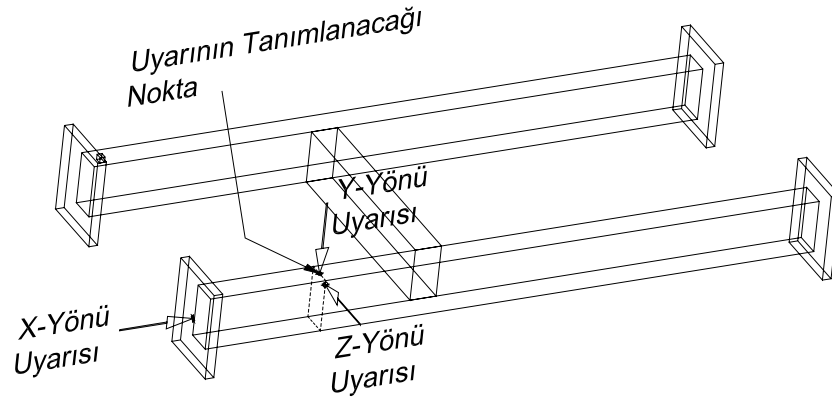
diğer ucundaki plakaya vuruş yapılmış ve bu iki vuruşun FYF'ları karşılaştırılmıştır, Şekil 3.22. Şekilden görüleceği üzere 150Hz'e kadar uyum mükemmeldir. Bu frekansdan sonra frekanslar doğru olmak ile beraber sönüm değerlerinde sapmalar oluşmaya başlamaktadır. Bu sapmalara sebebin özellikle üst frekansların yeterince uyarılmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada yapılan varsayımdan olan sapmalara rağmen modal analiz ve sonlu elemanlar model oldukça iyi uyum göstermektedir.

Modal Analiz Sonuçları:**SAP Analizi Sonuçları:**

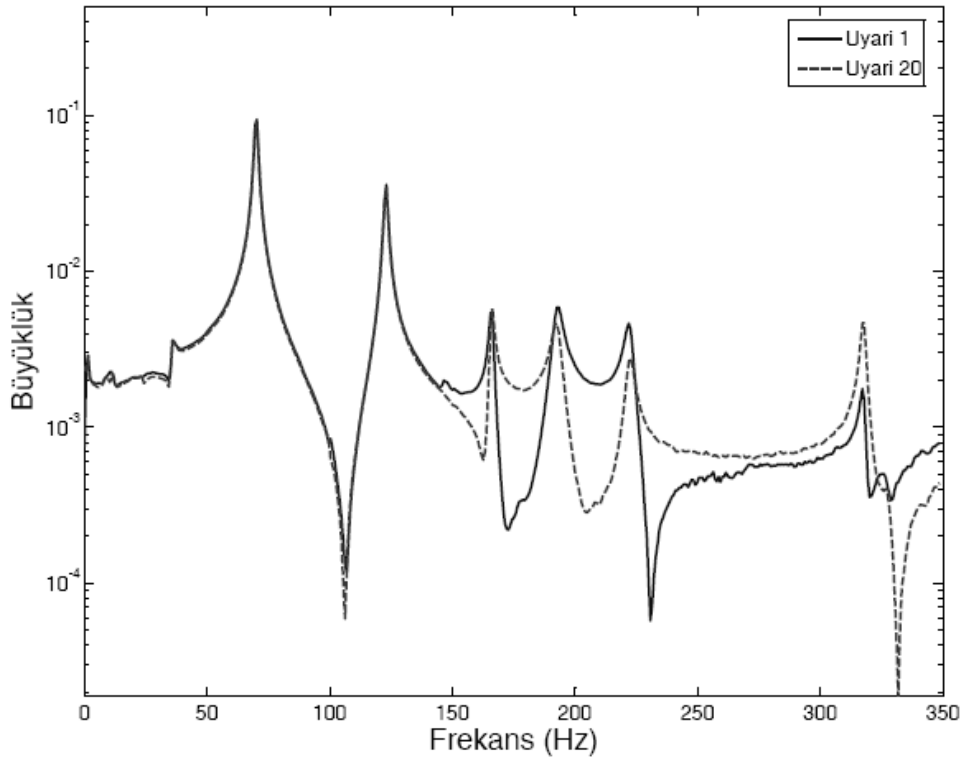
Şekil 3.20 H-çerçevenin modal analiz ve sonlu elemanlar sonucu elde edilen frekans ve şekilleri

Modal Analiz Sonuçları:**Mod 4****SAP Analizi Sonuçları:****Mod 5****Mod 6****Şekil 3.20** Şeklin devamı

Modal Analiz Sonuçları:**Mod 7****Mod 8****Mod 9****SAP Analizi Sonuçları:****Şekil 3.20: Şeklin devamı**



Şekil 3.21: Sistem okumalarının birleştirilmesinde kullanılan bileşenler



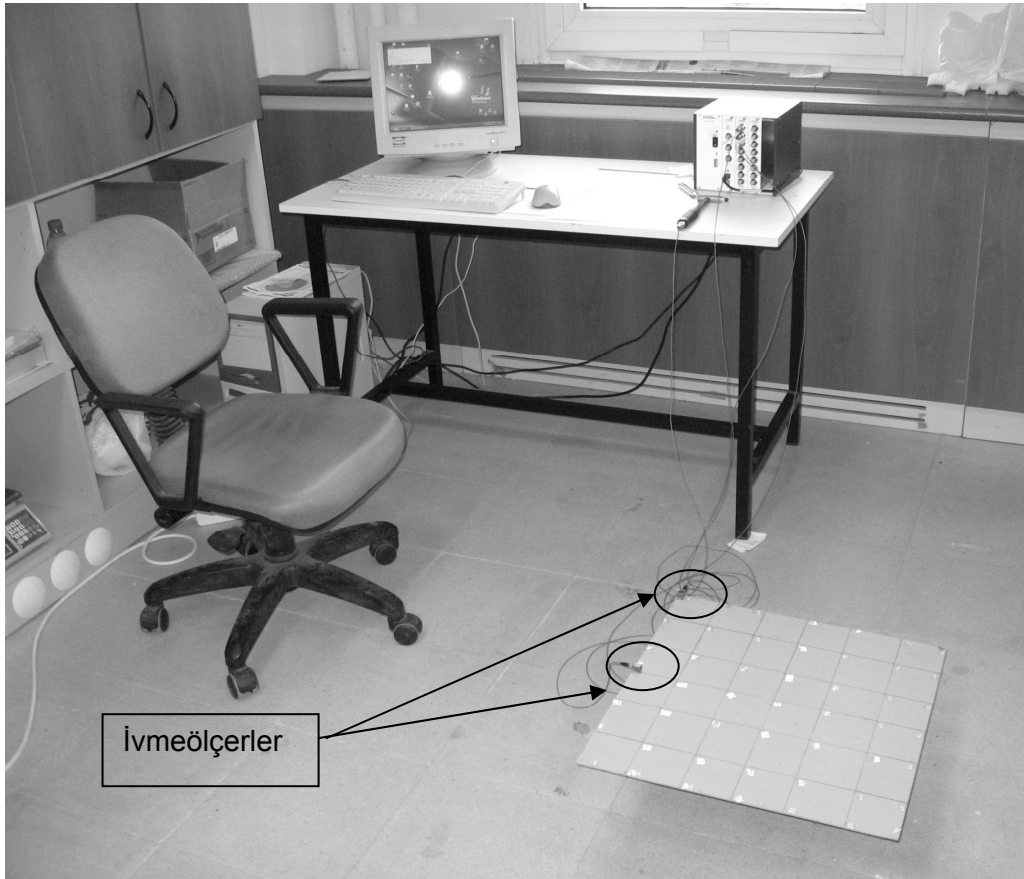
Şekil 3.22: Sistem verilerinin birleştirilmesinde kullanılan FYF'lerin karşılaştırılması

3.5 Kare Plaka

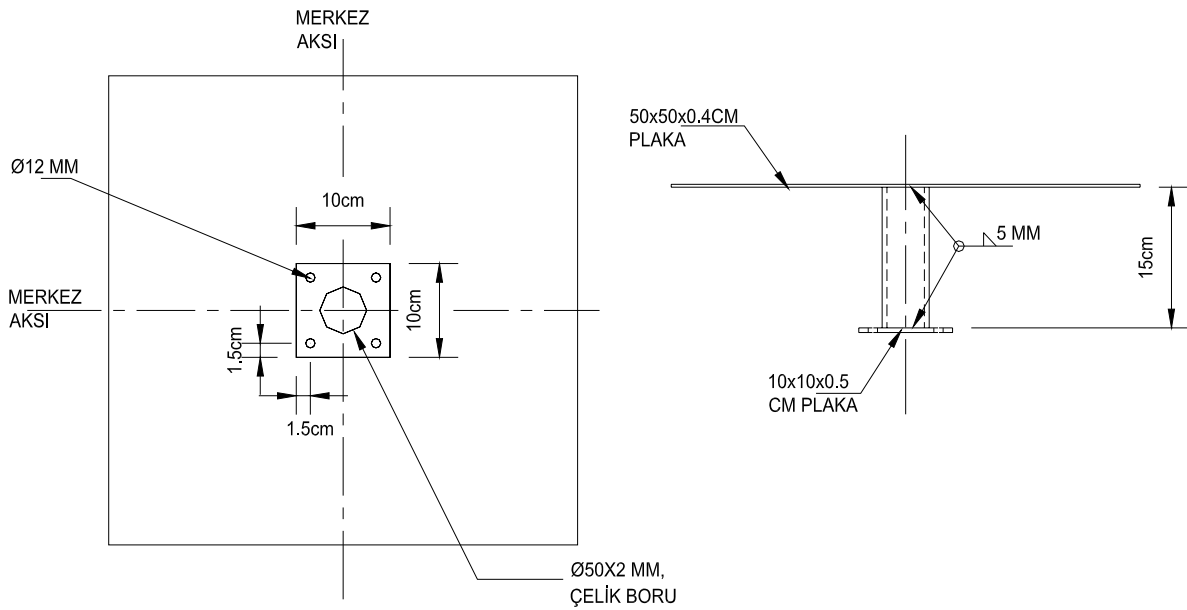
Modal analizde aynı frekansa sahip iki modal şekil (çakışık kök olarak da adlandırılır) olması durumunda sistemin çözümü için özelleşmiş algoritmalara ihtiyaç duyulur. Bu tip durumları çalışmak amacıyla simetrisi sebebi ile çakışık köklere sahip olan bir kare plaka deney programına alınmıştır. Sistemin fiziksel özellikleri Şekil 3.23a'da verilmiştir. Modal deney 49 noktadan darbe çekici ile uyarı verilip iki noktadan ivmeölçer ile okuma alınarak yapılmıştır. Kare plaka ve ölçüm sistemi beraber Şekil 3.23b'de sunulmuştur. Modal deney amacı ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen modal şekillerde göz önüne alınarak, iki adet ivmeölçer birisi köşe noktaya diğeri plakanın orta ekseninde uç noktaya olmak üzere yerleştirilmiştir. İvmeölçer ve vuruş noktalarının yerleri Şekil 3.24'de gösterilmiştir. Alınan ön ölçümlerde yönler arasında bağlaşım gözlenmediğinden analizlerde ivmeölçerlerin

sadece kare plaka düzlemine dik bileşeni kullanılmıştır. Modal analiz, tek giriş tek çıkış (TGTÇ) verilerinin tersinirlik kullanılarak çok giriş çok çıkış (ÇGÇÇ) gibi kullanılması ile yapılmıştır. Seçilen ivmeölçerler PCB-333B42 modeli olup 500mV/g hassasiyete, 0.5-3000 Hz frekans aralığına ve 7.5 gr ağırlığına sahiptir. Sisteme uyarı darbe çekicinin orta sertlikteki uç (mavi uç) ile verilmiştir. Bu şekilde uyarılan frekans aralığı Şekil 3.25’de sunulmuştur.

Plakadan alınan ön ölçümlerden ilk sekiz frekansın 200Hz’nin altında olduğu görülmüş ve 0-250 Hz frekans aralığı ölçüm aralığı olarak tanımlanmıştır. Veri edinim sistemi diğer deney düzeneklerinde olduğu gibi 3 saniyelik kayıtlar alacak şekilde düzenlenmiş ve 6 kHz’lik kayıt hızı ve 2.5 kHz analog alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Hedef bölgesi 0-200Hz frekans aralığı olduğu için kayıtlar ayrıca 250Hz Butterworth sayısal alçak geçiren filtreye tabii tutulmuştur. Kare plaka ivme kayıtlardan ilk üç saniyede dalganın tamamı ile sönümlenmediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple oluşacak katlanma hatasına engel olmak amacı ile kayıtlar üstel pencerelemeye tabii tutulmuştur. Darbe çekici verileri, darbe bölgesi dışındaki gürültünün etkisini yok etmek amacıyla, dörtgen pencerelemeye tabii tutulmuştur. Her bir FYF için beşer kayıt kullanılarak rastgele hataların azaltılması amacı ile ortalama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş veriler kullanılarak oluşturulan FYF’ları toplu şekilde Şekil 3.26’da sergilenmiştir.



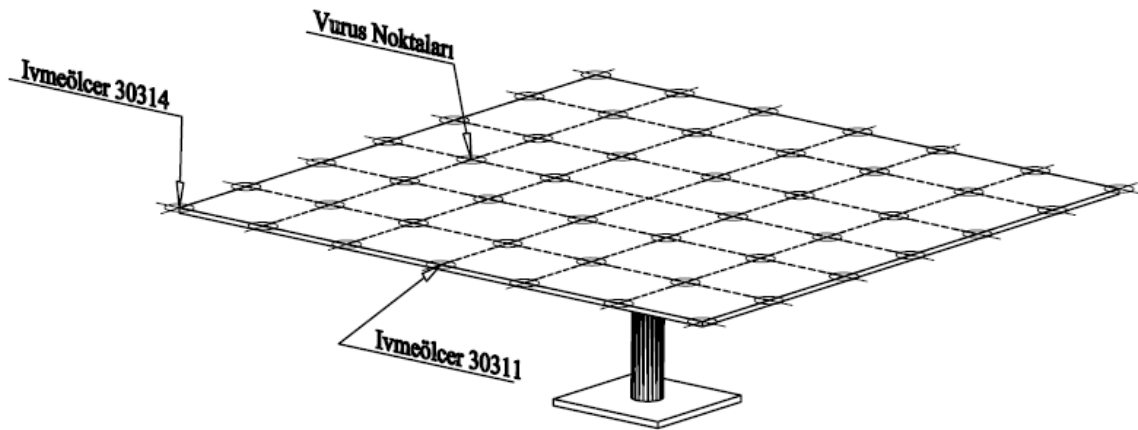
a) Kare plaka ölçüm cihazları, alıcılar ve kare plaka



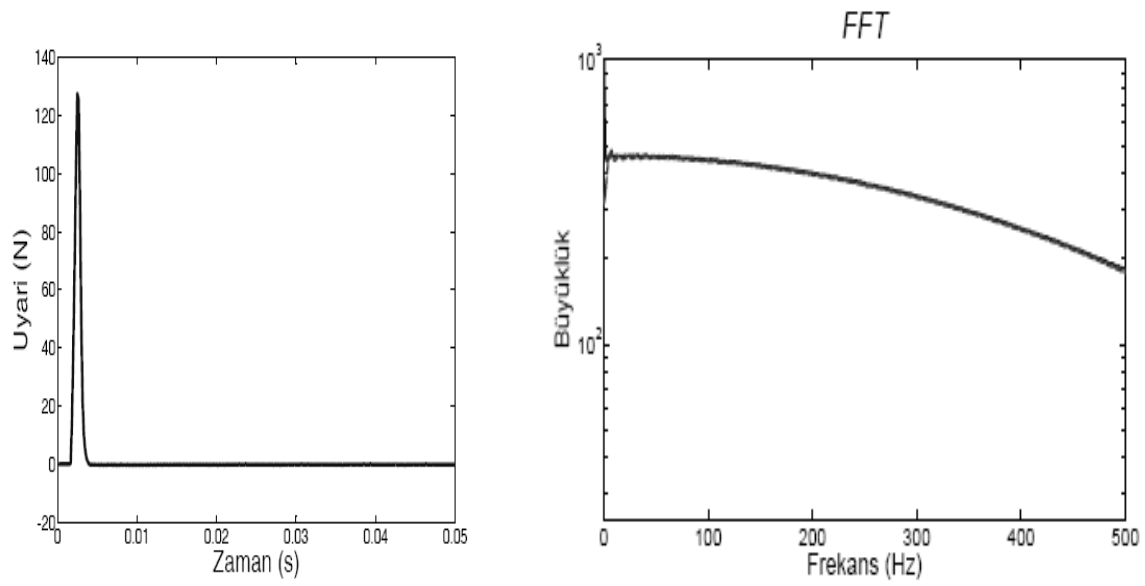
b) Kare plaka boyutları

Şekil 3.23 Kare plakanın boyutları ve görünüm

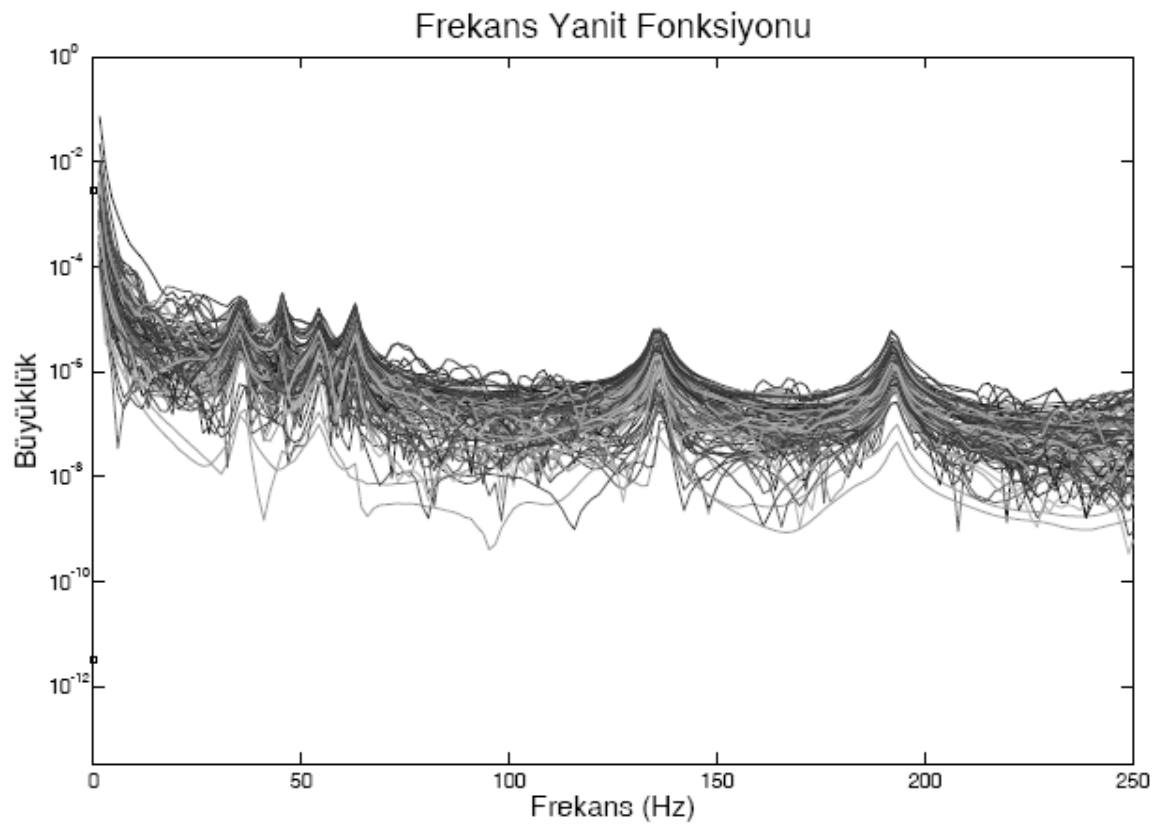
Sistemin modal analiz temel varsayımlarına uygunluğunun kontrol edilmesi amacı ile doğrusallık ve tersinirlik testleri uygulanmıştır. Doğrusallığın kontrolü amacı ile uyarı büyüklükleri 49 N ve 79 N olan iki okuma karşılaştırılmıştır, Şekil 3.27. Bu uyarıların FYF'larından görüldüğü üzere, Şekil 3.28, plakanın rezonans bölgelerinde iyi bir uyum vardır. Buradan sonuçla doğrusallığın sağlandığı sonucuna varılmıştır. Tersinirlik kontrolü için plakadan Şekil 3.29'da gösterildiği üzere karşılıklı iki noktadan uyarı ve okuma alınmıştır. Oluşturulan FYF'ların karşılaştırılması, Şekil 3.30, ile sistemin tersinirlik kontrolü yapılmıştır. Yine rezonans bölgeleri göz önüne alınarak sistemin tersinirliği sağladığı kabul edilmiştir.



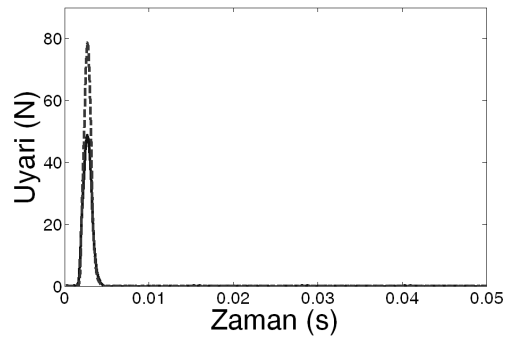
Şekil 3.24 Kare plaka için ivmeölçer ve vuruş noktaları



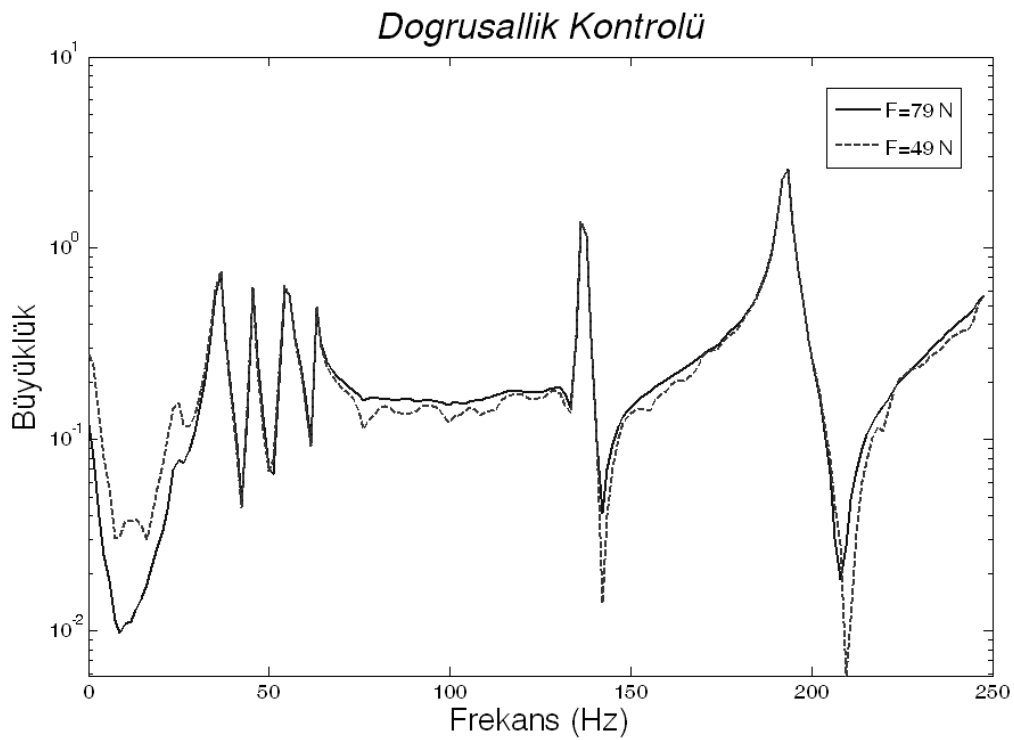
Şekil 3.25 Sisteme verilen dürtünün frekanslar üzerinde tipik etkinliği



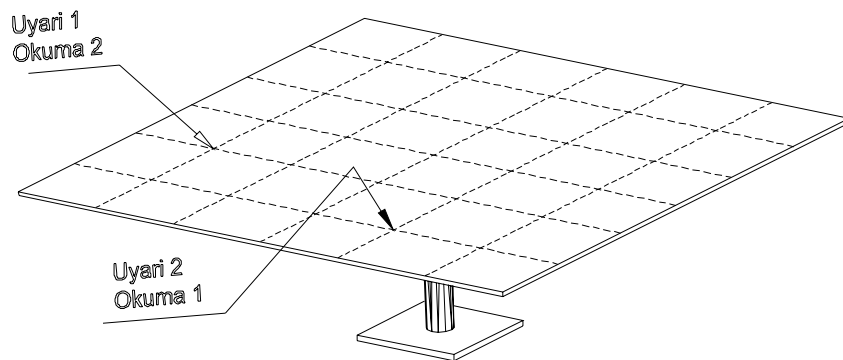
Şekil 3.26 Kare plakanın frekans yanıt fonksiyonlarının toplu görünüşü



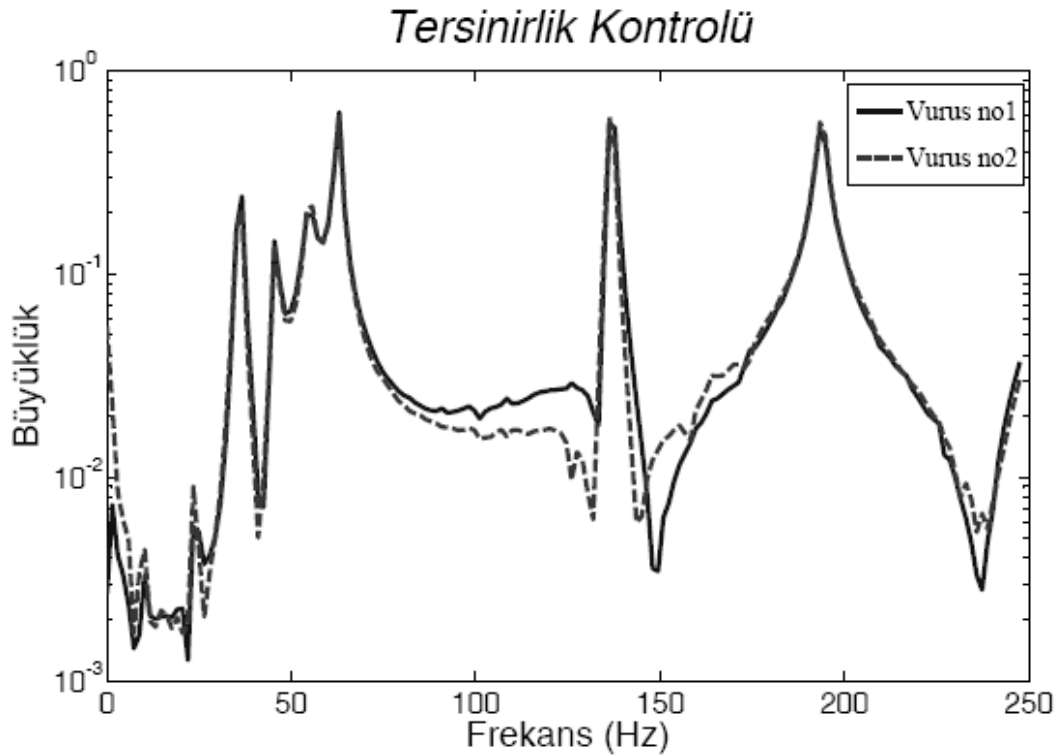
Şekil 3.27 Tersinirlik kontrolü için sisteme verilen dürtülerin büyüklüğü



Şekil 3.28 Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları



Şekil 3.29 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okuma noktaları

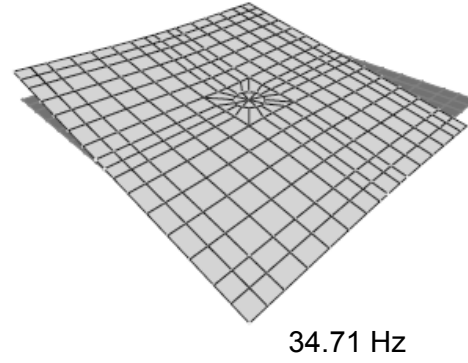
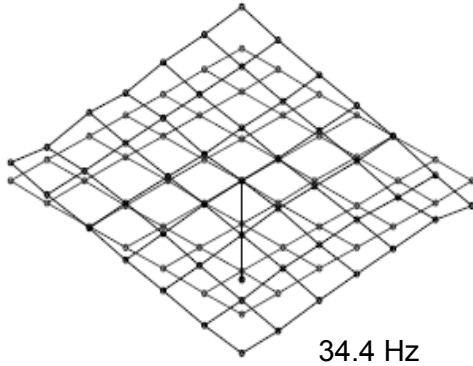
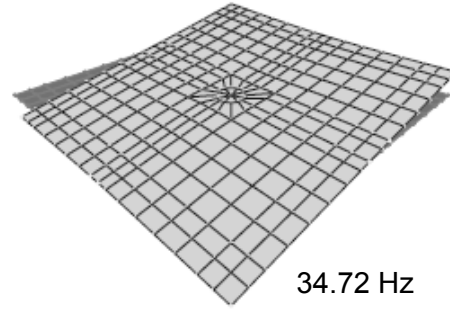
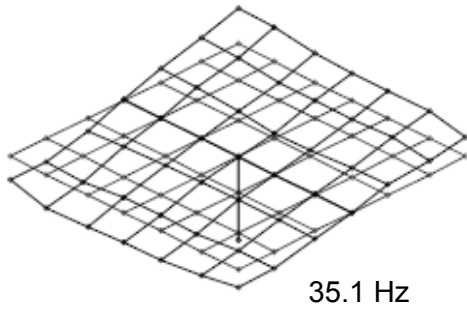
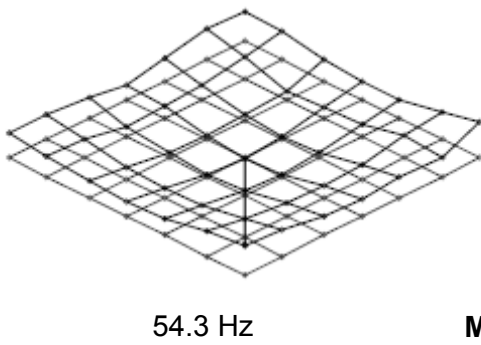
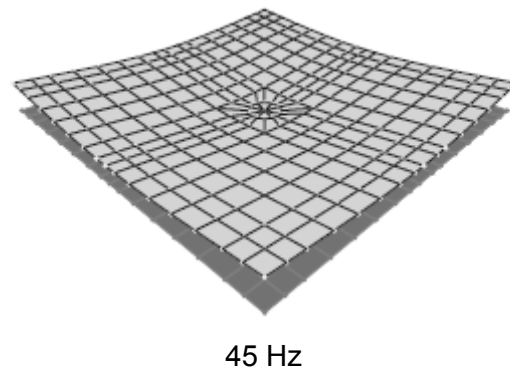


Şekil 3.30 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okumalara karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları

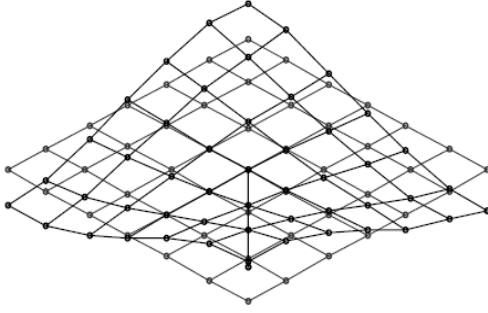
Tablo 3.5 Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri

Mode #	Modal analiz Frekans (Hz)	SAP Modeli Frekans (Hz)	Frekans Farkı (%)	Modal Analizden Elde Edilen Sönüm (%)
1	34.4	34.71	1.0	1.9
2	35.1	34.72	1.2	2.4
3	54.3	45	17.2	0.1
4	45.4	53.1	16.9	0.6
5	62.7	77.1	23.1	-
6	136.6	139.07	1.8	0.2
7	135.5	139.08	2.6	0.4
8	192.4	182.5	5.2	0.3

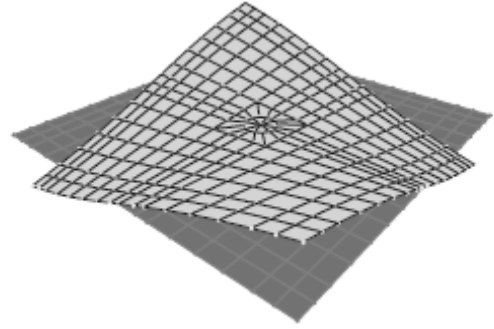
Tanımlanan FYF'ları KMGF ile modal analize tabii tutulmuştur. Şekil 3.31'de gösterilen ve Tablo 3.5'de listelenen doğal frekanslar, sönüm oranları ve modal şekiller elde edilmiştir. Sönüm oranları üstel fonksiyonun etkisini yok edecek şekilde düzeltilmiştir (Fladung ve Rost 1997). Kare plaka 4 düğüm noktalı kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiş, SAP2000 programı ile analiz edilmiş ve modal değişkenleri bulunmuştur. SAP2000 analiz programı ile X-modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında 3. ve 4. Modların frekans değerlerinin yer değiştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 5. modun frekansında %23 bir fark vardır. Sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan iyileştirmeler bu yer değiştirmeyi ve farkı düzeltmemiştir. Bu sebeple sonlu elemanlar modeli nominal değerlerin kullanıldığı hali ile korunmuştur.

Modal Analiz Sonuçları:**SAP Analizi Sonuçları:****Mod 1****Mod 2****Mod 3**

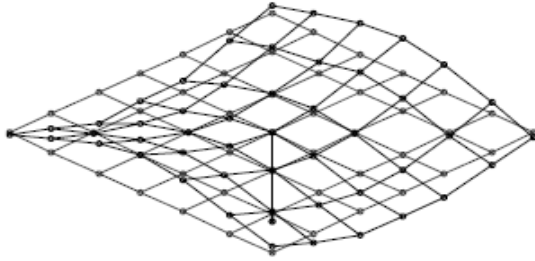
Şekil 3.31: Kare plakanın modal analiz ve sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekans ve modal şekillerinin karşılaştırılması

Modal Analiz Sonuçları:

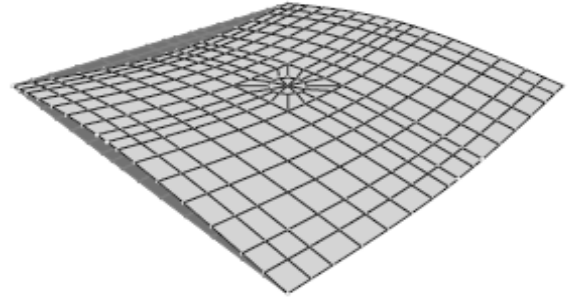
45.4 Hz

Mod 4**SAP Analizi Sonuçları:**

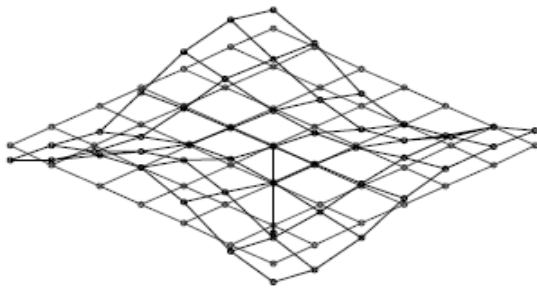
53.1 Hz



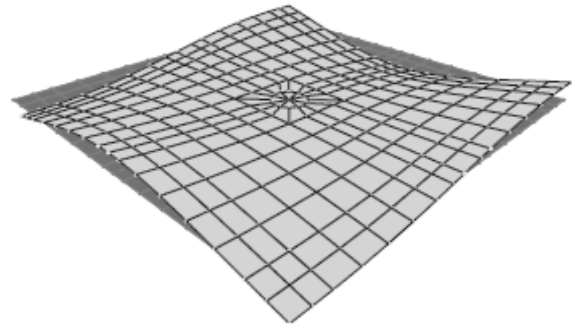
62.7 Hz

Mod 5

77.1 Hz

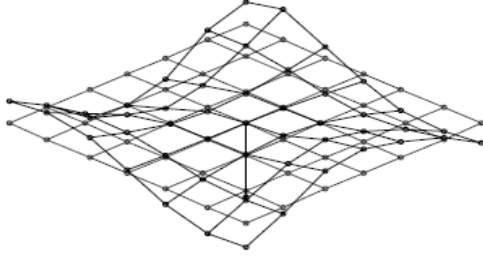


136.6 Hz

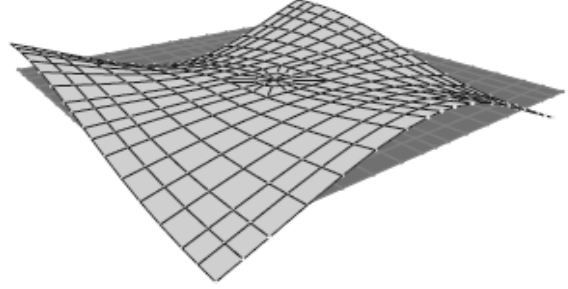
Mod 6

139.07 Hz

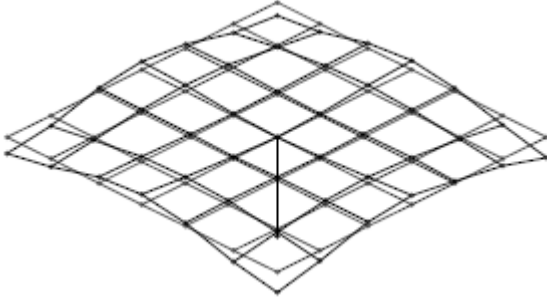
Şekil 3.31: Devam

Modal Analiz Sonuçları:

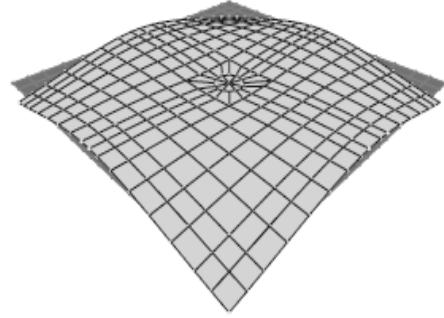
135.49 Hz

Mod 7**SAP Analizi Sonuçları:**

139.08 Hz



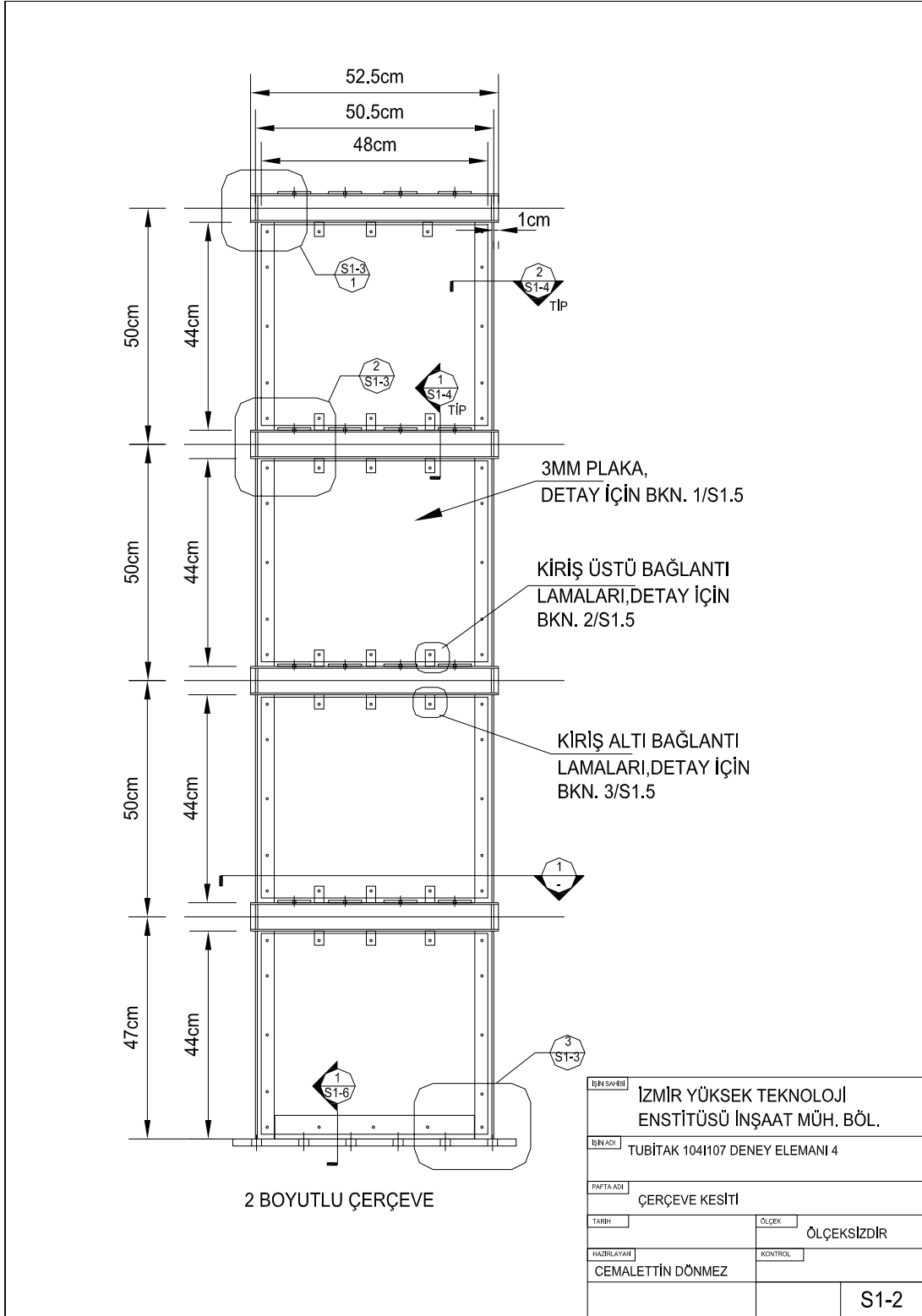
182.5 Hz

Mod 8

192.4 Hz

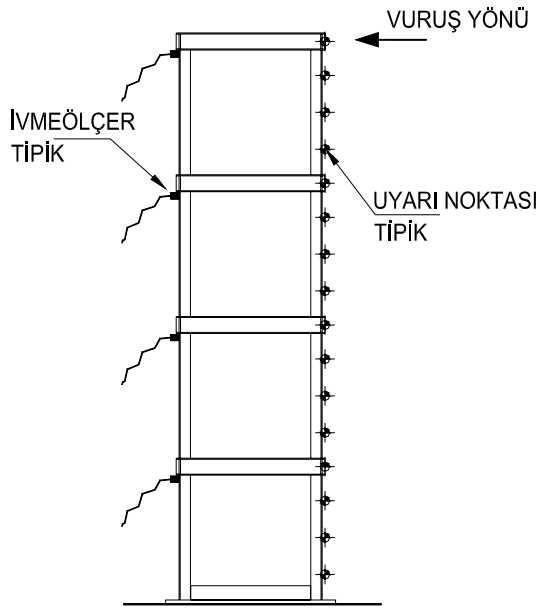
Şekil 3.31: Devam**3.6 Düzlem Çerçeve**

Çalışma kapsamında öngörölmüş son basit sistem olan 2-boyutlu çelik çerçevenin detayları Şekil 3.32 ve Ek. B'de sunulmuştur. Genel olarak tanımlanacak olursa sistem 4 katlı tek açıklıklı bir çerçivedir. Sistem iki amaçla tasarlanmıştır: i) Doğrusal ve zamanda değişmez sistemlerin deneyleri konusunda tecrübe edinilmesi, ii) Yapısal benzerliği dolayısı ile bir sonraki çalışma paketi olan 2-boyutlu betonarme çerçeveler için deneysel düzenek ve yapısal davranış konusunda ön bilgi sağlanması. Sistem açıklıkların dolgulu ve dolgusuz davranışlarını gözlemleyebilmek amacı ile boş halinde moment-çerçevesi ve çelik paneller ile doldurulması sayesinde ise dolgulu-çerçeve şeklinde olarak yapılandırılmıştır. Her iki durumda da kat seviyelerinde yaklaşık 20 kg kütle eklenmiştir.

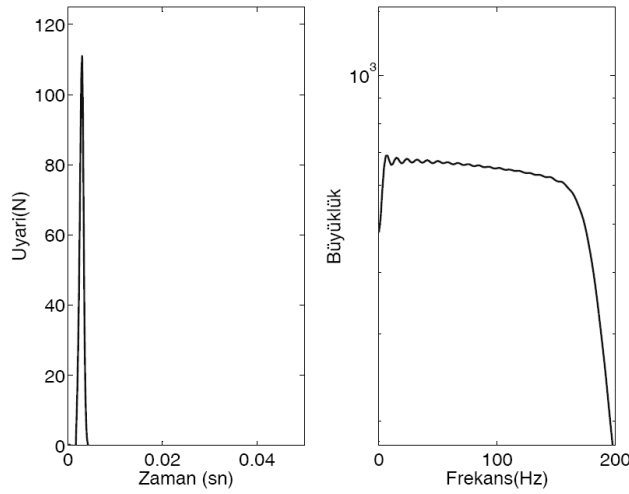


Şekil 3.32 Düzlem çerçevenin boyutları

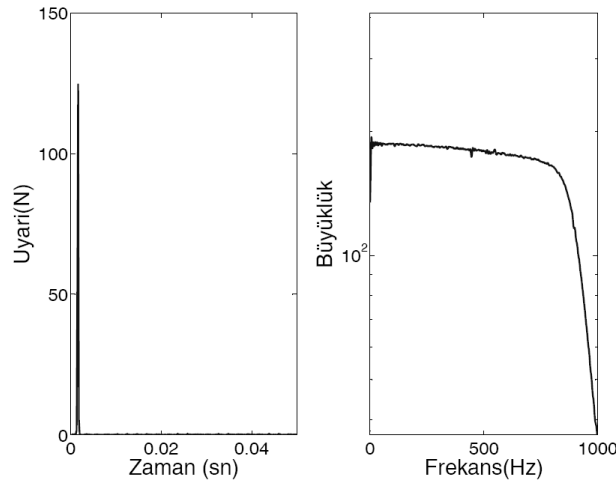
Sistemin okuma ve uyarı noktaları dağılımı Şekil 3.33a'da sunulmuştur. Modal analiz tek giriş çok çıkış (TGÇÇ) verilerinin tersinirlik ilkesi ile çok giriş çok çıkış (ÇGÇÇ) gibi kullanılması ile yapılmıştır. Bu amaçla darbe çekici ve her bir deney için dörder adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçerler PCB-393B04 ve PCB-333B42 modelleri olup sırasıyla 1000 ve 500 mV/g hassasiyetlere, 0.05-450 ve 0.5-3000 Hz frekans aralıklarına ve 50 ve 7.5 gr ağırlıklara sahiptir. Sisteme dürtü darbe çekici ile verilmiştir. Moment-çerçevesi hali için 393B04 ivmeölçerleri, dolgulu-çerçeve hali için ise 333B42 ivmeölçerleri kullanılmıştır. İlk denemede uyarı enerjisinin istenilen frekans aralığı civarında kalabilmesini sağlayabilmek için moment-çerçevesi durumunda en yumuşak (kırmızı), dolgulu-çerçeve olması durumunda ise en sert (metal) çekiç ucu kullanılmıştır. Bu uçlar ile uyarılan frekans aralıkları Şekil 3.33b ve c'de gösterilmiştir. Çerçevelerin fiziksel görüntüleri Şekil 3.34'de sunulmuştur. Çerçevelerin düzlem dışı kararlılığını sağlamak amacı ile 4.kat giriş seviyesinde her iki yönden düzlem yüzden harekete izin verip buna dik yönde hareketi engelleyen tekerler kullanılmıştır.



a) Uyarı ve okuma noktaları



b) Moment-Çerçevesi sistemine verilen dürtünün frekanslar üzerindeki tipik etkinliği



c) Dolgulu –Çerçeve sistemine verilen dürtünün frekanslar üzerindeki tipik etkinliği

Şekil 3.33 Düzlem çerçeve modal deney okuma noktaları ve uyarıların etkinliği

Uyarı noktası sayısı simetriyi kullanacak sayıda ayarlanıp Şekil 3.33a'da gösterildiği üzere bir yüzden 16 ayrı noktadan yapılmıştır. Okumalar ise diğer yüzden kat seviyelerinden 4 ivmeölçer vasıtası ile alınmıştır. Sistemin modal şekilleri kurulurken uyarı verilmeyen diğer yüzdeki noktaların uyarı verilen yüzdeki noktalar ile aynı hareketi yaptığı gerçeği/kabülü kullanılmıştır. Kat seviyelerindeki uyarılar fiziksel olarak mümkün olmaması sebebi ile teorik olarak düşünülen noktaların 3'er santim altına yapılmıştır. Sistemin modal deneyinin yapılması amacıyla veri edinim sistemi 3 saniyelik kayıtlar alacak şekilde düzenlenmiş ve 6kHz'lik kayıt hızı ve 2.5 kHz'lik analog alçak geçiren filtre kullanılmıştır.

Veriler yüksek frekanslardan kurtulmak için moment-çerçevesi ve dolgulu-çerçeve için sırası ile 200Hz ve 1000Hz Butterworth sayısal alçak geçiren filtreye tabii tutulmuştur. İvme kayıtlardan ilk üç saniyede dalganın tamamı ile sönümlenmediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple oluşacak sızıntı hatasına engel olmak amacı ile de kayıtlar üstel pencerelemeye tabii tutulmuştur. Darbe çekici verileri, darbe bölgesi dışındaki gürültünün etkisini yok etmek amacıyla, dörtgen pencerelemeye tabii tutulmuştur. Her bir frekans yanıt fonksiyonu (FYF) için beşer kayıt kullanılarak rastgele hataların azaltılması amacı ile ortalama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş veriler kullanılarak oluşturulan FYF'lar moment-çerçevesi için Şekil 3.35'de sergilenmiştir.



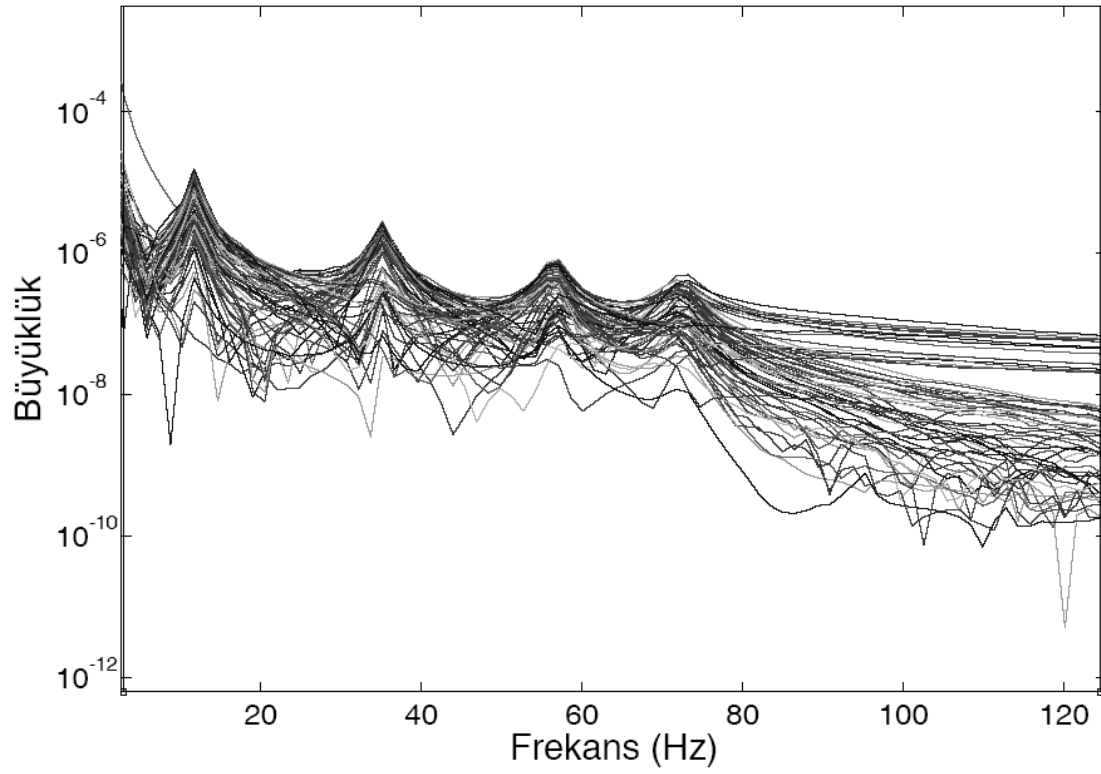
a) Moment Çerçevesi



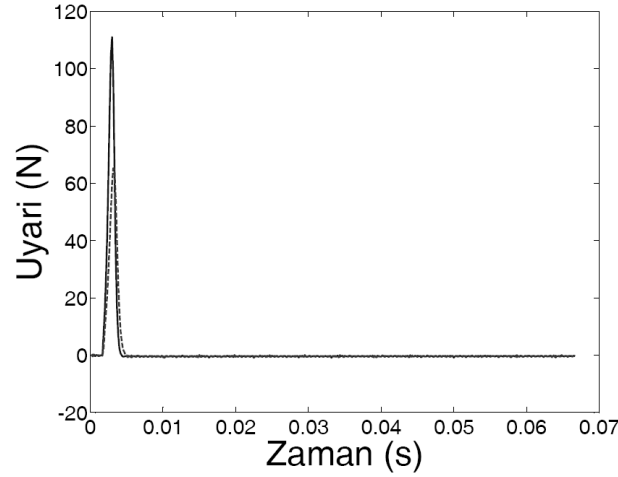
b) Dolgulu Çerçeve

Şekil 3.34 Çerçevelerin görünüşleri

Frekans Yanıt Fonksiyonu

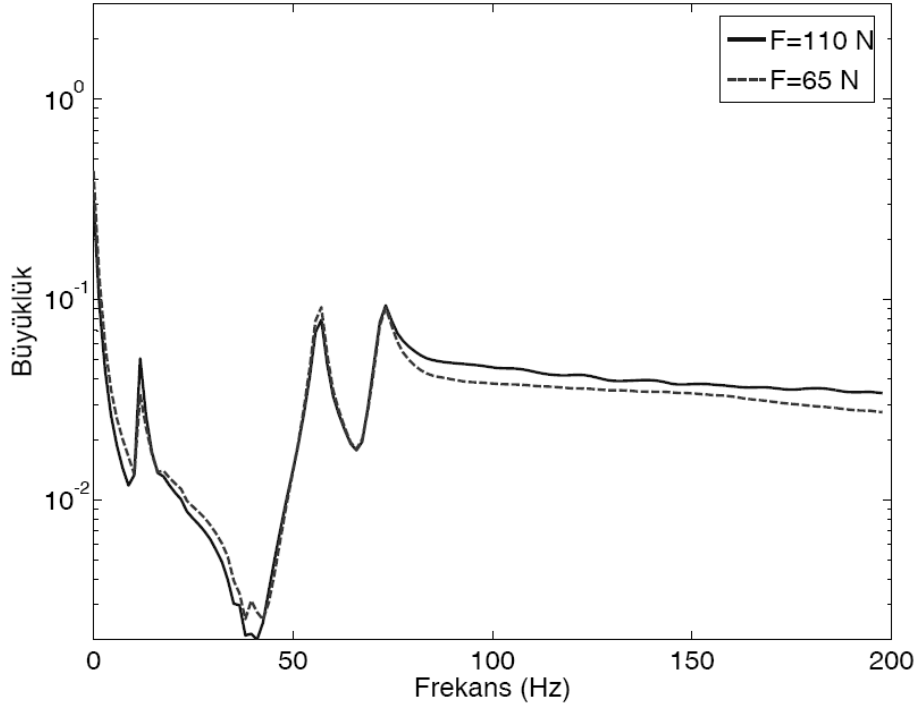
**Şekil 3.35** Moment-Çerçevesi frekans yanıt fonksiyonlarının toplu görünüşü

Moment-çerçevesinin modal analizin temel varsayımlarına uygunluğun kontrol edilmesi amacı ile doğrusallık ve tersinirlik testlerine tabii tutulmuştur. Doğrusallık karşılaştırması amacıyla 3. kat seviyesinde farklı şiddetlerde uyarılar verilerek ölçümler yapılmıştır. Uyarı büyüklükleri 65 N ve 110 N olan iki okuma karşılaştırılmıştır, Şekil 3.36a ve b. Şekilden görüleceği üzere doğrusallıktan sapma olmamaktadır. Tersinirlik kontrolü için Şekil 3.37'de gösterildiği şekilde karşılıklı iki noktadan uyarı ve tepkiler kaydedilmiş ve 4 ayrı okuma setinin ortalamaları alınarak FYF'lar oluşturulmuştur. Keza şekilden gözleneceği üzere sistem içinde kabul edilebilir sınırlar içerisinde tersinirlik ilkesi geçerlidir.



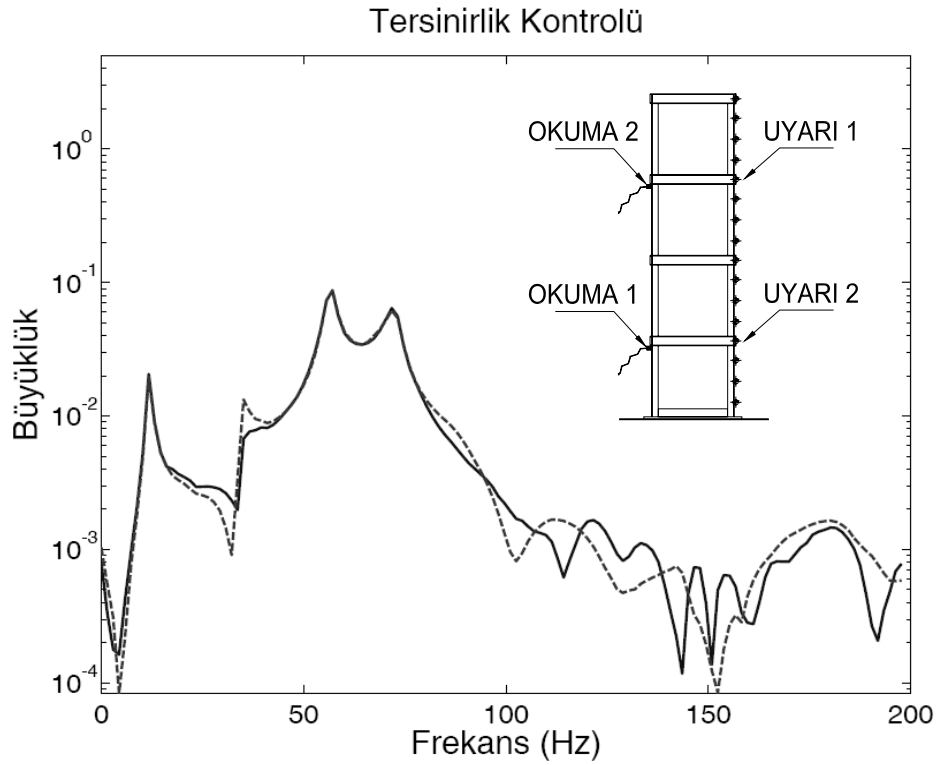
a) Doğrusallık kontrolü için moment-çerçeve sistemine verilen dürtülerin büyüklükleri

Doğrusallık Kontrolü



b) Farklı büyüklüklerde uyarılara maruz kalmış sistemin frekans yanıt fonksiyonları

Şekil 3.36 Doğrusallık kontrolü



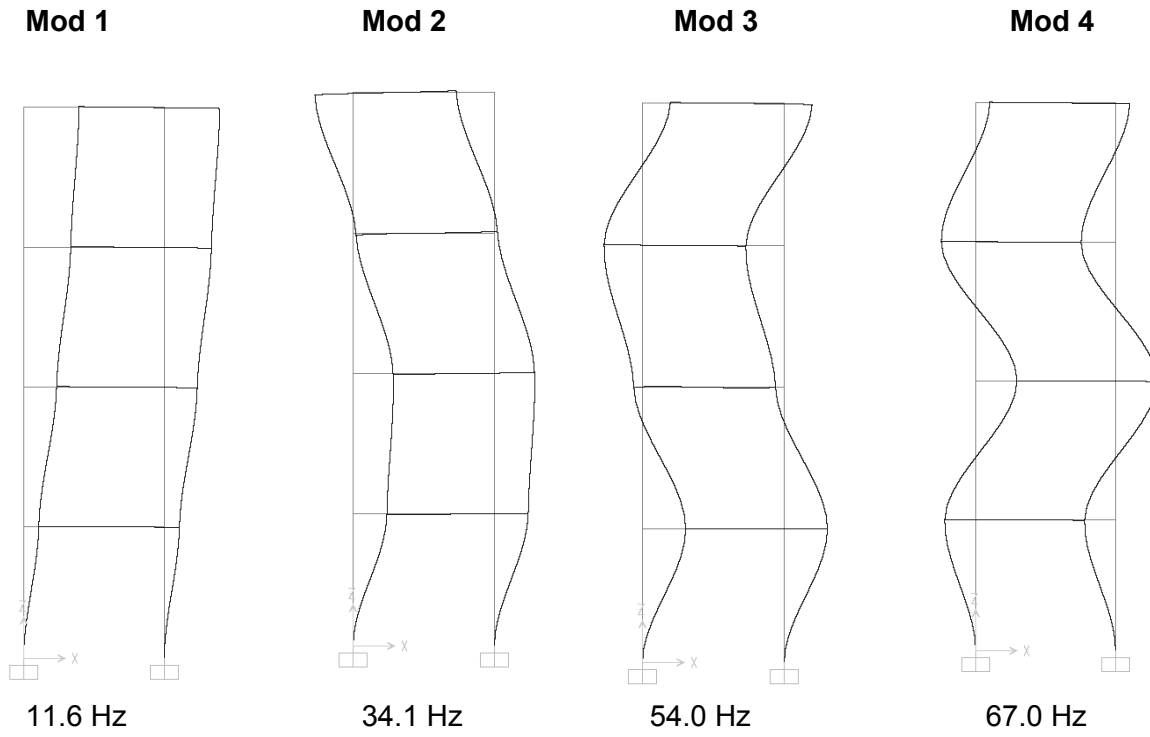
Şekil 3.37 Tersinirlik kontrolü amacıyla karşılıklı noktalardan yapılan uyarı ve okumalara karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları

Tanımlanan FYF'lar KMGF ile modal analize tabii tutularak Şekil 3.38'de sunulan ve Tablo 3.6'da listelenen doğal frekanslar, sönüm oranları ve modal şekiller elde edilmiştir. Sönüm oranları üstel fonksiyonun etkisini yok edecek şekilde düzeltilmiştir (Fladung ve Rost 1997). Çerçeveler ayrıca dört serbestlik dereceli çerçeve ve kabuk elemanları kullanılarak SAP2000 programı ile analiz edilmiş ve modal değişkenleri bulunmuştur.

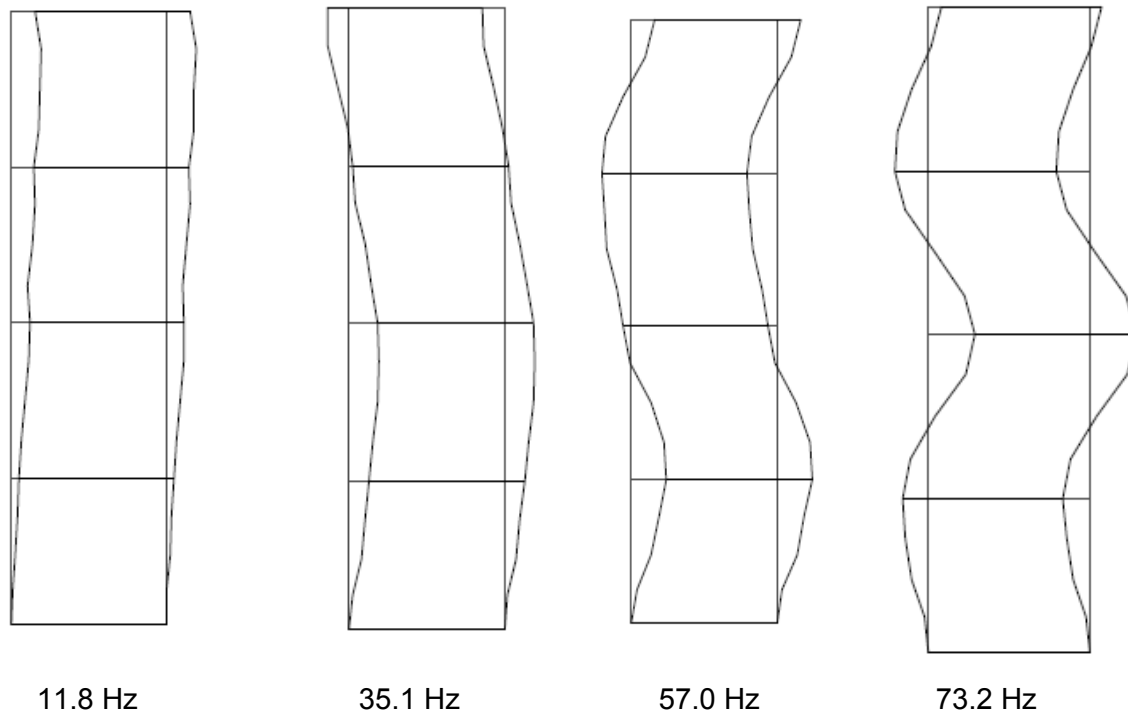
Tablo 3.6 Modal ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen frekans ve sönüm değerleri

Mode #	Modal Analiz Frekans(Hz)	Sap Modeli Frekans(Hz)	Frekans Farkı (%)	Modal Analizden Elde Edilen Sönüm (%)
1	11.8	11.6	1.7	0.0
2	35.1	34.1	2.8	1.2
3	57.0	54.0	5.3	2.4
4	73.2	67.0	8.5	2.1

Moment Çerçevesi SAP Analizi Sonuçları:



Moment Çerçevesi Modal Analiz Sonuçları:



Şekil 3.38 Moment-çerçevesinin modal analiz ve sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen frekans ve modal şekillerinin karşılaştırılması

Modal ve sayısal analizin ham sonuçları karşılaştırıldığında, modal analiz sonuçlarının daha sıkı bir sisteme işaret edildiği görülmüştür. Yapılan çalışma sonrası sistem değişkenlerinde yapılan ayarlamalar ile sayısal ve modal analiz frekans değerleri birbirine yakın hale getirilmişlerdir. Bu amaçla ilk olarak çeliğin elastisite modülü nominal değer olan 200 000 MPa'dan %5 arttırılmıştır. İkinci olarak T-kolon kesitlerinin ikinci eylemsizlik momentleri %25 arttırılmıştır. İmalat sırasında saçtan imal edilen T-kesitlerde saçtaki boyut bozuklukları sebebi ile iki plakanın temas yüzeyinde ortalama 2-3 milimetreyi bulan boşluklar oluşmuştur. Bu sebeple kesitin ikinci eylemsizlik momentinin arttırılması kabul edilebilir. Ayrıca kesitin küçüklüğü sebebi ile kaynak dolgusu da kayda değer bir artışa sebep olmaktadır. Yapılan hesaplara göre 2 mm'lik bir boşluk ve kaynak dolgusu etkisi ile kesitin momentini %20 arttırmaktadır. Üçüncü olarak ise I-kesitlerin ikinci eylemsizlik momentleri %50 arttırılmıştır. Benzer şekilde kirişlerde de imalattan kaynaklı boyut bozuklukları mevcuttur. Ayrıca kirişlerde ağırlıklık desteği olarak kullanılan plakalar düşük şiddetteki hareketlere sürtünme sebebi ile kesitin bir parçası olarak çalışabilmektedirler.

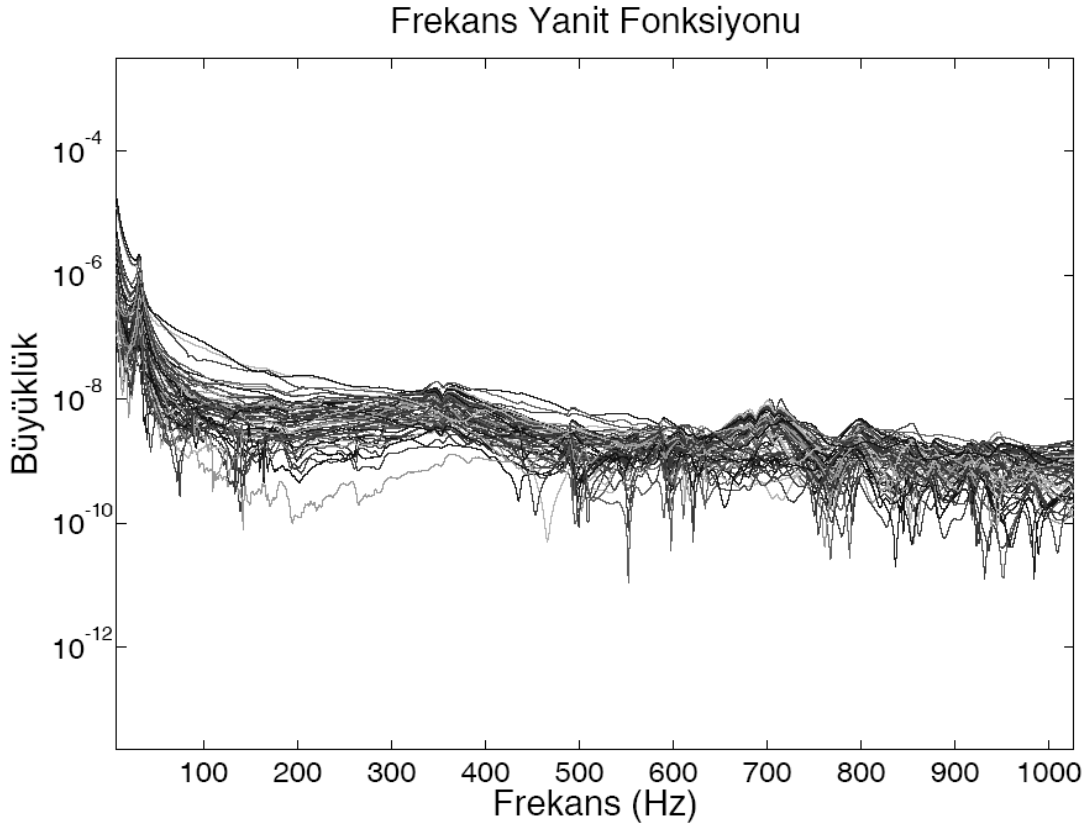
Tablo 3.6'da sunulan sönüm değerlerinden görüleceği üzere birinci modun sönüm değeri sıfır olarak çıkmaktadır. Bu durum fiziksel olarak doğru değildir. Modal analiz sırasında frekans uzayına geçişte sızıntı sorununa engel amacıyla kullanılan üstel pencere sebebiyle alınan kayıtlara suni olarak sönüm verilmektedir. Belirtildiği üzere suni olarak verilen sönüm daha sonra sistemden geri alınmaktadır (Fladung ve Rost, 1997). Sisteme suni olarak sönüm verilip daha sonra bunun geri alınması sönüm değerlerinde bir miktar hataya yol açmakta, özellikle hafifçe sönümlenen sistemlerde dönüşüm sonrası sıfır veya negatif bir sönüm değerine yol açmaktadır.

Dolgulu çerçeve için işlenmiş veriler kullanılarak oluşturulan FYF'lar moment-çerçevesi için Şekil 3.39'da sergilenmiştir. Şekilden görüleceği üzere kullanılan 235 gr ağırlığındaki PCB çekiç ile dolgulu-çerçevede yeterli büyüklükte uyarılar sağlanamamıştır. Alınan sinyaller yüksek frekanslarda zayıftır ve 30 Hz civarı dışında sistemin temiz bir modu gözlenememektedir. Bu sebepler ile giriş enerjisini arttırarak sistemi uyarabilmek amacı ile kütlesi artacak şekilde iki ayrı çekiç daha kullanılması yoluna gidilmiştir. Ayrıca her bir çekiçte uyarılan frekans aralığını kontrol etmek amacı ile farklı sertlikte uçlar kullanılmıştır. İlk kullanılan PCB çekiç ile birlikte kullanılan çekiç ve uç tipleri Tablo 3.7'de sunulmuştur.

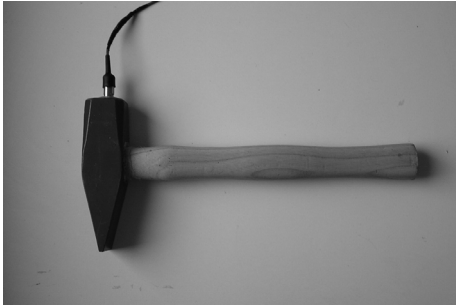
Tablo 3.7 Dolgulu çerçeve için kullanılan çekiç kütle ve uçları

Çekiç Tipi	Kütlesi	Uç Tipi
PCB Çekici	235 gr	Orta sert (mavi uç)
		Sert (metal uç)
Balyoz	2 023 gr	Orta sert (sıcak silikon uç)
		Sert (metal uç)
Plaka çekiç	11 477 gr	Sert (metal uç)

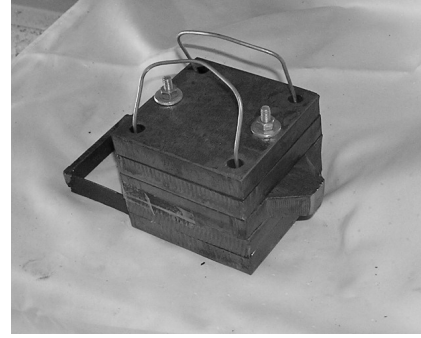
Deneylerde kullanılan balyoz ve plaka çekiçler sözü geçen kütlelere ivmeölçer bağlanarak elde edilen çekiçlerdir, Şekil 3.40. Plaka çekiç asılarak pandül şeklinde kullanılmıştır.



Şekil 3.39 Dolgulu-Çerçeve frekans yanıt fonksiyonlarının toplu görünüşü



a) Balyoz çekiç, 2023gr



b) Plaka çekiç, 11 477gr

Şekil 3.40 Dolgu çerçeveyi uyarmakta kullanılan yapma çekiçler

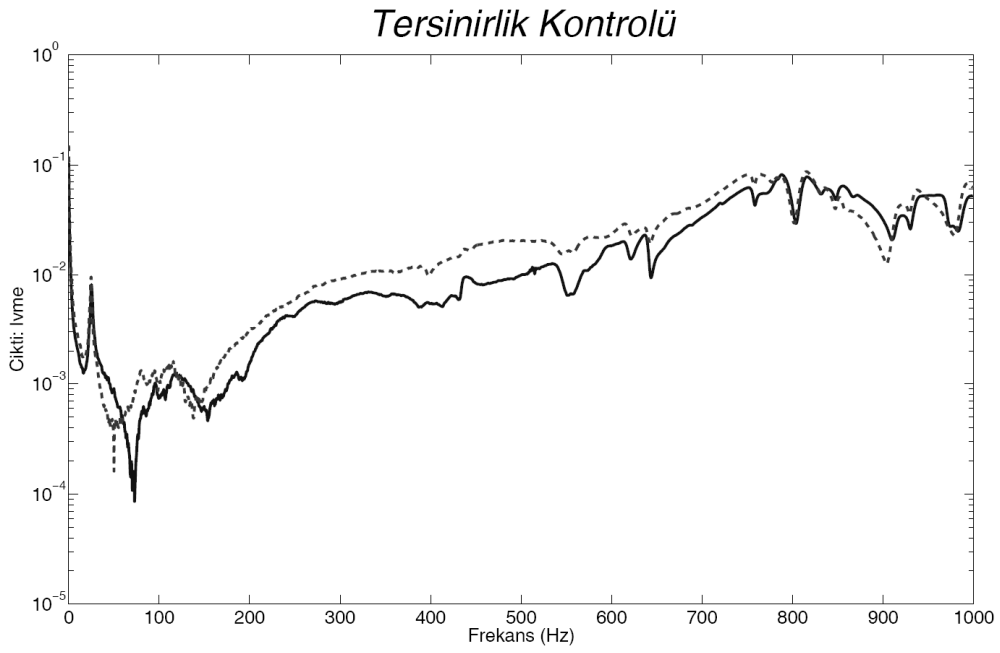
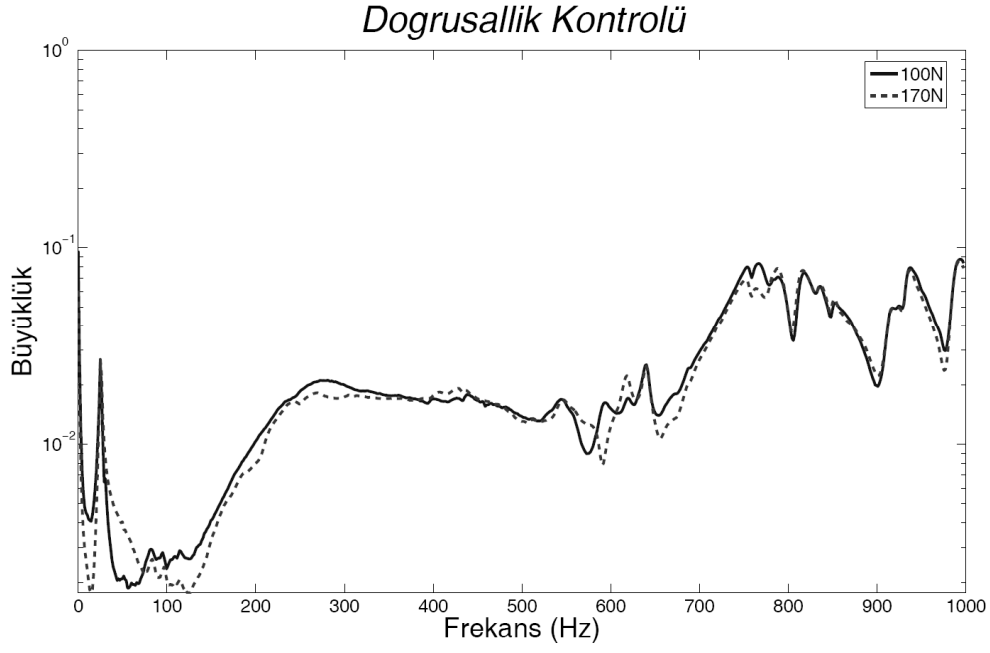
Ayrıca dolgulu çerçevede iki konuda değişiklik yapılmıştır. Birinci değişiklik panel-çerçeve bağlantısında gerçekleşmiştir. Yapılan ön ölçümlerde sistemin doğrusallıktan saptığı gözlemlendiğinden sapmanın dolgu panellerin sisteme vidalar ile bağlanmış olmasından kaynaklanabileceği için paneller ek olarak çerçeveye kaynaklanmıştır. İkinci değişiklik ise sistem frekanslarını aşağıya çekebilmek amacıyla sistemin kütle miktarında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kat seviyesindeki kütle miktarları ikiye katlanarak 40kg'a çıkarılmıştır.

Doğrusallık varsayımının kontrolü için sistemden alınan ön okumalar alınmıştır. Tersinirlik kontrolleri Sekil 3.37b'de sunulan uyarı ve okuma noktalarından yapılmıştır. Şekil 4.41'ye görüleceği üzere sistem hiç bir uyarı tipi için 24.5Hz civarındaki ilk modundan sonra doğrusallık kabüllerini sağlamamaktadır.

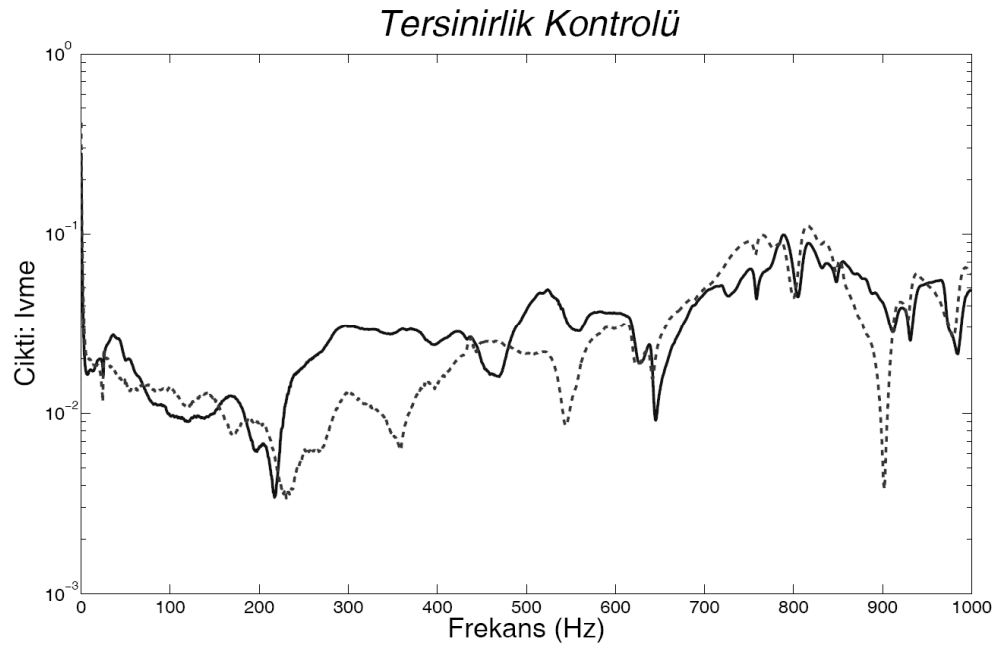
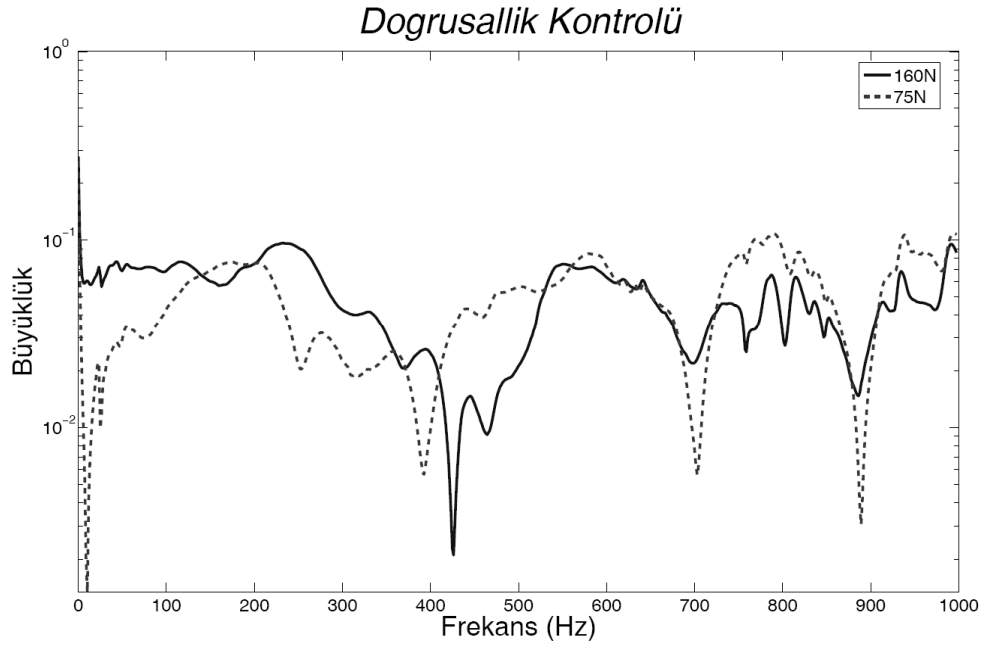
Moment çerçevesinde doğrusallığın sağlanmış olması, dolgulu çerçevenin sistem olarak moment çerçevesinin üzerine çelik panel eklemek dışında bir değişikliğe sahip olmaması ve son kertede panellerin bağlantılarının kaynaklanarak panel kaynaklı sorunların önüne geçilmesi sebebi ile sistemin doğrusallığı sağlayamamasının sistemdeki kontrolsüz gürültü kaynaklarından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Şekil 3.41-45-1.11'de görülen frekans yanıt fonksiyonları sorunun 30Hz civarında başladığını göstermektedir. Sistemde yüksek frekanslarda gürültü yaratma potansiyeline sahip iki bileşen vardır: sisteme eklenen kütleler ve sistemin mesnetlere bağlantısı.

Sisteme kütleler 1cm kalınlığında plakaların üst üste yığılması şeklinde eklenmiştir. Bu plakalardan her katın kanatlarında 6'şar adet olmak üzere 12 adet vardır. Yukarıdaki ölçümlerde plakalar birbirlerine bantla tutturulmuş olup bu bloklar sisteme bağlandığı kanat plakaları üzerine olası boşluğun alınması amacı ile sıcak tutkal üzerine oturtularak bağlanmıştır. Bu yöntem moment çerçevesinde sorunsuz işlemiştir. Çerçevenin mesnetlere bağlantısı ise bir seri bulon ile sağlanmıştır. Şekil 3.41-45'de sunulan ölçümlerde bulonlar hafif el sıkılığında bağlanmışlardır.

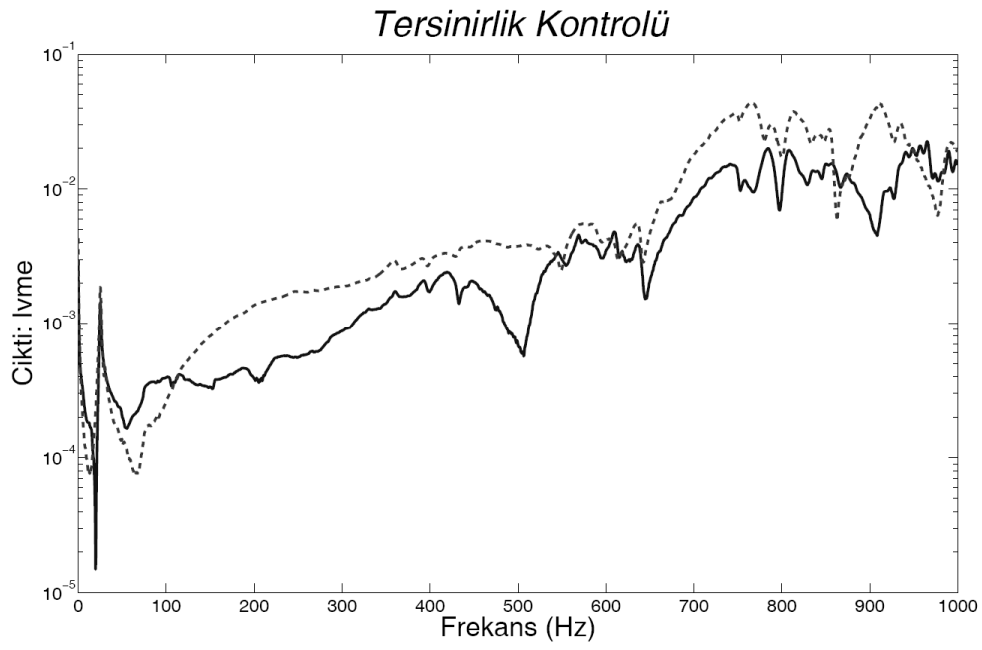
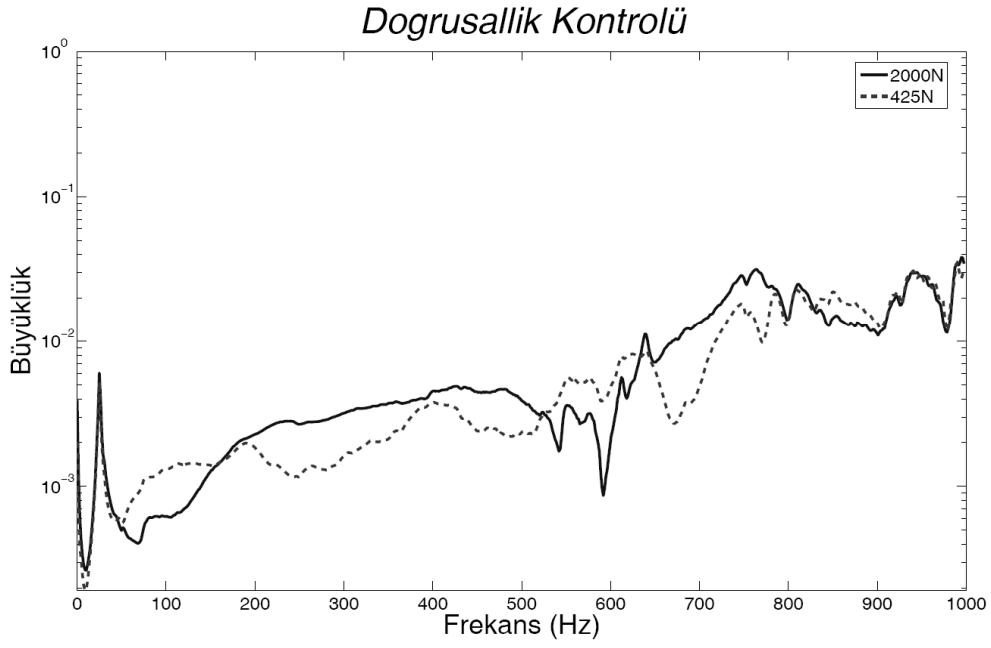
Ek kütle ve bağlantı bulonları kaynaklı gürültünün gerçekten mevcut olup olmadığını anlamak amacı ile kütle plakaları mengenelerle sıkıştırılarak, bulonlarda insan gücü ile sıkılabileceği en son noktaya kadar zorlanarak plaka çekiç ile yapılan doğrusallık testleri tekrarlanmıştır, Şekil 3.46.



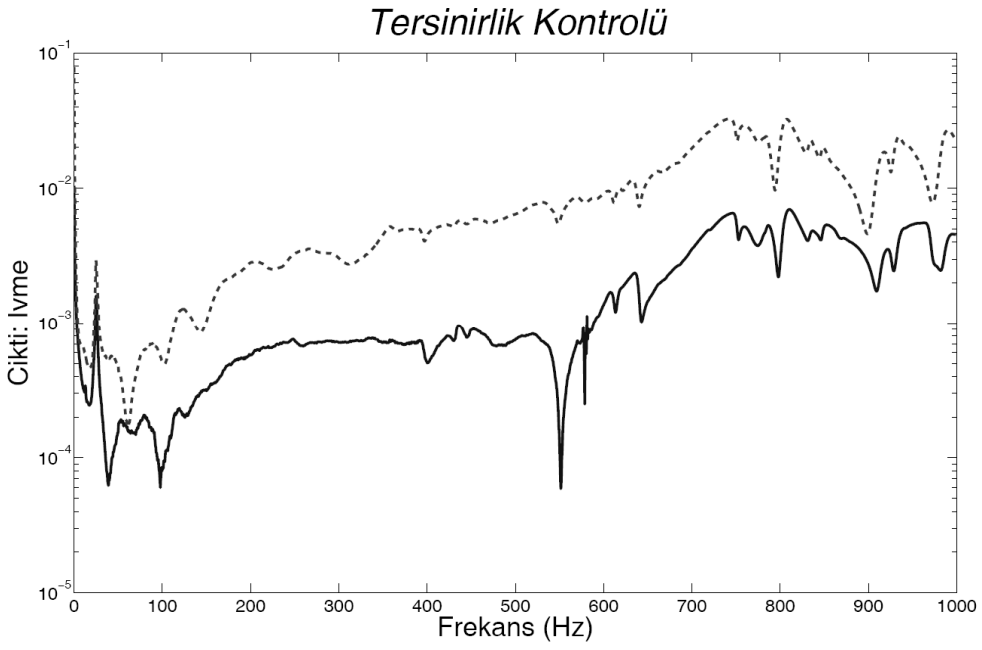
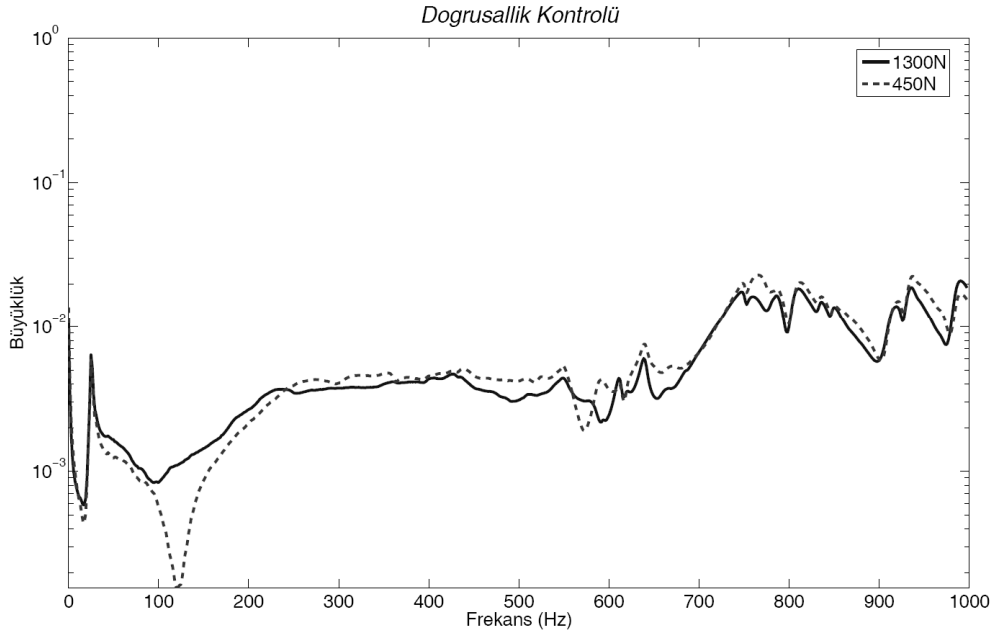
Şekil 3.41 PCB çekiç orta sertlikte uç



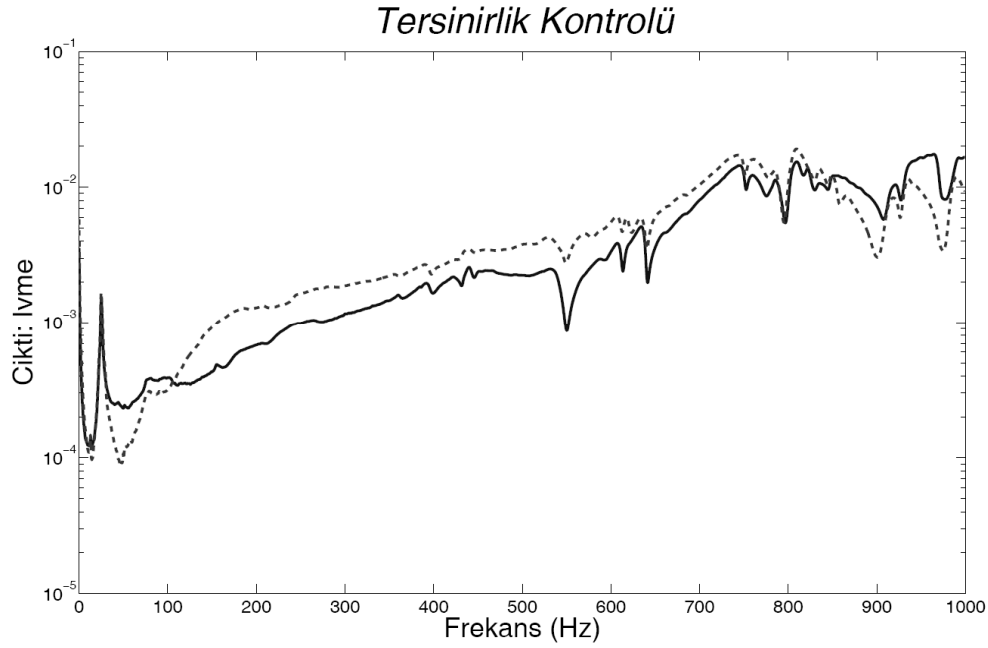
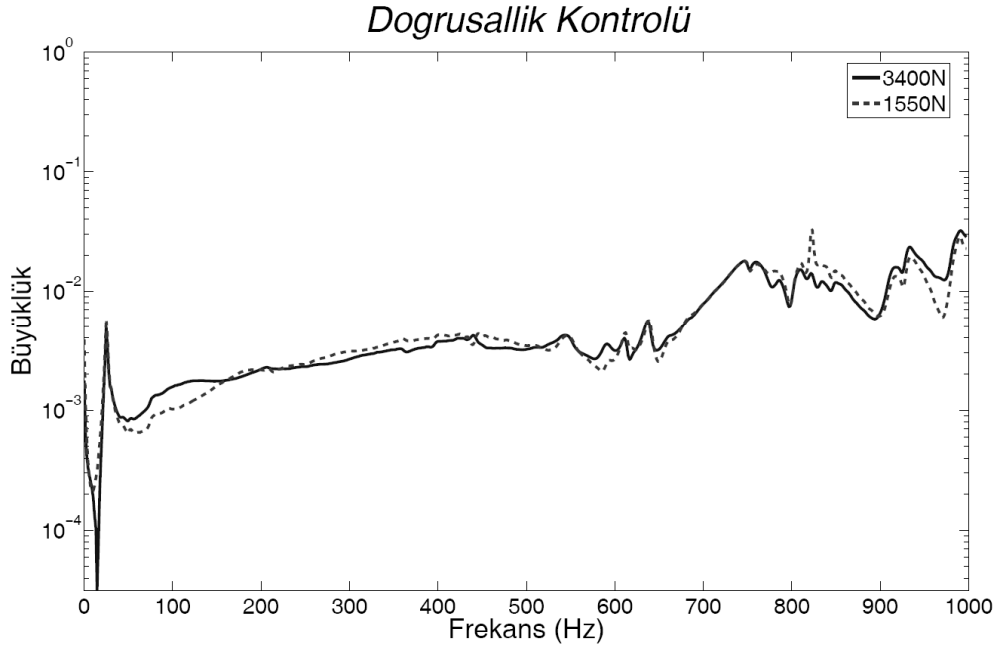
Şekil 3.42 PCB çekiç sertlikte uç, metal



Şekil 3.43 Balyoz orta sertlikte uç, sıcak silikon



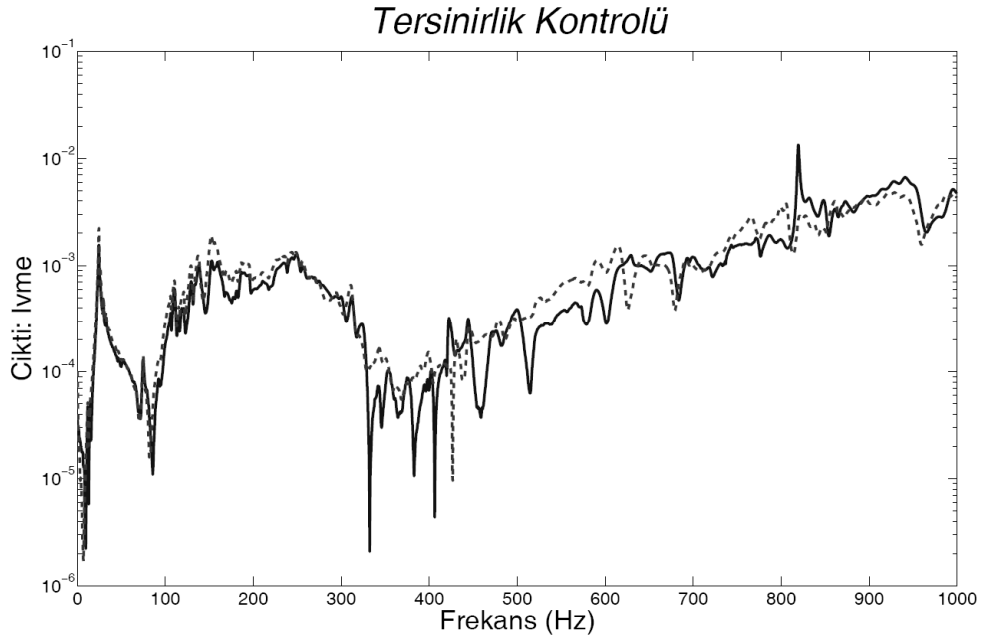
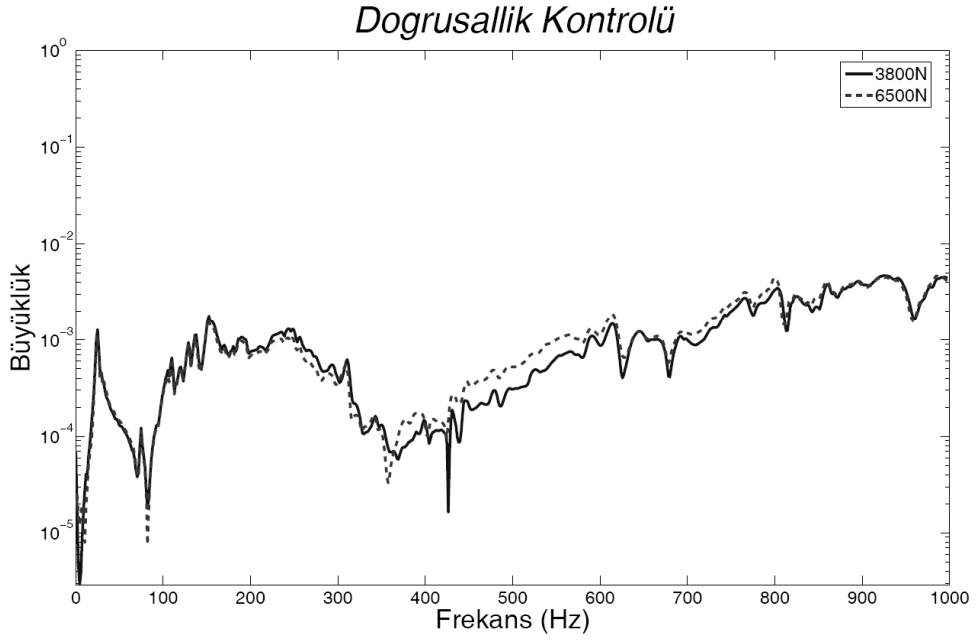
Şekil 3.44 Balyoz sert uç, metal



Şekil 3.45 Plaka çekiç sert uç, metal

Şekil 3.46'dan görüldüğü üzere taban bulonları zorlanarak sıkıştırıldıktan sonra sistemin doğrusal davranış gösterdiği bölge 150Hz civarlarına kadar yükselmiştir. SAP analizi sonuçları ilk dört modun 0-450Hz arasında olduğunu göstermektedir. Bu sebeple elde edilen veriler ile üst modlara ulaşmak olası değildir. Elde edilen sonuçlar ile sistemin üst modları elde edilemeyecek olsa da bu çalışmaya ana amaç olan betonarme çerçeve deneylerinde öngörülemeyen olası sorunların tespiti amacına hizmet etmiştir. Bu deneylerden elde edilen tecrübe yüksek frekans ölçümlerinin söz konusu olduğu ölçümlerde zayıf bağlantılı yada kendi ağırlığı ile oturan parçaların gürültü yaratarak verileri bozduğudur. Betonarme çerçevelerin hem ek kütlelerinde kütlelerin birbirlerine ve çerçeveye olan bağlantılarına hem

de çerçeveyi laboratuvar döşemesine bağlayan bağlantılara konularında özel önlemler alınmıştır.



Şekil 3.46 Olası gürültü kaynaklarına müdahaleden sonra, plaka çekiş sert uç

BÖLÜM 4

BETONARME ÇERÇEVELER DENEY DÜZENEĞİ VE STATİK VERİLER

4.1 Giriş

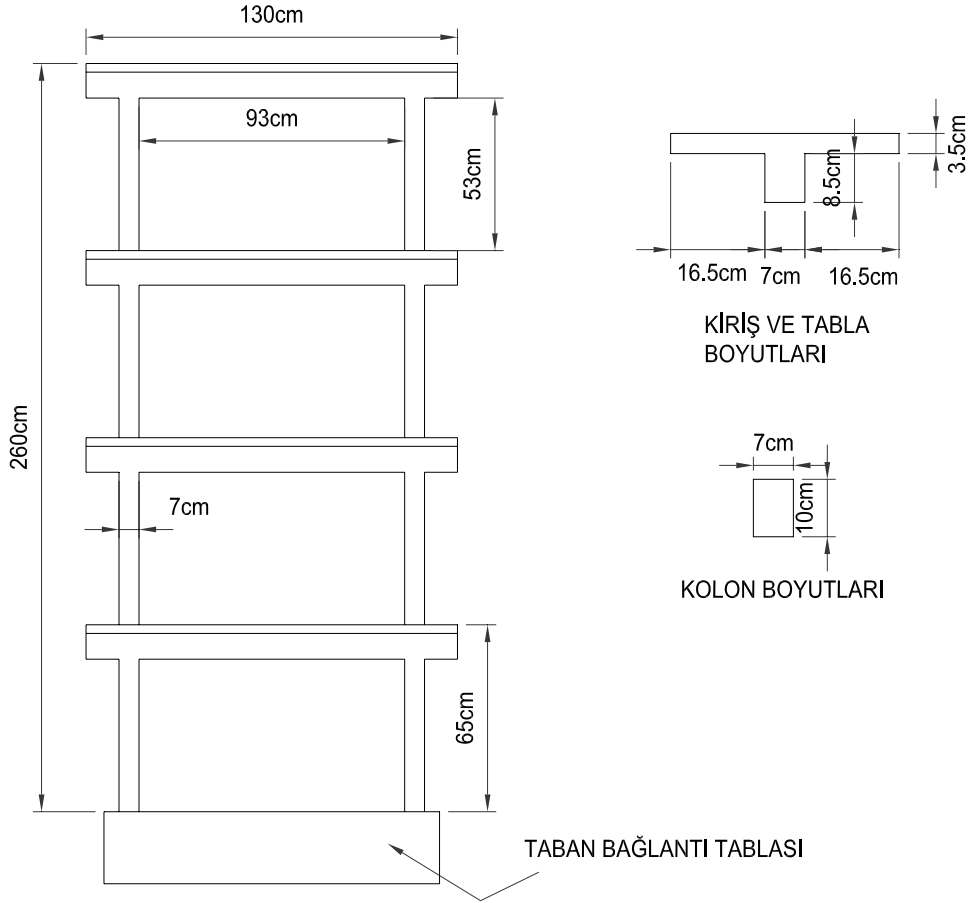
Dört adet betonarme çerçevenin tasarım, imalat ve deneyleri yapılmıştır. Çerçeveler boş ve dolu, zayıf ve kuvvetli olmak üzere iki ana değişken üzerinden tasarlanmıştır. Boş ve dolu değişkeni olarak ara bölme duvarların mevcudiyeti, zayıf ve kuvvetli değişkeni olarak ise betonarme elemanların şartname gereği istenilen sünek çerçeve detaylandırmasına uygunluğu tanımlanmıştır. Şekil 4.1'de sunulduğu üzere çerçeveler dört katlı tek açıklıklı düzlem çerçeveler olarak seçilmiştir. Laboratuvar fiziksel sınırları düşünülerek sistem 1/5 ölçeğinde tasarlanmış ve gerçek yapılarıdaki kütle-rigidlik ilişkisini benzetebilmek amacı ile çerçevelere kat seviyelerinde ek kütleler eklenmiştir. Modal deneyler artırımlı hasar verilen sistemlerden darbe çekici ve çek bırak vasıtaları ile sistem tanılamaya yönelik veri üretecek şekilde organize edilmiştir. Bu amaçla laboratuvar kuvvetli döşemesine bağlanan çerçevelere mevcut kuvvetli duvardan destek alınarak hidrolik krikolar vasıtası ile kademeli olarak hasar verilmiştir. İki-boyutlu çerçevelerin düzlem boyutuna dik yöndeki kararlılığının sağlanması için ayrıca bir destek çerçevesi imal edilmiştir. Bu kısımda deney düzeneği, elemanları ve deneylerden elde edilen statik veriler ve yorumları sunulacaktır.

4.2 Deney Düzeneği ve Elemanlarının Tasarımı

Yukarıda belirtildiği üzere boş ve dolu, zayıf ve kuvvetli olmak üzere dört adet betonarme çerçeve tasarlanmıştır. Kolonlar üzerindeki eksenel yükü arttırabilmek, daha narin bir yapıya ulaşabilmek ve aynı zamanda laboratuvardaki fiziksel sınırların içerisinde kalabilmek için yapı dört katlı ve 1/5 ölçeğinde seçilmiştir. Çerçevelerin genel geometrisi Şekil 4.1'de sunulmuştur. Çerçevelerin ve deney düzeneğinin boyut ve imalat detayları Ek B, Şekil B.5-28'de sunulmuştur. Gerçek yapılarıdaki kütle-sıklık ilişkisini benzetebilmek amacıyla çerçevelere kat seviyelerinde ek kütleler eklenmiştir. Toplamda çerçeveler üzerine 1602 kg harici kütle eklenmiştir. Ek kütlelerin çerçeve üzerindeki yerleşim ve montaj detayları Ek B, Şekil B.29'da sunulmuştur. Ek kütleler çelik plakalar kullanılarak oluşturulmuştur. Plakalar kat döşemelerine 10mm çapındaki yivli çubuklar ile hedeflenen ivme seviyelerinde hareket etmeyecek şekilde sabitlenmişlerdir. Plakalar kirişlerin eğilme kapasitelerini arttırmaması için parçalı ve her bir parça döşemeye iki hat üzerinden basit mesnetli olarak oturtulmuşlardır. Ayrıca çerçevelerde statik yük altında en alt kat kolonlarındaki basınç gerilmeleri %15 civarında oluşacak şekilde boyut ve malzeme tasarımı yapılmıştır. Modal deneyler artırımlı hasar verilen sistemden darbe çekici ve çek bırak vasıtası ile sistem tanılamaları yapılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla kuvvetli döşemeye bağlanan çerçevelere mevcut kuvvetli duvardan destek alınarak hidrolik krikolar vasıtası ile kademeli olarak hasar verilmiştir.

Sisteme kademeli hasar verilebilmesi amacıyla ters üçgen yük dağılımı uygulanmıştır. Bu sistem sayesinde çerçeveler sözde statik (İng. pseudo-static) olarak önceden saptanmış öteleme seviyelerindeki yük döngülerine tabii tutulmuştur. Her bir döngüden sonra dinamik değişkenleri etkilememesi için statik yükleme sistemi çerçevelerden ayrılarak modal deneyler gerçekleştirilmiştir. Modal deneyler, çekiç darbelerinin sistemi sadece düşük ötelenme seviyelerinde uyarabildiğinden hareketle, hem çekiç hem de çek bırak uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çek bırak uygulaması sistemin en üst kat döşemesine bağlanan halatlar vasıtası ile en son döngüsündeki en üst kat döşeme ötelenmesinin yarısına kadar çekilmesi ve akabinde bağlantının kesilmesi yoluyla uygulanmıştır. Statik deney sırasında her kat seviyesinde yük hücreleri vasıtası ile uygulanan kuvvetler ve öteleme ölçerler ile kat ötelenmeleri kaydedilmiştir. Ayrıca en alt kat kolonlardaki donatılar üzerine gerinim pulları uygulanarak bu seviyedeki iç kuvvetlerinde izlenmesi amaçlanmıştır. Dinamik deneylerde her

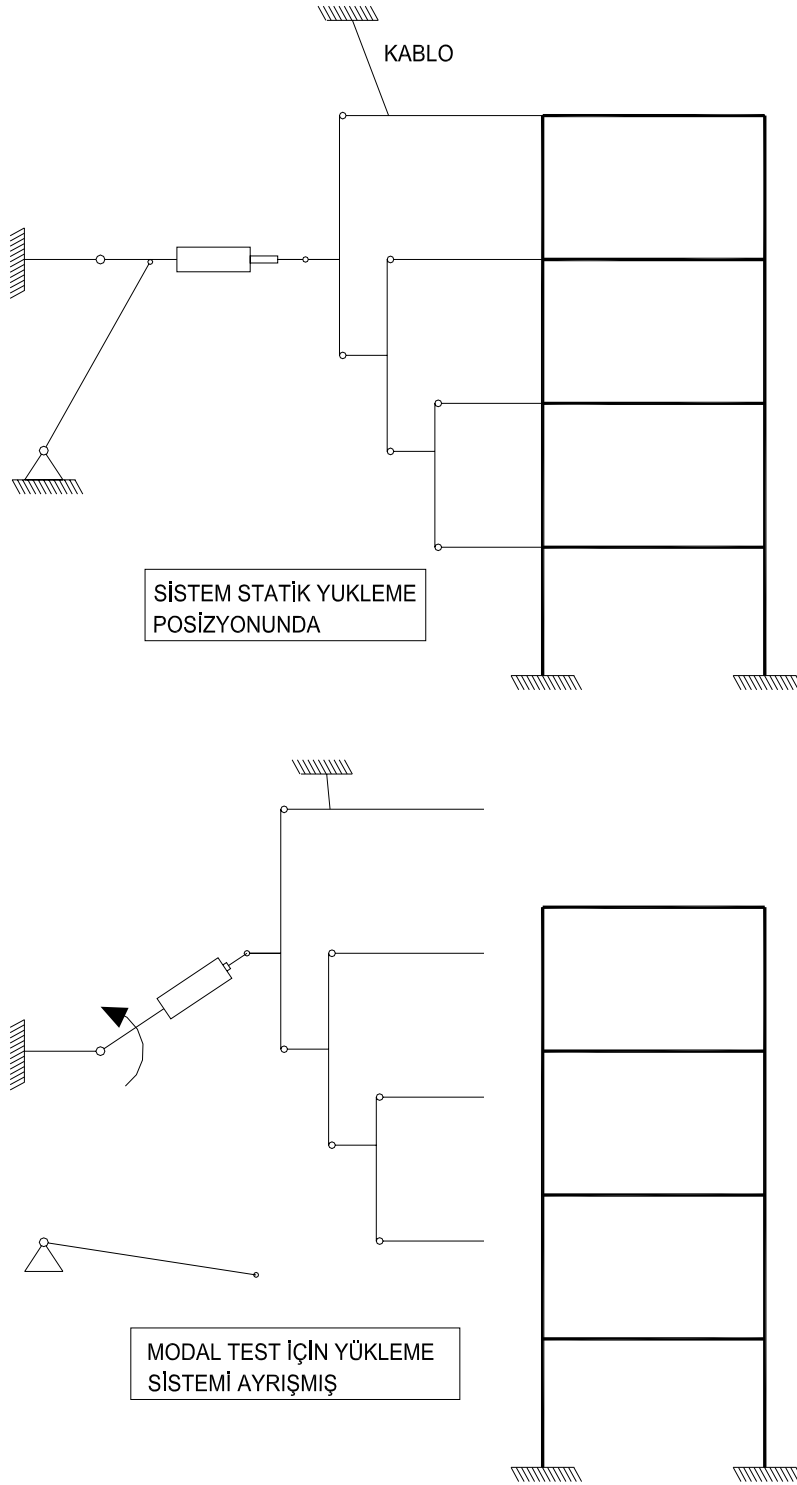
bir kat seviyesi ve kolon orta seviyelerinde ivmeölçerler vasıtası ivme değerleri kaydedilmiştir. Şimdi sırası ile yükleme sistemi, çerçevelerin destek düzeneği, ölçüm sistemi ve betonarme çerçevelerin tasarım ve imalatları hakkında bilgiler verilecektir.



Şekil 4.1 Betonarme çerçevelerin boyutları

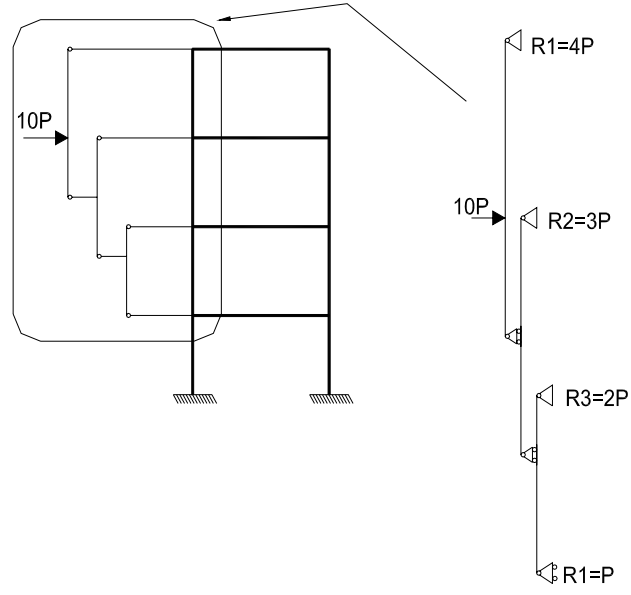
4.2.1 Yükleme Sistemi Tasarım ve İmalatı

Yükleme sisteminin hem istenilen şekilde sözde-statik yüklemeyi gerçekleştirebilmesi hemde dinamik yüklemeye izin verebilmesi için pratik bir şekilde çerçeveden ayrılabilmesi gerekmiştir. Bu amaçla Şekil 4.2'den şematik olarak görülebileceği gibi bir destek ve kat seviyesi bağlantılarının sökülmesi üzerine mekanizma haline gelebilen bir sistem tasarlanmıştır. Söz konusu sistemin imalat detayları Ek B, Şekil B.8-14'de sunulmuştur. Yükleme sistemi ters üçgen bir yük dağılımı sağlayabilmek için bir yüzünden verilen 10 birim yükü diğer ucunda en üst kattan başlamak üzere 4, 3, 2 ve 1 birim olarak ters üçgen şeklinde dağıtabilen bir yapılanmaya sahiptir. Dağıtma işleminin nasıl gerçekleştiği şematik olarak Şekil 4.3'de ve düzeneğin çerçeve üzerindeki fotoğrafı Şekil 4.4'de sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere basit kirişlerin boyları ve birbirlerine destek verdikleri noktaların pozisyonları ayarlanarak istenilen yük dağılımına ulaşılmaktadır.



Şekil 4.2 Yükleme sisteminin sözde statik ve modal deneyler için şematik pozisyonları

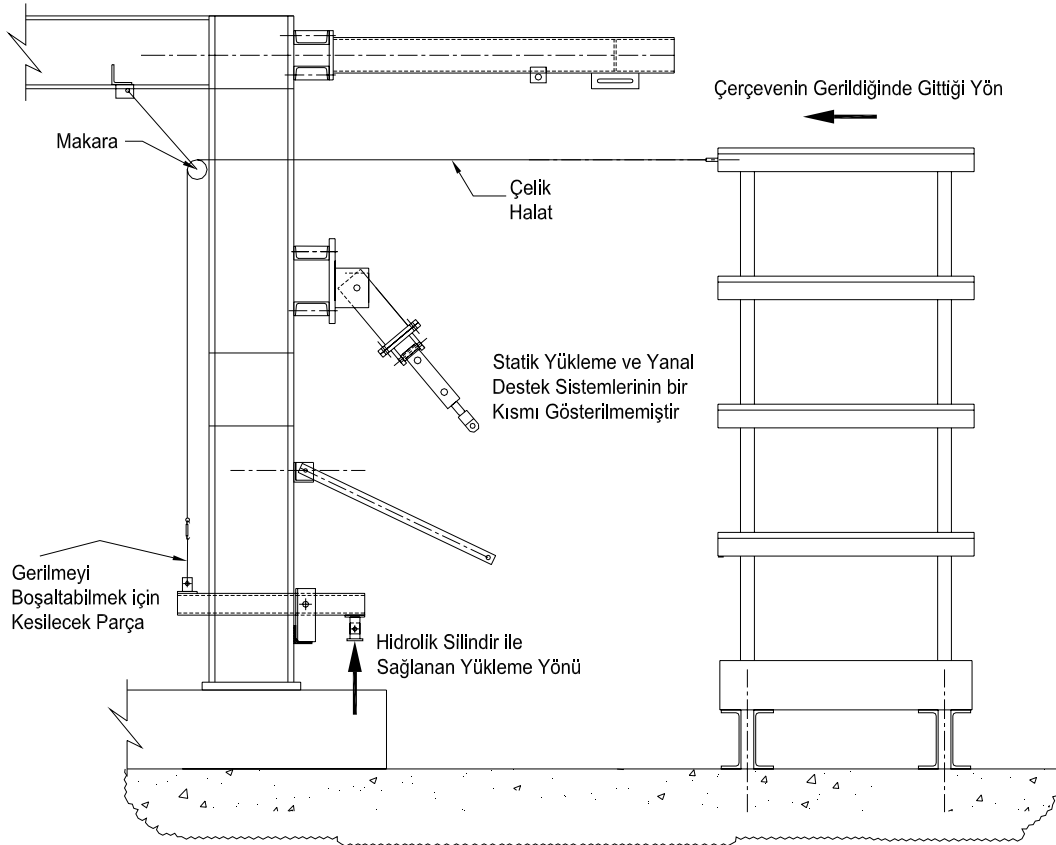
Sisteme yüksek seviyede dinamik dürtü vermek amacı ile hidrolik silindir ve kablo vasıtası ile sistemi gerip ani bir şekilde bu bağlantının koparılması, çek-bırak, yoluna gidilmiştir. Bu amaçla oluşturulan mekanizmanın şematik görünümü Şekil 4.5’de, detayları Ek B Şekil B22-23’de sunulmuştur.



Şekil 4.3 Yükleme sisteminin ters üçgen yük dağılımını sağlaması



Şekil 4.4 Yükleme sistemi yük dağıtım kirişleri çerçeveye bağlı halde



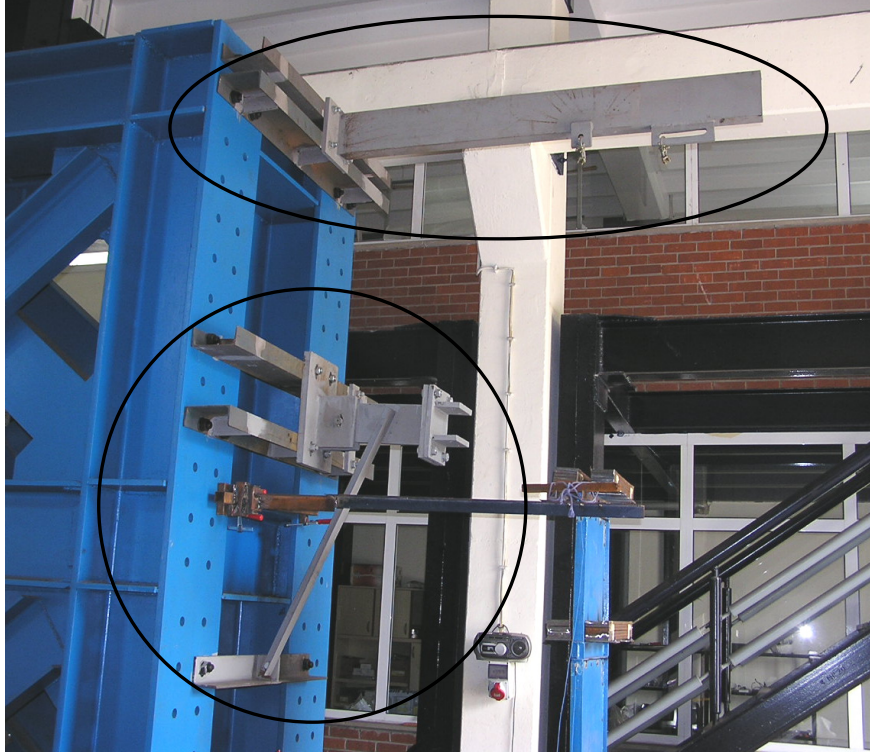
Şekil 4.5 Çek bırak düzeneği

4.2.2 Çerçevelerin Askı Düzeneği Tasarım ve İmalatı

Betonarme çerçeveye tam boyutlu bir yapıdaki kolon gerilmelerine benzetilmiş değerler sağlayabilmek ve sistemin birinci doğal frekansını düşürebilmek amacı ile kat seviyelerinde ek kütleler eklenmiştir. Bu amaçla kat başına ortalama 400 kg ekstra kütle uygulanmıştır. Deney sırasında çerçeve hasar göreceğinden, gerektiğinde sistemin düzlem dışı ve içi yanıl kararlılığını sağlayabilmek için askı sistemleri planlanmıştır, Şekil 4.6 ve 7. Düzlem dışı hareketi kontrol eden askı sistemi düzlem yönünde çerçeveye teflon dayanaklar ile basarak harekete izin verirken, düzlem dışı hareketi sınırlamıştır. Bu amaçla dördüncü kat kirişinin her iki yüzünde 60 cm boyunda 1cm kalınlığında plaka ve destek çerçevesinde 2cm çapında 30 cm boyunda çubuk olmak üzere teflon üstü teflon destek sistemi kurulmuştur. Düzlem içi kontrol sistemi ise çelik bir kablunun daha yüksekte sağlanan bir mesnet noktasına gevşek olarak bağlanması ile hasar durumunda oluşması muhtemel yüksek ötelenmeleri sınırlamak üzere tasarlanmıştır. Askı sistemlerinin imalat detayları Ek B, Şekil B.15-21'de sunulmuştur.

4.2.3 Ölçüm Sistemi Tasarımı

Deneylerde statik yüklemeye durumunda kat seviyelerinde uygulanan yüklerin ve oluşan ötelenmelerin ve ayrıca tabanda oluşabilecek dönmelerin ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla yük hücreleri ve LVDT'ler kullanılmıştır. En alt kat kolonlarında oluşacak yüklerin izlenebilmesi amacıyla da bu kat kolonlarındaki donatılara gerinim pulları yerleştirilmiştir. Alıcıların şematik yerleri Şekil 4.8a'da sunulmuştur.



Şekil 4.6 Düzlem içi askı sistemi (üstte) ve yükleme sistemi silindir yatağı (altta)

Modal deney ölçümleri en üst kat döşeme seviyesinde vuruş noktasından yapılacak olan dürtülerin kat ve kolon orta seviyelerine ve çekiç üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerde oluşturdukları uyarıların kaydedilmesi yolu ile yapılmıştır. Bu amaçla belirlenen ivmeölçer ve vuruş noktaları Şekil 4.8b'de gösterilmiştir. Alıcıların teknik özellikleri Ek C'de sunulmuştur.

4.2.4 Betonarme Çerçevesinin Tasarım ve İmalatı

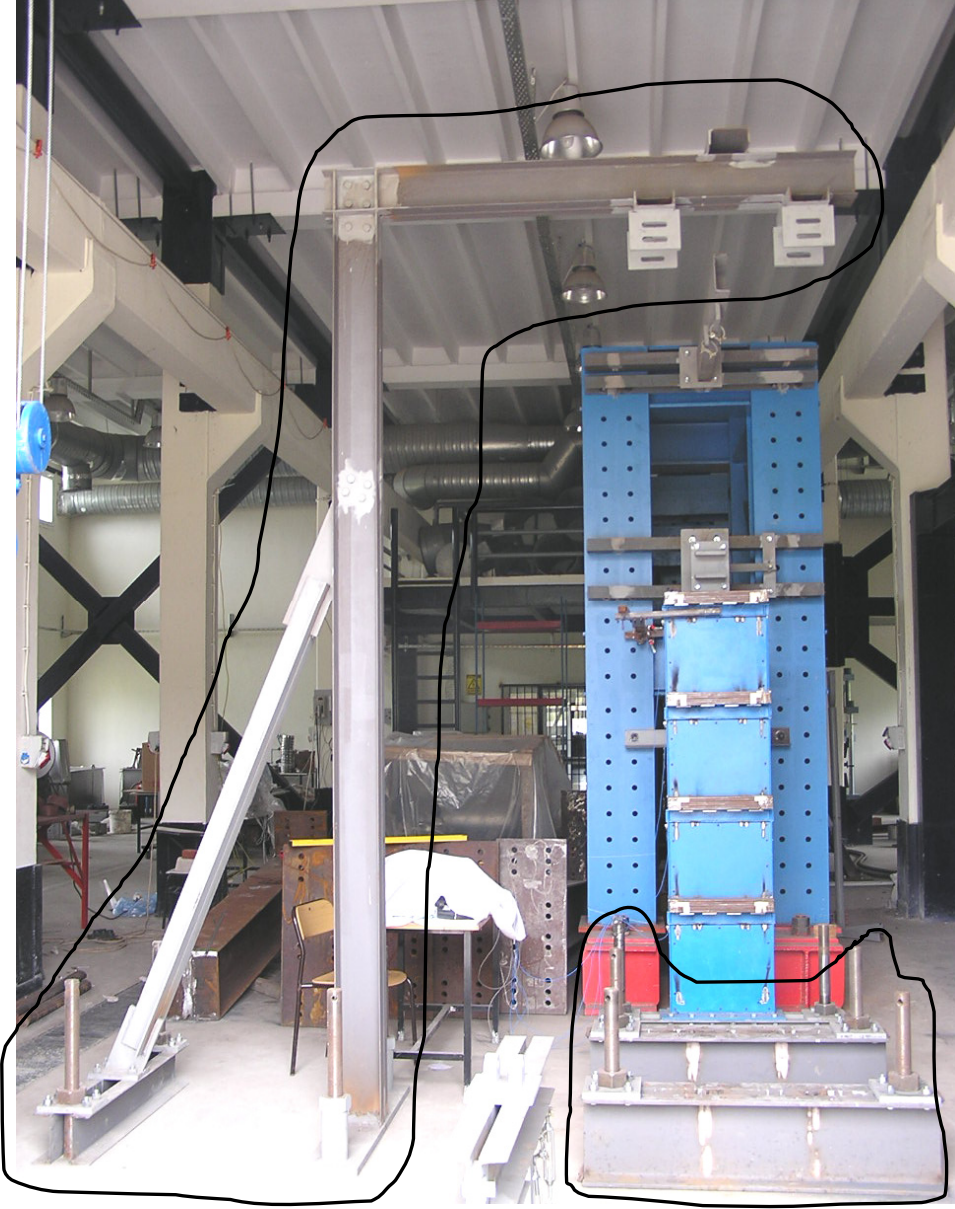
Öngörülen deney serisinde iki ana değişken planlanmıştır. Bunlar çerçeve gözlerinde dolgu duvar bulunup bulunmaması ile çerçevelerin zayıf ve kuvvetli olmasıdır.

Çerçevelerin zayıf olması donatı detaylarının yurdumuzdaki mevcut yetersiz sismik donatı detayları temel alınarak gerçekleştirilmiştir (Sezen ve Moehle 2004, Erdem ve diğ. 2006, Altın ve diğ. 2008). Bu amaçla :

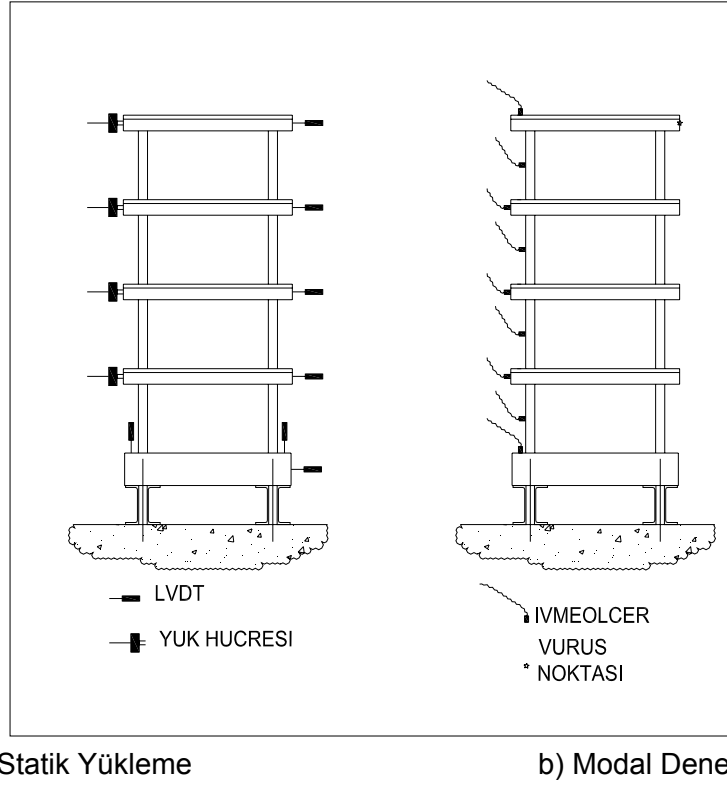
- Boyuna donatılar kat seviyelerinin üzerinde yetersiz bindirme boyları, 25Φ ,
- Eleman uç bölgeleri yetersiz kesme-kuşatma donatısı ile, $d/2$ aralık,
- Etriyeler yetersiz kenetlenme boyuna sahip 90° kancalar ile,
- Kiriş-kolon düğüm noktaları ise etriye olmadan detaylandırılmıştır.

Burada Φ ana donatı çapı, d ise kolon ve kiriş etkili derinliği olarak alınmıştır. Kuvvetli çerçeveler donatı detayları ise yürürlükteki deprem şartnamesi (TDY 2007) esas alınarak uygulanmıştır. Bu amaçla uygulanan donatı detayları Ek B, Şekil B.24-28'de sunulmuştur. Çerçevelere kiriş akslarında yük uygulayabilmek amacıyla yükleme sistemi kiriş bağlantısı kiriş aksı boyunca uzanıp orta noktadaki plakalar bağlanan $\phi 16\text{mm}$ çubuklar vasıtası ile yapılmıştır. Söz konusu çubuklar beton ile bağ yapmaması için $\Phi 18\text{mm}$ PVC boru içerisinde tutulmuşlardır.

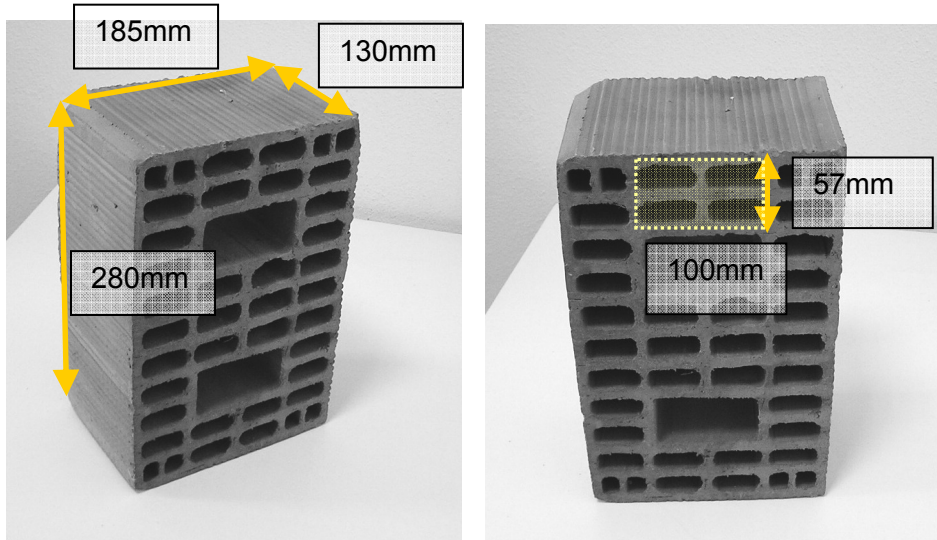
Sistemin ölçekli olmasından dolayı dolgu olarak kullanılacak tuğlalar piyasada mevcut 130x185x280 (mm) delikli tuğlalardan kesim yolu ile 57x100x130 tuğlalar elde edilmesi yolu ile yapılmıştır, Şekil 4.9.



Şekil 4.7 Düzlem dışı askı sistemi (solda) ve çerçeve taban bağlantı sistemi (sağda)



Şekil 4.8 Ölçüm düzenekleri, en alt kat kolonlarındaki gerinim pulları gösterilmemiştir.



Şekil 4.9 Dolgu olarak kullanılacak delikli tuğla boyutları

4.3 Çerçeve Deneyleri

Çerçeve deneyleri kendi aralarında karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamak amacı ile her başlık altında toplu olarak dökümlenecektir. Bu amaçla aşağıda sırası ile malzeme dayanımları, alıcılar ve kayıt sistemi detayları, yüklemde izlenen yol, gerçek zamanlı uygulanan yükler, kat seviyelerinde uygulanan yükler, yük-histeresis ilişkileri, çerçeve davranış hikayeleri sunulup ve irdelenmiştir.

4.3.1 Malzeme Dayanımları

Çerçevede kullanılan malzeme özelliklerini belirlemek amacı ile beton, çelik ve dolgu duvar numuneleri alınmış ve test edilmiştir.

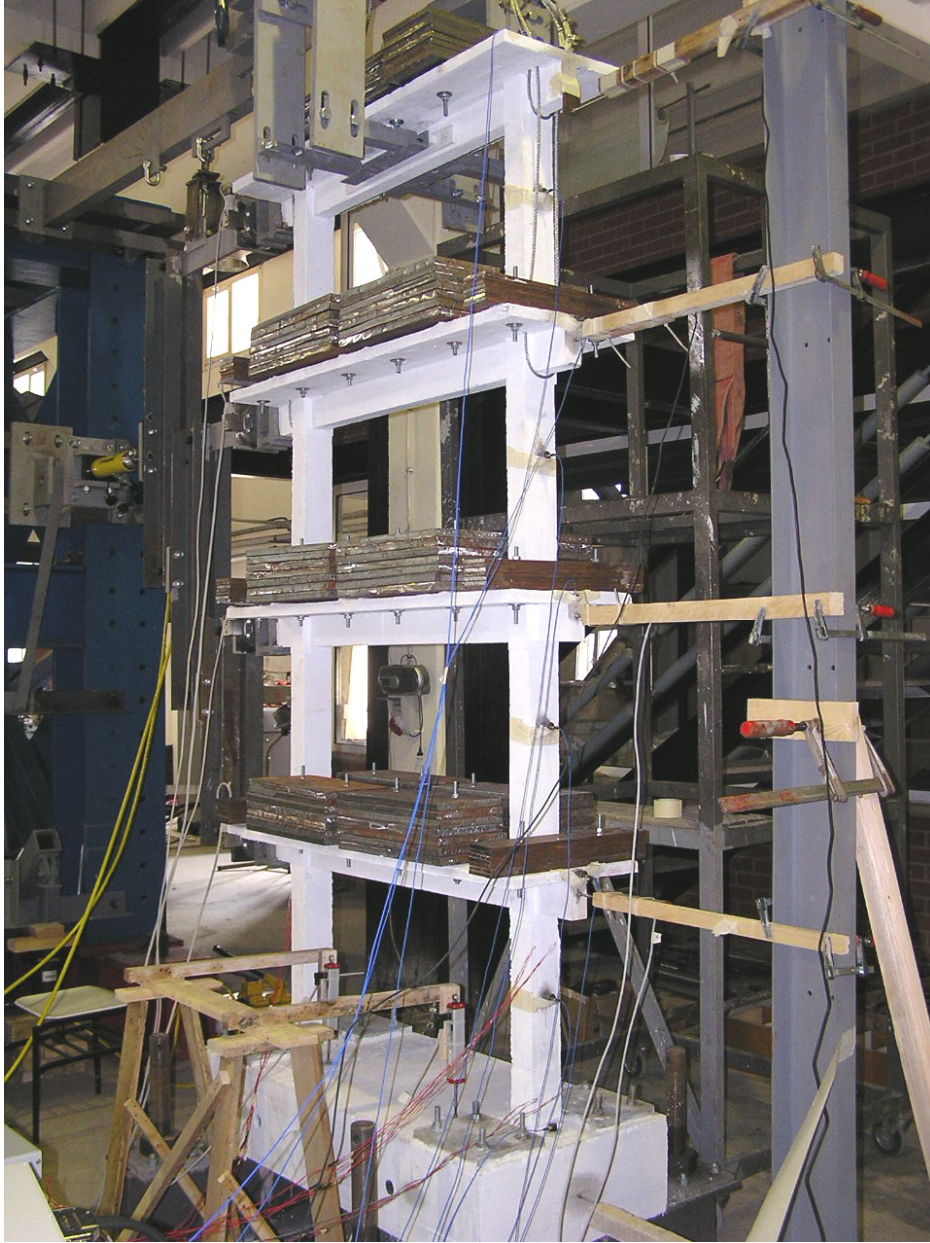
Çerçevelerin beton dayanımı 28. gün için $260-280 \text{ kgf/cm}^2$ deney günün için ise $250-413 \text{ kgf/cm}^2$ arasında değişmektedir. Beton dayanımları ve belirlenmeleri ile ilgili detaylar Ek. D'de sunulmuştur.

Beton çeliği ile ilgili yapılan testler sonucunda ise boyuna donatıların TS500 (2000) tanımlanan S420 sınıfından olduğu, etriyelerin ise TS500'de tanımlanan birim uzama sınırlarına uymamak ile beraber akma dayanım olarak 4200 kgf/cm^2 sahip olduğu tespit edilmiştir. Çelik numuneleri ile ilgili detaylı bilgi de Ek D'de sunulmuştur.

Ticari boyutlu tuğlalardan kesim yolu ile elde edilen dolgu tuğlalar kabaca %50 dolgu alanına sahiptir. Yapılan basınç deneylerinden tuğlaların ortalama basınç dayanımını 32 kgf/cm^2 olarak vermiştir. Dolgu duvar numuneleri ile ilgili detaylı bilgi de Ek D'de sunulmuştur.

4.3.2 Alıcılar ve Kayıt Sistemi

Deneylerde statik ve dinamik olmak üzere iki tip ölçüm yapılmıştır. Statik ölçümler kat seviyelerinde dört adet yük hücresi, dördü kat seviyesinde üç tanesi de temel bloğu üzerinde olmak üzere yedi adet doğrusal pozisyon algılayıcı (DPA, Şekil 4.8 ve 4.10) ve 16 adet gerinim pulu vasıtası ile yapılmıştır. İlk iki çerçeve deneyinde DPA, yük hücresi ve gerinim pulları için saniyede ikişer okuma alınırken özellikle yük hücrelerinin yüksek frekanslı salınımlar yapmaya başlaması üzerine üçüncü deneyden itibaren 100 veri/sn'lik okumalardan ortalama alınarak 2 veri/sn'ye düşürülme yapılarak veriler kaydedilmiştir. Verilerin bu şekilde işlenmesi salınımları beşte bir seviyesine düşürmüştür. Dinamik ölçümler Şekil 4.8'de sunulduğu gibi dokuz ivmeölçer ve tek vuruş noktası üzerinden yapılmıştır. Sisteme darbe ve çek-bırak dürtüleri verilmiştir. Darbe dürtüsü çelik çerçeve deneyleri için imal edilmiş olan 11.7 kg 'lık pandül çekiç ile sağlanmıştır. Sistem frekanslarının 100 Hz altında olması sebebi ile çekicinin ucu darbe enerjisini düşük frekanslarda yönlendirecek yumuşak bir lastik olarak seçilmiştir. Çek-bırak dürtüleri ise, Şekil 4.5'de sunulmuş sistem temel olarak her bir yükleme grubu için 4. kat seviyesinde ulaşılan ötelenmenin yarısına ulaşılabilecek şekilde sistem çekilip bırakılarak verilmiştir. Alıcılardan gelen bilgiler 5 kHz 'lik filtreye tabii tutulup saniyede 6 kHz veri hızı ile kaydedilmişlerdir. Kayıt süresi olarak sistemin sönüm özellikleri gözlemlendikten sonra 5 saniye seçilmiştir. Çerçeve 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla biri sistemin hasarsız hali diğerleri ise her bir yükleme döngü sonrası olmak üzere 5, 7, 7 ve 7 takım çekiç ve 4, 6, 6 ve 6 takım çek-bırak okuması alınmıştır. Her bir takım için tipik olarak çekiç dürtülerinde beşer, çek-bırak dürtülerinde üçer okuma alınmıştır.

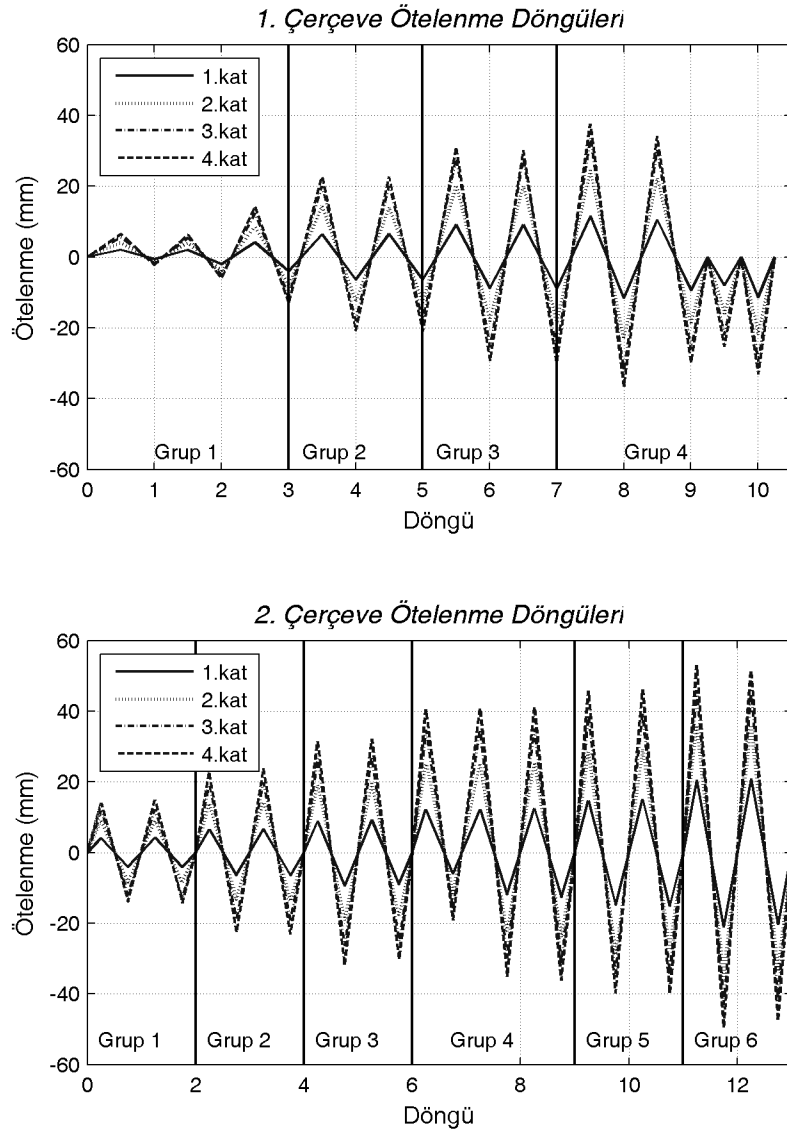


Şekil 4.10 LVDT ve ivmeölçerlerin yerleşimi

4.3.3 Yüklemede İzlenen Yol

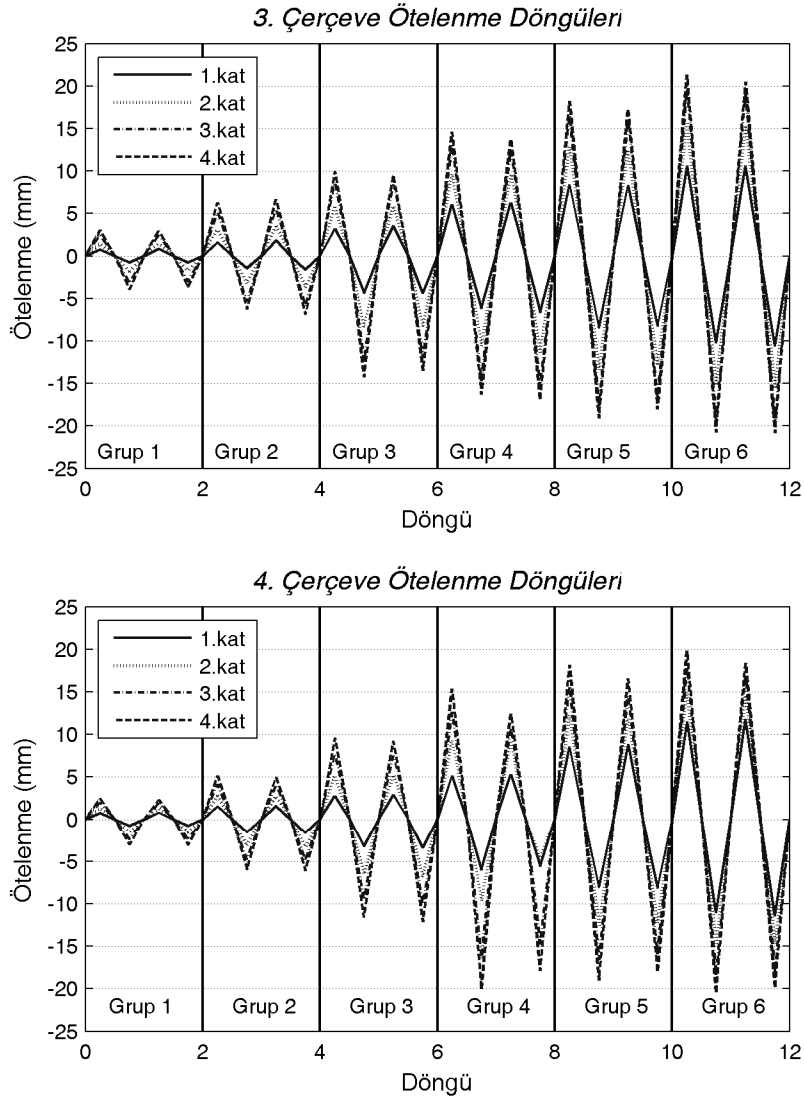
Deneylerde farklı hasar seviyelerini izleyebilmek amacı ile çerçevelerin farklı ötelenme seviyelerine ulaşmasını hedefleyen bir yükleme programı uygulanmıştır. Deneylerin sonlandırılmasına çerçevelerin üzerlerindeki ek kütleler göz önüne alınarak herhangi bir ani çökmeye karşı maksimum ötelenme miktarına ve deney anındaki hasar durumuna göre karar verilmiştir. Sünek davranış beklenmeyen 1 ve 3. çerçevelerde ötelenme miktarları sınırlı tutulmuştur. Yükleme en kritik kat olan birinci kat ötelenmesi üzerinden tanımlanmıştır. Yaklaşım olarak çerçevelere aynı ötelenme miktarına iki defa ulaştırılarak yükleme grupları oluşturulması hedeflenmiş ve bu yöntem büyük oranda uygulanmıştır. Bu sayede çerçevelerin aynı yük altındaki kararlılığıda irdelenmiştir. Her bir çerçeve için her bir katın döşeme seviyesinde uygulanmış olan ötelenme miktarları o döngü içerisinde ulaşılan en büyük değeri gösterecek şekilde Şekil 4.11 ve 4.12'de sunulmuştur. Şekillerden gözleneceği

üzere dolgusuz çerçevelerde bütün katlar orantılı bir şekilde artan ötelenmelere sahipken dolgulu çerçevelerde son üç döngüde birinci kattaki artışa rağmen üst katlardaki artış sınırlı olmuştur.



Şekil 4.11 Birinci ve ikinci çerçeve kat seviyelerinde okunan ötelenmeler ve yükleme grupları

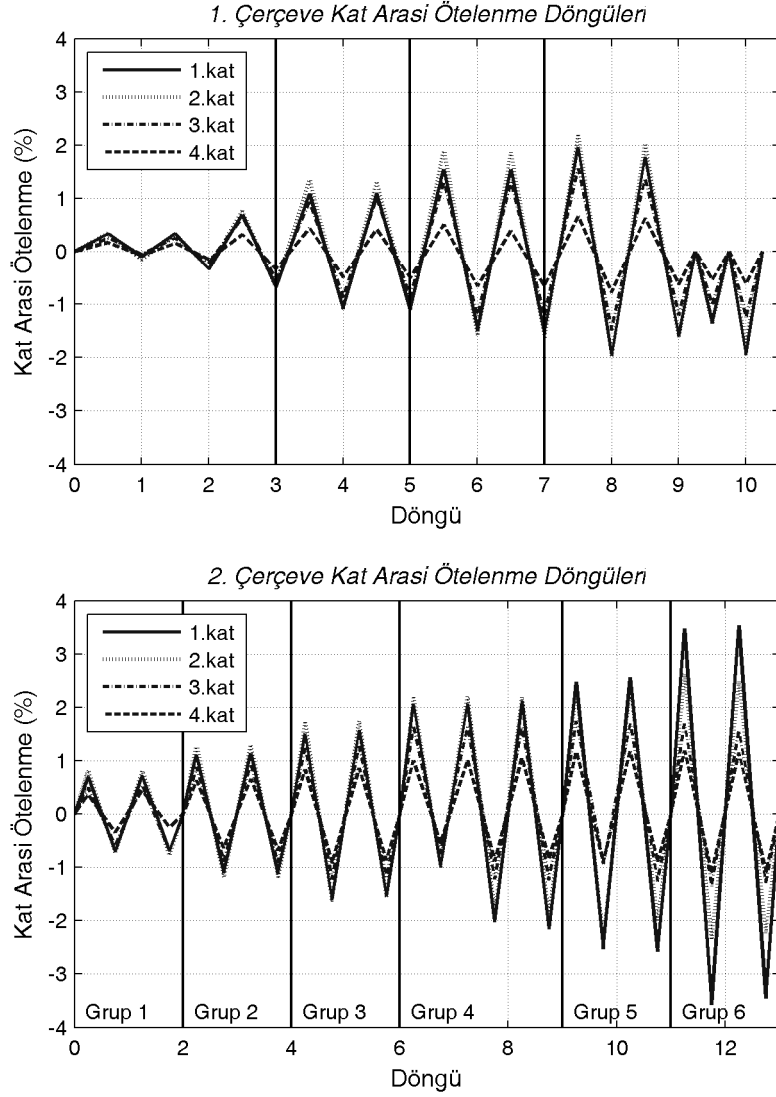
Şekil 4.11 ve 12’de sunulan döngüler mutlak ötelenme miktarlarını göstermekle beraber ötelenmelerin sistem üzerindeki talebini anlayabilmek için kat arası ötelenme oranlarına çevirilmesi faydalı olacaktır. Kiriş kolon noktalarındaki dönme miktarlarının gerçek değerleri bilinmediğinden 1. kat harici gerçek kat arası ötelenme miktarlarına ulaşılamaz. Fakat eldeki ötelenme verilerini kullanarak hesaplanacak 2, 3 ve 4. katlardaki kat arası ötelenme miktarlarının gerçek kat arası ötelenme miktarlarından büyük olacağı aşıkardır. Bu durum göz önünde bulundurularak Şekil 4.11 ve 12’deki veriler kat arası ötelenme miktarlarına çevirildiğinde Şekil 4.13 ve 14’deki sonuçlar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.12 Üçüncü ve dördüncü çerçeve kat seviyelerinde okunan ötelenmeler ve yükleme grupları

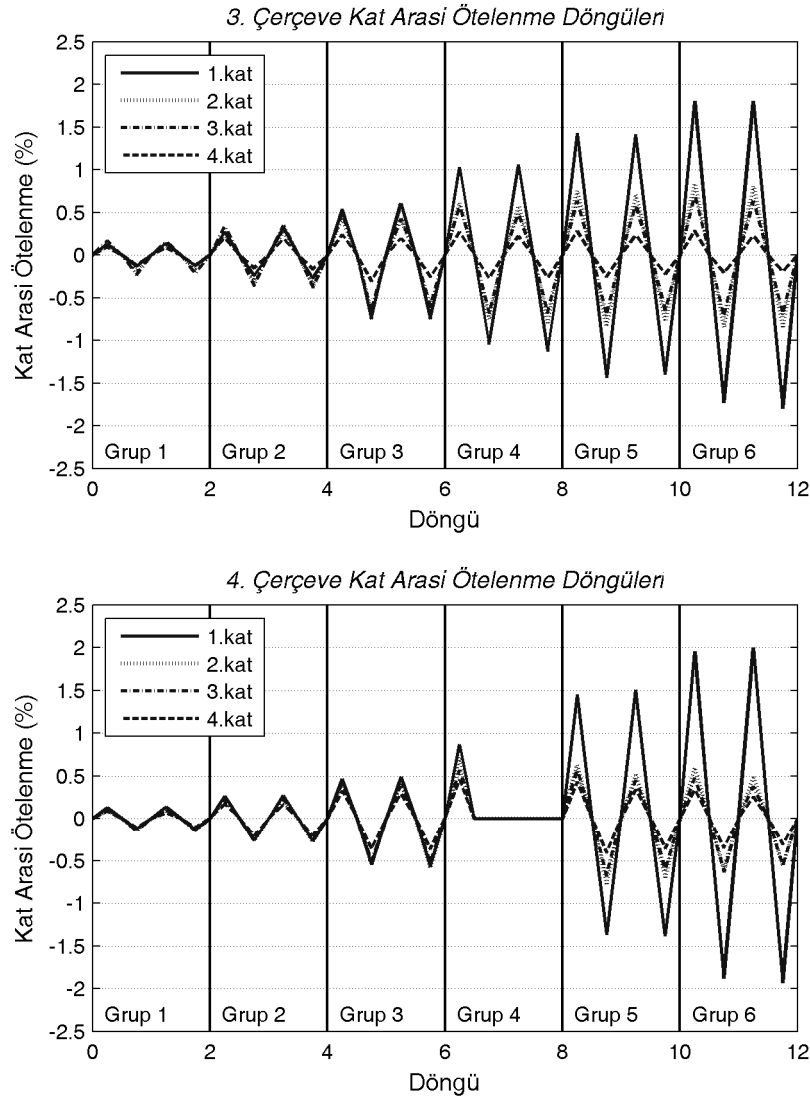
Birinci ve ikinci çerçevelere sırası ile birinci kat seviyesinde %0.7, %1.1, %1.5, 1.9% ve %0.7, %1.1, %1.5, %1.9, %2.5, %3.4 kat arası ötelenmelere karşılık gelecek yükler uygulanmıştır. İlk ötelenme kolonlarda çatlamayı başlatacak şekilde seçilmiştir. Sonraki adımlar her iki çerçeve için de eş tutulmuş ve deneylerin sonlandırılmasına çerçevelerin deney ekipmanlarına zarar verme riskinin oluşmaya başladığı noktada karar verilmiştir. Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde ise sırası ile yine birinci kat seviyesinde %0.12, %0.27, %0.7, %1.0, %1.4, %1.8 ve %0.12, %0.26, %0.54, %1.0, %1.4, %1.9 kat arası ötelemelere karşılık gelecek yükler uygulanmıştır. Bu grupta ilk iki ötelenme seviyesi dolgu duvarın davranışını gözlemleyebilmek için düşük tutulmuştur. Sonraki döngülerde ise adımlar dolgunsuz çerçevelere yakın tutulmuş ve deney sonlandırılması gene çerçevelerin deney ekipmanlarına zarar verme riskinin oluştuğu noktada karar verilmiştir.

Şekil 4.13 ve 14'den görüleceği üzere tipik olarak 1. kat en yüksek kat arası ötelenmelere maruz kalmaktadır. 1, 2, 3 ve 4. çerçeveler için sırasıyla en büyük talepler %1.9, %3.4, %1.8 ve %1.9'dur. Şekil 4.14'de dördüncü çerçeve dördüncü grup döngülerde 2. kat seviyesindeki pozisyon algılayıcının bağlantısının kopması sebebi ile veri alınamamıştır. Bu sebeple şekilde söz konusu döngü için yalnızca birinci kat ötelemeleri sunulmuştur.



Şekil 4.13 Birinci ve ikinci çerçeveler kat arası ötelenme döngüleri

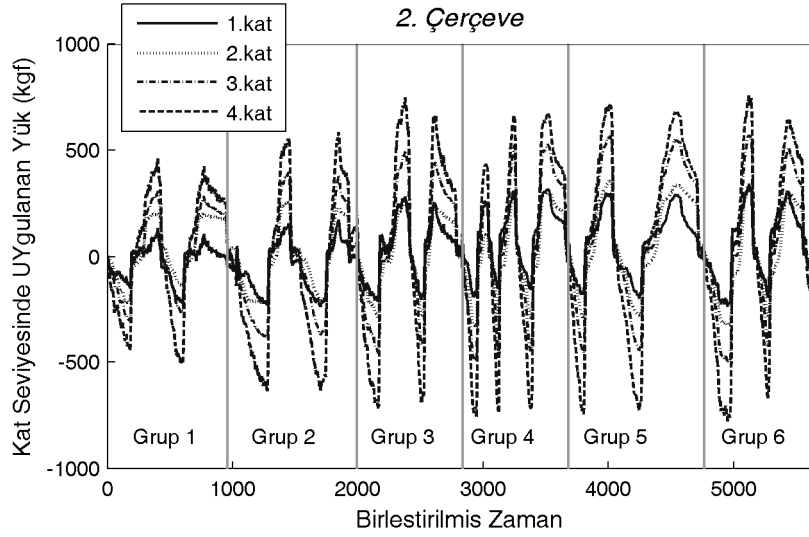
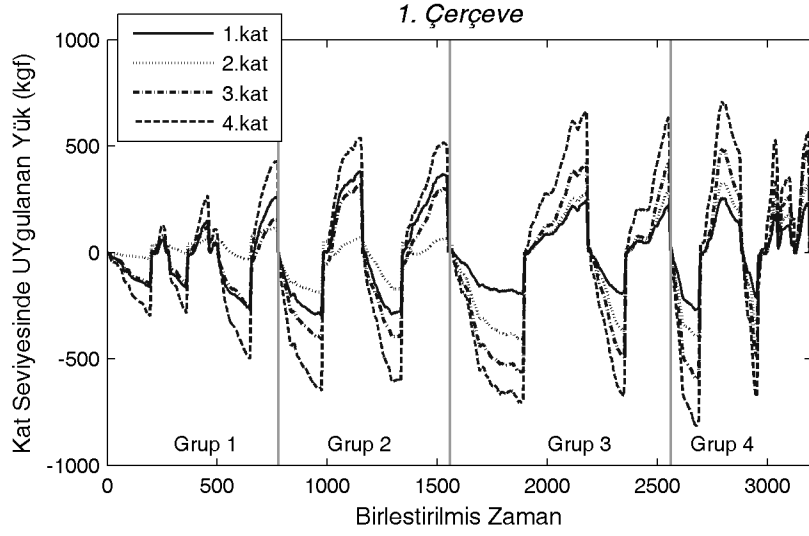
Kat arası ötelenme döngülerine yakından bakılırsa ötelemeler 1. ve 2. çerçevelerde ağırlıklı olarak ilk iki kata yoğunlaşmış olmakla beraber üst katlarda ötelenmeye katkıda bulunmuştur. Dolgu duvarlı çerçevelerde ise ötelemeler ağırlıklı olarak birinci kata yoğunlaşmaktadır. Birinci kat giriş kolon birleşimlerinde oluşan kesme çatlağı ilerlemesi ile 4. çerçevenin son iki döngüsünde ötelenme ağırlıklı olarak birinci katta oluşmaktadır. Bu durum ağır hasar sebebi ile sistemin birinci katında kolon alt ucunda ve ilk kat giriş kolon düğüm noktasında oluşan plastik mafsallar ve dolgu duvardaki ağır hasar sebebi ile oluşmuştur. Daha hafif olmak ile beraber aynı durum 3. çerçevede de oluşmuştur. Bu konuya çerçeve davranışları ve dinamik veriler kısmında tekrar değinilecektir.



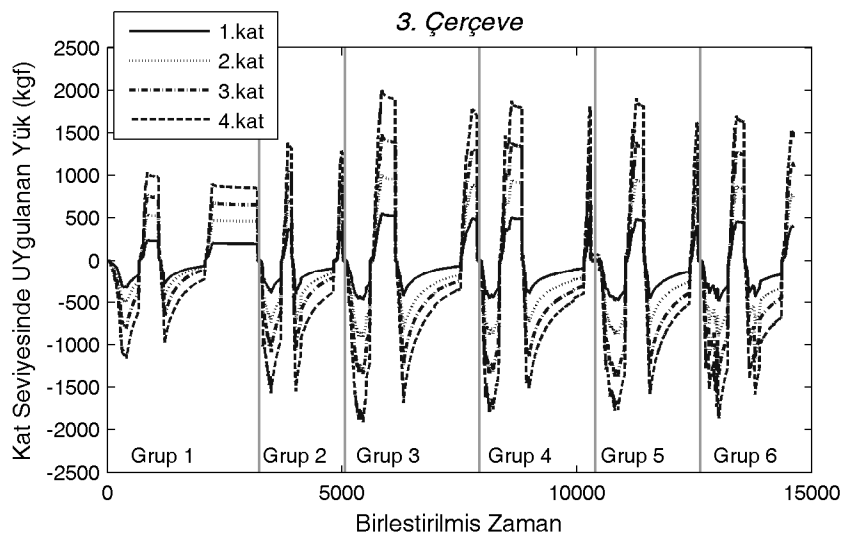
Şekil 4.14 Üçüncü ve dördüncü çerçeve kat arası ötelenme döngüleri

Çerçevelere her bir kat seviyesinde uygulanan yükleri sunmak amacı ile Şekil 4.15 ve 16'da sunulan eğriler hazırlanmıştır. Buradaki her bir eğri o kat seviyesine uygulanan yük-kompozit zaman ilişkisini vermektedir. Şekillerde zaman saniye cinsinden verilmiştir. Her bir döngü grubu zamanda ardışık olmayıp aralarında dinamik ölçümler olduğu için kompozit zaman tanımı kullanılmıştır. Şekillerden gözleneceğe üzere yüklemeler hidrolik krikolar vasıtası ile elle yapıldığından yük boşaltma ani olarak oluşmaktadır. İstenilen ötelenme değerine ulaştıktan sonra çerçeveler üzerinde çatlak gözlemi yapıldığından maksimum yükte beklenmiştir. Bu beklentiler sırasında hidrolik krikonun bir yönünde yavaş bir şekilde basınç kaybı oluşmuş bu sebeple örnek olarak dördüncü çerçeve dördüncü grup ikinci döngüde maksimum yük seviyesinden sonra oluşan parabolik yük kayıpları oluşmuştur.

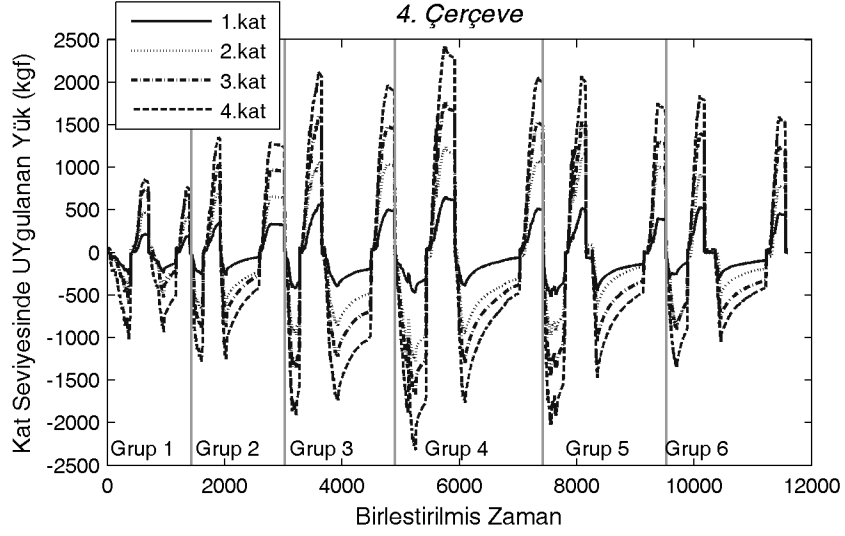
Çerçeveler birinciden başlamak üzere sırasıyla iki yönde (1712, -2000), (1972, -1763), (4998, -4635), (6000, -5739) kgf maksimum yanal yük kapasitelerine ulaşmıştır. Maksimum kapasitelerin tamamı içinde bulunan ötelenme gruplarının ilk döngüsünde ulaşılmıştır. Aynı ötelenme gruplarının ikinci döngülerinde dolgunsuz çerçeveler için %7-15, dolgulu çerçeveler için ise %10-23 arasında değişen kapasite kayıpları oluşmuştur.



Şekil 4.15 Birinci ve ikinci çerçeve için kat seviyelerinde uygulanan yükler



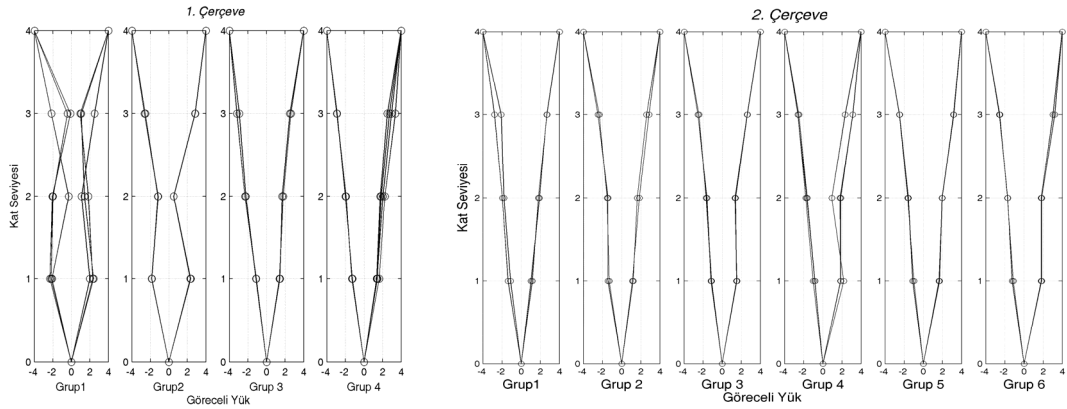
Şekil 4.16 Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde kat seviyelerinde uygulanan yükler (devamı sonraki sayfada)



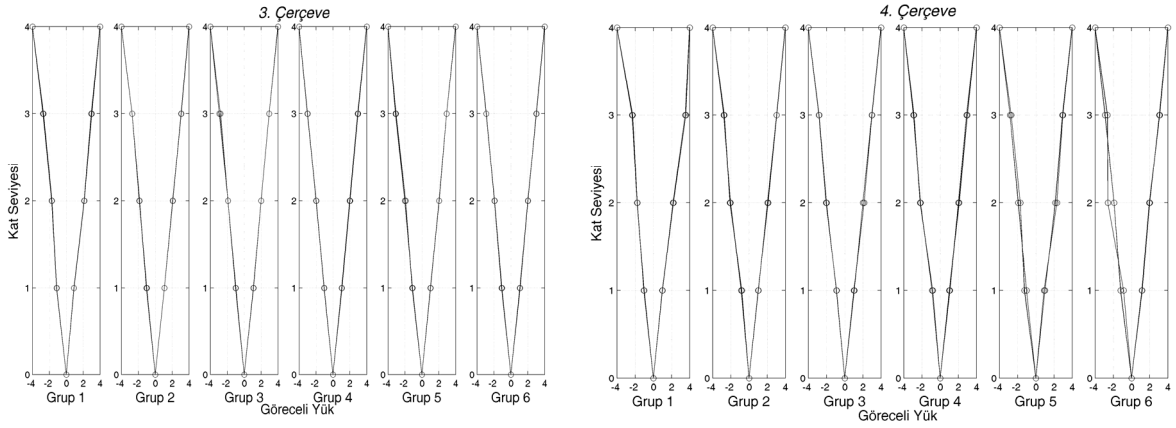
Şekil 4.16 (devam)

Deneylerde daha önce bahsedildiği üzere ters üçgen yük dağılımı hedeflenmiştir. Ters üçgen dağılımının uygulamada elde edilip edilemediğini kontrol maksadı ile her bir grup ve döngü için kat başına düşen yükler en üst kat dört birim olmak üzere düzgelemeye (İng. normalization) tabii tutularak Şekil 4.17 ve 18'de sunulan dağılımlar elde edilmiştir. Şekillerde başlangıç noktasından dördüncü katta 4 değerine (diğer yönde -4 değerine) çizilecek çizgi ideal yük dağılımını temsil etmektedir.

Birinci çerçevede ilk iki grup için yük dağılımları istenilen ters üçgen dağılım olarak gerçekleşmemiştir. Deney sırasında bu sorun farkedilerek müdahale edilmiş yük dağıtım sistemi, Şekil 4.4 ve Ek B, B.8, mafsallarının sıkılıkları ayarlanarak kalibre edilmiştir. Ayar sonrası birinci çerçeve son iki grupta dağılım kabul edilebilir seviyelere gelmiştir. Diğer çerçevelerde yük dağılımı Şekil 4.17 ve 18'den izleneceği gibi başarılı şekilde uygulanmıştır.



Şekil 4.17 Birinci ve ikinci çerçevelerde düzgelemli yük dağılımı

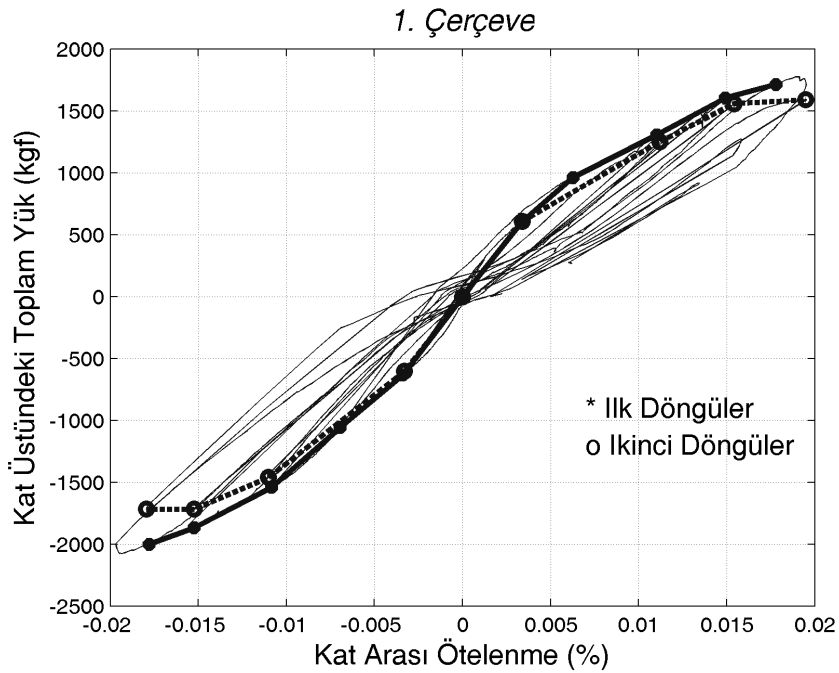


Şekil 4.18 Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde düzgelemlı yük dağılımı

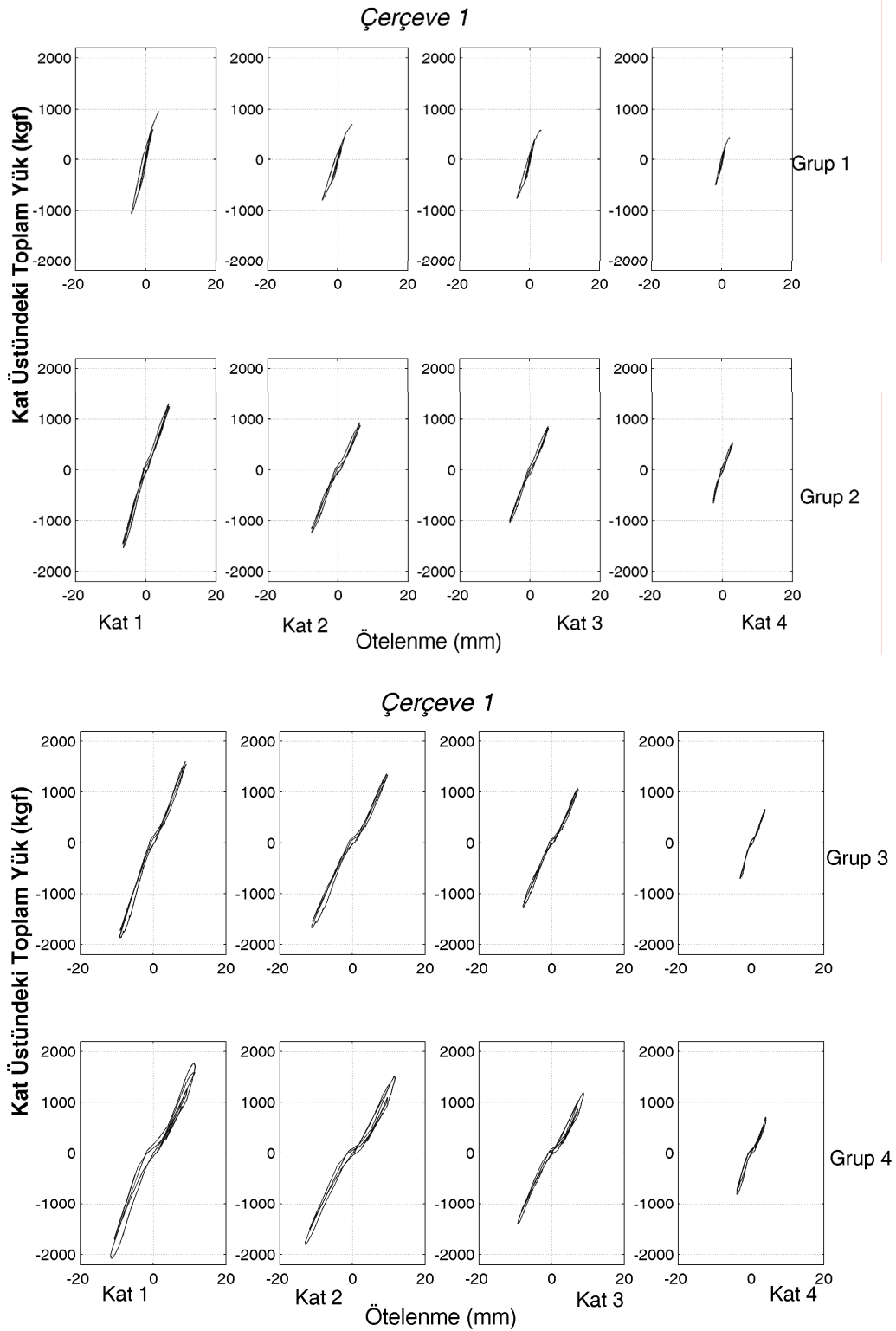
4.3.4 Birinci Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar

Sisteme uygulanan ötelenme talepleri sonucu elde edilen yanal yük ötelenme döngüleri (Histeresis, İng. Hysteresis) toplu olarak Şekil 4.19'da ve her bir yüklem grubu için kat başına olarak da Şekil 4.20'de sunulmuştur. Şekilde sunulan döngülerdeki ötelemeler birinci kat hariç o kat kolonunun tabandaki dönmesi sonucu oluşan ötelemeleri de içerdiğinden gerçek ötelemelerden daha büyüktür. Bu sebeple bütün çerçeveler için birinci kat hariç katların kat arası ötelemeleri yorumlanırken bu durumun hesaba katılması gerekmektedir.

Birinci grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 4\text{mm}$ (0.7%) ötelenmeye ve 1050 kgf yanal yük seviyesine ulaşılmış, birinci kat kolonları çatlama kapasitesinin ötesine geçerek kolonun uç bölgelerinde eğilme çatlakları oluşmuştur. Bu grup döngünün histeresis eğrileri bir doğru ile tanımlanabilir durumdadır.



Şekil 4.19 Birinci çerçeve 1. kat zarf eğrileri ve toplu histeresis eğrileri



Şekil 4.20 Birinci çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri

İkinci grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 6.5\text{mm}$ (1.1%) ötelemeye ve 1450 kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. İlk kat kolonlarında eğilme çatlakları gövde boyuna yaygınlaşmış ve kolon-kiriş düğüm noktasında her iki yönde kesme çatlakları başlamıştır, Şekil 4.21. Kirişlerde eğilme ve kesme-eğilme, ikinci kat kolon ve kirişlerinde eğilme çatlakları başlamıştır. Histeresis eğrileri hala doğrular ile tanımlanabilir durumdadır.

Üçüncü grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 9\text{mm}$ (1.5%) ötelenmeye ve 1861kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. İlk kat kolonundaki mevcut çatlakların boyları uzayıp çatlak açıklıkları artmış, bazı eğilme çatlakları eğilme-kesme çatlaklarına dönüşmüş, yeni kesme ve eğilme çatlakları oluşmuştur, Şekil 4.22. Keza ikinci kat kolon ve kirişlerinde yeni eğilme ve kesme çatlakları ve birinci kat düğüm noktasına benzer şekilde ikinci kat düğüm noktasında da her iki yönde kesme çatlakları oluşmuştur. Histerisis eğrilerinde donatının aderansının kaybetmeye başlamasının işareti olarak belirgin bir biçimde büzdürme (İng. Pinching) gözlenmeye başlanmıştır.

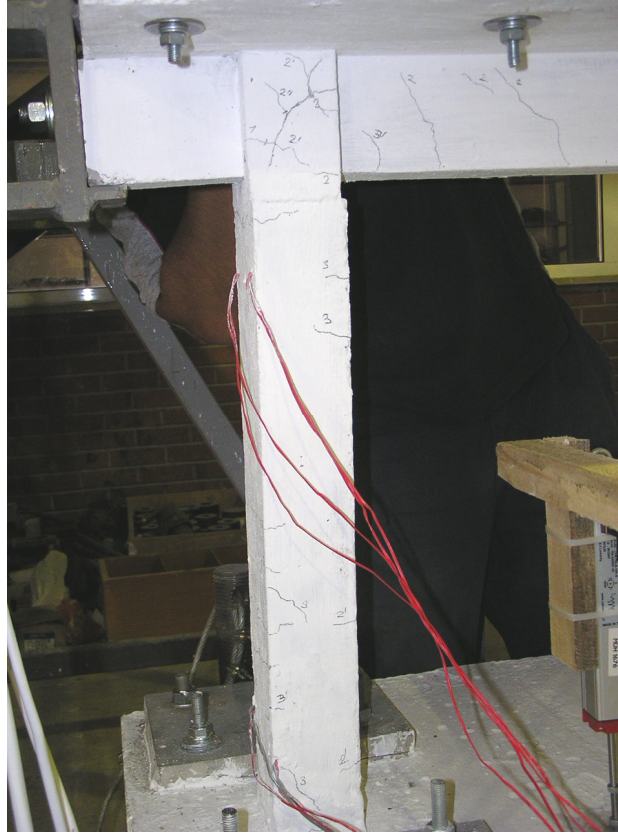


a) Yüklemeye paralel yüz

b) Yüklemeye dik yüz

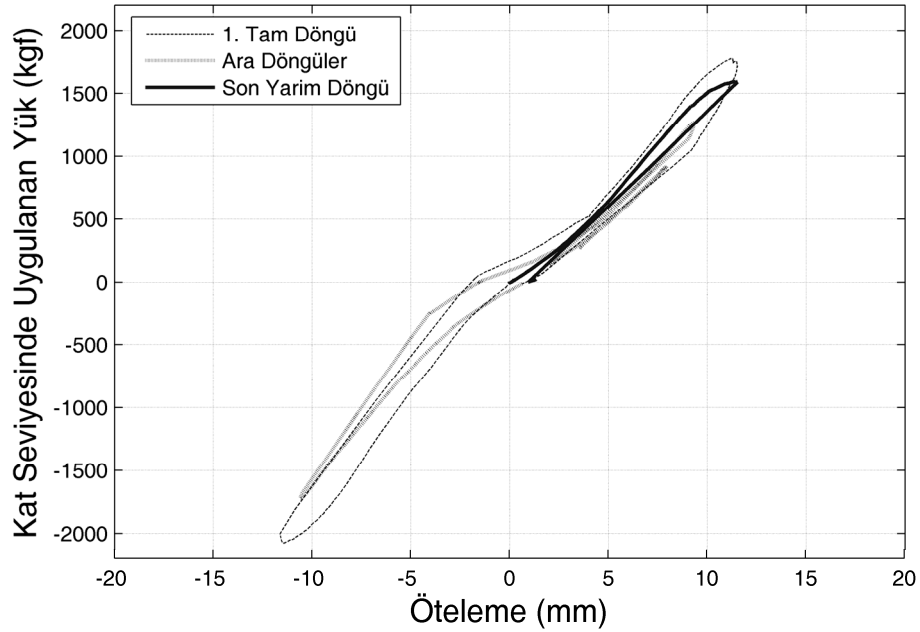
Şekil 4.21 Grup 2 döngüleri sonrası 1. kat kolonu,

Dördüncü grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 12\text{mm}$ (2.0%) ötelenmeye ve 1600kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. Bu grubun ilk tam döngüsünde düzlem dışı çerçeve desteklerinden birinin $\pm 11\text{mm}$ civarında ek kütleleri çerçeveye bağlayan çubuklardan birine dayandığı tespit edilmiş olup sistemin bu ilk tam döngüde ulaştığı yük seviyeleri gerçekçi değildir. Bu sebeple bu grupta $\pm 10\text{mm}$ öteleme seviyelerine çıkan yeni bir yarım döngü yapılmıştır. Daha sonra sorun yaratan çubuklardan bir tanesi kısaltılabilmemiş $+8\text{mm}$ ve $+11.5\text{mm}$ ötelenme uygulamaları yapılmıştır. $+11.5\text{mm}$ uygulamasının dayanımın ilk döngüdeki dayanımlarla karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlenmiş ve bu yarım döngünün gerçek davranışı sergilediği sonucuna varılmıştır. İlk tam döngü $\pm 11\text{mm}$ civarına kadar çerçevenin bağımsız davranışı olduğundan bu seviyeye kadar olan davranış gerçekçidir. Şekil 4.23'de sergilenen histerisis eğrilerine bu gözle bakıldığında sistemin $\pm 12\text{mm}$ seviyeleri sonrasında dayanım ve enerji tüketme kapasitesinde ciddi bir kayba uğradığı gözlenmektedir. $\pm 10\text{mm}$ seviyelerine ulaşan ikinci tam döngü incelenirse bir önceki yük seviyelerine ulaşılmadığı ve histerisis eğrisinin alanında büyük bir kayba uğradığı gözlemlenir. Kapasite kaybının başlaması göz önünde bulundurularak güvenlik sebebi ile deney bu aşamada durdurulmuştur.



Şekil 4.22 Grup 3 döngüleri sonrası 1. kat kolonu, yüklemeye dik yüz

4. Grup Döngüler



Şekil 4.23 Birinci kat 4.grup ötelenme yanal yük eğrileri

4. grup döngülerde kolonlarda mevcut çatlakları ilerlemiş, yer yer birleşmiş ve aralıkları büyümüştür. 1.kat düğüm noktasındaki kesme çatlakları yaklaşık 2mm genişliğe ulaşmıştır, Şekil 4.24. Üçüncü kat düğüm noktalarında her iki yönde kesme çatlakları oluşmuştur.



a) Ön Yüz

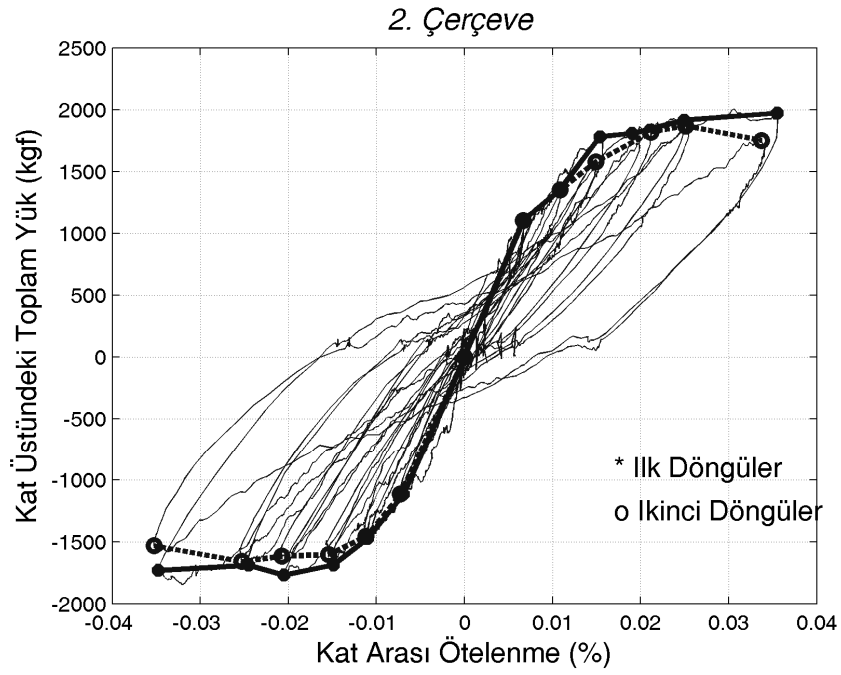
b) Arka Yüz

Şekil 4.24 Grup 4 döngüleri sonrası 1. kat doğu kolonu

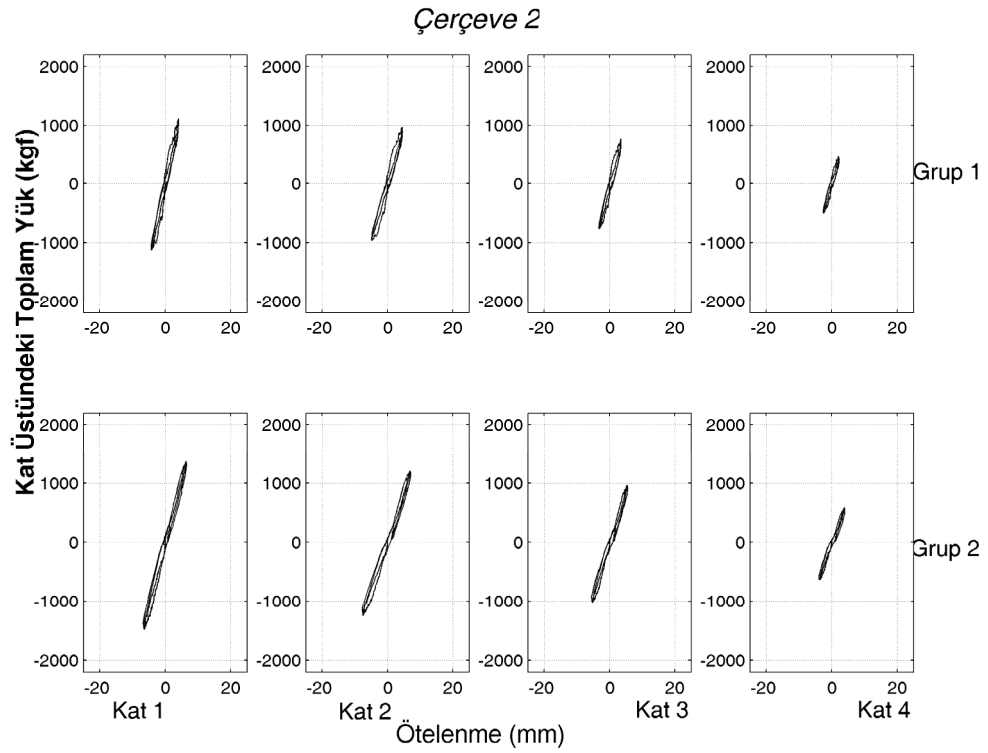
4.3.5 İkinci Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar

Sisteme uygulanan ötelenme talepleri sonucu elde edilen yanal yük ötelenme döngüleri (Histeresis, İng. Hysteresis) toplu olarak Şekil 4.25'de ve her bir yükleme grubu için kat başına olarak ise Şekil 4.26'da sunulmuştur. Birinci çerçeveye benzer olarak döngüler Şekil 4.11'de tanımlanan gruplar ve büyüklükler bazında yapılmıştır.

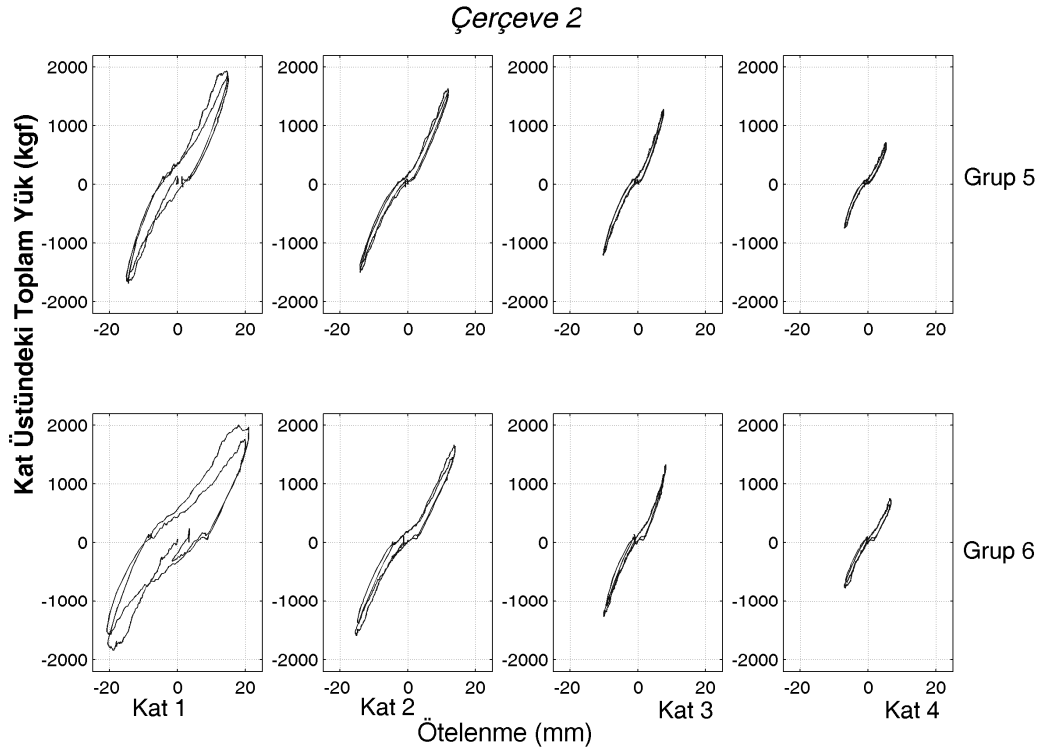
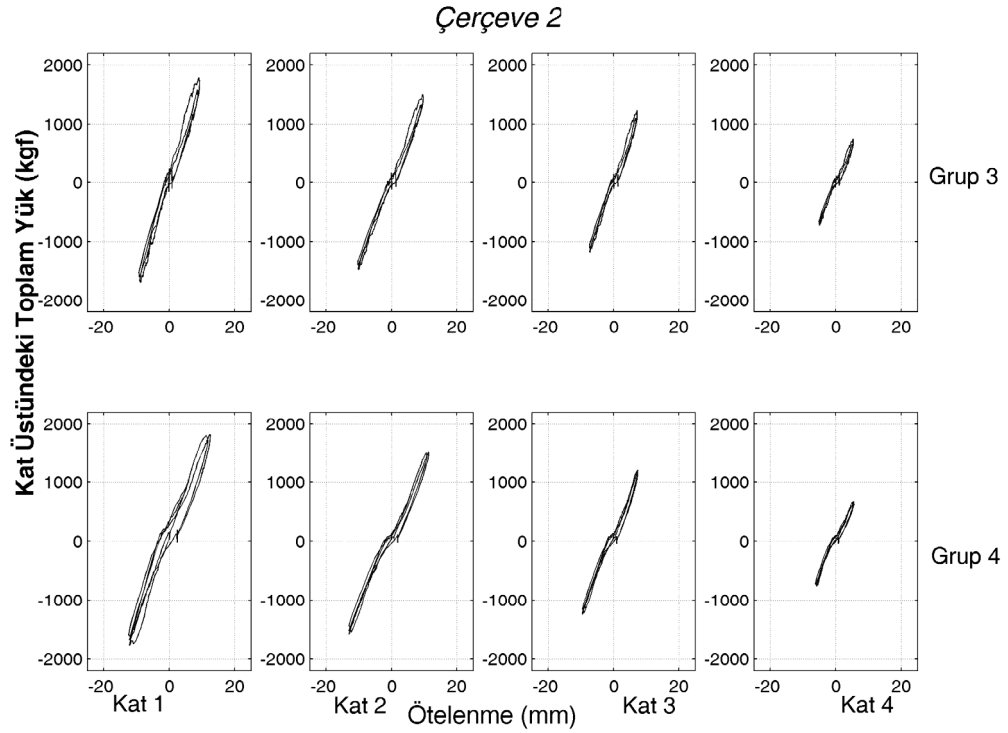
1. kat için elde edilen histeresis eğrileri toplu ele alınıp her bir döngü grubundaki birinci ve ikinci döngülerin zarf eğrileri oluşturularak Şekil 4.25'deki kalın çizgiler ile gösterilen eğriler elde edilmiştir. Zarf eğrilerinden yapılabilecek ilk gözlem her iki yönde de yaklaşık 10mm (1.7%) ötelenmeden sonra yanal yük kapasitesinde bir artış elde edilemediği ve ikinci döngüler için 15mm (2.5%) ötelenmeden sonra kapasitede düşüş başladığıdır. Ayrıca genel itibari ile 10mm ötelenmeden sonra ikinci döngüler için kapasite kaybı gözlenmektedir. Deney birinci kat 20mm (%3.4) ötelemeye ulaştıktan sonra durdurulmuştur. Bu öteleme seviyesinde çerçevenin şekil değiştirmesi gözle görülür bir hal almıştır, Şekil 4.31.



Şekil 4.25 İkinci çerçeve 1. kat zarf eğrileri ve toplu histeresis eğrileri



Şekil 4.26 İkinci çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri

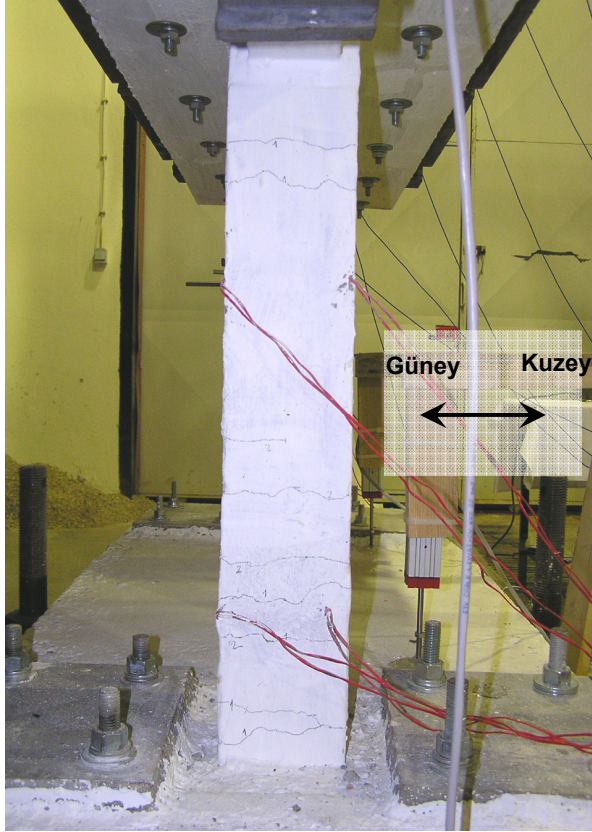


Şekil 4.26 (devam)

Birinci grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 4\text{mm}$ (0.70%) ötelenmeye ve 1120 kgf yanal yük seviyesine ulaşılmış, birinci kat kolonları çatlama kapasitesinin ötesine geçerek birinci kat kolonun uç bölgelerinde eğilme çatlakları oluşmuştur. 1. kat doğu kolonunun üst düğüm noktasında bir yüzde eğilme çatlağı başlamıştır. Bu grup döngünün histeresis eğrileri kabaca bir doğru ile tanımlanabilir durumdadır.

İkinci grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 6.5\text{mm}$ (1.1%) ötelemeye ve 1445 kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. İlk kat kolonlarında eğilme çatlakları gövde boyuna yaygınlaşmış ve kolon-kiriş düğüm noktasında her iki yönde kesme çatlakları başlamıştır, Şekil 4.27. Keza ikinci kat kolon ve kirişlerinde yeni eğilme ve kesme çatlakları oluşmuştur. Birinci kat düğüm noktasına benzer şekilde ikinci kat düğüm noktasında da kesme çatlakları ve üçüncü kat kolonunda eğilme çatlakları oluşmuştur. İlk iki katın kirişlerinde eğilme ve kesme-eğilme çatlakları başlamıştır. Histerisis eğrileri hala doğrular ile tanımlanabilir durumdadır.

Üçüncü grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 9\text{mm}$ (1.5%) ötelemeye ve 1739 kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. İlk kat kolonundaki mevcut çatlakların boyları uzayıp çatlak açıklıkları artmış, bazı eğilme çatlakları eğilme-kesme çatlaklarına dönüşmüş, yeni kesme ve eğilme çatlakları oluşmuştur, Şekil 4.28. Birinci kat kolonları düğüm noktalarındaki mevcut kesme çatlakları ilerlemiş eskilerine paralel yeni çatlaklar oluşmuştur. Histerisis eğrilerinde donatının aderansının kaybetmeye başlamasının işareti olarak belirgin bir biçimde büzdürme (İng. Pinching) gözlenmeye başlanmıştır.

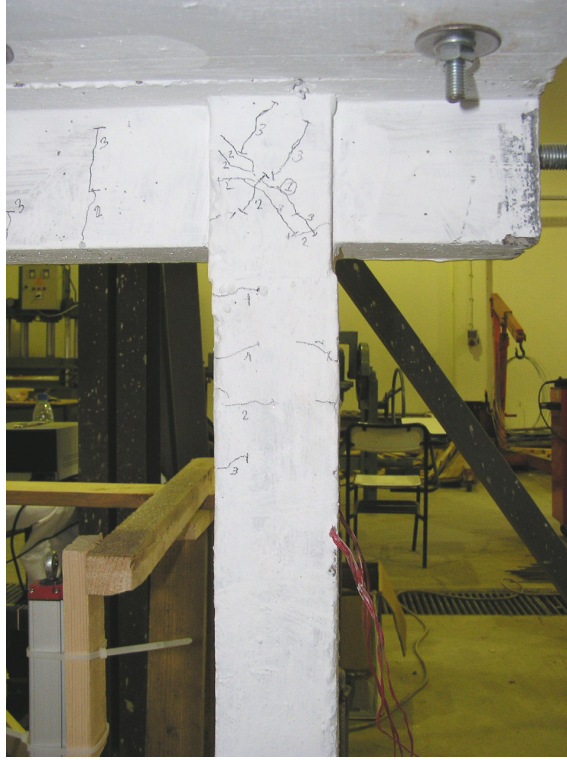


a) Yüklemeye dik yüz



b) Güney yüzü

Şekil 4.27 Grup 2 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu



Şekil 4.28 Grup 3 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu, güney yüzü



Şekil 4.29 Grup 4 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu, güney yüzü

Dördüncü grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 12\text{mm}$ (2.0%) ötelemeye ve 1830kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. 1. çerçeve davranışının aksine 2. çerçevede bu ötelenme seviyelerinde kapasite kaybı olmadığı gibi bir yönde kapasite artışının sürmüştür. Bu durum

sistemlerin donatı detaylarının farklılığından ileri gelmektedir. İkinci çerçevenin kolon boyuna donatıları yeterli kenetlenme boyuna sahiptir. Ayrıca etriye aralığı daha düşük ve düğüm noktalarında da etriye mevcuttur. Döngü sırasında kolon ve kirişlerde mevcut çatlaklar ilerlemiş ve yeni çatlaklar ortaya çıkmıştır, Şekil 4.29. Ayrıca birinci kat kolonlarında basınç bölgelerinde ezilmeye bağlı dökülmeler başlamıştır.

Beşinci grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 15\text{mm}$ (2.5%) ötelenmeye ve 1935kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. Dördüncü grup döngüleri ile karşılaştırıldığında bu ötelenme seviyelerinde toplam yanal yük seviyesi artmak ile beraber grubun ikinci döngüsünde her iki yönde yanal seviyesi düşme göstermektedir. Önceki döngüler ile karşılaştırıldığında histeresis eğrileri şişmanlamaya başlamıştır. Kolon ve kirişlerde mevcut çatlaklar ilerlemiş, sınırlı miktarda yeni çatlaklar ortaya çıkmış ve kolonlardaki ezilme bölgeleri büyümeye başlamıştır, Şekil 4.30.

Altıncı grup döngülerde 1. kat için en yüksek $\pm 20\text{mm}$ (3.4%) ötelenmeye ve 1957kgf yanal yük seviyesine ulaşılmıştır. Kat arası ötelenmenin %1 artmasına rağmen yanal yük seviyesi artış gösterememiştir. Beşinci grup döngülerine benzer şekilde grubun ikinci döngülerinde yanal yük seviyeleri düşme göstermektedir. Ağırlıklı olarak mevcut çatlak genişliğini arttırmış, ezilme bölgeleri büyümüştür. Şekil 3'den gözlemlenebileceği üzere bu grupta ötelenme birinci kat seviyesinde konsantre olmaya başlamıştır. Yük kapasitesinin artmayıp ötelenmelerin konsantre olması birinci kat seviyesinde plastik mafsal mekanizması ile göçme yoluna girildiğine işaret etmektedir. Döngü içinde ulaşılan ötelenme seviyelerinde çerçevenin görünümü Şekil 4.31'te sergilenmiştir.



Şekil 4.30 Grup 5 döngüleri sonrası doğu 1. kat kolonu, güney yüzü



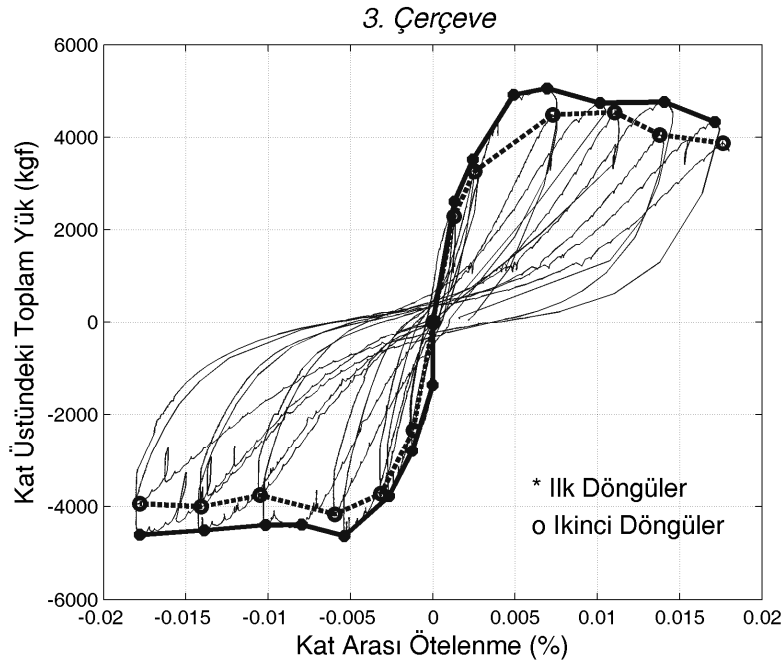
Şekil 4.31 Grup 6 döngüleri dışarında çerçeve ötelenmeleri çıplak gözle görülür halde

4.3.6 Üçüncü Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar

Sisteme uygulanan ötelenme talepleri sonucu elde edilen yanal yük ötelenme döngüleri toplu olarak Şekil 4.32'de ve her bir yükleme grubu için kat başına olarak ise Şekil 4.33'de sunulmuştur. Döngüler kat başına Şekil 4.12'de tanımlanan gruplar ve büyüklükler bazında yapılmıştır.

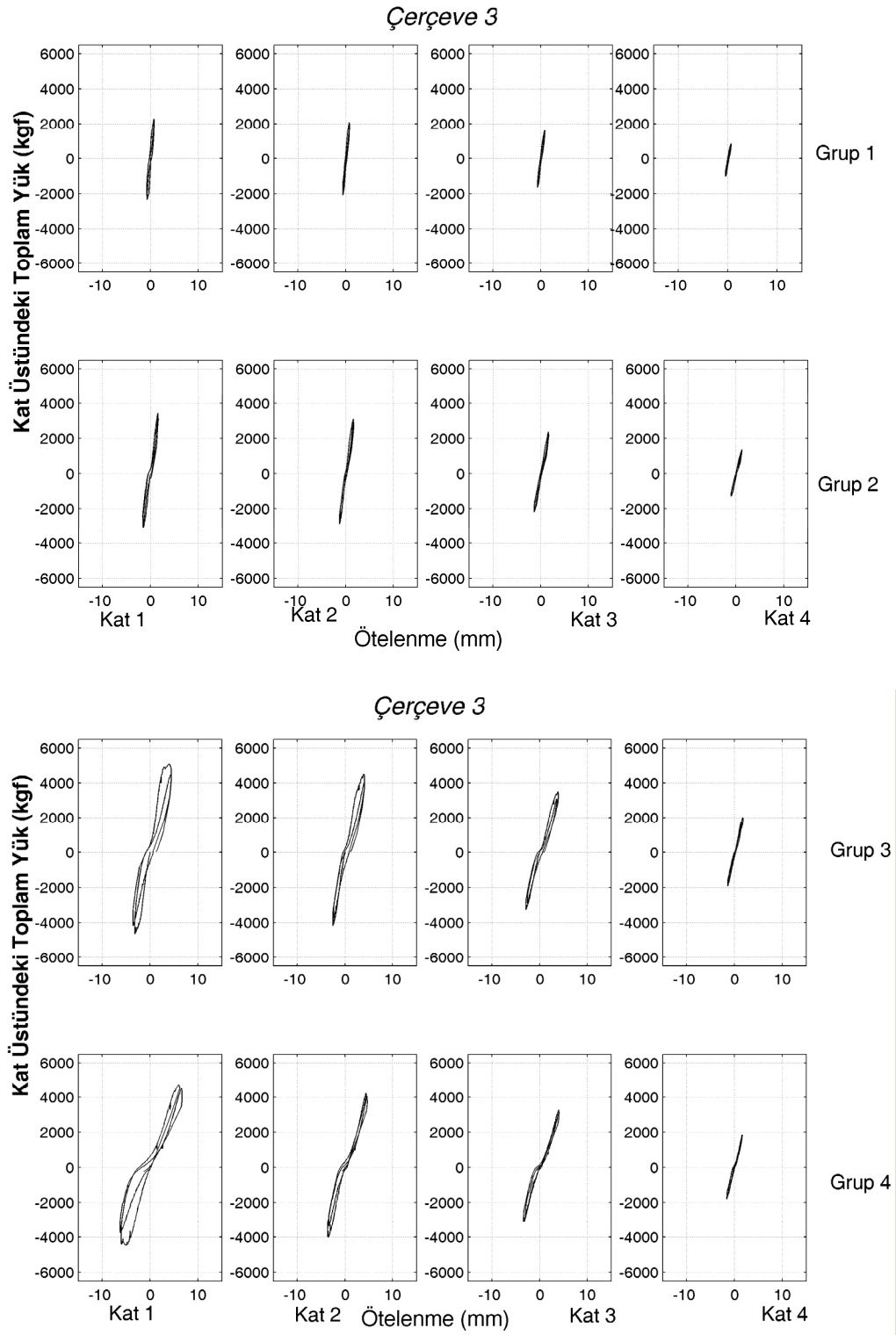
Birinci kat için elde edilen histeresis eğrileri toplu ele alınıp her bir döngü grubundaki birinci ve ikinci döngülerin zarf eğrileri oluşturularak Şekil 4.32 elde edilmiştir. Şekilden gözlenebileceği üzere her iki yönde de yaklaşık 4mm (%0.7) öteleme civarında yanal yük en yüksek değerlerine ulaşmış fakat bu noktadan sonra temelde yatay bir seyir izlemiştir. Ayrıca 1mm ötelenmeden sonra ikinci yük döngüleri için %5-16 arasında değişen kapasite kayıpları oluşmuştur. Sistemin yanal direnci sabit yük altında durağan değildir. Bu durum histeresis eğrilerinde ufak düşüşler olarak gözlenmektedir. Örnek olarak (-0.015,4000) öteleme-yük koordinatları gözlenebilir. Bu davranışın dolgu duvarların sabit yük altında çatlak

yüzleri üzerinde kayması sonucu oluştuğu kanısına varılmıştır. Deney birinci kat 10.5mm (%1.8) ötelemeye ulaştıktan sonra durdurulmuştur. İlerleyen döngü gruplarıyla histeresis eğrilerindeki büzdürmenin ikinci çerçeve ile karşılaştırıldığında daha etkin olduğu gözlemlenmektedir. Bu davranış sistemdeki yaygın çatlakların açılıp kapanması ve dolgu duvarların direnç gösterebilmek için bir yönden diğer yöne büyük miktarda şekil değiştiriyor olmasıyla oluşmaktadır. Her ne kadar deney sırasında önceden planlanmış ötelenme grupları, Şekil 4.12, uygulanmış olsa da ulaşılan yanal yük seviyelerinde sistem mesnetleri bir miktar oynama yapmıştır. Örnek olarak ilk döngü grubunda taban bağlantı tablası 0.000016 rad dönmüş ve 0.2 mm kaymıştır. Söz konusu taban oynamaları birinci kat ötelenmesine 0.3mm olarak yansımıştır. Bu oynamalar neticesinde ilk döngüde ötelenenin simetrisi etkilenmiştir. Şekil 4.32'deki histeresis döngüleri verilerin taban mesneti oynamaları kat seviyesine yansıtılarak oluşturulmuştur. Aşağıda döngü grupları tartışılırken mesnet oynama düzeltmeleri yapılmış değerler sunulmuştur.



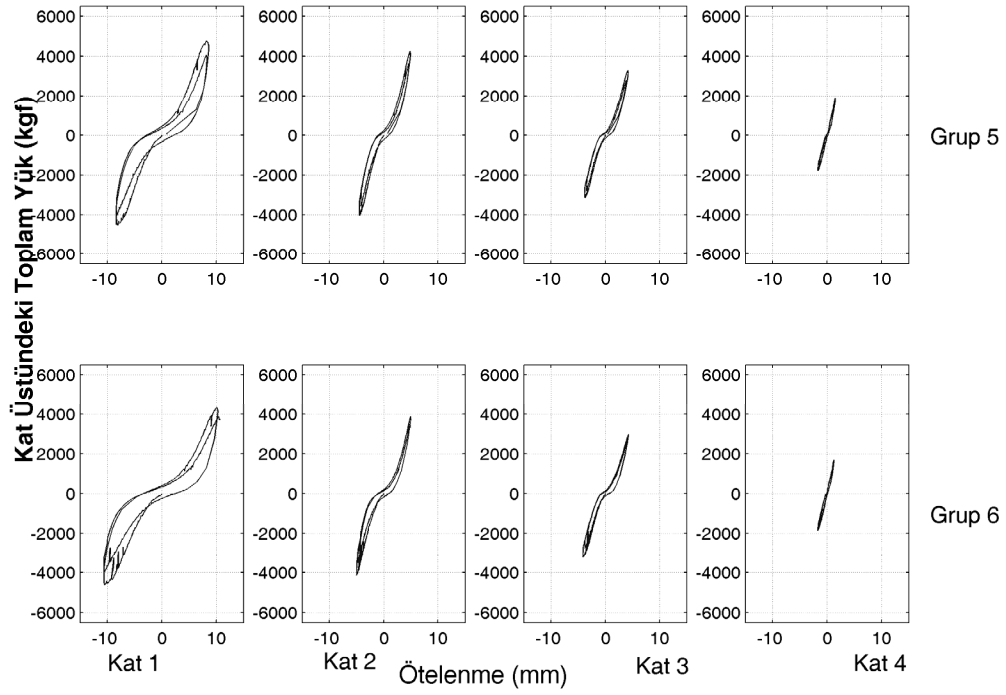
Şekil 4.32 Üçüncü çerçeve 1. kat zarf ve toplu histeresis eğrileri

Üçüncü çerçeve dolgu duvarlara sahip olduğu ve dolgu duvarların çok ufak ötelenmelerde hasar almaya başladığından ilk iki çerçeveden farklı olarak ilk döngüde ilk kat ötelenmesi ± 0.7 mm (%0.12) olarak uygulanmıştır. Sistemde bu seviyede dahi dolgu ve çerçeve hasarları oluşmuştur. Kılcal olmak ile beraber batı tarafı 1. kat kiriş kolon düğüm bölgesine sirayet eden bir eğilme çatlak ve kolon gövdesinde çok sayıda eğilme çatlak, Şekil 4.34a, oluşmuştur. Birinci ve ikinci kat dolgu duvarlarında çeperlerde ayrılmalar ve dolgu gövdesinde çapraz çatlaklar, Şekil 4.34b, oluşmuştur. Bu grupta en yüksek 2800 kgf yatay yük seviyesine ulaşılmıştır.



Şekil 4.33 Üçüncü çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri

Çerçeve 3



Şekil 4.33 (devam)



a) Kolonda oluşan eğilme çatlakları



b) Dolgu duvarlarda oluşan çatlaklar

Şekil 4.34 Grup 1 yüklemeleri sonrası oluşan hasarlar

İkinci grup döngülerde birinci kat seviyesini +1.6 ve -1.4mm(%0.27 ve %0.24) ötelenmeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Döngüler sonrası birinci kat kiriş kolon düğüm noktalarının ikincisinde de eğilme çatlakları oluşmuş. İlk grup yüklemde diğer düğüm noktasında oluşan eğilme çatlakları hafif eğim değiştirerek çapraza dönmeye başlamıştır. İlk kat kolonlarındaki eğilme çatlaklarının aralıklarının ve sayılarının artmasına ek olarak ikinci kat kolonlarında da eğilme çatlakları başlamıştır. Dolgu duvarlarda ilk döngüde oluşan çatlaklara ilave olarak çok sayıda kesme çatlakları oluşmuştur. Ayrıca birinci kat dolgusunda en üst seviye tuğla katmanı altı ve en alt seviye tuğla üstü derzlerine paralel yatay çatlak oluşumları başlamıştır, Şekil 4.35 ve 36. Üçüncü kat dolgusunda ise çerçeve dolgu arayüzünde kolon yüzünde ayrılma oluşmuştur. Bu grupta en yüksek 3787 kgf yatay yük seviyesine ulaşılmıştır.

Üçüncü grup döngülerde birinci kat seviyesini +4.1ve -3.1mm (%0.7 ve %0.52) ötelenmeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Birinci ve ikinci kat kolonlarında eğilme çatlaklarının sayısı ve mevcut çatlakların genişlikleri artmıştır. Kolonlarda yer yer ve özellikle de dolguların basınç uyguladığı bölgelerde kesme çatlakları oluşmuştur. İlk iki katın kirişlerinde eğilme çatlakları ve yine dolguların bastığı bölgelerde kesme çatlakları oluşmuştur, Şekil 4.37-39. İlk iki kat dolgu duvarında oluşmuş ana çatlak hatları ile irtibatlı yeni yan çatlaklar oluşmakla beraber temelde mevcut çatlaklar irileşmiştir. Bazı bölgelerde duvarlarda sıvalar tuğlalardan tabaka halinde kavlamaya başlamıştır. Ötelenmeler sırasında birinci kat en üst tuğla katmanı alt derzi boyunca oluşmuş olan çatlak boyunca hareket gözlenmiştir. Bu grupta sistemin yanal direnci artmaya devam etmiş ve 5053 kgf yatay yük seviyesine ulaşılmıştır.



Şekil 4.35 Grup 2 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.36 Grup 2 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.37 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat batı kolonu güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.38 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.39 Grup 3 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar

Dördüncü grup döngülerde birinci kat seviyesini $\pm 6.0\text{mm}$ (%1.0) ötelenmeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Birinci ve ikinci kat kolonlarında eğilme çatlaklarının bir

kısmı eğilme kesme çatlağı halini almış, kiriş kolon düğüm noktalarında mevcut çatlakların ilerlemesi ile beraber yeni kesme çatlakları da oluşmuştur. Birinci kat kirişinde yeni eğilme ve eğilme kesme çatlakları ikinci kat kirişinde ise dolgu duvarların basma bölgelerinde kesme çatlakları oluşmuştur. Üçüncü kat kolonunda ilk eğilme çatlakları belirmiştir. İlk iki katta dolgu duvarların kuzey yüzlerinde önceki döngüde kavlamaya başlayan sıvalar blok olarak dökülmüştür. Güney yüzlerde ufak yerel kavlamalar oluşmuş olmakla beraber daha çok çatlak yaygınlaşması devam etmiştir, Şekil 4.40 ve 41. Bu grupta sistemin yanal direnci artmayı kesmiş ve bir miktar düşerek 4739 kgf olarak gerçekleşmiştir. Üst iki kat dolgu duvarlarında çerçeve çeperinde yerel ayrılmalar dışında bir hasar gözlemlenmemiştir. Dolgusuz çerçevelerin yanal kapasiteleri göz önüne alınırsa mevcut yanal kapasite büyük oranda dolgu duvar etkisiyle gelmektedir.

Beşinci grup döngülerde birinci kat seviyesini $\pm 8.3\text{mm}$ (%1.4) ötelenmeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Çerçevenin ilk iki katında gözle görülür kalıcı şekil değiştirmeler oluşmuştur, Şekil 4.42 ve 43. Çerçeve elemanlarında az sayıda yeni çatlak oluşmuş, mevcut çatlaklar enlerini ve derinliklerini arttırmaya devam etmiştir. İlk çerçeve ile karşılaştırıldığında çerçevede yaygın bir çatlak ağı oluşmuştur. Dolgu duvarlarda sıva atmalar artmıştır. Oluşan bütün yaygın hasara rağmen sistemin yanal yük direnci 4759 kgf'da kalarak yatay bir seyir izlemiştir.



Şekil 4.40 Grup 4 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.41 Grup 4 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.42 Grup 5 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.43 Grup 5 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar

Altıncı grup döngülerde birinci kat seviyesini $\pm 10.7\text{mm}$ (%1.8) ötelenmeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. İlk iki kat elemanlarında yeni çatlak oluşmayıp temelde mevcut çatlaklar ilerleyip irileşmiştir. Kolon uç ve düğüm bölgelerindeki kesme çatlaklarının eni yer yer 2mm 'ye ulaşmıştır. Üçüncü kat kolonlarında yeni eğilme çatlakları oluşmuştur. Dolgu duvarlarda sıva atmalar devam etmiştir, Şekil 4.44 ve 45. Yanal dirençte bir yönde %9 düşüş diğer yönde ise değişim olmamıştır. Önceki döngülerde referans alınan yönde sistemin yanal yük direnci 4330kgf olarak gerçekleşmiştir. Deneysel bu aşamada sonlandırılmıştır.



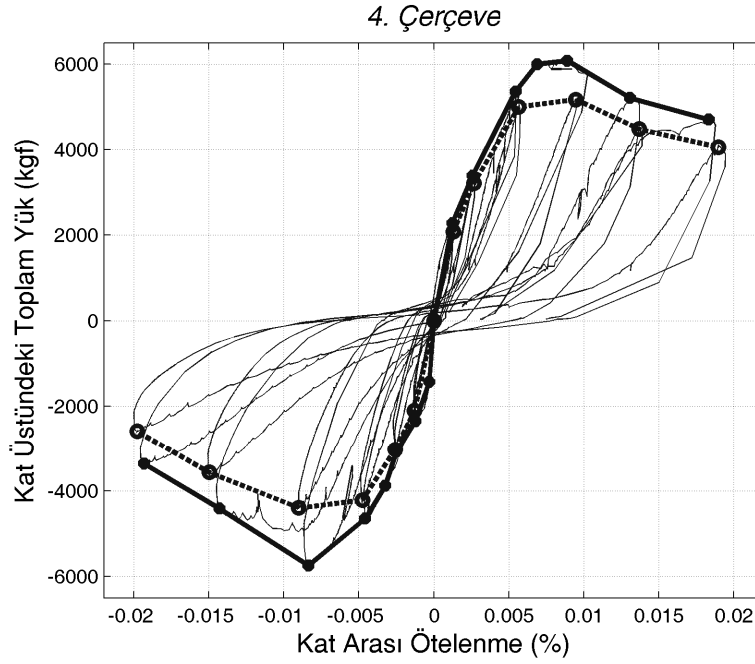
Şekil 4.44 Grup 6 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.45 Grup 6 yüklemeleri sonrası 2. kat güney yüzünde oluşan hasarlar

4.3.7 Dördüncü Çerçeve Yük-Ötelenme İlişkileri ve Gözlemlenen Hasar

Sisteme uygulanan ötelenme talepleri sonucu elde edilen yanal yük ötelenme döngüleri toplu olarak Şekil 4.46'da ve her bir yükleme grubu için kat başına olarak ise Şekil 4.47'de sunulmuştur. Döngüler deney sırasında kat başına Şekil 4.12'de tanımlanan gruplar ve büyüklükler bazında yapılmakla beraber oluşan görece büyük yanal yükler sebebi ile sistem mesnetinde sınırlı hareketler oluşmuştur. Mesnet oynamaları kullanılarak hesaplanan dönme ve doğrusal hareketler kat seviyelerinde okunan değerlerden düşülerek düzeltilmiş ötelenme değerleri hesaplanmıştır. Aşağıda verilen şekilde ve döngü grupları tartışılırken mesnet oynama düzeltmeleri yapılmış değerler sunulmuştur. Üçüncü çerçeve ile karşılaştırıldığında çerçevede maksimum yük daha yüksek gerçekleşmiştir. Fakat yanal yük direnci maksimum değerine ulaştıktan sonra düşüş göstermiştir. Şekilden gözlenebileceği üzere artı yönde 4mm (%0.7) eksi yönde ise 5mm (%0.85) ötelenme civarında yatay yük en yüksek değerlerine ulaşmış fakat bu noktadan sonra ciddi düşüşler yaşanmıştır. Ayrıca 1.5mm ötelemeden sonra ikinci yük döngüleri için %5-15 arasında değişen kapasite kayıpları oluşmuştur. Deney birinci kat kiriş kolon düğüm noktalarında oluşan ağır hasar sebebi ile, Şekil 4.53, birinci kat döşemesi 11.5mm (%2) ötelemeye ulaştıktan sonra durdurulmuştur. Üçüncü çerçeveye benzer şekilde ilerleyen döngü gruplarında histeresis eğrilerindeki büzdürme etkili bir biçimde gerçekleşmiştir.

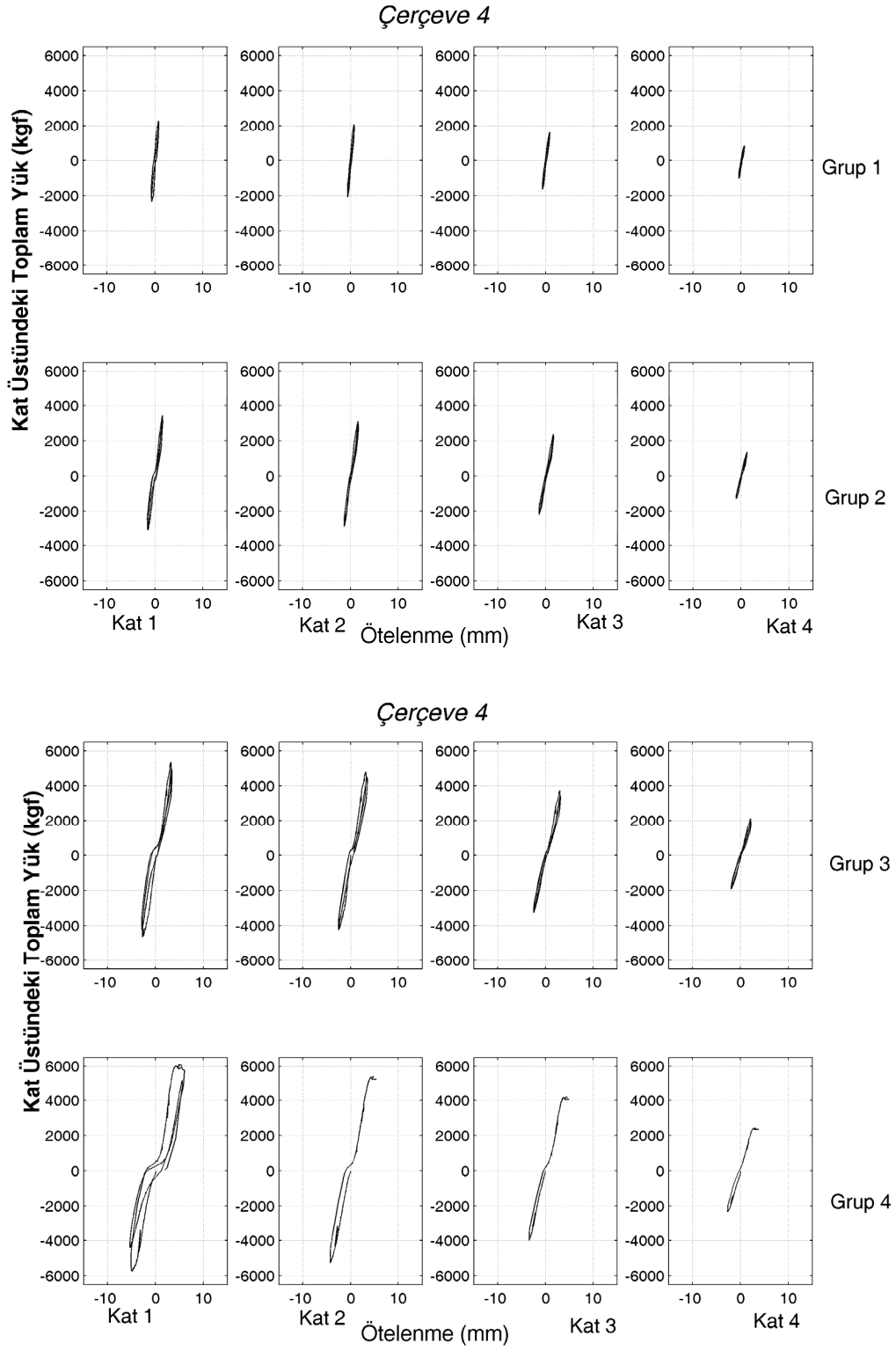


Şekil 4.46 Dördüncü çerçeve 1. kat zarf ve toplu histeresis eğrileri

İlk grup döngülerde üçüncü çerçeve benzer şekilde birinci kat seviyesini $\pm 0.7\text{mm}$ (%0.12) ötelemeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Sistemde bu seviyede dahi dolgu ve çerçeve hasarları oluşmuştur. Birinci kat dolgu duvarı alt üçte birlik bölümde duvarda yatay bir kılcal çatlak oluşmuşur. Aynı çatlağın bir uzantısı olarak kolonda da bir eğilme çatlağı oluşmuştur. Birinci kat batı kolonunda giriş kolon düğüm noktasında eğilme çatlağı başlamış ve ilk iki katta dolgu duvar çerçeve arayüzünde kılcal ayrışma gözlenmiştir. Bu grupta en yüksek 2288 kgf yatay yük seviyesine ulaşılmıştır.

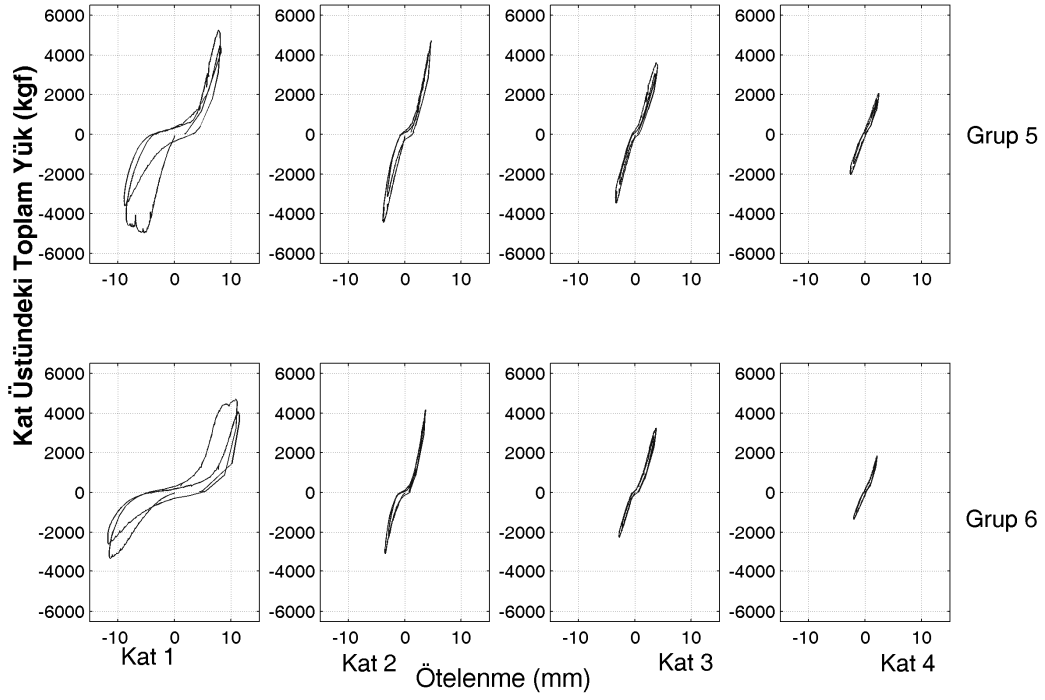
İkinci grup döngülerde birinci kat seviyesini $\pm 1.5\text{mm}$ (%0.26) ötelemeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Döngülerde birinci kat kolonlarında düğüm noktaları dahil eğilme çatlakları oluşmuştur. İkinci kat kolonu düğüm noktalarında eğilme çatlakları başlamıştır. Birinci kat duvar çerçeve arayüzleri duvar basma bölgeleri hariç tamamı ile ayrılmıştır. Birinci kat duvarındaki çatlak aralıkları 1mm'ye ulaşmıştır, Şekil 4.48. Ayrıca bu grupta en yüksek 3396 kgf yatay yük seviyesine ulaşılmıştır.

Üçüncü grup döngülerde birinci kat seviyesini +3.2 ve -2.7mm (%0.54 ve %0.46) ötelemeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Birinci ve ikinci kat kolonlarında eğilme çatlaklarının sayısı artarak yaygın bir hal almış ve yine her iki kat düğüm noktalarında kesme çatlakları ve birinci kat girişinde eğilme ve eğilme kesme çatlakları oluşmuştur, Şekil 4.49. Dolgu duvarlarda çok sınırlı yeni çatlak oluşup temelde mevcut çatlaklar ilerlemiş ve genişlemiştir, Şekil 4.50. Bu grupta sistemin yanal direnci artmaya devam edilmiş ve 5359 kgf yatay yük seviyesine ulaşılmıştır.



Şekil 4.47 Dördüncü çerçeve kat ve grup bazında dağıtılmış histeresis eğrileri

Çerçeve 4



Şekil 4.47 (devam)



Şekil 4.48 Grup 2 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar

Dördüncü grup döngülerde birinci kat seviyesini +6 ve -5mm (%1.0 ve %0.85) ötelemeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Birinci kat kolonları yük altında tam gerilme durumuna geçmiş ve kolon alt kısmında 2mm eninde bütün kesiti geçen bir çatlak oluşmuştur. Dolgu duvarın bastığı üst kısımda eğilme ve çekme altında bir çatlak yine 2mm ene kavuşmuştur. Ayrıca yine dolgu duvarın bastığı kolon kiriş düğüm noktasında kabaca birbirine paralel üç adet yaklaşık 2mm eninde kesme eğilme çatlakları oluşmuştur. Bu aşamada kolondaki şekil değiştirme gözle ayırdedilebilir bir hal almıştır. Bahsi geçen hasarlar Şekil 4.51'de sunulmuştur. Fotoğraf sistem yük altında iken çekilmiştir. Dolgu duvarlarda görünürde yeni hasar oluşmaması ile beraber sıvanın basınç bölgelerinde duvardan ayrıldığı halde ayrı bir kol olarak kolona basmaya devam ettiği gözlenmiştir. İkinci kat elemanlarında mevcut çatlaklar ilerlemiş ve sınırlı sayıda yeni çatlaklar oluşmuştur. Bu grupta sistemin yanal direnci artmaya devam edilmiş ve 6082 kgf ile en yüksek değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.49 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat kolonları düğüm noktalarında oluşan hasarlar

Beşinci grup döngülerde birinci kat seviyesini $\pm 8.3\text{mm}$ (%1.4) ötelemeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Her iki yönde de yükleme sonucu birinci kat kolonlarının kirişe bağlandığı uçlarda kesme göçmesi olmuştur, Şekil 4.52. Birinci kat dolgu duvarı doğu tarafında yeni bir kesme çatlakları başlamıştır. Bu grupta sistemin yanal direnci düşme göstermiş ve 5247 kgf değerine gerilemiştir.

Altıncı grup döngülerde birinci kat seviyesini $\pm 11.2\text{mm}$ (%1.9) ötelemeye ulaştıracak ters üçgen yükleme uygulanmıştır. Her iki yönde de yükleme sonucunda önceki grupta oluşan ağır kolon ucu kesme hasarları ilerleyerek bu bölgelerdeki beton ezilmeye başlamıştır, Şekil 4.53. Birinci kat dolgu duvarı daha önce duvardan ayrılmaya başlamış olan sıva kısmı açılmış ve altta ki tuğlada oluşan ezilmeler gözlenir hale gelmiştir. Birinci katta oluşan ağır hasar sebebi ile yük altında çerçevenin üst katları alt kat üzerinde kayar şekilde rijit cisim olarak hareket etmeye başlamıştır. Sistemin yanal direnci düşmeye devam etmiş ve 4704 kgf değerine gerilemiştir. Deney bu aşamada durdurulmuştur.



Şekil 4.50 Grup 3 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.51 Grup 4 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.52 Grup 5 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar



Şekil 4.53 Grup 6 yüklemeleri sonrası 1. kat güney yüzünde oluşan hasarlar ve deney sonu

BÖLÜM 5

BETONARME ÇERÇEVELER DİNAMİK VERİLER

5.1 Giriş

Betonarme çerçeve deneylerinin imalat ve uygulama detayları ile statik verileri 4. bölümde sunulmuştur. Bu bölümde dinamik veriler sunulup yorumlanacaktır. Betonarme çerçevelerden dinamik veri alabilmek için her bir yükleme grubundan sonra yükleme sistemi çerçevelerden ayrılmış ve iki yolla dinamik veri alınmıştır. Bu amaçla darbe çekici ile dördüncü kat döşeme seviyesinden dürtü verilmiş ve sistem yine dördüncü kat döşeme seviyesinden o döngü grubu içindeki dördüncü kat en yüksek ötelemesinin yarısına kadar çekip ani şekilde bırakılmıştır. Aşağıda ilk olarak çerçevelerin bu iki farklı uyarıya nasıl tepki verdikleri irdelenecek daha sonra her tip için sistem dinamik değişken kestirimleri ve sonuçlar tartışılacaktır.

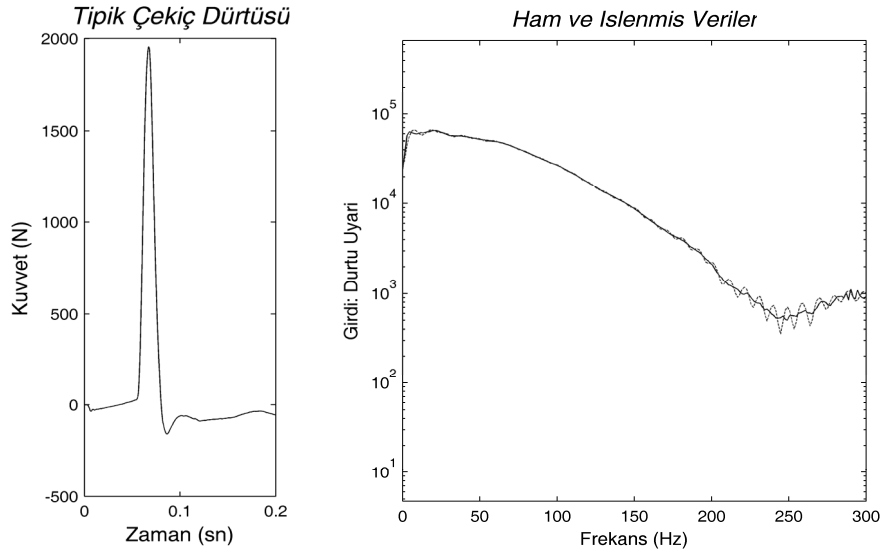
5.2 Çerçevelerin Darbe Çekici ve Çek Bırak Uyarıları Altındaki Tipik Davranışı

Çerçeveden darbe çekici uyarıları için her bir döngü veri setinde beşer takım kayıt alınmıştır. Kayıt sistemi ve düzeni ile ilgili detaylı bilgi kısım 4.3.2'de sunulmuştur. Çerçevelerden alınan verilerin modal analiz ile işlenebilmesi için modal analizin temel varsayımları olan doğrusallık ve zamanda değişmezliğin (her bir kayıt takımı kendi içinde) sınanması gerekmektedir. Bu amaçla temel varsayımlar kontrol edilecek ve çerçevelerin tipik dürtü cevapları sunulacaktır.

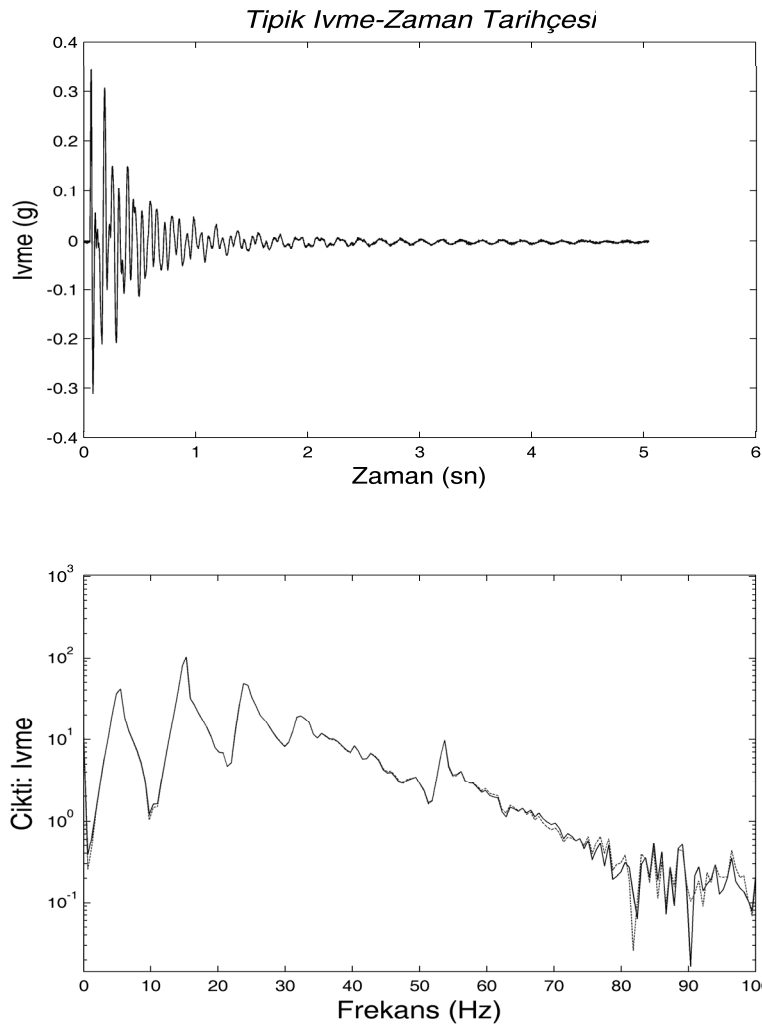
Yapılan çalışmanın sonuçları depreme maruz kalmış bir çerçevenin davranışını yorumlama amacı güttüğünden ve sistemlerin hasar sonrası dinamik değişkenlerinin kestirilmesi hedeflendiğinden, zamanda değişmezlik sistemlerin deney süresince her hasar verici yükleme arasındaki zaman aralığında değişmezlik olarak algılanmalıdır. Birbirine yakın olmak ile beraber her bir dürtü uyarısı farklı zamanlarda verildiğinden doğrusallığı ispat edilen bir sistem zamanda değişmez olarak kabul edilebilir.

Doğrusallığın kontrolü için çerçevelere farklı büyüklükte uyarılar verilmiş ve bu uyarılar altında her bir kayıt noktasına karşılık gelen frekans yanıt fonksiyonları (FYF) karşılaştırılmıştır. Dört çerçevede toplam 31 yükleme grubu olması sebebi ile her bir grup incelenmiş olmak ile beraber gösterge olması bakımından ilk çerçeve için hasarsız ve son yükleme grubuna karşılık gelen FYF'ler, diğer çerçevelerde ise sadece en ağır hasarın olduğu son yükleme grupları sonrası FYF'ler sunulacaktır.

Doğrusallığın kontrolünden önce tipik bir dürtü uyarısının ve kayıt noktalarında elde edilen sinyalin zaman ve frekans uzayındaki şekli sunulacaktır. Tipik darbe çekici dürtüsü Şekil 5.1'de sunulmuştur. Görüleceği üzere kullanılan yumuşak uç sebebi ile etkin olarak uyarılan bölge 50Hz'in altındadır. Darbe çekici dürtüsüne karşılık sistemin dördüncü kat seviyesinden elde edilen yanıt ise Şekil 5.2'de sunulmuştur. Alınan sinyalde hareket kayıt süresi olan 5sn'de sönümlenmektedir ve 50Hz'in altında sistem moduna işaret eden dört adet tepe mevcuttur.

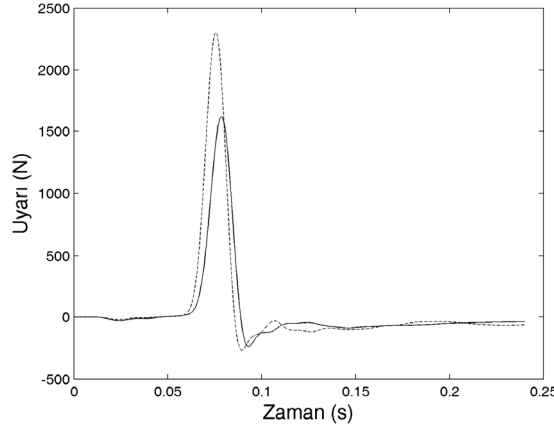


Şekil 5.1 Tipik darbe çekici dürtüsü

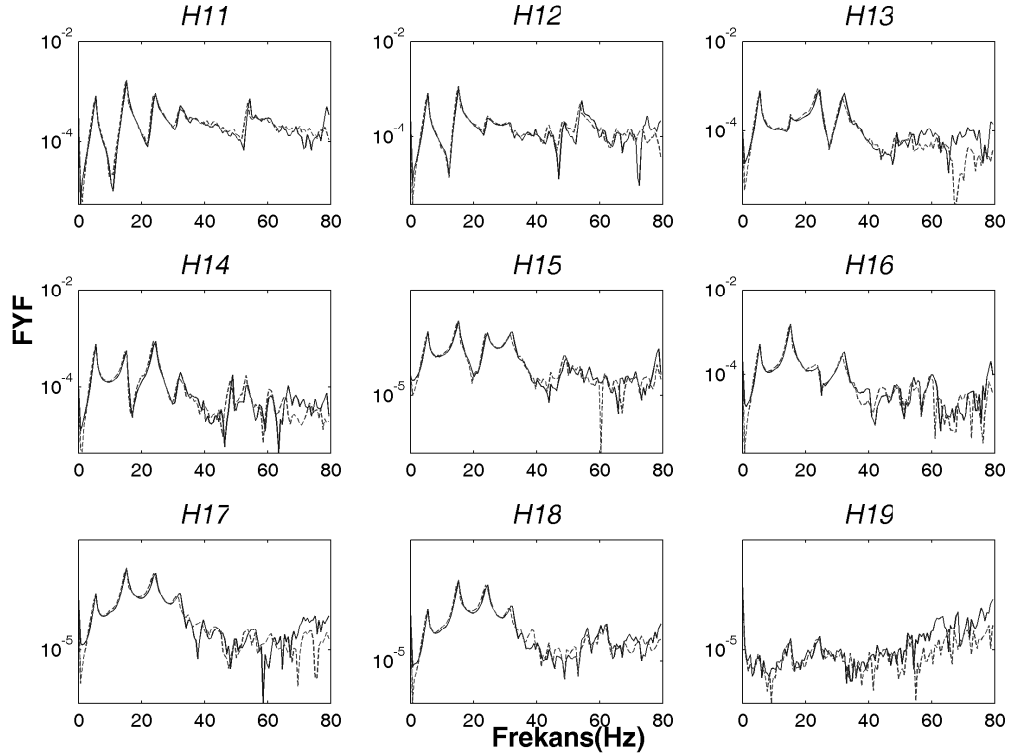


Şekil 5.2 Tipik ivme-zaman tarihçesi ve Fourier dönüşümü

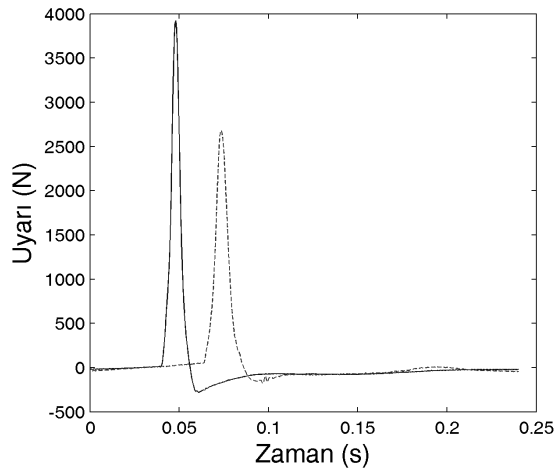
Birinci çerçeve hasarsız hali için 1620 ve 2300N büyüklüğünde uyarılara karşılık gelen iki FYF seti karşılaştırılmıştır, Şekil 5.3 ve 5.4. Sistemin FYF fonksiyonuna dikkatli bakılırsa 40Hz'e kadar olan bölgede sistemin doğrusal işlediği görülecektir. Şekilde H11 dördüncü kat döşeme seviyesinde yapılan uyarı ve yine dördüncü kat döşeme seviyesinde yapılan kayıt karşılığı FYF'dur. H19 ise dördüncü kat döşeme seviyesinde yapılan uyarı ile çerçeve mesnet tablası seviyesinde yapılan kayıt karşılığı FYF'dur. Ara numaralar yukarıdan aşağıya Şekil 4.8'deki konumlar ile sıralanmıştır. Yine birinci çerçevenin en ağır hasarlı hali olan dördüncü grup yükleme sonrası 2680 ve 3920N büyüklüklerindeki, Şekil 5.5, uyarılara karşılık gelen FYF setleri karşılaştırılırsa Şekil 5.6 elde edilmektedir. Grafikler 25Hz'in altında doğrusallığın kabul edilebilir olduğu görülmektedir.



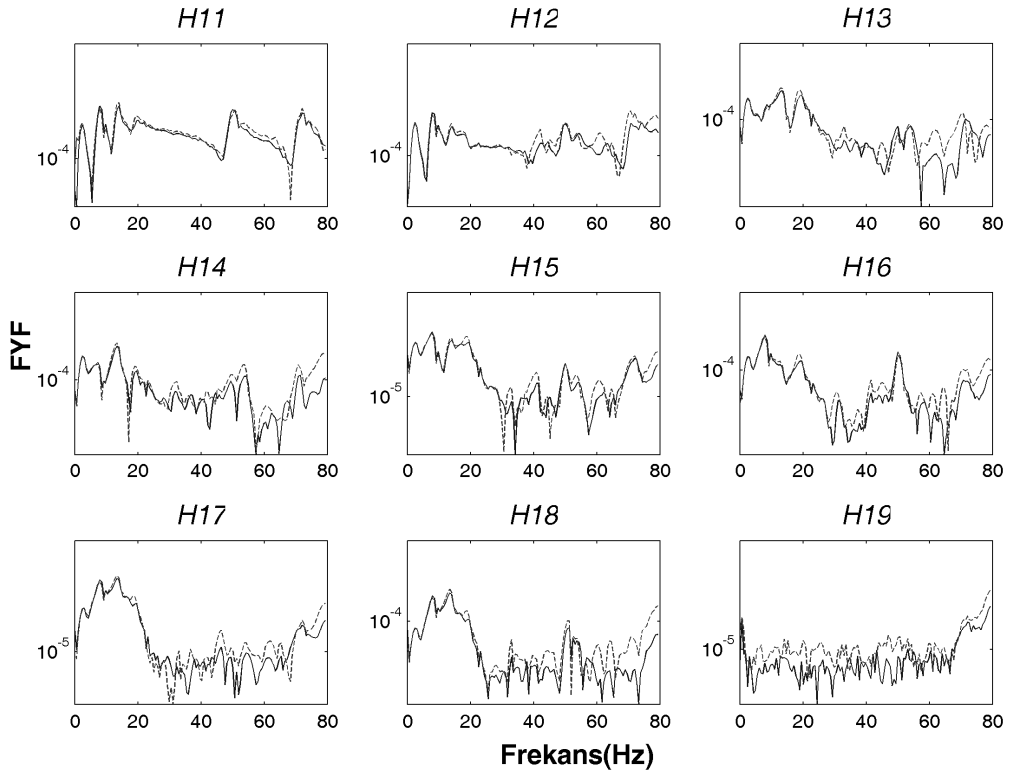
Şekil 5.3 Birinci çerçeve hasarsız hali, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri



Şekil 5.4 Birinci çerçeve hasarsız hali FYF grafikleri

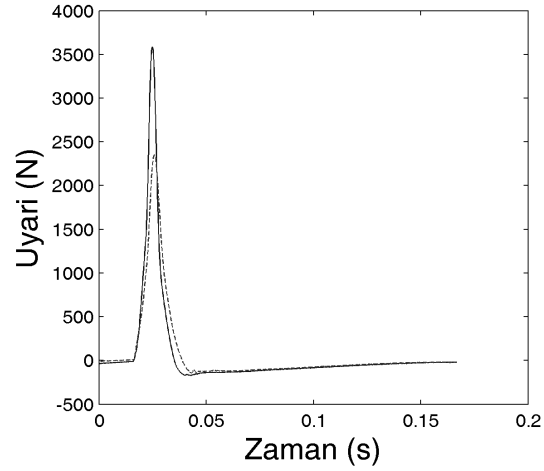


Şekil 5.5 Birinci çerçeve dördüncü döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri

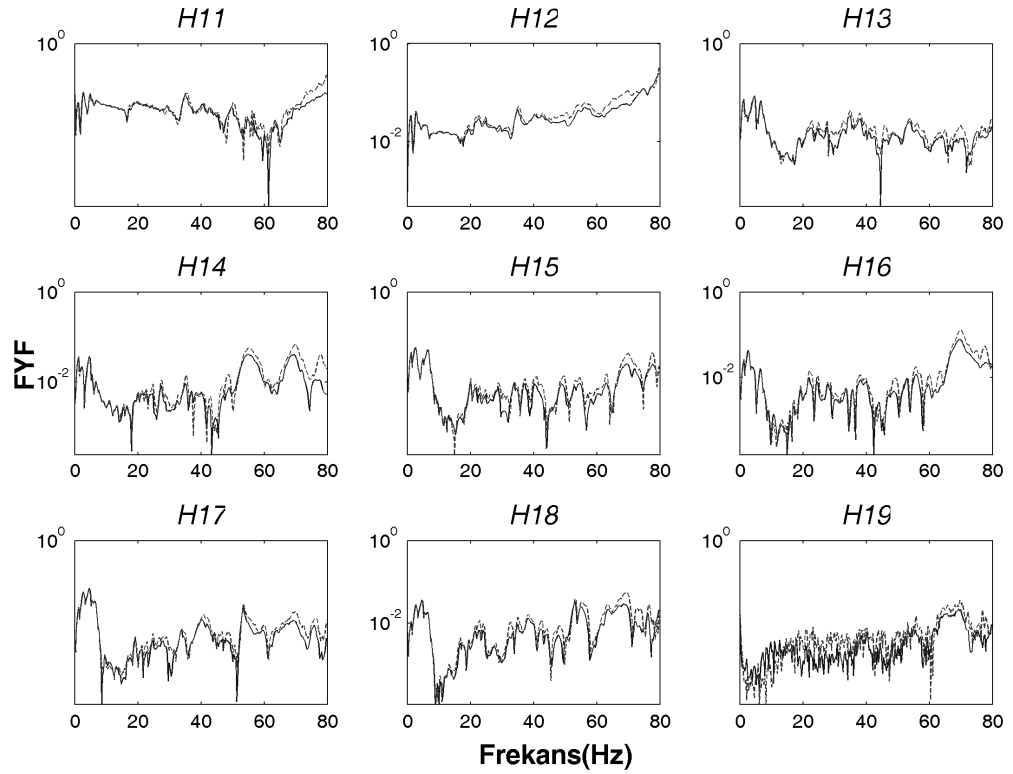


Şekil 5.6 Birinci çerçeve dördüncü yükleme grubu sonrası FYF grafikleri

İkinci çerçevenin en ağır hasarlı hali olan altıncı döngü sonrası 2530 ve 3590N büyüklüğünde uyarılara karşılık gelen iki FYF seti karşılaştırılmıştır, Şekil 5.7 ve 5.8. Sistemin FYF fonksiyonları karşılaştırıldığında 20Hz'e kadar olan bölgede sistemde doğrusallığın kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

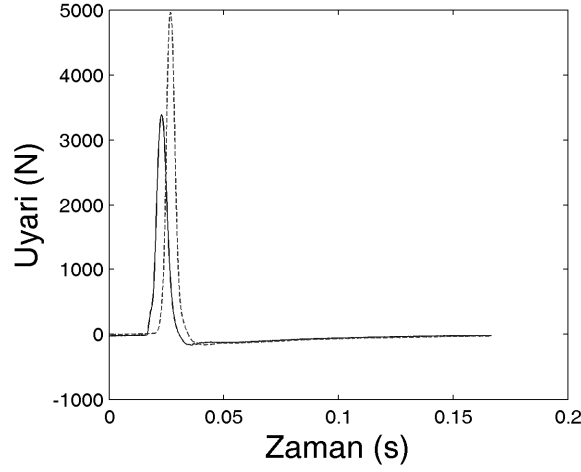


Şekil 5.7 İkinci çerçeve altıncı döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri

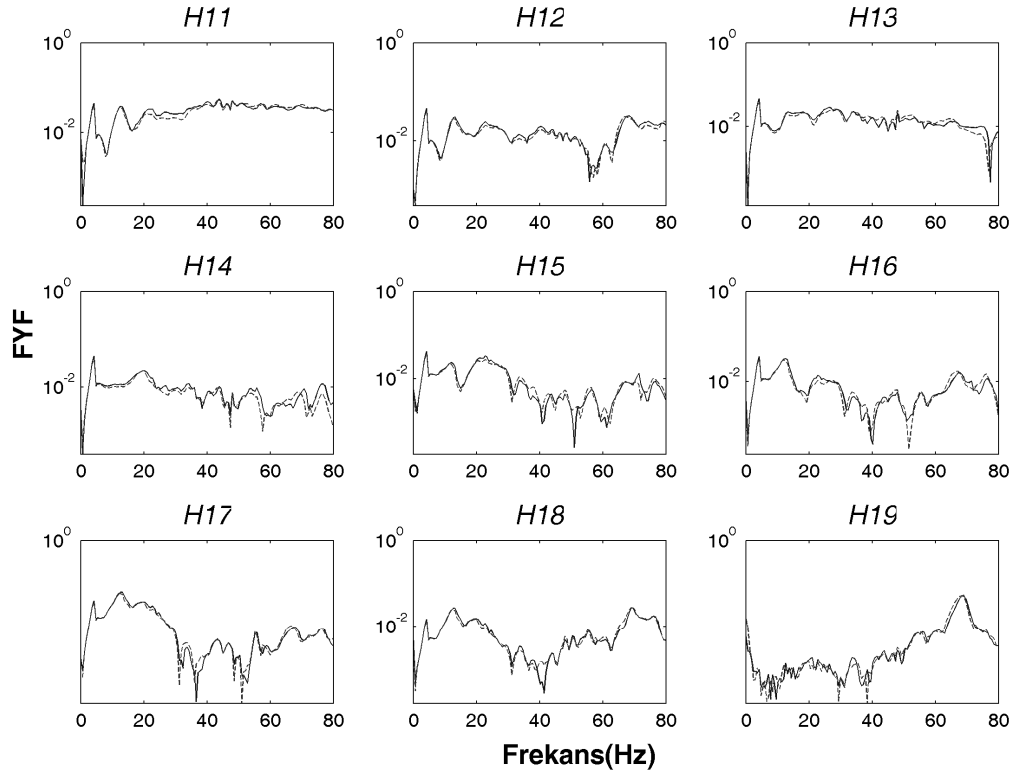


Şekil 5.8 İkinci çerçeve altıncı yükleme grubu sonrası FYF grafikleri

Üçüncü çerçevenin en ağır hasarlı hali olan altıncı döngü sonrası 3390 ve 4963N büyüklüğünde uyarılara karşılık gelen iki FYF seti karşılaştırılmıştır, Şekil 5.9 ve 5.10. Sistemin FYF fonksiyonları karşılaştırıldığında 30Hz'e kadar olan bölgede sistemde doğrusallığın kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

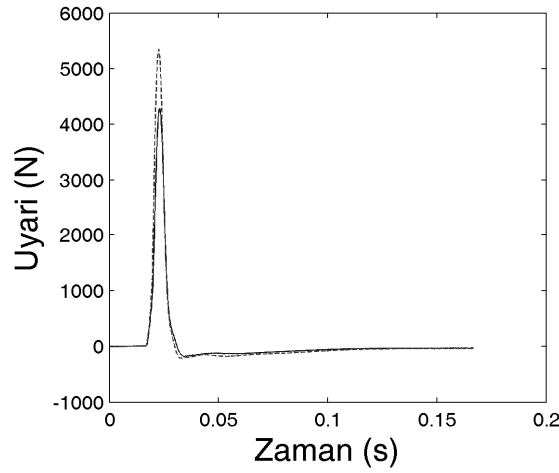


Şekil 5.9 Üçüncü çerçeve altıncı döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri

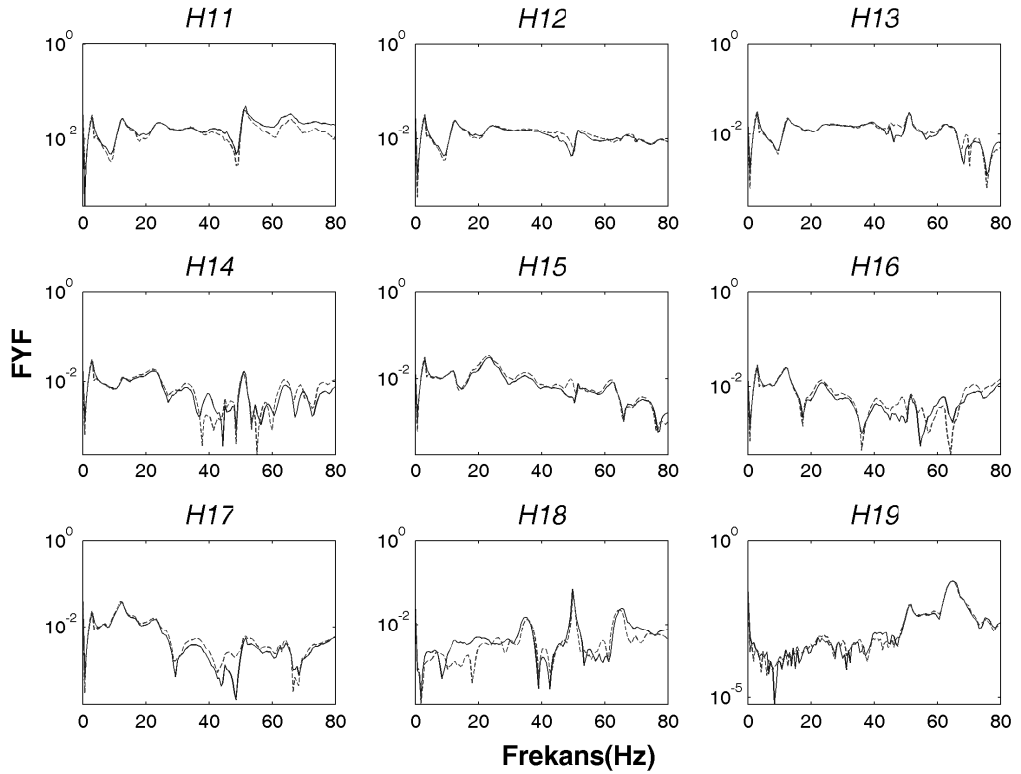


Şekil 5.10 Üçüncü çerçeve altıncı yükleme grubu sonrası FYF grafikleri

Dördüncü çerçevenin en ağır hasarlı hali olan altıncı döngü sonrası 4279 ve 5350N büyüklüğünde uyarılara karşılık gelen iki FYF seti karşılaştırılmıştır, Şekil 5.11 ve 5.12. Sistemin FYF fonksiyonuna dikkatli bakılırsa H18 hariç 30Hz'e kadar olan bölgede sistemde doğrusallığın kabul edilebilir olduğu görülmektedir. H18'de sinyal çok zayıftır. Sonraki kısımda irdeleneceği üzere dördüncü çerçeve dördüncü döngüden itibaren birinci kat kolonları üst ucunda oluşan ağır kesme hasarı sebebi ile sistemde titreşim kesme hasarının üzerinde kalan çerçeve kısmında odaklanmış, altta kalan parça hareketten yalıtılmıştır. Burada uyarının en üst kattan verildiğini hatırlamakta fayda vardır.



Şekil 5.11 Dördüncü çerçeve altıncı döngü, doğrusallık kontrolü uyarı büyüklükleri



Şekil 5.12 Dördüncü çerçeve altıncı yükleme grubu sonrası FYF grafikleri

Çerçevelerdeki fiziksel hasara rağmen darbe çekici dürtüleri altında FYF'lerin belirli frekans bölgelerinde doğrusallık varsayımını sağlıyor olmaları çerçevelerin dinamik parametrelerinin modal analiz yöntemleri ile analiz edilebilmesinin yolunu açmaktadır.

Darbe çekici uyarıları sisteme en fazla 55 kgf'luk bir güç ile uyarı verebilmiştir. Bu yük seviyelerinde çerçeveler doğrusal bölgede kalabilmektedir. Dördüncü kısımda belirtildiği üzere doğrusal bölgenin ötesine geçen uyarılar yapabilmek çerçevelere çek bırak uyarıları

verilmiştir. Bu amaçla çerçeveler dördüncü kat seviyesinde döngü grubunda dördüncü kat seviyesinde ulaşılan ötelenmelerin yarısı kadar ötelenip ani olarak bırakılmıştır.

Çek bırak uyarıları dinamik denge denkleminde başlangıç ötelemesi olarak giriş yaparlar. Denge denkleminde

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (5.1)$$

Laplace dönüşümü yapılırsa

$$L\{M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx\} = (Ms^2 + Cs + K)X(s) - Msx(0) - M\dot{x}(0) - Cx(0) \quad (5.2)$$

$$L\{f(t)\} = F(s) \quad (5.3)$$

$$[Ms^2 + Cs + K] X(s) = F(s) + (Ms + C)x(0) + M\dot{x}(0) \quad (5.4)$$

Çek bırak sistemi için $x(0) = x_0$, $\dot{x}(0) = 0$ ve $f(t) = 0$ 'dir. Bu durumda Denk. 5.4

$$[Ms^2 + Cs + K] X(s) = (Ms + C)X(0) \quad (5.5)$$

halini alır. Burada $(Ms + C)X(0) = F^*(s)$ kabulü yapılırsa Denk. 5.5 şu şekli alır.

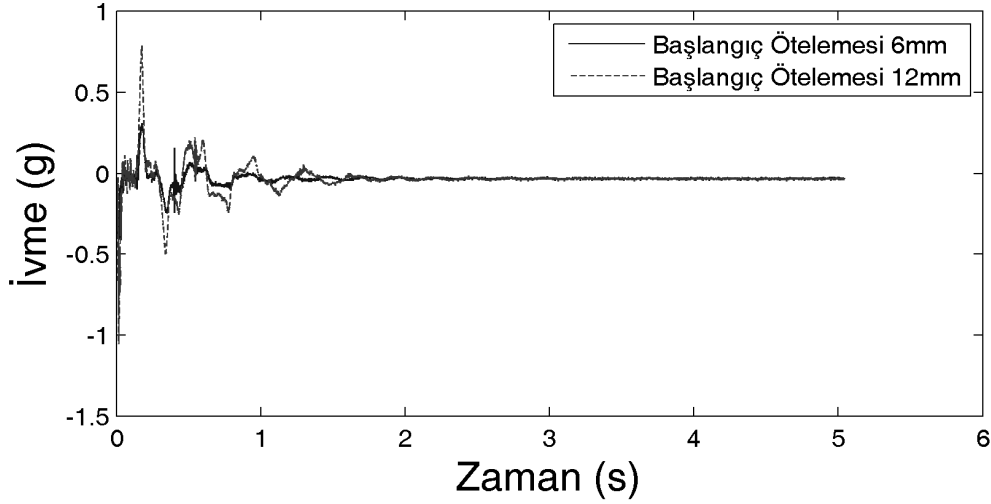
$$[Ms^2 + Cs + K] X(s) = F^*(s) \quad (5.6)$$

Denklem 2.6 ve 2.7 göz önüne alınacak olursa çek bırak uyarısı ile elde edilen yanıtlar darbe çekici ile elde edilen yanıtların frekans uzayında $(Ms + C)X(0)$ ile çarpılmış halidir. Bu durumda çek bırak yanıtlarından frekans yanıt fonksiyonu oluşturup standart modal analiz yöntemleri kullanılarak sistem değişkenleri kestirilebilir. Böyle bir yaklaşımda sistem sönümlü frekansları ve modal vektörleri hafif olarak sönüm değerleri de ağır bir biçimde etkilenecektir. Buradan sonraki bölümde çek bırak uyarılarında kestirim yapabilmek için yukarıda tanımlanan yaklaşım uygulanacak ve bu şekilde oluşturulan FYF'ları sözde-FYF olarak adlandırılacaktır.

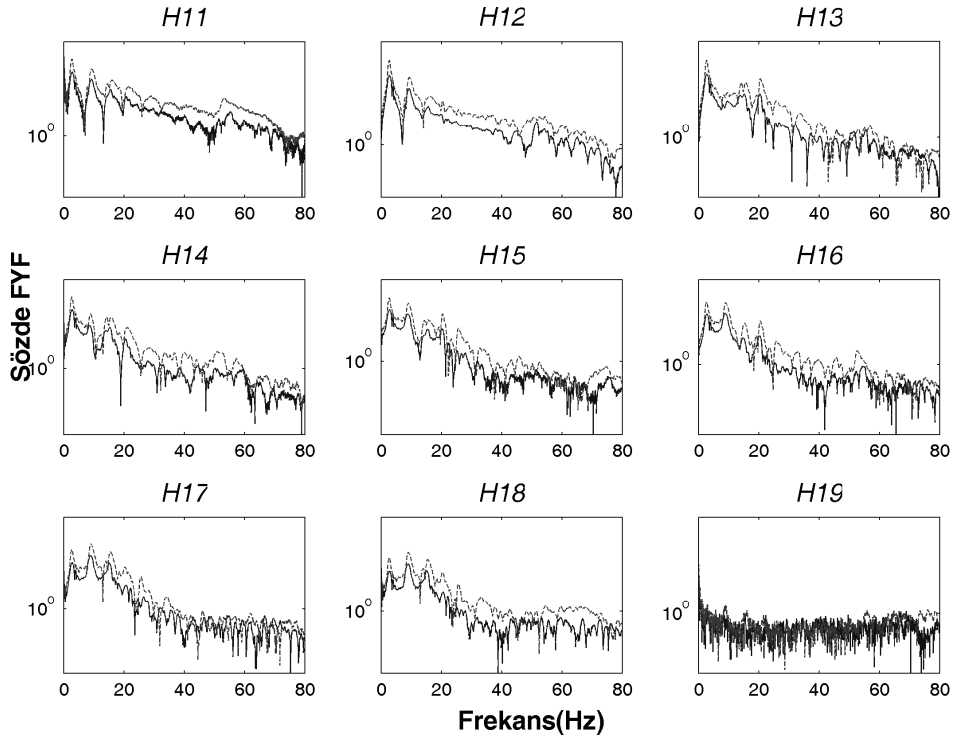
Çek bırak uyarılarına çerçevelerin verdiği yanıtı özetlemek amacı ile birinci çerçeve ikinci yükleme döngüsü sonrası yapılan çek bırak yüklemelerinden iki örnek sunulacaktır. Yapılan yükleme sonrası çerçeve yanal kapasitesinin %75'ine ulaşmış ve elemanlarında hasarlar oluşmuş durumdadır. İlk örnekte çerçevenin son döngüsündeki dördüncü kat ötelemesinin dörte birine ve yarısına kadar çekilip bırakıldığı uyarılardan elde edilen sözde FYF'ları, ikinci örnekte ise dördüncü kat ötelemesinin yarısına kadar çekilip bırakılan iki farklı yükleme için elde edilen sözde FYF'ları karşılaştırılacaktır.

Dördüncü kat ötelemesinin dörte bir ve yarısına kadar çekilip bırakılarak yaratılan uyarılar sonucu dördüncü kat seviyesinden elde edilen ivme yanıtları Şekil 5.13'de sunulmuştur. Şekilden görüleceği üzere yanıtlar arasında büyüklük ve frekans farklılıkları olmak ile beraber benzerliklerde taşımaktadırlar. Yanıtların sözde-FYF'larına bakıldığında, Şekil 5.14, her iki sinyal 30 Hz'in altında için farklı şiddetlerde dört adet tepe noktası izlenmektedir. Sinyallerin tepe yaptığı frekanslar yakın olmak ile beraber düşük uyarıya sahip sinyalin frekansları diğer

sinyalin frekanslarına göre sağa doğru kayma göstermektedir ve frekans değerleri daha düşüktür. Bu durum sistem daha düşük uyarıya maruz kaldığında daha rigid davranıyor şeklinde yorumlanabilir.

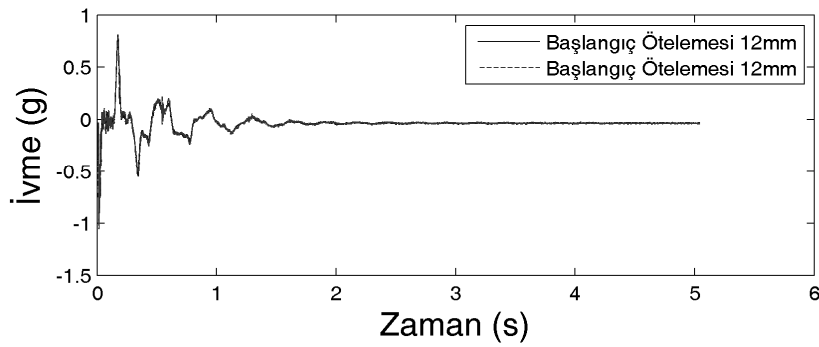


Şekil 5.13 Birinci çerçeve ikinci yüklem grubu çek bırak ivme yanıtı karşılaştırması

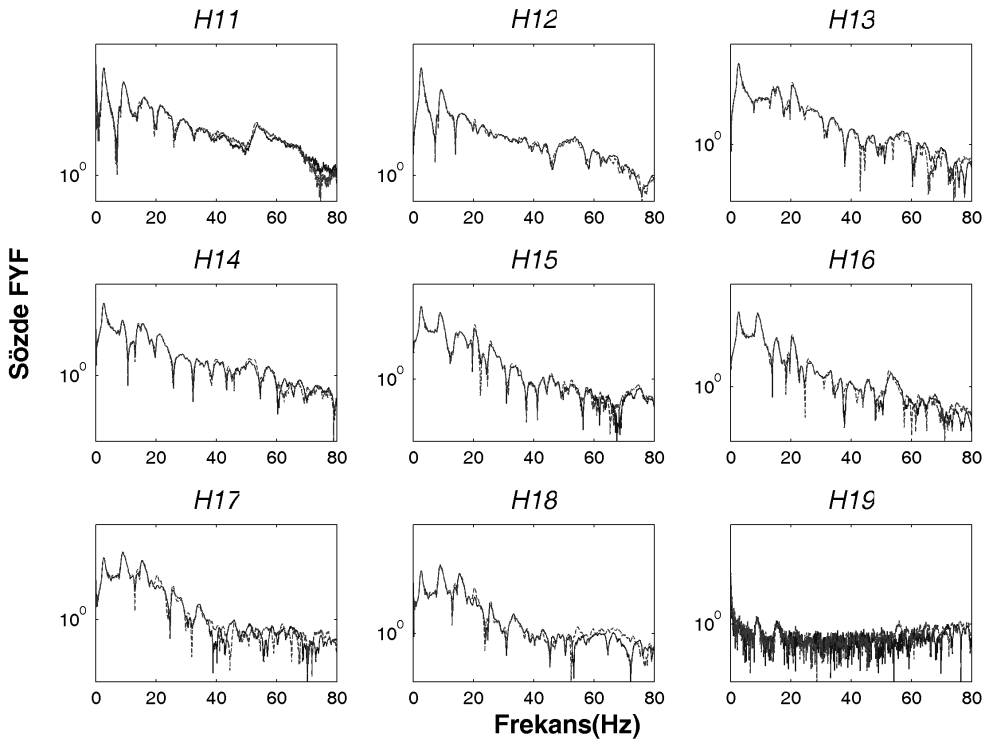


Şekil 5.14 Birinci çerçeve ikinci yüklem grubu çek bırak Şekil 5.13'de sunulan kayıtlar için sözde FYF, dolu çizgi 6mm kesik çizgi 12mm öteleme karşılığı

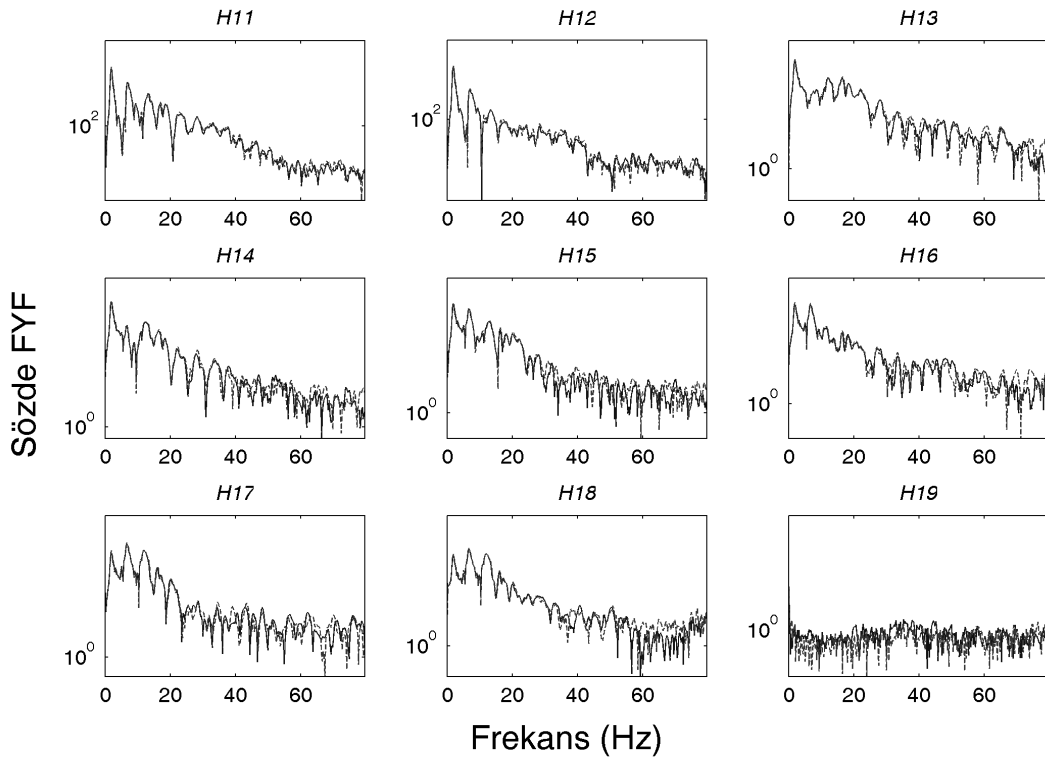
Dördüncü kat ötelemesinin yarısına kadar çekilip bırakılan iki farklı yükleme için elde edilen uyarılar sonucu dördüncü kat seviyesinden elde edilen ivme yanıtları Şekil 5.15'de sunulmuştur. Sistem hasarlı olmasına rağmen aynı şiddette uyarılara maruz kaldığında neredeyse eş tepkiler vermektedir. Bu durum gözlemlenen doğrusal olmayan sistemlerin farklı enerji seviyelerinde farklı sistemler gibi çalışıyor olmak ile beraber enerji seviyesi korunduğunda kararlı bir sistem olarak davrandığını göstermektedir. Sistemin sözde FYF'ları da bu davranışı doğrulamakta ve Şekil 5.16'dan görüleceği üzere aynı şiddetteki iki farklı uyarı için çok benzer sonuçlar vermektedir. Diğer çerçevelerin en ağır hasar seviyesi olan son döngüleri için sözde FYF'leri Şekil 5.17-19'de sunulmuştur. Dördüncü çerçeve hariç bütün çerçeveler aynı davranışı göstermiştir. Dördüncü çerçeve ikinci döngüden itibaren sadece birinci mod civarında uyum göstermekte olup daha yüksek frekanslarda aynı enerji seviyelerindeki kararlılığı sağlamamıştır. Dördüncü çerçevenin ilk döngü sonrası çek bırak yüklemelerinden elde edilen sözde FYF'ları Şekil 5.20'de sunulmuştur.



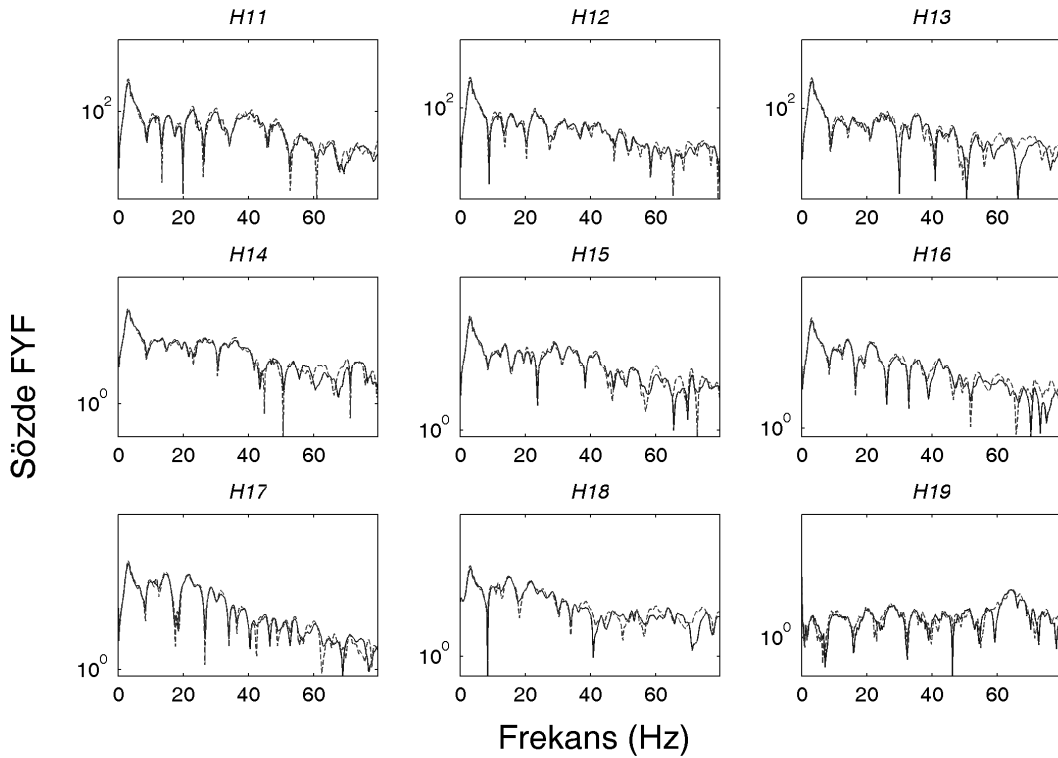
Şekil 5.15 Birinci çerçeve ikinci yükleme grubu çek bırak ivme yanıtı karşılaştırması



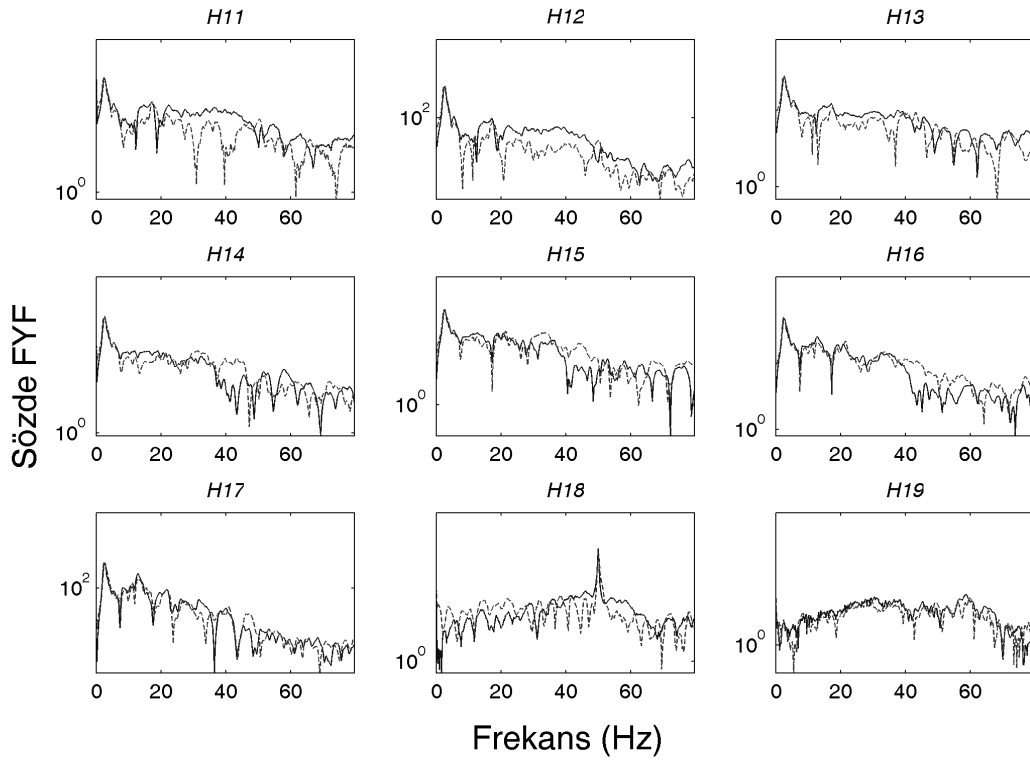
Şekil 5.16 Birinci çerçeve ikinci yükleme grubu çek bırak Şekil 5.15'de sunulan kayıtlar için sözde FYF



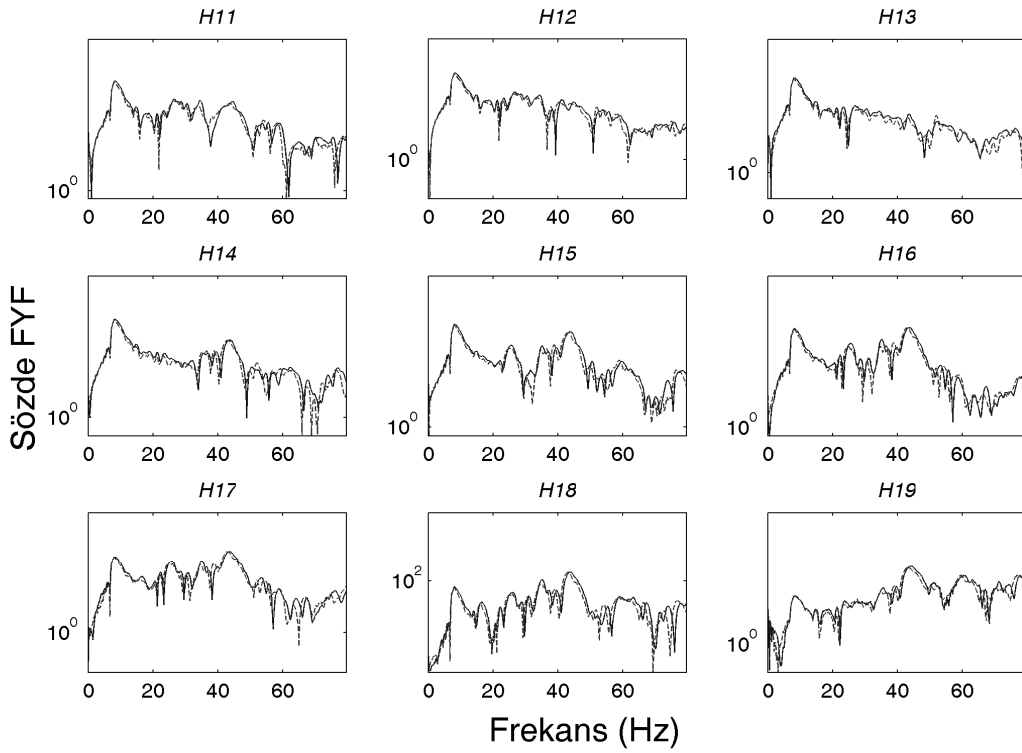
Şekil 5.17 İkinci çerçeve altıncı yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar



Şekil 5.18 Üçüncü çerçeve altıncı yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar

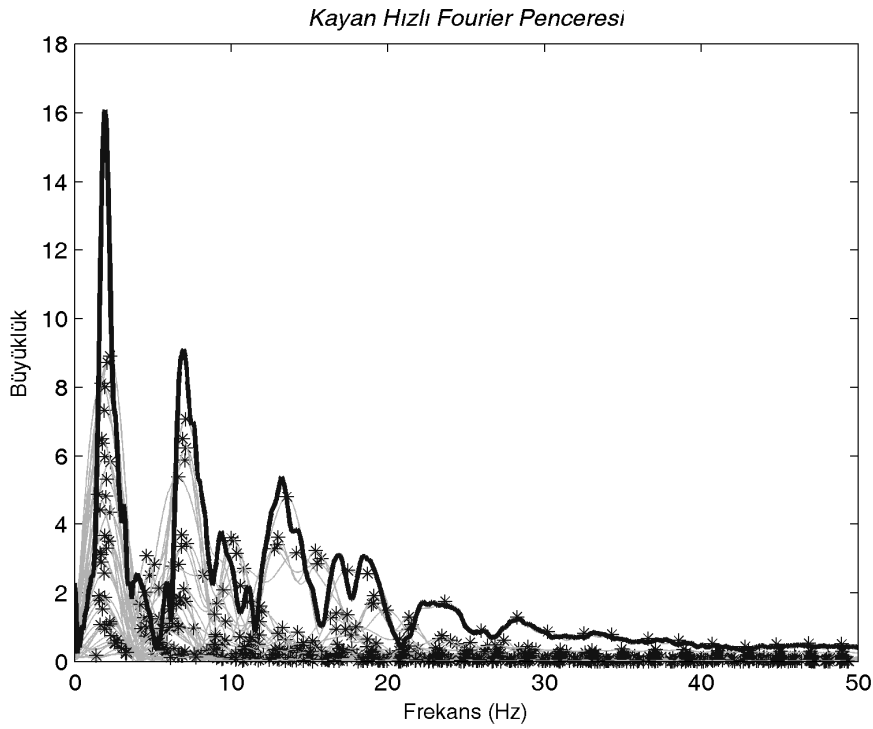


Şekil 5.19 Dördüncü çerçeve altıncı yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar



Şekil 5.20 Dördüncü çerçeve birinci yükleme grubu aynı büyüklükteki uyarılar için sözde FYF'lar

Çek bırak uyarıları altında sistem yanıtının zaman eksenindeki frekans dağılımını izleyebilmek amacı ile çek bırak uyarıları kayan bir hızlı Fourier dönüşüm (HFD, İng. FFT) penceresine tabii tutulmuştur. Bu amaçla ikinci çerçeve altıncı döngü dördüncü kat ivme yanıtı seyreltme süzgecine tutularak 100 veri/sn hızına düşürülmüştür. Seyreltilen veri kullanılarak her adımda 5 veri kayan ve 50 veri büyüklüğünde bir pencere oluşturulup HFD penceresine tabii tutulduğunda Şekil 5.21’de sunulan grafik elde edilmiştir. Grafikte kalın çizgi bütün verinin HFD tutulması ile elde edilen eğridir. Silik eğrilerin üzerlerindeki yıldız işaretleri bu eğrilerin tepe noktalarına işaret etmektedir. Grafikten izleneceği üzere sistem yanıtları ufak kaymalar olmak ile beraber temelde zaman ekseninde hakim frekanslar açısından büyük bir değişikliğe uğramamakta ve bütün sinyalin HFD eğrisi hakim frekansları sergileyebilmektedir.



Şekil 5.21 İkinci çerçeve altıncı yüklem grubu dördüncü kat çek bırak ivme sinyalinin kayan HFD penceresi altında frekans eğrileri

5.3 Betonarme Çerçevelerde Dinamik Değişken Kestirimi

Betonarme çerçevelerde hasar oluştuktan sonra bunların davranışlarında doğrusallıktan sapmalar bekleniyor olmakla beraber bu çalışma kapsamında yapılan gözlemlerden çerçevelerin dürtü uyarıları altında doğrusal çalışıyor kabul edilebileceği ve bu uyarılardan elde edilen yanıtların standart modal analiz teknikleri ile inceleyebileceği gözlenmiştir. Ayrıca çek bırak uyarılarında şiddetlerinin sabit tutulması durumunda dördüncü çerçevenin son döngüleri hariç durağan bir tepki verdiklerinden hareketle bu yanıtların modal analiz yöntemleri ile işlenmesi ile sadece bu uyarı seviyesine ait olmak üzere sistem ile ilgili bilgi edinilebileceği sonuçlarına varılmıştır.

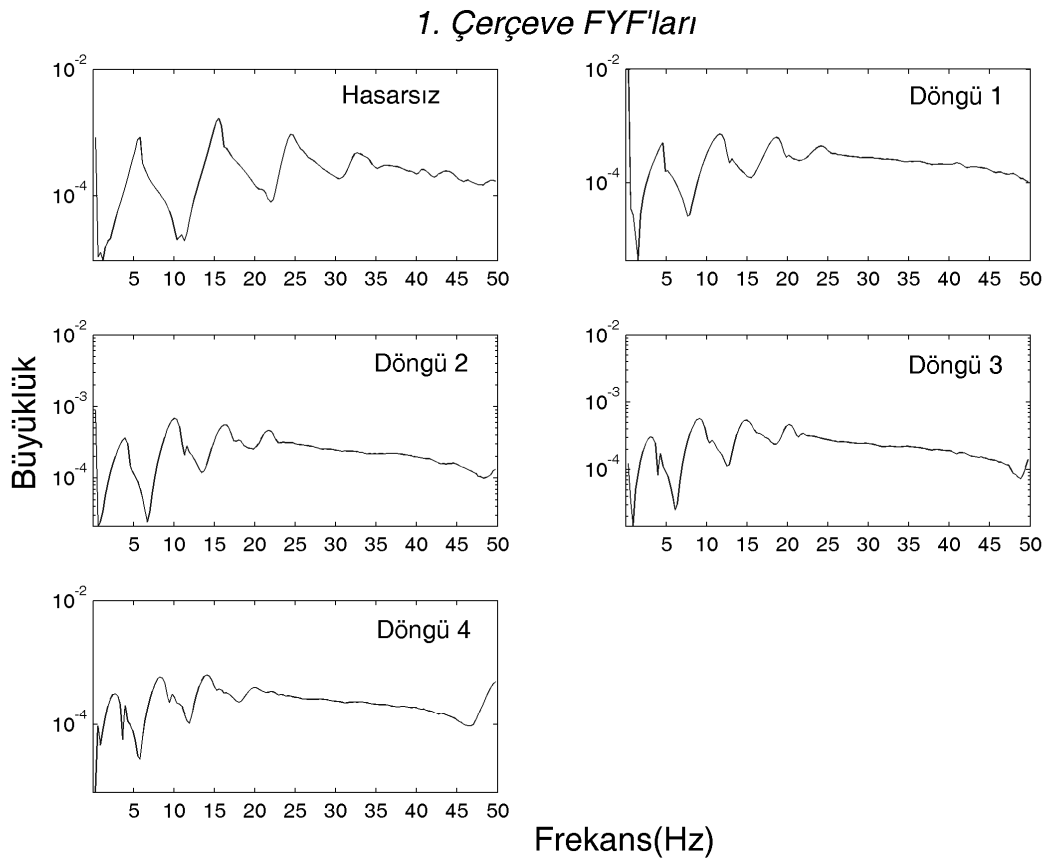
Çalışma kapsamında başlangıçta bazı doğrusal olmayan yöntemlerin kullanılabilmesi düşünülmüştür. Bunlar, doğrusal sistemleri modelleyen dürtü yanıtlarının, doğrusal olmayan sistemlere genelleştirilmesi olan ve temelleri Volterra ve Wiener tarafından atılan Volterra ve Wiener serileri ile doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi Schetzen 1989) ve Rosenberg tarafından önerilip daha sonra çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen doğrusal olmayan

normal modlar (İng. Nonlinear normal modes – NNM) yöntemiydi (Rosenberg 1962, Shaw 1993, Vakakis 1997). Ancak bu yöntemlerde gelinebilen düzey henüz tek veya çift serbestlik dereceli sistemlerin tanılanmasıyla sınırlıdır, (Haaj 2000, Roberts 2000, Kerschen 2009). Proje kapsamında incelenen sistemler hasarsız durumda iken en az dört, hasar sonrasında ise sonra ise gittikçe artan serbestlik derecesinin dikkate alınmasını gerektirebilmektedirler. Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı üzere proje kapsamındaki sistemlerin doğrusal yöntemlerle analiz edilebileceği sonucuna ulaşıncaya doğrusal olmayan kestirim tekniklerinin kullanılmasına gerek kalmamıştır.

Çerçevelerden alınan dinamik veriler Karmaşık Mod Gösterge Fonksiyonu yöntemiyle işlenerek değişken kestirimi yapılmıştır.

5.4 Dürtü Yanıtı ile Sistem Kestirimi

Çerçevelerin farklı hasar seviyelerinde oluşturdukları FYF'ları izlemek amacıyla en güçlü sinyale sahip olan dördüncü kat seviyesindeki ivmeölçerden verdiği yanıtlar kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen grafikler Şekil 5.22-25'de sunulmuştur.

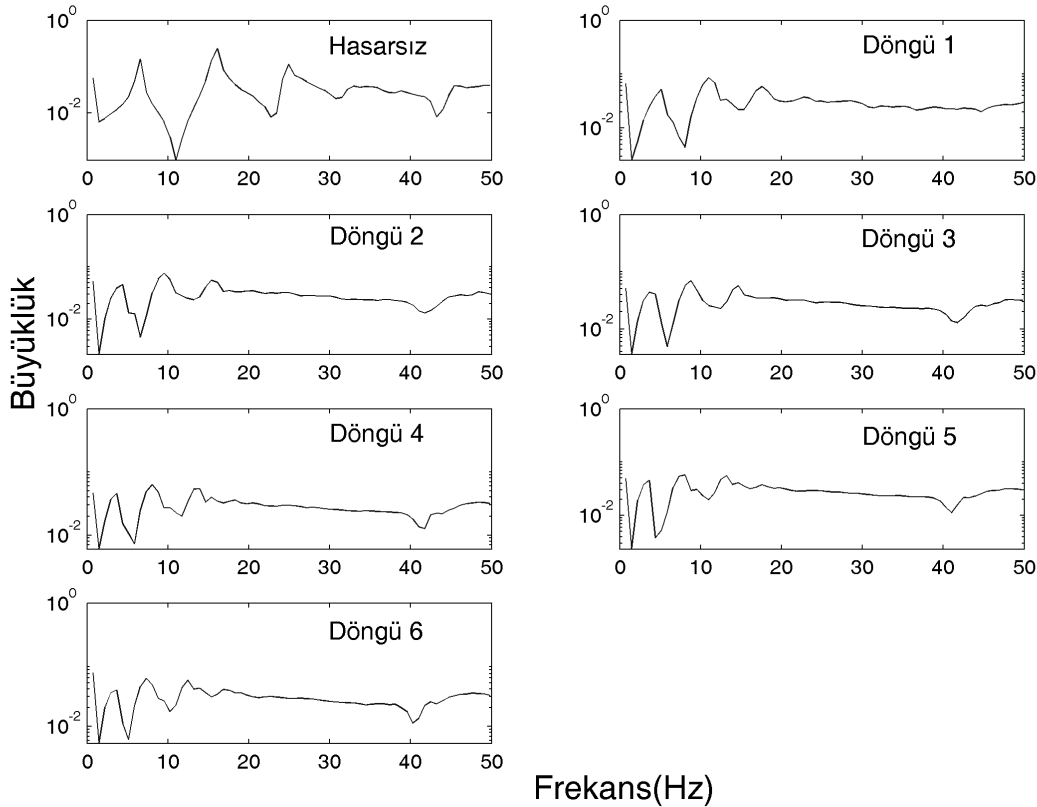


Şekil 5.22 Birinci çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları

Birinci ve ikinci kat çerçevelerinin FYF'ları sistemlerin hasar döngüleri sonrası nasıl bir değişim geçirdikleri konusunda bilgi içermektedir, Şekil 5.22 ve 23. Örnek olarak birinci çerçevenin dönüşümü irdelenecek olmak ile beraber ikinci çerçevede benzer bir değişimden geçmiştir. Hasarsız durumda birinci çerçeve frekansları 5 ila 35 Hz arasında değişen keskin

zirveli dört adet moda sahiptir. Birinci döngü sonunda hala dört mod görünmek ile beraber modların göstergesi tepelerin keskinliği azalmış ve modların frekansları olan tepe noktaları başlangıç noktasına doğru kaymıştır. Bu aşamada hakim frekanslar 3 ila 25 Hz arasında değişmektedir. Birinci döngü sonunda izlenen oluşum aynı şekilde devam etmiş ve diğer döngülerde de frekanslar başlangıç noktasına kaymaya ve tepelerin boyları kısalmış keskinlikleri azalmaya devam etmiştir. Son döngüde hakim frekanslar 2 ila 20 Hz arasında değişmektedir. Tepelerin yuvarlaklığının artması sistemde sönümün artmasının da bir göstergesidir. Sistemin hakim frekanslarının düşüş göstermesi fiziksel olarak gözlemlendiği üzere de sistemin yumuşamasının, sıklığının düşmesinin, göstergesidir. Daha ileriki aşamada sistemlerin hakim frekansları sayısal olarak döküldüğünde meydana gelen değişim grafik olarak da ortaya çıkacaktır.

2. Çerçeve FYF'ları

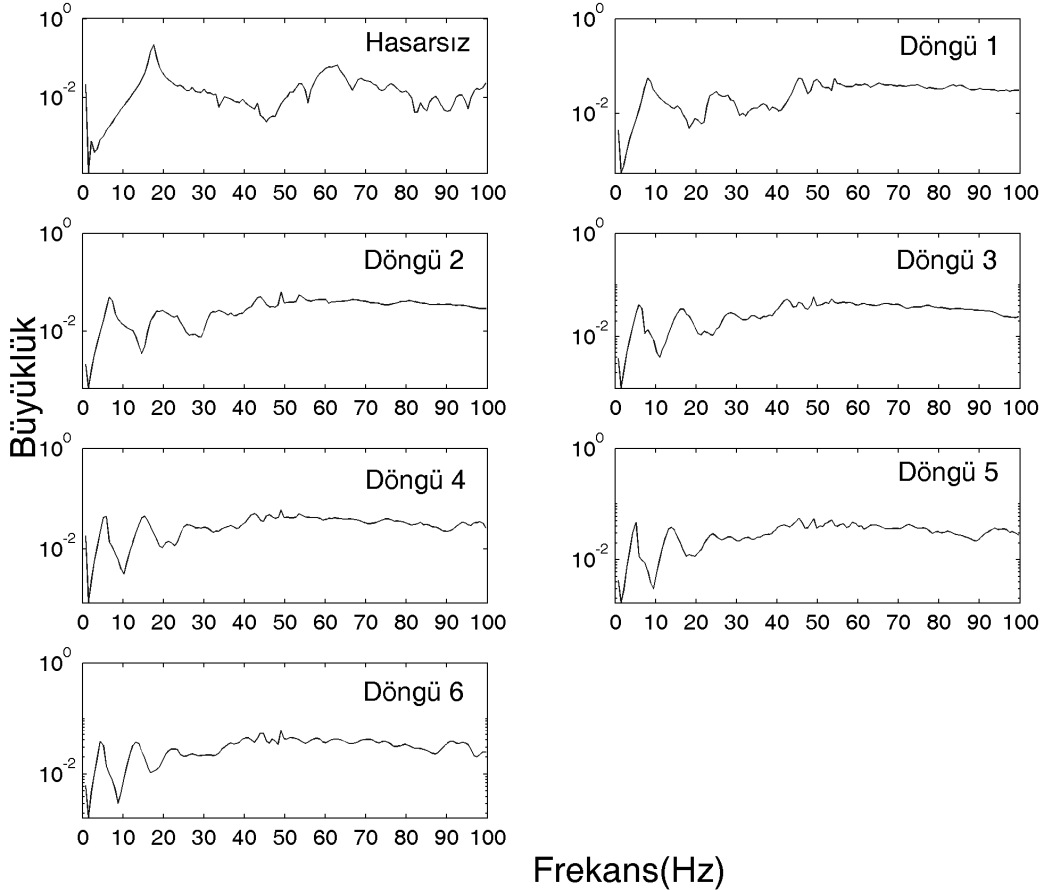


Şekil 5.23 İkinci çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları

Üçüncü ve dördüncü çerçevelerin FYF'ları ilk iki çerçeveden daha farklı durumlar arz etmektedirler. Her iki çerçeve içinde hasarsız durumda bütün harekete baskın olan tek bir frekans görülmektedir. Sistemlerde hasar ortaya çıkmaya başlayınca bu modun etkinliği azalmakta ve yeni hakim frekanslar ortaya çıkmaktadır, Şekil 5.24 ve 25. İlk iki çerçeveye benzer şekilde hasarla birlikte hakim frekans zirvelerinin keskinliği azalmakta daha yuvarlak bir hal almaktadır. Üçüncü çerçevedeki birinci hakim mod hasarsız halde 16Hz civarında iken bir sonraki döngüde kabaca yarıya düşmüş ve son döngüde 3Hz civarına kadar gerilemiştir. Bu durum yaklaşık üçte bir düşüş gösteren dolgunuz çerçevelerden farklılık göstermektedir. Üçüncü çerçevede hasarla birlikte yeni hakim frekanslar ortaya çıkmış ve her döngü sonrası bu frekanslar sağa doğru kayma göstermişse de FYF'nun genel şekli pek bozulmamıştır. Üçten farklı olarak dördüncü çerçevede dördüncü döngü sonrası FYF'ların şeklinde belirgin bir değişim oluşmuştur. Dördüncü döngü çerçevede birinci kat kolon kafalarında ağır çapraz çatlakların ve sistemde ciddi kapasite kayıplarının olduğu döngüdür. Diğer çerçevelerden

farklı olarak bu döngüde hakim frekans sağa doğru kaymasını sürdürmek ile beraber zirvesi bir önceki döngüye göre daha keskin bir hal almış ve kendisini diğer frekanslardan ayırmıştır, Şekil 5.25. Bu durum sonraki kısımda görüleceği üzere kolon kafalarındaki ağır hasar sonrası birinci hakim frekansın modal şeklinin değişmesiyle eş zamanlı gelişmiştir.

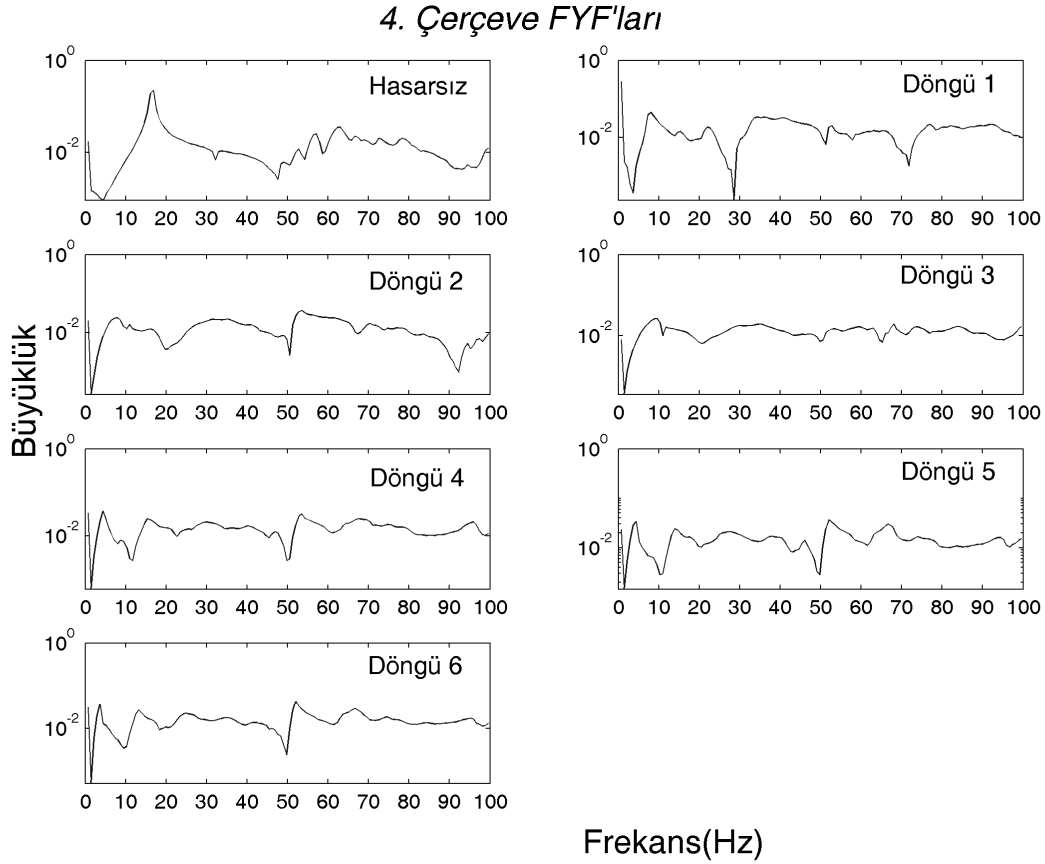
3. Çerçeve FYF'ları



Şekil 5.24 Üçüncü çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları

Çerçevelerden elde edilen FYF'lar karmaşık mod gösterge fonksiyonuna tabii tutularak sistemlerin hakim frekanslarını ve bu frekanslara karşılık gelen modal şekillerin elde edilmiştir. Kestirimlerden sistemlerin sönüm değerleri elde ediliyor olmak ile beraber sönüm değerlerinin gerçekçi olmadığına kanaat getirilmiş ve bu sebeple de rapor edilmemiştir. Elde edilen frekanslar ise sistemde etkin frekanslar olmak ile beraber listelenen frekanslar çerçevelerin hareketini bütün detayı ile tanımlayamamaktadır. Yapılan gözlem sistemlerin hareketlerinin tam olarak çatılabilmesi için fazladan frekansların kullanılması gerektiğini göstermekle beraber eksiklik ana dalgadan çok ana dalga üzerinde hareket eden görece yüksek frekanslı bileşenler sebebi ile oluşmaktadır. Söz konusu frekansların bir kısmı ana frekansların aynı sayıda nodal noktaya sahip ötelenme şekli değişik tipleri şeklindedir.

Analizde kullanılan dalgaların tekrar çatıldığında nasıl bir davranış gösterdiklerini sergileyebilmek maksadı ile 2. çerçeve 4. kat sinyali her bir yük döngüsü için çatılmıştır, Şekil 5.26. Şekillerde silik çizgiler orjinal dalgaya, koyu çizgiler ise ger çatılan dalgaya aittir. Görüleceği üzere geri çatılan dalga ilerleyen hasarla birlikte görece orjinal dalgadan uzaklaşıyor olmak ile beraber orjinal dalganın güçlü olduğu bölgede ana büyüklük ve frekans içeriğini başarı ile modellemektedir.

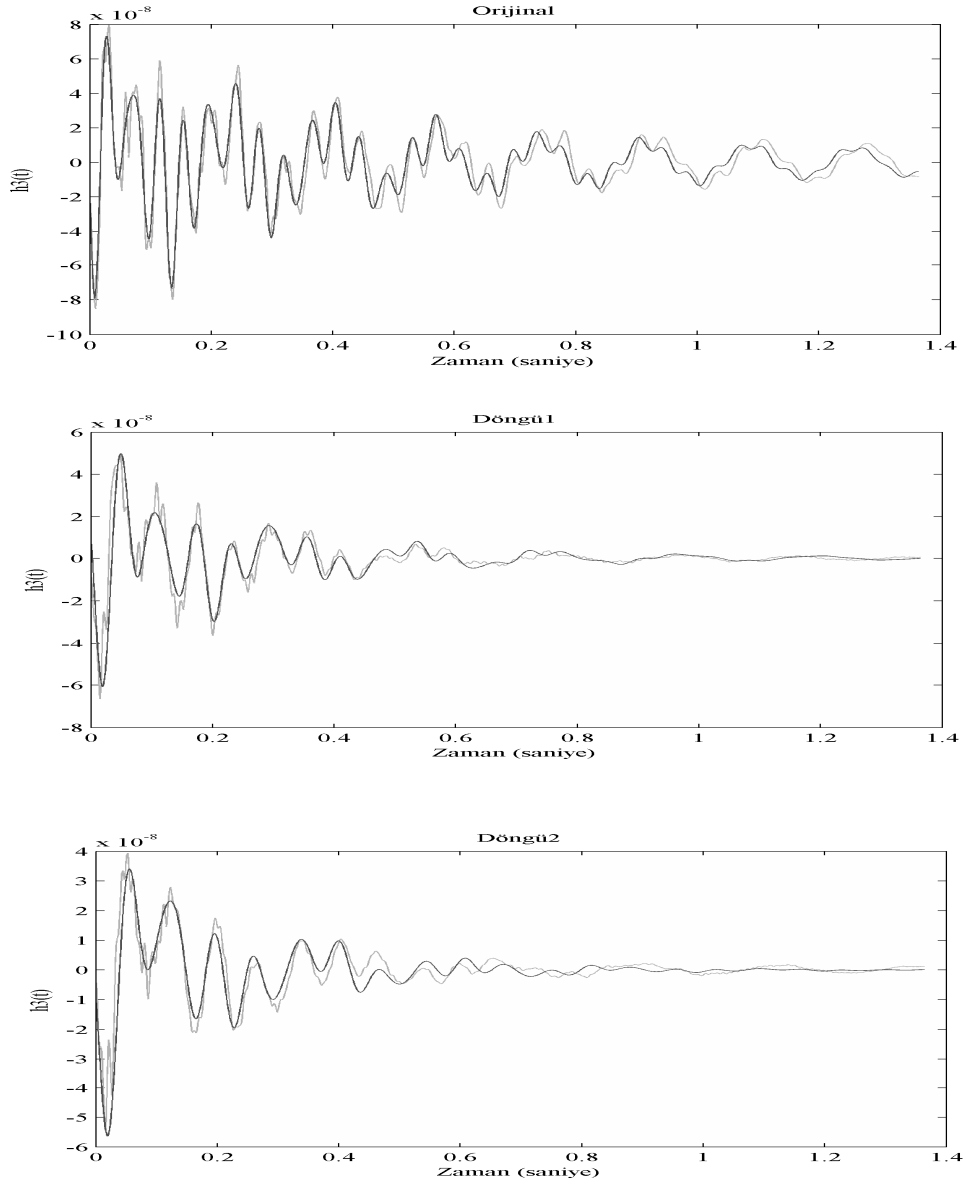


Şekil 5.25 Dördüncü çerçeve dördüncü kat döşeme seviyesinden alınan sinyalin FYF'ları

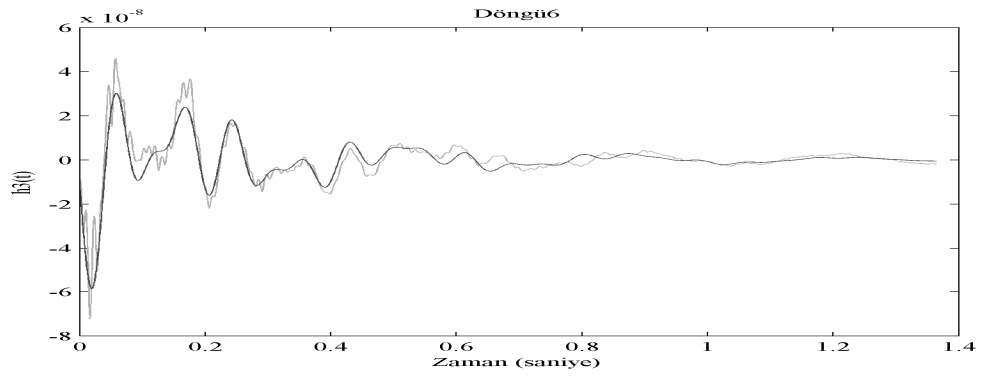
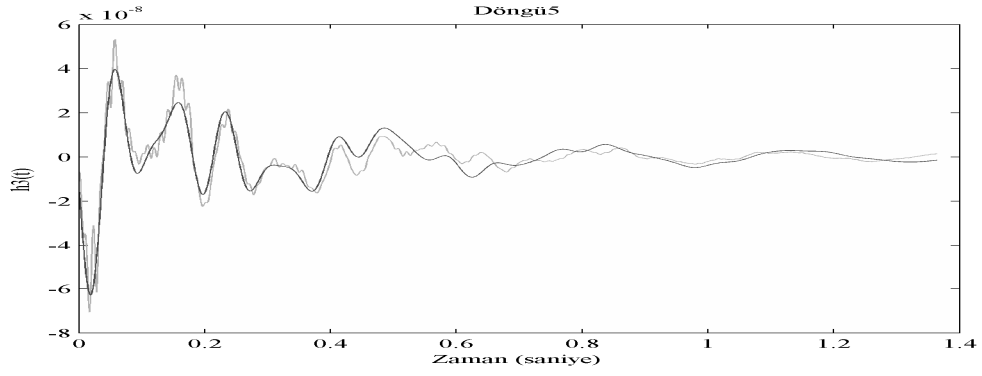
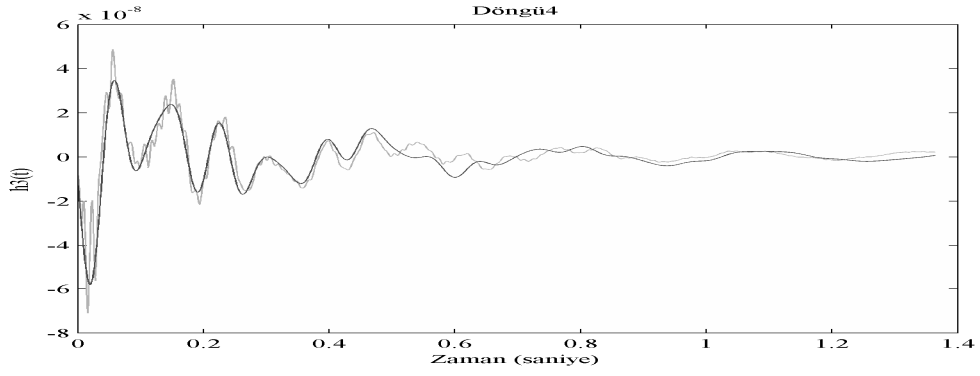
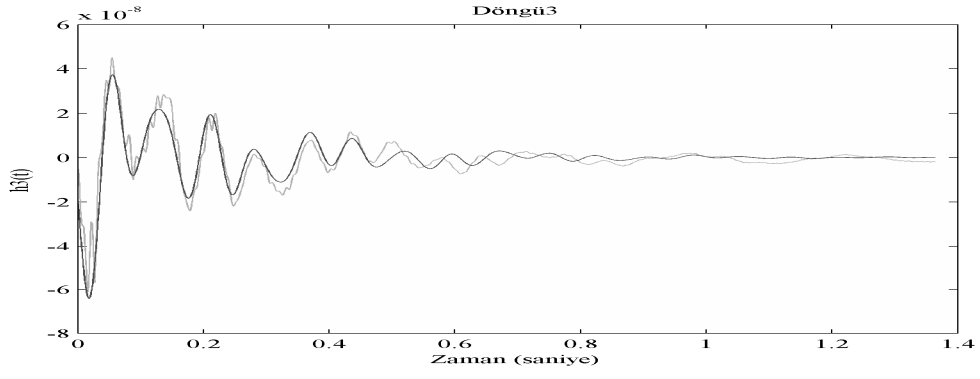
Birinci ve ikinci çerçevelerin hakim frekansları Tablo 5.1 ve 5.2'de sıralanıp kat ötelenmesine bağlı olarak değişimleri Şekil 5.27'da sunulmuştur. Sistemlerin donatı detayları ve beton dayanımları hariç eş olmaları sebebi ile birbirlerine çok yakın hakim frekanslara sahiptir. Hakim frekanslar hasarsız durumdan sonra göreceli olarak hızlı bir şekilde düşmekte fakat ilerleyen hasar durumlarında düşüş miktarı azalmaktadır. Frekansların azalım şekli bir azalım fonksiyonu ile ifade edilebilecek bir davranış göstermektedir. Her iki çerçeveyenin birinci hakim frekansı %1 kat ötelenmesi civarında ortalama 0.48 kat, %2 kat ötelenmesi civarında ise ortalama 0.35 katına düşme göstermiştir. Ayrıca ikinci çerçeve %3.5 kat ötelenmesinde 0.30 katına düşme göstermiştir. Diğer hakim frekanslarındaki düşme miktarı daha ufak değerlerdir.

Tablo 5.1 Birinci çerçevenin hakim frekansları

Seviye	Hakim Frekanslar, Hz			
	#1	#2	#3	#4
Hasarsız	5.1	14.9	23.9	31.6
Döngü 1	3.4	10.6	17.4	22.8
Döngü 2	2.6	9.1	15.0	20.4
Döngü 3	2.1	8.1	13.8	19.1
Döngü 4	1.9	7.5	13.0	18.6



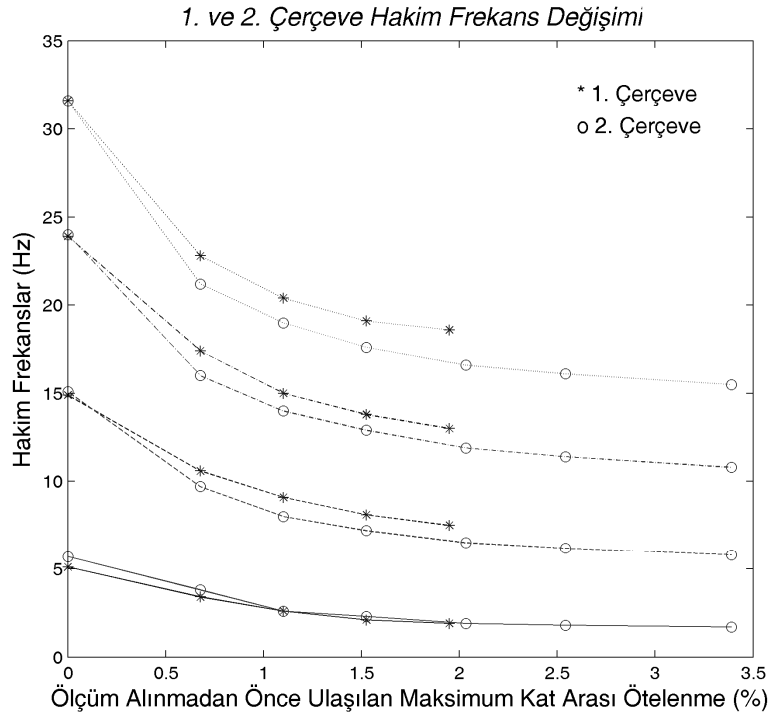
Şekil 5.26 İkinci çerçeve dördüncü kat sinyalinin bütün döngüler için geri çatılması



Şekil 5.26 (devam)

Tablo 5.2 İkinci çerçevenin hakim frekansları

Seviye	Hakim Frekanslar, Hz			
	#1	#2	#3	#4
Hasarsız	5.7	15.1	24.0	31.6
Döngü 1	3.8	9.7	16.0	21.2
Döngü 2	2.6	8.0	14.0	19.0
Döngü 3	2.3	7.2	12.9	17.6
Döngü 4	1.9	6.5	11.9	16.6
Döngü 5	1.8	6.2	11.4	16.1
Döngü 6	1.7	5.8	10.8	15.5



Şekil 5.27 Birinci ve ikinci çerçevelerin 1. kat ötelenmelerindeki hakim frekans değişimleri

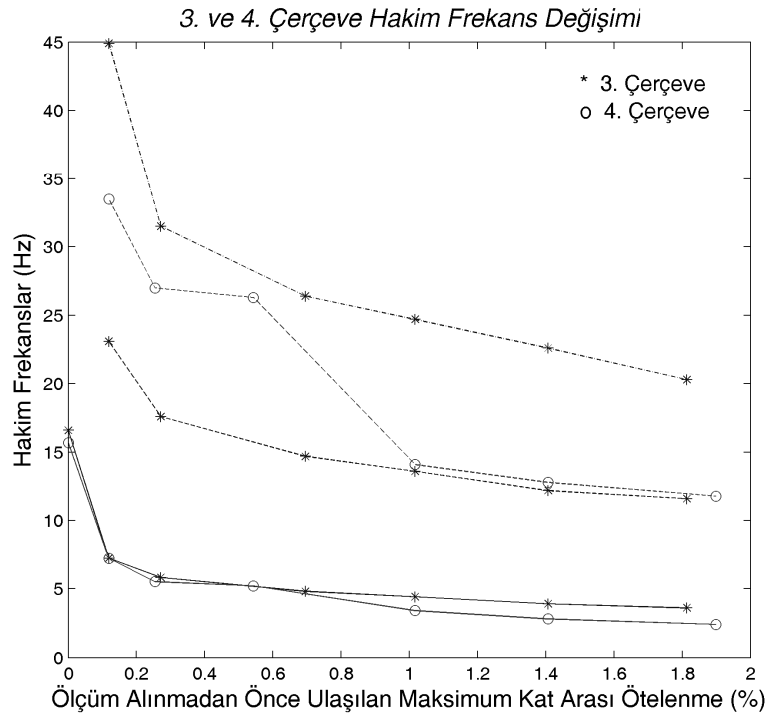
Üçüncü ve dördüncü çerçevelerin hakim frekansları Tablo 5.3 ve 5.4'te sıralanıp kat ötelenmesine bağlı olarak değişimleri Şekil 5.28'de sunulmuştur. İlk iki çerçeveye benzer şekilde sistemlerin donatı detayları ve beton dayanımları hariç eşittir. Ayrıca bu iki çerçevede teorik olarak eş olan ama pratikte belirsizlik içeren dolgu duvar imalatı vardır. Çerçeveler birinci hakim frekansta dördüncü döngüye kadar yakın değerlere sahiptir. Dördüncü döngüde birinci hakim frekansta ayrışma başlamıştır. Dördüncü döngü hatırlanacağı üzere birinci kat kolon kafalarında ağır kesme çatlaklarının başladığı döngüdür. Çerçevelerde daha büyük hakim frekanslar çerçeveler hasar gördükçe ortaya çıkmıştır ve ilk iki çerçevenin aksine farklı değerlere sahiptir. Dördüncü döngüdeki hasardan sonra frekanslar birbirine yaklaşmıştır. Üst frekanslar arasındaki büyük fark dolgu duvarların davranış farkları yüzünden ortaya çıkmıştır. Üçüncü çerçevede dolgu duvarlar ilk döngülerden itibaren kayma yüzeyleri oluşturup sistemi yumuşatıp harekete izin verirken, dördüncü çerçevede kolonlarda kesme göçmesi yapana kadar bütünlüklerini korumuşlardır. Bu sebeple dördüncü çerçeve ötelenmeleri donatı detaylandırmasının sünek bir davranışa izin verecek şekilde tasarlanmış olmasına rağmen %2 gibi erken bir kat arası ötelenmede göçmüştür. Duvar etkisi olmasaydı sistemin en azından ikinci çerçeveye benzer şekilde %3.6 kat arası ötelenmeye kadar dayanması beklenirdi.

Tablo 5.3 Üçüncü çerçevenin hakim frekansları

Seviye	Hakim Frekanslar, Hz			
	#1	#2	#3	#4
Hasarsız	16.6	-	-	-
Döngü 1	7.2	23.1	44.9	-
Döngü 2	5.8	17.6	31.5	-
Döngü 3	4.8	14.7	26.4	-
Döngü 4	4.4	13.6	24.7	-
Döngü 5	3.9	12.2	22.6	-
Döngü 6	3.6	11.6	20.3	-

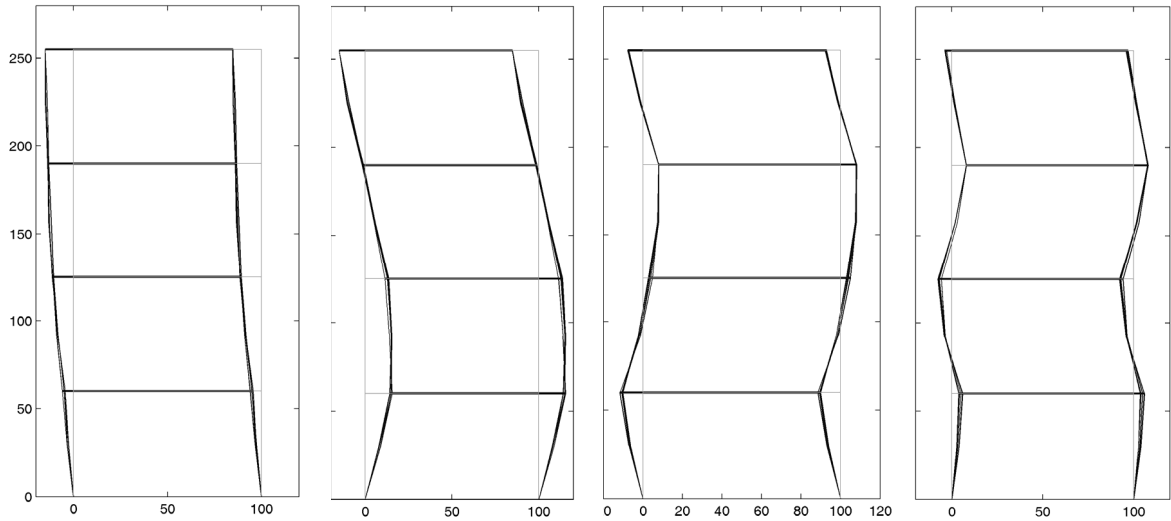
Tablo 5.4. Dördüncü çerçevenin hakim frekansları

Seviye	Hakim Frekanslar, Hz			
	#1	#2	#3	#4
Hasarsız	15.7	-	-	-
Döngü 1	7.2	33.5	-	-
Döngü 2	5.5	27.0	-	-
Döngü 3	5.2	26.3	-	-
Döngü 4	3.4	14.1	-	-
Döngü 5	2.8	12.8	-	-
Döngü 6	2.4	11.8	-	-

**Şekil 5.28** Üçüncü ve dördüncü çerçevelerin 1. kat ötelenmelerindeki hakim frekans değişimleri

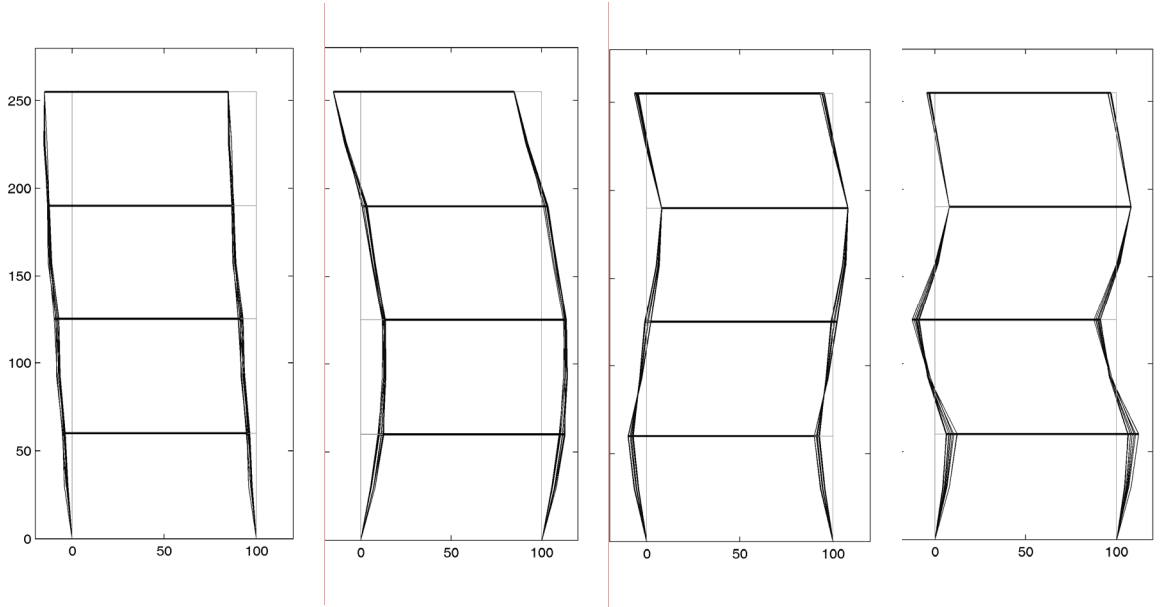
Çerçevelerin dürtü uyarıları verileri son olarak hakim frekansların modal vektörlerinin değişen ötelenme ile davranışı yönünden incelenecektir. Bu amaçla ilk olarak her bir çerçevenin kendi içinde modal vektörlerinin değişimi daha sonra da birbirlerine göre olan değişimi sunulacaktır.

Modal şekiller karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla ilk iki modda en üst kat döşeme seviyesi on birim, son iki modda ise üçüncü kat seviyesi beş birim ötelenecek şekilde standart hale getirilmişlerdir. Birinci çerçeve hakim frekans modal şekilleri frekanslardaki ciddi değişimlere rağmen çok zayıf bir değişim göstermişlerdir, Şekil 5.29. Tipik olarak harekete egemen olan birinci hakim şeklin değişimi üst frekansların şekillerine göre az olmuştur. Modal şekiller beklenen tipte ve sıra ile gerçekleşmişlerdir (Bknz. Bölüm 3.6 Düzlem Çerçeve). Üst frekanslarda değişim göreceli olarak daha büyük görünüyormak ile beraber bu değişimin fiziksel kaynaklı olduğu, bu seviyelerdeki sinyal gürültü oranının düşüklüğü sebebiyle, kesin olarak söylenemez. Modal şekillerdeki değişim yakından izlendiğinde bunun tek yönde bir gevşemeden çok her iki yöne hareket edebilen bir değişim olduğu gözlenmiştir.



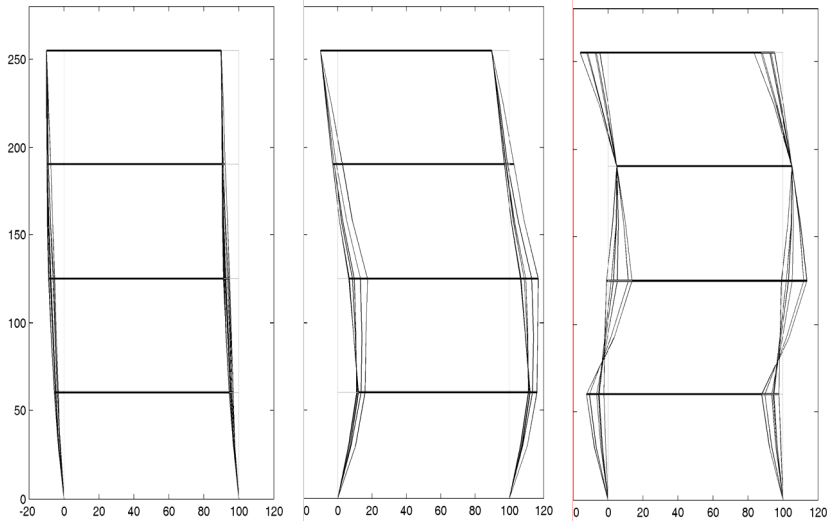
Şekil 5.29 Birinci çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 4'e sırayla

İkinci çerçeve birinci çerçeveye benzer davranmış olmakla beraber modal şekillerdeki değişimler bir miktar daha büyük gerçekleşmiştir, Şekil 5.30. İkinci çerçevede daha yüksek ötelenme değerlerine ulaşıldığından hareketle daha büyük değişimler oluşması değişimlerin kuvvetli ihtimal oluşan hasar kaynaklı olduğunu göstermektedir.

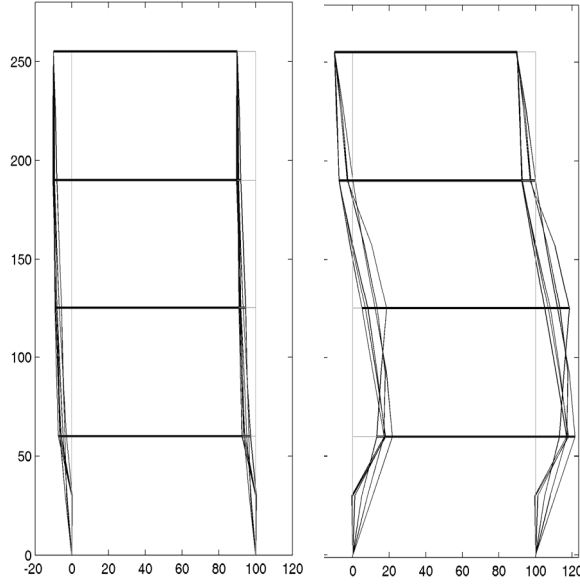


Şekil 5.30 İkinci çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 4'e sırayla

Üçüncü çerçeve dolgu duvarlı sistemlerin üst frekanslardaki modlarını uyarabilmenin zorluğu sebebi ile sadece uyarılabilen ilk üç hakim frekans hakkında bilgi içermektedir, Şekil 5.31. Hasarsız durumda ikinci ve üçüncü hakim frekanslarda veri alınamamıştır. Birinci hakim frekans modal şekli ilk iki çerçeveye benzer şekilde hasardan çok etkilenmemiştir. İkinci ve üçüncü modal şekillerde etkilenme daha güçlü gerçekleşmiştir. Döngü dizgesinde modal şekiller başta durağan duruma yaklaşma gösterirken son iki döngüde tekrardan ters yöne bir hareket gösterip ilk döngüden daha fazla ötelenmişlerdir.



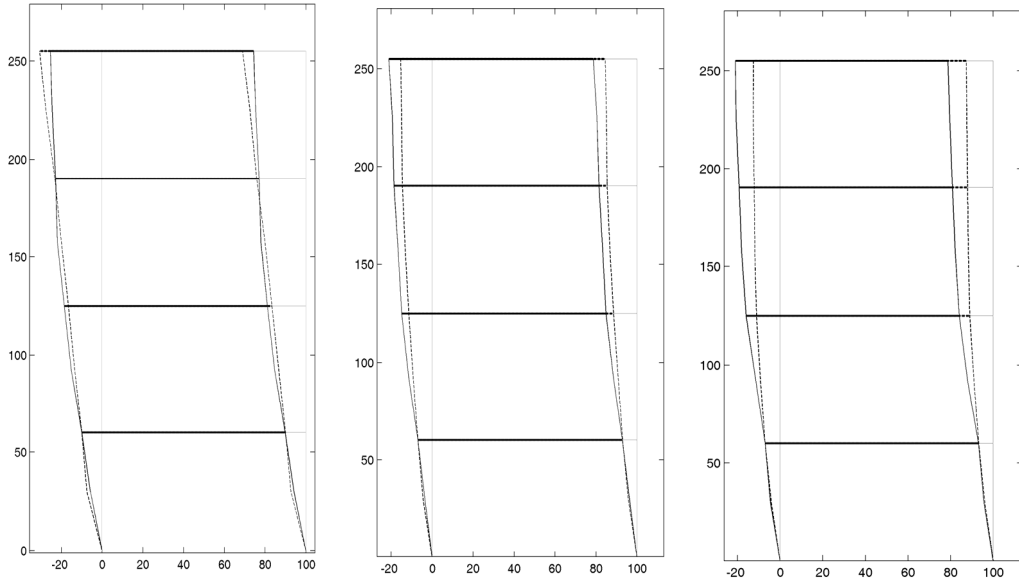
Şekil 5.31 Üçüncü çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 3'e sırayla



Şekil 5.32 Dördüncü çerçeve hakim frekans modal şekilleri, 1'den 2'ye sırayla

Dördüncü çerçevede ilk iki hakim frekans kestirilmiştir, Şekil 5.32. Modal şekillerde dördüncü döngü ile birlikte belirgin bir değişiklik gerçekleşmiştir. Değişiklik şekillerde birinci kat kolon ortasında keskin bir köşe ile ayırtedilebilir. Buradaki keskin köşe fiziksel bir durum olmayıp kayıt çözünürlüğü sebebi ile oluşmaktadır. Hatırlanacak olursa her bir katta döşeme seviyesinde ve kolon orta noktalarında ivmeölçerler mevcuttur. Dördüncü döngüde birinci kat kolonu uçlarına ağır kesme hasarları oluşmaya başlamıştır. Bu durumda çerçeve iki blok şeklinde düşünülürse birinci kat seviyesindeki ivmeölçer üst blok, birinci kat kolon ortasındaki ivmeölçerde alt blok üstünde kalmaktadır. Oluşan hasar sebebi ile üst blok alt blok üzerinde kabaca kayar şekilde hareket etmeye başlamıştır. Bu sebeple eğer yeterli çözünürlüğe sahip olunsaydı hareket sebebi ile kolonda köşe oluşması yerine üst blok ile alt blok arasında kolon üst noktasında süreksizlik şeklinde kendini gösteren bir modal şekil elde edilecektir.

Moment çerçevesi ve dolgulu çerçevelerin modal şekillerinin oluşan hasar ile birlikte birbirlerine göre nasıl değiştiklerini gözlemlemek amacıyla hasarsız durum ve birinci kat döşemesi için 4mm ve 11mm ötelenmelere karşılık gelen döngülerden elde edilen modal şekiller birinci kat ötelenmesine göre standart hale getirilerek Şekil 5.33'de sunulmuştur. Şekilleri tam olarak örtüşmemekle birlikte her iki çerçevede farklı dağılım ve ötelenme seviyelerinde kesme savrulması (İng. shear sway) yapmaktadır.



Şekil 5.33 Birinci ve üçüncü çerçeveler birinci mod modal şekil karşılaştırılması, sırası ile birinci katta hasarsız durum, 4mm ve 11mm ötelenmeler sonrası (kesik çizgi üçüncü çerçeveyi gösterir)

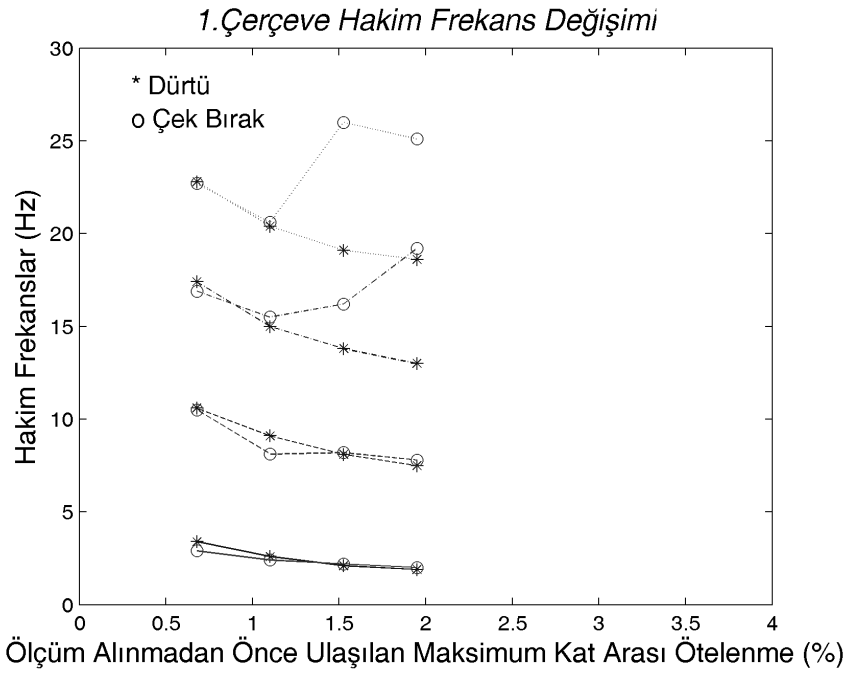
5.5 Çek Bırak Uyarı Yanıtları ile Sistem Kestirimi

Kısım 5.2'de belirtildiği üzere çerçeveler güçlü uyarılar altında aynı uyarıya maruz kaldıklarında ve benzer yanıtlar vermekte ve sınırlı bir frekans aralığında durağan kalmaktadır. Sistemlerin bu davranışını ve Kısım 5.2'de detayları verilen türetimi kullanıp modal analiz uygulayarak söz konusu uyarı seviyesi ve frekans sınırları içindeki çerçevelerin frekans ve modal şekillerin elde edilmesi mümkündür. Bu kısımda betonarme çerçeve deneyleri çek bırak verileri kullanılarak sistem değişkenleri saptanacak ve sonuçlar irdelenecektir.

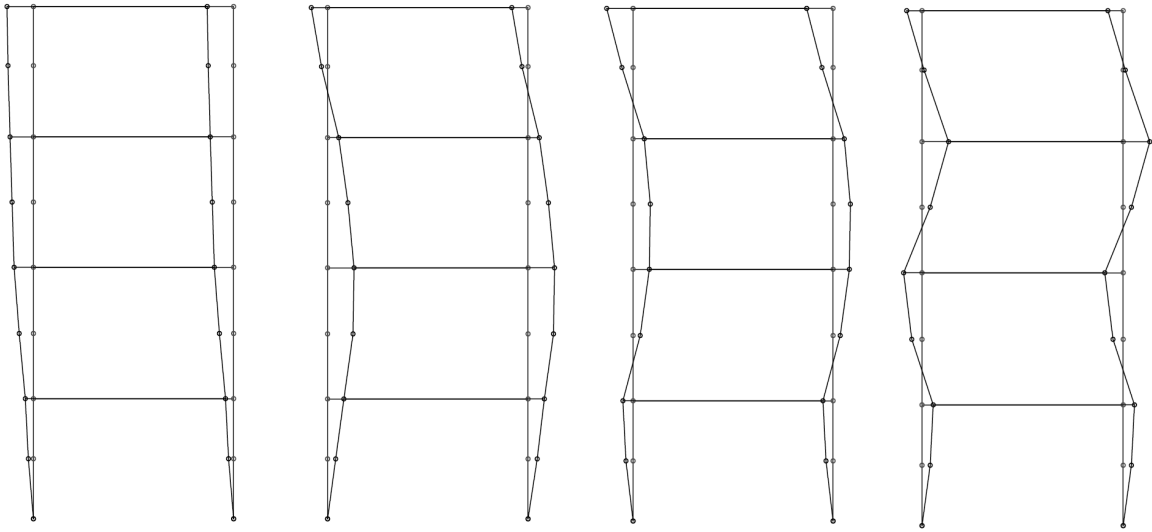
Birinci çerçeve çek bırak verileri ile her bir döngü sonrası kestirimleri yapılan sistem hakim frekansları Tablo 5.5'de sunulduğu gibidir. Çerçeve hasar arttıkça hasarsız durumdaki hakim frekansların modal şekillerine benzer yeni frekanslar ortaya çıkmaktadır. Tabloda ilk döngüden itibaren değişerek de olsa varlığını sürdüren modal şekillerin frekansları sunulmuştur. Bu frekansların aynı çerçevenin dürtü uyarılarından elde edilen frekanslar ile karşılaştırılması amacıyla Şekil 5.34 oluşturulmuştur. Görüleceği üzere çerçevenin hakim frekansları ulaşılan maksimum ötelenme arttıkça dürtü uyarılarına göre çek bırak uyarıları altında daha yüksek frekans değerlerine ulaşmaktadır. Yüksek hakim frekanslardaki artış daha güçlü gerçekleşmektedir. Diğer yandan sistemin hareketine baskın olan birinci hakim frekanstaki değişim ihmal edilebilir seviyelerdedir.

Tablo 5.5 Birinci çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen sürekliliğe sahip hakim frekanslar

Seviye	Hakim Frekanslar, Hz			
	#1	#2	#3	#4
Hasarsız	-	-	-	-
Döngü 1	2.9	10.5	16.9	22.7
Döngü 2	2.4	8.1	15.5	20.6
Döngü 3	2.2	8.2	16.2	26.0
Döngü 4	2.0	7.8	19.2	25.1

**Şekil 5.34** Birinci çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen hakim frekanslar

Tablo 5.5’de sunulan ve Şekil 5.34’de dürtü uyarıları ile karşılaştırılması yapılan hakim frekanslar tanımlanırken çerçevenin hasarsız halindeki modal şekiller baz alınmıştır. Dürtü uyarılarının aksine çek bırak uyarılarında hasar durumu arttıkça modal şekillerde güçlü değişimler gözlenmiştir. Bu değişim altında frekans tanımları yapılırken modal şekillerdeki nodal nokta (modal şekil altında harekesiz kalan nokta) sayısı esas alınmıştır. Tipik olarak değişim olan modlarda benzer modal şekle, aynı sayıda nodal noktaya, sahip birden çok frekans ortaya çıkmaktadır. Çerçevenin Tablo 5.5’de sunulan Döngü 2’de sıralanan frekanslara karşılık gelen modal şekilleri Şekil 5.35’de sunulduğu şekildedir. Bu modal şekillerden ilk üçünün değişmiş tipleri üst frekanslarda ortaya çıkmıştır. Birinci modun değişmiş tipleri Şekil 5.36a ve b’de gözlenebilir. Bu modal şekiller ve frekanslarda Şekil 5.36’da sunulmuştur. 8.3Hz’de ortaya çıkan birinci modun değişmiş hali frekans olarak ikinci mod frekansına ve gücüne yakın bir etkinlik sergilemektedir. İkinci modun bir tipi Şekil 5.36c’de sunulmuştur. Dikkat edileceğe üzere yeni modal şekilde nodal nokta aşağıya kaymış ve titreşim frekansı 13.4Hz’e yükselmiştir. Üçüncü modun bir tipi ise Şekil 5.36d’de sunulduğu üzere 17.1Hz’de ortaya çıkmıştır.



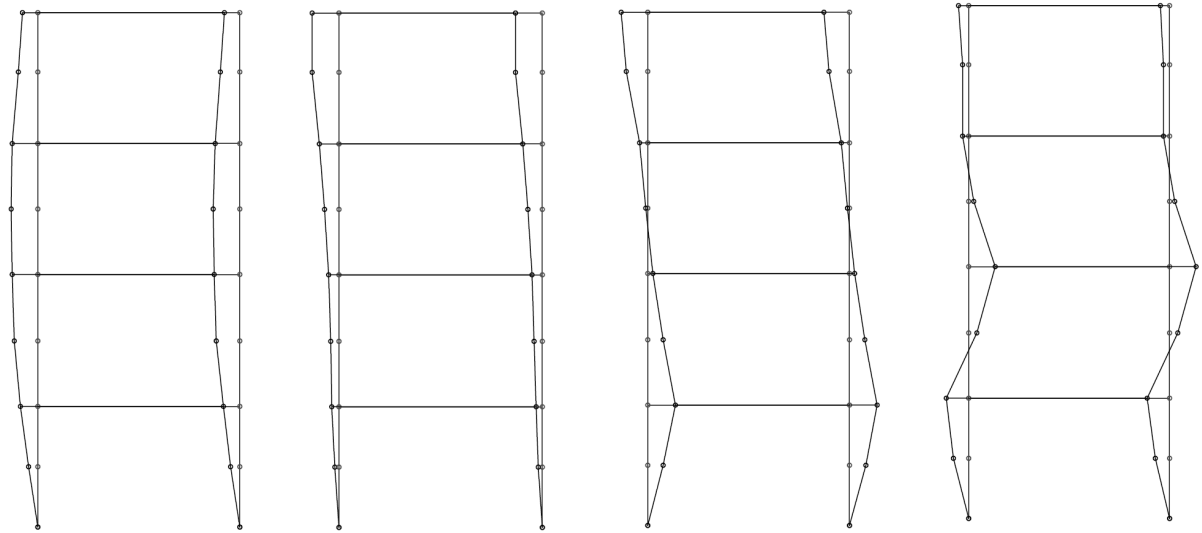
a) 2.4 Hz

b) 8.1 Hz

c) 15.5 Hz

d) 20.6 Hz

Şekil 5.35 Birinci çerçeve 2. döngü çek bırak verilerinden elde edilen hakim frekansların modal şekilleri



a) 5.5 Hz

b) 8.3 Hz

c) 13.4 Hz

d) 17.1 Hz

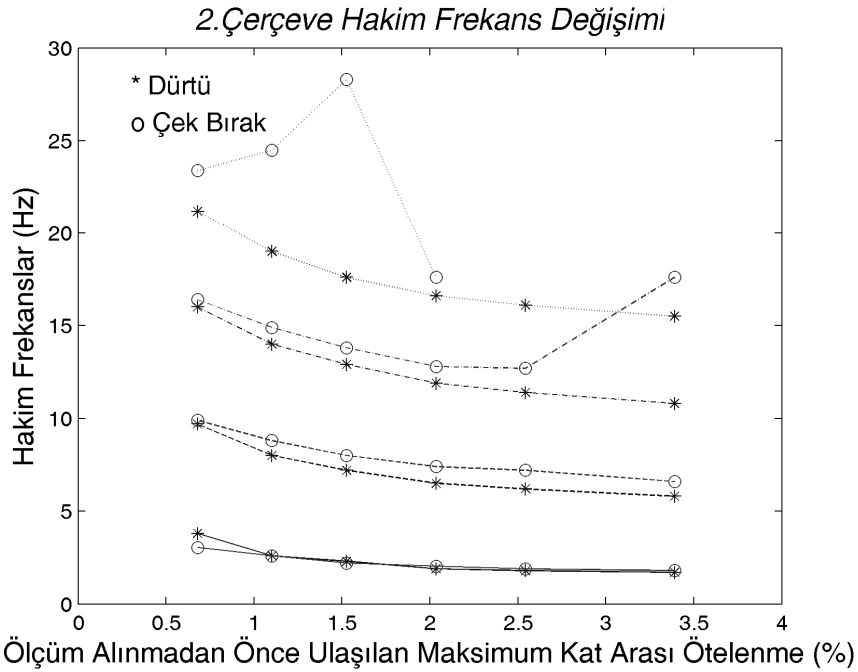
Şekil 5.36 Birinci çerçeve 2. döngü hakim modal şekillerin değişime uğramış tipleri

İkinci çerçeve çek bırak verileri ile her bir döngü sonrası kestirimleri yapılan sistem hakim frekansları Tablo 5.6'da sunulduğu gibidir. Birinci çerçeveye benzer şekilde hasar durumu arttıkça hasarsız durumdaki hakim frekansların modal şekillerine benzer yeni frekanslar ortaya çıkmaktadır. Tabloda ilk döngüden itibaren değişerek de olsa varlığını sürdüren modal şekillerin frekansları sunulmuştur. Çek bırak uyarılarından elde edilen hakim frekansların dürtü uyarılarından elde edilen hakim frekanslar ile karşılaştırılması amacıyla Şekil 5.37 hazırlanmıştır. Birinci çerçeveye benzer şekilde hasar miktarı arttıkça çek bırak uyarılarından elde edilen hakim frekans değerleri büyümektedir. Birinci ve ikinci hakim frekanslardaki

değişim çok sınırlı olup değişim olmadığı kabulü ile dürtü uyarılarından elde edilen değişkenlerin kullanılması büyük bir hataya sebep olmayacaktır. Sistemin dinamik davranışına bu iki modun hakim olduğu kabulü ile ilk iki çerçeve için dürtü uyarılarından elde edilen sistem değişkenlerinin davranışı tanımlamakta yeterli olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5.6 İkinci çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen hakim frekanslar

Seviye	Hakim Frekanslar, Hz			
	#1	#2	#3	#4
Hasarsız	-	-	-	-
Döngü 1	3.0	9.9	16.4	23.4
Döngü 2	2.6	8.8	14.9	24.5
Döngü 3	2.2	8.0	13.8	28.3
Döngü 4	2.0	7.4	12.8	17.6
Döngü 5	1.9	7.2	12.7	-
Döngü 6	1.8	6.6	16.4	-

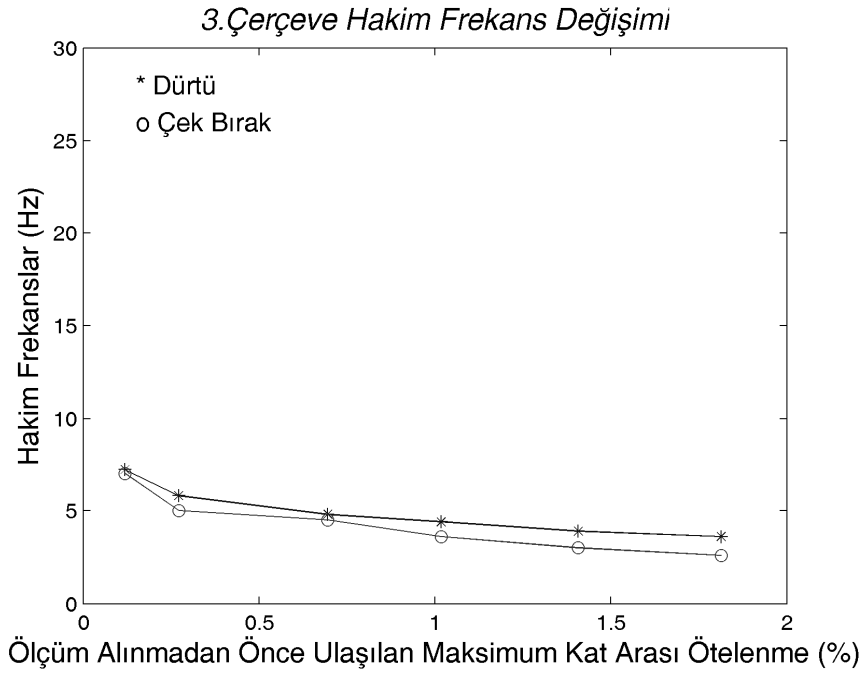


Şekil 5.37 İkinci çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen hakim frekanslar

Üçüncü ve dördüncü çerçeve çek bırak verileri ile her bir döngü sonrası kestirimleri yapılan sistem hakim frekansları Tablo 5.7 ve 5.8'de sunulduğu gibidir. İlk iki çerçeveden farklı olarak üçüncü ve dördüncü çerçevelerde birinci hakim modun ötesinde sağlıklı kestirim yapılamamıştır. Birinci mod enerji bakımından ölçülen titreşimlerde çok etkin bir durumdadır. Çek bırak ve dürtü uyarılarından elde edilen birinci mod frekanslarının karşılaştırılması Şekil 5.38 ve 5.39'da yapılmıştır. İlk iki çerçeveye benzer şekilde hasar durumu arttıkça birinci mod modal şekillerine benzer yeni frekanslar ortaya çıkmıştır. Çerçevelerde oluşan ağır hasarlara rağmen birinci mod frekansları ilk döngü sonrası ile karşılaştırıldıklarında üçüncü çerçevede son döngü sonrası maksimum %27, dördüncü çerçevede ise üçüncü döngü sonrası maksimum %21 farka sahiptir. Her iki durumda da çek bırak frekansları daha düşük düşük değerlere sahiptir.

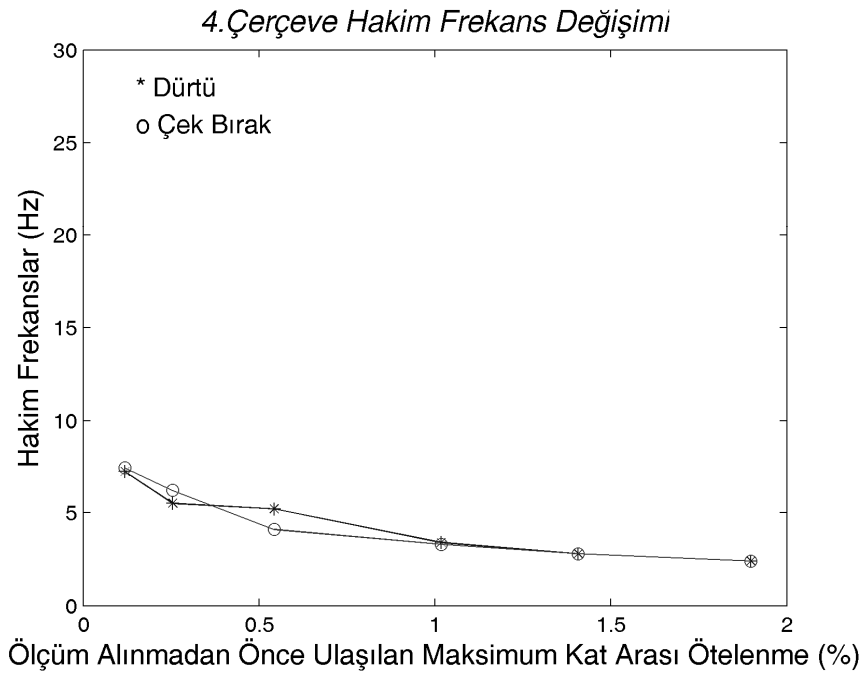
Tablo 5.7 Üçüncü çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen hakim frekanslar

Seviye	Hakim Frekanslar Hz
	#1
Hasarsız	-
Döngü 1	7.0
Döngü 2	5.0
Döngü 3	4.5
Döngü 4	3.6
Döngü 5	3.0
Döngü 6	2.6

**Şekil 5.38** Üçüncü çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen birinci mod frekansları

Tablo 5.8 Dördüncü çerçeve çek bırak dürtülerinden kestirilen hakim frekanslar

Seviye	Hakim Frekanslar Hz
	#1
Hasarsız	-
Döngü 1	7.4
Döngü 2	6.2
Döngü 3	4.1
Döngü 4	3.3
Döngü 5	2.8
Döngü 6	2.4

**Şekil 5.39** Dördüncü çerçeve çek bırak ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen birinci mod frekansları

BÖLÜM 6

MEVCUT BİR YAPIDAN ELDE EDİLEN VERİLER İLE DİNAMİK DEĞİŞKEN KESTİRİMİ

6.1 Giriş

Sistem tanımlama tekniklerini mevcut bir yapı üzerinde uygulayabilmek amacı ile proje kapsamında mevcut bir yapının test edilmesi planlanmıştır. Böylece gerçek boyutlu bir yapının modal deney tasarım, hazırlık, uygulama ve sonuçların değerlendirilmesi konusunda tecrübe elde edilmiştir. Bu kapsamda yapıdan kuvvetli rüzgar altında çevre gürültüsü, zayıf bir deprem kaydı ve darbe çekici ile dürtü uyarısı kayıtları olmak üzere üç çeşit veri alınmıştır. Verilerin işlenmesi rüzgar altındaki ve dürtü uyarıları sonucu elde edilen veriler ile sistem kestirimini yapılabildiğini, zayıf deprem kaydının ise yeterli bilgiyi sağlayamadığını göstermiştir. Ayrıca sistem kestiriminden elde edilen dinamik değişken bilgileri yapının sayısal modelinden elde edilen bilgiler ile sınanmıştır.

6.2 Seçilen Yapı ve Veri Kayıt Sistemi

Üzerinde çalışmak üzere kampüs alanımızda bulunan, Şekil 6.1, dört katlı bir betonarme yapı seçilmiştir. Söz konusu yapı halihazırda Mimarlık Fakültesine ofis ve sınıf olarak hizmet etmektedir. Sistem zemin ve üç normal kattan oluşmaktadır ve taşıyıcı sistem olarak perde-moment çerçevesi sistemine sahip yerinde döküm bir betonarme yapıdır. Yapının temel katına ait kolon ve perde uygulama planı Şekil 6.2'de sunulmuştur.

Sistemin kat yükseklikleri tüm katlar için 4m'dir. Toplam alan 4939 m²'dir. Döşemeler kirişlere oturan betonarme plak sistemidir. Yapıda yaygın olarak boşluklu tuğladan imal dolgu duvar kullanılmıştır. Temel sistemi kirişli radyedir. Yapıda genel itibari ile büyük açıklıklara sahip olup 12 metre açıklıklar mevcuttur.

Yapı Ekim 2005 Sığacık depreminde M_l 5.7-5.9 arasında değişen 4 kuvvetli ve ayrıca çok sayıda küçük şiddette sarsıntıya maruz kalmıştır. Sarsıntılar neticesinde ağırlıklı olarak taşıyıcı olmayan sistemleri etkileyen hasarlar oluşmuştur. Orjinal sistem moment çerçevesi olmak ile beraber depremler sonrası yapılan tahkikler sonucu yapının güçlendirilmesine karar verilmiştir. Şekil 6.2'de görülen perde duvarlar sisteme daha sonra, 2007, güçlendirme amacı ile eklenmiştir. Ayrıca yapının temelinde de perde altlarında yeni mütemadi kirişler oluşturulmuştur. Güçlendirme amacı ile yapılan incelemeden beton basınç dayanımı olarak karakteristik küp için 188kg/cm² sonucu çıkarılmıştır. Yapıda boyuna donatıların S420, etriyelerin ise S220 kalitesinde olduğu tespit edilmiştir.

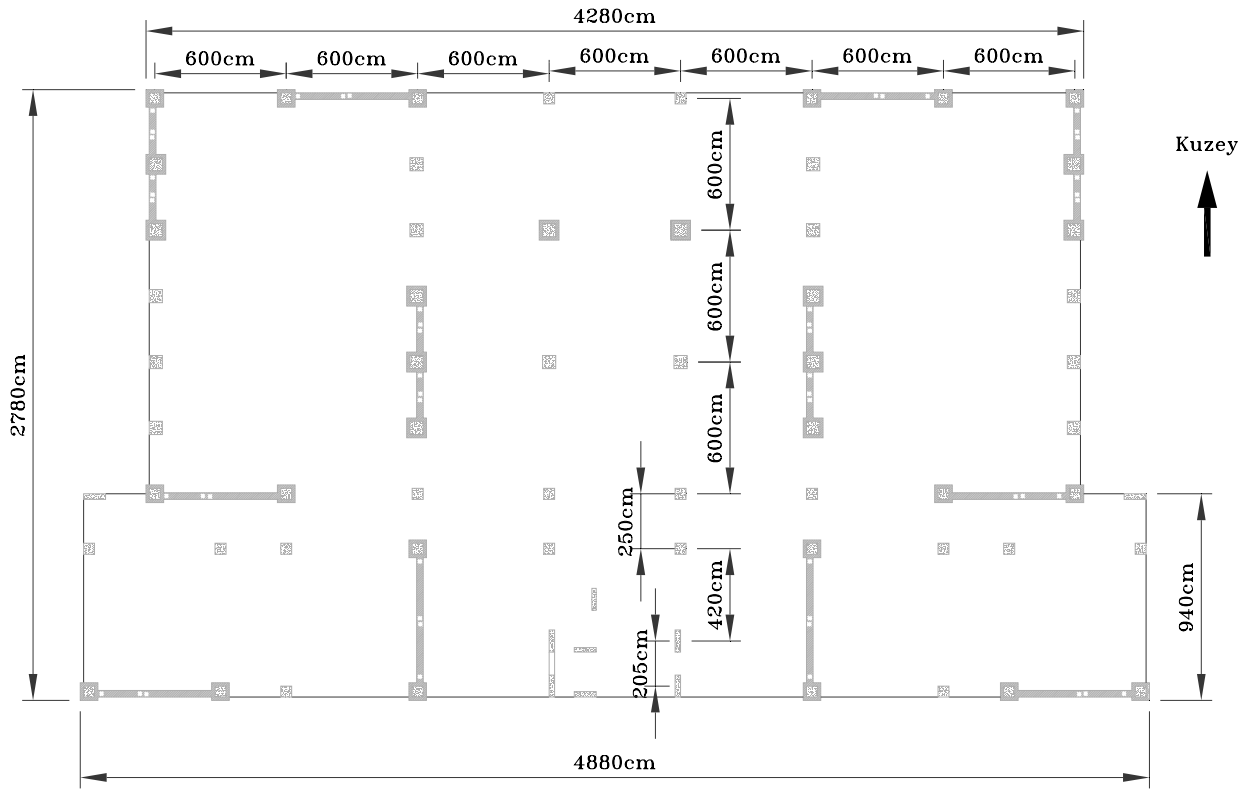
Yapı bağımsız olması, dolgu duvarlara sahip betonarme bir sistem olması, detaylı malzeme ve tasarım bilgilerine erişilebilir olması sebepleriyle projenin son ayağı için seçilmiştir.

Yapının boyutları sebebi ile elimizdeki ivmeölçerlerin kablo boyları ve adetlerinde değişiklik yapılmadan ölçüm alabilmek mümkün değildir. Bu sorunu aşabilmek amacı ile ODTÜ İnşaat Mühendisliği bölümü ile yapılan protokol ile ellerinde bulunan Güralp marka bina gözlem sistemi ödünç alınmıştır. Sistem 3 kanallı bir yer kayıt istasyonu (CMG-5TD), 12 adet tek eksenli ivmeölçer (CMG-5U) ve 15 kanallı veri izleme ve kayıt sisteminden (CMG-DM24S1AMS) oluşmaktadır, Şekil 6.3.

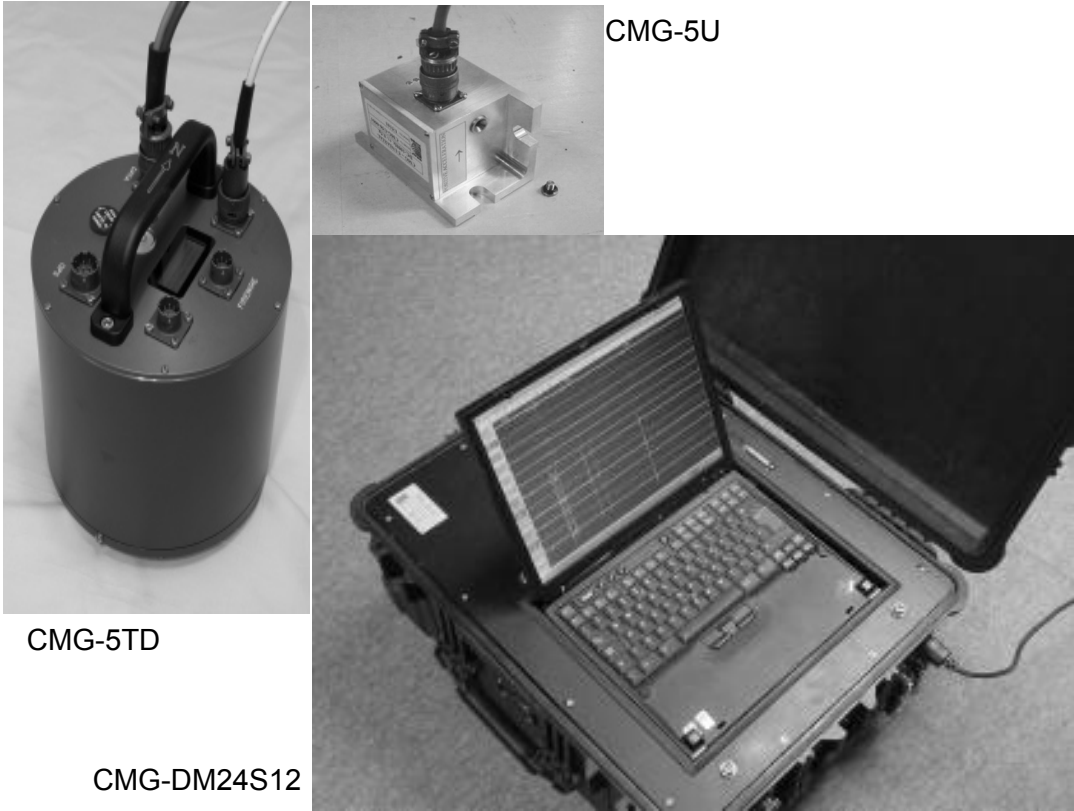


Şekil 6.1 İYTE Mimarlık A-Blok coğrafik pozisyonu

Ölçüm sistemi yer istasyonuna sahip ve 7/24 işleyen bir sistem olduğu için kuvvetli yer hareketlerinin kayıt edilmesine de olanak sağlamaktadır. Sistem sayesinde yapının tanılmasının yapılabilmesi için üç farklı veri elde edilmiştir. Bunlar çevreden gelen uyarılar (İng. ambient) sonucu elde edilen veriler, yer sarsıntısı sonucu elde edilen veriler ve sisteme darbe çekici ile yapılan uyarılar ile elde edilen verilerdir. Sistemi uyarabilmek için 92.6 kgf olan bir darbe çekici imal edilmiştir. Voltaj dalgalanmalarının kayıt cihazının kartlarından birisini yakması ve diğer karta bağlı ivmeölçerlerinden birisinin çalışmaması sonucu darbe çekici uyarıları sadece üçüncü ve dördüncü katlarda konuşlanmış olan beş ivmeölçer kullanılarak alınabilmektedir. Bu sebeple alınan kayıtlardan ancak sistem frekans değerleri kestirilebilmiştir.



Şekil 6.2 İYTE Minarlık A-Blok temel kolon ve perde uygulama planı

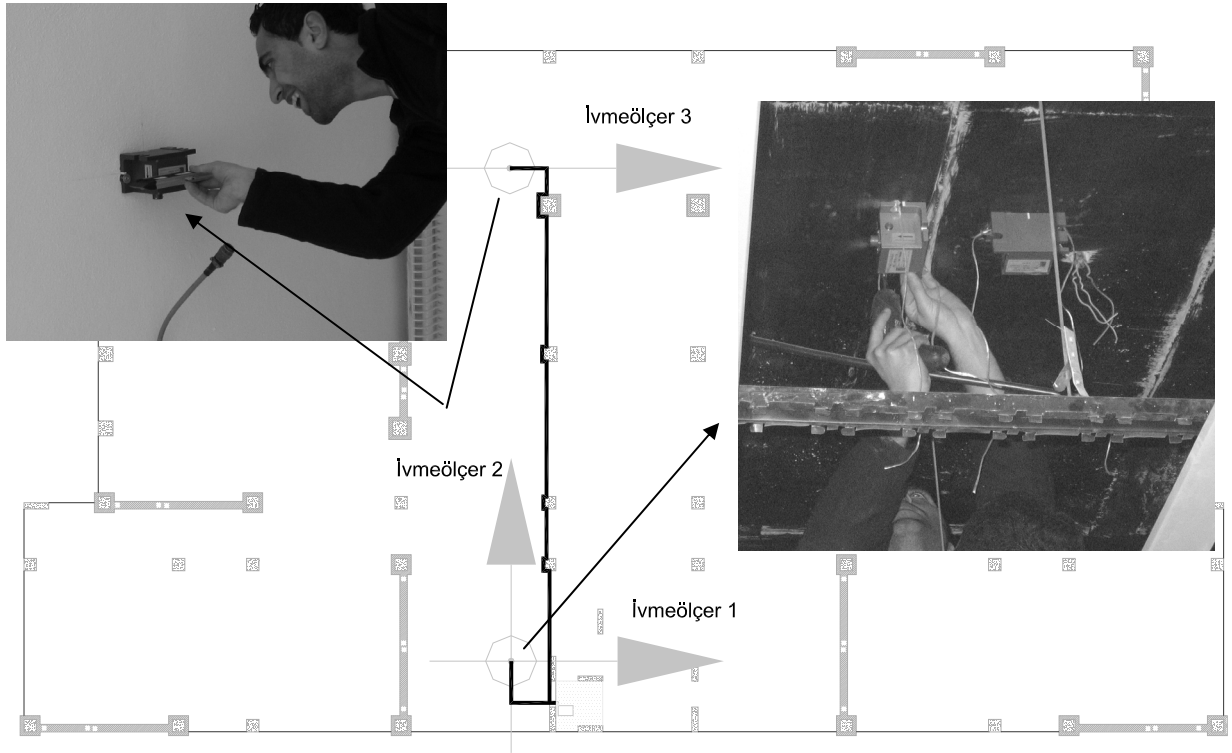


Şekil 6.3 Güralp yapı gözlem, ölçüm ve kayıt sisteminin ana parçaları



Şekil 6.4 Mimarlık A-bloğa darbe uyarısı vermekte kullanılan 92.6 kg'lık darbe çekici

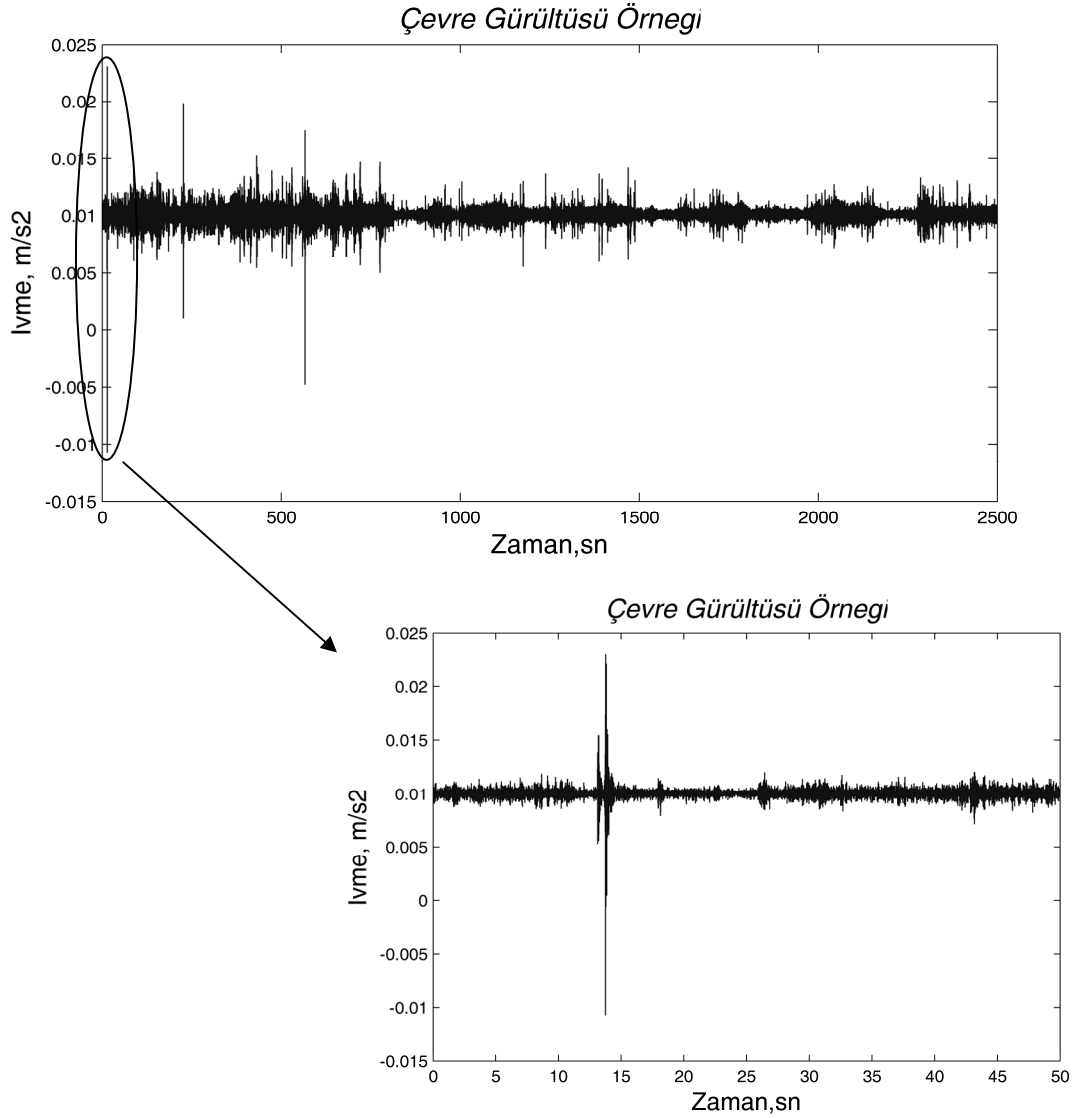
Gözlem/kayıt sistemi yapıya her kata üç ivmeölçer gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Burada yapının döşeme sisteminin rijit diyafram olarak çalışacağından hareketle her kattaki iki yöndeki yer değiştirmeyi ve dönmeyi izleyebilmek hedeflenmiştir. Bu düzenleme ile tek yönlü ivmeölçerler Şekil 6.5'de gösterildiği şekilde her kata 3 adet olacak şekilde monte edilmişlerdir. Ayrıca yer istasyonu yapının sarsıntıları değiştirici etkisinden etkilenmemesi için yapıya 50m mesafede kendisine ait bir kulübe inşaa edilerek yerleştirilmiştir.



Şekil 6.5 Kat seviyelerindeki ivmeölçerlerin yerleşim ve yönleri

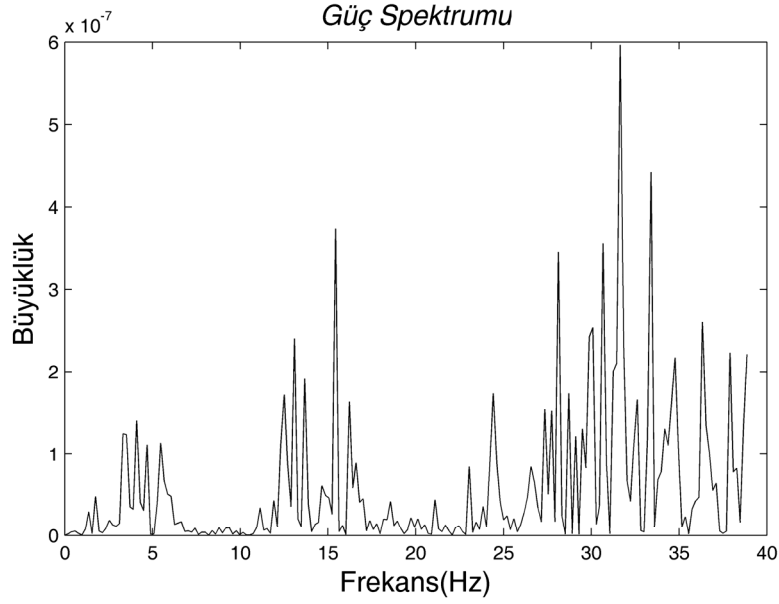
6.3 Yapıdan Alınan Veriler ve İrdelenmesi

Çevre gürültüsü altında elde edilen veriler uzun süreli olup 200 veri/sn hızıyla kaydedilmiş yaklaşık 6 saat uzunluğunda veri mevcuttur. Elde edilen verilerin sinyal/gürültü oranı çok düşüktür. Alınan verilere tipik bir örnek Şekil 6.6'da sunulmuştur. Şekilde aralıklarla görülen sıçramalar rüzgarın darbe (İng. Gust) yaptığı anlara aittir. Kaydedilen en yüksek ivme değerleri 0.02 m/s^2 'dir.



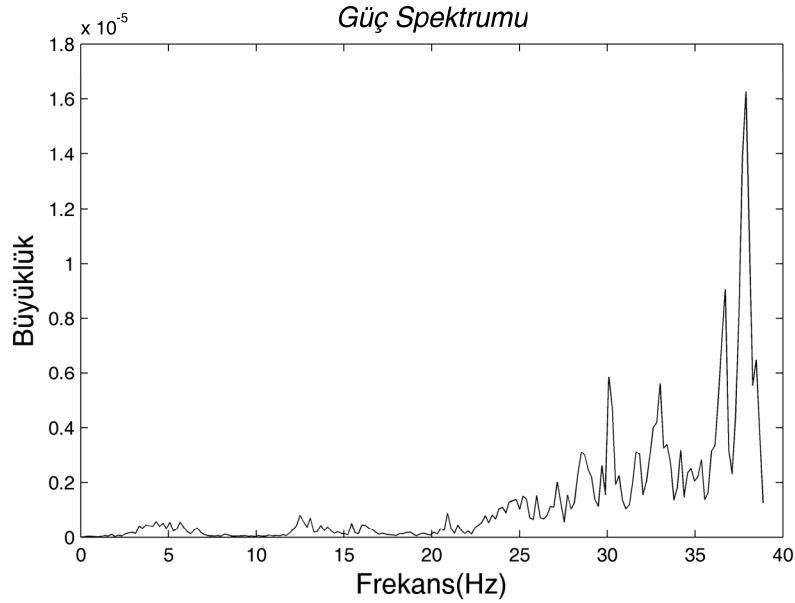
Şekil 6.6 Mimarlık A-bloktan alınan şiddetli rüzgar altında çevre gürültüsü kaydı örneği

Çevresel gürültü verileri değerlendirilebilmek amacıyla ilk olarak rüzgar darbesinin olduğu 5sn uzunluğundaki bir veri bloğunun fourier dönüşümü yapılmış ve Şekil 6.7'de sunulan eğrilere ulaşılmıştır. Bu haliyle eğriler sistem hakkında kestirim yapılmasına izin vermemektedir.

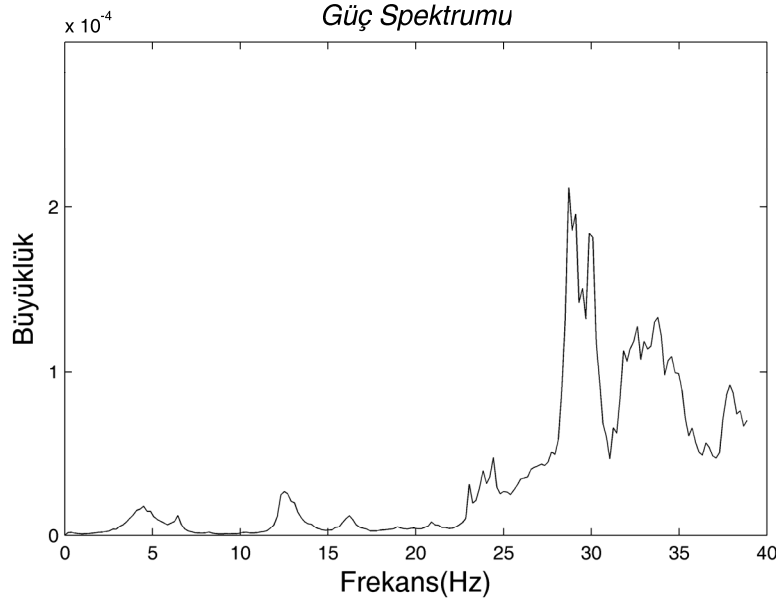


Şekil 6.7 1024 verilik (~5sn) tek bir bloktan elde edilen güç spektrumu

Kayıttaki rasgele gürültüleri birbirine kırdırıp sistemin özelliklerini öne çıkarabilmek amacı ile ayrı bloklardan elde edilen güç spektrumlarının bindirilmesi yoluna gidilmiştir. On bloğun birbirine bindirilmesi durumunda Şekil 6.8, 500 bloğun birbirine bindirilmesi durumunda ise Şekil 6.9'da sunulan eğriler elde edilmektedir.



Şekil 6.8 10 ayrı veri bloğundan (~50sn veri) elde edilen güç spektrumu

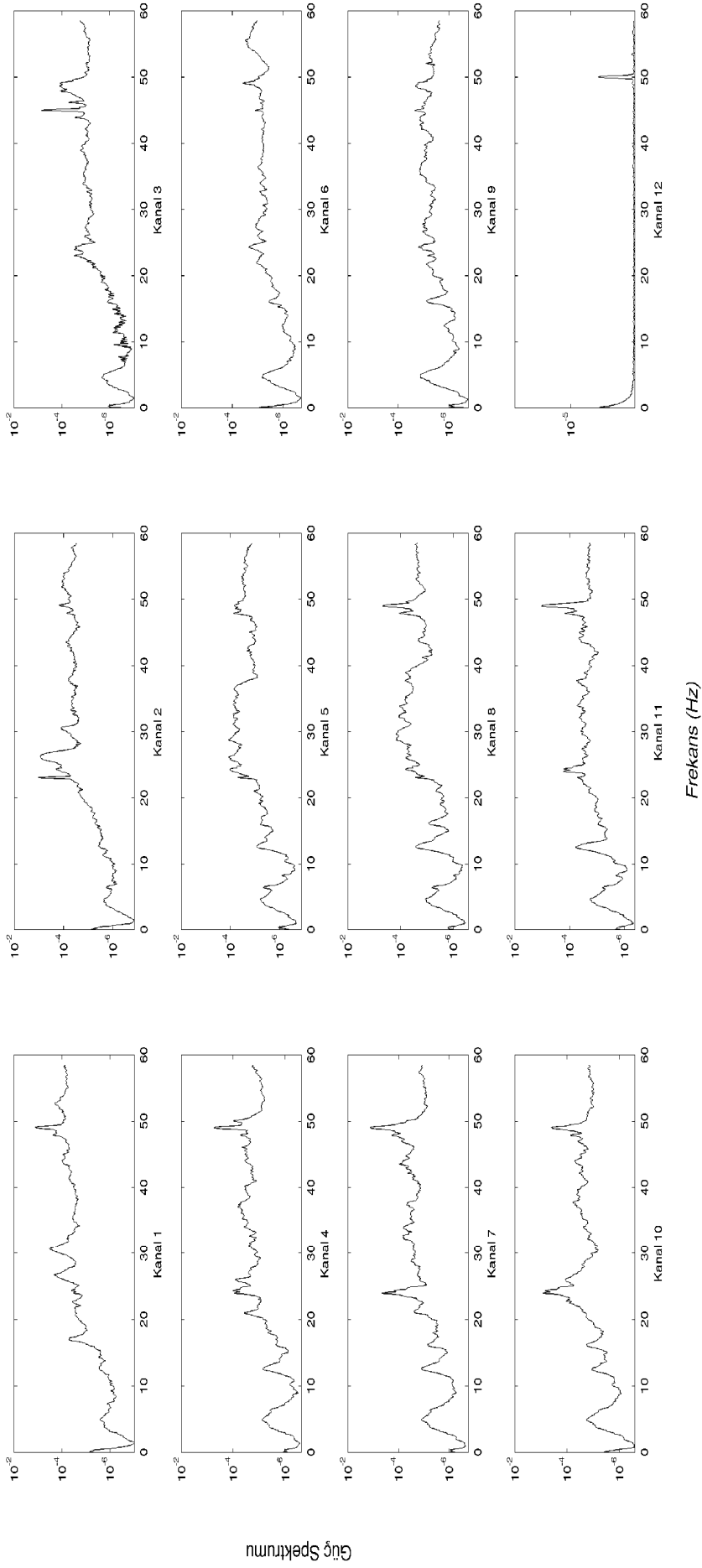


Şekil 6.9 500 ayrı veri bloğundan (~2500sn veri) elde edilen güç spektrumu

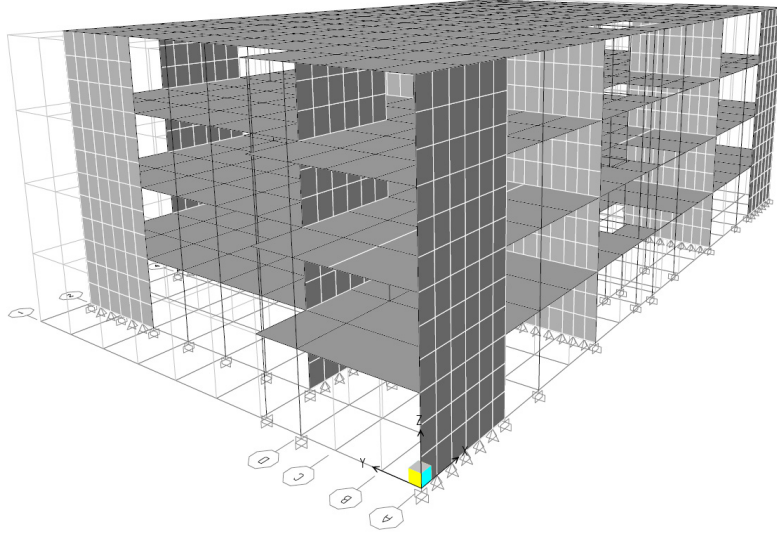
Çoklu blok işlenmesi sonucu elde edilen, Şekil 6.9, güç spektrumu eğrileri rastgele gürültülerin yok olması sonucu sistemde bir grup frekansın öne çıkmasına olanak vermektedir. Yapıdan alınan bir saatlik bir verinin tamamının 1500'lük verilik paketlerde halinde (7.5 sn) mevcut bütün kanallar için işlenip güç spektrumlarının çizilmesi halinde şekil 6.10'da sunulan eğriler elde edilir. Her katta üç ivmeölçer olduğu ve her katın 1 ve 3. ivmeölçerlerinin doğu batı (D-B) yönünden, 2. ivmeölçerinin ise kuzey güney (K-G) yönünden okuma aldığı hatırlanırsa 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10 ve 12. kanallar D-B, 2, 5, 8 ve 11. kanallar ise K-G yönünden okuma almaktadır. Kanal numaralandırması birinci kattan başlamaktadır. Ayrıca 12. kanal ivmeölçerinin çalışmadığı kanal karşılık gelmektedir.

Şekil 6.10'da D-B yönünde kayıt alan ivmeölçerlere bakıldığında 5Hz ve 12.5Hz değerlerinde ortak zirvelere sahip oldukları görülmektedir. K-G yönünde kayıt alan ivmeölçerler ise 4.6 ve 12.5 Hz değerlerinde ortak zirvelere sahiptir. 5Hz sadece D-B yönündeki ivmeölçerlerde görüldüğü için bu yöndeki birinci moda, 4.6Hz sadece K-G yönündeki ivmeölçerlerde görüldüğü için bu yöndeki birinci moda, 12.5 Hz ise bütün ivmeölçerler tarafından hissedildiğinden döşemelerin burularak veya köşegen bir hat üzerinde hareket ettiği bir moda karşılık geldiği düşünülebilir. Yapılan kayıtlardan elde edilen veriler sistemin ilk üç modunun yönleri ve frekansları hakkında bilgi veriyor olmakla beraber doğrulanmaları gerekmektedir.

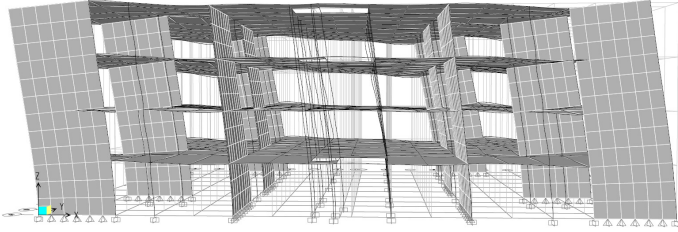
Yapılan kestirimleri doğrulamak maksadı ile yapının sayısal ETABS (2004) modeli hazırlanarak, Şekil 6.11, sistemin dinamik değişkenleri hesap edilmiştir. Model kurulurken gerçekçi modellemesi halen yeterli olgunluğa ulaşmamış olan bölme duvarlar sisteme sadece yük ve kütle olarak girilmiş, sistemin yapısal davranışına etkisi göz önüne alınmamıştır. Bu sebeple analizden elde edilecek yapı frekanslarının ölçümlere göre daha düşük olması beklenir. Betonarme çerçeve deneylerinden elde edilen tecrübe frekanslarının yükselmesine rağmen modal şekillerin dolgu duvarsız şekillerine benzerliklerini koruduklarını şeklindedir. Bu sebeple dolgu duvarların mevcut olmadığı analizden elde edilecek modal şekillerin dolgu duvarların bulunduğu bir analizden elde edilecek modal şekillerin benzeri olacağı beklenir.



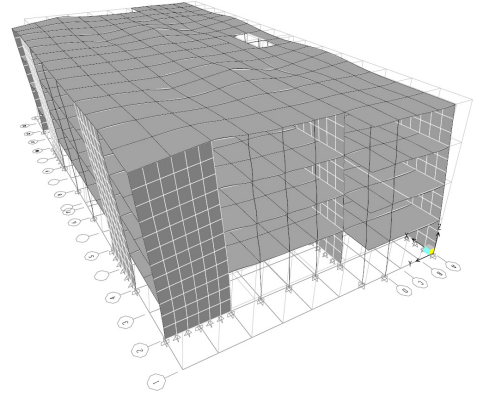
Şekil 6.10 Güçlü rüzgar altındaki çevresel gürültüden elde edilen verilerin güç spektrum eğrileri



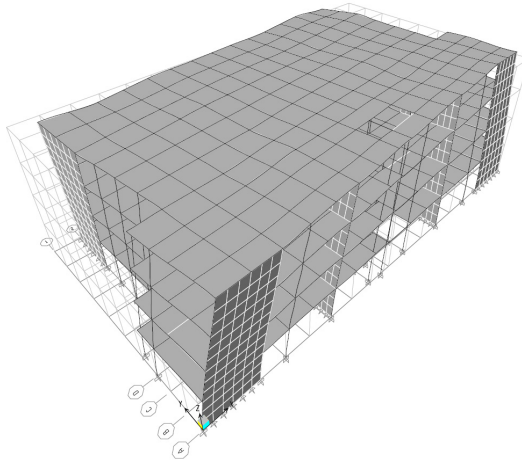
Şekil 6.11 Mimarlık A-blok sayısal modeli görüntüsü



a) 1. mod, 1.8Hz



b) 2. mod, 1.9Hz



c) 3. mod, 2.1Hz

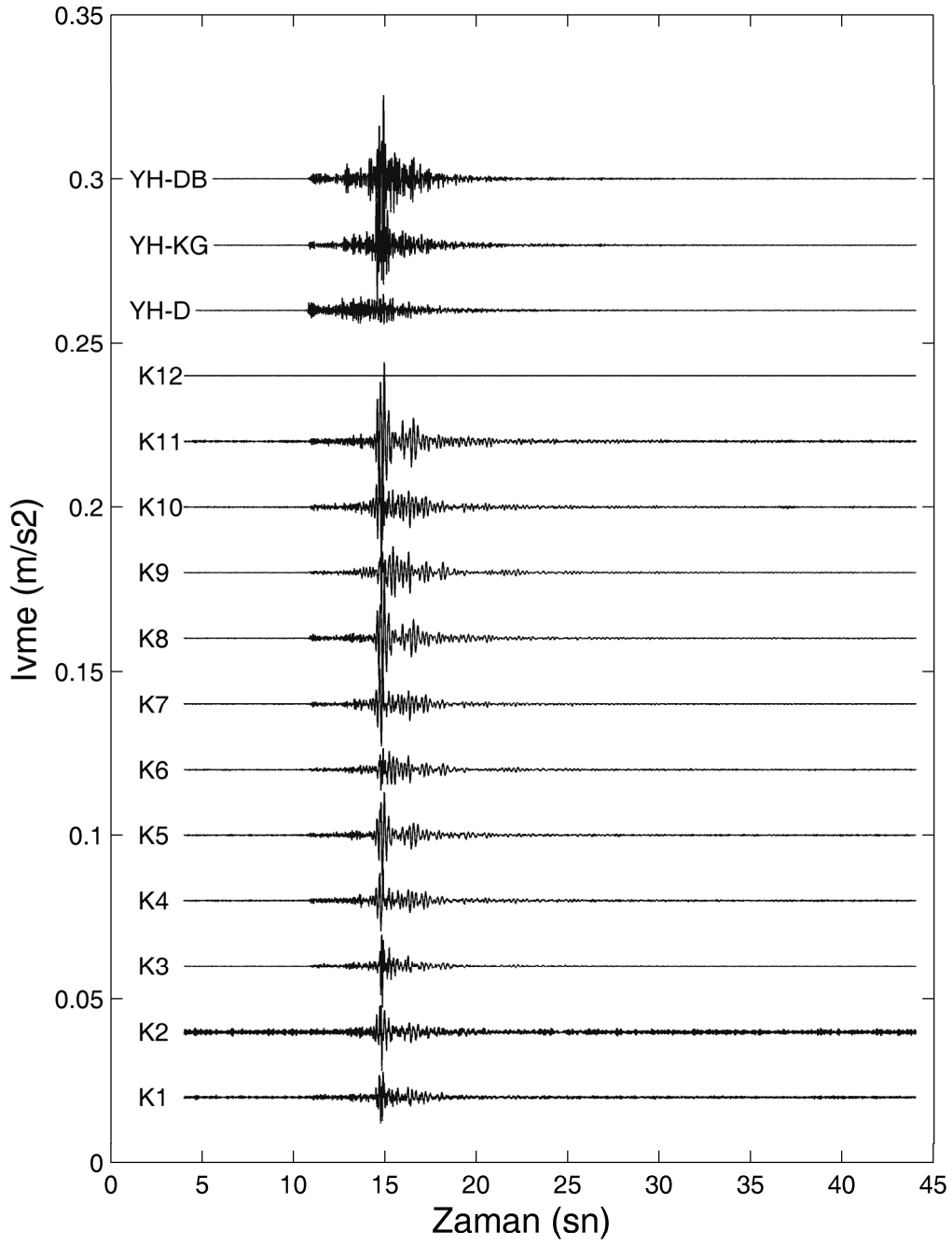
Şekil 6.12 Mimarlık A-blok analizden elde edilen ilk üç modu

Analiz sonuçları birinci modun D-B yönünde 1.8 Hz, ikinci modun K-G yönünde 1.9 Hz ve üçüncü modun döşemelerin burulması ile 2.1 Hz olarak vermiştir, Şekil 6.12. Modların diziliş sırası ve şekilleri rüzgar altındaki çevre gürültüsü ile yapılan kestirim ile uyumludur. Beklendiği üzere kestirimlerden elde edilen frekans değerleri dolgu duvarların etkisi ile daha yüksektir. Her ne kadar betonarme deneylerdeki çerçeveler ile mimarlık A-bloğun yapısal sistemi ciddi farklılıklar içerse de ilk iki mod için dolgu duvarlı ve duvarsız analiz ve/veya analiz/kestirim sonuçları yaklaşık olarak birbirinin üç katıdır. Dolgu duvarların yapının bütün çevresini sararak burulma rigitliğine büyük bir katkı yaptığından üçüncü modda oluşan yüksek orandaki fark kabul edilebilir yöndedir.

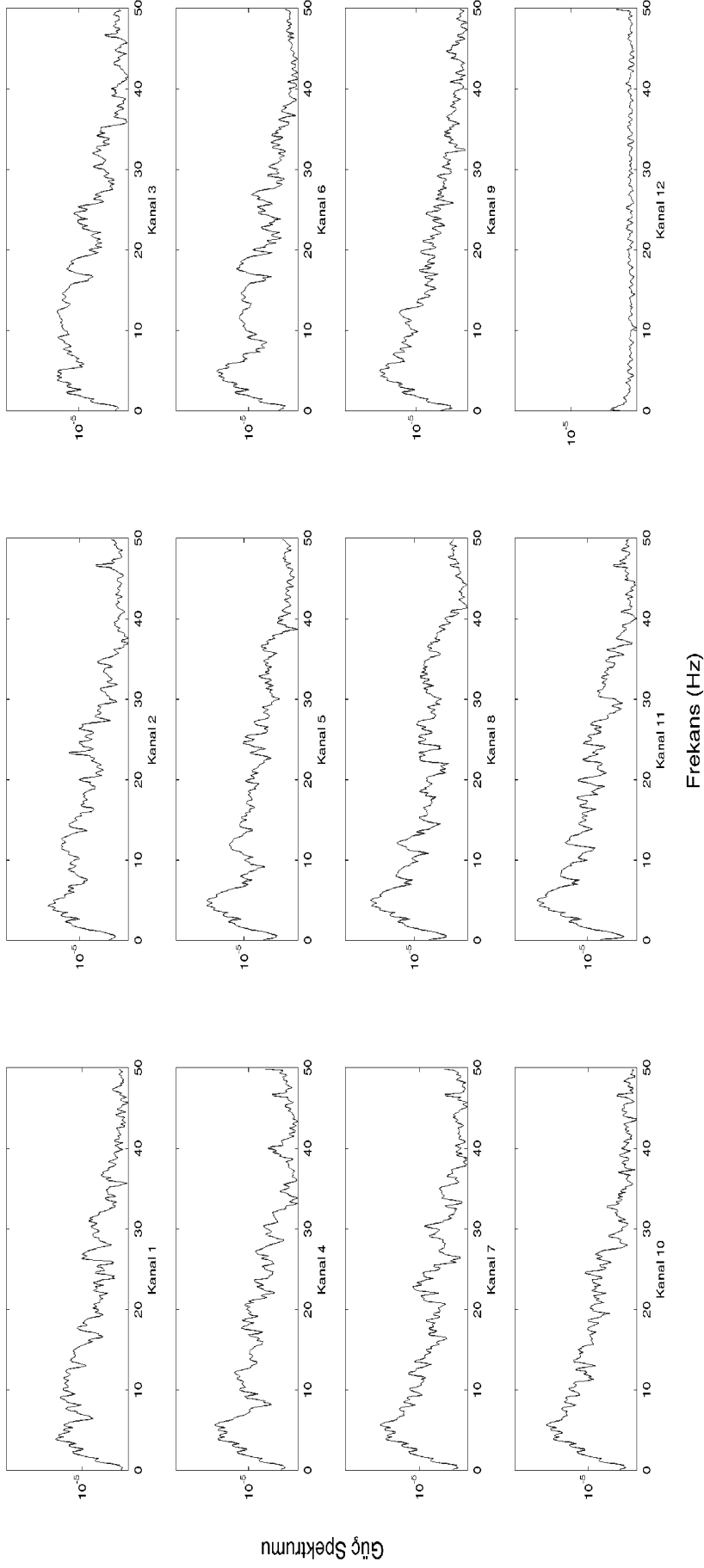
Analiz sonuçları üçüncü moddan sonra titreşimlerin ağırlıklı olarak yapının kuzey bölgesindeki uzun açıklıklı kirişlerin düşey hareketlerinin hakimiyetinde olduğunu göstermektedir. Söz konusu hareketler yapının üst katlarında daha büyük genliklere sahiptir. Analiz sonuçlarına benzer şekilde çevre gürültüsü sonuçları da ilk üç moddan sonra ,örnek olarak 16.1 Hz 'de, üst katlarda çok daha belirgin olan modlara sahiptir.

Mimarlık A-Blok'dan çevre gürültüsünden ayrı olarak düşük şiddete deprem kaydı almak mümkün olmuştur. Kaydedilen depremin yer hareketinin ve bina üzerinde yaptığı etkilerin ivme kayıtları Şekil 6.13'de sunulmuştur. Kayıtlarda en büyük ivme değeri 0.03m/s^2 ve titreşim süresi 8sn civarındadır. Kayıtların blok olarak Fourier dönüşümü yapılması durumunda anlamlı bilgiye ulaşılamamıştır. Rüzgar verisine benzer şekilde yapı üzerinden alınan verilerin her bir kanal için 6sn uzuluğunda bloklar halinde ve her seferinde 0.5 sn kaydırılarak güç spektrumlarının alınıp bu spektrumların toplanması sonucu Şekil 6.14'de sunulan eğrilere ulaşılmıştır. Buradaki eğriler rüzgar verisi altındaki eğriler kadar net olmamakla beraber yapının ilk üç moduna ait frekans bölgelerinde toparlanma gözlenmektedir. Eğrilerin net olmamasının sebebi Şekil 6.15'de sunulan deprem yer kayıtlarının Fourier dönüşümleri incelenince anlaşılmaktadır. Görüleceği üzere yer hareketi 15Hz'in altında daha güçlü olan inişli çıkışlı bir uyarı sağlamaktadır. Bu uyarı altında sistem yanıtında da inişler çıkışlar oluşması olağandır. Güç spektrum eğrileri ilk iki modun oturduğu 5Hz civarında kabarmıştır fakat modları doğrudan kestirebilmek pek mümkün değildir. Benzer şekilde 12Hz civarında özellikle üst katlarda sinyal gücünü arttıran bir kabarma olmakla beraber frekansların kestirimi sadece söz konusu deprem kaydı ile pek mümkün gözükmemektedir.

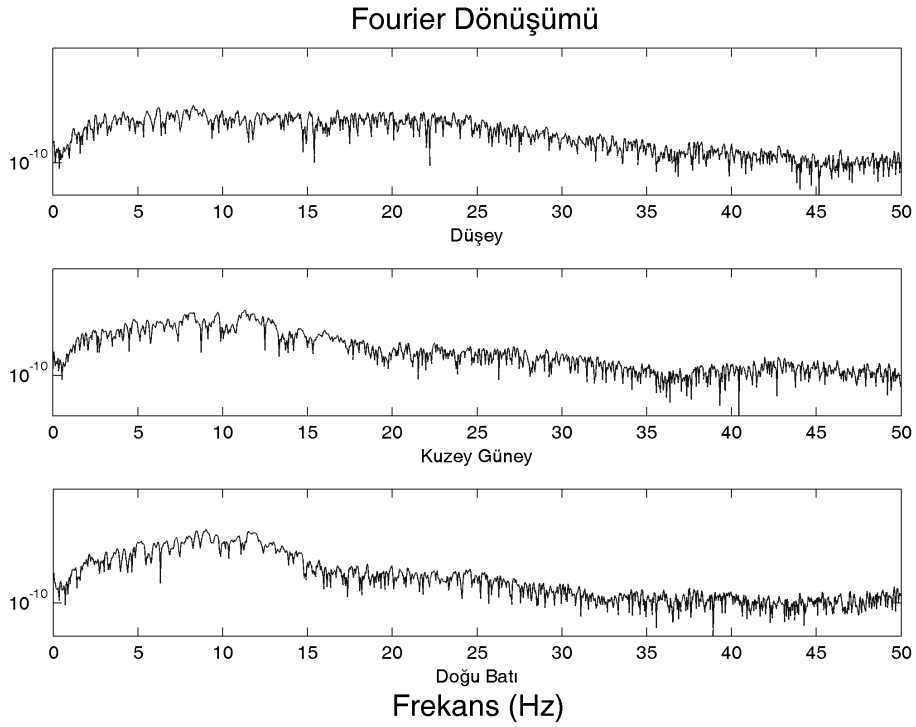
Düşük şiddetli deprem verisi ile hem yapı yeteri kadar iyi uyarılmadığı için hem de elde edilen kayıtların kısalığı sebebi ile sağlıklı kestirim yapılamamıştır. Benzer şekilde literatürde kısa ve orta boylu yapılarda (göreceli daha sıkı) yer hareketi marifetiyle dinamik değişken kestiriminin başarılı olmadığı rapor edilmiştir (Oliveria 2010). Ayrıca betonarme çerçeve deneyleri dolgu duvarlı yapılarda duvarlar halen sağlam iken üst modları yeteri kadar uyarabilmenin kolay olmadığını göstermiştir. Gerçek yapıda da benzer bir durum söz konusu olup her yöndeki birincil modlar ve döşeme kaynaklı modlar dışında modlar gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.13 Mimarlık A-blok'ta 22 Mart 2009 tarihinde kaydedilendüşük şiddetteki depremin kayıtları



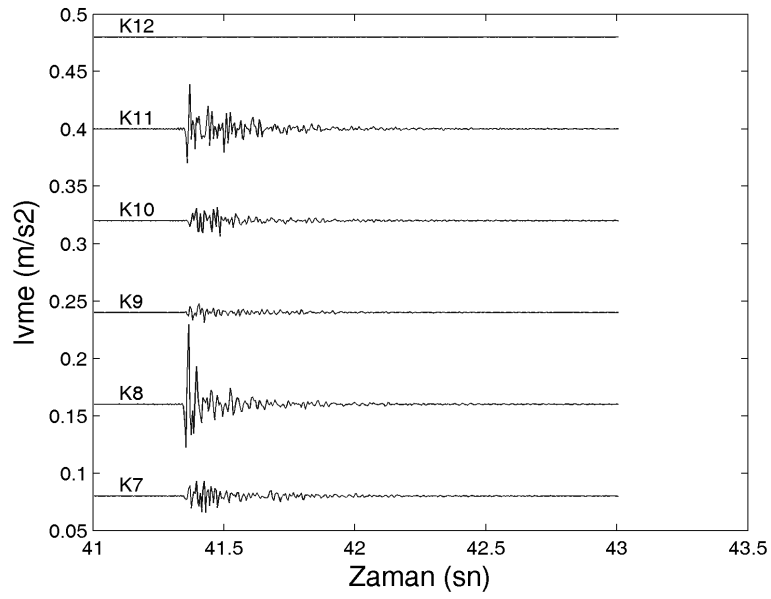
Şekil 6.14 Mimarlık A-Blok 22 Mart 2009 tarihli deprem akabinde kat seviyelerinde alınan verilerin güç spektrum eğrileri



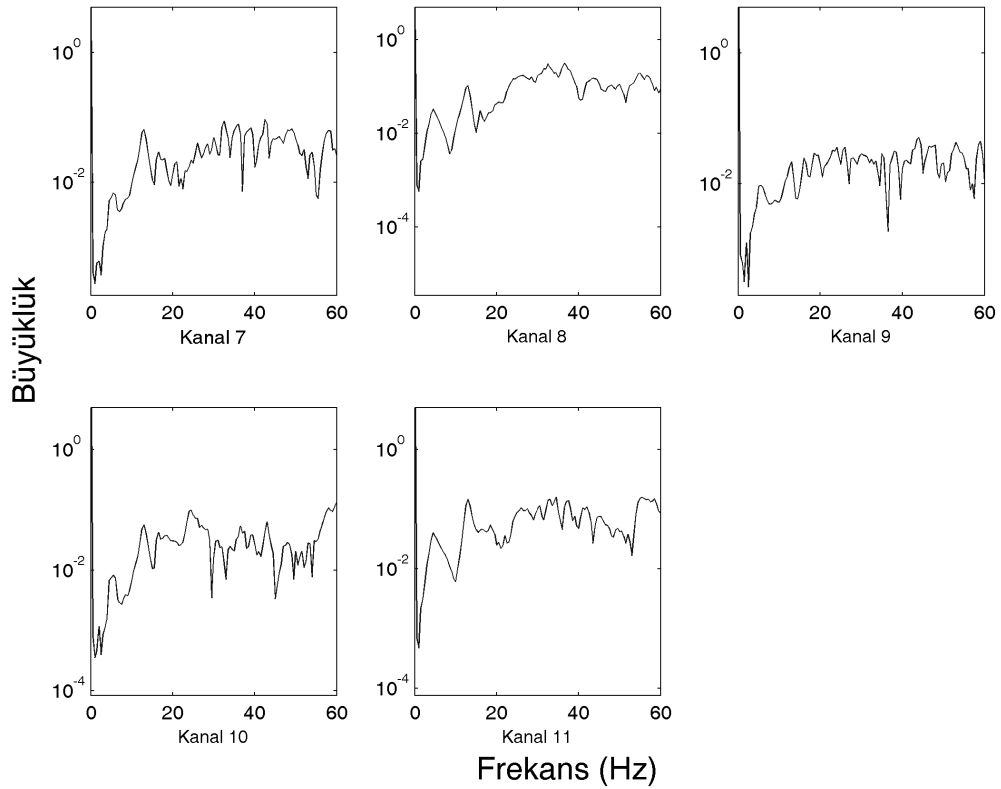
6.15 Mimarlık A-blok'da kaydedilen depremin açık zeminde kaydedilen bileşenlerinin Fourier dönüşümleri

Son olarak Mimarlık A-blok ağır darbe çekici ile uyarılmıştır. Belirtildiği üzere kayıt sisteminin kartlarından birisinin voltaj dalgalanması sebebi ile yanması sonucu sadece üçüncü ve dördüncü katlardaki çalışır durumdaki beş ivmeölçerden kayıt alınmıştır. Kayıtlar 200 veri/sn hızı ile alınmıştır. Dürtü üçüncü katta batıdan sayarak üçüncü kolon hattında bina orta bölgesinde K-G yönünde verilmiştir. Bu sebeple alınan ivme kayıtlarında K-G yönüne bakan 8. ve 11. kanalların ivme değerleri daha büyük gerçekleşmiştir. En büyük ivme değeri 0.06m/s^2 civarında gerçekleşmiş ve 1sn civarında süren bir titreşim gerçekleşmiştir.

Alınan kayıtların Fourier dönüşümleri yapıldığında D-B yönlerindeki kanallar için 5.5 ve 13 Hz, K-G yönündeki kanallar için ise 4.5 ve 13 Hz frekanslarında zirveler görülmektedir. Veri azlığı sebebi ile yapılan Fourier dönüşümünün frekans çözünürlüğü 0.5 Hz'dir. Bu sebeple gerçek zirveler okunan zirvelerin 0.5 Hz komşuluğunda gerçekleşebilirler. Dürtü uyarılarından elde edilen veriler rüzgar altındaki çevre gürültüsü verileri ile örtüşmekte ve sistemin ilk üç modunu doğru yönleri ve sırası ile vermektedirler. Sistemden bütün katlardan ya da daha uzun süreli ya da daha daha yüksek bir kayıt hızında veri alınması durumunda frekans ve modal şekil kestirimi yapmak mümkün görünmektedir.



6.16 Mimarlık A-blok'da darbe çekici dürtüsü sonucu alınan ivme kayıtları



6.17 Mimarlık A-blok'da darbe çekici dürtüsü sonucu alınan ivme kayıtlarının Fourier dönüşümleri

BÖLÜM 7

ÖZET, SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Giriş

Ülkemizdeki yapıların büyük bir kısmında taşıyıcı sistem olarak betonarme çerçeve kullanılmıştır. Mevcut analiz ve tasarım tekniklerinde bu tip yapıların sadece betonarme kısımlarının sistemde yük taşıyıcı oldukları varsayılarak mevcut diğer kısımlar ihmal edilmektedir. Taşıyıcı kapasiteleri ihmal edilen bu kısımların en önemlisi bölme amaçlı olarak inşa edilen dolgu duvarlardır. Bölme duvarlar ile ilgili yapılan varsayım düşey yükler altında tipik olarak herhangi bir sorun çıkarmamak ile birlikte yatay yükler, özellikle de deprem yükleri, altında tam olarak geçerli değildir. Bu çalışmada betonarme yapılarıdaki taşıyıcı çerçeve-dolgu duvar etkileşiminin sistemin dinamik özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Taşıyıcı çerçeve/dolgu duvar etkileşimi konusunda yapılan gözlemler ışığında betonarme çerçeve yapıların depreme karşı tasarım ve güçlendirilmesi konusunda temel bilgilere ulaşılmış ve öneriler sunulmuştur.

Ekonomi, yaygınlık ve uygulanma kolaylığı sebepleri ile dolgu duvarlar ile yapıların depreme karşı güçlendirilmesi araştırmacıların ilgisini çekmekte ve bir kısım teknikler şartnamelerde yerini almaktadır. Dolgu duvarların asli taşıyıcı sistem ile etkileşim sistemin bütününün davranışını nasıl etkiledikleri ve bu etkileşimi sistemin toplamdaki davranışı iyileştirme yönünde nasıl katkıda bulunabilecek hale getirebileceği büyük ekonomik öneme haiz, çözüm bekleyen, zor bir problemdir.

Dolgu duvarların betonarme çerçevelerin davranışını nasıl etkilediği konusunda deneysel ve sayısal çok sayıda çalışma vardır. Araştırmaların en temel sonucu dolgu duvarların yapı içinde düzgün dağıtılıp kolonlarda kesme göçmesine sebep olmadıkları sürece davranışa iyi yönde etki ettiği görülmüştür.

Literatürde çok katlı betonarme çerçeve ve betonarme dolgulu çerçevelerin dinamik değişkenlerini saptamaya yönelik çok sınırlı çalışma vardır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla sunulan çalışmada çerçeve dolgu duvar etkileşimi laboratuvar yöntemleri ile incelenmiş ve dinamik değişkenleri kestirilmiştir. Bu amaçla modal deney/analiz yöntemleri kullanılmıştır. Modal deney/analiz yöntemlerinde sistemlerin doğal titreşim frekansları, her bir frekansa karşılık gelen modal şekilleri ve modal sönüm miktarları sistem üzerindeki ölçümlerin analizi sonucu tespit edilebilmektedirler. Modal deney/analiz yöntemleri inşaat mühendisliğinde sistem tanımlama, yapısal modelleri düzeltme/ilintilendirilme, yapısal sistemlerin durumunu izleme, mevcut yapıların durum tespiti ve aktif titreşim kontrolü konularında önemli bir araçtır.

Sunulan çalışmadaki ana amaç betonarme çerçeve dolgu duvar etkileşiminin dinamik değişkenler üzerindeki etkisini belirlemek olmak ile beraber diğer bir amaç da modal analiz ve deney tekniklerinin özümsemesidir.

Modal analiz tekniklerinin özümsebilmesi amacıyla planlanmış deneylerin verilerini işleyebilecek modal analiz teknikleri seçilmiş, irdelenmiş ve Matlab (2007) yazılımları haline getirilmiştir. Seçilen algoritmaların türetilmesine geçilmeden önce tek serbestlik dereceli bir sistem için dinamik denge denkleminde başlayarak transfer fonksiyonu ile frekans yanıt fonksiyonları türetilmiştir.

Seçilen algoritmalar en küçük kareler üstel karmaşık, özsystem gerçekleştirme algoritması ve karmaşık mod gösterge fonksiyonudur. En küçük kareler üstel karmaşık ve özsystem gerçekleştirme algoritmasının türetilmesi yapılmış ve karmaşık mod gösterge fonksiyonunun

kullanımında önemli olacak özellikleri irdelenmiştir. İncelenen yöntemlerin işlerliklerini doğrulamak amacı ile özellikleri bilinen sentetik veriler ile uygulamalar yapılmış ve her üç yöntemde sentetik veriler ile başarılı bir şekilde işlemiştir.

Çalışma kapsamında iki grup laboratuvar deneyi yapılmıştır. Birinci grupta modal deney ve analiz yöntemlerinin özümsemesi amacı ile bir grup doğrusal sistem tasarlanıp imal edilerek teste tabii tutulmuşlardır. Bu grup deneyler sonucunda modal analiz ve deney yöntemlerinde tecrübe kazanılmıştır. İkinci grupta ise betonarme çerçeveleri temsilen boş ve dolgu duvarlı deney çerçeveleri tasarlanıp, bu sistemler sözde statik (İng. pseudo-static) yükleme döngüleri sonrası hasara tabii tutularak her bir döngü sırasındaki modal değişkenleri belirlenmiştir.

Birinci grup deneylerde tamamı çelikten imalat dört tip basit sistem incelenmiştir. Bu sistemler basit bir kiriş, kare bir plaka, ayak uçlarında ağır plakalar olan bir H-çerçeve ve tek açıklık ve dört kata sahip olan bir düzlem çerçevedir. Seçilen sistemler verilen sıra ile basitten karmaşığa doğru incelenmişlerdir.

İkinci grup deneylerde dört adet betonarme düzlem çerçeve incelenmiştir. Her bir çerçeve temelde geometrik olarak eş olmak ile beraber donatı detaylandırılması ve dolgu duvar içeriği ile dört tip çerçeve test edilmiştir. Her bir çerçeve tek açıklık ve dört kata sahiptir. Çerçeveler laboratuvar olanakları içinde test edilebilmek amacı ile 1/5 ölçeklendirilmiş ve ölçeklendirmede ana değişken olarak sistemin frekansları alınmıştır. Çerçeve betonları 250 ile 400 kgf/cm² (deney günlerinde ölçülmüş) ortalama beton dayanımlarına sahiptir. Çerçeve ana donatıları S420, etriyeler ise ise soguk çekilmiş telden imal edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak dolu alanı %50 civarında olan kil tuğlalar kullanılmıştır. Çerçeveler sözde statik yüklemelerinde her bir kat döşeme seviyesinde olmak üzere dört noktadan yüklenen ters üçgen yüke tabii tutulmuş ve yük miktarları hedefli birinci kat katarası öteleme miktarlarına karşılık olarak çerçeve kapasitesi tarafından belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında son olarak mevcut bir betonarme binaya sistem kestirimi yapmak amacı ile üçü açık sahada, diğerleri her bir katta üçer adet olmak üzere 15 adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Yapıdan rüzgar altındaki çevre gürültüsü, düşük şiddette bir deprem ve darbe çekici ile verilen dürtüye karşılık veriler alınmış ve sistem dinamik değişkenleri kestirilmiştir.

7.2 Basit Sistemler

Basit sistemlerin dinamik değişkenleri modal analiz yöntemleri ile saptanmıştır. Yapılan çalışma neticesinde modal analiz deney tasarımında dikkat edilmesi gereken durumlar hem literatürden kuramsal olarak hemde yapılan çalışma neticesinde pratik olarak saptanmıştır. Çalışma kapsamında üzerinde çalışılan modal analiz yöntemleri deney verilerine uygulanmış ve bu yöntemlerin kuvvetli ve zayıf yönleri, hangi durumlarda başarılı çözümlerler verebildikleri saptanmıştır. Dört farklı basit sistem deneysel olarak çalışılmıştır.

Birinci sistem basit mesnetli, değişmez kesitli bir çelik kiriştir. Bu sistem analitik çözümünün mevcut oluşu, sayısal çözümünün göreceli olarak az varsayım içermesi sebebi ile modal analizin temel ilkelerinin irdelenmesinde kullanılmıştır. Modal analizin temel varsayımları olan zamanda değişmezlik ve doğrusallık için kullanılan deneysel yöntemler bu sistemde sınanmış ve işlerlikleri doğrulanmıştır. Yapılan sistem tanılama çalışması neticesinde sistemin frekans ve modal şekilleri kabul edilebilir farklılıklar içerisinde birbirine yakın değerler vermişlerdir. Ayrıca yine bu sistem çalışmaları sırasında en küçük kareler üstel yönteminin deneysel verilerin sinyal veri oranlarında çalışmadığı görülerek yöntem terk edilmiştir.

İkinci sistem olan H çerçeve üç boyutlu ve dürtü ve tepkilerin yönler arasında etkileşime sahip olmaları sebebi ile göreceli olarak daha karmaşık bir sistemdir. Sistemin deney düzeneği kayıt noktası çokluğu, çok sayıda noktadaki uyarının fiziksel olarak verilememesi ve sistemde etkileşim olması sebepleri ile düzenek kurulması yönünden çok öğretici olmuştur. Sistemdeki deneysel karmaşıklığı azaltabilmek için tersinirlik ve elemanların aksel rijitliğinin yüksek olduğu bilgilerinden faydalanılarak deneysel karmaşa azaltılmış ve sistem tanılama başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü sistem olan kare plaka çakışık köklere sahip bir sistem olduğu baştan bilindiği için böylesi durumları irdelemek amacı ile çalışılmıştır. Sistem tanılama çalışmalarında öz sistem gerçekleştirme algoritması ve karmaşık mod gösterge fonksiyonu yöntemlerinden sadece karmaşık mod gösterge fonksiyonu yönteminin çakışık kökleri tanılayabildiği sonucuna varılmıştır.

Son sistem olan düzlem çerçeve tek açıklıklı dört katlı bir çerçeve sistemidir. Projenin sonraki aşamalarında çalışılacak olan betonarme çerçevelere fiziksel benzerliği sebebi ile sonraki aşamalar için hem deney düzeneği hem de ölçümle ilgili sistemler konusunda bir ön çalışma olması amacı ile çalışılmıştır. Çerçeve temel katında laboratuvar tabanına oturan ve kuvvetli döşemesine 56mm çapında çelik çubuklar ile bağlanan iki adet U kesit üzerine oturmuştur. Açıklıkların boş olduğu moment çerçevesi olan durumda sistemin dinamik değişkenleri başarı ile kestirilmiştir. Açıklıkların 3mm'lik çelik plakalar ile doldurulduğu sistem için ise ilk denemelerde sistem tanılama başarılı olamamış ve yapılan inceleme neticesinde bunun iki ana sebebi olduğu anlaşılmıştır. İlk sebep sistem mesnetlerinin yeteri kadar sıkı olmaması sebebi ile doğrusallık varsayımını engellemesidir. İkinci sebep ise sistemin eklenen dolgular sebebi ile yüksek sıklık neticesinde çok yüksek frekanslara sahip olması ve eldeki dürtü ve mesnet şartları ile bu frekansların uyarılamamasıdır.

Bu kısımda yapılan çalışmalar neticesinde modal deney tasarım ve uygulamasında tecrübe kazanılmış, verilerin işlenmesi konusunda nasıl bir yöntem izleneceği konusu ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında belirlenen modal analiz yöntemlerinden karmaşık mod gösterge fonksiyonu yönteminin sonraki aşamalarda kullanılmasına karar verilmiştir.

7.3 Betonarme Çerçeve Deneyleri

Proje kapsamında deneyleri yapılan dört adet betonarme çerçeve deneyi planlanmış ve uygulanmıştır. Çerçeveler boş ve dolu, zayıf ve kuvvetli olmak üzere iki ana değişken üzerinden tasarlanmıştır. Boş ve dolu değişkeni olarak ara bölme duvarların mevcudiyeti, zayıf ve kuvvetli değişkeni olarak ise betonarme elemanların şartname gereği istenilen sünek çerçeve detaylandırmasına uygunluğu tanımlanmıştır. Çerçeveler dört katlı tek açıklıklı ve laboratuvar fiziksel sınırları düşünülerek 1/5 ölçekli düzlem çerçeveler olarak seçilmiştir. Gerçek yapılarıdaki kütle-sıklık ilişkisini benzetebilmek amacı ile çerçevelere kat seviyelerinde ek kütleler eklenmiştir. Modal deneyler artırımlı hasar verilen sistemlerden darbe çekici ve çek bırak vasıtaları ile sistem tanılamaya yönelik veri üretecek şekilde organize edilmiştir. Bu amaçla laboratuvar kuvvetli döşemesine bağlanan çerçevelere mevcut kuvvetli duvardan destek alınarak hidrolik krikolar vasıtası ile kademeli olarak hasar verilmiştir. Yükler sisteme çerçeve yüksekliği boyunda ters üçgen yük oluşturacak şekilde uygulanmıştır. İki-boyutlu çerçevelerin düzlem boyutuna dik yöndeki kararlılığının sağlanması için ayrıca bir destek çerçevesi imal edilmiştir.

Deneylerde farklı hasar seviyelerini izleyebilmek amacı ile çerçevelerin farklı ötelenme seviyelerine ulaşmasını hedefleyen bir yükleme programı uygulanmıştır. Deneylerin sonlandırılmasına çerçevelerin üzerlerindeki ek kütleler göz önüne alınarak herhangi bir ani çökmeye karşı maksimum ötelenme miktarına ve deney anındaki hasar

durumuna göre karar verilmiştir. Sünek davranış beklenmeyen 1 ve 3. çerçevelerde ötelenme miktarları sınırlı tutulmuştur. Yükleme en kritik kat olan birinci kat ötelenmesi üzerinden tanımlanmıştır. Yaklaşım olarak çerçevelere aynı ötelenme miktarına iki defa ulaştırılarak yükleme grupları oluşturulması hedeflenmiş ve bu yöntem büyük oranda uygulanmıştır. Bu sayede çerçevelerin aynı yük altındaki kararlılığıda irdelenmiştir. Uygulanan yükleme programı sonrasında moment çerçevelerin bütün katlarının orantılı bir şekilde artan ötelenmelerle hareket ettiği gözlemlenirken dolgulu çerçevelerde son üç döngüde birinci kattaki artışa rağmen üst katlardaki artış sınırlı olmuş ve sistem kabaca birinci kat üzerinde hareket eden rijit bir kütle şeklini almıştır.

Birinci ve ikinci çerçevelere sırası ile birinci kat seviyesinde %0.7, %1.1, %1.5, 1.9% ve %0.7, %1.1, %1.5, %1.9, %2.5, %3.4 kat arası ötelemelere karşılık gelecek yükler uygulanmıştır. İlk ötelenme kolonlarda çatlama başlatacak şekilde seçilmiştir. Sonraki adımlar her iki çerçeve için de eş tutulmuş ve deneylerin sonlandırılmasına çerçevelerin deney ekipmanlarına zarar verme riskinin oluşmaya başladığı noktada karar verilmiştir. Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde ise sırası ile yine birinci kat seviyesinde %0.12, %0.27, %0.7, %1.0, %1.4, %1.8 ve %0.12, %0.26, %0.54, %1.0, %1.4, %1.9 kat arası ötelemelere karşılık gelecek yükler uygulanmıştır. Bu grupta ilk iki ötelenme seviyesi dolgu duvarın davranışını gözlemleyebilmek için düşük tutulmuştur. Sonraki döngülerde ise adımlar dolgusuz çerçevelere yakın tutulmuş ve deney sonlandırılması gene çerçevelerin deney ekipmanlarına zarar verme riskinin oluştuğu noktada karar verilmiştir.

Çerçevelerin her bir döngü grubundaki birinci ve ikinci yüklemelerine karşılık gelen zarf eğrileri incelendiğinde 1. ve 2. çerçeveler arasındaki temel farkın ulaşılan ötelenme miktarı olmuş, bunun haricinde çok benzer bir davranış göstermişlerdir. Ayrıca ikinci yük döngülerindeki düşüş, donatı detayı yetersiz 1. çerçevede daha erken başlıyor olmak ile beraber büyüklükleri önemsizdir. Üçüncü ve dördüncü çerçevelerin maksimum yük değerleri %20 civarında farklıdır. Donatı detayı sünek bir çerçeve olmak üzere tasarlanmış dördüncü çerçeve daha yüksek bir yük değerine ulaşmıştır. Deney sırasında yapılan gözlemler yük değerindeki artışın donatı detayından çok dolgu duvar davranışından dolayı oluştuğunu göstermektedir. Bu gözleme dayanarak dolgu duvarlı çerçevelerin yanıl yük kapasitesinin dolgu duvarın göçme mekanizmasına göre ciddi farklılıklar içerebileceği söylenebilir. Diğer taraftan dördüncü çerçeve sünek olarak tasarlanmasına rağmen bölme duvar etkisi ile gevrek olan üçüncü çerçeve ile yakın bir ötelenme miktarında ağır hasar görmüş ve deney durdurulmuştur.

Üçüncü çerçeve maksimum yük değerini deney sonuna kadar koruyabilmiştir. Bu davranışa çerçevenin yaygın hasar görmesine rağmen göçmemesi ve dolgu duvarın altta ve üstte yere paralel iki hat üzerinden çatlayarak ötelenme döngülerinde bu iki hat üzerinde kayma hareketi yapıp kendini aşırı yüklerden korumasının sebep olduğuna kanaat getirilmiştir.

Dolgulu çerçeveler maksimum yük kapasiteleri civarından itibaren yükleme gruplarının ikinci döngülerinde yük kapasitelerinde %5-15 arası değişen düşüşler göstermiştir. Üçüncü ve dördüncü çerçevelerin histeresis eğrileri yükleme sırasında yükleme sabit tutulduğunda dolgulu çerçeveler yük kapasitelerinde nispeten yavaş bir düşüş göstermiştir. Bu durum dolgu duvarlı sistemlerin hasar gördükten sonra yük altında durağan bir direnç göstermediklerine işaret etmektedir.

Moment ve dolgulu çerçeveler karşılaştırılırsa yük kapasitesinde 3 kata, sıklık değerlerinde ise 12 kata varan artışlar gerçekleşmiştir. Diğer yandan dolgulu çerçevelerin ilk iki kat özellikle de birinci kat kiriş ve kolonlarında çok yaygın hasar oluşmuştur.

Betonarme çerçevelerin hasarsız hali ve hasar sonrası dinamik değişkenlerinin kestirimi amacıyla dürtü ve çek bırak olmak üzere iki tip uyarı kullanılmıştır. Dürtü uyarılarlarından elde edilen kayıtların incelenmesi sonrası her döngü sonrası sistemlerin frekansları azalıyor olmakla beraber oluşturulan frekans yanıt fonksiyonlarının her bir döngü grubu içerisinde doğrusal olarak değerlendirilebilecek şekilde davrandığı ortaya çıkmıştır. Buradan hareketle dürtü uyarılarından elde edilen veriler her bir çerçevenin her bir döngü grubu için modal analize tabii tutulmuş ve dinamik değişkenleri kestirilmiştir. Kestirimler sonrası sistemi tanımlayan dört mod kestirilmekle beraber hasar arttıkça sistemlerdeki karmaşa artmakta ve sistem titreşiminin yeniden çatılması için fazladan bir iki frekansa daha ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu durum ilk dört modun etkin oldukları gerçeğini değiştirmemektedir.

Dürtü uyarılarından yapılan kestirimler çerçevelerin hakim frekanslarının artan hasarla beraber gittikçe yavaşlayan bir şekilde azaldığını göstermiştir. Frekans değişimlerinde donatıları süneklik bazında farklı detaylandırılmış olan moment çerçeveleri olan birinci ve ikinci çerçeveler arasında dikkate değer bir farklılık gözlenmemiştir. Gene donatıları süneklik bazında farklı detaylandırılmış üçüncü ve dördüncü çerçevelerde ilk üç hakim frekansta kestirim yapılmış ve frekanslarda görülen farklılık sünek donatı detayından çok dolgu duvar hasar zamanlamasından kaynaklanmıştır. Çerçevelerin hasarsız ve son döngü sonrası elde edilen birinci mod frekansları sırası ile 0.4, 0.3, 0.2 ve 0.15 oranlarında değişmiştir. Çerçeve bir ve ikinin son döngülerinde farklı öteleme seviyelerine ulaştığı ve birinci çerçevenin son döngü ötelenme seviyesinde ikinci döngü frekansının aynı miktarda düşüş gösterdiğini belirtmekte fayda vardır. Dördüncü çerçeve ise üçüncü çerçeveden farklı olarak dördüncü döngüde ağır bir kesme hasarına maruz kalmıştır. Söz konusu hasar öncesi çerçeve elemanlarında ve dolgu duvarlarda yaygın hasarlar oluşmasına rağmen frekans değerleri birbirlerine yakın değerler almışlardır.

Birinci çerçeve birinci katı yüzde iki, ikinci çerçeve birinci katı ise yüze dört civarında kat arası ötelenmeye maruz kalmasına rağmen her bir döngüden elde edilen modal şekillerin karşılaştırılması modal şekillerde çok büyük değişim oluşmadığını ortaya koymuştur. Üst modlarda daha büyük değişim görülüyor olmakla beraber bu frekanslarda sinyal gürültü oranının daha küçük olması ve sergilenen modal şekillerin belirli noktadaki ötelemelere göre standart hale getirildiği gerçeği ile büyük görünen farklılıkların ölçüm kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde birinci hakim frekans modal şekline, ilk iki çerçeveden daha etkin olmak ile beraber, yine çok büyük değişimler gözlemlenmemiştir. Dördüncü çerçevede ancak dördüncü döngüde oluşan ağır kolon kesme hasarları sonrası modal şekilde ciddi bir değişiklik meydana gelmiştir.

Çerçeveler arası yapılan karşılaştırma farklı büyüklüklerde olmak ile beraber her iki tip çerçevenin de (moment çerçevesi ve dolgulu çerçeve) kesme savrulması şeklinde modal şekillere sahip olduğu gözlenmiştir.

Moment çerçevelerinde hasar durumu arttıkça hasarsız durumdaki hakim frekansların modal şekilleri benzer (aynı sayıda nodal noktaya sahip ama ötelenme dağılımı değişik) yeni frekanslar ortaya çıktığı gözlenmiştir. Ana modlar ilk döngüden itibaren değişerek de olsa varlığını sürdürmektedir. Çek bırak uyarılarından elde edilen hakim frekansların dürtü uyarılarından elde edilen hakim frekanslar ile karşılaştırılması hasar miktarı arttıkça çek bırak uyarılarından elde edilen hakim frekans değerlerinin büyüdüğünü göstermektedir. Birinci ve ikinci hakim frekanslardaki değişim çok sınırlı olup değişim olmadığı kabulü ile dürtü uyarılarından elde edilen değişkenlerin kullanılması büyük bir hataya sebep olmayacaktır. Üçüncü ve dördüncü çerçevelerde birinci mod için kestirim yapılabilmektedir. Çerçevelerde oluşan ağır hasarlara rağmen birinci mod frekansları ilk döngü sonrası ile karşılaştırıldıklarında üçüncü çerçevede son döngü sonrası maksimum %27, dördüncü çerçevede ise üçüncü döngü sonrası maksimum %21 farka sahiptir. Bu durum dolgu duvarlı

sistemlerde sistemin dinamik değişken kestiriminde dürtü uyarılarının doğrudan kullanımında çekince yaratmıştır.

7.4 Mevcut Yapı Çalışmaları

Sistem tanılama tekniklerini tam boyutlu gerçek bir yapı üzerinde uygulamak amacı ile İYTE kampüsünde dört katlı bir betonarme bina olan Mimarlık A-blok seçilmiştir. Yapı 2005 Sığacık İzmir depremlerinde ağırlıklı olarak dolgu duvarlarının hasar görmesi sonucu güçlendirmeye tabii tutulmuştur. Güçlendirme öncesi büyük açıklıklara sahip ve esnek bir moment çerçevesi iken güçlendirme ile yapıya çok sayıda betonarme perde duvar eklenmiştir. Yapılan çalışma ile yerinde gerçek boyutlu bir yapının sistem tanılması yapılması için deney tasarımı, düzeneği, uygulaması ve sonuçların analizi konusunda tecrübe edinilmiştir.

Yapıdan veri alabilmek amacı Güralp marka veri kayıt sistemi kullanılmıştır. Sistem ile yapının her bir katına üçer adet tek yönlü ivmeölçer ve açık zemine bir adet üç yönlü ivmeölçer yerleştirilmiştir. Katlara yerleştirilen ivmeölçerler rijit kat döşemelerinin iki yatay yöndeki ötelenmesini ve dönmesini ölçebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Sistemde en yüksek kayıt hızı 200 veri/sn'dir.

Yapıdan güçlü rüzgar etkisi altında çevre gürültüsü, düşük büyüklükte bir deprem kaydı ve bir darbe çekici ile uyarılar verilerek dürtü uyarısı verileri alınmıştır. Ayrıca ETABs programı yardımıyla yapının sayısal bir modeli kurulmuştur. Yapılan ölçümlerin tamamı yapının her iki yönde de 5Hz civarında yanal modlara 12.5Hz civarında ise burulma moduna sahip olduğunu göstermiştir. Kurulan sayısal model ölçümleri doğrulamıştır.

Yapıdan alınan ölçümlerden rüzgar altındaki çevre gürültüsünde tek bir veri bloğunun işlenmesi yeterli cevap vermemiştir. Sistem hakim frekansları bir saat uzunluğundaki bir kaydın 7.5sn'lik bloklar halinde güç spektrumlarının hesaplanıp üst üste bindirilmesi yolu ile başarıyla elde edilmiştir. Düşük büyüklükteki deprem verileri de tek bir blok halinde işlendiğinde anlamlı cevaplar ortaya koymamış ancak eldeki sınırlı veri kayar bloklar halinde güç spektrumları hesaplanarak taoplendiğinde hakim frekans bölgelerinde yükselme elde edilmiştir. Mevcut deprem verileri kısa olmaları ve depremin farklı frekanslara farklı uyarılar vermesi sebebi ile başarılı sonuçlar vermemiştir. Dürtü uyarıları kayıt sistemindeki kartların birinin voltaj dalgalanmaları sebebi ile yanması sebebi ile beş kanal üzerinden yapılmıştır. Elde edilen veriler sistem hakim frekanslarının başarılı bir şekilde saptanmasına olanak vermiştir.

Yapılan çalışma gerçek bir yapının sistem değişkenlerinin kuvvetli rüzgar gibi çevresel bir gürültü verisi ile sayısal bir model eşliğinde başarı ile saptanabildiğini göstermiştir. Diğer taraftan düşük büyüklükteki deprem kayıtları sistem kestirimi için yeterli bilgiyi sağlamamıştır. Çevre gürültüsüne benzer şekilde dürtü çekici ile verilen uyarılardan elde edilen verilerinde sistem değişkenlerinin kestirilmesinde başarı ile uygulanabileceği saptanmıştır. Dürtü uyarıları çevre uyarılarından farklı şekilde tek bir veri bloğundan sistem değişkenlerini ortaya çıkarabilmektedir. Dürtü uyarıları ile ilgili olarak iki önemli detay saptanmıştır. Dürtü verilerinin süresinin kısalığı sebebi ile (tipik olarak 1 sn civarı) düşük kayıt hızlarında yapılan kayıtlardan elde edilen veriler kullanılarak üretilen frekans yanıt fonksiyonlarının çözünürlüğü düşük olmaktadır. Bu sebeple gerçek bir yapıda veri süresini uzatmanın zorluğu göz önüne alınarak yüksek hızda kayıt yapan (tipik bina yapıları için 2000 veri/sn) veri kayıt sistemleri seçilmelidir.

Çalışma kapsamında yapılan sistem kestirimi yapının mevcut durumunu tanımlamıştır. Gelecekte yapıda oluşacak temel bir değişiklik (kuvvetli bir deprem sonucu hasar, yapıda

kullanım amaçlı büyük değişiklik vb.) sonrasında veri alınması durumunda yapının değişiminin izlenmesine olanak sağlanmıştır. Elde edilen ilk üç frekansı kullanılarak yapının şartname tasarım depremi altındaki performansı saha verileri ışığında kontrol edilebilme olanağına ulaşmıştır.

7.5 Sonuçlar

Modal analiz inşaat mühendisliği yapılarının dinamik değişkenlerinin sahada saptanmasına olanak sağlayan bir yöntemdir. Tasarımı ve uygulaması doğru yapıldığı takdirde elde edilen sonuçlar yapıların dinamik değişkenlerini doğru olarak, inşaat mühendisliği genel kabülleri içinde, vermektedir. Söz konusu veriler sistemlerin davranışlarının tanımlanmasına, mevcut durum tespitine ve yapısal model düzeltme veya ilintilendirilme amaçlarına hizmet edebilecek geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir.

Proje kapsamında yapılan modal analiz algoritma çalışmaları, basit sistem ve betonarme çerçeve deneyleri ve mevcut yapı çalışmaları sonrasında İYTE İnşaat Mühendisliği proje ekibimiz modal deney tasarım, uygulama ve analiz konularında yetkin bir pozisyona gelmiştir.

Betonarme çerçeve deneyleri kapsamında moment çerçeveleri ve dolgu duvarlı moment çerçeveleri hakkında önemli verilere ulaşılmıştır. Özetlenecek olursa:

- Oluşan hasara rağmen çerçevelerden elde edilen verilerin her bir döngü grubu içinde doğrusal olarak modal analiz yöntemleri ile işlenebileceği ortaya çıkmıştır.
- Her iki tip çerçeveninde hakim frekanslarının artan hasar ile birlikte gittikçe azalan bir biçimde düştüğü gözlenmiştir.
- Moment çerçeveleri bütün hasar seviyeleri için birbirinden kayda değer şekilde farklılaşmayan modal şekillere sahiptir. Burada yapılan deneylerde moment çerçevelerinde oluşan hasarın özellikle ilk iki kata yoğunlaşmak ile beraber düzgün olarak yayıldığını belirtmekte fayda vardır.
- Dolgu duvarlı çerçevelerin hakim frekanslarının modal şekilleri ilk mod hariç moment çerçevelerine göre daha büyük değişiklik göstermiştir. İlk modun modal şeklinde çerçevede büyük hasarlar oluşmadan ciddi değişiklikler oluşmamıştır. Dördüncü çerçeve dördüncü döngüsünde ilk kat kolon kafalarında oluşan kesme hasarı sonrasında ilk modun modal şekli değişmiştir.
- Özellikle çek bırak verilerinden gözleendiği üzere sistemlerde hasar arttıkça hasar olmadan önceki modların modal şekillerine benzer şekillere ama farklı frekanslara sahip yeni modlar ortaya çıkmaktadır. Hasarsız durum modal şekillerine benzerlik aynı sayıda nod sayısına fakat farklı bir ötelenme dağılımına sahip olmak şeklinde açıklanabilir.
- Oluşan bütün hasar ve ortaya çıkan yeni modlara rağmen çerçevelerden elde edilen titreşim dalgaları yalnızca hasarsız durumda elde edilen orjinal modların hasarlı durum altındaki frekansları kullanılarak çatılması sonucu ana dalgayı izleme açısından başarı ile çatılabilmektedir.
- Dolgulu duvara sahip çerçevelerin davranışları ağırlıklı olarak dolgu duvarın davranışına bağlıdır. Dolgu duvar hasar gördükten sonra ötelenmeler ilk kata yoğunlaşmakta ve bu durum çerçevenin toplamda çok daha erken ötelenmelerde göçmesine sebep olmaktadır. Dolgu duvarların büyük yük kayıplarına uğramadan ötelenmelerinin sağlanabilmesi durumunda üst katlarında ötelenmeye katılması sağlanarak çerçevenin erken ötelenmelerde göçmesi engellenebilir.

Mevcut yapı çalışmaları sistem dinamik değişkenlerinin çok ucuz biçimde saha deneyleri ile elde edilebileceğini göstermiştir.

7.6 Öneriler

Yapılan çalışma dolgu duvarların betonarme çerçevelerin dinamik davranışında büyük değişikliklere sebep olduğunu göstermiştir. Gerçek bir yapıda her açıklığın dolgu duvarlar ile doldurulmayacağı gerçeği söz konusu etkinin duvar miktarı belirli bir eşiği aştıktan sonra etkinlik göstereceğini işaret etmektedir. Bu kritik eşiğin dolgu duvar miktarı ve yapı içindeki dağılımı konusunda çalışılması gereklidir.

Dolgu duvarlı sistemlerde hasarla birlikte ötelenme ilk katlara odaklanmakta ve bu katları göçmesine sebep olmaktadır. Dolgu duvarların dinamik davranışı iyileştirici etkilerini kaybetmeden ötelenmeyi diğer katlara yaymanın yollarını bulmak gereklidir.

Dolgu duvarlar içini doldurduklar çeperde ağır hasarlara sebep olmakta ve bütün sistemin ihtiyaç duyulandan daha önce göçmesine sebep olmaktadırlar. Çerçeve çeperinin maruz kaldığı hasarı azaltmanın teknikleri geliştirilmelidir.

Bir yapının depremi başarılı şekilde geçirebilmesi için depremin yapı periyodundan talep ettiği ötelenme miktarını sağlayabilmesi gerekmektedir. Dolgu duvarlar sistemlerin aynı zamanda hem periyotlarını kısaltmakta hemde ötelenme miktarlarını düşürmektedir. Oluşan bu değişikliklerin deprem talepleri ile ne şekilde örtüştüğünün çalışılması dolgu duvarlı çerçeve davranışını tanımlama konusunda çok faydalı olacaktır.

Bu projede incelenen sistemler doğrusal modal analiz yöntemleriyle başarılı bir şekilde modellenmiş ve tanılanmıştır. Ancak hasarlı yapılara büyük enerjili girdi sinyalleri uygulanması durumunda, doğrusal olmayan sistem davranışı ihmal edilemeyecek düzeylere ulaşabilir. Bu durumda sistem tanılanmasında Fourier analizi ile belirlenen tepe noktalarına çakıştırılan sönümlenen sinüzoidlerin zamanda pencerenmesi ile daha iyi bir çakıştırma sağlanabilir. Böyle bir yöntemin teorik dayanağının ve mevcut doğrusal olmayan sistem tanılama yöntemleriyle ilişkisinin araştırılması bu alana katkı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

AKTAN E., Farhey D. N., Helmicki A. J., Brown D. L., Hunt V. J., Lee K., Levi A., "Structural Identification for Condition Assessment", *Journal of Structural Engineering*, v 123, n 12, Dec., pp: 1674-1684, (1997)

ALLEMANG R. J., *Vibrations II: Analytical and Experimental Modal Analysis*, UC-SDRL-CN-20-263-662, University of Cincinnati, (1999)

ALLEMANG R. J., *Vibrations III: Experimental Modal Analysis*, UC-SDRL-CN-20-263-663/664, University of Cincinnati, (1999)

ALTIN S, Anıl Ö, Kara M. E., Kara M., An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips, *Composites: Part B*, 39 pp:680–693, (2008)

BARAN M., Duvarcı M., Tankut T., Ersoy U. ve Özcebe G., Occupant Friendly Seismic Retrofit (OFR) of RC Buildings, *Proceedings of the NATO Science for Peace Workshop*, İzmir, Turkey, Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-1624-7, Mayıs, (2003)

CHOPRA A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, ISBN 0 13 855214-2, (1995)

CLOUGH R. W., Penzien J., *Dynamics of Structures*, McGraw Hill, 2nd Edition, ISBN 0 07 113241 4, (1993)

CRAIG R. R., *Structural Dynamics*, Wiley, ISBN 0 471 87715 8, (1981)

ÇATBAŞ F. N., Aktan, A. E. , "Condition and damage assessment: Issues and some promising indices", *Journal of Structural Engineering*, v 128, n 8, August, pp: 1026-1036, (2002)

ÇATBAŞ F. N., Brown D. L., Aktan A. E., "Parameter estimation for multiple-input multiple-output modal analysis of large structures ", *Journal of Structural Engineering*, v 130, n 8, pp: 921-929, (2004)

DOLSEK M., Fajfar F., The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame—a deterministic assessment, *Engineering Structures*, 30 pp:1991–2001, (2008)

EERI, Erzincan, Turkey, Earthquake of March 1992. Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, Issue S1, Chapter 5, (1993)

EERI, Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999. Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Vol. 16, Issue S1, Chapter 11, (2000)

EERI (WEB), *World Housing Encyclopedia Report*, Report #:64, Country: TURKEY, http://www.world-housing.net/Report_Selection/list.asp?varCountry=Turkey#ReportsList

ERDEM İ., Akyüz U., Ersoy U., Özcebe G., An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames, *Engineering Structures*, 28 pp:1843–1851, (2006)

ERDOĞAN T.Y., *Beton*, ODTÜ Yayıncılık, ISBN 975-7064-67-X, (2007)

ETABS, Structural Analysis Software, *Computers and Structures*, (2004)

EWINS D.J., *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., 2nd Edition, ISBN 0-86380-218-4, (2000)

FLAUDUNG W., Rost R., Application and Correction of the Exponential Window for Frequency Response Functions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(1), pp: 23-26, (1997)

GRIFFITH M., *Seismic Retrofit of RC Frame Buildings with Masonry Infill Walls: Literature Review and Preliminary Case Study*, JRC Scientific and Technical Reports, EUR23289, (2008)

HAJJ M.R., Fung J., Fahey S.O'F., Damping Identification Using Perturbation Techniques and Higher-Order Spectra, *Nonlinear Dynamics*, 23, pp: 189–203, (2000)

HASHEMI A., Mosalam K.M. Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall, *Earthq Eng Struct Dyn*, 35, pp:1827–1852, (2006)

HE J., Fu, Z.F., *Modal Analysis*, Butterworth/Heinemann, ISBN 0 7506 5079 6, (2001)

JUANG J.N., Papa R.S., An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *J. Guidance, Control and Dynamics*, V.8, No. 5, pp 620-627, (1985)

JUANG J.N., Cooper J. E., Wright J. R., An eigensystem realization algorithm using data correlations (ERA/DC) for modal parameter identification, *Control Theory and Advanced Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 5-14, (1988)

KERSCHEN G., Peeters M., Golinval J.C., Vakakis A.F., Nonlinear normal modes, Part I: A useful framework for the structural dynamicist, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, pp: 170-194, (2009)

KÖSE M.M., Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls. *Engineering Structures*, 31 pp:93-102, (2009)

LABVIEW 8.0, Data Acquisition and Experiment Design Software, *National Instruments* (2005)

LU H., Betti R., Longman R. W., Identification of linear structural systems using earthquake-induced vibration data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V. 28, pp. 1449-1467, (1999)

MARPLE S. L., *Digital Spectral Analysis*, Prentice Hall, (1988)

MATLAB, High-performance language for technical computing, *The Mathworks*, (2007)

MOHAMMADI M., Akrami V., An engineered infilled frame: Behavior and calibration, *Journal of Constructional Steel Research*, 66 pp:842-849, (2010)

MEIROVITCH L., *Analytical Methods in Vibrations*, Macmillan, ISBN 0 02 380104 9, (1967)

OLIVERIA C. S., Navarro M., Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques, *Bull Earthquake Eng*, 8, pp:609–642, (2010)

- ÖZCEBE G., Tankut T., Ersoy U., Erduran E., Keskin O. R. S., Mertol H. C., Strengthening of Brick-Infilled RC Frames with CFRP, Report No:2003/1, SERU, TUBITAK-METU, (2003)
- PERERA R., Performance evaluation of masonry-infilled RC frames under cyclic loading based on damage mechanics, *Engineering Structures*, 27 pp:1278–1288, (2005)
- PUJOL S, Fick D. The test of a full-scale three-story RC structure with masonry infill walls. *Engineering Structures*, doi:10.1016/j.engstruct.2010.05.030, (2010)
- ROBERTS J.B., Vasta M., Parametric identification of systems with non-Gaussian excitation using measured response spectra, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 15, pp: 59-71 (2000)
- ROSENBERG R.M., On nonlinear vibrations of systems with many degrees of freedom, *Advances in Applied Mechanics*, 9, pp: 155-242, (1966)
- SAP2000, Structural Analysis Software, *Computers and Structures*, (2004)
- SCHARF L.L., *Statistical Signal Processing*, Addison Wesley, (1991)
- SCHETZEN M., *The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems*, Reprint Edition, R.E. Krieger Publishing Company, 1989.
- SEZEN H., Moehle P., Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns, *ASCE Journal of Str. Eng.*, Vol. 130, No.11, November 1, pp:1692-1703, (2004)
- SHAW S.W., Pierre C., Normal modes for non-linear vibratory systems, *Journal of Sound and Vibration*, 164, pp: 85-124, (1993)
- TDY, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, pp:154-159, (2007)
- TS500, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, (2000)
- TUMİLİAN J.G., Bartolome A.S., Nanni A., Strengthening of URM Infill Walls by FRP Structural Repointing, *North American Masonry Conference*, Clemson, South Carolina, pp:1064-1075, (2003)
- UC-SDRL, University of Cincinnati Structural Dynamics Research Laboratory, http://www.sdrl.uc.edu/sdrl_jscript_homepage.html
- X-MODAL, Modal Analysis Software, *University of Cincinnati Str. Dyn. Lab.*, (2007)
- VAKASİS A.F., Non-linear normal modes and their applications in vibration theory: an overview, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11, pp:3-22, (1997)
- ZARNIC R., Gostic S., Crewe A.J., Taylor C.A., Shaking Table Tests of 1:4 Reduced-Scale Models of Masonry Infilled Concrete Frame Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, pp: 819-834, (2001)
- ZONTA D., Elgamal A, Fraser M., Priestley M.J.N., Analysis of Change in Dynamic Properties of Frame-Resistant Test Building, *Engineering Structures*, 30, pp: 183-196, (2008)
- ZEMBATY Z., Kowalski M., Pospisil S., Dynamic Identification of a Reinforced Concrete Frame in Progressive States of Damage, *Engineering Structures*, 28, pp: 668-681, (2006)

EK A: Modal Analiz Yöntemlerinin Yazılımları

Yazılım 1. EKÜK Yazılımı

%EKÜK-TGÇÇ (Ing. LSCE-SIMO)

*%Seviyesi (Ing. rank)bilinen bir sistemin modal degiskenlerinin kestirimi
%Bu algoritmada sistemi tanımlayan polinomun köklerini kestirebilmek için...
% gerekenden fazla sayıda veri kullanılarak en küçük kareler kestirimi yapmaktadır.
%Sistem sentetik olarak önceden bilinen kökler ve kalıntılar(Ing. residues)
% yardimiyla tanımlanmıştır.
%Asagida tanımlanan algoritma tanımlanan sistemin durtu yanıt fonksiyonunu...
% kullanarak sistemin kok ve kalıntılarını ve bu sayede de dogal frekans...
% sonum ve modal vektorlerini bulmaktadır.*

%%
% Hazirlayan: Yrd. Doc. Dr. Cemalettin DÖNMEZ
% Yrd. Doc. Dr. Serdar ÖZEN
% 15 Şubat 2007
%%

clear all

%%
%2 SERBESTLIK DERECELİ SİSTEMİN TANIMI

counter=2
w1=25; %frekans, rad/sec
w2=40;
d1=0.01; %sonum faktorleri
d2=0.02;

s1=-d1*w1+j*sqrt(1-d1^2)*w1; %Tanımlanan kokler
s2=-d2*w2+j*sqrt(1-d2^2)*w2;
s1, s2

Dt=0.005;
t=0:Dt:25;
Fs=1/Dt;

% Sistemin tanımlanan durtu yanıtı fonksiyonları
hinp(:,1)=exp(s1*t)+exp(s1'*t)+0.25*exp(s2*t)+0.25*exp(s2'*t);
hinp(:,2)=0.75*exp(s1*t)+0.75*exp(s1'*t)-0.25*exp(s2*t)-0.25*exp(s2'*t);
%%

Nfft =2048 ;
w=1:Nfft;
w=Fs*[0:(Nfft/2)]/Nfft;
Fy=fft(hinp(1:Nfft,1),Nfft);

%%
% EKÜK TGÇÇ

overdetermine_factor = 30; %Kullanilacak veri sayisinin tanimi

r_o = 10; %Bagil konum
L = 4; %Hankel Matrisini olusturmak icin tanımlanması gereken sistem...
% boyutu -eslenikleri ile beraber sistemin modlarının sayısı: Mod sayısı*2

% TGÇÇ seklinde Hankel Matrisinin olusturulması
ii=0;

for ii=(r_o+1):(r_o+L+1)

```

    Y_rough(:,(ii-r_o))=hinp(ii:ii+L*overdetermine_factor-1,1);
end
Y=Y_rough(:,1:L);
h=Y_rough(:,L+1);

ii=0; mm=0;
for mm=2:counter
    for ii=(r_o+1):(r_o+L+1)
        Y_rough(:,(ii-r_o),mm)=hinp(ii:ii+L*overdetermine_factor-1,mm);
    end
    Y=[Y; Y_rough(:,1:L,mm)]; %Sistemin Hankel Matrisi
    h=[h; Y_rough(:,L+1,mm)];
end

beta_vec = inv(Y*Y)*Y*h; %Polinomun katsayilarinin elde edilmesi
roots_poly = roots(flipud([beta_vec ; -1])); %Polinomun kokleri

%Sistemin frekanslari siraya dizilmeden once
w = Fs*(sqrt(log(roots_poly).*log(conj(roots_poly))));
[YY,II]=sort(abs(w));
ii=0;
for ii=1:L
    nn(ii,1)=roots_poly(II(ii));
    nm(ii,1)=w(II(ii));
end
roots_poly=nn;
w = nm;% Sistemin sonumsuz frekanslari siraya dizilmis halde
Frekanslar=w'
s_ROOTS=log(roots_poly)./Dt;
ksi = -real(s_ROOTS)./w; % Sistemdeki sonum oranlari
SonumOranlari=ksi

for kk=1:L
    %Sistemin kokleri
    s(kk,1)=-ksi(kk)*w(kk)-(-1)^kk*sqrt(1-ksi(kk)^2)*w(kk);
end

%Kalintilarin hesaplanmasi
nn=0;
for nn=1:counter

    Rt=((r_o):(r_o-1+L*overdetermine_factor)).*Dt;
    Rh=hinp((r_o+1):(r_o+L*overdetermine_factor),nn);
    kk=0; mm=0;
    for mm=1:L
        for kk=1:(L*overdetermine_factor)
            Rz(kk,mm)=exp(s(mm,1)*Rt(kk));
        end
    end

    Residue=inv(Rz'*Rz)*Rz'*Rh;
    Res(:,nn)=Residue;
end
ModalSekilBuyuk=abs(Res) % Kalintilarin buyuklukleri
ModalSekilFaz=angle(Res)*360/2/pi % Kalintilarin fazlari

```

Yazılım 2. ÖGA Yazılımı

%ÖGA-TGÇÇ (Ing. ERA-SIMO)

*%Bu algoritmada sistemi tanımlayan polinomun köklerini kestirebilmek için
% Özdeğer gerçekleştirme algoritması kullanılmaktadır.
%Sistem sentetik olarak önceden bilinen kökler ve kalıntılar(Ing. residues)
% yardımıyla tanımlanmıştır.
%Asagıda tanımlanan algoritma tanımlanan sistemin durtu yanıtı fonksiyonunu...
% kullanarak sistemin kok ve kalıntılarını ve bu sayede de dogal frekans...
% sonum ve modal vektorlerini bulmaktadır.*

*%%
% Hazırlayan: Yrd. Doc. Dr. Mustafa A. Altinkaya
% 10 Şubat 2007
%%*

```
clear all
load sentetik.txt %Sentetik veriler disaridan aliniyor.
                %w1=25 rad/sec, w2=40rad/sec
                %damp1=0.01, damp2=0.02
                %MOdVec1'=(1 0.75), MOdVec2'=(0.25,-0.25)
data=sentetik; deltat=0.005;
```

```
[N,nout]=size(data)
len = floor(N/35);
datat=data';
for i=1:floor(N/len) %Hankel Matrisinin kurulmasi
H0((i-1)*nout+1:i*nout,1:len-1)=datat(1:nout,(i-1)*len+1:i*len-1);
H1((i-1)*nout+1:i*nout,1:len-1)=datat(1:nout,(i-1)*len+2:i*len-0);
end
```

```
dimH=size(H0)
[P,D,Q]=svd(H0,'econ'); %Ozdeger Kestirimi
size2=size(D);
dimP=size(P);
dimQ=size(Q);
invrootD=D^(-0.5);
for i=1:size2(2)
    if(D(1,1)>(D(i,i)*100)) invrootD(i,i)=0; end
end
```

```
invrootD*ones(size2(2),1);
A=invrootD * P' * H1 * Q * invrootD;
[V, LAMBDA] = eig (A);
size3=size (LAMBDA);
LAMBDAv = LAMBDA * ones(size3(2),1);
Sv=(log(LAMBDAv))/deltat;
Lv=abs(log(LAMBDAv))/deltat;
Frekanslar=Lv(1:4)
zeta=-real(Sv(1:4))./Lv(1:4);
SonumOran=zeta
dimP=size(P);
dimV=size(V);
Ept=zeros(nout,dimH(1));Ept(1:nout,1:nout)=eye(nout);
rootD=(D^(0.5));
```

```
% Modal Sekillerin Bulunmasi
shape=Ept*P*rootD*V;
```

```

shape(1:nout,1:4);
shapen(2,:)=shape(2,:)./shape(1,:);
shapen(1,:)=1;
ModalSekilBuyuk=abs(shapen(1:nout,1:4))
ModalSekilFaz=angle(shapen(1:nout,1:4))/2/pi*360

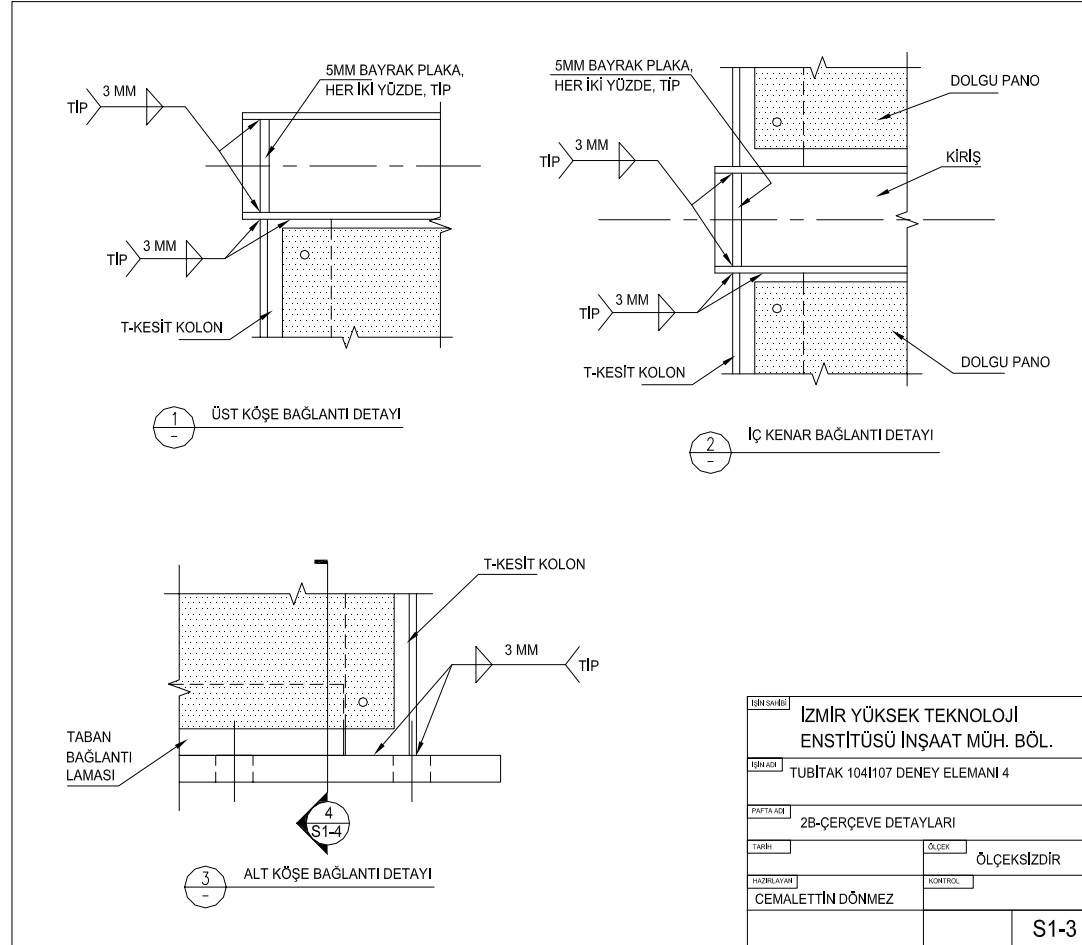
% Baslangic Degerlerinin Bulunmasi
invV=V^(-1);
Em=zeros(dimH(2),nout);Em(1:dimH(2),1:dimH(2))=eye(dimH(2));
initial=invV*rootD*Q*Em;
initialt=abs(initial(1:4,:));

% Ilk 4 ozdeger kullanilarak Juang'in anlattigi sekilde rekonstruksiyon yapilmasi
modefactor=eye(4); %Ilk dort kok kullaniliyor
for i=1:N
modefactor=LAMBDA(1:4,1:4)*modefactor;
recon(1:nout,i)=shape(:,1:4)*modefactor*initial(1:4,1);
end
save recon.txt recon

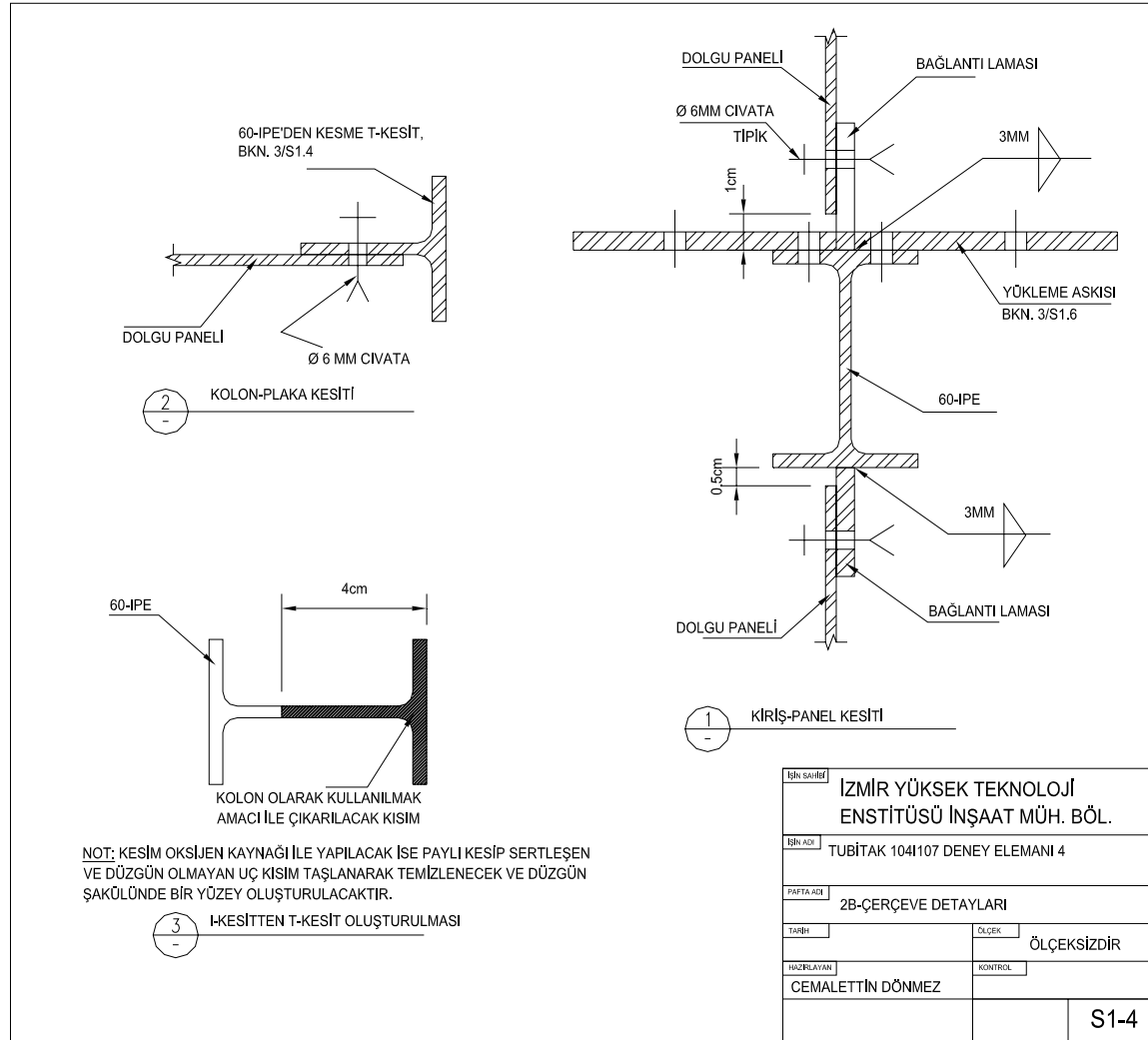
```

EK B: İmalat Detayarı

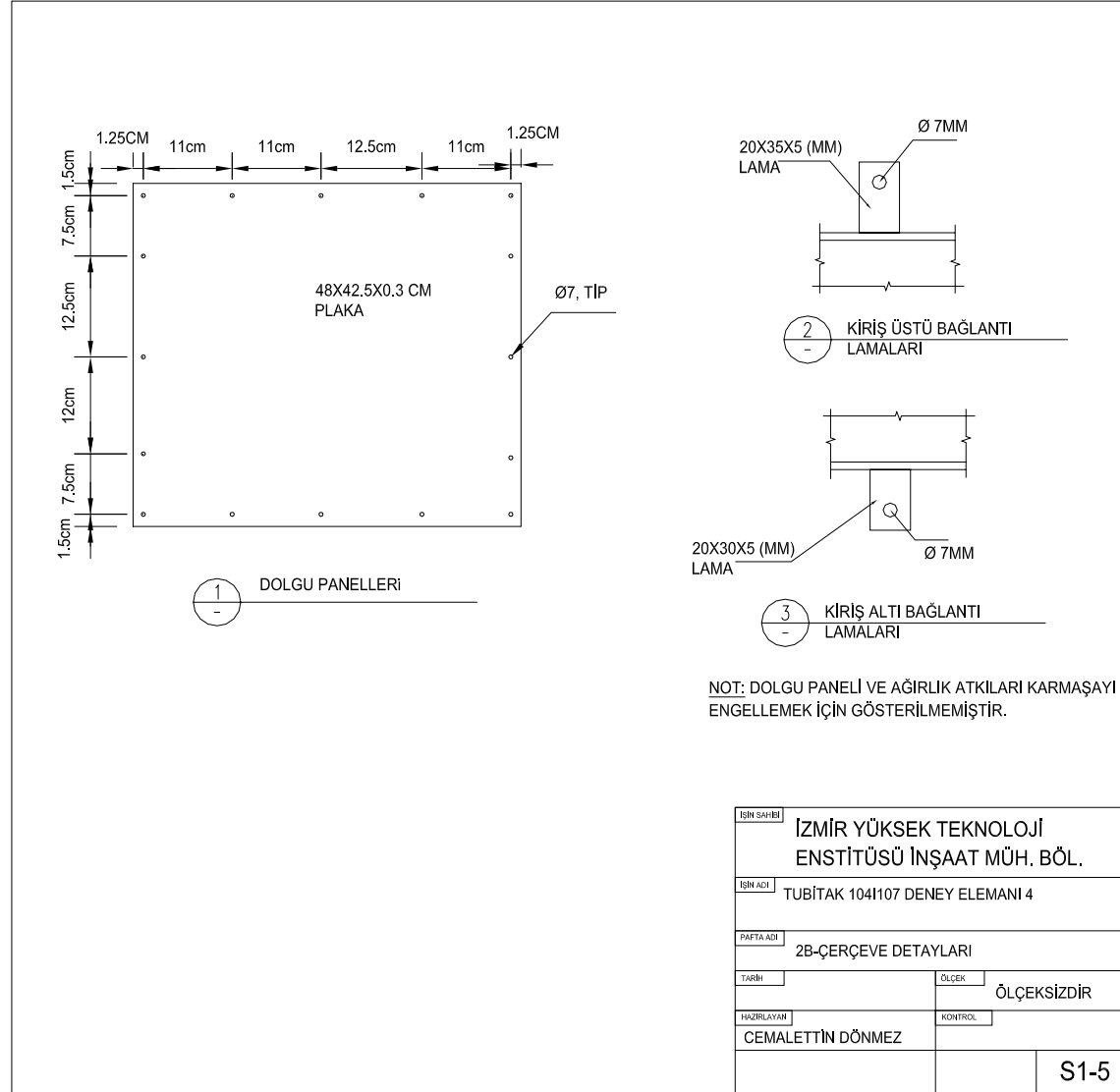
B.1 Düzlem Çerçeve (İmalat detaylarının ilk çizimi Şekil 3.32'de verilmiştir.)



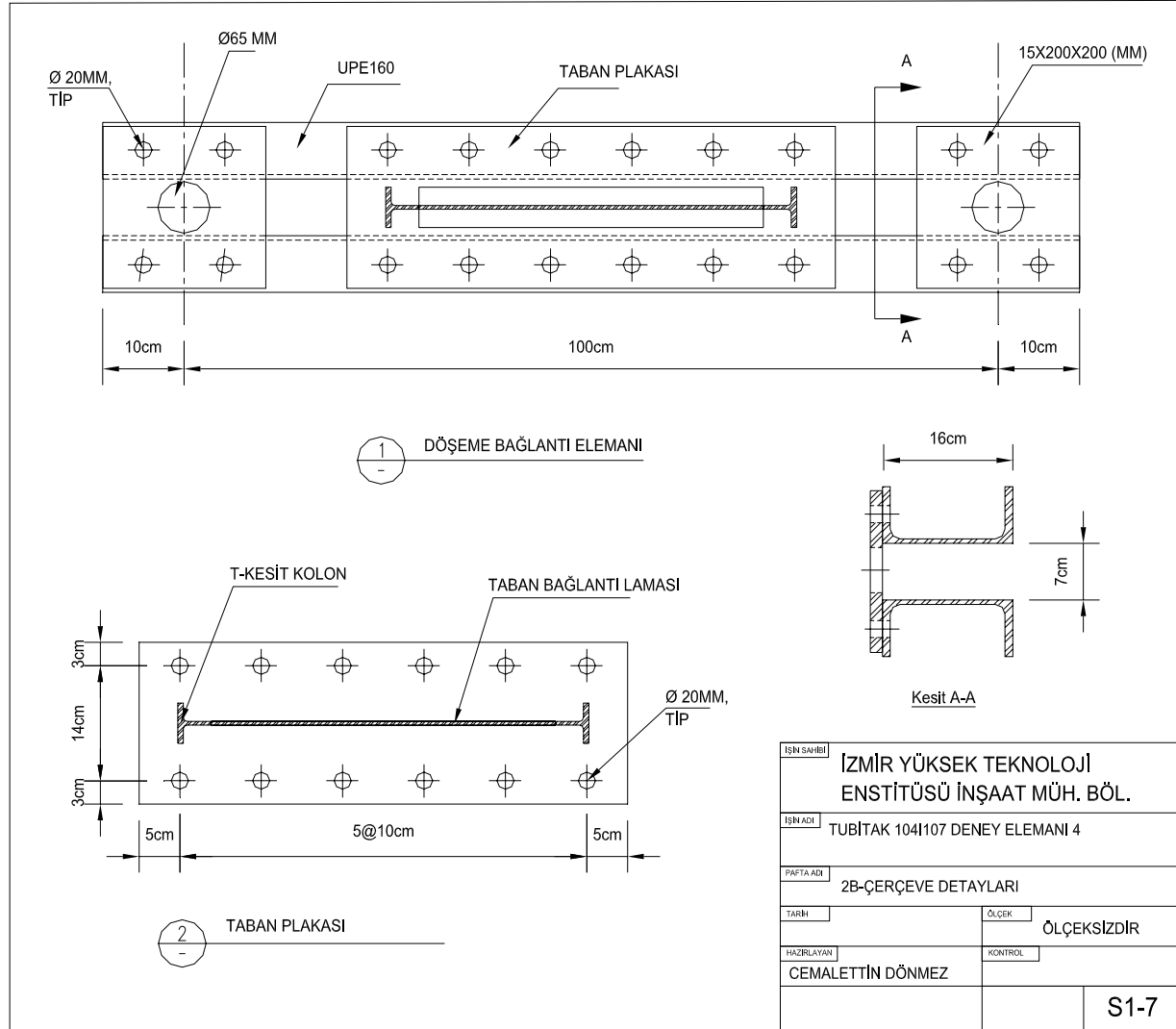
Şekil B.1 Düzlem çerçeve detayları



Şekil B.2 Düzlem çerçeve detayları (İhtiyaç duyulan buyutta I-kesitler bulunamadığından kolonlar ve kirişler 4mm kalınlığında plakalardan imal edilmiştir.)

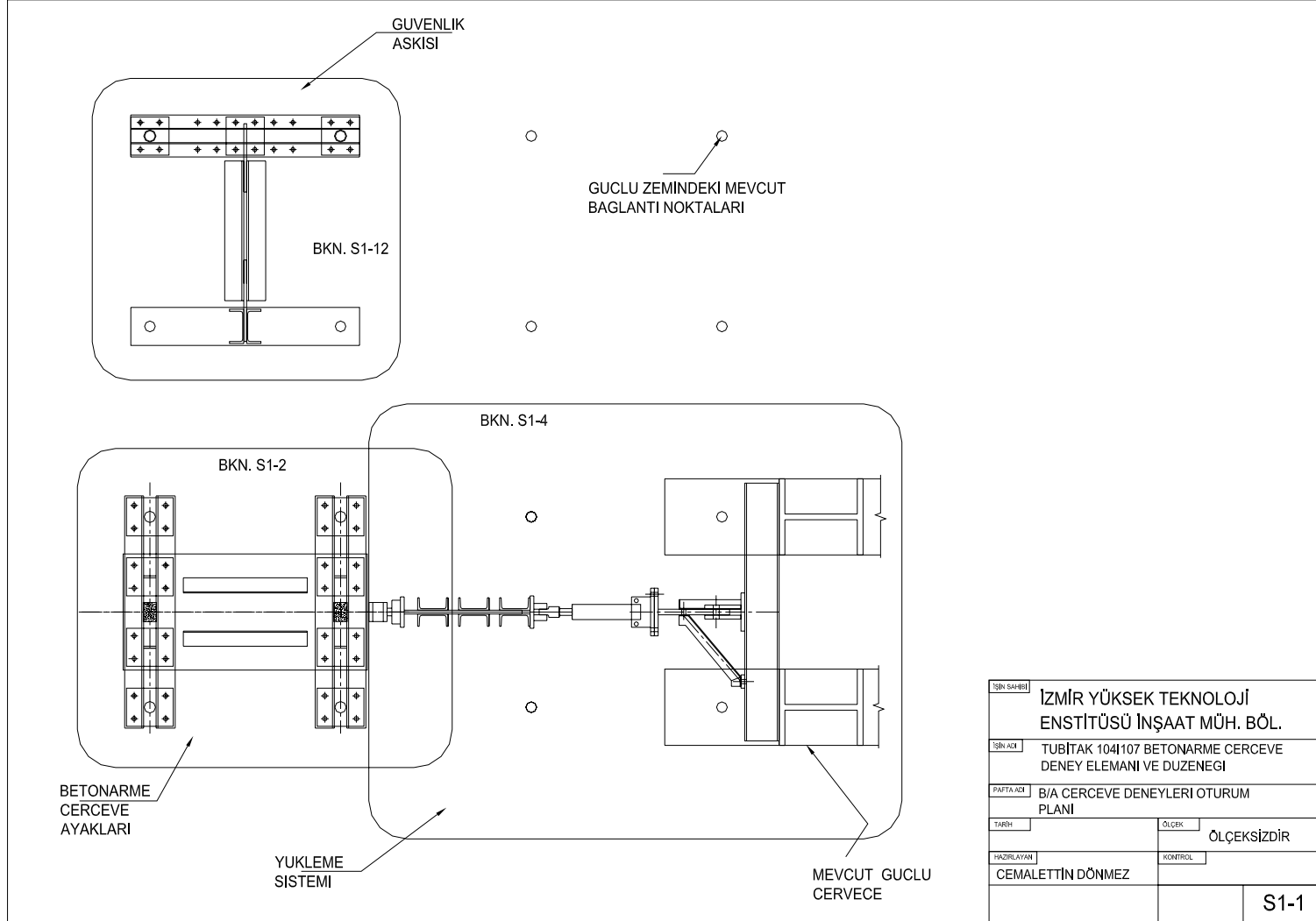


Şekil B.3 Dolgu paneller ve bağlantı detayları

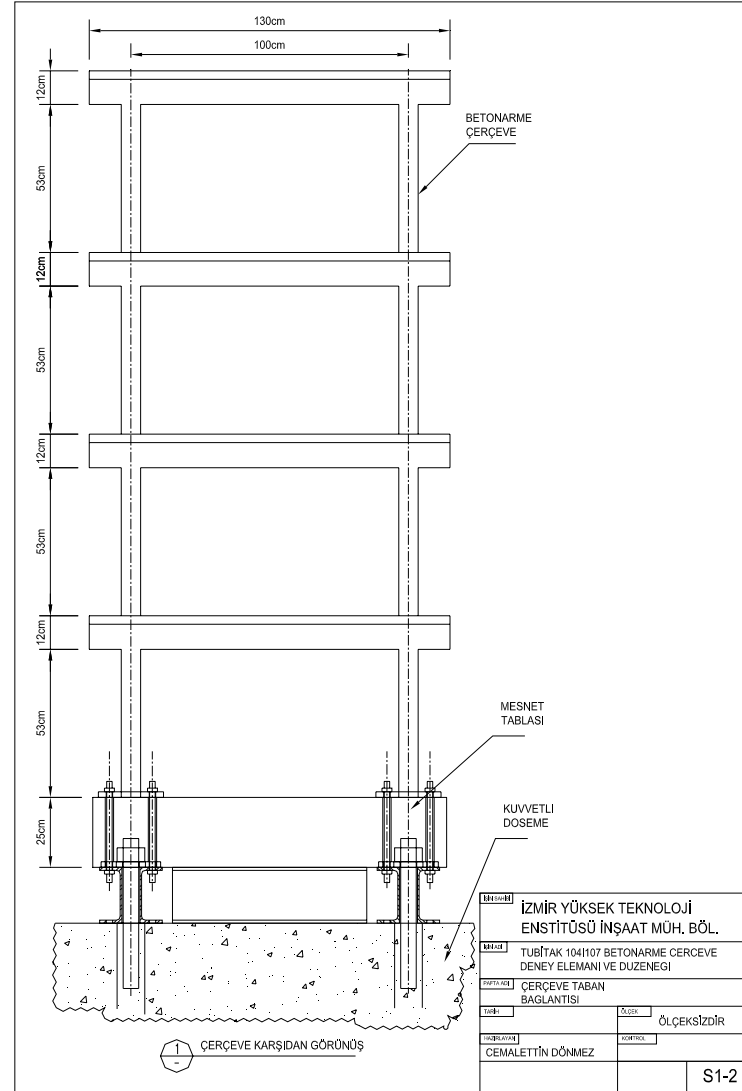


Şekil B.4 Dolgu çerçeve taban mesnet detayları

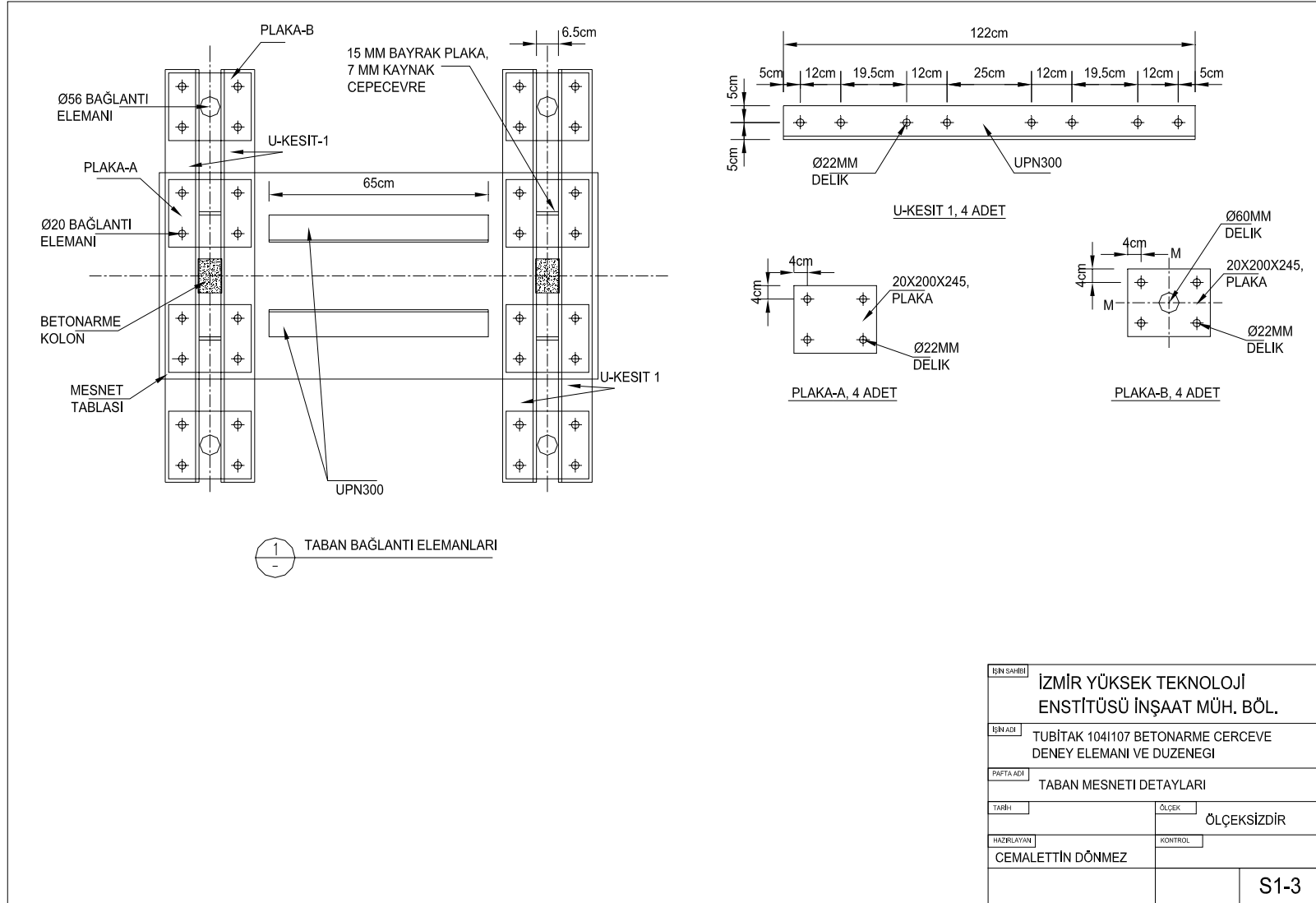
B.2 Betonarme Çerçeve Yükleme ve Askı Sistemleri



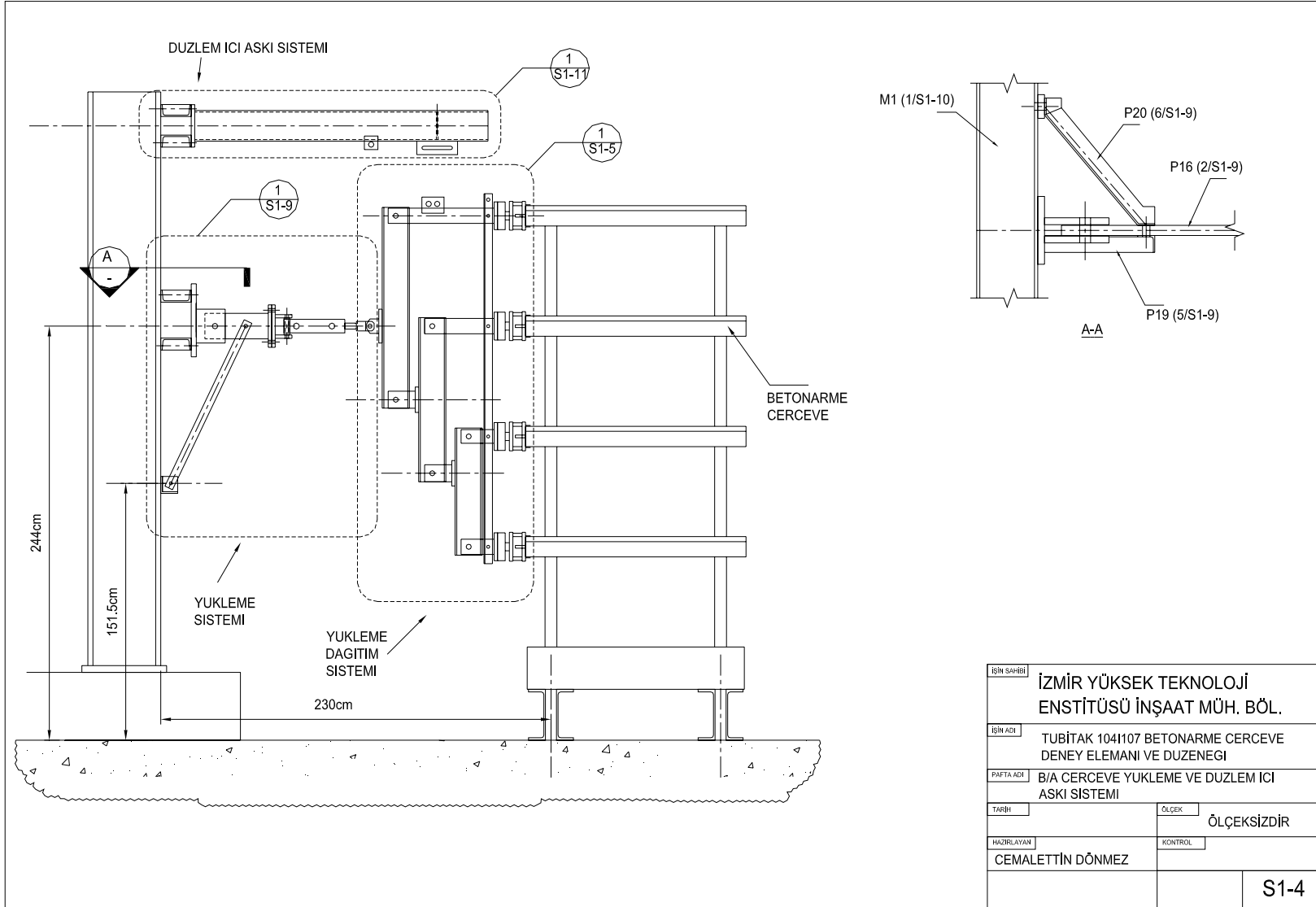
Şekil B.5 Betonarme çerçeve planda yerleşim



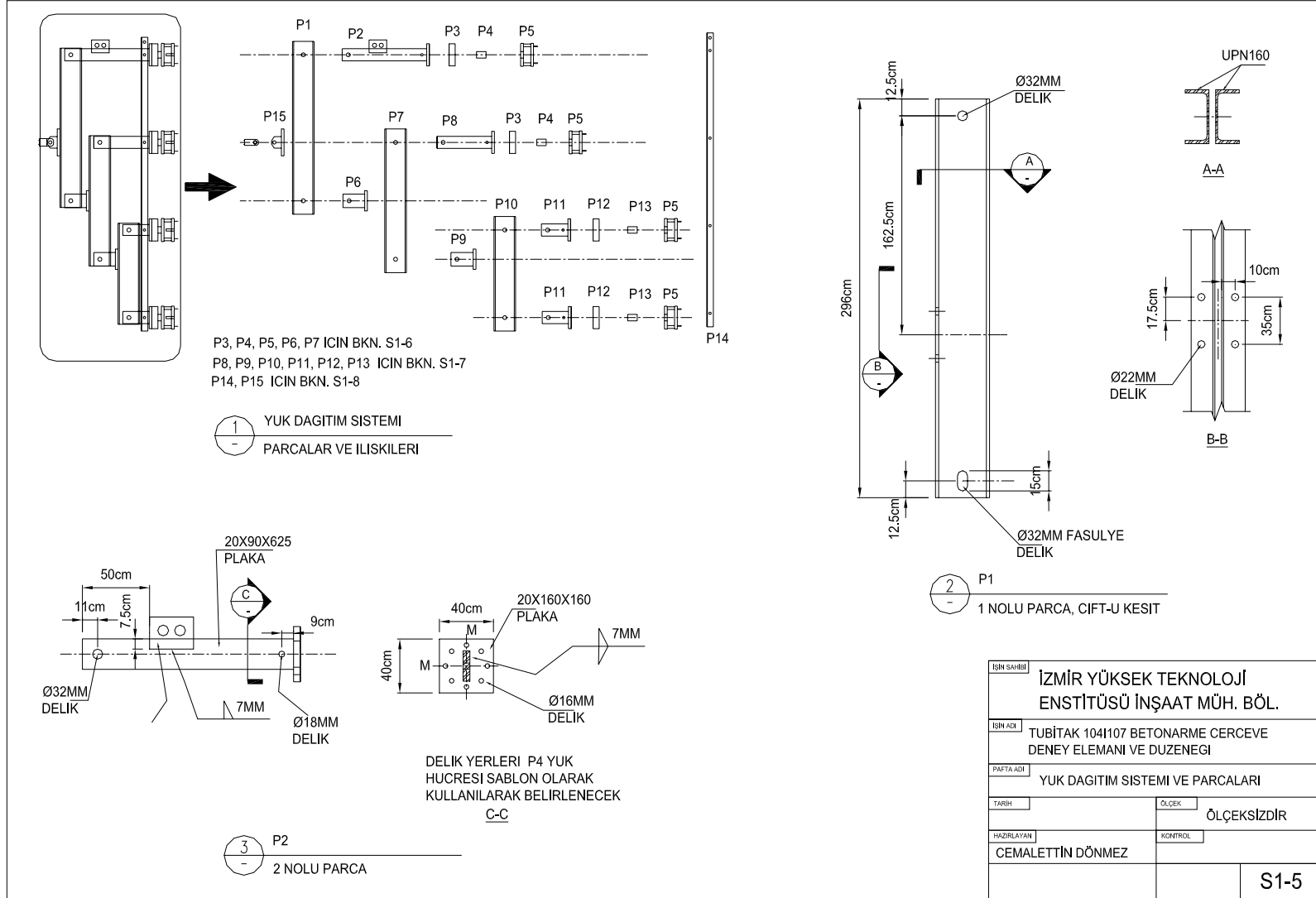
Şekil B.6 Betonarme çerçeve boyutları ve taban bağlantısı



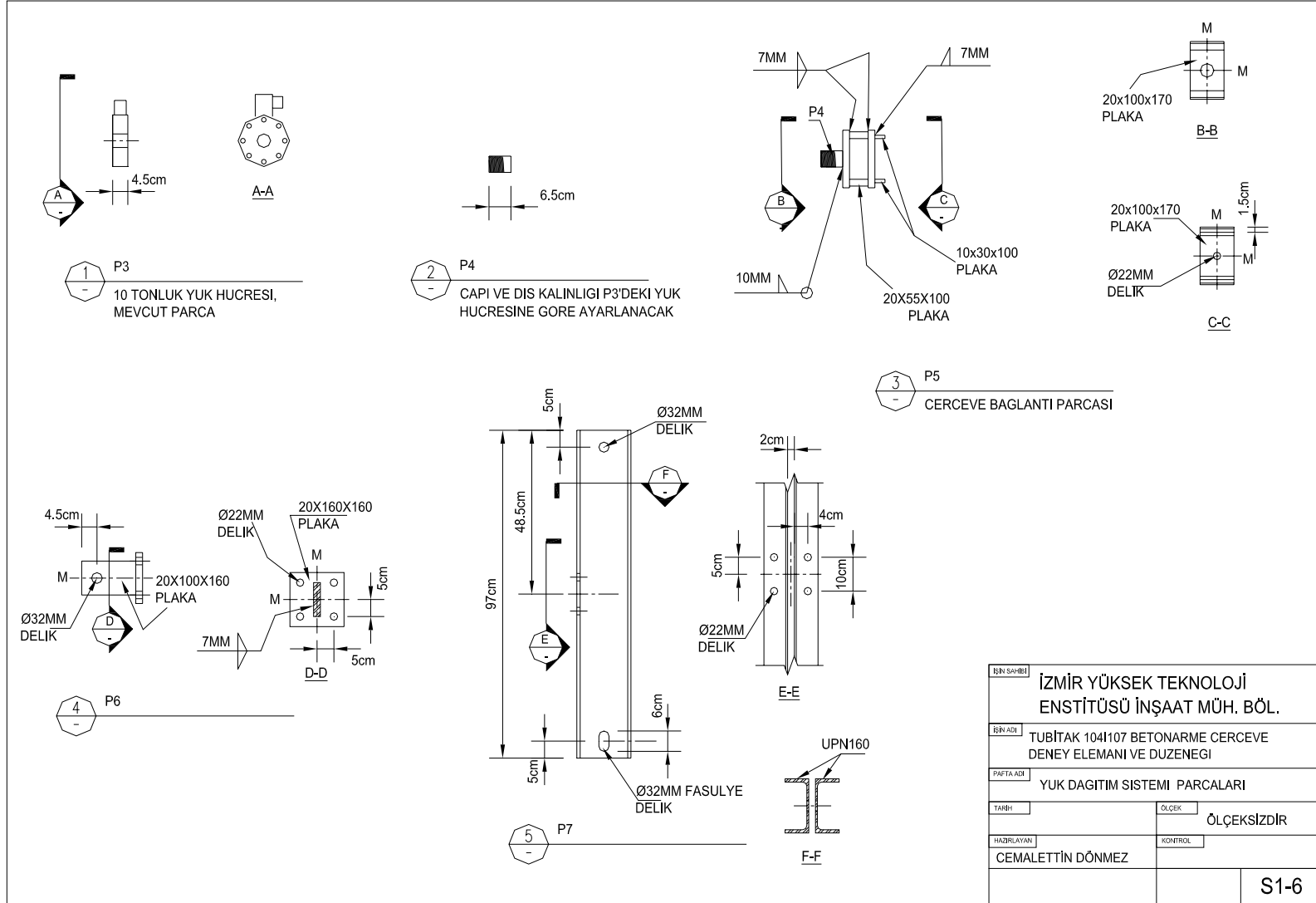
Şekil B.7 Betonarme çerçeve taban mesnet detayları



Şekil B.8 Betonarme çerçeve yükleme düzlem içi askı sistemleri

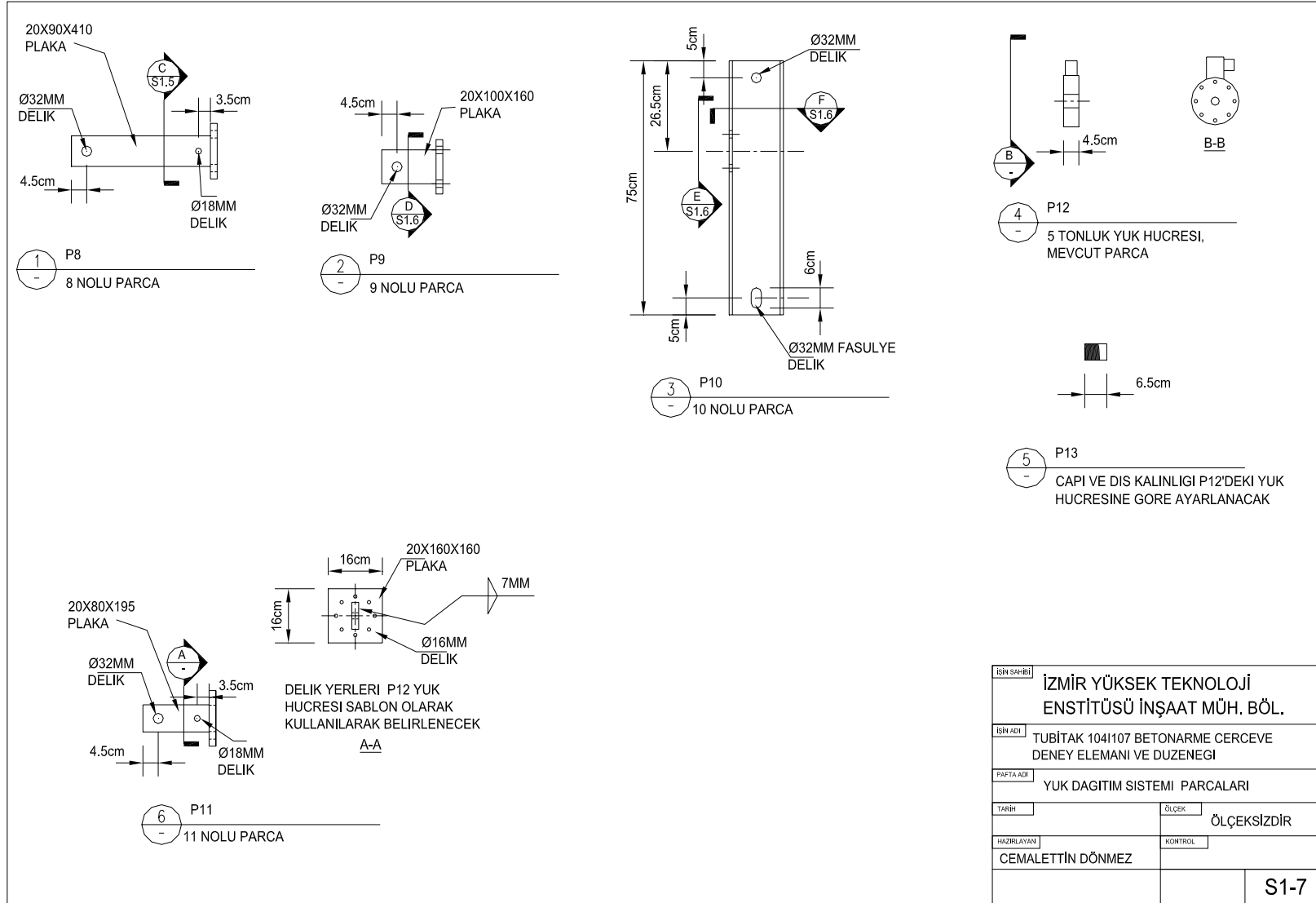


Şekil B.9 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi ve parçaları

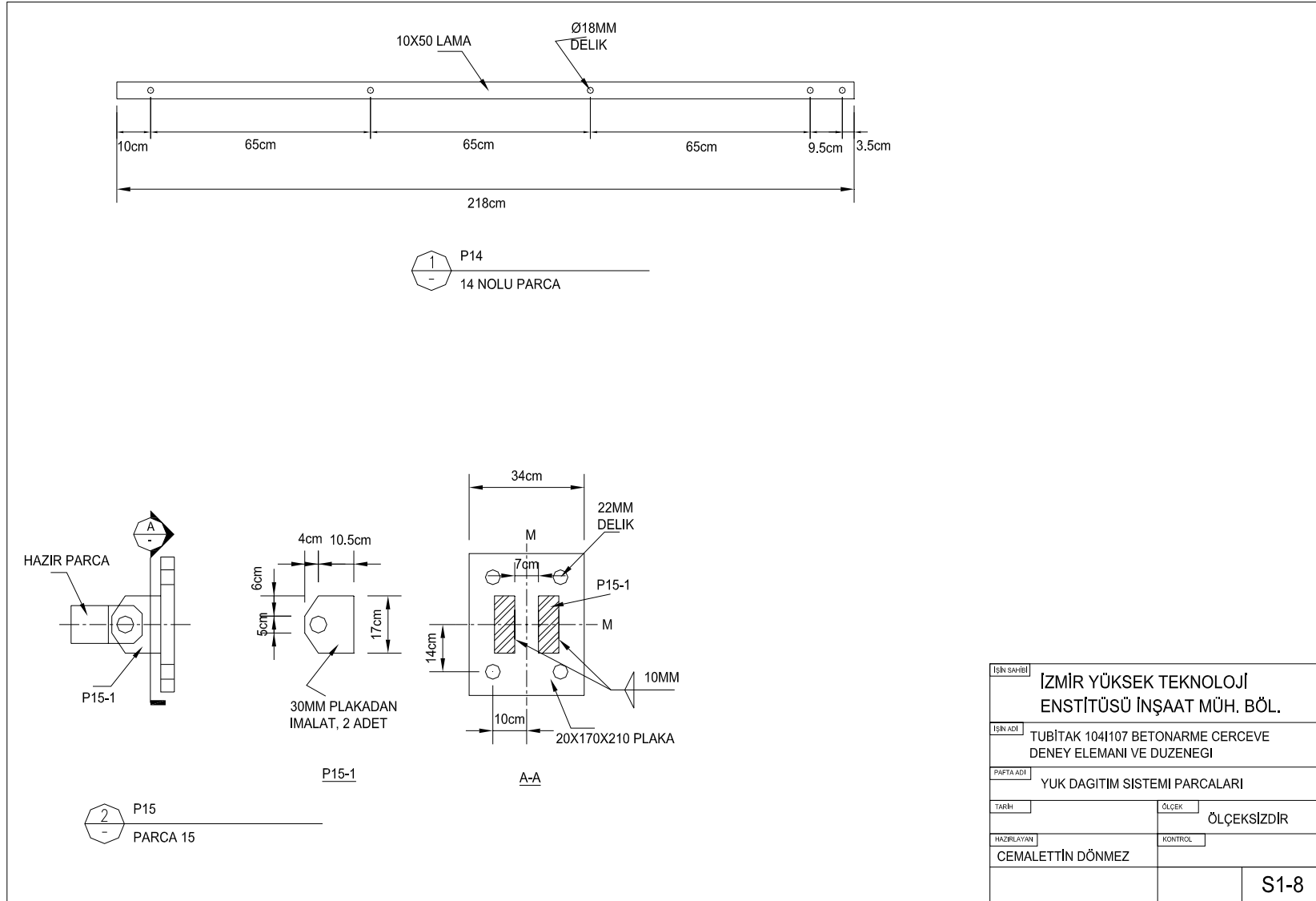


İSİN SAHİBİ	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ İNŞAAT MÜH. BÖL.	
İSİN ADI	TUBİTAK 1041107 BETONARME CERÇEVE DENEY ELEMANI VE DÜZENEGİ	
PARÇA ADI	YÜK DAĞITIM SİSTEMİ PARÇALARI	
TARİH	ÖLÇEK	ÖLÇEKSİZDİR
HAZIRLAYAN	KONTROL	
CEMALETTİN DÖNMEZ		
		S1-6

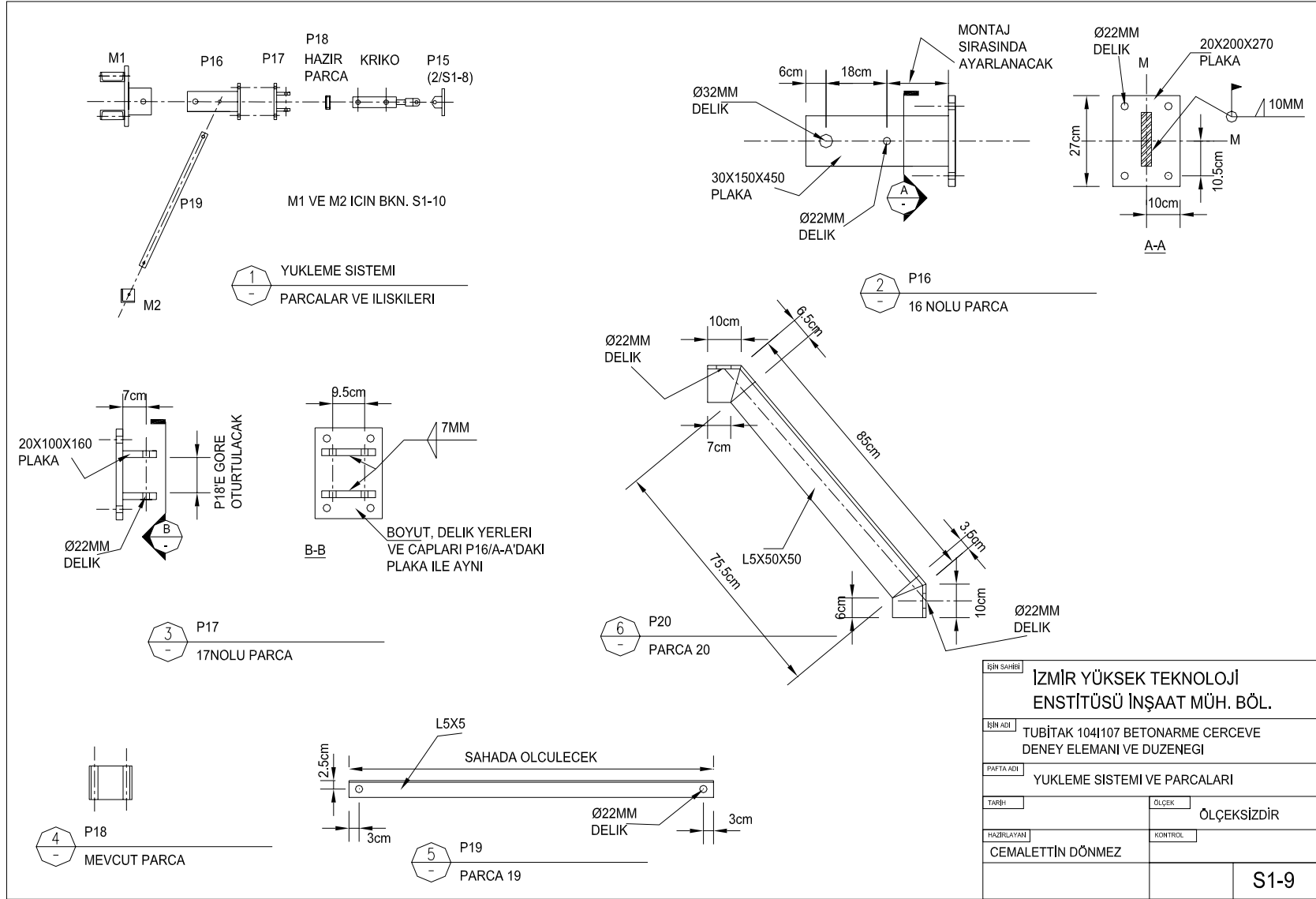
Şekil B.10 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi parçaları



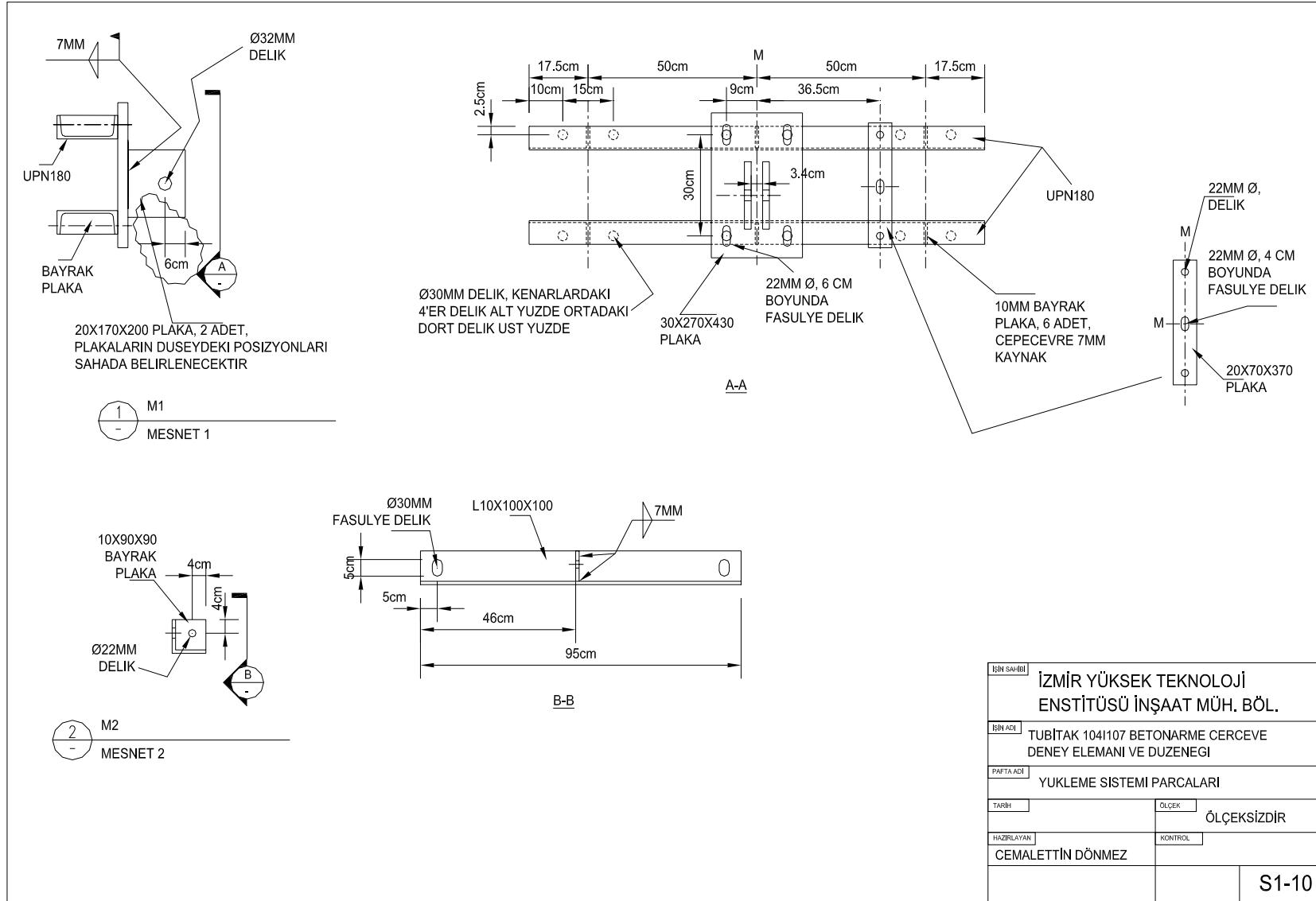
Şekil B.11 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi parçaları (devam)



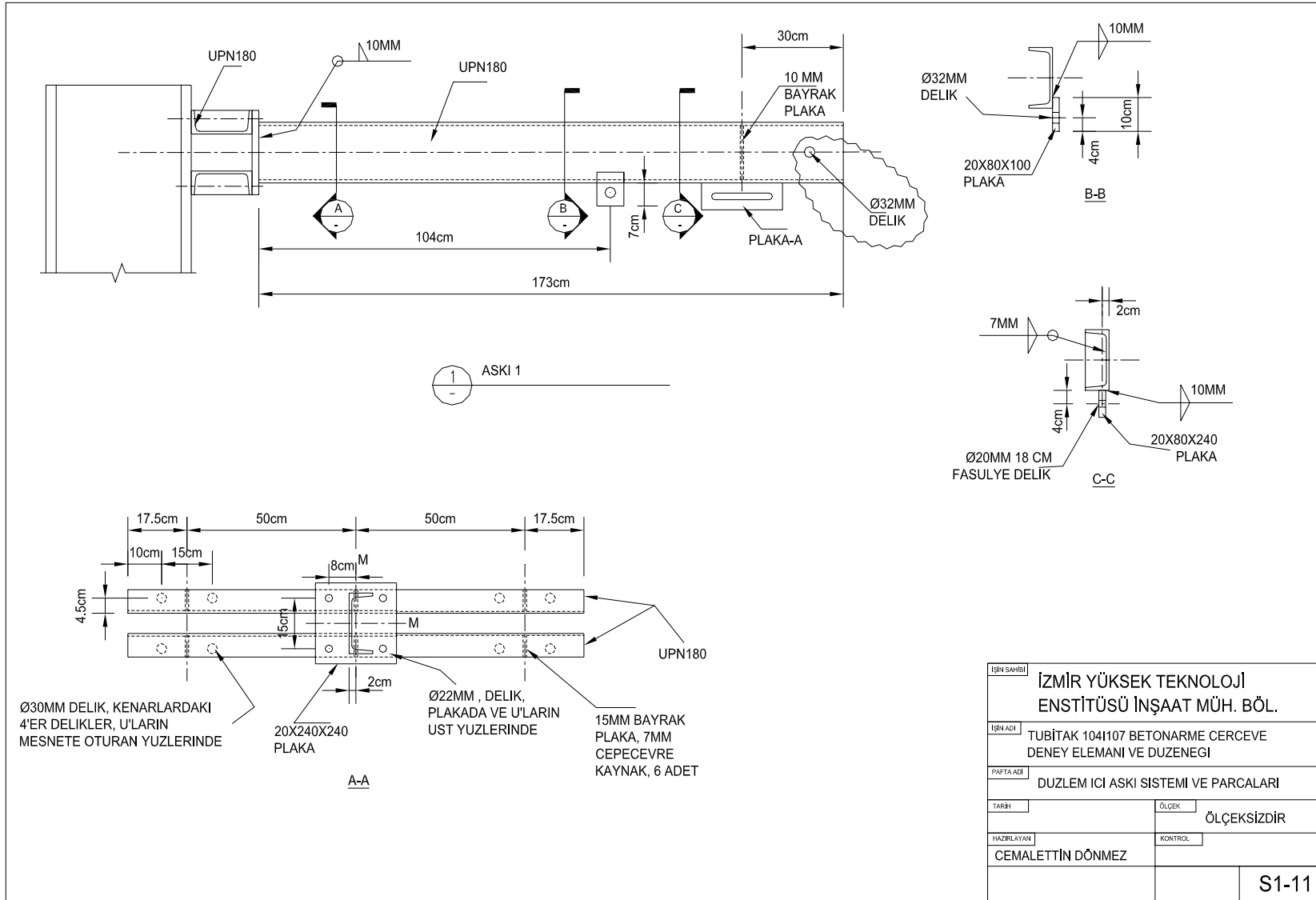
Şekil B.12 Betonarme çerçeve yük dağıtım sistemi parçaları (devam)



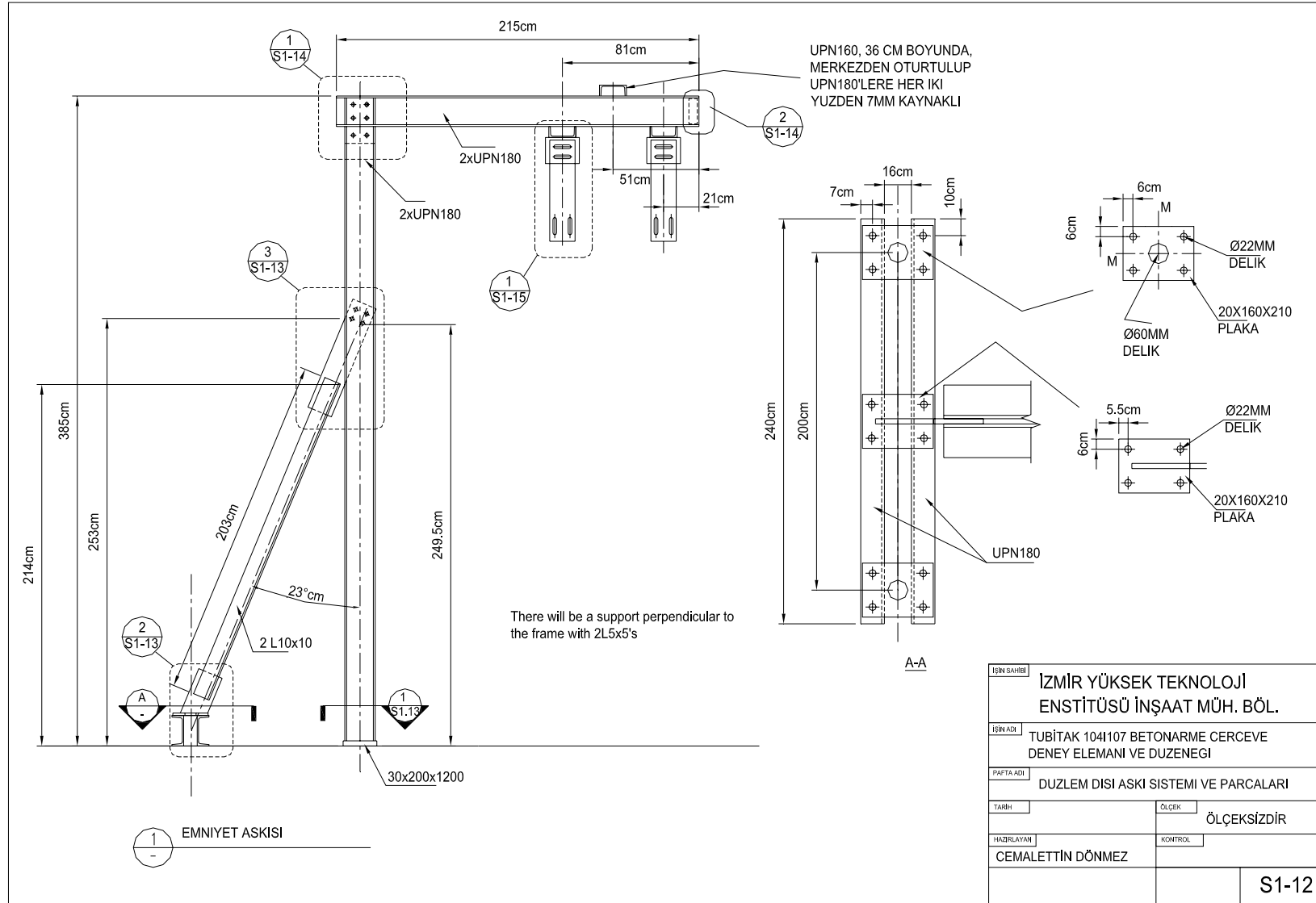
Şekil B.13 Betonarme çerçeve yüklem sistemi parçaları



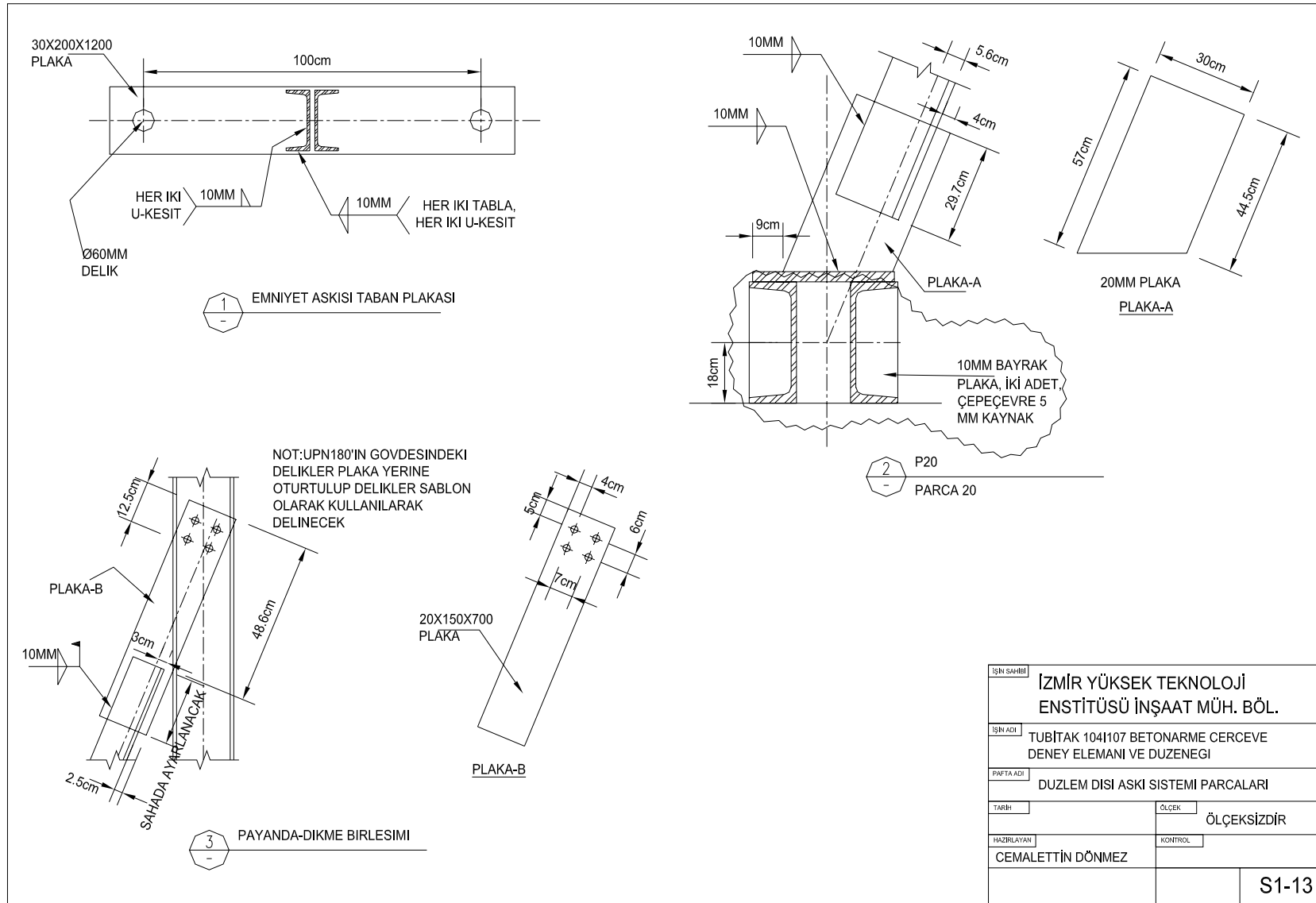
Şekil B.14 Betonarme çerçeve yükleme sistemi parçaları (devam)



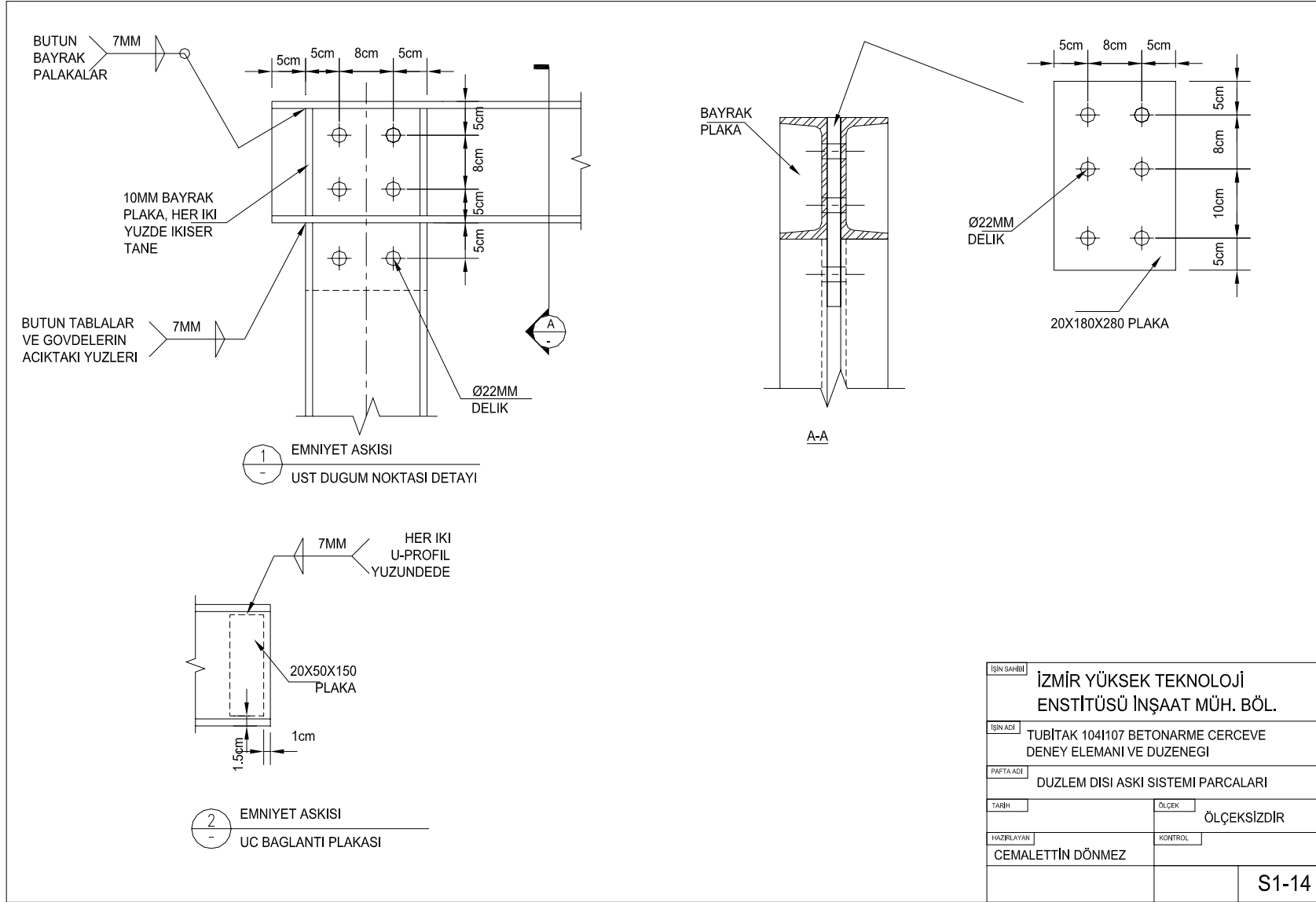
Şekil B.15 Betonarme çerçeve düzlem içi askı sistemi parçaları



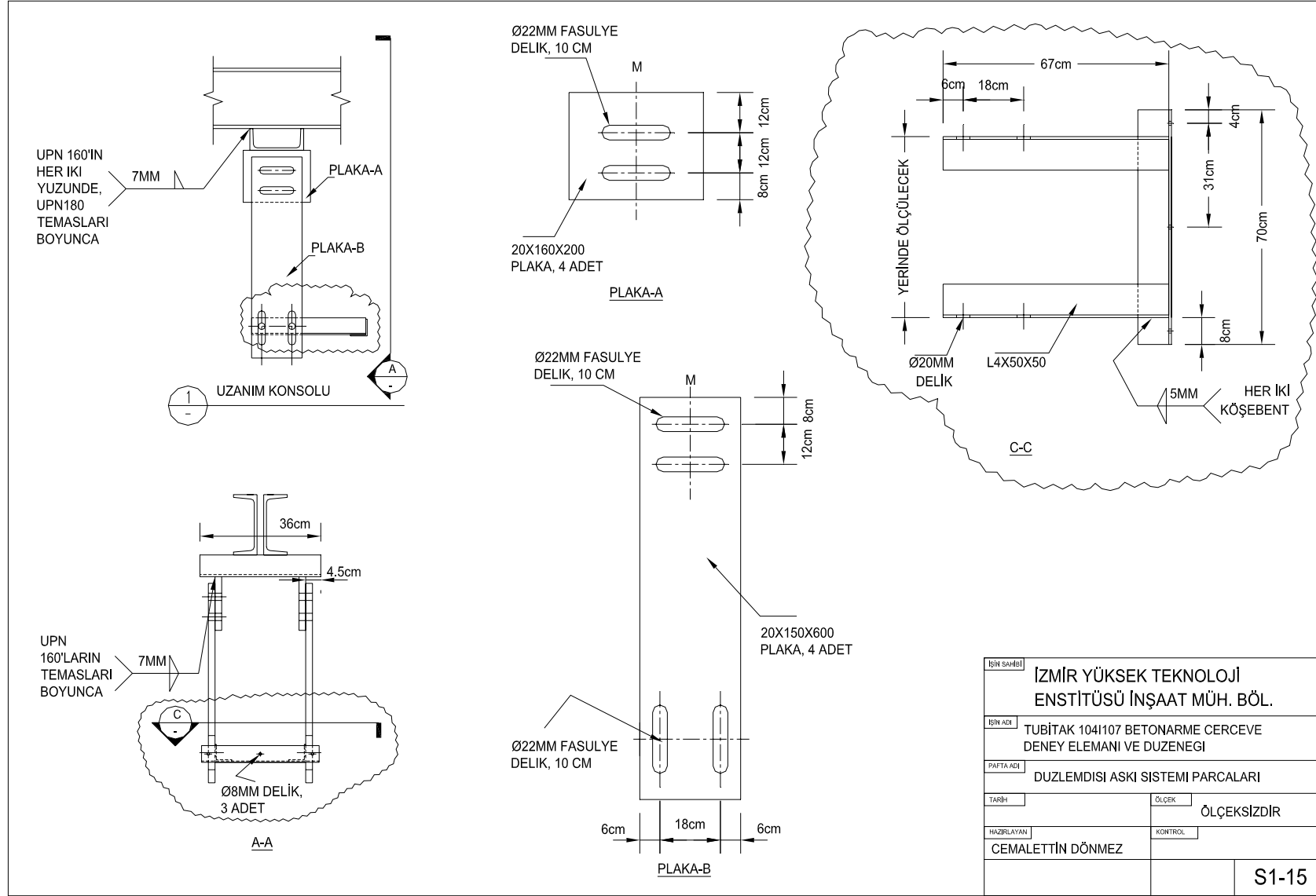
Şekil B.16 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları



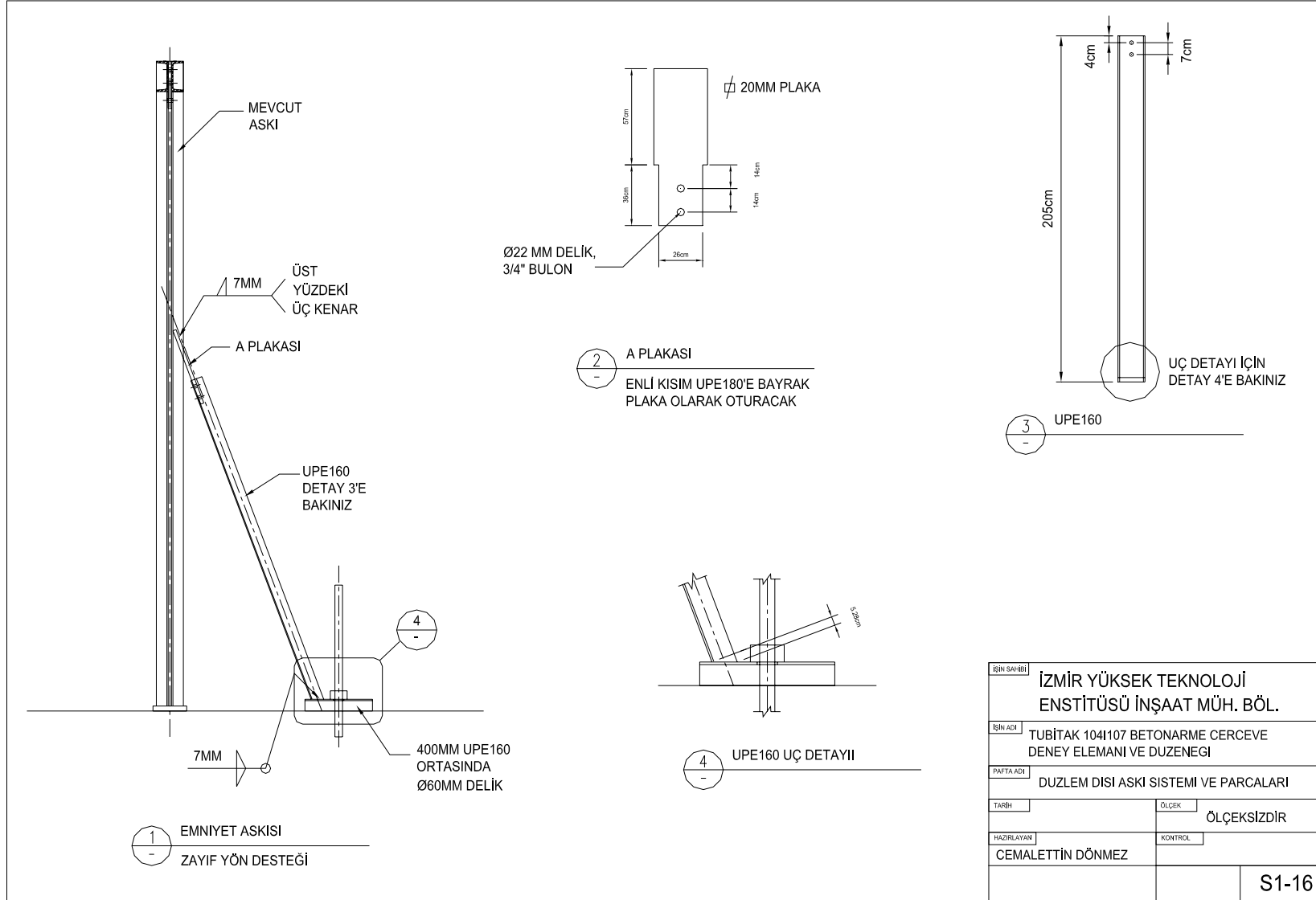
Şekil B.17 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)



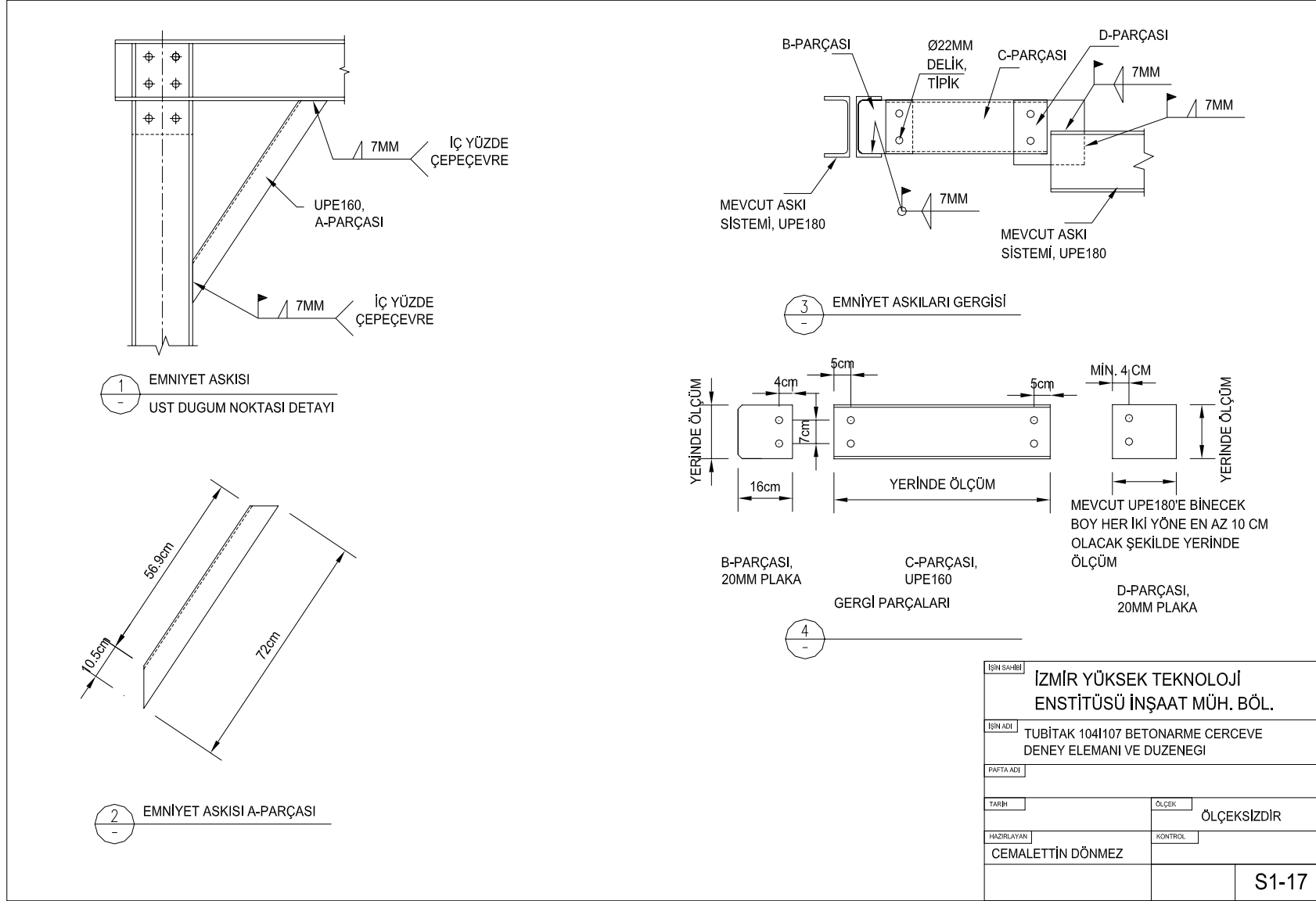
Şekil B.18 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)



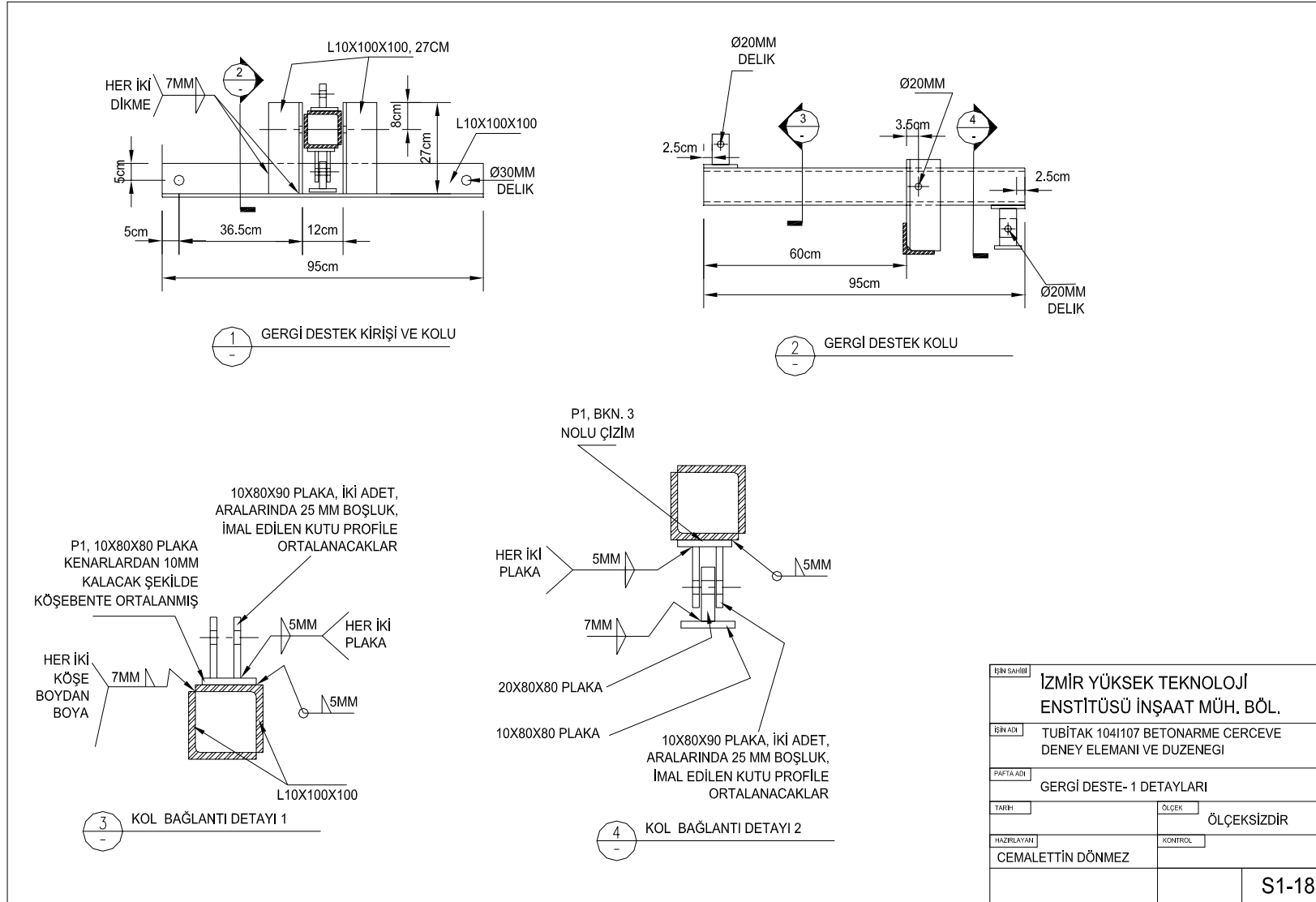
Şekil B.19 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)



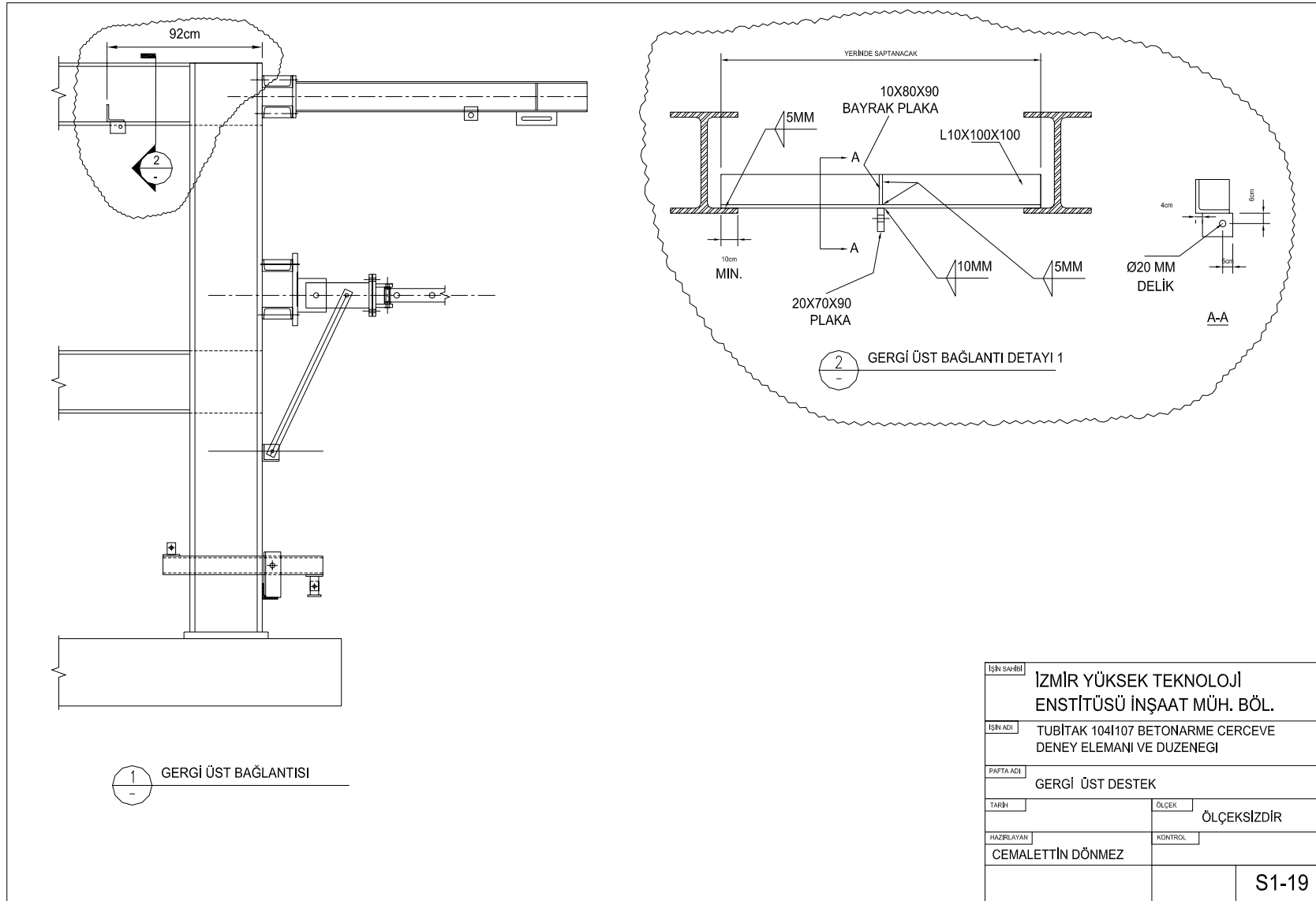
Şekil B.20 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)



Şekil B.21 Betonarme çerçeve düzlem dışı askı sistemi parçaları (devam)

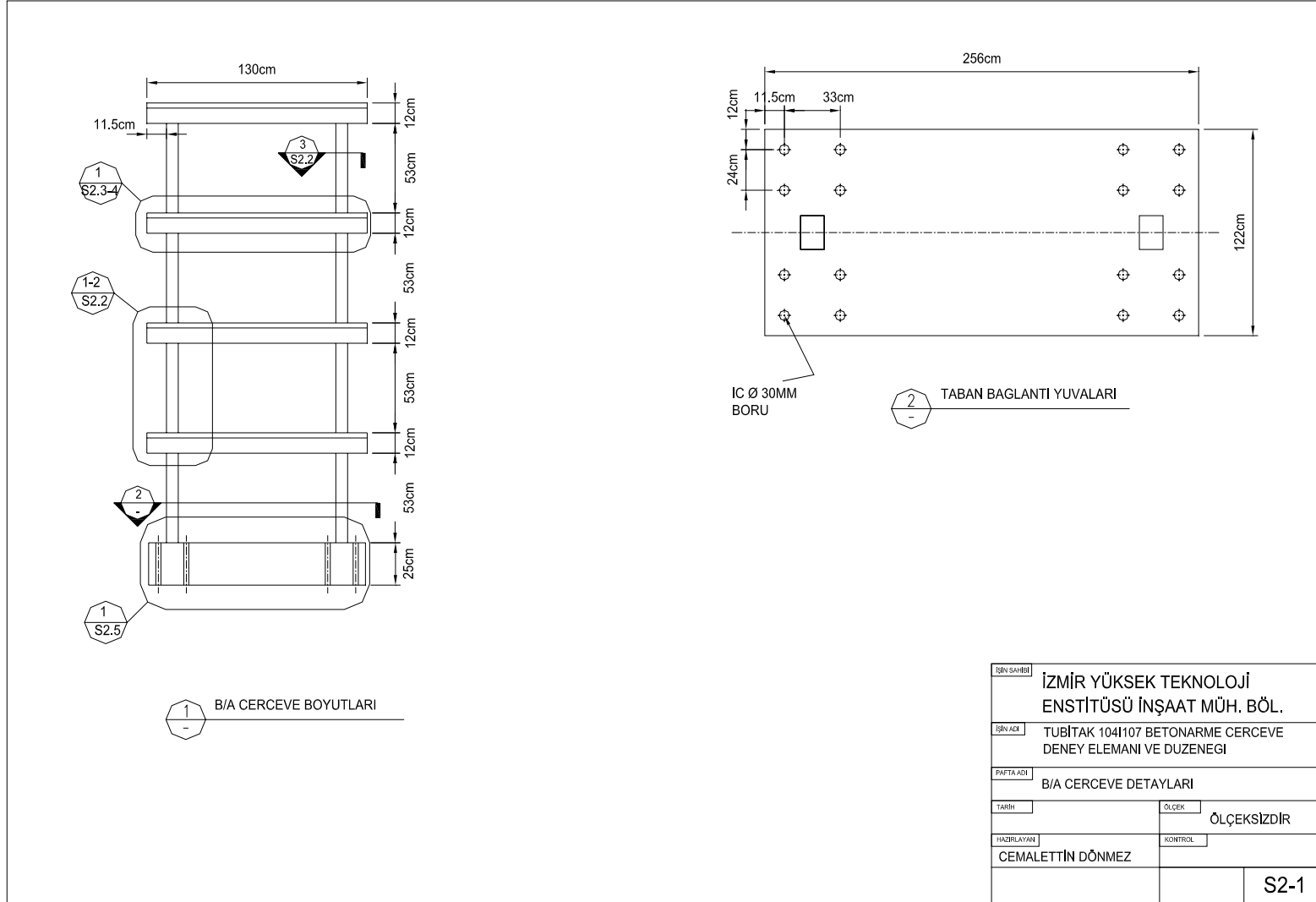


Şekil B.22 Betonarme çerçeve gergi alt destek detayları

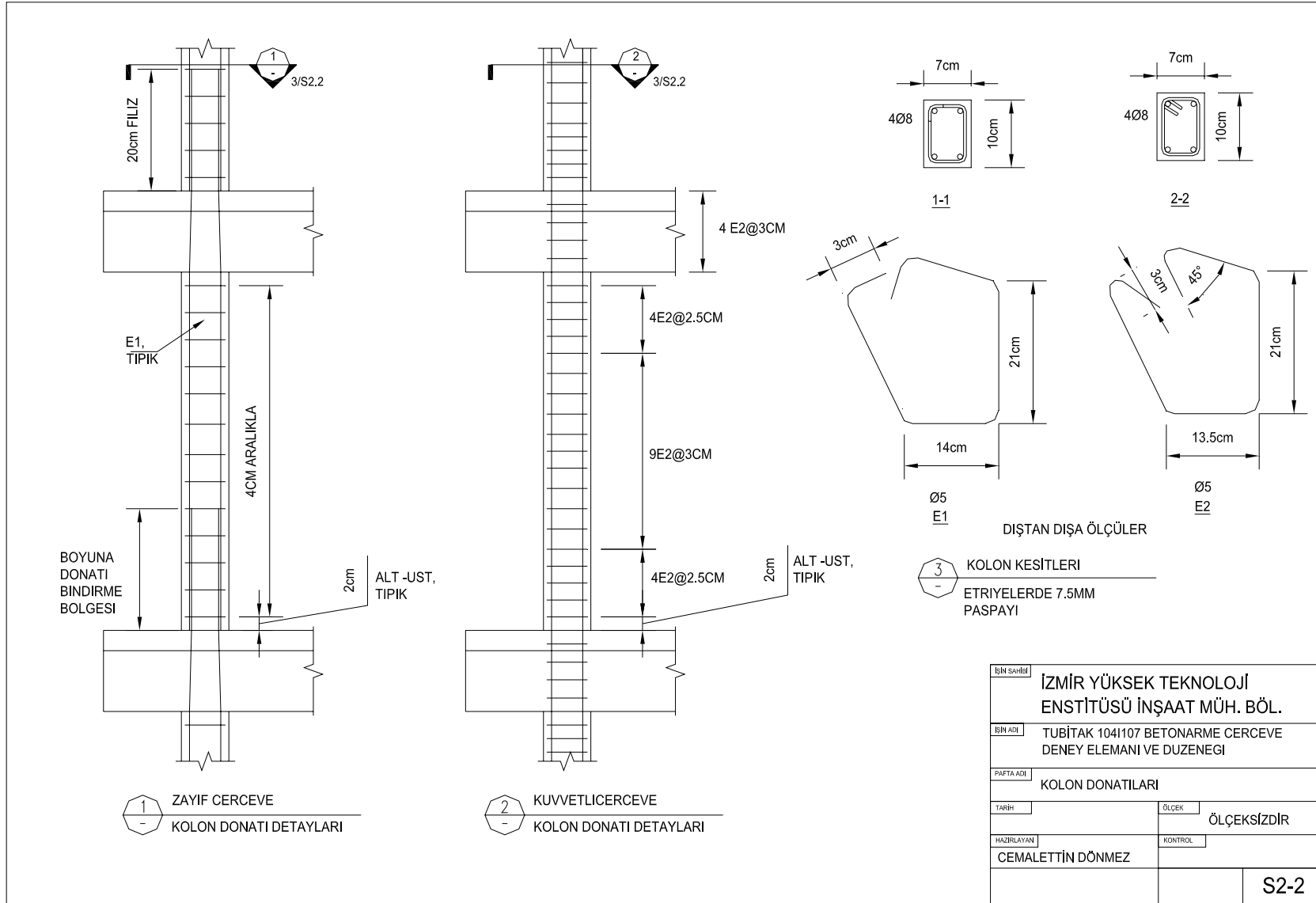


Şekil B.23 Betonarme çerçeve gergi üst deste detayları

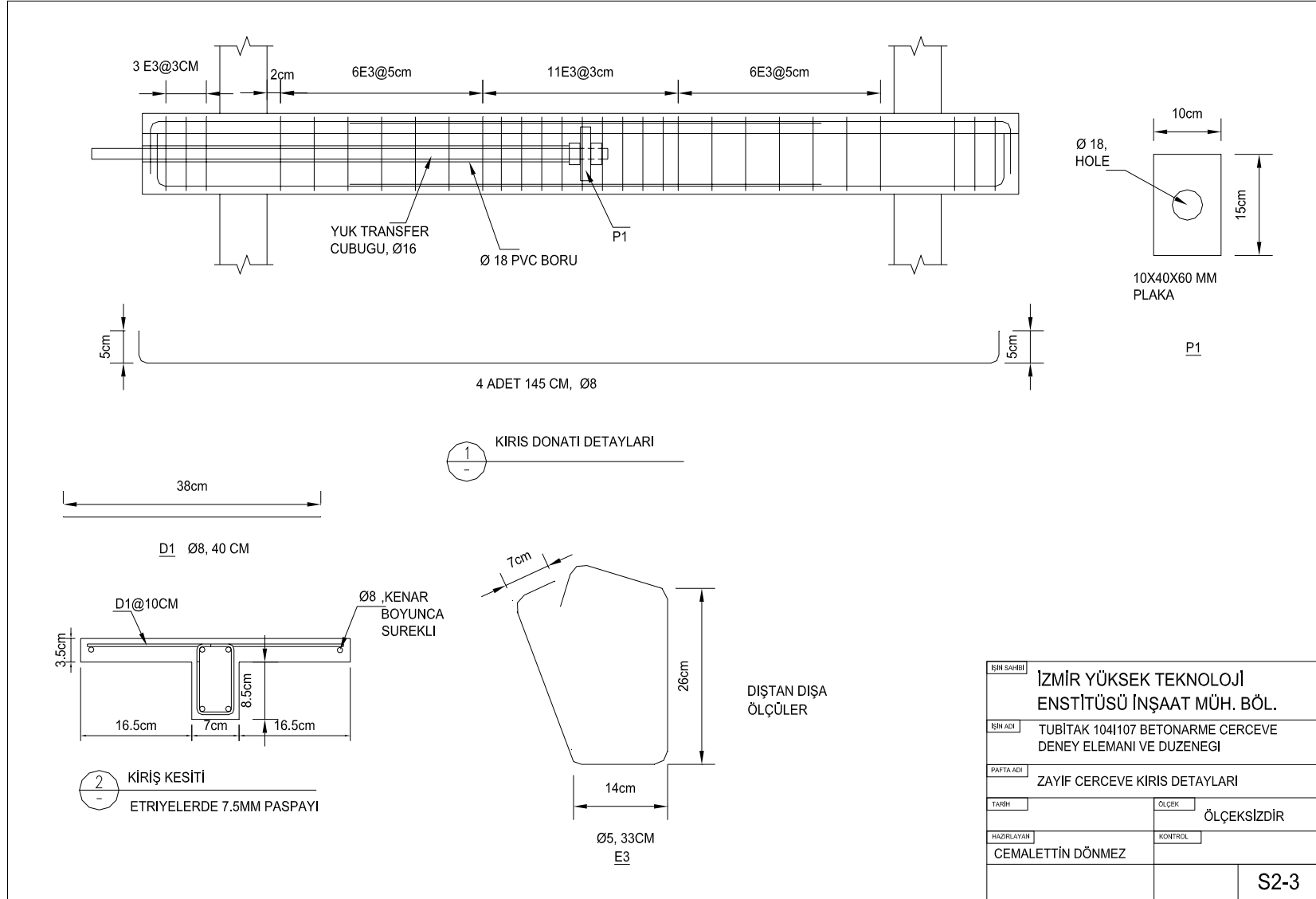
B.3 Betonarme Çerçeve Detayları



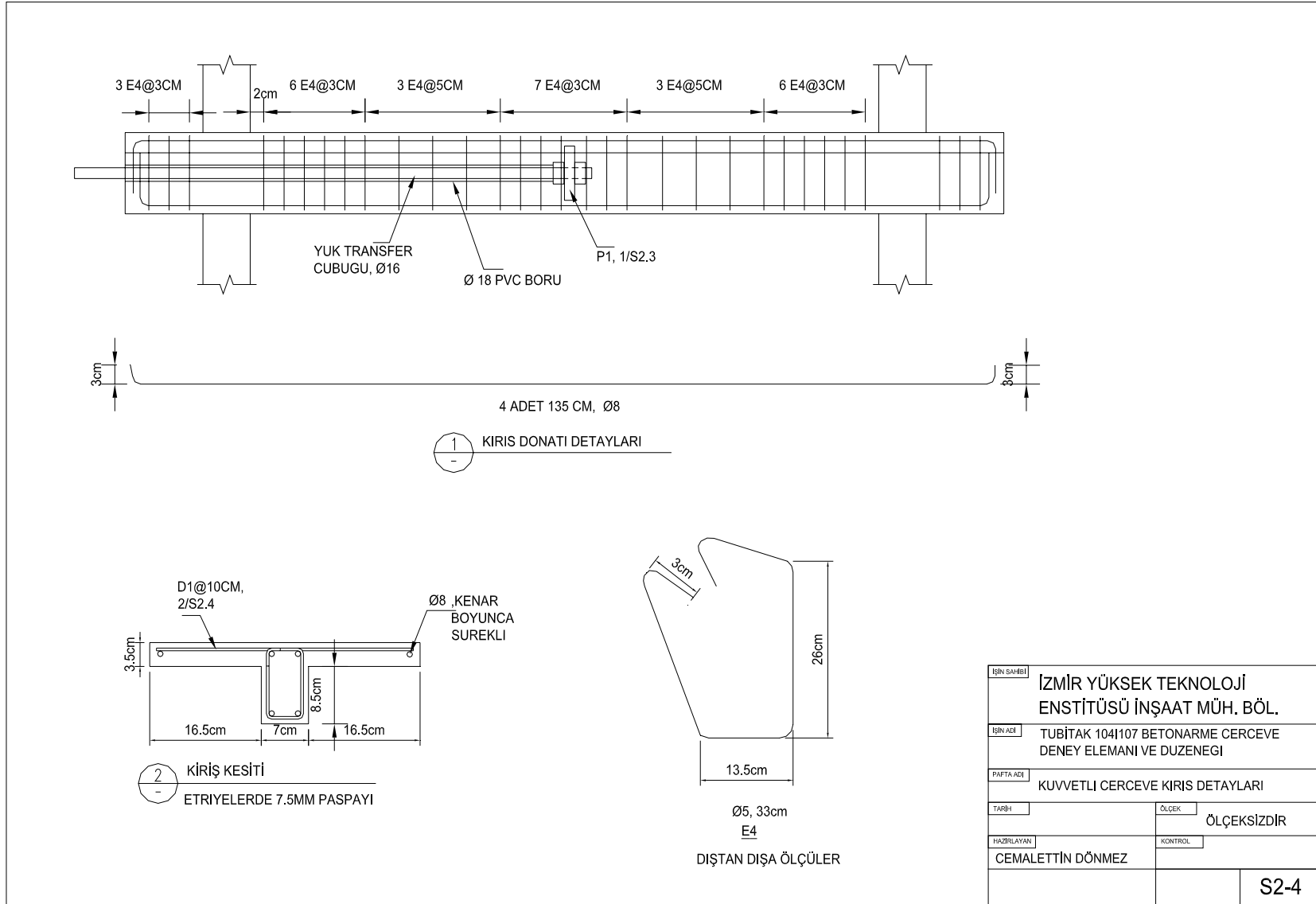
Şekil B.24 Betonarme çerçeve geometri ve taban mesneti



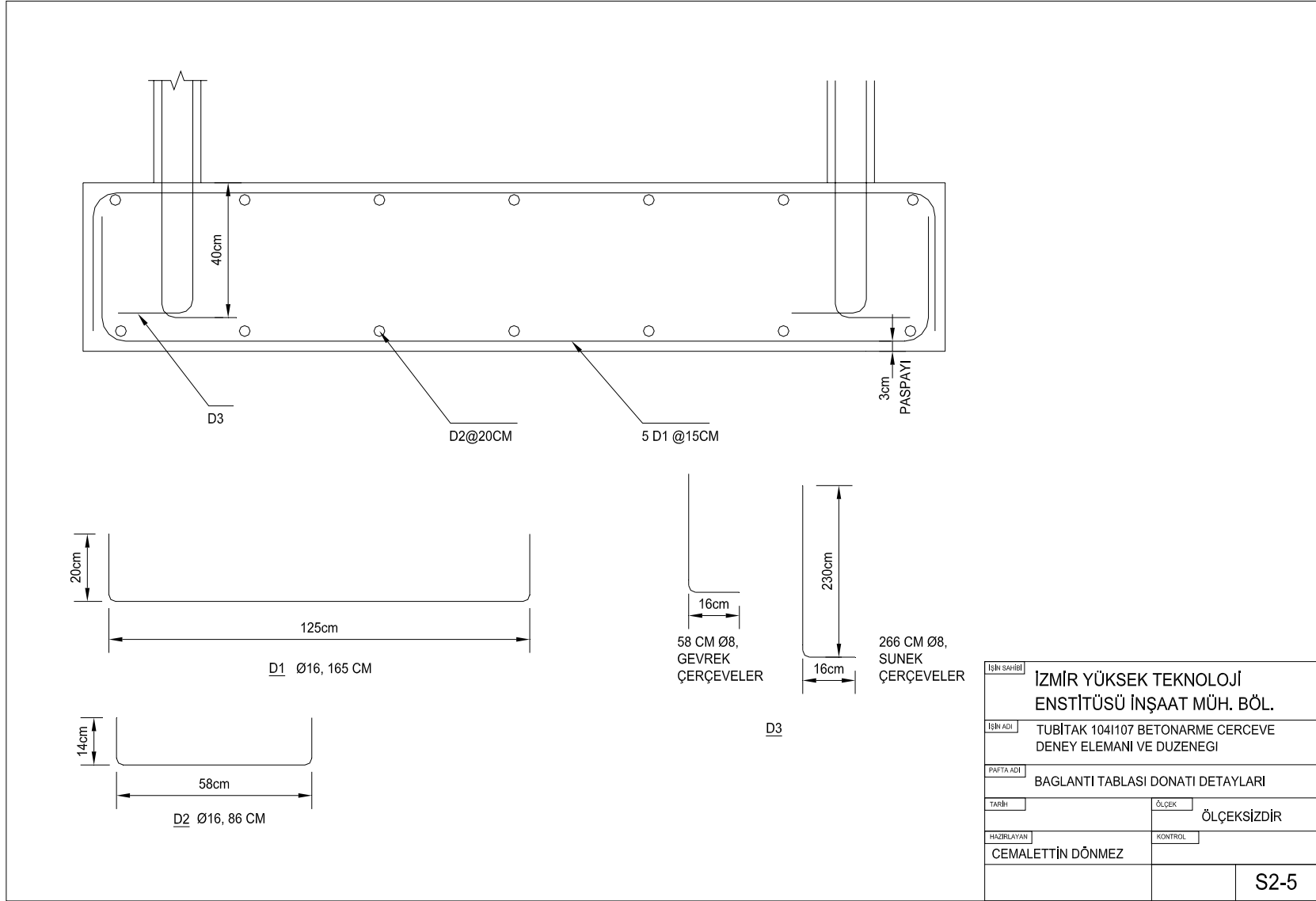
Şekil B.25 Betonarme çerçeve kolon detayları



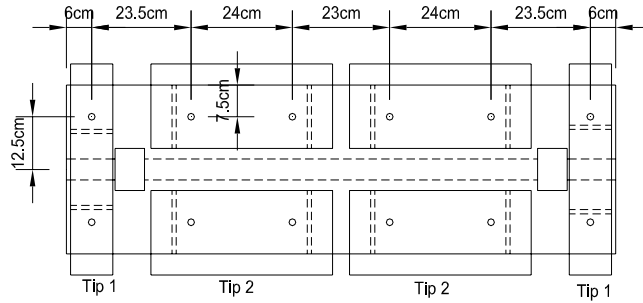
Şekil B.26 Betonarme çerçeve zayıf kiriş detayları



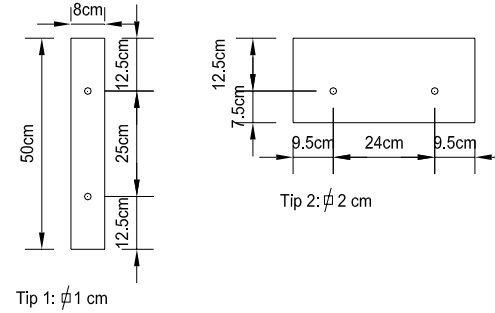
Şekil B.27 Betonarme kuvvetli çerçeve kiriş detayları



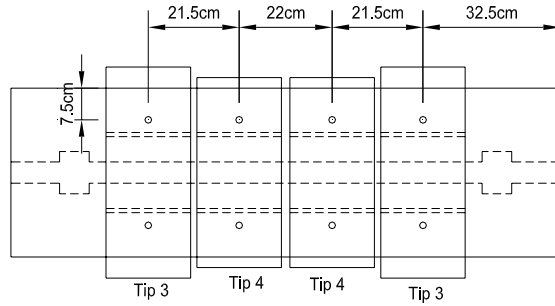
Şekil B.28 Betonarme çerçeve taban bağlantı tablası detayları



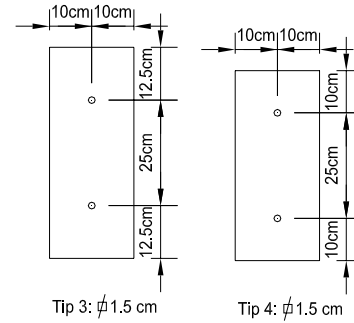
1, 2 ve 3. Katlar Ek Kütle Yerleşim Planı
 Tip 1'den 7 plaka üst üste
 Tip 2'den 7 plaka üst üste



Not: 1. Beton Çerçeve'deki Delikler Ø10
 2. Çelik Plakalardaki Delikler Ø16



4. Kat Ek Kütle Yerleşim Planı
 Tip 3'den 8 plaka üst üste
 Tip 4'den 7 plaka üst üste



İŞİN SAHİBİ	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ İNŞAAT MÜH. BÖL.	
İŞİN ADI	TUBİTAK 1041107 BETONARME ÇERÇEVE DENEY ELEMANI VE DÜZENEGİ	
PAFTA ADI	AĞIRLIK SABİTLEME DÜZENEGİ	
TARİH	ÖLÇEK	ÖLÇEKSİZDIR
HAZIRLAYAN	KONTROL	
CEMALETTİN DÖNMEZ		
		S3-2

Şekil B.29 Betonarme çerçeve ek kütle plakaları

EK C: Alıcıların Teknik Özellikleri

C.1 Yük Hücreleri

1. Marka- Model: Honeywell-41A
Yükleme Aralığı: +/- 22650 lbs
Hassasiyet: 2264 kgf/V
2. Marka- Model: Honeywell-41A
Yükleme Aralığı: +/- 9060 kgf
Hassasiyet: 906 kgf/V
3. Marka- Model: Honeywell-41
Yükleme Aralığı: +/- 4530 kgf
Hassasiyet: 906 kgf/V

C.2 İvmeölçerler

1. Marka-Model: PCB-333B42
Hassasiyet: 500 mV/g
Frekans Aralığı: 0.5 to 3000 Hz
Maksimum İvme: +-10g
2. Marka-Model: PCB-393B04
Hassasiyet: 1000 mV/g
Frekans Aralığı: 0.06 to 450 Hz
Maksimum İvme: +-5g
3. Marka-Model: PCB-356A16(Üç eksenli)
Hassasiyet: 100 mV/g
Frekans Aralığı: 0.5 to 5000 Hz
Maksimum İvme: +-50g

C.3 Doğrusal Yer Değiştirme Ölçerler

1. Marka- Model: OPKON- LPM-100-B-10K-S
Ölçüm Aralığı: +/-50 mm
Hassasiyet: 0.1 V/V.mm
2. Marka- Model: OMEGA- LD600
Ölçüm Aralığı: +/-50 mm
Hassasiyet: 6 mV/Vmm
3. Marka- Model: OMEGA- LD600
Ölçüm Aralığı: +/-100 mm
Hassasiyet: 2 mV/Vmm

C.4 Gerinim Pulları

1. Marka: TML
Tip: QFLA-5-11
Maksimum Birim Uzama: 3%

Ölçüm Uzunluğu: 5mm

2. Marka: TML
Tip: QFLK-1-11
Maksimum Birim Uzama: 3%
Ölçüm Uzunluğu: 1mm
3. Marka: TML
Tip: YFLA-5
Maksimum Birim Uzama: 15%
Ölçüm Uzunluğu: 5mm

EK D: Malzeme Dayanımları

D.1 Beton Basınç Deneyi Sonuçları

Beton dayanımının tespiti amacı ile çoğunluğu küp olmak üzere küp ve silindir numuneler alınmıştır. Tipik olarak üç grup üç elemanlı numuneler alınmış ve gruplardan iki tanesi biri 28. günde diğeri deney gününde test edilmek üzere su tankında küre tabii tutulmuştur. Son grup ise deney gününe kadar çerçeve ile birlikte çerçevenin maruz kaldığı çevre şartlarına tabii tutulmuştur. Numuneler ilk çerçeve numuneleri hariç 1.5-2 dakika süren yüklemeler ile göçmeye zorlanmıştır. Bütün çerçeveleri için sonuçlar Tablo D.1'de sunulmuştur.

Tablo D.1 Çerçeve beton dayanım ortalamaları

	28 günlük dayanım(kgf/cm ²)	Deney günü dayanımları(kgf/cm ²)
Çerçeve 1	277	413 (129.gün)
Çerçeve 2	260	355 (152.gün)
Çerçeve 3	277	362 (92.gün)
Çerçeve 4	-	247 (79.gün)

D.1.1 Çerçeve 1

Birinci çerçeve deneyleri sırasında elimizde yeterli sayıda tek tip numune kabı bulunmaması sebebi ile numunelerin bir kısmı silindir (15x30 cm) diğeri bir kısmı ise küp (20x20 cm) kaplara alınmıştır. Deney sonuçları ve sonuçların standart hale dönüştürülmüş hali Tablo D.2'de sunulmuştur.

Tablo D.2 Birinci çerçeve beton numuneleri

28. Gün Sonuçları (12 Mayıs 2009), SİLİNDİR NUMUNELER

Numune No	Okunan Göçme Yüğü (kg)	Göçme Süresi (sn)	Pres için Düzeltmiş Yük (kg), *0.9	Gerilme Dayanımı (kg/cm ²)	Yükleme Hızı Düzeltmesi, *0.9	
1	60950		54855	310.42	279.37	
2	57170		51453	291.16	262.05	Ort:
3	63520		57168	323.50	291.15	277.5

DENEY GÜNÜ YAPILAN ÖLÇÜMLER (9 EYLÜL 2009), KÜP NUMUNELER

Numune No	Okunan Göçme Yükü (kg)	Göçme Süresi (sn)	Pres için Düzeltilmiş Yük (kg)	Gerilme Dayanımı (kg/cm ²)	Silindir Kapasitesine Çevrilmiş Gerilme Dayanım (kg/cm ²)	
Çerçevenin Yanında Tutulan Numuneler						
1	115230	95	103707	460.92	401.0	
2	127470	120	114723	509.88	443.6	Ort:
3	125280	132	112752	501.12	436.0	426.9
Kür Tankında Tutulan Numuneler						
1	122540	125	110286	490.16	426.4	
2	113130	155	101817	452.52	393.7	Ort:
3	110270	120	99243	441.08	383.7	401.3

Silindir numuneleri yüksek yükleme hızlarında test edilmiş ve daha sonra sonuçlar normal hızlara dönüştürülmek amacı ile düzeltilmiştir (Erdoğan, 2007). Ayrıca bir karşılaştırma yapabilmek amacı ile küp ve silindir numuneler arasında çevrim yapılmıştır. Küp dayanımları silindir dayanımlarına dönüştürülüp dayanımlar karşılaştırıldığında 28 günlük silindir dayanımlarının beklenildiği gibi daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Deney günü yapılan deneylerde kür tankında tutulan numuneler çerçevenin yanında tutulan numunelere göre daha düşük bir dayanım sergilemişlerdir. Kür tankı numuneleri tanktan çıkarıldıktan yaklaşık altı saat sonra deneye tabii tutulduklarından diğer gruba göre daha nemli bir durumdaydılar. Görece nemli numunelerde daha düşük dayanım elde edilmesi tipik olarak beklenen bir sonuçtur (Erdoğan, 2007).

D.1.2 Çerçeve 2

Bütün numuneler 15x15 (cm) küpler şeklinde alınmıştır. Deney sonuçları ve sonuçların standart hale dönüştürülmüş hali Tablo D.3'de sunulmuştur.

Tablo D.3 İkinci çerçeve beton numuneleri

Numune No	Okunan Göçme Yükü (kgf)	Pres İçin Düzeltilmiş Yük (kgf), *0.9	Gerilme Dayanımı (kgf/cm ²)	Silindir Kapasitesine Çevrilmiş Gerilme Dayanımı (kgf/cm ²), *0.87	
28. Gün Sonuçları					
1	75400	67860	301.6	262.4	
2	77900	70110	311.6	271.1	Ort.
3	72300	65070	289.2	251.6	261.7
Deney Zamanı Ölçümleri (1 Aralık 2009, Deneyden 1 hafta sonra numuneler kırılmıştır)					
Çerçevenin Yanında Tutulan Numuneler					
1	108920	98028	435.7	379.0	
2	103540	93186	414.2	360.3	Ort.
3	98720	88848	394.9	343.5	361.0

Kür Tankında Tutulan Numuneler

1	98230	88407	392.9	341.8	
2	104710	94239	418.8	364.4	Ort.
3	98510	88659	394.0	342.8	349.7

Küpler 1.5 ila 2 dakika arası süren yüklemeler altında kırılmıştır.

D.1.3 Çerçeve 3

Bütün numuneler 15x15 (cm) küpler şeklinde alınmıştır. Deney sonuçları ve sonuçların standart hale dönüştürülmüş hali Tablo D.4'de sunulmuştur.

Tablo D.4 Üçüncü çerçeve beton numuneleri

<i>Numune No</i>	<i>Okunan Göçme Yüğü (kgf)</i>	<i>Pres İçin Düzeltmiş Yüğü (kgf), *0.9</i>	<i>Gerilme Dayanımı (kgf/cm²)</i>	<i>Silindir Kapasitesine Çevrilmiş Gerilme Dayanımı (kgf/cm²), *0.87</i>	
28. Gün Sonuçları					
1	77450	69705	309.8	269.5	
2	80700	72630	322.8	280.8	Ort.
3	80860	72774	323.44	281.4	277.3
Deney Günü Yapılan Ölçümler					
<i>Çerçevenin Yanında Tutulan Numuneler</i>					
1	107310	96579	429.2	373.4	
2	104630	94167	418.5	364.1	Ort.
3	108630	97767	434.5	378.0	371.9
<i>Kür Tankında Tutulan Numuneler</i>					
1	99490	89541	398.0	346.2	
2	107400	96660	429.6	373.8	Ort.
3	98320	88488	393.3	342.2	354.0

Küpler 1.5 ila 2 dakika arası süren yüklemeler altında kırılmıştır.

D.1.4 Çerçeve 4

Bütün numuneler 15x30 (cm) silindirler şeklinde alınmıştır. Diğer çerçevelerden farklı olarak bu deneyde sadece 6 numune alınmış ve tamamı deney gününe kadar kür tankında tutulmuş ve deney günü test edilmiştir. Numunelerin ilk üçlük grup ilk iki katın betonunun sağlayan 1. karışımdan ikinci üçlük grup ise son iki katın betonunu sağlayan 2. karışımdan alınmıştır. Deney sonuçları Tablo D.5'de sunulmuştur.

Tablo D.5 Dördüncü çerçeve beton numuneleri

Numune No	Okunan Göçme Yüğü (kgf)	Pres İçin Düzeltilmiş Yüğü (kgf), *0.9	Gerilme Dayanımı (kgf/cm²)
------------------	--------------------------------	---	--

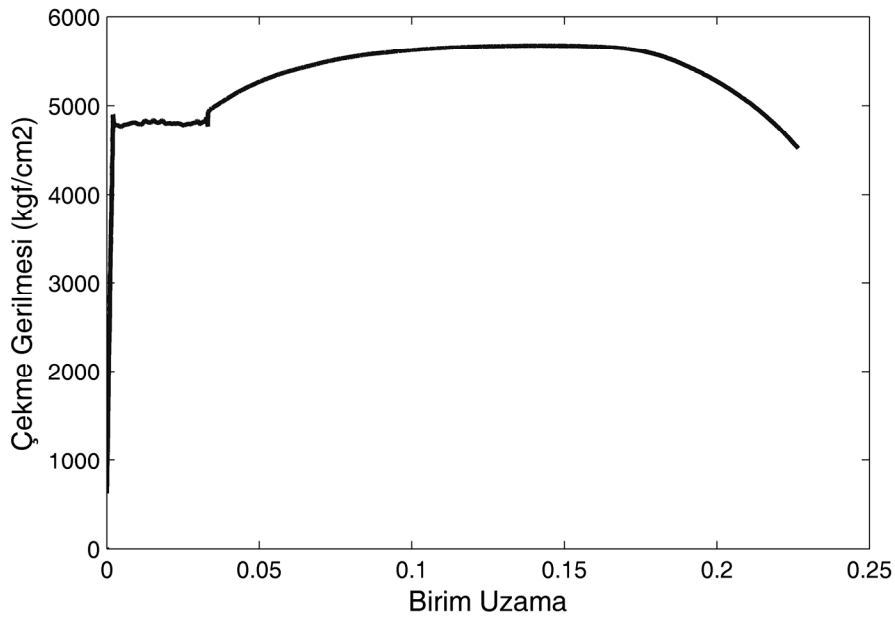
Deney Günü Yapılan Ölçümler**Kür Tankında Tutulan Numuneler**

1	48840	43956	248.7	
2	48030	43227	244.6	
3	54250	48825	276.3	
4	40520	36468	206.4	
5	51590	46431	262.7	Ort.
6	48050	43245	244.7	247.2

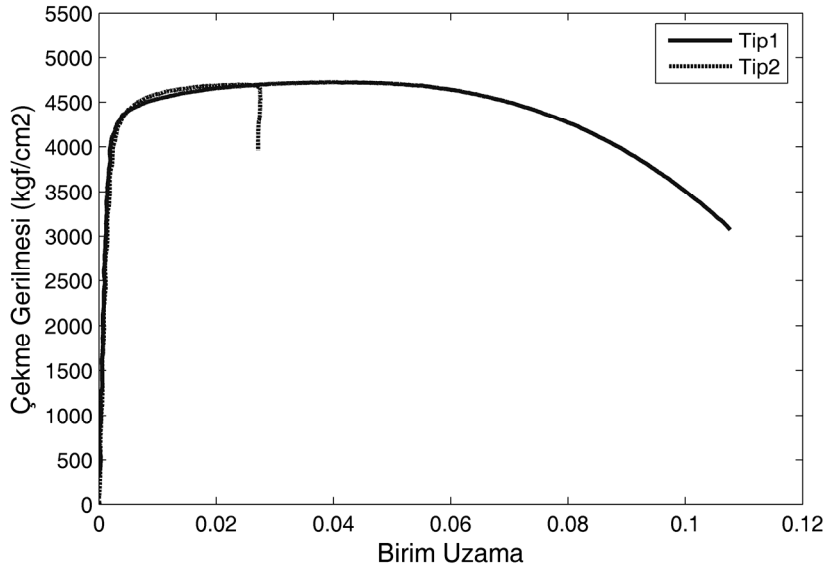
Silindirler 1.5 dakika civarında süren yüklemeler altında kırılmıştır.

D.2 Beton Çeliği Çekme Deneyi Sonuçları

Çerçeve imalatlarında kullanılmak üzere iki tip donatı alınmıştır. Kiriş ve kolon boyuna donatılarında $\Phi 8$ mm nervürlü beton çeliği, etriyelerde ise standart beton çeliğinden soğuk çekilmiş $\Phi 5$ düz tel kullanılmıştır. Donatıların her birinden altışar numune alınarak çekme testine tabii tutulmuştur. Testler sonucunda $\Phi 8$ donatılarının TS500'e (2000) göre S420 sınıfından olduğu sonucuna varılmıştır. Testlerden elde edilen tipik bir birim yük-uzama eğrisi Şekil D.1'de sunulmuştur.

**Şekil D.1** $\Phi 8$ nervürlü beton çeliği için testlerden elde edilen tipik birim yük-uzama eğrisi

Soğuk çekilmiş düz tellerin ise 4200 kg/cm^2 akma dayanıma sahip olmak ile beraber genel olarak iki tip birim-uzama ilişkisine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Birinci tipte telin kopma birim uzaması 6% civarında, ikinci tipte ise 2% civarındadır. Test edilen 6 numune içinde iki tipte eşit şekilde temsil edilmiştir. Her iki tip için tipik birim yük uzama ilişkisi Şekil D.2'de sunulmuştur.



Şekil D.2 $\Phi 5$ soğuk çekilmiş tel için testlerden elde edilen tipik birim yük-uzama eğrisi

D.3 Dolgu Duvar Dayanımları

Dolgu duvarların dayanımlarını belirleyebilmek amacıyla biri tuğla eksenine paralel diğeri ise tuğla eksenine ile 45 derece yapan bir eksen üzerinde yüklemek sureti ile iki tip test yapılmıştır, Şekil D.3. Köşegen yüklenen numunelerde yükü düzgün biçimde uygulayabilmek amacıyla ile yükün uygulanacağı köşelerde tek tuğlaya oturan köşebentler kullanılmıştır. Test sonuçları Tablo D.6'da sunulmuştur.

Tablo D.6 Dolgu duvar malzeme test sonuçları

Çerçeve 3	Kapasite (kgf)	Alan (cm^2)	Gerilim (kgf/cm^2)	Ortalama Gerilim (kgf/cm^2)
Tuğla Eksenine Paralel	1670	(7x10) 70	23.9	32.3
	2213		31.6	
	2888		41.3	
Çapraz	658	(7.5x28x28) 297	2.2	2.8
	1372		4.6	
	475		1.6	

Çerçeve 4	Kapasite (kgf)	Alan (cm^2)	Gerilim (kgf/cm^2)	Ortalama Gerilim (kgf/cm^2)
Çapraz	2541	(7.5x28x28) 297	8.6	7.6
	2498		8.4	
	1686		5.7	



Şekil D.3 Dolgu duvar malzeme test numuneleri

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 104I107
Proje Başlığı: Modal DeneY Yöntemi ile Betonarme Yapılarda Taşıyıcı Çerçeve Bölme Duvar Etkileşiminin İncelenmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yrd. Doç.Dr. Cemalettin DÖNMEZ Yrd. Doç.Dr. Mustafa ALTINKAYA Yrd. Doç.Dr. Engin AKTAŞ Yrd. Doç.Dr. Serdar ÖZEN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü - Urla İzmir, TÜRKİYE 35430
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: TÜBİTAK Atatürk Bulvarı No:221 06100 Kavaklıdere/ANKARA
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1 Nisan 2005 – 1 Temmuz 2010
Öz Bu çalışmada ana amaç betonarme çerçeve dolgu duvarlı sistemlerde çerçeve dolgu duvar etkileşimiyle sistemin dinamik değişkenlerinin nasıl değiştiğini ortaya koymaktır. Bu amaçla modal analiz yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan gözlem ve analizler dolgu duvarlı sistemlerde artan hasarla birlikte ötelenmelerin ilk kata yoğunlaştığını ve bu katta ağır hasara sebep olduğunu ve çerçevelerin frekanslarının artan hasar ile birlikte düştüğünü fakat özellikle moment çerçevelerinde modal şekillerin ciddi bir değişikliğe uğramadığı göstermiştir.
Anahtar Kelimeler: Betonarme Çerçeve, Modal Analiz, Dolgu Duvar, Dinamik Değişkenler
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: <ul style="list-style-type: none">Dönmez C., Karakan E., "Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları", Teknik Dergi, Cilt 20, Sayı 4, 2009Tanyer, İ., Özen, S., Dönmez, C., Altinkaya M.A., "Yapıların Modal Analizi için Kalman Süzgecinin Tutarlılık Analizi", SİU (IEEE 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı), Antalya, 2009