



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**BETONARME KOLONLARDA ETRİYE  
ARALIKLARININ VE DONATI SINIFININ  
YAPI DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**Emine KAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Emine KAYA tarafından hazırlanan “Betonarme Kolonlarda Etriye Aralıklarının ve Donatı Sınıfının Yapı Dinamik Davranışına Etkisi” adlı tez çalışması 15/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Abdullah AVEY

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

.....

#### Üye

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından 211004049 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Emine KAYA

Tarih: 15.06.2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### BETONARME KOLONLARDA ETRİYE ARALIKLARININ VE DONATI SINIFININ YAPI DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

**Emine KAYA**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN  
2022, 161 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN  
Prof. Dr. Abdullah AVEY  
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI**

Mimarlar ve mühendisler yönetmeliklerde belirtilen şartlara göre yapıları dizayn edip tasarım ömrü belirlemektedir. Yapıya aşırı yüklenilmesi (sel, deprem, patlama vb.), yüklerin tekrarlı uygulanması gibi beklenmeyen durumların oluşması ya da gelişen teknolojiler neticesinde yönetmeliklerin yenilenmesi eski yönetmeliklere göre tasarlanan yapıların tasarım ömrünün güvenilirliğini sorgulamaya yönlendirmektedir. Yapılan araştırmalar maalesef ki meydana gelen depremlerde eksik tasarlanmış ve detaylandırılmış betonarme binalardaki kolonların sismik kırılma gücü vurgulanarak eski yönetmeliklere göre tasarlanmış betonarme kolonların ciddi hasar gördüğünü hatta çöktüğünü göstermektedir. Bu gibi istenmeyen durumların önüne geçebilmek için betonarme kolonların deprem altındaki davranışının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında eski ve mevcut yönetmeliklere göre tasarlanmış yapıları temsil edecek farklı donatı sınıfına ve etriye aralığına sahip betonarme kolon numunelerinin laboratuvar ortamında deprem durumunu simüle edecek sarsma tablasında deneyleri gerçekleştirilerek doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları tespit edilip karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde kolonların doğal titreşim frekanslarını etriye aralığının yaklaşık %6-7 oranında, donatı sınıfının %25 oranında etkilediği tespit edilirken; kolonların sönüm oranını ise etriye aralığının %4.98-9.6, donatı sınıfının %36-39 oranları arasında etkilediği saptanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ülkemizdeki betonarme yapı stoğunda sıklıkla karşılaşılan seyrek etriye aralığına ve düşük donatı sınıfına sahip kolonların deprem performansı konusunda kayda değer veri tabanı meydana getirerek bu yapıların deprem performansının belirlenmesinde kullanılan analitik yöntemlerin geliştirilmesine önemli katkıda bulunacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel Modal Analiz, Dinamik Parametreler, Etriye, Kolon, Sarsma tablası

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **EFFECT OF STIRRUP SPACING AND REINFORCEMENT CLASS ON STRUCTURAL DYNAMIC BEHAVIOR IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS**

**Emine KAYA**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN**

**2022,161 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN  
Prof. Dr. Abdullah AVEY  
Prof. Dr. Mehmet KAMANLI**

Architects and engineers design the structures according to the conditions specified in the regulations and determine the design life. The occurrence of unexpected situations such as overloading the structure (flood, earthquake, explosion, etc.), repetitive application of loads or the renewal of regulations as a result of developing technologies lead to question the reliability of the design life of the structures designed according to the old regulations. Unfortunately, the researches show that the seismic fragility of the columns in the poorly designed and detailed reinforced concrete buildings in the earthquakes that occurred, and the seismic fragility of the reinforced concrete columns designed according to the old regulations were seriously damaged and even collapsed. In order to prevent such undesirable situations, the behavior of reinforced concrete columns under earthquakes should be determined. In this thesis, natural vibration frequencies and damping rates were determined and compared by performing experiments on reinforced concrete column samples with different reinforcement classes and stirrup spacing, which will represent the structures designed according to the old and current regulations, on a shaking table to simulate the earthquake situation in the laboratory environment. As a result of the data obtained, it was determined that the natural vibration frequencies of the columns were affected by approximately 6-7% of the stirrup spacing and 25% of the reinforcement class; It was determined that the damping rate of the columns was affected by the stirrup spacing between 4.98-9.6% and the reinforcement class between 36-39%. Experimental studies will create a significant database on the earthquake performance of columns with sparse stirrup spacing and low reinforcement class, which are frequently encountered in the reinforced concrete building stock in our country, and will contribute significantly to the development of analytical methods used in determining the earthquake performance of these structures.

**Keywords:** Column, Dynamic Parameters, Experimental Modal Analysis, Shaking table, Stirrup

## ÖNSÖZ

Ülkemizin yüksek depremselliği nedeniyle geçmişten günümüze deprem güvenliği konusu hayati öneme sahip olmuştur. Yapıların depreme karşı dayanıklı olması ve deprem sonucu oluşan hasarların en aza indirilebilmesi için yapı dinamik parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. KTÜN Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı yüksek lisans programı kapsamında gerçekleştirilen bu yüksek lisans çalışmasında ülkemizdeki yapı stoğunu temsil edecek şekilde farklı deney parametrelerine sahip betonarme kolonlar tasarlanarak dinamik parametreleri karşılaştırılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleri ile bana her konuda destek olarak yol gösterip teşvik eden, deneysel modal analiz alanında çalışmamı sağlayan saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN'e,

Tez çalışmamı gerçekleştirdiğim süreç boyunca yardımlarından dolayı Araş. Gör. Abdülhamit NAKİPOĞLU'na, Mohammed Gama Omar AL-HAGRI'na, katkılarını esirgemeyen KTÜN İnşaat Mühendisliği bölümü hocalarına ve Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvar sorumlusu Mehmet Emin GÜRHAN'a,

Deneysel çalışmalarda kullandığımız sarsma tablasını bölümümüze kazandıran Acos Makina'ya, FSM Doğan Yapı Teknolojileri Tic. San. Ltd. Şti'ye, İnş. Müh. Adnan DOĞAN'a, İnş. Müh. İskender AVCI'ya ve bölüm başkanımız Prof. Dr. Mehmet KAMANLI'ya,

Tez çalışmasında kullanılan betonu üreterek deneysel çalışmamıza yaptıkları katkıdan ötürü Konya Hazır Beton San. ve Tic. A.Ş.'ye,

211004049 nolu proje ile bu tez çalışmasını destekleyen Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP)'ne,

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren, hoşgörü ve sabırla yanımda olan babam Cengiz KAYA'ya, annem Fatma KAYA'ya, ablam Seda KAYA'ya ve kardeşim Celalettin KAYA'ya,

Sonsuz teşekkür ederim.

Emine KAYA  
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı .....	3
1.2. Tezin Konusu ve Kapsamı .....	3
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>5</b>
2.1. Kolon Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler .....	5
2.2. Çerçeve/ Yapı Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler .....	17
<b>3. DONATILAR VE YAPI DİNAMİK PARAMETRELERİ .....</b>	<b>37</b>
3.1. Donatı Tanımı .....	37
3.2. Kolon Türleri.....	38
3.3. Sargı Donatısının Etkileri.....	40
3.4. Sargı Donatısında Etkili Olan Parametreler .....	40
3.5. Yapı Dinamik Parametreleri .....	42
3.5.1. Periyot.....	43
3.5.2. Frekans .....	44
3.5.3. Sönüm oranı.....	45
3.5.4. Mod şekli .....	47
3.6. Titreşim .....	48
3.6.1. Serbest titreşim .....	48
3.6.2. Zorlanmış titreşim .....	48
3.7. Yer Hareketi Parametreleri .....	48
3.7.1. Genlik parametreleri .....	49
3.7.2. Frekans içeriği parametreler .....	51
3.7.3. Deprem süresi.....	54
<b>4. MODAL ANALİZ.....</b>	<b>55</b>
4.1. Teorik Modal Analiz .....	55
4.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler .....	56
4.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler .....	61
4.2. Deneysel Modal Analiz.....	64
4.2.1. Operasyonel modal analiz (OMA) .....	65

4.2.2. Geleneksel deneysel modal analiz (EMA) .....	67
<b>5. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>100</b>
5.1. Deney Numuneleri Hakkında Genel Bilgi .....	100
5.2. Deney Numunelerinin Üretimi.....	105
5.2.1. Beton basınç dayanımı deneyleri.....	105
5.2.2. Donatılar .....	106
5.2.3. Kalıplar .....	108
5.2.4. Beton dökümü .....	109
5.3. Dinamik Testler.....	111
5.3.1. Sarsma tablası.....	111
5.3.2. Veri toplama .....	112
<b>6. TARTIŞMA VE BULGULAR.....</b>	<b>119</b>
6.1. SE-01 Deney Numunesi .....	119
6.2. SE-02 Deney Numunesi .....	124
6.3. SE-03 Deney Numunesi .....	128
6.4. SE-04 Deney Numunesi .....	133
6.5. SE-05 Deney Numunesi .....	137
6.6. SE-06 Deney Numunesi .....	142
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>147</b>
7.1. Sonuçlar.....	147
7.2. Öneriler .....	152
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>154</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$A_5$	: Kopma uzaması (%)
$A_{gt}$	: Maksimum yükte toplam uzama (%)
$c$	: Sönüm katsayısı
$c_{cr}$	: Kritik sönüm
$f_{ck}$	: Beton karakteristik basınç dayanımı
$f_{ywd}$	: Enine donatı tasarım akma dayanımı
$H$	: Bina yüksekliği
$Hz$	: Hertz
$k$	: Rijitlik
$kN$	: Kilonewton
$m$	: Metre
$mm$	: Milimetre
$MPa$	: Megapascal
$N$	: Newton
$R_e$	: Akma dayanımı (MPa)
$R_{e, act}$	: Deneysel akma dayanımı (MPa)
$R_{e, nom}$	: Karakteristik akma dayanımı (MPa)
$R_m$	: Çekme dayanımı (MPa)
$T_p$	: Binanın hâkim doğal titreşim periyodu
$T_{pA}$	: Ampirik olarak hesaplanan hâkim doğal titreşim periyodu (s)
$\xi$	: Sönüm oranı
$\sigma_c$	: Betondaki gerilme
$\omega$	: Sönümsüz doğal açısal frekans
$\omega_d$	: Sönümlü doğal açısal frekans
$\varepsilon_c$	: Beton birim şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{cu}$	: Betonun nihai birim şekil değiştirmesi
$\mu$	: Coulomb sabiti

Not: Burada gösterilmeyen semboller metin içerisinde ilgili yerlerde tanımlanmışlardır.

## Kısaltmalar

AIR	: Artçı Şok Etki Oranı (Aftershock Influence Ratio)
AS	: Artçı Şok (Aftershock)
AV	: Ortam Titreşimi (Ambient Vibration)
BPF	: Bant Geçiren Filtre (Band-Pass Filters)
BSF	: Bant Durduran Filtre (Band-Stop Filters)
BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (Carbon-Fiber-Reinforced Polymers)
ÇSDS	: Çok Serbestlik Dereceli Sistemler
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
EMA	: Geleneksel Deneysel Modal Analiz (Experimental Modal Analysis)
EW	: Doğu-Batı (East-West)
FF	: Uzak Alan (Far-Field)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FRF	: Frekans Davranış Fonksiyonu (Frequency Response Function)
FTAA	: Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi
GFTAA	: Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi
HCC	: Ağır Kalsiyum Karbonat (Heavy Calcium Carbonate)
HPF	: Yüksek Geçiren Filtre (High-Pass Filters)
HRWR	: Yüksek Oranlı Su Azaltıcı (High-Range Water-Reducing)
IEPE	: Entegre Elektronik Piezoelektrik (Integrated Electronics Piezo Electric)
LPF	: Alçak Geçiren Filtre (Low-Pass Filters)
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistem (Microelectromechanical System)
MS	: Ana Şok (Mainshock)
NCSs	: Yapısal Olmayan Bileşenler ve Sistemler (Nonstructural Components and Systems)
NS	: Kuzey- Güney (North-South)
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
PEER	: Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pacific Earthquake Engineering Research Center)
PGA	: Maksimum Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
PGD	: Maksimum Yer Değiştirme (Peak Ground Displacement)
PGV	: Maksimum Yer Hızı (Peak Ground Velocity)
PP	: Tepe Genlik Yöntemi (Peak Picking)
PRC	: Kısmen Öngerilmeli Betonarme Kolon (Partially Prestressed Reinforced Concrete Column)
PTMS	: Ard Gerilmiş Metal Çemberleme (Post-Tensioned Metal Strapping)
RAC	: Geri Dönüştürülmüş Agregalı Beton (Recycled Aggregate Concrete)

RC	: Betonarme (Reinforcement)
RMS	: Karekök ortalama (Root Mean Square)
SAB	: Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi
SE	: Sonlu Elemanlar
SMA	: Şekil Hafızalı Alaşım (Shape Memory Alloys)
TBDY	: Türk Bina Deprem Yönetmeliği
TMA	: Teorik Modal Analiz
TSDS	: Tek Serbestlik Dereceli Sistemler
UD	: Aşağı-Yukarı (Up Down)
UHDCC	: Ultra Yüksek Süneklığe Sahip Çimentolu Kompozitler (Ultra-High Ductility Cementitious Composites)
UHMWPE	: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene)



## 1. GİRİŞ

Depreme karşı yapıların ayakta kalabilmesi yapının enerji yutabilme kapasitesine ve dayanımına bağlıdır. Kolonlar yapının enerji yutma kapasitesinde etkili taşıyıcı sistemlerden biridir. Betonarme yapılarda taşıyıcı sistem elemanlarının sünek davranış göstermesi deprem sırasında açığa çıkan enerjinin yutulmasında ve tüketilmesinde önemli rol oynar. Deprem yüklerine karşı doğru tasarlanmayan kolonlar sonucunda yapıda önemli hasarlar ve göçmeler oluşmaktadır. Özellikle perdesiz olarak tasarlanmış yapılarda temeller ve yatay taşıyıcı elemanlar arasındaki tek bağlantı kolonlar olduğundan yapıyı oluşturan elemanlar arasında önem bakımından ilk sırada yer alırlar. Yapılan araştırmalar sonucunda yatay taşıyıcı elemanları hasar görmüş ya da yıkılmış olduğu halde ayakta duran binalara rastlanırken sadece bir kolonunun hasar görmesi yüzünden yıkılan yapılar olduğu saptanmıştır. Bu nedenle son yıllarda betonarme yapılardaki araştırmalar kolon üzerine yoğunlaşmaktadır. Kolonların tasarımında eğilme momenti ve eksenel kuvvet etkilerini karşılamak üzere yerleştirilen donatıların oranı ve sarılma tekniği önem arz etmektedir.

Mevcut yapıların depreme karşı güvenli tahmini ve yeni yapısal deprem tasarımı için yapıların dinamik davranışlarının tespit edilmesi önemlidir. Teorik modal analiz ile yapıların dinamik parametreleri bulunabilmektedir ancak bu parametreler çözüm yönteminin sınırlı olması neticesinde yapılan kabullerden dolayı yapının gerçek dinamik davranışını belirleyememekle birlikte yaklaşık sonuçlar vermektedir. Bu sebepten yapı sisteminin dinamik davranışını doğru şekilde yansıtan, teorik modal analiz ile ortaya konulan matematiksel modellerin ve bu modellerin çözümü sonucunda elde edilen dinamik karakteristiklerin dinamik deneyler ile doğrulanması gerekmektedir.

Bu tez çalışması, ilgili literatürün gözden geçirilmesinden modal analiz yöntemleri hakkında temel bilgilerin verilmesine, deneysel programın tasarımına ve ardından deney numunelerinin performansının değerlendirilmesine kadar ilerleyen yedi bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerin içerikleri hakkında aşağıda kısaca bilgi verilmiştir:

1. bölüm giriş bölümüdür. Bu bölümde tezin konusu, kapsamı ve amacı hakkında bilgi verilerek tezin ana hatlarından bahsedilmiştir.

2. bölüm kaynak araştırması olup sarsma tablası ile ilgili literatürün bir özetini içermektedir. Sarsma tablası ile yapılmış çalışmalar iki grup altında tasnif edilerek bu çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

3. bölümde kolon türleri ve donatı tanımları yapılarak sargı donatısının kolon davranışı üzerindeki etkisinden bahsedilmiştir. Yapı dinamik parametreleri (frekans, periyot, sönüm oranı, mod şekli) açıklanmıştır. Ayrıca dinamik analiz için en önemli terim olan titreşimden bahsedilerek titreşim türleri anlatılmış, yer hareketi parametreleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

4. bölümde modal analizden bahsedilerek modal analiz türleri ve formülasyonları incelenmiştir. Bu tez çalışmasında dinamik parametreleri tespit etmede kullanılan frekans davranış fonksiyonu (Frequency Response Function-FRF), hızlı fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT), tepe genlik (Peak Picking-PP), yarım güç bant genişliği (Half Power Bandwidth) yöntemleri hakkında temel bilgiler verilmiştir.

5. bölüm materyal ve yöntem bölümüdür. Kolon modelini oluşturma aşamaları, deney numunelerinde kullanılacak malzemelerin özellikleri ve kolon numunelerinin üretim aşamaları anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde deneysel konfigürasyon, uygulanan yükleme prosedürü, veri toplama sistemi, analizde kullanılan ekipmanlar, alet ve teçhizatlar yer almaktadır.

6. bölüm araştırma sonuçları ve tartışma bölümüdür. Kolon numunelerinin sarsma tablasında test edilmesi sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır. Farklı etriye aralığına ve donatı sınıfına sahip ölçekli kolon numuneleri karşılaştırılarak performanslarının değerlendirilmesi, deneysel sonuçlara dayalı sayısal ve grafiksel datalarla gösterilmektedir. Ölçekli üretilmiş betonarme kolonların geleneksel deneysel modal analiz ile bulunan doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları değerlendirmeleri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

7. bölüm sonuçlar ve öneriler bölümüdür. Tez çalışmasında test edilen kolon numunelerinin geçerliliği ve yetersiz detaylandırılmış kolonların küresel performansı özetlenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar yorumlanarak ileri araştırmalarla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

## 1.1. Tezin Amacı

Ülkemizdeki yapı stoğunun büyük bir bölümünü betonarme yapılar oluşturmaktadır. Özellikle 1990 yılından önce tasarlanan betonarme binalar güncel yönetmelik standartlarının yükümlülüklerini karşılamamaktadır. Bu yapıların çoğunluğu yeterli denetim mekanizmasının olmaması sebebiyle sadece güncel yönetmelik standartlarını değil, inşa edildikleri dönemde yürürlükte bulunan yönetmeliklerin yükümlülüklerini de karşılayamamaktadırlar. Bu yüzden bu betonarme yapıların önemli bir kısmı, yetersiz enine donatıya ve düşük donatı sınıfına sahip kolonlardan (özellikle sadece yerçekimi yüklerini karşılamak için tasarlananlar) oluşmaktadır. Son zamanlarda meydana gelen depremler kolonlarda etriye miktarının, donatılar arasındaki mesafenin ve donatı sınıfının yetersiz olduğunu göstermiştir. Bu çalışma betonarme bir kolonda etriye aralığının ve donatı sınıfının yapı dinamik davranışına etkisinin araştırılmasına odaklanmaktadır.

Bu tez çalışmasının amaçları:

1. Betonarme kolonların geleneksel deneysel modal analiz yöntemiyle doğal titreşim frekanslarını ve sönüm oranlarını belirlemek,
2. Tekrarlı yükleme prosedürleri altında betonarme kolonların dinamik davranışlarını saptamak,
3. Farklı etriye aralığına sahip betonarme kolonların dinamik performanslarını doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları yönünden karşılaştırmak,
4. Farklı donatı sınıfına sahip betonarme kolonların dinamik performanslarını doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları yönünden karşılaştırmak,
5. Yetersiz detaylandırılmış kolonların geçerliliğini ve uygulanan donatı düzeninin güvenilirliğini tespit etmektir.

## 1.2. Tezin Konusu ve Kapsamı

Kolonlar deprem etkisi altında tersinir ve tekrarlı yüklere maruz kalan eksenel yük elemanlarıdır. Deprem etkisi altındaki yüklerin karmaşıklığı nedeniyle betonarme yapılarda kolon davranışının analizi oldukça önemlidir. Deprem etkisi altındaki

yapıların davranışını gerçekçi bir şekilde belirleyebilmek için deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek boyutlu ya da belirli bir ölçekte küçültülmüş numunelerin dinamik etkiler altındaki davranışlarını belirlemek için kullanılacak farklı deneysel yöntemler vardır. Bunlardan biri de sarsma tablası deneyleridir. Sarsma tablası en basit tanımıyla bir, iki ya da üç boyutlu titreşim hareketlerini yapay olarak üretilen depremi taklit ederek karakteristik sismik titreşimler altında yapıların ve yapısal olmayan bileşenlerin davranışını değerlendirmeye olanak sağlayan platforma verilen isimdir. İncelenecek kolonlar sarsma tablasına rijit olarak bağlanarak, dinamik deney gerçekleştirilmektedir. Sarsma tablasının temel çalışma prensibi rijit tablaya bağlanmış numunenin istenilen bir ivme fonksiyonu ile titreştirilmesidir.

Bu tez çalışmasında farklı etriye aralığına ve donatı sınıfına sahip altı adet ölçekli betonarme kolon üretilmiştir. Üretilen deney numuneleri sarsma tablasında sismik uyarıya tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin gösterdikleri tepkiler ivmeölçerler ile ölçülmüştür. Zaman tanım alanında elde edilen veriler hızlı fourier dönüşümü ile frekans tanım alanına dönüştürülmüştür. Dönüştürülmüş datalar üzerinde hata ayıklama ve filtreleme yapılarak frekans davranış fonksiyonu elde edilmiştir. FRF üzerinden tepe genlik yöntemi ile kolonların doğal titreşim frekansları, yarım güç bant genişliği yöntemi ile de kolonların sönüm oranları bulunmuştur. Bulunan değerler karşılaştırılarak yapının dinamik yükler sonucunda davranışını etkileyen parametrelerin etki oranları tespit edilmiştir: Elde edilen veriler neticesinde kolonların doğal titreşim frekanslarını etriye aralığının yaklaşık %6-7 oranında, donatı sınıfının yaklaşık %25 oranında etkilediği; kolonların sönüm oranını ise etriye aralığının %4.98-9.6, donatı sınıfının %36-39 oranları arasında etkilediği saptanmıştır.

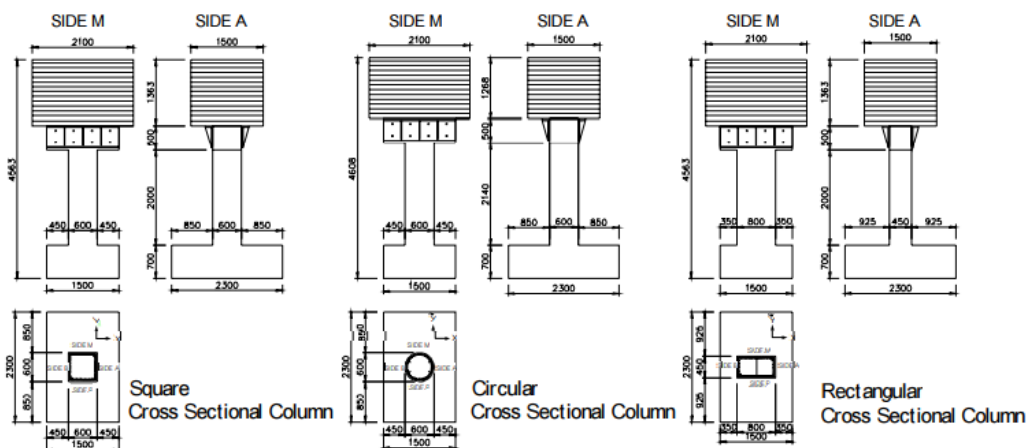
## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sarsma tablası deneyleri deprem ya da yapay ivme kayıtlarının test numunelerine uygulanabildiği deneylerdir. Sarsma tablasının boyutlarına göre tam boyutlu numuneler test edilebildiği gibi ölçekli numuneler üzerinde de deney gerçekleştirilebilmektedir. Literatürdeki sarsma tablası deney çalışmaları iki grupta incelenmiştir:

- Kolon üzerinde gerçekleştirilen deneyler
- Çerçeve/ yapı üzerinde gerçekleştirilen deneyler

### 2.1. Kolon Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

(Nishida ve Unjoh, 2004) üç betonarme kolon numunesinin dinamik davranış özelliklerini sarsma tablasında test etmiştir. Sarsma tablasındaki kolon numunelerine iki yönlü deprem yer hareketi titreşimi uygulanmıştır. Betonarme kolon numuneleri kare, dairesel ve dikdörtgen olarak tasarlanmıştır. Bu numunelerde; boyuna donatı oranı kare ve dikdörtgen kolonlarda %0.95, dairesel kolonda %1.01, kolon tabanından atalet merkezine olan yükseklik 3000 mm, etriye aralığı 75 mm, pas payı 40 mm, boyuna donatı çapı 10 mm'dir. Kare kolonlar (600 × 600 mm), dairesel kolonlar 600 mm ve dikdörtgen kolonlar (450 × 800 mm) boyutundadır (Şekil 2.1).



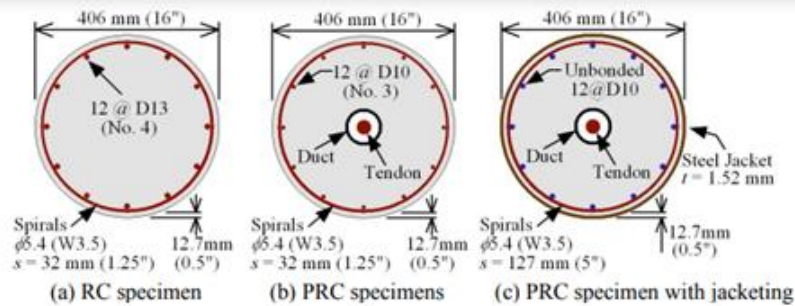
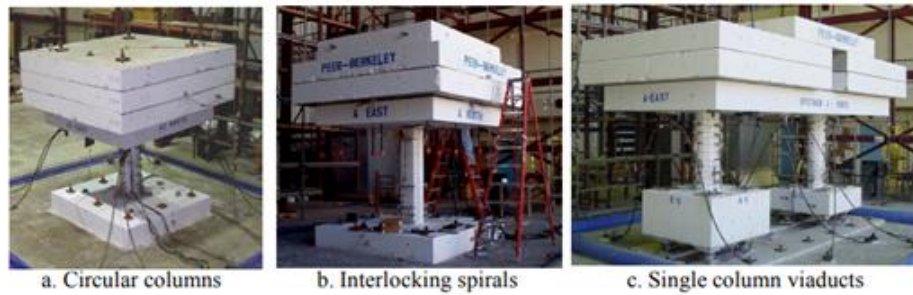
Şekil 2.1. Kolonların enine kesitleri (Nishida ve Unjoh, 2004)

Hasar alanı dairesel kolonda temelden yaklaşık 450 mm yükseklikte yoğunlaşırken kare kolonda temelden yaklaşık 500 mm yükseklikte yoğunlaşmıştır.



Dikdörtgen kolonda kabuk betonu temelden yaklaşık 400 mm yüksekliğe kadar sıyrılmıştır. Kalıcı yer değiştirme; kare kolonda her bir kesit yönü için yaklaşık 10 mm, dairesel kolonda X yönünde yaklaşık 10 mm ve Y yönünde 5 mm, dikdörtgen kolonda X yönünde yaklaşık 1 mm ve Y yönünde 5 mm bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, kolonun iki yönlü uyarılmasının kolonun doğrusal olmayan tepki davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Nishida ve Unjoh, 2004).

(Mahin ve ark., 2005) modern köprü yapılarının şiddetli depremlere karşı davranışının anlaşılmasını geliştirme çabalarını vurgulayan; konvansiyonel-yeni geliştirilmiş, kendinden merkezli güçlendirilmiş köprü kolonlarını, tek yönlü ve çok yönlü uyarılar altında sarsma tablasında test etmiştir. Testler, spiral takviyeli modern dairesel kolonlar, birbirine geçen spirallere sahip dikdörtgen kolonlar ve kısmen öngerilmeli dairesel kolonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tek kolonlu bir viyadükten basit bir çerçevede tasarlanmıştır. Kolon çapları 406 mm'dir ve kolonun tabanından üst kütleliğin ağırlık merkezine kadar olan yükseklik 2.44 m'dir (Şekil 2.2). Tasarım beton dayanımı 34.5 MPa'dır. Numunelerin üzerine köprü üst yapısından gelen sabit yükü idealize etmek ve atalet kuvveti oluşturmak için büyük beton bloklar eklenmiştir.

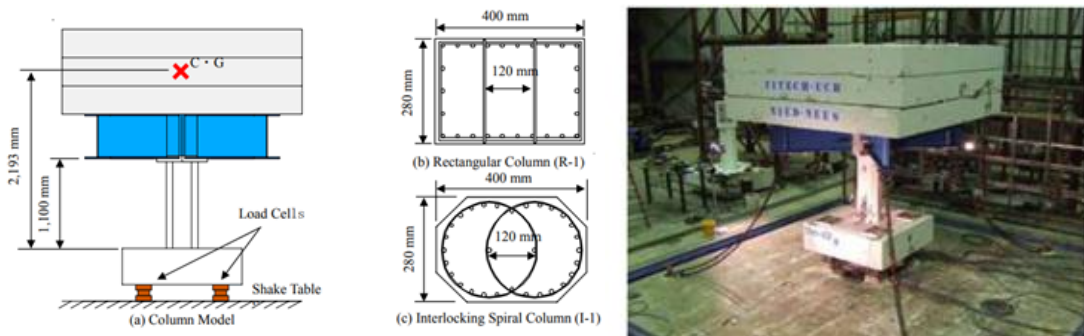


Şekil 2.2. Kolonların sarsma tablası testleri ve enine kesitleri (Mahin ve ark., 2005)

Bağlanmamış ardgerme tendonlara sahip kısmen öngerilmeli betonarme kolonlar (PRC) geleneksel kolonlarla yaklaşık olarak aynı rijitlik ve dayanıma sahipken kuvvetli

sarsıntıyı takiben kalıcı yer değiştirmeler genellikle %70-80 oranında az bulunmuştur. PRC kolonlarının tepe yer değiştirmeleri tipik olarak geleneksel bir kolon için olanın %10'u dahilindedir. Birbirine kenetlenen spirallere sahip kolonlar, geometrik doğrusalsızlıklar nedeniyle zayıf eksen yönünde potansiyel kararsızlıklar sergilemiştir. Birçok durumda, şiddetli depremin ardından köprü kolonlarında önemli bir kalıcı yanıl yer değiştirmenin oluştuğu kaydedilmiştir. Mevcut doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin doğruluğunu değerlendirmeye yardımcı olmak için, tek sütunlu bir viyadük modelinden iki sütunlu basit bir çerçevede test edilmiştir ancak yapılan sistemin tepkisinin karmaşık olduğu ve analitik olarak tahmin edilmesinin zor olduğu belirtilmiştir. Bu sistemleri içeren köprü mekanizmalarına yönelik tasarım detaylarını iyileştirmek ve doğrulamak için ek araştırmalara ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır (Mahin ve ark., 2005).

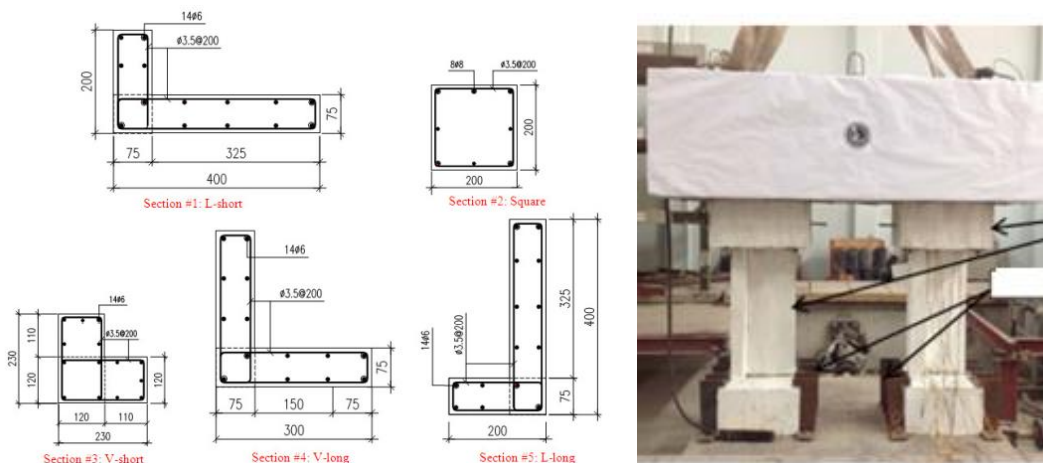
(Matsumoto ve ark., 2008) çapraz bağları olan betonarme dikdörtgen kolonların ve birbirine kenetlenen spiral kolonların sismik performansını değerlendirmek için bir dizi sarsma tablası deneyi yapmıştır. Çapraz bağlantılı iki dikdörtgen kolon modeli ve aynı kesit boyutlarına sahip birbirine kenetlenen iki spiral kolon modeli yapılmıştır. Dikdörtgen kolon ve birbirine kenetlenen spiral kolonlar (280 x 400 mm) boyutlarında ve 1100 mm yüksekliğinde olup kolon tabanından üç kütle bloğunun ağırlık merkezine olan mesafe 2193 mm'dir (Şekil 2.3). Kolonlara toplam ağırlığı 226.6 kN olan üç beton kütle bloğu eklenmiştir. Boyuna donatılar 10 mm ve etriyeler 6 mm çapındadır. Modellere sarsma tablası kullanılarak 3 boyutlu uyarı için 1995 Kobe, Japonya depremi sırasında JR Takatori İstasyonunda kaydedilen yer ivmelerinin Kuzey-Güney (NS), Doğu-Batı (EW) ve Aşağı-Yukarı (UD) bileşenleri sırasıyla boyuna, enine ve düşey yönlerde uygulanmıştır. Orijinal ivmelerin zaman eksenini 1/6 oranında ölçeklenmiştir. Modeller ilk önce elastik seviyede kalacak şekilde uyarılmıştır. Daha sonra ivme şiddetleri arttırılmıştır.



Şekil 2.3. Betonarme kolonların enine kesitleri ve sarsma tablasına kurulumu (Matsumoto ve ark., 2008)

İlk uyarım seviyeleri altındaki dikdörtgen ve birbirine kenetlenen spiral kolonlarda hasar sadece kaplama betonunun kabarması şeklinde ortaya çıkmış olup boyuna donatılarda burkulma ve kırılma meydana gelmemiştir. Hem birbirine kenetlenen spiral kolonlar hem de dikdörtgen kolonlar ilk seviye uyarıları altında tatmin edici bir performans sergilemiştir. Tekrarlanan, beklenenden daha güçlü uyarılar altında, her uyarıdan sonraki hâkim doğal periyot, dikdörtgen kolonlarda birbirine kenetlenen spiral kolonlardan daha yüksek çıkmıştır. (Matsumoto ve ark., 2008).

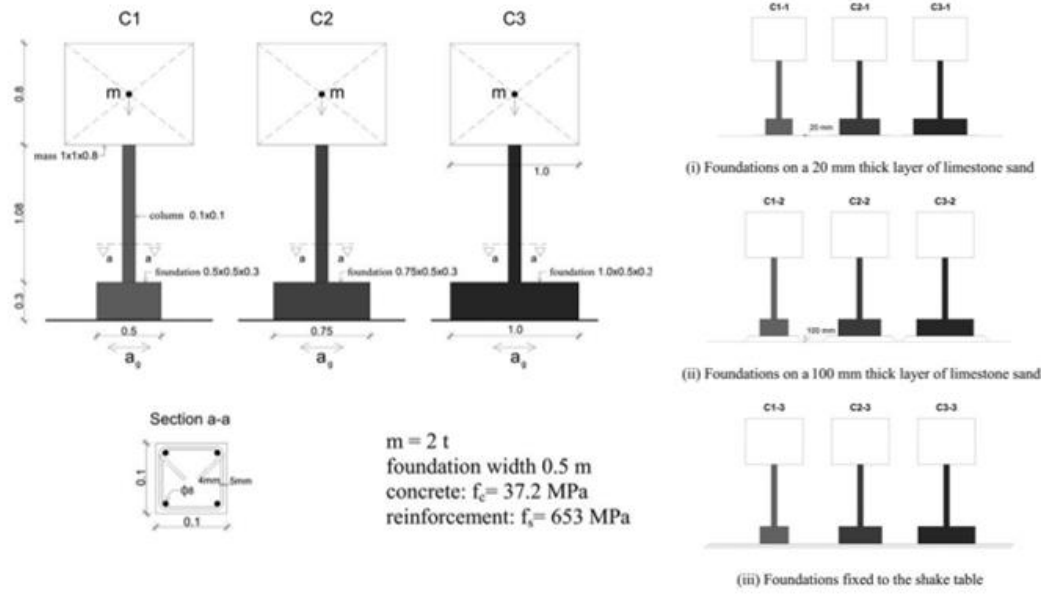
(Nguyen ve ark., 2015) sismik performans üzerinde kesit şeklinin etkilerini araştırmak için prototip binanın yumuşak katının 1/4 ölçekli düzensiz şekilli on adet betonarme kolon numunesini üreterek sarsma tablasında test etmiştir. Numuneler aynı kesit alanına, ancak farklı kenar genişliğine ve kenar kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Kolonlar geleneksel kare, L ve V şeklinde farklı kesitlerde tasarlanmıştır. Tüm kolonlar,  $40,000 \text{ mm}^2$ 'lik aynı brüt alana ve çevre kenarları boyunca eşit olarak dağıtılan %1'lik aynı miktarda boyuna donatıya sahiptir. Boyuna donatılar ve etriyeler için 6 mm ve 3.5 mm çapa sahip çubuklar kullanılmıştır. Etriyeler 200 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. 900 mm uzunluğundaki kolon gövdesinin üstüne beton blok ( $0.84 \times 0.7 \times 2.4 \text{ m}$ ) eklenmiştir (Şekil 2.4). Sarsma tablası testi için giriş sinyali, Tolmezzo depremine karşılık gelen toprak tipi B olan Eurocode 8 spektrumlarından türetilmiştir. Yükleme prosedürü, test yapısı çökene kadar art arda en yüksek yer ivmesini arttırılması şeklindedir. Tek eksenli sarsma tablası kullanılarak on kolon numunesi üzerinde beş sismik dinamik test gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Deneysel numunelerin kesit tasarımı ve sarsma tablasına kurulumu (Nguyen ve ark., 2015)

Sarsma tablası testi sonucunda düzgün tasarlanmışsa düzensiz şekilli kolonların (L, V şekilli) geleneksel kare kesitli kolonlara kıyasla daha iyi sismik performans sergilediği tespit edilmiştir. Kare kesitli numune aksel göçme durumunda, donatıların kırılması ve şiddetli beton ezilmesi nedeniyle mukavemetinin çoğunu kaybederken düzensiz şekilli kolonlar kalıcı mukavemetlerini koruyabilmişlerdir. V-uzun şekilli kolonun, kullanılabilir alandan tasarruf etme, iç mimari gereksinimleri karşılama ve genel yanal rijitliğe önemli ölçüde katkıda bulunmadaki dikkate değer avantajları sebebiyle verilen numuneler arasındaki en iyi seçim olduğu belirtilmiştir. Geleneksel kare kolonlar tarafından absorbe edilen enerjinin iki katı kadar sismik enerji miktarını V-uzun şekilli kolon absorbe edebilmiştir. Yazarlar geleneksel kare kesitli kolonlara kıyasla, L ve V şekilli kolon kullanımının sadece her daire köşesindeki iç mimari gereksinimi karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda binanın genel yanal rijitliğinde önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir (Nguyen ve ark., 2015).

(Radnić ve ark., 2015) farklı temel boyutuna (uzunluğuna) sahip konsol betonarme kolonların davranışını sarsma tablası kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Kolon parametreleri (narinlik, malzeme özellikleri, donatı, üst kısımdaki kütle vb.) test edilen tüm yapılar için eşit tutulup temel için 3 farklı yerleşim boyutu benimsenmiştir: 20 mm kalınlığında bir kireçtaşı kumu tabakası üzerine sabitlenmiş temeller, 100 mm kalınlığında bir kalker kumu tabakası üzerine sabitlenmiş temeller ve sarsma tablasına sabitlenmiş temeller. Test edilen yapılar, yapay bir ivme kaydının tekrarlanan yatay taban ivmelerine maruz bırakılarak zamanla ivmeleri kademeli olarak artırılmıştır. Tüm kolonlar 1.08 m yüksekliğinde (narinlik  $\lambda = 75$ ), kare kesitli (0.1 x 0.1 m)'dir. Kolonların üstüne (1 x 1 x 0.8 m) boyutlarında beton bloktan yapılmış iki tonluk bir kütle yerleştirilmiştir (Şekil 2.5). C1 temeli 0.5 m, C2 temeli 0.75 m ve C3 temeli 1 m uzunluğundadır. Tüm temeller 0.5 m genişliğinde ve 0.3 m yüksekliğindedir. Kolonlar 4Ø8 mm boyuna donatı ve 50 mm aralıklarla Ø4.2 etriyeler ile güçlendirilirken temelerde üst ve alt bölgede 4Ø10 boyuna donatılarla ve 100 mm aralıklı etriyelerle güçlendirilmiştir.

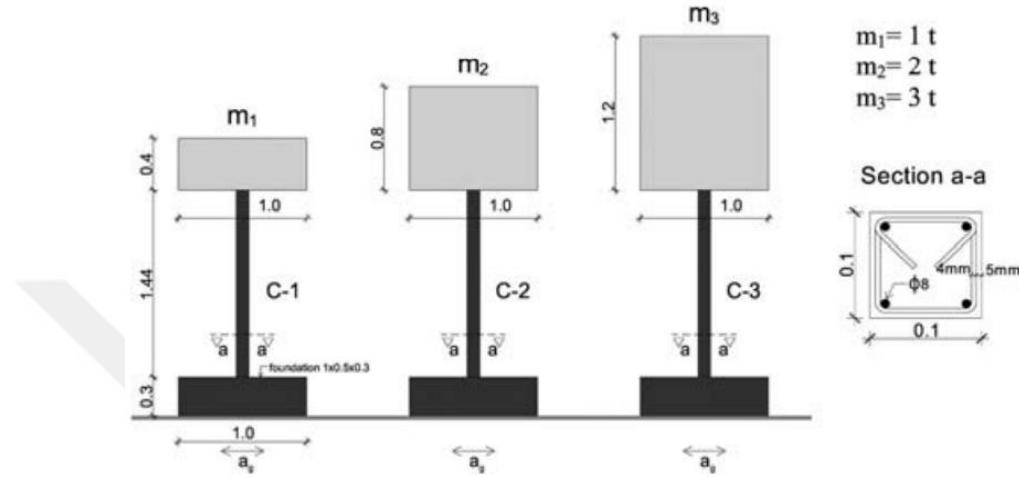


Şekil 2.5. Test edilen kolonların geometrik verileri (Radnić ve ark., 2015)

Temelin yerleşim boyutunun, özellikle daha büyük yer ivmeleri için, deprem koşullarında betonarme kolonun davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Düşük deprem ivmelerinde temelin yerleşim boyutunun kolonun davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı; daha büyük deprem ivmelerinde ve özellikle temelin yerleşim boyutu (uzunluğu) küçük olduğunda, temelde önemli dönüşlerin meydana gelebileceği belirtilmiştir. Temelin daha küçük yerleşim boyutu (uzunluğu), yapıyı daha esnek hale getirerek deprem yüklemesinde yapıda daha düşük atalet kuvvetleri ve daha büyük yer değiştirmelere neden olmuştur. Temelin daha büyük yerleşim boyutu yapıyı güçlendirerek yapıda daha büyük atalet kuvvetleri ve daha düşük yer değiştirmeler oluşturmuştur. Temel ile destekleyici zemin arasındaki kireçtaşı kum veya çakıl tabakası, deprem yükü altındaki kolonların davranışını değiştirmesinden dolayı bu katmanın, uygun kalınlık ve sıkılaşmada deprem yalıtımı görevi görebileceği belirtilmiştir. Yapılan deneylerde ince kireçtaşı kum tabakasının kalın tabakaya göre daha verimli olduğu vurgulanmıştır. Temeli kalın kum tabakasına dayanan kolonların davranışı, temeli sarsma tablasına sabitlenmiş kolonların davranışından biraz daha olumlu olmuştur (Radnić ve ark., 2015).

(Grgić ve ark., 2016) kütleli; ölçekli betonarme kolonların deprem yükü altındaki davranışına ve limit taşıma kapasitesine etkisini sarsma tablasında kolonların çökmesine kadar artan maksimum ivmelere sahip bir dizi ardışık yatay yer ivmesi uygulayarak incelemiştir. Kütleli 1, 2 ve 3 t olan üç ölçekli betonarme konsol kolon test

edilmiştir. Tüm kolonlar 1.44 m yüksekliğinde ve kare kesitli (0.1 × 0.1 m)'dir. Tüm temeller aynı, 0.5 m genişliğinde, 0.3 m yüksekliğinde ve 1 m uzunluğundadır (Şekil 2.6). Kolonlar, 4Ø8 boyuna donatılar ve 50 mm aralıklı Ø4.2 etriyeler ile güçlendirilmiştir. Betonun nihai basınç dayanımı 37.2 MPa'dır. Kütle merkezi, kolonun eksenine ile çakışmaktadır.

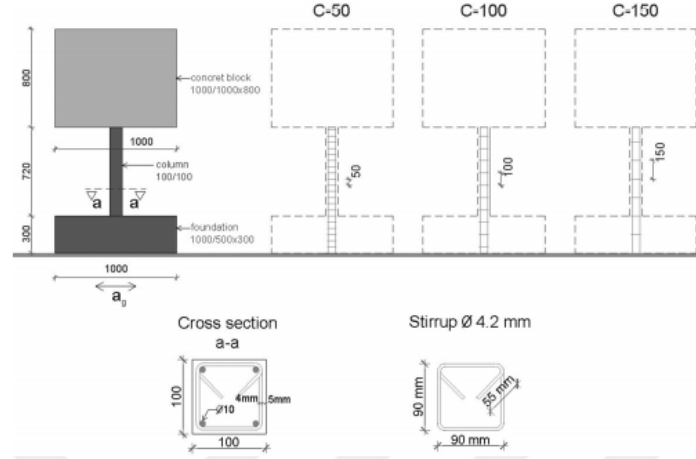


Şekil 2.6. Test edilen kolonların temel verileri (Grgić ve ark., 2016)

Beton blok boyutlarının kolonun davranışı ve taşıma kapasitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Kolonların limit taşıma kapasiteleri, üstlerindeki kütlelerin artmasıyla orantılı olarak azalmamıştır. Üstte 1 t kütleli bir kolon  $a_{g \max} = 0.45 g$ 'da çökmüş ve üstte 3 t kütleli aynı kolon  $a_{g \max} = 0.25 g$ 'da çökmüştür. Bu nedenle, (1:3) kütle oranı için, aynı kolonun limit taşıma kapasitesinin (1:1.8) olduğu belirtilmiştir. Kütle boyutunun kolonların limit taşıma kapasitesi üzerinde büyük etkisi olduğu, ancak bu etkinin kütle boyutu ile lineer olarak orantılı olmadığı sonucuna varılmıştır. Kolonların tepesindeki bir kütlelerin davranışı ve limit taşıma kapasitesi üzerindeki etkisine ilişkin kesin sonuçlara varmak için kapsamlı deneysel çalışmalara ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır (Grgić ve ark., 2016).

(Grgić ve ark., 2017) farklı etriye aralıklarına sahip üç eşit ölçekli konsol betonarme kolonun davranışını, sarsma tablası kullanarak deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla C-50, C-100 ve C-150 kolonlarına sırasıyla 50 mm, 100 mm ve 150 mm aralıklarla etriye demetleri yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan kolonlar kare kesitli (0.1 x 0.1 m) olup tüm kolonların yüksekliği 0.72 m'dir. Kolonlar 1 m uzunluğunda 0.5 m genişliğinde ve 0.3 m yüksekliğinde temellerle sınırlandırılmışlardır. Ayrıca kolonların tepesinde (1 x 1 x 0.8 m) boyutlarında 2 tonluk bir beton blok bulunmaktadır (Şekil

2.7). Test sırasında deprem ivmeleri kademeli olarak artırılmıştır. İlk uyarma için maksimum ivme,  $a_{g \max} = 0.05 \text{ g}$ 'dir. Sonraki uyarımlar için, art arda  $0.05 \text{ g}$  artarak  $0.4 \text{ g}$ 'a çıkarılmıştır.



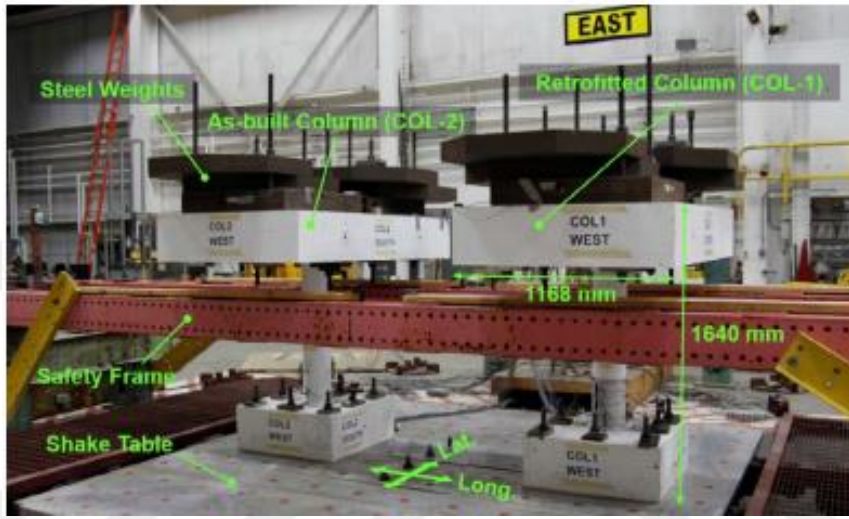
Şekil 2.7. Betonarme kolonların kesit özellikleri (Grgić ve ark., 2017)

Bu çalışma sonucunda betonarme kolonlardaki etriyeler arası mesafenin, deprem sırasında betonda oluşan çatlakların sayısı, yeri, aralığı ve genişliğinin yanı sıra, içindeki çatlak bölgelerinin boyutu üzerinde de büyük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Etriye demirlerinin aynı şekli ve kesit alanı ile etriye aralığının azaltılmasıyla kolonlar sertleşmiştir. Bu, düşük ivmeli uyarım altında daha küçük yer değiştirmelere ve biraz daha büyük atalet kuvvetlerine yol açmıştır. Daha yüksek hızlanma seviyelerine sahip uyarımlar altında, daha yoğun etriye demirlerine sahip kolonlardaki maksimum yer değiştirmeler, daha fazla etriye aralığı olan kolonlara göre biraz daha düşük bulunmuştur. Etriye demirlerindeki gerilmelerin, betondaki basınç gerilmelerini azalttığı ve basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür (Grgić ve ark., 2017).

(Jung ve ark., 2018) betonarme köprü kolonlarının sismik güçlendirme ve acil onarımında şekil hafızalı alaşım (SMA) sınırlaması uygulanmasını bir dizi sarsma tablası testi gerçekleştirerek deneysel olarak incelemiştir. SMA spiralleri ile güçlendirilen ve onarılan iki adet 1/6 ölçekli betonarme kolon, değişen yoğunlukta çift yönlü test hareketleri altında aynı anda test edilmiştir. 1971 öncesi sismik tasarım hükümlerine dayalı olarak tasarlanan 203 mm çaplı betonarme kolonlar, temel ( $813 \times 813 \times 305 \text{ mm}$ ) ve kolon başlığı ( $1930 \times 1168 \times 305 \text{ mm}$ ) arasında 1029 mm'lik net bir yüksekliğe sahiptir (Şekil 2.8). Yeterli eğilme sünekliğine sahip olmayan prototip betonarme kolonun zayıf sismik detaylandırmasını yansıtmak için kolonların yüksekliği



boyunca her 89 mm’de 2.67 mm çapında çelik çemberler yerleştirilmiştir. Testten önce, test numunelerinden biri (COL-1), SMA sonradan takılan bir kolonu temsil etmek için plastik menteşe bölgesinde SMA spiralleri ile donatılmıştır. Güçlendirilmiş kolon (COL-1), 305 mm yüksekliğinde 8 mm aralıklı 1.9 mm çaplı NiTiNb alaşımlı spiral ile sarılmıştır. 1634 kg’lık beton başlık ve altı adet 681 kg’lık çelik levha (toplam 5720 kg), atalet kütesini ve kolonun basınç kapasitesinin yaklaşık %5’ine tekabül eden 56 kN’luk eksenel yükü idealize etmek için her kolonun tepesinde yerleştirilmiştir.

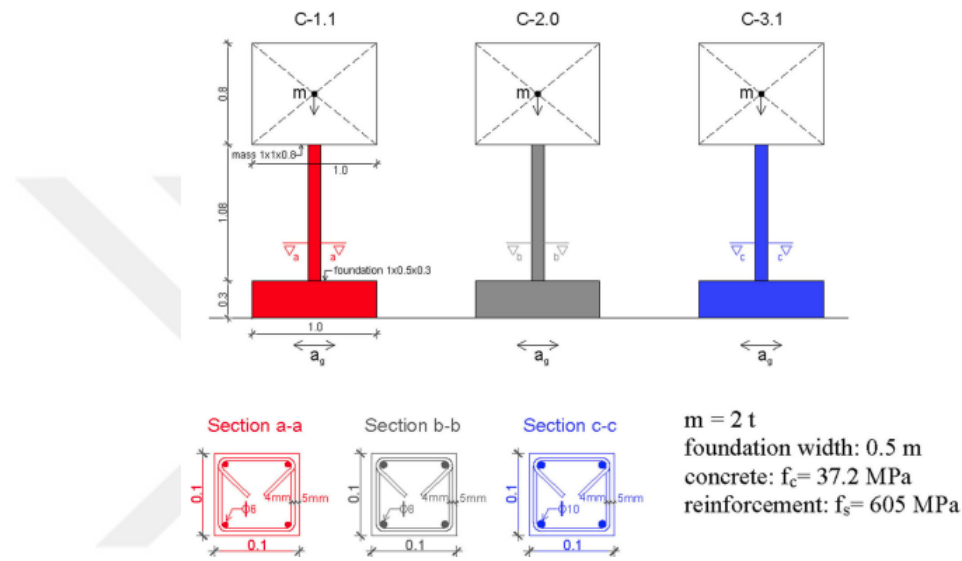


Şekil 2.8. Sarsma tablasına test kurulumu (Jung ve ark., 2018)

Şekil hafızalı alaşım spiralleri sadece betonu güçlü sismik uyarılar altında ezilmekten etkili bir şekilde korumakla kalmamış, aynı zamanda ardışık sismik uyarılar altında takviye çubuklarında ilerleyen hasarın geciktirilmesine katkıda bulunmuştur. Sadece 2.5 saatte tamamlanan SMA onarım tekniği, hasarlı kolonun (COL-2) sismik kapasitesini geri kazanmasında ve sonraki sismik olaylarda daha fazla beton hasarının önlenmesinde etkili olmuştur. Güçlü sismik uyarılara maruz kalan SMA kolon (COL-1), güçlü ardışık uyarılar altında yüksek süneklik tepkisi göstermiştir. Yapılan çalışmanın ikincil bir sonucu olarak, sismik uyarıların yönünün art arda değiştirilmesinin, darbe/şok yükleme etkisine atfedilen kolon maksimum ve kalıcı ötelemelerinde önemli artışlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Test sonucunda, SMA sınırlamasının sismik hasarı azaltmada ve güçlü depremlere maruz kalan, güçlendirilmiş ve onarılmış betonarme kolonların sismik performansını iyileştirmede oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır (Jung ve ark., 2018).



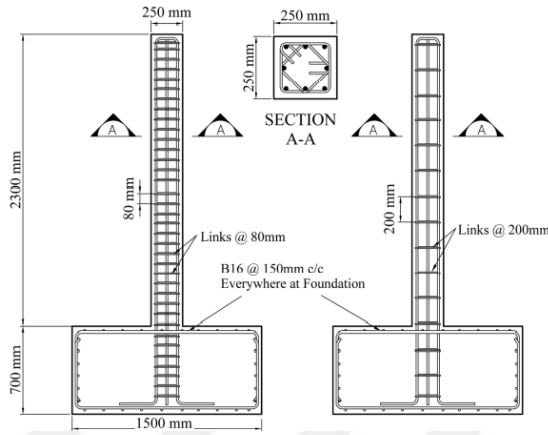
(Grgić ve ark., 2018) 1/3 ölçekli konsol betonarme kolonların deprem sırasında davranışı ve sınır taşıma kapasitesi üzerindeki boyuna donatı miktarının etkisini sarsma tablası kullanarak incelemiştir. Deneylede sadece boyuna donatı miktarı değişmiştir. Tüm kolonlar 1.08 m yüksekliğinde, (0.1 x 0.1 m) kare kesitli olup temeller (0.5 x 0.3 x 1 m) boyutundadır. Kütlesi 2 ton olan (1 x 1 x 0.8 m) beton blok kolonların tepesine merkezi olarak yerleştirilmiştir (Şekil 2.9). Kolonlar, çökmelerine kadar art arda artan en yüksek yer ivmesine maruz bırakılmıştır.



Yapılan deneysel araştırma sonucunda betonarme kolonlardaki boyuna donatı alanının, deprem altındaki kolon davranışları üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu, bir kolonun nihai taşıma kapasitesinin ve şekil değiştirebilirliğinin önemli ölçüde boyuna donatı miktarına bağlı olduğu bulunmuştur. Boyuna donatı miktarı artırılarak, kolonun nihai taşıma kapasitesinin arttığı, ancak orantısız olmadığı belirtilmiştir (test edilen kolonlar için boyuna donatının kesit alanı ilişkisi 1: 1.82: 2.82 olmasına rağmen, sınır taşıma kapasiteleri arasındaki ilişki 1: 1.75:2.25 bulunmuştur) (Grgić ve ark., 2018).

(Kashani ve ark., 2019) yer hareketinin durağan olmayan özelliklerinin doğrusal olmayan dinamik tepkiler üzerindeki önemini ve donatı detayının betonarme kolonların yapısal hasarına etkisini araştırmak için bir dizi karşılaştırmalı orta ölçekli sarsma tablası testi gerçekleştirmiştir. Yer hareketi özelliklerinin etkisini incelemek için, dört adet betonarme kolon uzak alan (FF), darbesiz yakın alan (NFWP) ve yakın alan darbe

benzeri (NFPL) yer hareketlerine maruz bırakılmıştır. Her kolon hafif, kapsamlı ve tam hasar sınırı durumlarında test edilmiştir. Ardından, ciddi şekilde hasar görmüş betonarme kolonların performansını araştırmak için artçı sarsıntı uyarıları uygulanmıştır. Tüm kolonlar (250 × 250 mm) kesitinde ve 2300 mm yüksekliğindedir. İyi birleştirilmiş kolonlarda 8Ø16 boyuna donatı ve 80 mm aralıklı 8 mm çapında etriyeler kullanılmıştır. Hafif sınırlı kolonlarda ise 8Ø16 boyuna donatı ve 200 mm'de 8 mm çapında etriyeler kullanılmıştır (Şekil 2.10). Deneylerde atalet kuvvetini oluşturmak için kolonların üstüne 3 tonluk kütle bloğu eklenmiştir.

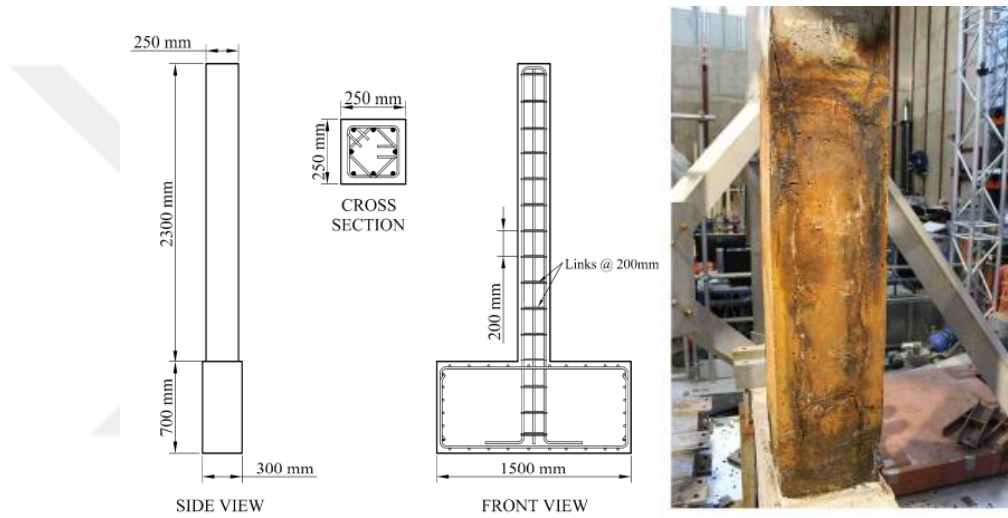


Şekil 2.10. Deney numunelerinin detayları ve sarsma tablasına test kurulumu (Kashani ve ark., 2019)

Betonarme kolon yetersiz detaylandırıldığında ve boyuna donatıların esnek olmayan burkulması olduğunda, kabuk beton daha hızlı parçalanmış ve donatı burkulmasından hemen sonra çekirdek betonu ezilmiştir. Deneysel sonuçlar, yer hareketi türünden bağımsız olarak tüm betonarme kolonların, elastik çatlaksız orijinal rijitliklerinin yaklaşık %20'sine kadar bir rijitlik düşüşü yaşadığını göstermiştir. Sonuçlar anlık frekans tahminlerinin rijitlik kaybının iyi bir ölçüsü olduğunu, bu rijitlik kaybının çatlak oluşumundan kaynaklandığını göstermiştir. Yer hareketi tipinin ve süresinin, uyarma genliği nedeniyle tepe yer değiştirme tepkisini etkilediği bulunmuştur (Kashani ve ark., 2019).

(Ge ve ark., 2020) korozyon hasarının betonarme köprü ayaklarının doğrusal olmayan dinamik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, aşınmış betonarme kolonlar üzerinde sarsma tablası testi yapmıştır. Deney programı, aynı yapısal ayrıntılara sahip, korozyona uğramamış bir kontrol numunesi ve iki korozyonlu betonarme kolon numunesinden oluşmaktadır. Numuneler (1500 × 700 × 300 mm) temel üzerine dökülmüştür. Kolonlar (250 × 250 mm) kare kesitli ve 2300 mm

yüksekliğindedir (Şekil 2.11). Kolonlarda 8Ø16 boyuna donatı ve 200 mm aralıklı 8 mm çapında enine donatı kullanılmıştır. Kolon üzerindeki güverte kütesinden kaynaklanan aksel yükü idealize etmek ve atalet kuvveti oluşturmak için üç metal kütle bloğu (her biri 1 ton) kolonun üstüne rijit bir şekilde bağlanmıştır. Testler sırasında aşınmış numunelerin çökmesi beklendiği için kolonun etrafına bir destek çerçevesi yerleştirilip sarsma tablası üzerinde yükselen kütlelerin sismik olarak indüklenen devrilme momentlerini azaltmak için tabla yüzeyinin köşelerine dört adet metal kütle (1 ton) blok yapıştırılmıştır. İki aşınmış kolonda ortalama %51 ve %65 kütle kaybı oranları vardır.

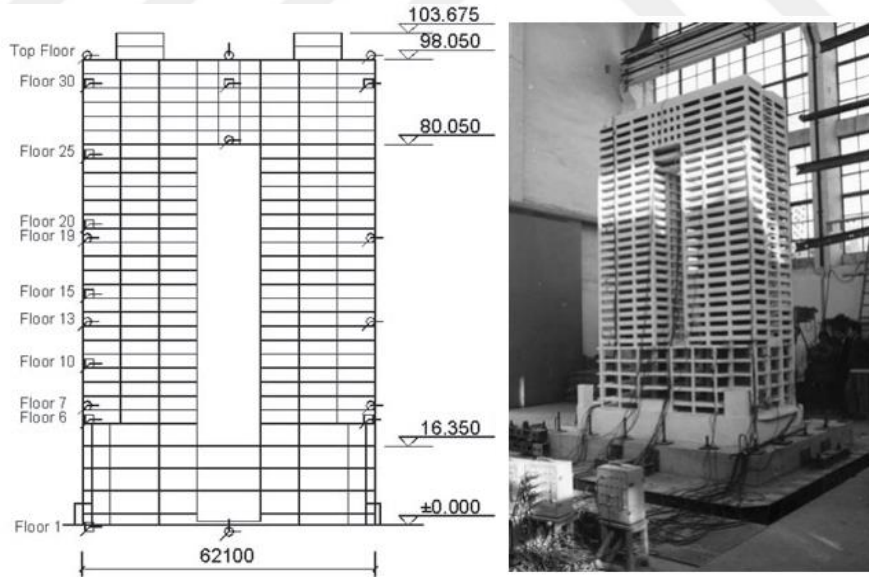


**Şekil 2.11.** Test edilen kolonların geometrik özellikleri ve korozyona uğramış kolon numunesi (Ge ve ark., 2020)

Ağır korozyona uğramış betonarme kolonlar, aynı sismik uyarı altında, korozyonun neden olduğu rijitlik bozulmasından dolayı kontrol kolonuna göre daha büyük yer değiştirme tepkileri göstermiştir. Ciddi derecede korozyona uğramış betonarme kolonların, yüksek genlikli uyarım altında kontrol betonarme kolonlarına kıyasla çok daha az enerji yayma kapasitesi sergilediği belirtilmiştir. Küçük genlikli uyarım seviyelerinde, kontrol kolonları doğrusal elastik tepkiler sergilerken, korozyona uğramış kolonlar simetrik olmayan kuvvet-yer değiştirme döngüleri ile elastik olmayan davranış sergilemiştir. Küçük genlik seviyelerinde, aşınmış kolonlarda kontrol kolonundan daha büyük bir enerji kaybı (enerji kaybında %50'lik bir artış) meydana gelmiştir. Bu, normalde betonarme köprülerde önemli bir hasara yol açmayan küçük büyüklükteki depremlerin bile aşınmış betonarme köprülerde ciddi hasara yol açabileceğini göstermiştir (Ge ve ark., 2020).

## 2.2. Çerçeve/ Yapı Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

(Lu ve ark., 2008) 33 katlı bir betonarme binanın 1/25 ölçekli modeli üzerinde yapının doğal frekansları da dahil olmak üzere dinamik özelliklerini belirlemek, doğrusal sismik tepkileri hakkında bilgi sağlamak ve daha ciddi sarsıntı olaylarına maruz kaldığında hasar modellerini niteliksel olarak anlamak için sarsma tablası ile bir dizi deney gerçekleştirmiştir. KaixuanMen, Şanghay'da, ikisi bodrum katı olmak üzere 33 katlı bir ofis binasıdır (Şekil 2.12). Kule yapısı, üstte altı katlı bir üst geçitle birbirine bağlanan iki alt kuleden oluşan geniş bir açıklığa sahiptir. Her bir alt kuleden merkezinde bir perde duvar sistemi vardır. Bu düzensiz geometrik tasarım, karmaşık dinamik özelliklere ve davranışlara neden olur. Ölçeklenen model 4.449 m üst yapı yüksekliği ve 0.3 m temel yüksekliği dahil olmak üzere 4.749 m yüksekliğindedir. 5960 kg üst yapı ve 6830 kg taban dahil toplam ağırlığı 12790 kg'dır. Sahanın zemin durumuna ve yapının tahmini dinamik özelliklerine göre, test programında 1940 tarihli El Centro kaydı, 1970 Pasadena kaydı ve yapay olarak sentezlenmiş bir ivme kaydı uygulanmıştır.



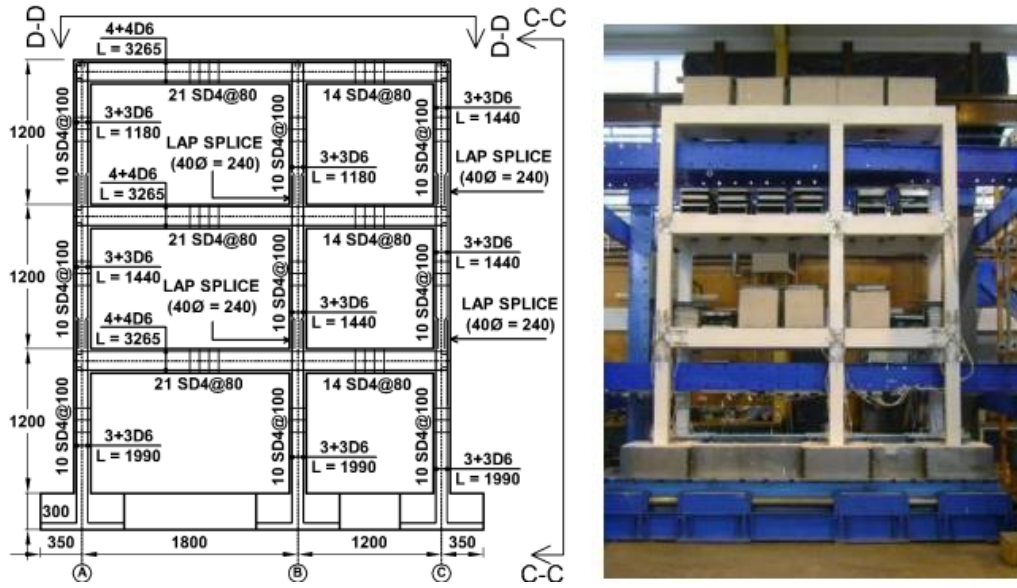
**Şekil 2.12.** Test edilen ölçekli binanın geometrik özellikleri ve sarsma tablasına kurulumu (Lu ve ark., 2008)

Sarsma tablasında gerçekleştirilen genel uyarımlar altında, yapısal elemanlarda görünür çatlaklar oluşmasına ve birkaç çelik etriyenin yerel olarak akmasına karşın yapıda önemli bir hasar riski görülmemiştir. Nadir durumlarda meydana gelen şiddetli depremler sonucunda, daha fazla kolonda görünür çatlaklar oluşmasına ve yük taşıma

kapasitesinde yerel azalma meydana gelmesine rağmen binanın nihai halinin çökmeye karşı yeterli bir dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir. Altıncı ve on birinci katlardaki kolonların beton dayanımının alt katlara göre daha düşük olması ve ilk burulma doğal frekansının, girişin hakim frekans aralığına yakın olması nedeniyle bu modun uyarılması sonucunda orta yükseklikteki bölgeyi yüksek gerilime maruz bırakmasından dolayı sistemdeki en savunmasız bileşenler olarak tespit edilmişlerdir (Lu ve ark., 2008).

KaixuanMen kulesinin gerçek inşaatı tamamlandıktan birkaç ay sonra, yapı rutin işletimdeyken bina için test yapılmıştır. Analiz için sadece ortam yükü (rüzgar ve yer hareketi) altındaki yatay hareketler ölçülmüştür. Karşılaştırma, sarsma tablası modeli testinin kesinlikle mükemmel olmasa da makul derecede iyi tahminlere yol açtığını göstermiştir. Ayrıca model testlerine göre tahmin edilen değerlerin sürekli olarak daha yüksek olduğu bulunmuştur. Dinamik benzerliğe dayalı sarsma tablası modeli testinin özellikle yapının geometrik boyutları KaixuanMen kulesinde olduğu gibi düzensiz olduğunda, ilgili belirsizlik anlaşılabilir ve dikkate alınarak uygulandığında güvenilir yöntemlerden biri olduğu belirtilmiştir (Lu ve ark., 2008).

(Gallo ve ark., 2011) 1970 öncesi sünek olmayan betonarme çerçeve binaların sismik davranışı ile ilgili bilgi sağlamak ve betonarme binalar üzerinde geliştirilen yenilikçi uygulanabilir güçlendirme çözümlerinin etkinliğini araştırmak için sarsma tablasında bir dizi deney gerçekleştirmiştir. 1/ 2.5 ölçekli numune, birbirine enine kirişler ve döşeme plakaları ile birleştirilmiş, paralel, iç ve dış iki adet 3 katlı 2 bölmeli asimetrik çerçeveden oluşmaktadır. Betonarme çerçeve ilk olarak Loma Prieta Depremi'nden (California, 1989) alınan kayıtlar kullanılarak artan yer hareketi genlikleri altında test edilmiştir. İkinci aşamada güçlendirilen numune Darfield (Yeni Zelanda, 2010) ve Maule (Şili, 2010) depremleri sırasında kaydedilen veriler kullanılarak test edilmiştir. Betonarme çerçevenin toplam yüksekliği 3600 mm, uzun açıklığı 1800 mm, kısa açıklığı 1200 mm, kat yüksekliği 1200 mm olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.13).

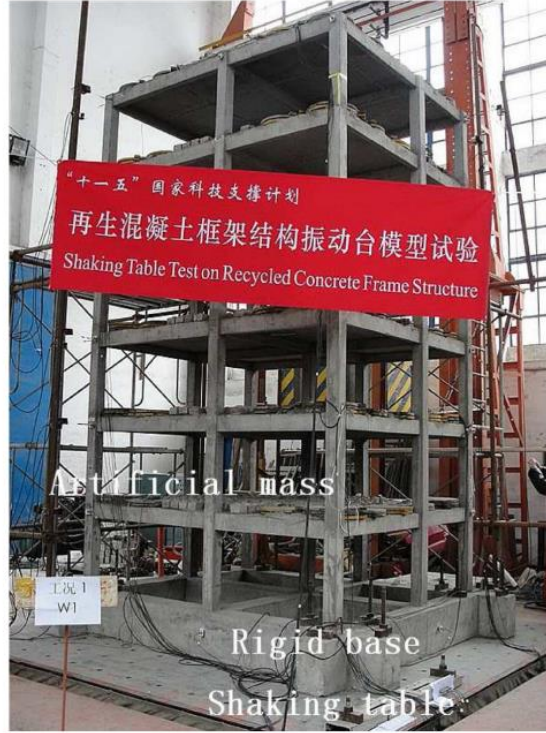


Şekil 2.13. Çerçeve boyutları ve ilk test serisinden önce çerçeve düzeneği (Gallo ve ark., 2011)

Tüm testler karşılaştırıldığında, yapıların sismik etkiler altındaki tepkisinin belirsizliği hakkında birçok soru ortaya çıkmıştır. İlk olarak, bir sismik tehlike parametresi olarak PGA'nın rolü, bir yapıda oluşması beklenen hasar ile tek başına iyi bir korelasyon sağlamadığı için abartıldığı belirtilmiştir. Frekans içeriğinin yanı sıra giriş hareketi süresinin, hasar açısından beklenen performansı değerlendirirken daha önemli parametreler olmasa da eşit olduğu doğrulanmıştır. Deneysel kullanılabilen kayıt tepki spektrumları, performans temelli bir yaklaşım içinde yapıların tasarımı ve değerlendirilmesi için yer değiştirme spektrumlarının dikkate alınmasının önemini ortaya çıkarmıştır (Gallo ve ark., 2011).

(Xiao ve ark., 2012) iki bölmeli, iki açıklıklı, altı katlı geri döndürülmüş agregalı beton (RAC) çerçeve yapısının 1/4 ölçekli modelini sarsma tablasında test etmiştir (Şekil 2.14). Yapının dinamik özellikleri beyaz gürültü testleri ile değerlendirilmiştir. Yükleme koşullarını simüle etmek için birinci kattan beşinci kata kadar her bir levhaya 1528 kg ve çatıya 1375 kg kütle eklenmiştir. Modelin toplam ağırlığı yaklaşık 17 ton olarak belirtilmiştir. Betonarme çerçevenin toplam yüksekliği 4850 mm, uzun açıklığı 1425 mm, kısa açıklığı 1125 mm'dir. Betonarme kirişlerin boyutları (62.5 x 125 mm) ve (50 x 112.5 mm) olup betonarme kolonların boyutları (100 x 100 mm)'dir.



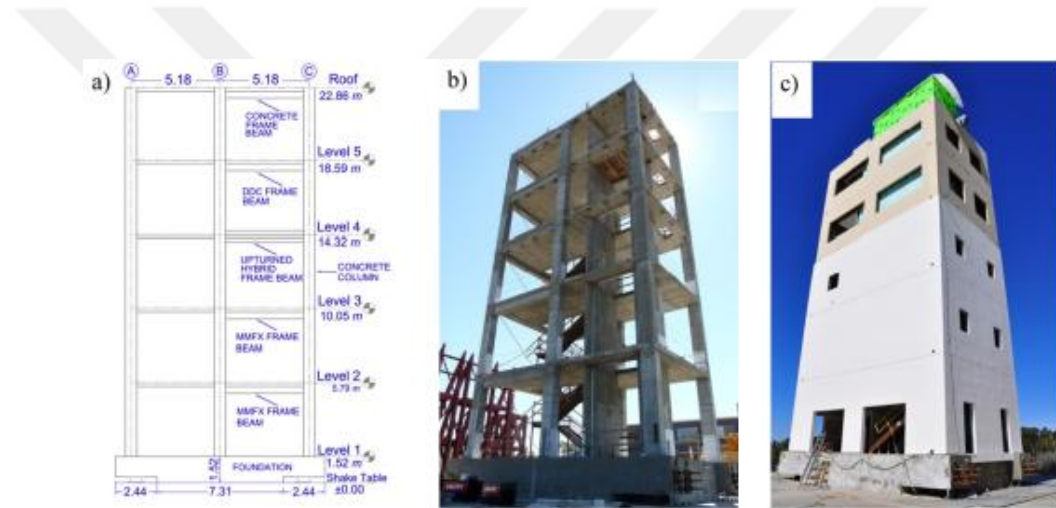


Şekil 2.14. Sarsma tablası üzerinde çerçeve düzeneği (Xiao ve ark., 2012)

Deney sonucunda ivme genliğinin arttıkça yapının elastik-plastik aralığa girdiği tespit edilmiştir. Yüksek dereceli titreşim modlarının etkisi daha sonra kademeli olarak artmıştır ve sismik kuvvet dağılımı doğrusallığını kaybetmiştir. Bununla birlikte, bina 1.170 g'a kadar olan maksimum yer ivmesinde temel uyarılar altında çökmemiştir. RAC çerçeve model yapısının, 0.130 g'lık bir PGA ile test aşaması altında Şanghai yapay dalgasına tabi tutulduktan sonra elastik-plastik aşamasına adım attığı ve x yönünde maksimum katlar arası ötelenme oranının 1/266 olduğu bulunmuştur. Test sonuçları, RAC çerçeve model yapısının iyi bir nihai deformasyon kapasitesine ve süneklığe sahip olduğunu ve 0.750 g'lık bir PGA ile deprem testi sırasında maksimum katlar arası ötelenme oranının 1/29 bulunduğu, bu da nadiren meydana gelen şiddetli depremlere karşılık geldiğini göstermiştir. Altı kattan daha az olan RAC çerçeve binalarının deprem bölgelerinde ve deprem sonrası yeniden inşa alanlarında uygulanmasının mümkün olduğu belirtilmiştir (Xiao ve ark., 2012).

(Astroza ve ark., 2013) farklı şiddetlerdeki sismik uyarımlar sırasında yapı ve yapısal olmayan bileşenlerin ve sistemlerin (bölme duvar, çatı katı, soğutma kulesi, prekast kaplama, asansör ağırlık ve rayları, yağmurlama sistemi, çatı ve gaz boruları, asansör kabini, iç kaplama vb.-NCSs) tepkisini ve bunların dinamik etkileşimini incelemek amacıyla sarsma tablasında tam ölçekli beş katlı betonarme bir binanın

inşaatını yaparak test etmiştir. Betonarme çerçevenin inşaatı sırasında, yapısal olmayan bileşenlerin kurulumunun farklı aşamalarında ölçümler yapılarak kaydedilmiştir. Sarsma yönünde iki bölmeye diğer yönde ise bir bölmeye sahip çerçevenin plan boyutları (6.6 x 11 m)'dir. Bina kat yüksekliği 4.27 m, toplam yüksekliği 21.34 m ve betonarme çerçeve için tahmini toplam ağırlık 3010 kN olup yapısal olmayan malzemelerle birlikte 4420 kN'dur (Şekil 2.15). Kirişler farklı katlarda farklı donatı detaylarına sahiptir. Döşeme sistemi, tüm seviyelerde 203 mm kalınlığında bir beton levhadan oluşmaktadır. Merdivenleri ve asansörü yerleştirmek için her levhada iki ana açıklık vardır. Dinamik testler, ortam titreşimi (AV), serbest titreşimi (şok) ve zorlamalı titreşimi (UCSD-NEES sarsma tablası kullanılarak düşük genlikli beyaz gürültü temel uyarımı) içermektedir.



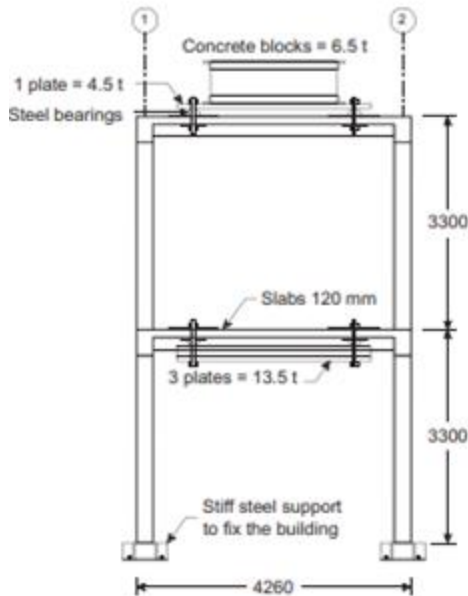
Şekil 2.15. a) Test örneğinin şematik görünümü b) Çerçeve bina c) Yapısal olmayan bileşenleri ile bina (Astroza ve ark., 2013)

İnşaat sırasında, yapısal elemanların dökülmesi, yapının eklenen kütlesi nedeniyle doğal frekanslarda ani düşüşlere neden olmuştur. Doğal frekanslar daha sonra zamanla kütleme işlemi sırasında betonun sertleşmesine ve buna karşılık gelen sertlik kazancına bağlı olarak kademeli olarak artmıştır. NCSs'nin etkileri ile ilgili olarak, daha büyük NCSs'nin seçilmesinin sistemin modal özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Örneğin, bölme duvarların yapının yanal rijitliğine katkısı nedeniyle doğal frekanslar artmaktadır. Prekast beton kaplama, binanın üst katlarına önemli bir kütle kazandırarak, doğal frekanslarda ani düşüşlere neden olmuştur. Genel bir eğilim olarak, NCSs'nin tüm kurulum periyodu boyunca, tanımlanan sönüm oranlarının zamanla biraz artma eğiliminde olduğunun fark edilebildiği, ancak yine bunların tahmin değişkenliğinin, doğal frekanslarınkine kıyasla büyük olduğunu tespit edilmiştir. Modal



sönüm oranlarının varyasyonları ile inşaat faaliyetleri arasında net bir eğilim gözlemlenemediği vurgulanmıştır (Astroza ve ark., 2013).

(Garcia ve ark., 2014) yeni bir Ard-Gerilmiş Metal Çemberleme (Post-Tensioned Metal Strapping-PTMS) tekniğinin standartların altında bir betonarme binanın sismik davranışını iyileştirmedeki etkinliğini sarsma tablası testleri ile araştırmıştır. Bina plan ve cephe olarak düzenli, tek bölmeli, iki katlı bir betonarme çerçeve olup eski inşaat uygulamalarını simüle etmek için kolonlarda ve mafsallarda yetersiz donatı detayına sahiptir. Yapı (4.26 × 4.26 m) plan boyutunda, sabit kat yüksekliği 3.30 m, kolonların ebatları (260 × 260 mm) olup birinci kat kolonları 8Ø14 mm, ikinci kat kolonları 4Ø14 boyuna donatı detayına sahiptir. Kolonlarda etriye çapı 6 mm olup 200 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Etriyeler mevcut deprem yönetmeliklerinin gerektirdiği 135° kancalar yerine 90° dirseklerle kapatılmıştır. Kiriş boyutları X yönünde (260 × 400 mm) ve Y yönünde (260 × 300 mm) olup kirişlerde 4Ø14 boyuna donatı ve 250 mm aralıklı Ø8 enine donatı kullanılmıştır. İlave kalıcı ve değişken yükleri simüle etmek için, toplam kütlesi 13.5 ton olan üç çelik levha birinci kat döşemesine, bir çelik levha ve bir beton blok 11 tonluk bir kütle eklemek için ikinci kat döşemesine kenetlenmiştir (Şekil 2.16). Yetersiz donatılandırılmış bina başlangıçta önemli ölçüde hasar gördükten sonra PTMS ile onarılıp güçlendirildikten sonra ek sismik testler yapılmıştır.



Şekil 2.16. Test örneğinin şematik görüntüsü ve çerçevenin genel görünümü (Garcia ve ark., 2014)

Yetersiz donatılandırılmış bina ilk sismik uyarım seviyelerinin ardından, birinci kattaki derzlerde ve kolonlarda sınırlı hasar görmüştür ve bu hasar binanın ilk rijitliğini %70 oranında azaltmıştır. İlk testlerden sonra yapılan onarım ve PTMS güçlendirme çözümlerinin, binanın sertlik bozulmasını  $PGA = 0.15$  g'de %70'den %21'e düşürdüğünü göstermiştir. Onarımlar ve PTMS güçlendirmesi, ciddi şekilde bozulan ikinci kat kiriş-kolon bağlantılarının kapasitesini artırmıştır. İlk durumda yapı,  $PGA = 0.15$  g'da kritik bir hasar seviyesine ulaşırken, PTMS ile güçlendirilmiş bina, kararlılığından ödün vermeden  $PGA = 0.35$  g'a kadar sismik sarsıntıya direnmiştir. Güçlendirmenin ardından, ikinci kattaki binanın sismik performansı, Çökme Önleme'ye yakın seviyeden Anında Kullanıma yakın performans seviyesine yükselmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, düşük maliyetli ve basit güçlendirme yönteminin, standart altı betonarme yapıların deprem sonrası hızlı dayanım kazanması için çok etkili olduğu ve özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki uygulamalar için uygun olduğu sonucuna varıldığı bildirilmiştir (Garcia ve ark., 2014).

(Lu ve ark., 2015) daha iyi sismik performans ve kontrol edilebilir deprem sonrası onarım ile geleneksel sismik kuvvete dayanıklı sistemlere bir alternatif sunmak amacıyla iki katlı tek bölmeli tek açıklıklı kendinden merkezli 1/2 ölçekli betonarme çerçeve modelinin dinamik özellikleri ile farklı deprem seviyelerindeki dinamik tepkisini ve hasarını sarsma tablası kullanarak incelemiştir (Şekil 2.17). Betonarme çerçevenin boyutları ( $6 \times 3$  m) olup her kata rijit beton blok uygulanmıştır. Her katta beton bloğu desteklemek için ana kirişlere iki çelik kiriş menteşelenmiştir. Yapının toplam ağırlığı 13 t, eklenen kütlelerin her biri ise 4.8 t dur. Kirişler ve kolonlar öngerilmeli tendonlarla bağlanmıştır. Testteki sarsma tablasına iki sismik yer hareketi girilmiştir: California Imperial Valley depreminden El Centro NS kaydı ve Wenchuan depreminden Wolong EW kaydı. Her iki yer hareketi de sadece X yönünde uygulanmıştır. Yapının doğal frekanslarındaki değişiklikleri tespit etmek için her uyarıdan önce ve sonra beyaz gürültü taraması yapılmıştır.



Şekil 2.17. Sarma tablasına yerleştirilmiş çerçevenin genel görünümü (Lu ve ark., 2015)

Deney sonucunda kendinden merkezli betonarme çerçeve sistemi, özellikle şiddetli depremler altında tatmin edici bir sismik performans göstermiştir. Test modeli, 0.2 g PGA ile uyarma altında elastik kalıp 0.6 g'a çıktıktan sonra bile ciddi bir hasar görmemiştir. En büyük hasar, köşebent çeliği ve beton arasındaki ara yüzlerde meydana gelmiştir. Kendinden merkezleme elemanlarında herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Açı çeliğinin büyük bir deformasyonla enerjini dağıttığı bildirilmiştir (Lu ve ark., 2015).

(Nagae ve ark., 2015) mevcut Japon sismik tasarım yönetmeliğine göre tasarlanmış tam ölçekli, dört katlı, betonarme bir binayı, E-Savunma sarsma tablası üzerinde çok yönlü sarsma altında test etmiştir. Uzun plan yönünde iki bölmelidir ve kısa plan yönünde dış çerçevelere bir çift çok katlı duvar dahil edilmiştir. Nihai yapının daha geniş bir kitleye hitap edebilmesi için ABD yönetmeliğine uygun düzenlemeler yapılmıştır. Her katın yüksekliği 3 m; bina x yönünde 14.4 m y yönünde 7.2 m açıklığa sahiptir. Kolonlar (500 x 500 mm), duvarlar (250 x 2500 mm) ve kirişler de (300 x 600 mm) (300 x 300 mm) (300 x 400 mm) boyutlarındadır (Şekil 2.18). Yapı üç yüksek yoğunluklu yer hareketini içeren bir dizi çok yönlü sismik yer hareketine tabi tutulmuştur.



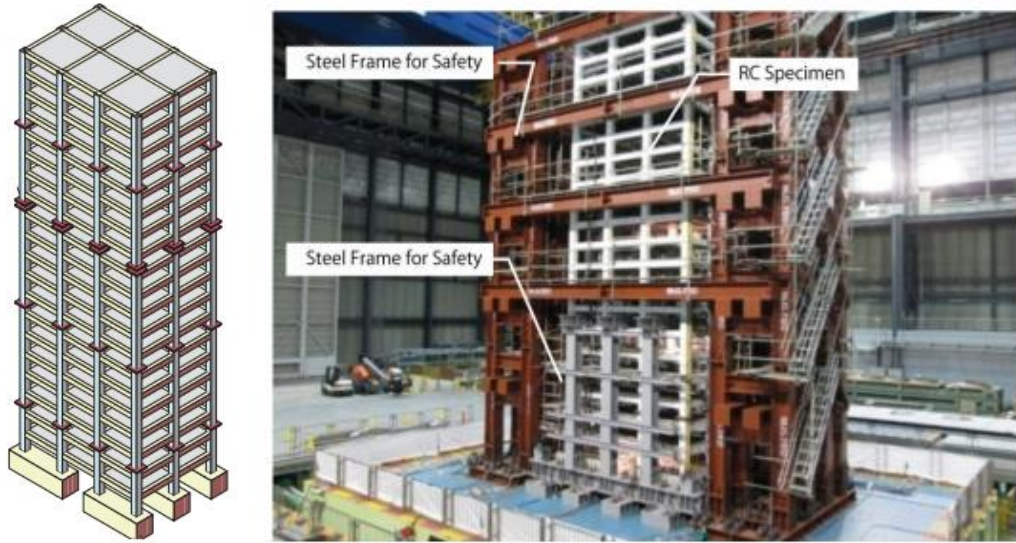
**Şekil 2.18.** E-Defense sarsma tablasında betonarme (solda) ve öngerilmeli beton (sağda) numuneler (Nagae ve ark., 2015)

Yanal ötelenme oranları 0.04'ü geçse bile yapı testler boyunca stabil kalmıştır. Yapı çökme önleme performans hedefini karşılarken duvarlarda ve kiriş-kolon bağlantılarında ciddi hasarın olduğu bildirilmiştir. Duvarlarda duvar sınırının ezilmesi, boyuna donatı burkulması ve yanal kararsızlık dahil olmak üzere sınır bölgelerinde önemli hasarlar oluşmuştur. Duvarın tabanında duvar-temel inşaat derzinde kayma gözlenmiştir. Kolonlar ve kirişler, ACI 318-11'in sınırlandırma hacimsel donatı oranı gereksinimlerini karşılamasalar da testler dizisi boyunca yeterli performans göstermiş ve çekirdek bütünlüğünü korumuşlardır. Bu nedenle yazarlar düşük eksenel kuvvet oranlarına sahip kolonlar için ACI 318-11 yönetmeliğindeki minimum sınırlayıcı donatı hacimlerini azaltmanın mümkün olabileceğini bildirmişlerdir (Nagae ve ark., 2015).

(Sugimoto ve ark., 2016) çeyrek ölçekli 20 katlı betonarme bina modelini sarsma tablasında test etmiştir (Şekil 2.19). Kullanılan girdi dalgaları, uzun periyotlu ve uzun süreli yer hareketidir. Test numunesi, 1990'ların sonlarında tasarlanan 20 katlı bir betonarme prototip binası temel alınarak planlanmıştır. Numune boyuna yönde 3 açıklığa ve enine yönde 2 açıklığa sahip olup, her kat için (750 m) yüksekliğe sahiptir. Numunenin toplam yüksekliği, ilk kat kolonunun altından 15 m'dir. Kolonlar (225 x 225 mm) ve kirişler (150 x 200 mm) boyutlarındadır. Prototipinkine karşılık gelen ölü ve hareketli yüklerin neden olduğu kolon eksenel gerilmesini oluşturmak için numunenin her katının altına çelik plakalar yerleştirilmiştir ve numunenin toplam



ağırlığı (3,557 kN)'dır. Güvenlik ve hasarları gözlemek için numunenin etrafına çelik çerçeve tasarlanmıştır.



Şekil 2.19. Binanın perspektif görüntüsü ve sarsma tablası üzerinde inşaatı tamamlanmış yapı (Sugimoto ve ark., 2016)

Sarsma tablası testinin son aşamasında maksimum 1/35 kat öteleme açısı gözlemlenmiştir. Geri yükleme kuvveti özellikleri sıkışma göstermiş ve eşdeğer viskoz sönümlenme faktörü, büyük deformasyon bölgelerinde geleneksel yolla tahmin edilen değerinden daha küçük bulunmuştur. Sarsma tablası testi için çeşitli prosedürler kullanılarak analizler yapılmıştır. 1/100 rad'lık maksimum kat ötelenme açısı öncesinde ve sırasında, analitik sonuçlarla deneysel sonuçların oldukça uyumlu olduğu bulunmuştur. Yazarlar bu çalışma ile Japonya'daki tasarım kriterlerini deneysel sonuçlarla doğrularak analitik sürecin iyi olduğunu belirtmişlerdir. (Sugimoto ve ark., 2016).

(Wang ve ark., 2017) depremlerden önce karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ile güçlendirilen standart altı betonarme çerçevelerin sismik performansını araştırmak ve değerlendirmek için sarsma tablası testi yapmıştır. İki adet 1/2 ölçekli 4 katlı ve 2 bölmeli betonarme çerçeve bir tanesi kontrol numunesi olarak diğer numune testten önce CFRF ile güçlendirilmek üzere üretilip sarsma tablasında deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.20). Her iki numunede x yönünde iki bölmeli ki bu bölmeler bu tür çerçevelerin burulma tepkisini araştırmak için farklı açıklıklara (sırasıyla 2.7 ve 1.8 m) sahip olacak şekilde tasarlanmış olup y yönünde tek bölmeye sahip betonarme çerçevelerdir. Alt kat, diğer katlardan (1.5 m) daha büyük bir yüksekliğe (1.8 m) sahip

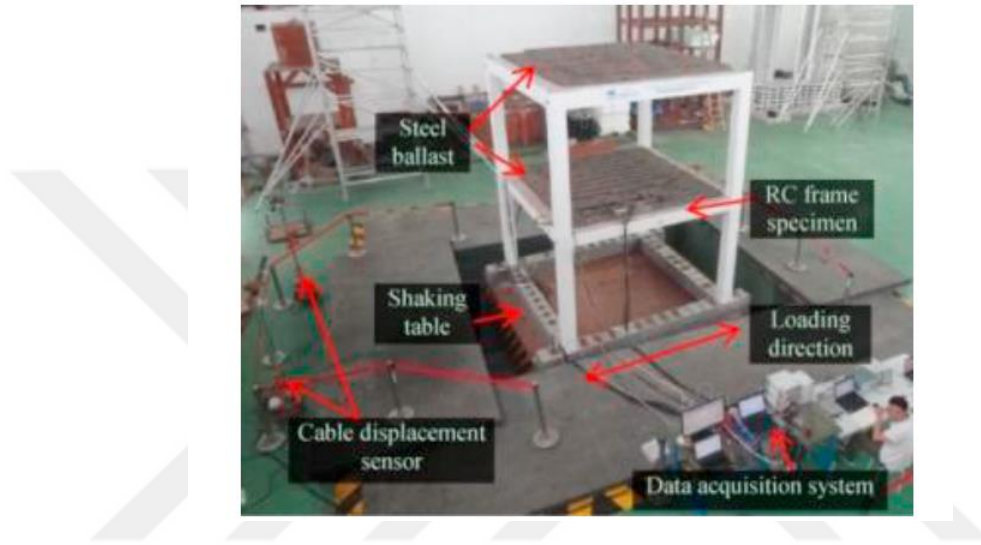
olacak şekilde tasarlanmıştır. Boyuna donatı oranı tüm kolonlar için %2.26 ve tüm kirişler için %1.45'tir. Enine donatı oranı tüm kolonlar için %0.71 ve kirişler için %0.91'dir. Her çerçeve numunesinin ağırlığı 20.25 t olup her bir çerçeveye toplam 9.46 t ilave kütle eklenmiştir. Sarma tablası için Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nden (PEER-2013) üç gerçek ivme kaydı seçilerek testten önce, giriş yer hareketleri benzerlik teorisine göre ivme kayıtları ölçeklendirilmiştir.



Şekil 2.20. CFRP ile güçlendirilmiş çerçeve ve çerçevenin genel şematik görüntüsü (Wang ve ark., 2017)

Test sonucunda kontrol çerçevesinin testlerinde alt iki kattaki kiriş-kolon birleşimlerinde erken bölgesel göçme meydana gelmiştir. Eklem çekirdek alanları ve kolon uçları, yalnızca 0.4 g'lık bir PGA seviyesinde ciddi hasar görmüş ve kontrol çerçevesinin direnç gösterdiği maksimum PGA, yaklaşık 0.6 g olarak bulunmuştur. Döşemelerin katkısı nedeniyle kiriş uçlarında plastik mafsal oluşmamış ve çerçeve güçlü kiriş-zayıf kolon modunda göçmüştür. Alt iki katın kiriş kolon birleşim yerlerinde CFRP güçlendirmesinden sonra çerçeve, önemli bir hasar olmadan 1.0 g'a kadar bir PGA değeriyle sismik uyarılara dayanabilmiştir. CFRP kaplamaları, testlerin sonunda neredeyse bozulmadan kalmıştır. Benzer düzeyde sismik uyarımlar altında, güçlendirilmiş çerçevenin küresel hasar indeksi, kontrol çerçevesinden çok daha küçük çıkmıştır. CFRP güçlendirme tekniğinin, küresel hasarı kontrol etmede ve çerçeve yapılarının sertlik bozulmasını azaltmada çok etkili olduğu bulunmuştur. Yazarlar güçlendirme tekniğinin ayrıca yapının asimetrik eksen yönünde burulma yer değiştirmelerini de önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir (Wang ve ark., 2017).

(Hou ve ark., 2017) sarsma tablasında tek yönlü yatay uyarıma tabi tutulan tek bölmeli iki katlı bir betonarme çerçeve test etmiştir. Betonarme çerçeve, 0.8 g'lik bir tepe değeri ile Loma Prieta deprem kaydına tabi tutulmuştur. Kat yüksekliği 2 m olan çerçeve, 300 mm yüksekliğindeki temellere sabitlenmiştir. Numunenin toplam yüksekliği 4.3 m olup, (4 × 4 m) boyutlarındaki sarsma tablasına sabitlenmiştir (Şekil 2.21). Kiriş, kolon ve temelin boyuna donatıları sırasıyla 4Ø4, 6Ø4 ve 8Ø6'dır. Elde edilen donatı oranı kolon için %1.7'dir.



Şekil 2.21. Sarsma tablasına test kurulumu (Hou ve ark., 2017)

Simüle edilen yer hareketi sonrasında yapıda sadece orta dereceli hasarlar oluşmuştur. Kat arttıkça PGA değerleri artmıştır. Birinci ve ikinci katın PGA'sı sırasıyla 0.8 g ve 1.28 g'dir. Birincil ve ikincil frekans sırasıyla 3.62 Hz ve 14.27 Hz'dir. Sismik yüklemelerden sonra 2.14 Hz ve 9.92 Hz ölçülmüştür. Yazarlar betonarme çerçevede hasar oluştuğunu bildirmişlerdir. (Hou ve ark., 2017).

(Yu ve ark., 2018) çelik takviyesiz inşaat için ultra yüksek süneklığe sahip çimentolu kompozitlerin (UHDCC) kullanımının fizibilitesini doğrulamak ve özellikle aşırı güçlü depremler altında UHDCC binasının sismik performansını karşılaştırmalı olarak incelemek için bir UHDCC çerçevesi ve bir betonarme çerçeve üzerinde sarsma tablası testi yapmıştır. Sarsma tablası testi için iki adet 1/4 ölçekli, 2 bölmeli ve iki katlı çerçeve modelleri oluşturulmuştur. Modellerin kat yüksekliği sabit (1.5 m) olup toplam yüksekliği 3.5 m'dir. Bir çerçeve referans içindir ve normal beton ile çelik donatıdan yapılmıştır. UHDCC-B, kısaca UB, sarsma tablası testi için 1/4 ölçekli bir çerçeve oluşturmak için kullanılmıştır. UB normalden daha fazla uçucu kül içermektedir ve

0.32'ye kadar su/bağlayıcı oranına sahiptir, yüksek aralıklı su azaltıcı (HRWR) kullanılmıştır. Karışımda takviye malzemesi olarak ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (Ultra-high molecular weight polyethylene-UHMWPE, kısaca PE) lifler kullanılmıştır. UHDCC çerçevesini inşa etmek için kullanılacak UB'nin basınç özelliklerini eşleştirmek için, ince agregalı betona aktif olmayan katkıları olarak kireç tozları ilave edilmiştir. Çerçevenin tüm sismik-hassas bölgeleri (şekildeki beyaz kısımlar) düz UB'den yapılmıştır, yani UHDCC'de boyuna veya enine çelik inşaat demiri kullanılmamıştır. Sismik duyarlı bölgeler (şekildeki sarı ve mavi kısımlar) ilk sarsma tablası testinden sonra betonarme çerçeveden alınmıştır. UHDCC bileşenlerini (şekildeki beyaz kısımlar) ve betonarme bileşenlerini (şekildeki kırmızı kısımlar) birleştirmek için yüksek akışkanlıklı harç kullanılmıştır (Şekil 2.22). Girdi olarak El Centro dalgası, Kobe dalgası ve Şanghay yapay dalgası olmak üzere üç yer hareketi seçilmiştir.



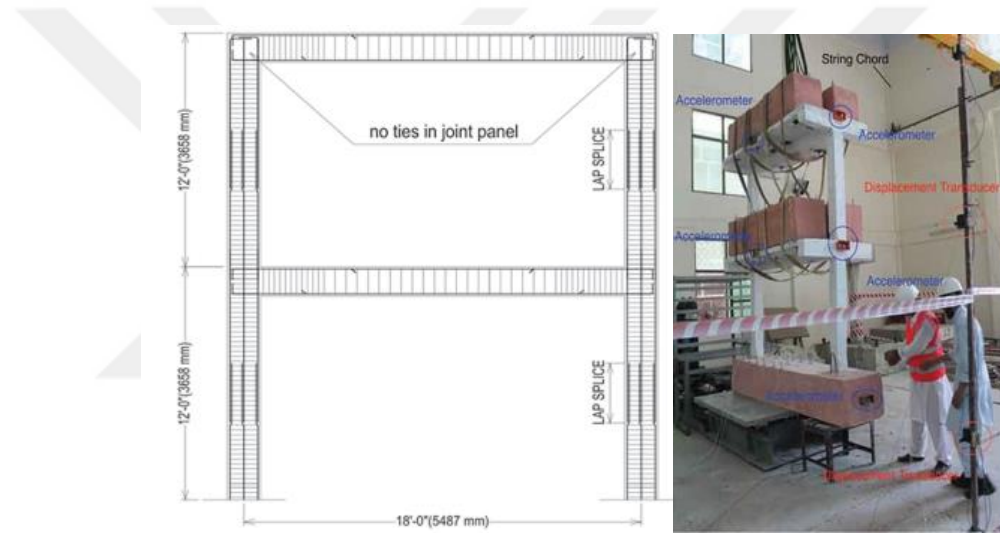
Şekil 2.22. Betonarme çerçeve ve UHDCC çerçevesi (Yu ve ark., 2018)

Uyarılar sırasında, UHDCC çerçevesindeki karot birleşimlerinde herhangi bir çatlak bulunmamış ve kolon ile kiriş uçlarında ciddi bir diyagonal çatlak gözlemlenmemiştir. Birinci katın çekirdek derzlerine bitişik kirişlerde bulunan ve genişliği 1.0 mm'den fazla olan kritik çatlaklar dışında, çatlak genişliğinin çoğu 0.1 mm'den az bulunmuştur. UHDCC çerçevesinin öteleme oranları mevcut yönetmeliklerdeki gereksinimleri karşılamıştır. Bu nedenle, UHDCC'nin çekme şekil değiştirme kapasitesinin, yeryüzünde meydana gelebilecek son derece güçlü depremlere maruz kalan bir bina için yeterli olduğunu söylemenin güvenli olduğu bildirilmiştir.



Yazarlar yapılan bu çalışmadaki UHDCC çerçeve performansının, çeşitli sismik yönetmeliklerin gereksinimlerini karşıladığını belirtmişlerdir (Yu ve ark., 2018).

(Ahmad ve ark., 2019) kiriş-kolon birleşim bölgesinde bağlayıcı olmayan, düşük dayanımlı betondan inşa edilmiş, 1/3 ölçekli iki katlı betonarme çerçeve yapısını sarsma tablasında test etmiştir (Şekil 2.23). Ölçekli betonarme çerçeve, tasarım spektrumu uyumlu doğal ivme kaydı kullanılarak tek yönlü artan dinamik uyarıya tabi tutulmuş, tasarım yer hareketlerinin %5 ila %100'ünü oluşturan çeşitli hedef seviyelerinde test edilmiştir. Tasarlanan numunenin kat yüksekliği 3658 mm, kolon ebatları (381 x 381 mm), kiriş ebatları (305 x 457 mm)'dir. Döşeme plakasına eşit olarak dağıtılmış beton bloklarla (her biri 300 kg ağırlığında) her kata ilave kütle eklenmiştir.

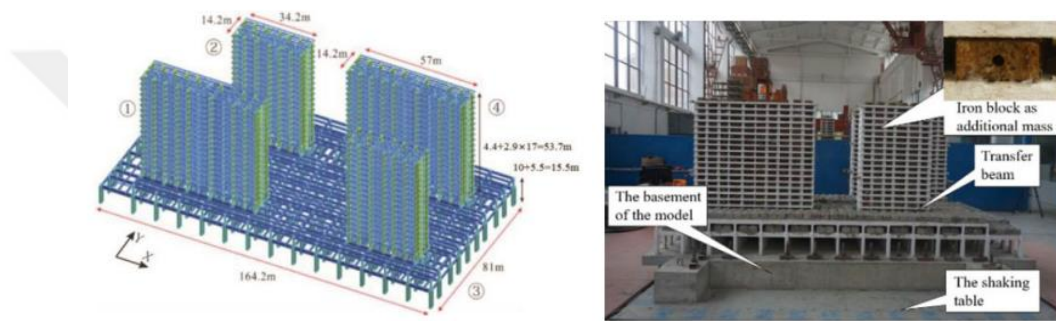


Şekil 2.23. Çerçevenin perspektif görüntüsü ve sarsma tablası üzerine yerleştirilen yapı (Ahmad ve ark., 2019)

Çerçevede, düşük dayanımlı beton kullanımı nedeniyle kiriş boyuna donatısında donatı kayması ve donatı çekmesi oluşmuştur. Sınırlayıcı bağları olmayan derzlerde büyük hasar meydana gelmiş ve kaplama ile çekirdek betonunda kabarma oluşmuştur. Ele alınan çerçeve, katlar arası ötelenme limiti içinde kalmak için yönetmelikte belirtilen tasarım yer hareketinin sadece %70'ine direnebilmiştir. Bu araştırma, minimum kolon derinliği için yönetmelik gereksiniminin, düşük dayanımlı betonda ve sınırlayıcı bağları olmayan derzlerde, derzin hasar görebileceğini göstermiştir (Ahmad et al., 2019).

(Zhou ve ark., 2019) bir metro deposuna oturan altta büyük çerçeve platforma sahip dört kuleli bir binanın sismik performansını sarsma tablası kullanılarak test

etmiştir. Sarsma tablası test modeli, 1:40 ölçekli benzerlik yasanına göre tasarlanmıştır. Prototip bina, Çin'in Şanghai kentindeki Jinqiao metro deposunda bulunan 20 katlı çok işlevli bir binadır. Altta 2 katlı betonarme çerçeve platform ile 3. kattan (3F) çatıya (20F) kadar dört adet betonarme çerçeve-perde duvar kulesinden oluşmaktadır. Podyum (164.2 x 81 m) boyutlarında dikdörtgen bir plana sahiptir. Kule 1 ve Kule 4 'uzun kule' olarak adlandırılmıştır ve her ikisi de (57 x 14.2 m) dikdörtgen plan boyutuna sahiptir. 'Kısa kule' olarak adlandırılan Kule 2 ve Kule 3, (34.2 x 14.2 m) plan boyutlarına sahiptir. Binanın toplam yüksekliği 69.2 m'dir (Şekil 2.24). Benzerlik ilişkisine göre ek kütle olarak demir bloklar kullanılmıştır.

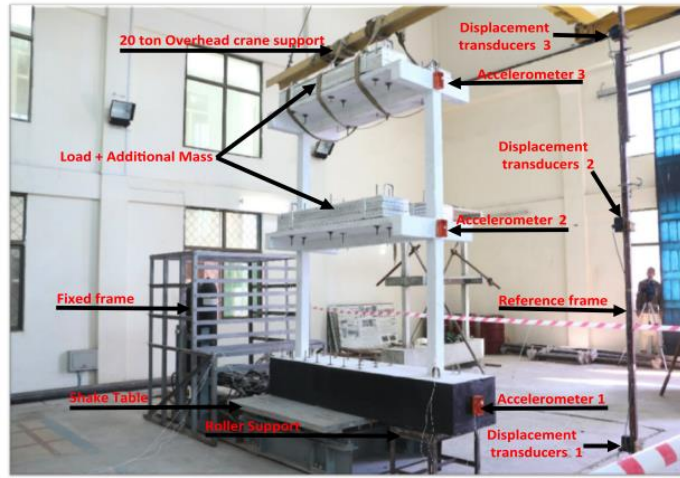


Şekil 2.24. Binanın perspektif görüntüsü ve sarsma tablası üzerine yerleştirilen ölçekli yapı (Zhou ve ark., 2019)

Sarsma tablası testi sonucunda, bu yapının sismik şiddet altında performans gereksinimlerini karşıladığı belirtilmiştir. Yapının, sık depremlere maruz kaldığında elastik kalabileceği ve nadir depremlerde hiçbir çökmeye uğramayacağı tespit edilmiştir. Tüm kulelerin 13. ve 14. katları ile 2. ve 3. Kulelerin 6. katları zayıf katlar olup, zayıf katta kesme yenilmesi yapının ana göçme modu olarak kabul edilmiştir. Yüksek katlı çok kuleli binalarda daha iyi sismik davranış elde etmek için üst katların güçlendirilmesi ve sünekliğin iyileştirilmesi gerektiği bildirilmiştir. Yazarlar kule planında uzunluk-genişlik oranının, yapısal davranışı daha makul kılmak için sınırlandırılması gerektiğini belirtmişlerdir (Zhou ve ark., 2019).

(Rizwan ve ark., 2020) bir adet ACI 318-14 yönetmeliğine uygun ve dört adet yönetmeliğe uygun olmayan 1/3 ölçekli iki katlı betonarme çerçeve üzerinde sarsma tablası testi gerçekleştirmiştir. Modeller 1994 Northridge deprem ivmesi zaman geçişine tabi tutulmuştur. Ele alınan yapı, her iki kat için 5487 mm boşluk uzunluğu ve 3658 mm kat yüksekliğine sahip 2'ye 1 bölmeli çerçeveden oluşmaktadır. Beton basınç dayanımı 21 Mpa ve donatı akma dayanımı 414 MPa'dır. Model-1 referans test

modelidir ve yönetmelik tasarım gereksinimlerine dayanmaktadır. Model-2, Model-1'e benzer, ancak düşük dayanımlı beton (14 MPa) ile üretilmiştir. Model-3 düşük dayanımlı beton ile üretilmiş ve kiriş-kolon birleşim bölgesinde enine bağlantılar sağlanmamıştır. Model-4 ve Model-5, Model-3'e benzerdir ancak kirişlerde ve kolonlarda enine donatı aralıkları %100 ve %200 sırasıyla önceki modellerden daha büyüktür. Model-5'te kiriş eğilme takviyesi donatı çapları da düşürülmüş ve hem kirişlerde hem de kolonlarda 90° kancalı etriyeler kullanılmıştır. Kütle simülasyon koşulunu sağlamak için her kata 1200 kg'lık ilave kütle eklenmiştir (Şekil 2.25).

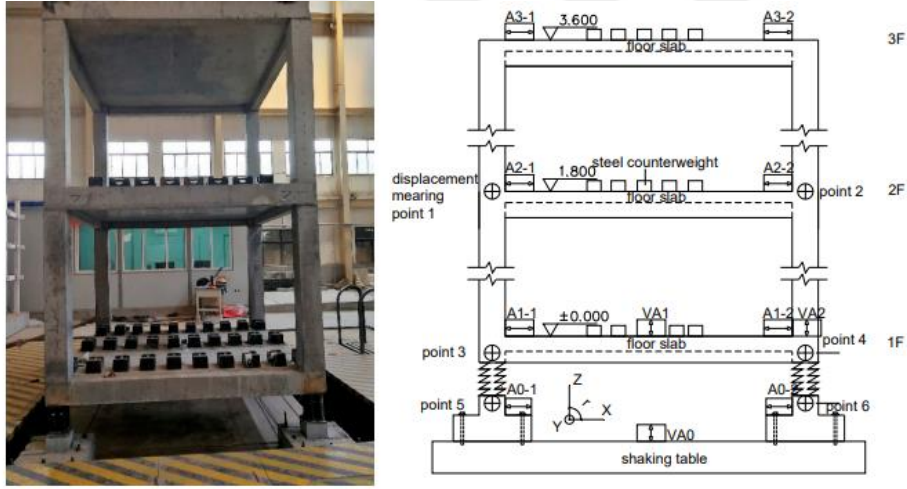


Şekil 2.25. Sarsma tablası üzerine yerleştirilen ölçekli çerçeve (Rizwan ve ark., 2020)

Yönetmeliğe uygun modelin zemin kattaki kolonların kiriş uçlarında ve tabanında plastik mafsallar gözlemlenmiştir. Bu çerçevede, aşırı sarsıntı altında bağlantı panellerinde sadece hafif çatlaklar oluşmuştur. Yönetmeliğe uygun model, yeni başlayan çökme durumuna ulaşmadan önce 1 g'lık en yüksek yatay ivme ile giriş uyarımına direnmiştir. Yönetmeliğe uygun olmayan modellerde kiriş/kolon elemanlarında plastik mafsallar gözlenmiş ve aşırı sarsıntı altında kiriş-kolon birleşimlerinde büyük hasarlar oluşmuştur. Tamamen uyumlu olmayan çerçeve, yeni başlayan çökme durumuna ulaşmadan önce 0.5 g'lık PGA'ya direnebilmiştir. Çeşitli sismik bölgelerdeki statik kuvvete dayalı performans değerlendirmesi, hem sismik bölge 3 hem de bölge 4'te, yönetmeliğe uygun çerçeve performansının "Tamam" olduğunu, yönetmeliğe uygun olmayan çerçeve performansının ise "NG" olduğunu ortaya koymuştur (Rizwan ve ark., 2020).

(Shang ve Wang, 2020) yeni önerilen düşük maliyetli üç boyutlu izolasyon yatağında ağır kalsiyum karbonat (HCC) ile modifiye edilmiş asfaltın enerji yayma

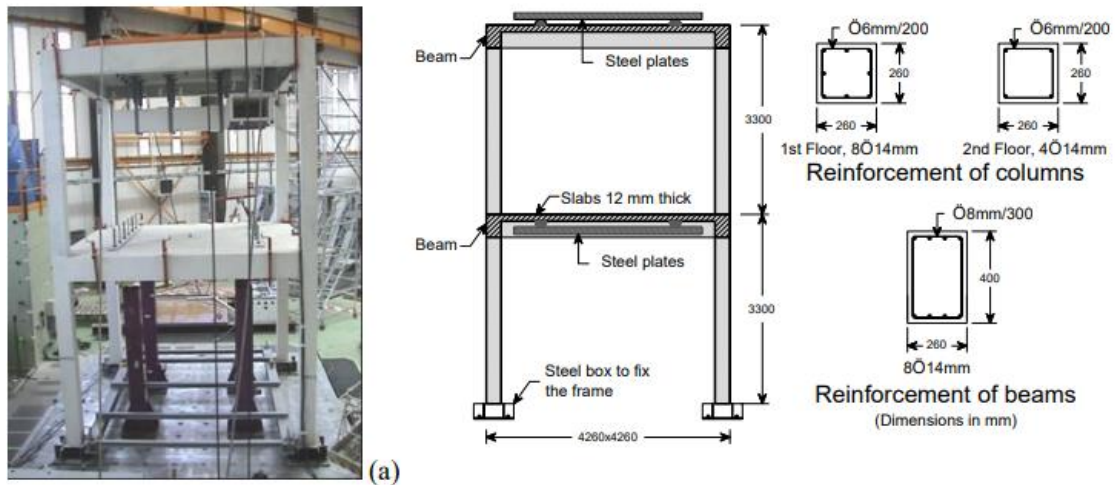
kapasitesinin etkinliğini ve performansını doğrulamak ve yayın enerjii dağıtma kabiliyetine sahip olup olmadığını incelemek için sarsma tablası testi gerçekleştirmiştir (Şekil 2.26). Deneysel modelin geometrik ölçeği 0.5'tir. Yapı, asfalt yağlı üç boyutlu izolasyon yataklarına sahip betonarme bir çerçevedir. Modelin düzlem boyutu (2.4 x 2.4 m), üst yapının yüksekliği ise 3.6 m'dir. İzolasyon tabakası 16 sarmal yaydan oluşmakta olup, yayların yüksekliği üst yapının yerçekimi altında 25.5 cm'dir. Betonarme çerçevede kullanılan kolonların ebatları (200 x 200 mm) olup kolonlarda 4Ø16 boyuna donatı ve Ø8 etriye kullanılmıştır. Test iki bölümden oluşmaktadır: asfalt dışı testler ve asfaltlı testler. Asfaltsız testlerde izolasyon yataklarında asfalt yoktur. Çalışmanın asfaltsız kısmı tamamlandıktan sonra, izolasyon yatakları 0.2 HCC kütle oranına sahip asfalt ile doldurulmuştur.



Şekil 2.26. Sarsma tablası üzerine yerleştirilen izolasyonlu çerçeve ve çerçevenin perspektif görüntüsü (Shang ve Wang, 2020)

Test modelinin sönüm oranı ana araştırma konusudur. Sonuçlar, asfaltsız tüm testlerin sönüm oranlarının yaklaşık %13, asfaltlı testlerin ise %2'den az olduğunu göstermiştir. PGA'lar benzer bulunmuştur (sırasıyla 78 gal ve 93 gal). Asfaltsız testte hızlanma yavaş yavaş azalırken asfaltlı testte hızlanma hızla azalmıştır, bu da yayların yeterli sönümlenme sağlayamadığını, ancak asfaltın yeterli enerji dağıtma kapasitesi sunabileceğini göstermiştir. Sonuçlar, düşey yer hareketlerinin yatay yer değiştirmeleri önemli ölçüde değiştirmedeğini göstermiştir. Ayrıca asfalt eklendiğinde yatay ve düşey yer değiştirmeler yaklaşık %50 oranında azalmıştır. Asfalt ilave edildikten sonra doğal frekans 0.96 Hz'den yaklaşık 1 Hz'e yükselmiştir. Artan doğal frekans, asfalt ilavesinden sonra izolasyon yatağının sertliğinin arttığı anlamına gelmektedir. (Shang ve Wang, 2020).

(Ciupala ve ark., 2020) karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitleri ile güçlendirilmiş iki adet yetersiz tasarlanmış tek açıklıklı iki katlı betonarme çerçeve bina üzerinde tam ölçekli sarsma tablası testlerini içeren deneysel çalışma yürütmüştür. Çerçevelerin sismik davranışını değerlendirmek için ilk sarsma tablası testleri yapılmıştır. Kolonlara ve eklemlere daha sonra 1. çerçeve için CFRP kompozit malzeme ile 2. çerçeve için CFRP kompozit malzeme ve ard-gerdirilmiş metal kayışlardan (PTMS) oluşan bir güçlendirme yapıldıktan sonra önemli bir hasar elde edilene kadar bir dizi sarsma tablası testine tabi tutulmuştur. Çerçeve ( $4.26 \times 4.26$  m) plan boyutlarına ve 3.30 m sabit kat yüksekliğine sahiptir. Kolonlar ( $260 \times 260$  mm), kirişler x yönünde ( $260 \times 400$  mm) ve y yönünde ( $260 \times 300$  mm) kesit alanına sahiptir (Şekil 2.27). Kirişlerde ve kolonlarda  $\varnothing 14$  boyuna donatı ve  $\varnothing 8$  etriyeler kullanılmış olup etriyeler, mevcut sismik yönetmeliklerin tipik olarak gerektirdiği  $135^\circ$  kancalar yerine  $90^\circ$  kancalarla kapatılmıştır. Gerçek yükleme koşullarını simüle etmek için her bir levhaya 9 tonluk ek bir kütle ilave edilmiştir. 0.05 g ile 0.4 g arasında değişen PGA seviyeleri kullanılarak çerçeve tek yönlü bir yer hareketi altında test edilmiştir.



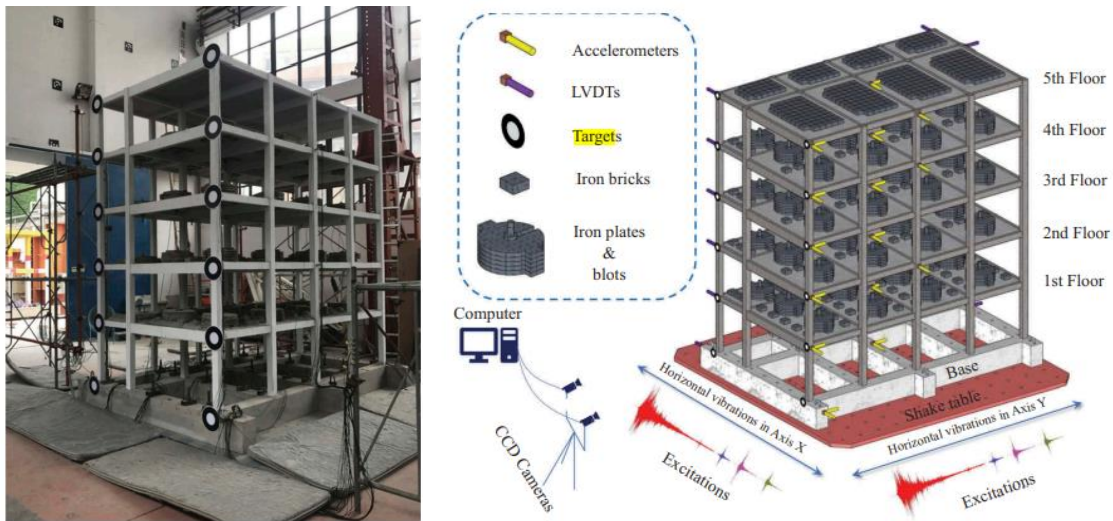
Şekil 2.27. Çerçevenin genel görünüşü ve yapı elemanlarının geometrik özellikleri (Ciupala ve ark., 2020)

Güçlendirilmemiş çerçeveler 0.15-0.20 g'lik PGA'da önemli ölçüde hasar görürken, güçlendirilmiş çerçeveler, PGA=0.50-0.60 g'ya kadar hasarsız bir şekilde direnmiştir. Ayrıca, güçlendirme müdahaleleri katlar arası ötelenme oranı kapasitesini arttırmış ve standart altı binaların sismik eksikliklerinin giderilmesinde çok etkili olduğunu kanıtlamıştır. Sarsma tablası testleri, CFRP kompozit malzeme kullanılarak benimsenen yerel güçlendirme stratejisinin, mevcut sismik tasarım hükümleriyle



uyumlu, güçlü kolon-zayıf kiriş mekanizmasının elde edilmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Çatlakların onarımı ve benimsenen güçlendirme stratejisi, betonarme çerçevelerin yanal rijitliğini ve ilk dinamik özelliklerini geri kazanmasında da etkili olmuştur. Önerilen CFRP ve ikili CFRP/PTMS güçlendirme müdahalesi aynı zamanda daha düzgün bir hasar dağılımına ve dolayısıyla yapıdaki mevcut kapasitenin daha iyi kullanılmasına olanak sağlamıştır. İncelenen binaların her ikisi de Çökme Önleme performans seviyesi dahilinde ve olası bir çökme belirtisi olmaksızın güvende kalmıştır (Ciupala ve ark., 2020).

(Qiao ve ark., 2020) artçı sarsıntuların yapısal performans üzerindeki olumsuz etkilerini araştırmak için ana şok (Mainshock-MS) ve artçı şok (Aftershock-AS) dizilerine maruz kalan 1/5 ölçekli 5 katlı betonarme bir çerçeve için sarsma tablası testi yapmıştır (Şekil 2.28). Mw 7.9 Wenchuan depreminde ağır hasar gören test örneğinin prototipi, Çin yönetmeliklerinin eski versiyonuna göre tasarlanmış ve inşa edilmiş bir ortaokul binasıdır. Binanın alt katının yüksekliği 4.0 m, diğer katların yüksekliği ise 3.6 m'dir. Betonarme kolonların boyutları (80 x 80 mm) ve (70 x 70 mm)'dir. Sınıflarda ve koridorlarda yer alan enine ve boyuna kirişlerin kesitleri sırasıyla (50 x 120 mm), (50 x 80 mm), (50 x 70 mm) ve (40 x 70 mm)'dir. Prototip binanın donatıları konum ve katlarda farklı olduğundan, 6 çeşit kolon, 20 çeşit kiriş ve 2 çeşit döşeme içeren donatı detayları test numunesi için tasarlanmıştır. Sismik diziyi oluşturmak için bir MS ve üç AS'nin yer hareketi kayıtları Wenchuan kuvvetli yer hareketi veri tabanından seçilmiştir.



Şekil 2.28. Çerçevenin genel görünüşü ve yapı elemanlarının geometrik özellikleri (Qiao ve ark., 2020)

Her sismik simülasyondan sonra numunenin frekansları azalmış, bu da yerel hasar birikmesi nedeniyle test numunesinin küresel rijitliğinin azaldığını göstermiştir. Frekanstaki önemli azalma, MS-AS dizilerinin neden olduğu kümülatif hasarların numunenin sismik performansı üzerindeki büyük etkisi olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Hem MS hem de sonraki AS'ler sırasında maksimum katlar arası yer değiştirme en üst katta meydana gelmiştir. Numunenin kümülatif hasarının büyümesiyle birlikte artçı şok etki oranı (AIR) değerleri önemli ölçüde artmıştır. AS'nin yapısal tepkiler üzerindeki etkilerinin AS'lerin özelliklerine bağlı olduğu bildirilmiştir. Bu deneysel araştırma, yapısal performans üzerindeki karmaşık AS etkilerini vurgulamıştır çünkü bunlar, esas olarak MS, yapısal tepki parametreleri ve AS özelliklerinin neden olduğu yapının birikmiş hasarı ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, özellikle yüksek sismisiteye sahip alanlarda bulunan yapıların sismik performans değerlendirmesinde ve sismik tasarımında AS etkilerinin iyi düşünülmesi gerektiği vurgulanmıştır (Qiao ve ark., 2020).

### 3. DONATILAR VE YAPI DİNAMİK PARAMETRELERİ

#### 3.1. Donatı Tanımı

Donatılar, betonla birlikte çalışıp çekme bölgesindeki gerilmeleri karşılamak üzere, yapı elemanlarından sıyrılmayacak şekilde, betonun içine yerleştirilmiş çelik çubuklardır. Betonla beraber çalışma özelliğini arttırmak ve donatının betona göre rölatif uzama ve kısalmasını önlemek için nervürlü donatılar kullanılmaktadır. Donatı eksenini doğrultusunda çekme veya basınç kuvveti taşıdığından kesit alanı ve çapı önemli olmaktadır (Göker, 2017). Donatı çeliğinin elastisite modülü  $2 \times 10^5$  MPa'dır (TS-708, 2010). Beton donatısı olarak kullanılacak çelikler TS 708'e uygun olmalıdır. Çeşitli donatı sınıflarının TS 708'de verilen mekanik özelliklerinden bazıları, Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. TS-708 göre donatı sınıflarının mekanik özellikleri (TS-708, 2010)

Tip	Düz Yüzeyle		Nervürlü				Profili
	S220	S420	B420B	B420C	B500B	B500C	B500A
<b>Sınıf</b>	S220	S420	B420B	B420C	B500B	B500C	B500A
<b>Akma dayanımı (en az) <math>R_e</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	220	420	420	420	500	500	500
<b>Çekme dayanımı (en az) <math>R_m</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	340	500	-	-	-	-	550
<b>Çekme dayanımı/akma dayanımı oranı <math>R_m/R_e</math></b>	1.20 (en az)	1.15 (en az)	1.08 (en az)	$\geq 1.15$ $< 1.35$	1.08 (en az)	$\geq 1.15$ $< 1.35$	-
<b>Deneysel akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranı <math>R_{e act}/ R_{e nom}</math> (max)</b>	-	1.30	-	1.30	-	1.30	-
<b>Kopma uzaması (en az) <math>A_5</math> (%)</b>	18	10	12	12	12	12	5
<b>Maksimum yükte toplam uzama (en az) <math>A_{gt}</math> (%)</b>	-	-	5	7.5	5	7.5	2.5

Sünek davranışı olabildiğince sağlamak amacıyla; Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'de kiriş, kolon ve perdelerin uçlarında kullanılacak çeliğin (TBDY,2018);

1. Nervürlü olması
2. Akma dayanımı  $R_e \geq 420$  veya  $R_e \geq 500$  N/mm<sup>2</sup> olması
3. Çekme dayanımı/akma dayanımı oranının  $1.15 \leq R_m/ R_e < 1.35$  olması



4. Deneysel akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranının  $R_{e \text{ act}} / R_{e \text{ nom}} \leq 1.3$  olması
5. Kopma uzamasının  $A_s \geq \%10$  olması
6. Eşdeğer karbon oranının  $\leq \%0.50$  olması istenmektedir.

### 3.2. Kolon Türleri

Betonarme kolonlar sınıflandırılırken donatının türü ve niteliği göz önünde bulundurulur.

#### 3.2.1. Etriyeli kolonlar

Uygulamada en sık görülen betonarme kolon türüdür. Boyuna donatılar belli adım aralıklarla daha küçük çaplı etriye adı verilen donatılar ile enine doğrultuda dıştan sargılanarak oluşturulur. Etriye yerleşim tipleri ve kesitleri farklı şekilde oluşturulabilen etriyeli kolonlar, kesitlerinin köşeleri arasında boyuna donatı olması durumunda çirozlarla ya da ek etriyelerle bağlanırlar.

Etriyenin başlıca görevleri;

- Kolonlarda meydana gelen kesme kuvvetini beton kesitle birlikte taşımak
- Kolonların sünekliğini arttırmak
- Kolonlardaki boyuna donatıların burkulma boyunu azaltmak
- Beton dökme sırasında boyuna donatıların kalıp içinde düzgün durmasını sağlamaktır.

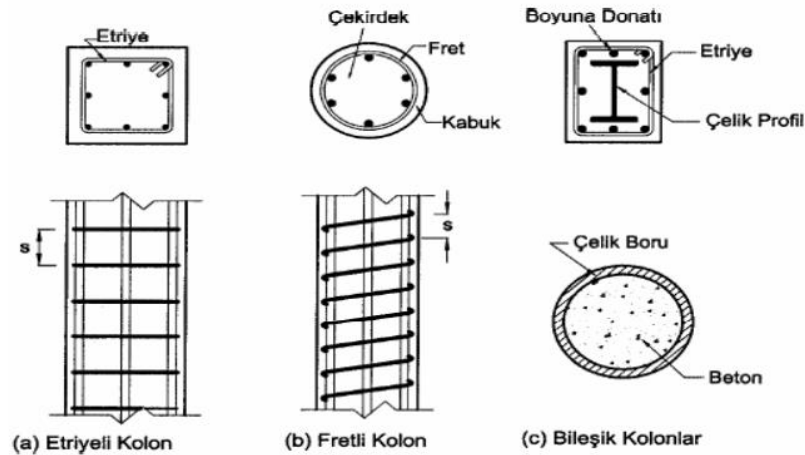
Betonarme kolonlarda eksenel yükleme sonucunda basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Yükleme ileri aşamalarında etriyeli kolonun betonunda ezilmeler oluşmakta ve kopan parçalar neticesinde boşalan kısımlarda boyuna donatılar burkulmaktadır. Etriyelerin sık aralıklarla yerleştirilmesi sonucunda boyuna donatıların burkulma boyları azalacak ve donatıların burkulması için daha büyük yükler gerekecektir. Tekniğine uygun yerleştirilmiş sık etriyeli kolon seyrek etriyeli kolona göre daha sünek davranacaktır.

### 3.2.2. Fretli (spiral donatılı) kolonlar

Yük taşıma kapasiteleri yüksek olan fretli kolonlar etriyeli kolonlar kadar yaygın kullanılmamaktadır. Fretli kolonlarda enine donatı spiral şeklinde kolon boyunca boyuna donatıyı ve kolonun çekirdek alanını sargılamaktadır. Dolayısıyla fretlerin açılması gibi bir durumla karşılaşılmaz ve sargı donatısı ancak kopma sonucunda görevini yerine getiremez. Fretli kolonlarda etriyeli kolonlara benzer olarak eksenel basınç artırıldığı zaman ilk olarak fretlerin sargıladığı çekirdek alanı dışındaki beton örtüsü dökülmeye başlar. Ancak kolon kesitinin dairesel olması nedeniyle fret donatısı kolonun hem genel dayanımına hem de sünekliğine önemli katkıda bulunmaktadır. Etriye kolonlarda meydana gelen etriyelerin açılması ya da kolon kesitinin dışa doğru şişmeye çalışması nedeniyle etriyelerin boyuna donatıya ya da çiroza tutunmadığı serbest açıklığında eğilmesi gibi bir davranış fretli kolonlarda meydana gelmez. Tam aksine, eksenel yük altında şişmeye çalışan çekirdek betonun bu hareketine karşı koyan fret donatısında eksenel çekme etkisi, dolayısıyla da göbek (çekirdek) betonuna sargılama etkisi meydana gelmektedir. Bu sebepten ötürü etriyeli kolonların ağır hasar gördüğü depremi fretli kolonlar daha hafif hasarla atlatabilmektedir. Fretli kolonlarda eksenel yükleme çok fazla olması durumunda deformasyonlar olacaktır fakat kırılma etriyeli kolonlardaki gibi gevrek olmayacaktır, daha sünek bir davranış oluşacaktır.

### 3.2.3. Birleşik kolonlar

Etriye, fret ve çelik profillerle birlikte bir bütün olarak oluşturulan kolonlara ise “Birleşik Kolon” denir. Kolon türleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kolon türleri (Sümer, 2009)

### 3.3. Sargı Donatısının Etkileri

Sargı donatısının betonarme yapı elemanlarının dinamik davranışında iki temel etkisi vardır (Sarıbaş, 2013):

1. Betonun dayanımı ve dayanıklılığını arttırmak; bu durum betonarme yapıda rötre sebebiyle oluşacak çatlakları ve taşıyıcı elemanlardaki göçmeleri engelleyecektir.
2.  $\sigma_c$ - $\epsilon_c$  ilişkisinde eğimin daha fazla azalmasını önleyerek eğilme tasarımında maksimum kullanılabilir şekil değiştirme ( $\epsilon_{cu}$ ) değerini %40 kadar daha artırır. Böylece sargı donatısı ile betonun sünekliği artar.

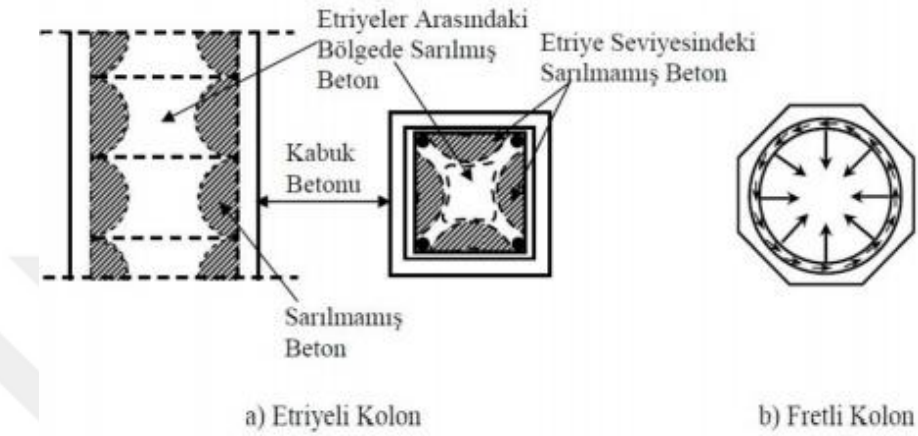
### 3.4. Sargı Donatısında Etkili Olan Parametreler

Sargı donatısını etkileyen parametreler şu şekilde sıralanabilir (Özkul, 2009):

1. Etriye Oranı; hacimsel oran  $\rho_w$  ile de tanımlanan, betonarme taşıyıcı elemandaki etriyelerin hacminin, sarılmış kesitin çekirdeğinin hacmine oranı olarak ifade edilir. Enine donatıların kütle merkezinden itibaren sardıkları bölüme çekirdek kesit denmektedir.  $\rho_w$ 'nin artışı ile sarılmış betonun hem dayanımı hem de sünekliği artmaktadır.
2. Enine Donatının (Etriye) Tasarım Akma Dayanımı ( $f_{ywd}$ ); Donatının dayanımı arttıkça sarılmış bölgenin basıncı da artar. Sarılma hesabında (özellikle yönetmeliklerde) enine donatıdaki gerilme artışı ( $f_{yw}$ ) dikkate alınmaz.
3. Betonun Karakteristik Basınç Dayanımı ( $f_{ck}$ ); Daha yüksek basınç dayanımına sahip betonun sünekliği, daha düşük basınç dayanımına sahip betondan azdır. Ayrıca aksel yüklemenin aynı miktarı için yatay genişleme (Poisson etkisi) düşük basınç dayanımı durumunda daha fazladır, bu yüzden beklendiği gibi bu durumda (pasif) sargı, yüksek dayanımlı beton elemanda göstereceği gerilme artışına göre daha fazla gerilmeye maruz kalacağından daha etkili olacaktır.
4. Enine Donatı (Etriye) Aralıkları ( $s$ ); Hacimsel etriye oranı ( $\rho_w$ ) için sargılanma oranının artması etriyeler arası mesafelerin azalması demektir. Yani basınca maruz bir elemanda etriye aralığının daha yakın olması betonarme elemanın sünekliğini olumlu yönde etkileyecektir, çünkü enine donatıların (etriye) en

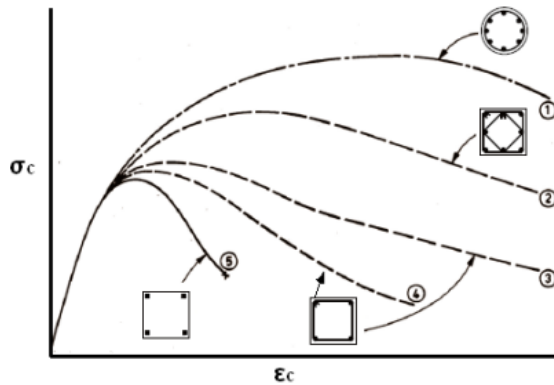
önemli görevi, boyuna donatıların, örtü betonu atılmadan önce erkenden burkulmasını önlemektir.

5. Enine Donatı (Etriye) Şekli; Bir elemanda çeşitli etriye şekilleri kullanılır. Sarılmamış betonun etkili bölgesi küçüldükçe dayanım ve süneklik artar. Şekil 3.2’de sargı donatıları ve etkili sarılmış bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Genel sargı tipleri (Özkul, 2009)

Şekil 3.3’te enine donatı düzeninin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir. Dairesel etriye (bir numaralı eğri) en etkili sargı donatısıdır. İki numaralı eğri, çepeçevre etriye ile birlikte diyagonal etriye ile sarılmış dikdörtgen betonarme elemanı; üç ve dört numaralı eğri, çepeçevre etriye ile sarılmış dikdörtgen betonarme elemanı, beş numaralı eğri ise enine donatısı bulunmayan betonarme elemanı ifade etmektedir. Üç numaralı eğride; enine donatı aralıkları (s), dört numaralı eğriye göre daha azdır. Bu nedenle üç numaralı eğride hem gerilmeler hem de şekil değiştirmeler daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir (Işıltan, 2010).



Şekil 3.3. Enine donatı düzeninin sargı etkisi üzerindeki önemi (Ersoy, 2001)

Eğrilerin yorumlanmasından;

1. Etriye seyrek de olsa, süneklik artar.
2. Sık etriye, süneklik ve dayanımı arttırır.
3. Etriye serbest açıklığı ve adımının azalması sebebiyle çift etriye süneklik ve dayanımı önemli ölçüde arttırır.
4. Fretli kolonlar etriyeli kolonlara göre hem süneklik hem de dayanım açısından daha etkindir.
5. Donatılı betonlarda  $\varepsilon_{co}$  değeri sargı etkisi arttıkça büyümektedir (Işıltan, 2010).

Sargı etkisini etkileyen faktörler, karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Sargı etkisini etkileyen faktörler (Işıltan, 2010)

Faktörler	Faktör değişimi	Sargı etkisi değişimi
Enine donatı miktarı	↑	↑
Enine donatı çapı	↑	↑
Enine donatı dayanımı	↑	↑
Beton dayanımı	↑	↓
Eksenel yük düzeyi	↑	↓
Enine donatı aralığı	↓	↑
Enine donatı düzeni	Dairesel etriye > Sık Etriye > Etriye	
Boyuna donatı düzeni	Küçük çaplı, çok sayıda donatı > Büyük çaplı, az sayıda donatı	

### 3.5. Yapı Dinamik Parametreleri

Her yapı sistemi kütle, rijitlik ve sönümlenme özelliklerine bağlı özgün dinamik parametrelere sahiptir. Yapıların dinamik yükler altındaki davranışının belirlenebilmesi için yapı sistemlerinin dinamik parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Literatürde genel olarak yapı sistemlerinin dinamik parametreleri periyot, doğal titreşim frekansı, mod şekli ve sönüm oranı şeklinde sıralanmaktadır. Aşağıda bu parametreler açıklanmıştır:

### 3.5.1. Periyot

Bir binanın hâkim doğal titreşim periyodu, binaların sismik tasarımında yanal kuvvetleri, yer değiştirmeleri ve katlar arası ötelemeleri belirlemek için kullanılır. Gerçekçi bir hakim dönem belirlemek, özellikle betonarme yapılar için zordur. Bina sismik uyarıma doğrusal olmasa da elastik tepki verse bile yapı elemanlarında çatlama gelişmesi, bina bölmelerinin gevşemesi doğrusal olmayan tepkiye neden olarak yanal rijitlikte azalmaya neden olur. Bu da hakim dönem olarak adlandırılan temel dönemin uzatılması ile sonuçlanır. Bu nedenle, bir binanın hakim periyodu, deprem yoğunluğuna bağlı olduğu için emsalsiz bir şekilde tanımlanamamıştır (Chen ve ark., 2017).

Periyot değerinin bulunması için bazı deprem yönetmelikleri yaklaşık formüller verirken bazı yönetmeliklerde yaklaşık formüllerle birlikte Rayleigh oranı gibi gerçek değere oldukça yakın sonuç veren formüller kullanılmaktadır. Farklı deprem yönetmeliklerinde periyot hesabı için farklı formüller kullanılmasına karşın bu formüllerin matematiksel temeli aynıdır (Aksoylu ve Arslan, 2019). Genellikle yönetmeliklerde kullanılan periyot formülü denklem (3.1) kullanılarak türetilmiştir:

$$T = \alpha \cdot H^\beta \quad (3.1)$$

$T$  = Doğal titreşim periyodu

$\alpha$  = Yapı türüne göre değişen katsayı

$H$  = Bina yüksekliği

$\beta$  = Yönetmeliklerde genellikle değeri 3/4 olan sabit bir kat sayı

Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi uygulanan tüm binalarda (X) deprem doğrultusunda hakim doğal titreşim periyodu TBDY 4.7.3.1 maddesine göre denklem (3.2)'de verilen formülle hesaplanabilir.

$$T_p^{(X)} = 2\pi \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (m_i d_{fi}^{(X)2})}{\sum_{i=1}^N (F_{fi}^{(X)} d_{fi}^{(X)})} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

$T_p^{(X)}$  = Hakim doğal titreşim periyodu

$F_{fi}^{(X)}$  = i'inci kata etkiyen fiktif yük

$m_i = i$ 'inci katın kütlesi

$d_{fi}^{(X)}$  =  $i$ 'inci katın deplasmanı

Ancak deprem tasarım sınıfı (DTS) = 1, 1a, 2, 2a ve bina yükseklik sınıfı (BYS) $\geq 6$  olan binalarda ve DTS = 3, 3a, 4, 4a olan tüm binalarda hakim doğal titreşim periyodunun TBDY 4.7.3.4 numaralı bölümde verilen denklem (3.3)'deki yaklaşık yöntemle hesaplanmasına izin verilmektedir.

$$T_p^X \cong T_{pA} = C_t H_N^{3/4} \quad (3.3)$$

$H_N$  = Bina toplam yüksekliği

Bu ampirik formüldeki  $C_t$  farklı yapı türlerinde farklı değerler almaktadır:

$C_t = 0.1$  (Sadece betonarme çerçeveden oluşan binalarda)

$C_t = 0.08$  (Çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda)

$C_t = 0.07$  (Diğer tüm binalarda)

### 3.5.2. Frekans

Bir yapının doğal frekansları, bozulmaya maruz kaldığında yapının doğal olarak titreşme eğiliminde olduğu frekanslardır. Örneğin, bir piyanonun tellerinin her biri belirli bir frekansta titreşecek şekilde ayarlanmıştır. Doğal frekans için bazı alternatif terimler kullanılmaktadır: karakteristik frekans, temel frekans, rezonans frekansı ve normal frekans (Toledo, 2019). Doğal periyodun tersi frekanstır (Denklem 3.4). Frekans birimi (Hz) veya  $1/s$ 'dir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

$f$  = Frekans

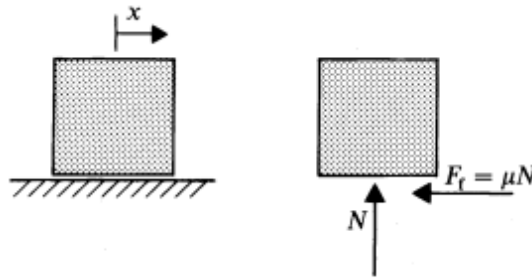
$T$  = Periyot

Eğer bir elastik sistem dış kuvvetler olmaksızın sadece iç kuvvetlerin etkisi altında titreşiyorsa, bu titreşim frekansına tabii frekans denir.



### 3.5.3. Sönüm oranı

Eylemsizlik ve elastik kuvvetlerin etkisi salınım hareketini sürdürme eğilimindeyken, enerji yayılımları nedeniyle geçici etki ortadan kalkar. Enerji yayılımı süreci genellikle sönümlenme olarak adlandırılır. Sönümlenme, genel olarak, titreşimin genliğini azaltma etkisine sahiptir ve bu nedenle, kararlılığı elde etmek için bir miktar sönümlenmenin olması istenir. Katı malzemeler tam olarak elastik değildir ve deformasyon işlemi sırasında malzemenin iç düzlemleri arasındaki bağıl hareketten dolayı iç sürtünme nedeniyle sönümlenme sergilerler. Bu tür malzemeler, viskoelastik katılar olarak adlandırılır ve sergiledikleri sönüm türü, yapısal veya histeretik sönüm olarak bilinir. İki yüzey arasındaki kayma temasının sonucunda yaygın olarak ortaya çıkan bir başka sönüm türü de Coulomb sönümdür. Coulomb sönümlenmede, temas halindeki yüzeyler arasındaki bağıl hareketten kaynaklanan sürtünme nedeniyle enerji ısı olarak dağılır. Bu durumda sönümlenme kuvveti, hareketin yönüne zıt bir yöne sahiptir (Shabana, 1991).



Şekil 3.4. Coulomb sönümlenmesi (Shabana, 1991)

Şekil 3.4'te gösterilen yüzey üzerinde kayan kütleyi düşünürsek, sürtünme kuvveti:

$$F_f = \mu N \quad (3.5)$$

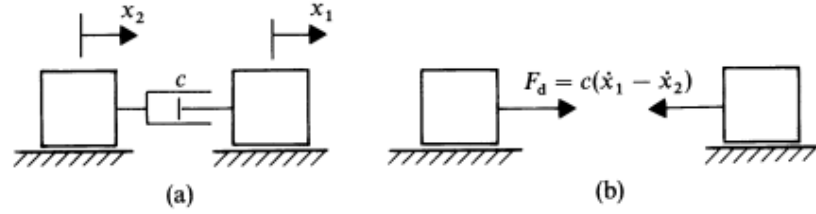
$F_f$  = Sürtünme kuvveti

$\mu$  = Coulomb sabiti

$N$  = Temas yüzeylerine dik olan kuvvet

Bununla birlikte en yaygın sönüm türü, üretilen sönümlenme kuvvetinin hızla orantılı olduğu viskoz sönümdür. Bu durumda enerji dağıtan elemana viskoz sönüm

veya amortisör denir. Bir amortisör örneği, otomobil süspansiyonlarındaki ve uçak iniş takımlarındaki amortisördür.



Şekil 3.5. Viskoz sönümlenme kuvveti (Shabana, 1991)

Şekil 3.5, viskoz bir sönüm ile birbirine bağlanan iki kütleyi göstermektedir.  $x_1$ 'in  $x_2$ 'den büyük olduğu varsayılırsa, bağlı hız ile orantılı olan dirençli sönümlenme kuvveti  $F_d$  şu şekilde verilir:

$$F_d = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3.6)$$

$\dot{x}_1$  = 1. kütlenin hızı

$\dot{x}_2$  = 2. kütlenin hızı

$F_d$  = Sönümlenme kuvveti

Sönüm, birçok karmaşık mekanizmanın sonucudur. Sönümün hesaplanan tepki üzerindeki etkisi, dinamik analizin tipine ve yükleme süresine bağlıdır. Çarpma darbesi veya şok patlamasından kaynaklananlar gibi kısa süreli yüklemeler için sönüm genellikle göz ardı edilebilir, çünkü yapı, önemli enerjinin dağılması için gerekli zamana sahip olmadan önce en yüksek tepkisine ulaşır. Sönümlenme, uzun süreli yüklemeler (deprem gibi) için önemlidir ve yapıya sürekli olarak enerji katan yüklemeler (dönen makineler gibi) için kritiktir (Toledo, 2019).

Sönüm, fiili uygulamalarda bir yapının sönümünün büyüklüğünü belirtmek için, tipik olarak sönüm oranı olan bir sönüm ölçüsü ile nicel olarak temsil edilir. Sönüm oranı, bir yapının titreşim tepkilerinden parametre tanımlama prosedürü yoluyla tahmin edilebilir. Bu anlamda, sönüm tahmini, sönümlenme parametresinin tanımlanması anlamına gelir (Cao ve ark., 2017).

Yapının dinamik parametrelerinden biri olan sönüm oranı yapıların doğrusal olmayan dinamik davranışının doğru şekilde tespit edilebilmesi yönünden oldukça

önemlidir fakat sönüm oranını etkileyen pek çok değişkenin olmasından dolayı (yapı boyutu, yapıyı oluşturan malzemelerin özellikleri, deprem büyüklüğü) sönüm oranının tanımlanması oldukça zor ve karmaşıktır (Karaahmetli ve Dündar, 2017). Literatürde bulunan sönüm mekanizmaları

- Viskoz Sönüm
- Rijitlikle Orantılı Viskoz Sönüm
- Kütleyle Orantılı Viskoz Sönüm
- Kütle ve Rijitlikle Orantılı (Rayleigh) Viskoz Sönüm
- Coulomb Sönümü
- Çevrimsel Sönüm
- Enerji Yayılma Sönümü

olarak sıralanabilir (Karaahmetli ve Dündar, 2017).

#### **3.5.4. Mod şekli**

Modlar, bir yapının doğal özellikleridir. Her mod, doğal (modal veya rezonans) bir frekans, modal sönümlenme ve mod şekli ile tanımlanır. Bir yapının malzeme özellikleri veya sınır koşulları değişirse, modları da değişecektir (Żóltowski ve Napieraj, 2017).

Belirli bir doğal titreşim frekansında yapının deforme olmuş şekli, normal titreşim modu olarak adlandırılır. Normal modu tanımlamak için kullanılan diğer bazı terimler mod şekli, karakteristik şekil ve temel şekildir. Her mod şekli, belirli bir doğal frekansla ilişkilendirilir. Doğal frekanslar ve mod şekilleri, yapısal özelliklerin ve sınır koşullarının fonksiyonlarıdır. Yapısal özellikler değişirse, doğal frekanslar değişir, ancak mod şekilleri mutlaka değişmeyebilir. Sınır koşulları değişirse hem doğal frekanslar hem de mod şekilleri değişir (Toledo, 2019).

Yapıların tespit edilen frekanslarında titreştiği geometrik konumunu mod şekli sergilemektedir. Analitik olarak da belirlenebilen mod şekilleri kullanılarak yapıların dinamik davranışına ilişkin bilgi edinilebilmektedir. Literatürde mod şeklinin belirlenmesi için geliştirilen metotlar genelde öncelikle yapı sisteminin rijitlik ve kütle matrislerinin tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu matrisler yardımı ile yapının mod şekli belirlenebilmektedir (Birdal, 2015).

### 3.6. Titreşim

İnşaat mühendisliği yapıları patlama, trafik, rüzgar ve deprem gibi titreşimlere maruz kalmaktadır. Titreşim olaylarının fiziksel doğasının anlaşılması, araştırmacılar ve mühendisler için her zaman önemli olmuştur. Yapıların titreşimi, yapı bileşenlerinde arıza, düşük performans, yorgunluk ve kullanım dışı kalma gibi büyük sorunlara ve kullanma kısıtlamalarına neden olabilir. Bu durumda, yapının titreşimini baştan sona anlamak esastır.

Titreşim başlangıç şartları ya da çevresel etkiler altında yapının gösterdiği tepkidir. Teorik olarak, titreşim özellikleri kütle, sertlik ve sönüm gibi yapısal fiziksel parametrelere bağlıdır. Serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki türü vardır.

#### 3.6.1. Serbest titreşim

Serbest titreşim terimi, harekete neden olan hiçbir dış kuvvet olmadığını ve hareketin öncelikle sistemin kütle elemanının bir denge konumundan ve/veya bir denge konumundan ilk yer değiştirmesi gibi başlangıç koşullarının sonucu olduğunu belirtmek için kullanılır. Sistemin hareketi boyunca enerji kaybı yoksa serbest titreşime sönümsüz serbest titreşim denir. Bu, bir atalet elemanı ve atalet elemanını denge konumuna geri getirme eğiliminde olan bir geri yükleme kuvveti üreten bir elastik elemandan oluşan en basit titreşimli sistemin durumudur. Enerji kaybının, sürtünmeden veya sistemin sistemden enerjiyi uzaklaştıran amortisörler gibi elemanlar içermesinden kaynaklanmasına serbest sönümlü titreşim denir (Shabana, 1991).

#### 3.6.2. Zorlanmış titreşim

Yapıya uygulanan dış kuvvet/ yük etkisiyle oluşmaktadır. Zorlanmış titreşim hareketi kuvvet yapıya etkidiği sürece devam etmektedir (Yanık ve ark., 2018).

### 3.7. Yer Hareketi Parametreleri

Yer hareketi parametreleri, kuvvetli yer hareketinin önemli özelliklerini nesnel, nicel biçimde tanımlamak için gereklidir. Kuvvetli yer hareketlerinin genliğini, frekans

içeriğini ve süresini karakterize etmek için birçok parametre önerilmiştir; bazıları bu özelliklerden sadece birini tanımlarken, bazıları da iki veya üçünü yansıtabilir. Deprem yer hareketlerinin karmaşıklığı nedeniyle, tüm önemli yer hareketi özelliklerini doğru bir şekilde tanımlayan tek bir parametrenin tanımlanması imkansız olarak görülmektedir (Jennings, 1985; Joyner ve Boore, 1988).

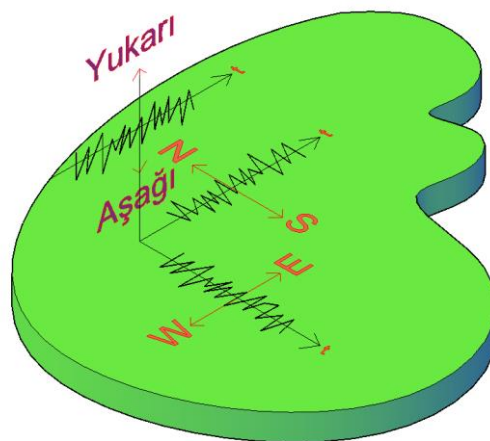
### 3.7.1. Genlik parametreleri

Zaman alanında en sık kullanılan genlik parametreleri maksimum yer ivmesi, maksimum yer hızı ve maksimum yer deyişirmesidir.

Maksimum yer ivmesi, yer hareketinin yüksek frekans bileşeni ile yakından ilişkilidir ancak tek başına hareketin süresi veya frekans içeriği ve hareketin hasar potansiyeli hakkında herhangi bir bilgi sağlamaz. Yer hareketinin genliğı düşünöldüğünde, en yaygın olarak kullanılan ölçü maksimum yer ivmesidir (PGA). PGA, ivme zaman geçmişinin en büyük (mutlak) değıeridir (Tekin, 2006).

Akselogramdan elde edilen verilerin iki bileşeni vardır (Şekil 3.6):

- Yatay ivme
  - Doğı-Batı (EW)
  - Kuzey-Güney (NS)
- Düşey ivme



Şekil 3.6. Akselogram tarafından kaydedilen bileşenler

Genellikle deprem sırasında düşey ivmenin neden olduğı düşey kuvvetlere karşı yapının güvenlik payı yatay ivmenin neden olduğı yatay kuvvetlere kıyasla daha büyük

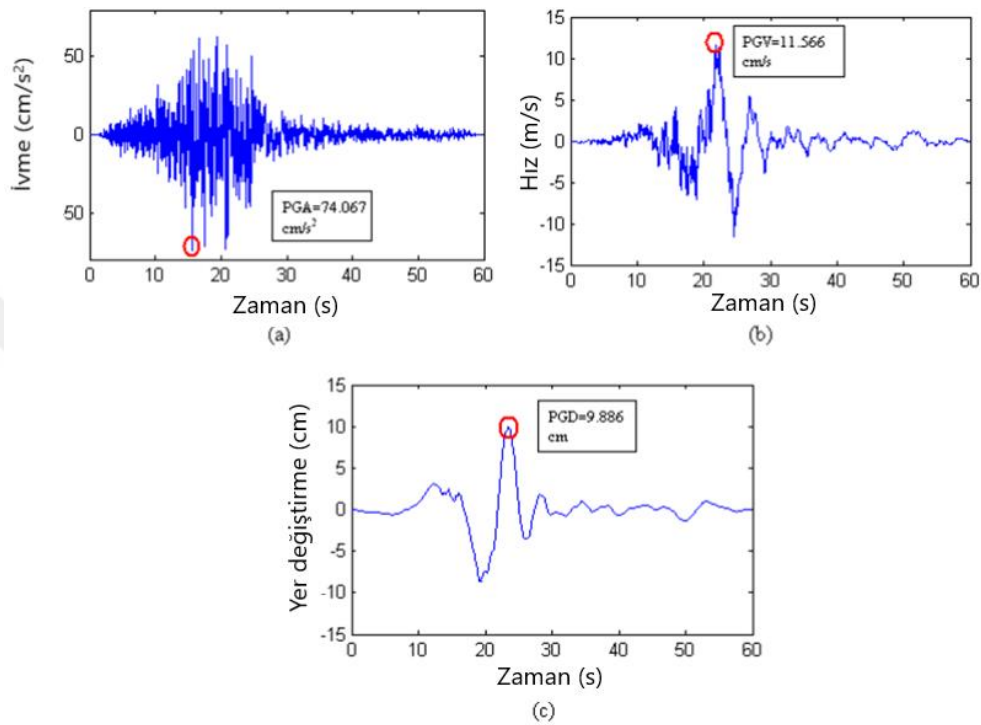
olduğu için yatay yer ivmelerinin genlikleri tasarımda dikkate alınmaktadır. Yapım işlerinde yerçekimi kaynaklı statik düşey kuvvetlere karşı güvenlik marjları genellikle depremler sırasında düşey ivmelerin neden olduğu dinamik kuvvetlere karşı yeterli direnç sağladığı düşünüldüğü için düşey ivmeler deprem mühendisliğinde yatay ivmelere göre daha az ilgi görmüştür. Ancak son zamanlarda meydana gelen şiddetli depremlerden elde edilen verilerden özellikle faya yakın bölgelerde düşey ivme değerlerinin yatay yer ivmelerinden daha büyük olduğunun tespit edilmesi neticesinde hem sismoloji hem de deprem mühendisliği literatüründe düşey ivme değerlerinin daha ayrıntılı incelemesi yaygınlaşmaya başlamıştır. Amerika, İran, İsrail, Hindistan gibi ülkelerde düşey deprem etkisi uzun zamandır dikkate alınırken ülkemizde 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile düşey deprem etkilerinin dikkate alınması zorunlu hale gelmiştir.

Maksimum yer hızı (PGV), yer hareketinin orta frekans bileşeninin iyi bir göstergesini sağlayan başka bir yer hareketi genliği ölçüsüdür. Yer hareketi genliğinin karakterizasyonu için kullanılan PGV, hız zaman geçişinin maksimum (mutlak) değeridir. Orta frekans aralığındaki yüklemelere karşı hassas yapı ve tesisler (yüksek binalar, köprüler vb.) için potansiyel hasarı doğru bir şekilde belirlemede PGV kullanılmaktadır.

Maksimum yer değiştirme (PGD), yer hareketinin genliğini ölçen başka bir parametredir. Maksimum yer değiştirme, yer hareketinin düşük frekans bileşeninin genliklerini daha doğru bir şekilde tanımlar. Maksimum yer ivmesi ve maksimum yer hızı durumunda olduğu gibi, maksimum yer değiştirme, yer hareketinin frekans içeriği ve süresi hakkında hiçbir bilgi sağlamaz. Yer hareketi, yer değiştirme zaman geçişi ve maksimum değeri, maksimum yer değiştirmesi ile de tanımlanabilir. Bununla birlikte, akselerogramların filtrelenmesi ve entegrasyonundaki sinyal işleme hataları ve uzun dönemli gürültü nedeniyle, genellikle PGD'nin doğru bir şekilde belirlenmesi zordur (Campbell, 1985; Joyner ve Boore, 1988). Genel olarak, maksimum yer değiştirme, yer hareketinin bir ölçüsü olarak, maksimum yer ivmesi veya maksimum yer hızından daha az kullanılmaktadır (Kramer, 1996).

Yukarıda bahsedildiği gibi, bu parametrelerin yer hareketini karakterize etmek için kullanılması, yer hareketinin süresini ve frekans içeriğini açıklayamamaları ve ayrıca farklı deprem zeminlerinin bağıl kuvvetlerini belirlemek için yeterli olmamaları

gibi birtakım sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, kuvvetli yer hareketini karakterize etmek için genellikle frekans içeriği veya süre parametreleri gibi ek bilgiler gereklidir. Şekil 3.7’de Heart Bar State Park istasyonunda 1999 Hector Mine depreminin yatay bileşeni için kaydedilen ivme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri sunulmuştur (Tekin, 2006).



Şekil 3.7. Heart Bar State Park istasyonunda kaydedilen 1999 Hector Mine depreminin yatay bileşeni için zaman geçişleri: (a) yer ivmesi; (b) yer hızı; (c) yer değiştirme (Tekin, 2006)

### 3.7.2. Frekans içeriği parametreler

Frekans içeriği, bir yer hareketinin genliğinin farklı frekanslar arasında nasıl dağıldığını tanımlar. Bir deprem hareketinin frekans içeriği, bu hareketin etkilerini güçlü bir şekilde etkileyeceğinden, hareketin karakterizasyonu, frekans içeriği dikkate alınmadan tamamlanamaz (Kramer, 1996).

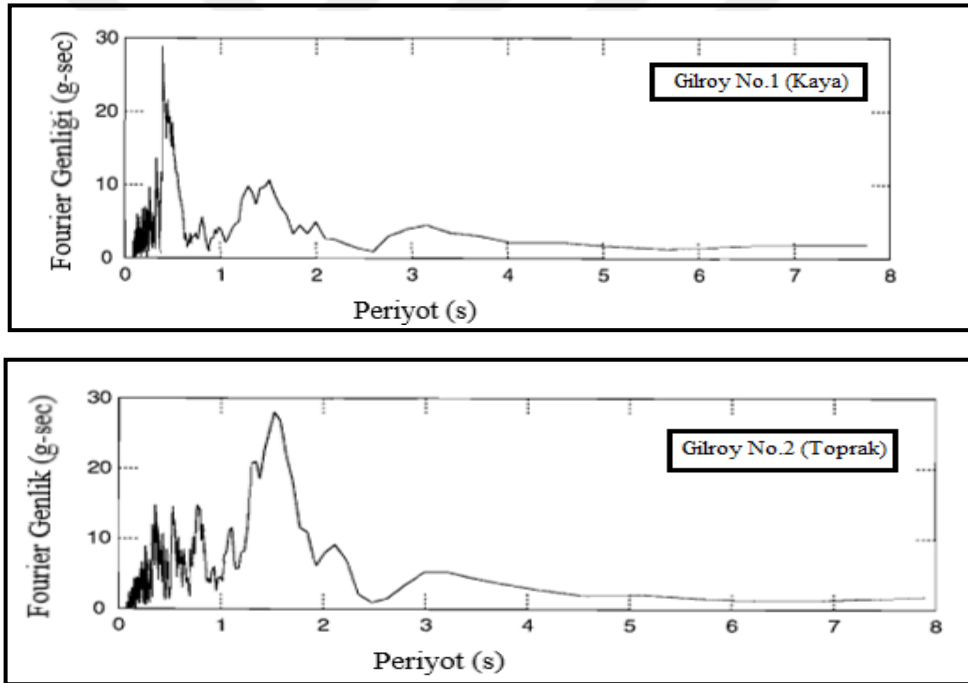
#### 3.7.2.1. Yer hareketi spektrumu

Herhangi bir periyodik fonksiyon farklı frekans, genlik ve faza sahip bir dizi basit harmonik terimin toplamı olarak Fourier analizi kullanılarak ifade edilebilir. Kuvvetli yer hareketlerinin frekans içeriği genellikle farklı tür spektrumlar kullanılarak tespit edilir.



### Fourier spektrumu

Fourier genliğinin frekansa karşı grafiği Fourier genlik spektrumunu; Fourier faz açısının frekansa karşı grafiği Fourier faz spektrumunu verir. Güçlü bir yer hareketinin Fourier genlik spektrumu, hareketin genliğinin frekansa göre nasıl dağıldığını gösterir. Bir hareketin frekans içeriğini çok net bir şekilde ifade eder. Fourier genlik spektrumu dar veya geniş olabilir. Dar bir spektrum, hareketin düzgün, neredeyse sinüzoidal bir zaman geçişi üretebilen baskın frekansa sahip olduğunu gösterir. Geniş bir spektrum, daha pürüzlü, düzensiz bir zaman geçişi üreten çeşitli frekansları içeren bir harekete karşılık gelir. Gilroy No.1 (kaya) ve Gilroy No.2 (toprak) hareketlerinin doğu-batı bileşenleri için Fourier genlik spektrumu Şekil 3.8'te gösterilmiştir (Kramer, 1996).



**Şekil 3.8.** Gilroy No. I (kaya) ve Gilroy No.2 (toprak) kuvvetli hareket kayıtlarının E-W bileşenleri için Fourier genlik spektrumları (Kramer, 1996)

Spektrumların şekilleri oldukça farklıdır: Gilroy No.1 (kaya) spektrumu düşük periyotlarda (veya yüksek frekanslarda) en güçlü iken, Gilroy No.2 (toprak) kaydı için bunun tersi gözlemlenir. Frekans içeriğindeki bir fark, zaman alanındaki hareketler yakından incelenerek saptanabilir. Gerçek deprem hareketlerinin Fourier genlik spektrumları düzleştirildiğinde ve logaritmik ölçeklerde çizildiğinde, karakteristik

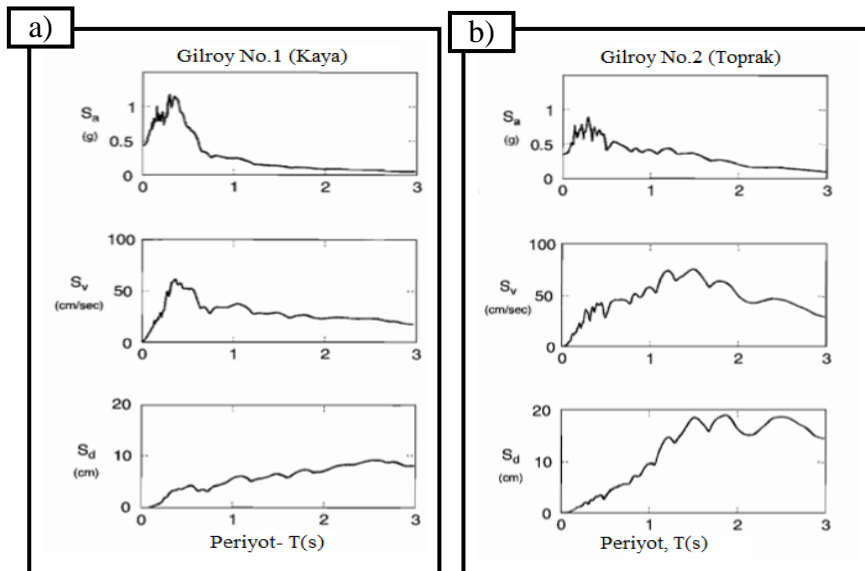
şekilleri daha kolay görülebilir. Faz açıları harmonik hareketlerin zirvelerinin meydana geldiği zamanları kontrol ettiğinden, Fourier faz spektrumu yer hareketinin zamanla değişimini etkiler. Fourier genlik spektrumlarının aksine, gerçek deprem kayıtlarından alınan Fourier faz spektrumları karakteristik şekiller göstermez (Kramer, 1996).

### Güç spektrumu

Bir yer hareketinin frekans içeriği, bir güç spektrumu veya güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu ile de tanımlanabilir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu, bir yer hareketinin istatistiksel özelliklerini tahmin etmek ve rastgele titreşim tekniklerini kullanarak stokastik tepkiyi hesaplamak için de kullanılabilir (Vanmarcke, 1976; Yang ve ark., 1986; Clough ve Penzien,1993;). Bir güç spektral yoğunluğu, sinyalin, güç içeriğinin frekansa karşı ölçüsüdür.

### Tepki spektrumu

Üçüncü tip bir spektrum deprem mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tepki spektrumu, tek serbestlik dereceli sistemin (TSDS) doğal frekansının (veya doğal periyodunun) ve sönüm oranının bir fonksiyonu olarak belirli bir giriş hareketine tek serbestlik dereceli bir sistemin maksimum tepkisini tanımlar. Gilroy No.1 (kaya) ve Gilroy No.2 (toprak) kayıtları için hesaplanmış tepki spektrumları Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. a) Gilroy No. 1 (kaya) kuvvetli hareket kayıtları için tepki spektrumları b) Gilroy No.2 (toprak) kuvvetli hareket kayıtları için tepki spektrumları (%5 sönüm) (Kramer, 1996)

Tepki spektrumları, aritmetik ölçeklere göre ayrı ayrı çizilebilir veya üçlü grafiklerde birleştirilebilir. Üçlü çizim, dikey ekseninde spektral hızı, yatay ekseninde doğal frekansı (veya periyodu) ve eğimli eksenlerde ivme ve yer değiştirmeyi gösterir. Spektral değerler doğal frekans yerine doğal periyoda göre çizildiğinde, ivme ve yer değiştirme eksenleri tersine çevrilir. Elastik tepki spektrumları, doğrusal yapısal kuvvet-yer değiştirme davranışını varsayar. Bununla birlikte, birçok gerçek yapı için, elastik olmayan davranış, deprem yer hareketleri tarafından indüklenebilir.

Süneklik arttıkça spektral ivmeler azalır, ancak toplam yer değiştirmeler artar. Tepki spektrumları, bir TSDS yapısının tepkisi tarafından “filtrelendiklerinden”, güçlü yer hareketi özelliklerini dolaylı olarak yansıtır. Giriş hareketinin genliği, frekans içeriği ve daha az ölçüde süresi, tümü spektral değerleri etkiler. Tepki spektrumlarının sadece bir dizi farklı yapının maksimum tepkilerini temsil ettiğini hatırlamak önemlidir. Ancak, deprem mühendisliğinde yapıların tepkisi büyük önem taşımaktadır ve tepki spektrumunun kuvvetli yer hareketinin karakterizasyonu için önemli ve kullanışlı bir araç olduğu kanıtlanmıştır.

### 3.7.3. Depremin süresi

Güçlü yer hareketinin süresi, deprem hasarı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilir. Güçlü bir yer hareketinin süresi, fay boyunca birikmiş şekil değiştirme enerjisinin kırılma yoluyla serbest bırakılması için gereken süre ile ilgilidir. Fay kırılmasının uzunluğu veya alanı arttıkça, kırılma için gereken süre artar. Sonuç olarak, artan deprem büyüklüğü ile kuvvetli hareketin süresi artar. Bir deprem ivme kaydı genellikle depremin başladığı andan hareketin arka plan gürültüsü seviyesine döndüğü zamana kadar olan tüm ivmeleri içerir. Mühendislik amaçları için, ivme kaydının sadece kuvvetli hareket kısmı önemlidir. Bir ivme kaydında kuvvetli hareketin süresinin değerlendirilmesi sorununa farklı yaklaşımlar getirilmiştir. Zarf süre (Bracketed Duration), bir eşik ivmesinin (genellikle 0.05g) ilk ve son aşılmaları arasındaki süre olarak tanımlanır (Bolt, 1973). Sürenin başka bir tanımı, toplam enerjinin %5 ile %95'inin kaydedildiği noktalar arasındaki zaman aralığına dayanmaktadır (Trifunac ve Brady, 1975).

## 4. MODAL ANALİZ

Deprem mühendisliği araştırmalarında, yapı hakkında bilgi edinmek, teorileri ve tahminleri doğrulamak ve numuneler üzerindeki dinamik etkileri incelemek için yapının dinamik parametrelerinin (frekans, mod şekli, sönüm oranı) belirlenmesi önemli bir husustur.

Modal analiz bir yapıyı frekans, sönümleme ve mod şekilleri gibi doğal özellikleri, yani dinamik özellikleri açısından tanımladığımız bir süreçtir. Basitçe modal analiz yapıların doğal özelliklerinin incelenmesidir. Hem doğal frekansı hem mod şeklini hem de sönüm oranını anlamak, yapısal sistemi tasarlamamıza yardımcı olur. Mod şekillerinin anlaşılması ve görselleştirilmesi tasarım sürecinde çok değerlidir. Tasarımdaki zayıflıkların veya iyileştirmenin gerekli olduğu alanların belirlenmesine yardımcı olur (Avitabile, 2001).

Kütleye, rijitliğe, sönümlemeye ve dağılımlarına bağlı olarak her sistemin kendine özgü dinamik parametreleri vardır. Bu parametreler sistemleri tanımlamak için kullanılabilir. Tanımlanan parametreler, dikkate alınan sistemin matematiksel bir modelini formüle etmek için kullanılabilir. Formüle edilmiş matematiksel model, sistemin modal modeli olarak adlandırılır ve karakteristikler için bilgi, onun modal verileri olarak bilinir (Karakan, 2008).

Yapıların dinamik parametrelerini belirlemede başlıca 2 yöntem kullanılmaktadır: teorik modal analiz ve deneysel modal analiz. Teorik modal analizde yapının kütlesi, rijitliği, sönümü kullanılarak formülasyonlarla yapının doğal titreşim frekansı ve mod şekli belirlenmektedir. Deneysel modal analizde ise yapıya etki eden titreşimler ölçülerek yapının doğal titreşim frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri tespit edilmektedir (Türker, 2011).

### 4.1. Teorik Modal Analiz

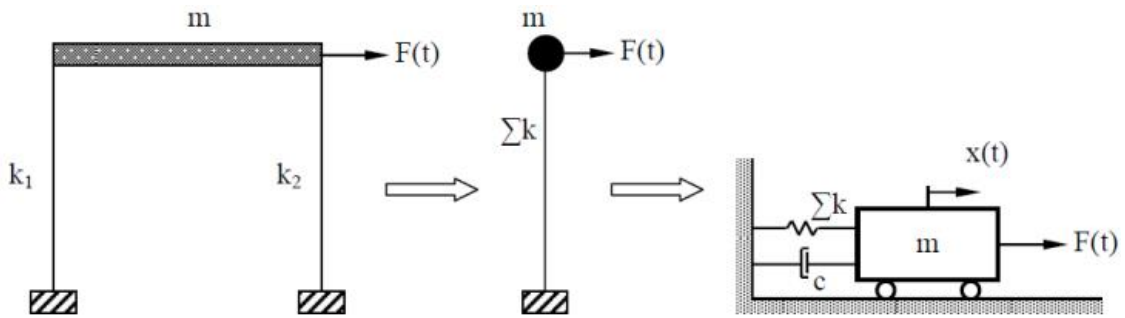
Teorik modal analiz (TMA) yöntemlerinde gerçek yapıya eşdeğer matematiksel olarak kolay çözümlenebilecek basitleştirilmiş bir analitik model oluşturularak bu modele karşılık gelen matematik model tespit edilir. Matematiksel modelden analiz için diferansiyel denklemler çözümlenmek suretiyle istenilen dinamik karakteristikler elde

edilebilir. Gerçekteki sistemlerin çok büyük ve karmaşık yapıya sahip olmasından dolayı teorik yöntemlerle modal analiz oldukça zorlaştığından belirli kabuller yapılarak numerik yöntemler geliştirilmiştir ve bilgisayar programlarıyla büyük ve karmaşık yapıların çözümlenebilmesi kolaylaştırılmıştır. Teorik modal analiz yöntemindeki kabuller sonucu yapının gerçek dinamik davranışı belirlenememekle birlikte yeterli yaklaşık sonuçlara ulaşılmaktadır. Yapıların dinamik karakteristiklerinin teorik modal analiz yöntemiyle belirlenmesinde en yaygın kullanılan sistem Sonlu Elemanlar (SE) yöntemidir (Yılmaz, 2021).

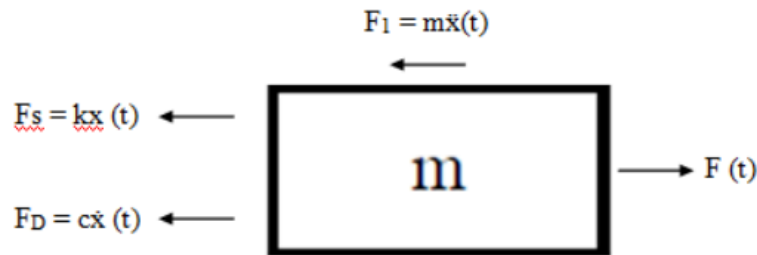
Yapıların dinamik parametrelerinin tek serbestlik dereceli sistemler ve çok serbestlik dereceli sistemler için tespit edilişi aşağıda açıklanmıştır.

#### 4.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler

Bir düğüm noktasının uzayda üç doğrusal ve üç açısal olmak üzere altı hareket edebilme kabiliyeti vardır. Düğüm noktasının her bir hareket kabiliyeti serbestlik derecesi olarak adlandırılır. Bir serbestliğe sahip sistemlere “Tek Serbestlik Dereceli Sistemler” (TSDS) denir (Chopra, 1995; Türker, 2005; Birinci, 2010).



Şekil 4.1. Tek serbestlik dereceli sistemlerin modeli (Turan, 2012)



Şekil 4.2. Tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest cisim diyagramı (Turan, 2012)

Tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılarak

$$F_I + F_D + F_S = F(t) \quad (4.1)$$

elde edilir.

$F_I$  = Atalet kuvveti

$F_D$  = Sönüm kuvveti

$F_S$  = Yay kuvveti

$F(t)$  =Uygulanan dış kuvvet

Bu denklemde gerekli ifadeler yerine yerleştirilirse, tek serbestlik dereceli sistemler için genel hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (4.2)$$

olarak bulunur.

$m$  = Kütle

$c$  = Sönüm katsayısı

$k$  = Yay katsayısı

$\ddot{x}(t)$  =Kütlenin ivmesi

$\dot{x}(t)$  =Kütlenin hızı

$x(t)$  =Kütlenin yer değiştirmesi

### **Tek serbestlik dereceli sistemlerde sönümsüz serbest titreşim**

Tek serbestlik dereceli sistemlerde sönümsüz serbest titreşim için (4.2) nolu denklemde  $c = 0$  ve  $F(t) = 0$  yazılarak hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (4.3)$$

olarak bulunur. (4.3) nolu denklemin çözümü için  $x(t) = Ce^{st}$  kabul edilerek  $x(t) = Ce^{st}$ ,  $\dot{x}(t) = Cse^{st}$ ,  $\ddot{x}(t) = Cs^2e^{st}$  ifadeleri (4.3) nolu denklemde yerine yazılarak

$$Ce^{st}(ms^2 + k) = 0 \quad (4.4)$$

elde edilir.  $C \neq 0$  ve  $e^{st} \neq 0$  olduğundan

$$(ms^2 + k) = 0 \quad (4.5)$$

$$s_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.6)$$

bulunur. Aşağıdaki gibi tanımlanarak

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.7)$$

$\omega$  sönümsüz doğal açısal frekans elde edilir (Chopra, 1995).

Kütlenin sinüzoidal salınımı sürekli olarak tekrar eder ve bir çevrimi tamamlamak için gereken zaman aralığı periyottur:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (4.8)$$

Periyodun tersi doğal frekanstır:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (4.9)$$

### **Tek serbestlik dereceli sistemlerde sönümsüz zorlanmış titreşim**

Tek serbestlik dereceli sistemlerde sönümsüz zorlanmış titreşim için (4.2) nolu denklemde  $c = 0$  yazılır.  $F(t) = Fe^{i\omega t}$  ve  $x(t) = Xe^{i\omega t}$  kabul edilerek (4.2) nolu denklemde yerine yazılıp,

$$(k - \omega^2 m)Xe^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad (4.10)$$

denklemleri elde edilir.

$X$  = Yer değiştirme

$F$  = Uygulanan kuvvet

$t$  = Zaman

$i$  = Karmaşık sayı sembolü

(4.10) nolu denklem kullanılarak sönümsüz zorlanmış titreşim yapan tek serbestlik dereceli bir sistemin frekans davranış fonksiyonu,

$$H(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \quad (4.11)$$

şeklinde bulunur (Chopra, 1995; Türker, 2005).

### **Tek serbestlik dereceli sistemlerde viskoz sönümlü serbest titreşim**

Tek serbestlik dereceli sistemlerde viskoz sönümlü serbest titreşim için (4.2) nolu denklemde  $F(t) = 0$  yazılır.

$$x(t) = X e^{st} \quad (4.12)$$

kabul edilip (4.2) nolu denklemde yerine yazılıp,

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (4.13)$$

denklemleri bulunur. (4.13) nolu denklem çözümlenerek

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \quad (4.14)$$

$$s_{1,2} = -\omega\xi \pm i\omega\sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.15)$$

$$s_{1,2} = -\omega\xi \pm i\omega_d \quad (4.16)$$



bulunur. Bu denklemde geçen  $\omega_d$  ve  $\xi$  aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\omega_d = \omega\sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.17)$$

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (4.18)$$

$\omega$  = Sönümsüz doğal açısal frekans

$\omega_d$  = Sönümlü doğal açısal frekans

$\xi$  = Sönüm oranı

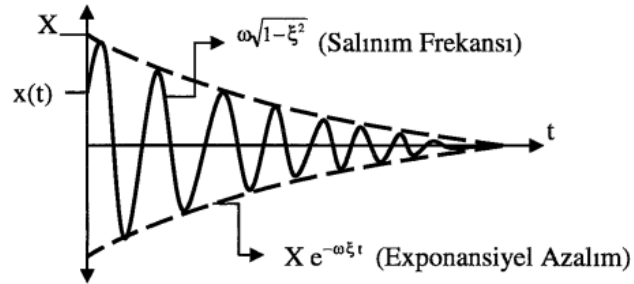
$c_{cr}$  = Kritik sönüm

(4.13) nolu denklemin çözümünden bulunan s değerleri (4.12) nolu denklemde yerine yazılırsa;

$$x(t) = X e^{(-\omega\xi \pm i\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \quad (4.19)$$

$$x(t) = X e^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \quad (4.20)$$

bulunur (Chopra, 1995; Türker, 2005). Tek serbestlik dereceli sistemlerde sönümlü serbest titreşim grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Tek serbestlik dereceli sistemlerde sönümlü serbest titreşim grafiği (Türker, 2005)

### Tek serbestlik dereceli sistemlerde viskoz sönümlü zorlanmış titreşim

Tek serbestlik dereceli sistemlerde viskoz sönümlü zorlanmış titreşim için  $F(t) = F e^{i\omega t}$  ve  $x(t) = X e^{i\omega t}$  kabul edilip (4.2) nolu denklemde yerine yazılırsa

$$(-\omega^2 m + i\omega c + k)Xe^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad (4.21)$$

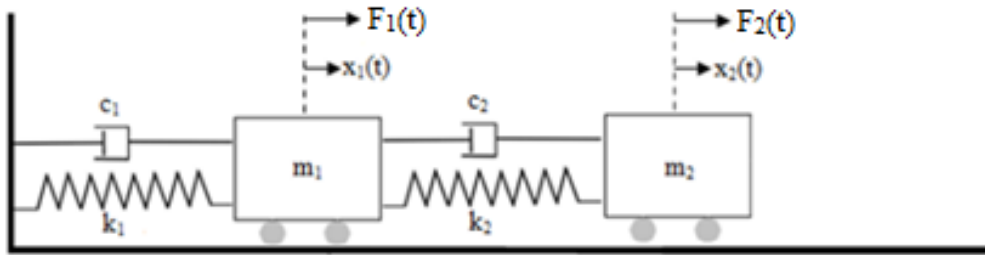
denklemini elde edilir. (4.21) nolu denklemden zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü tek serbestlik dereceli bir sistemin frekans davranış fonksiyonu

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(\omega c)} \quad (4.22)$$

şeklinde bulunur.

#### 4.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler

Yapılarda karşılaştığımız sistem çok serbestlik dereceli sistemlerdir (ÇSDS). TSDS'deki skaler değerlerin yerini ÇSDS'de vektörel ve matris büyüklükler alır (Birinci, 2010).



Şekil 4.4. Çok serbestlik dereceli sistemlerin modeli

Çok serbestlik dereceli bir sistemin genel hareket denklemini,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (4.23)$$

dir (Chopra, 1995; Birinci, 2010).

$[M]$  = Kütle matrisi

$[C]$  = Sönüm matrisi

$[K]$  = Rijitlik matrisi

$\{x(t)\}$  = Yer değiştirme vektörü

$\{\dot{x}(t)\}$  = Hız vektörü

$\{\ddot{x}(t)\}$  = İvme vektörü

$\{F(t)\}$  = Kuvvet vektörü

### Çok serbestlik dereceli sistemlerde sönümsüz serbest titreşim

Sönümsüz serbest titreşim durumunda  $[C] = 0$  ve  $\{F(t)\} = 0$  alınıp (4.23) nolu denklem düzenlenerek

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (4.24)$$

olur. (4.24) nolu denklemin çözümü için basit harmonik hareket dikkate alınarak

$$\{x(t)\} = \{A\}\sin(\varphi + \omega t) \quad (4.25)$$

olduğu varsayılır (Chopra, 1995; Birinci, 2010).

$\{A\}$  = Genlik vektörü

(4.25) nolu denklem türetilerek (4.24) nolu denklemde yazılırsa

$$-\omega^2[M]\{A\}\sin(\varphi + \omega t) + [K]\{A\}\sin(\varphi + \omega t) = \{0\} \quad (4.26)$$

elde edilir. Bu denklemden  $\sin(\varphi + \omega t)$  terimi çıkartılarak

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\} = \{0\} \quad (4.27)$$

denklemini elde edilir ve bu denklem  $[M]^{-1}$  ile çarpılarak,

$$[[D] - \lambda[I]]\{A\} = \{0\} \quad (4.28)$$

standart öz değer problemi bulunur (Chopra, 1995; Birinci, 2010). Burada

$$[D] = [M]^{-1}[K]$$

$[I]$  = Birim diyagonal matrisi

$$\lambda = \omega^2$$

dir. (4.27) nolu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (4.29)$$

karakteristik determinant denklemi elde edilir. Denklemin çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör) ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ ) elde edilir. Doğal frekansların büyükten küçüğe sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır. Her  $\lambda_r$  öz değer vektörüne karşılık bir  $A_r$  öz vektör veya doğal mod şekli belirlenir (Birinci, 2010).

$$\{A_r\} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{Bmatrix}_r \quad r = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.30)$$

Doğal titreşim modlarını elde etmek için (4.28) nolu denklem düzenlenirse

$$[D]\{A\} = \lambda\{A\} \quad (4.31)$$

olur ve r. mod için

$$[D]\{A\}_r = \lambda_r\{A\}_r \quad (4.32)$$

elde edilir. (4.32) nolu denklem  $C_r$  sabiti ile çarpılırsa

$$C_r\{A\}_r = \{\Phi\}_r \quad (4.33)$$

yazılırsa

$$[D]\{\Phi\}_r = \lambda_r\{\Phi\}_r \quad (4.34)$$

denklemini elde edilir.  $\{\Phi\}_r$  modal vektörlerinin beraber yazılmasıyla  $[\Phi]$  modal matrisi elde edilir ve aşağıdaki denklem gibi gösterilir (Birinci, 2010).

$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\Phi\}_1 \{\Phi\}_2 \{\Phi\}_3 \dots \{\Phi\}_n] \quad (4.35)$$

## 4.2. Deneysel Modal Analiz

Deneysel modal analiz, doğrusal zamanla değişmeyen bir titreşim sisteminin modal modelini türetmek için kullanılan deneysel bir tekniktir (Allemang, 1999). Deneysel modal analizde modal model, fiziksel yapıdan alınan titreşim ölçümlerine dayanmaktadır. Ancak, birtakım sınırlamalar ve hatalar nedeniyle, ölçülen verilerden oluşturulan model, yapının gerçek davranışını istenildiği kadar yakından temsil etmeyebilir (Schwarz ve Richardson, 1999). Genel olarak, deneysel modal analizin sınırlamaları ve hataları şunlardır:

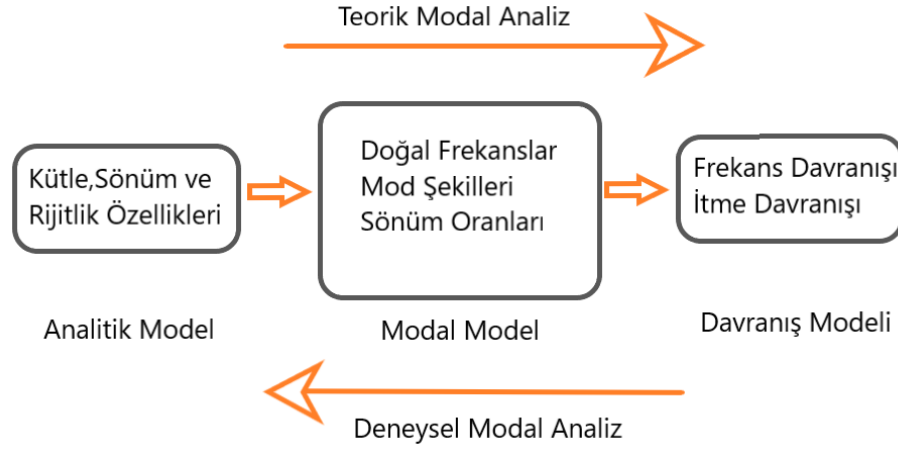
- Ortam gürültüsünden kaynaklanan hatalar
- Dönüştürücülerin yapıya zayıf ya da yanlış bağlanması
- Sınırlı sayıda ölçülebilen serbestlik derecesi
- Modun düğümündeki uyarma nedeniyle durağan mod oluşması
- Dönme serbestlik derecelerini ölçmede zorluk
- Deneysel verilerin yanlış analizi (Operatörün deneyim eksikliği ya da hatası)
- Yapıya ağır mekanik cihazlarının eklenmesi sonucu yapı titreşimin değiştirilerek yanlış ölçülmesi

Genel olarak modal test prosedüründeki hataların kaynakları üç grupta toplanabilir (Karakan, 2008):

1. Deneysel veri toplama hataları
2. Sinyal işleme hataları
3. Modal analiz hataları

Ölçümler gerçek yapılardan toplandığı ve fiziksel sistemin tüm gerçek özellikleri dikkate alınarak elde edildiği için deneysel verilere daha fazla güvenilebilir. Bu nedenle, deneysel modal analiz sonucunda oluşturulan matematiksel modeller, yapısal dinamiklerde karşılaşılan bazı problemlerden kaçınmak veya bazı sorunları gidermek için çeşitli şekillerde kullanılabilir. Modal test sonuçları, teorik model analiz ile oluşturulan analitik modelleri güncellemek/kalibre etmek için de kullanılabilir. Böylece

güncellenmiş analitik modeller ele alınan sistemin dinamik davranışını daha doğru bir şekilde yansıtabilecektir (Ewins, 2009). Teorik modal analiz ve deneysel modal analiz işlem sırası Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



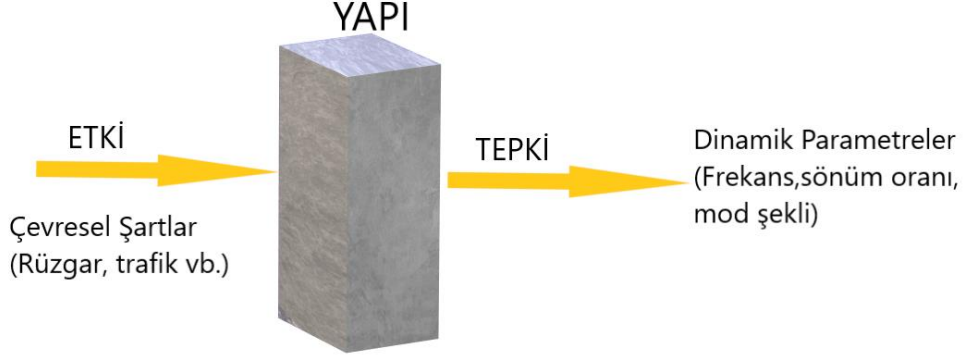
Şekil 4.5. Teorik modal analiz ve deneysel modal analizde oluşturulan modeller ve işlem sırası

Yapıların dinamik sistem parametrelerini deneysel olarak tanımlamak için temelde farklı iki yöntem mevcuttur: Geleneksel Deneysel Modal Analiz (EMA) ve Operasyonel Modal Analiz (OMA) (Cantieni, 2004). EMA'da yapı, bilinen girdi kuvvetleri (darbeli çekiçler, düşürme ağırlıkları ve elektrodinamik sarsıcılar vb.) tarafından uyarılır ve yapının tepkisi ölçülür. OMA'da ise yapı bilinmeyen girdi kuvvetleri (trafik yükü, rüzgar ve su dalgası etkileri gibi ortam uyarıları) tarafından uyarılır ve yapının tepkisi ölçülür (Bayraktar ve ark., 2011).

#### 4.2.1. Operasyonel modal analiz (OMA)

Operasyonel modal analiz çevresel etkilerden oluşan titreşimleri kullanarak yapıların dinamik parametrelerini belirlemede kullanılan yöntemdir (Şekil 4.6). OMA yapılırken yapının bir bütün olarak sürekli olduğu, malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının değişmediği, yapıda meydana gelen titreşimlerin küçük olduğu kabulleri yapılır (Turan, 2012). Operasyonel modal analizin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (Yılmaz, 2021):

- Uygulaması kolay ve ekonomik bir yöntemdir.
- Büyük ölçekli yapılar üzerinde de kullanılabilir.
- Tahribatsız bir yöntem olması nedeniyle özellikle tarihi yapılar üzerinde kullanımı hızla artan bir analizdir.



Şekil 4.6. Operasyonel modal analiz yöntemi

Oparasyonel modal analizde çevresel etkilerden oluşan titreşimlerin (rüzgar, trafik, dalga hareketi vb.) yapıya etki ederken yapının bu etkilere tepkisi ölçülmektedir. Yapının gösterdiği tepkilerin değerlendirilmesinde birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin matematik altyapısı aynı olup veri işleme tekniği, denklem çözme teknikleri, matris dizilişleri vb. konularda farklılıklar göstermektedirler (Altunışık, 2010). Bu yöntemler ikiye ayrılmaktadır:

#### **Frekans tanım alanındaki yöntemler**

Frekans tanım alanındaki yöntemler, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyona dayanmaktadır (Altunışık, 2010). Frekans tanım alanındaki yöntemlere aynı zamanda parametrik olmayan yöntemler de denilmektedir. Frekans tanım alanındaki yöntemler (Şahin, 2009);

- Piklerin Seçilmesi (PS) Yöntemi
- Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) Yöntemi
- Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi
- Polimax yöntemleridir.

#### **Zaman tanım alanındaki yöntemler**

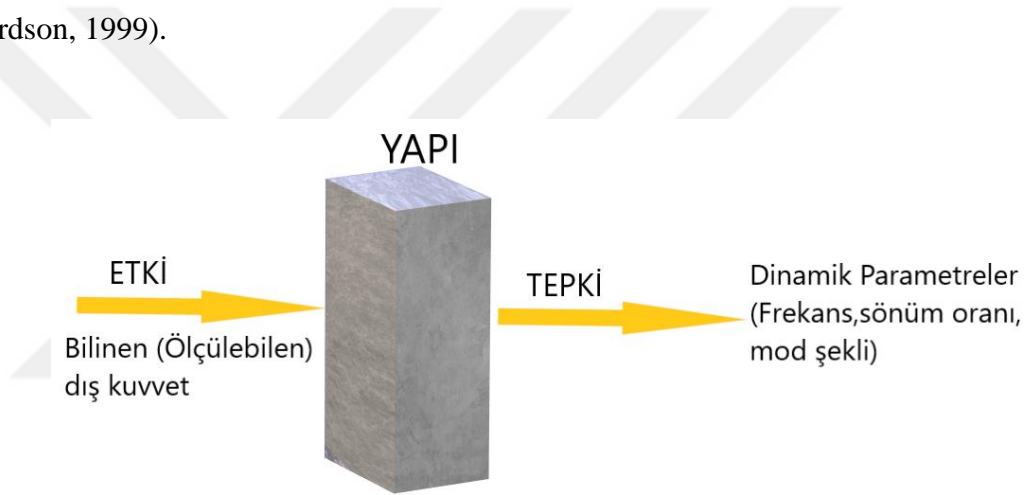
Zaman tanım alanındaki yöntemler ise her bir noktada sinyalin zaman geçişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır (Altunışık, 2010). Zaman ortamındaki yöntemler (Şahin, 2009);

- Rastgele Azaltım, Tekrarlanan Yöntemi

- Maksimum Olasılık Yöntemi
- Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleridir.

#### 4.2.2. Geleneksel deneysel modal analiz (EMA)

Geleneksel deneysel modal analiz (EMA) yönteminde yapıya bilinen (ölçülebilir) bir dış etki uygulanır ve yapının ivmesi ölçülerek tepkisi belirlenir (Şekil 4.7). Ağırlıklı olarak EMA, çözümü sezgi, analitik modeller veya önceki deneyimlerle belirlenemeyen bir dinamik problemi (titreşim veya akustik) açıklamak için kullanılır (Havaldar ve ark., 2012). 1970'lerin başında dijital FFT spektrum analizörünün ortaya çıkışından bu yana EMA'nın popülaritesi istikrarlı bir şekilde artmıştır (Schwarz ve Richardson, 1999).



Şekil 4.7. Geleneksel deneysel modal analiz yöntemi

Frekans tepki fonksiyonlarını belirlemek amacıyla bir sistemi harekete geçirmek için kullanılan girdiler ikiye ayrılır (Allemang, 1999):

1. Rastgele sinyaller
2. Deterministik sinyaller

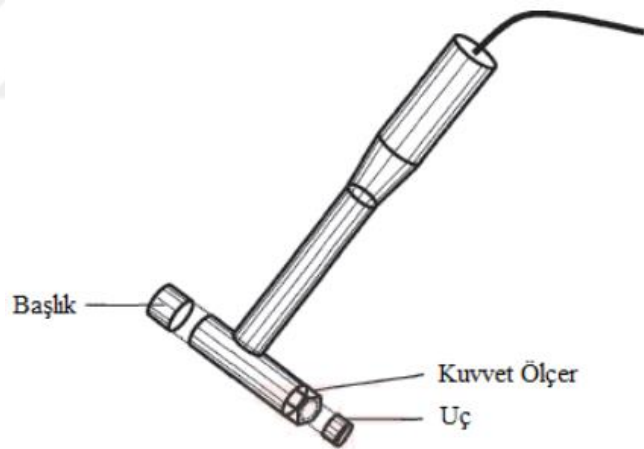
Rastgele sinyaller, belirli bir süre boyunca istatistiksel özellikleriyle tanımlanırlar. Rastgele sinyallerde sinyali tanımlamak için matematiksel denklem formüle edilemezken, deterministik sinyaller açık bir matematiksel denklem içinde temsil edilebilirler. Deterministik sinyaller ayrıca “periyodik” ve “periyodik olmayan” sinyaller olarak ikiye ayrılır. Periyodik deterministik sinyal atamasındaki en yaygın girişler sinüzoidal iken, periyodik olmayan deterministik sinyal atamasındaki en yaygın girişler formda geçicidir (Karakan, 2008).



Uyarma, yapısal bir sistemde bir yanıt oluşturmak için kullanılan herhangi bir girdi biçimidir (Allemang, 1999). Uyarma seçimi, iyi bir ölçüm ile zayıf bir ölçüm arasındaki farkı oluşturabilir. Uyarma seçimine, birbiriyle ilişkili oldukları için hem istenen işlev türünden hem de mevcut uyarma sistemi türünden yaklaşılmalıdır. Farklı çeşitlerde uyarma mekanizmaları olmasına karşın en çok kullanılan uyarma mekanizmaları darbe çekici ve sarsma tablasıdır.

### Darbe çekici

Yapıya dış kuvvet uygulamada yaygın olarak kullanılan aletlerdir. Yapıya titreşim uygulamak için kullanılan cihaz çekiçten ibarettir. Darbe çekiçlerini oluşturan temel kısımlar değiştirilebilir uç ve başlıklardır (Şekil 4.8). Darbe çekicinin ucuna yerleştirilen kuvvetölçerler ile darbe çekicinin yapıya uyguladığı kuvvet ölçülür. Ölçülen kuvvet ile yapıya uygulanan kuvvetin eşit olduğu kabulü yapılmaktadır (Türker, 2005).



Şekil 4.8. Yaygın kullanılan çekiç türü (Türker, 2005)

Darbe çekicinin kullanımını kolay olmasına rağmen dikkat edilmesi gereken noktalar vardır:

- Darbe çekici kullanırken her darbe, önceki darbeye aynı ya da yakın olmalıdır (Türker, 2005).
- Darbe kuvvetinin yönü yüzey normali doğrultusunda olmalıdır (Türker, 2005).
- Darbe çekici kullanımında çekiç ucunun seçimi, elde edilen ölçüm üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Giriş uyarma frekansı aralığı, esas olarak seçilen

ucun sertliği ile kontrol edilir. Uç ne kadar sert olursa, uyarma kuvveti tarafından uyarılan frekans aralığı o kadar geniş olur. Uç, tüm ilgili modlar, dikkate alınacak frekans aralığı üzerindeki darbe kuvveti tarafından uyarılacak şekilde seçilmelidir. Çok yumuşak bir uç seçilirse iyi bir ölçüm elde etmek için gerekli olan tüm modlar yeterince uyarılmayacaktır. Darbe testi yapılırken, tüm modların iyi bir şekilde uyarılması ve iyi bir frekans tepkisi ölçümü elde edilmesi için uygun ucun seçilmesine özen gösterilmelidir (Avitabile, 2001).

### **Sarsma tablası**

Büyük servo-hidrolik sarsma tablası sistemleri, deneysel deprem mühendisliğinde temel araçlardandır. Sarsma tablası testleri gerçek depremlerin neden olduğu dinamik uyarıları yapı sistemlerine uygulayabilmektedir. Sarsma tablası test teknolojisi inşaat, titreşim, elektronik, mekanik, hidrolik, kontrol ve bilgisayar mühendisliği gibi çok disiplinli ve entegre teknolojileri içerir. Genel olarak sarsma tablalarının bileşenleri üç alt sistemde gruplandırılabilir: mekanik, hidrolik ve elektronik. Tipik olarak çelik levha, dikey ve yanal yataklar, tutma payandaları ve aktüatörler mekanik kategorisine; pompalar, akümülatörler, servo valfler, dalgalanma tankı hidrolik kategorisine; kontrolör, sinyal koşullandırma üniteleri ve geri iletme sensörleri elektronik kategoriye dahil edilir (Ozcelik ve ark., 2008).

Sarsma tablaları büyüklüklerine, eksen sayılarına ve tahrik mekanizmalarına göre farklı özelliklerde üretilerek sınıflandırılabilirler. Sarsma tablasının büyüklüğüne bağlı olarak tahrik, servo motorlarla ya da hidrolik sistemlerle sağlanmaktadır. Bu sistemlerin kendilerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Servo motorlu sarsma tablalarının en büyük dezavantajı yük kapasitelerinin ve deplasman değerlerinin kısıtlı olmasıdır. Bu nedenle genellikle servo motorlu sarsma tablalarında ölçekli modeller test edilmektedir. Hidrolik sistemli sarsma tablalarında yüksek deplasman kapasitesine ve yük kapasitesine sahip olmasından dolayı tam ölçekli yapılar test edilebilmektedir. Hidrolik sistemli sarsma tablalarının dezavantajı ise çok yüksek maliyetlerle üretilmesidir (Tayfur ve ark., 2020).

Eksen sayısına göre başlıca 3 tip sarsma tablası vardır: Tek eksenli sarsma tablası, çift eksenli sarsma tablası ve çok eksenli sarsma tablası (Tirkey ve Kumar, 2019).

Tek eksenli sarsma tablası, deprem titreşimine maruz kaldığında yapının tepkisini gözlemlemek için küçük ölçekli deneylerde kullanılmaktadır (Şekil 4.9). Tabla boyutu (0.5 x 0.5 m), (1 x 1 m), (1.5 x 1.5 m), (2 x 2 m) arasında değişmektedir. Tabla frekansının dayanma kapasitesi 100 Hz'den fazladır ve yük kapasitesi 50-10000 kg'a çıkmaktadır. Sistem, çeşitli dönüştürücüleri bağlamak için dijital kontrol ve veri toplama sistemlerinden oluşur. Kolay kurulumu sahiptir ve herhangi bir kalifiye profesyonel gerektirmemektedir (Tirkey ve Kumar, 2019).



Şekil 4.9. Tek eksenli sarsma tablası (Tirkey ve Kumar, 2019)

İki eksenli sarsma tablası da yapının sismik aktivitesini kaydeden tek eksenli sarsma tablası ile aynı prensipte çalışır ancak tek eksenli sarsma tablası ile karşılaştırsak daha iyi bir seçenektir çünkü burada tabla hem x hem de y yönünde hareket sağlamaktadır (Şekil 4.10). Tabla boyutları (0.5 x 0.5 m), (1 x 1 m), (1.5 x 1.5 m), (2 x 2 m), (3 x 3 m) arasında değişmektedir. İki eksenli sarsma tablaları 50-10000 kg yük taşıma kapasiteli ve 100 Hz'den fazla frekansa dayanıklı hidrolik sistemler tarafından çalıştırılabilirler (Tirkey ve Kumar, 2019).



Şekil 4.10. İki eksenli sarsma tablası (Tirkey ve Kumar, 2019)

Çok eksenli sarsma tablası ile modüler yapı üzerinde gerçek zamanlı deprem sismik aktiviteleri test edilebilmektedir (Şekil 4.11). Altı eksenli hareket sağlayabilir ve

sismik aktiviteleri, yer değiştirmeyi ve frekansı kaydetmek için çok sayıda dijital alım kullandığından kullanıma uygundur. Bu tabla, kontrollü denetimler altında bir laboratuvardaki büyük yapılar için kullanılabilir. Tablanın frekansı (0.01-50 Hz) arasında değişirken yer değiştirmesi 250 mm'ye kadar çıkabilir (Tirkey ve Kumar, 2019).



Şekil 4.11. Çok eksenli sarsma tablası (Tirkey ve Kumar, 2019)

Günümüzde sarsma tablası depremlerin binalarda, yapılarda veya bileşenlerinde oluşturduğu gerçek dinamik etkilerin en yakın simülasyonunu yeniden üretebilen bir araç olmasına karşı bu test yönteminin dezavantajları ve sınırlamaları vardır (Dimig ve ark., 1999; Krawinkler, 2000):

- Tam ölçekli yapıları test etmek için gerekli olan büyük sarsma tablalarının kurulum ve bakım maliyeti yüksektir.
- Numune boyutu sarsma tablası kapasitesi ile sınırlıdır.
- Yüksek ölçekli faktörlere sahip modeller test edilirken, özellikle bozulma davranışı ve bölgesel arıza modlarında, ölçek etkilerinin önemli olduğu kabul edilir.
- Sarsma tablasının etkileşimi ile ilişkili hareketlerin kontrol edilmesinde (devrilme momenti vb.) zorluk yaşanmaktadır.
- Özellikle tam ölçekli yapıları göçmeye yakın performans seviyelerine kadar test etmek yüksek risk içermektedir çünkü deney numunesinin göçmesi sırasında sarsma tablası ekipmanlarında (hidrolik krikolar, platform, dahili aletler vb.) kalıcı hasarlar oluşabilmektedir.

Geleneksel deneysel modal analiz yönteminde aşağıdaki aşamalar sırasıyla uygulanmaktadır:

- 1) Deney numunesi üzerindeki daha önceden belirlenen noktalara ivmeölçerler yerleştirilir.
- 2) Deney numunesine bilinen (ölçülen) dış etki uygulanır.
- 3) Deney numunesinin dış etkiye gösterdiği tepki fonksiyonları toplanır.
- 4) Deney numunesine uygulanan dış etki ile deney numunesinin gösterdiği tepki oranlanarak frekans davranış fonksiyonu elde edilir.
- 5) Frekans davranış fonksiyonu üzerinden farklı yöntemler ile analiz yapılarak yapının dinamik karakteristikleri elde edilir.

### **Frekans davranış fonksiyonu (FRF)**

Deneysel modal analiz için gerekli olan en önemli ölçüm frekans davranış fonksiyonudur. Deneysel frekans davranış fonksiyonu verileri genellikle titreşim testlerinden elde edilir. Frekans davranış fonksiyonu, çok basit bir şekilde, uygulanan bir kuvvet nedeniyle bir yapının çıkış yanıtının giriş uyarma kuvvetine oranıdır. Hem uygulanan kuvvet hem de yapının uygulanan kuvvete verdiği tepki aynı anda ölçülür. Yanıt yer değiştirme, hız veya ivme olarak ölçülebilir (Avitabile, 2001). Tepki hareketinin yer değiştirme, hız veya ivme olarak ölçülmesine bağlı olarak, FRF ve tersi farklı şekilde isimlendirilmektedir (Żóltowski ve Napieraj, 2017):

- Reseptans (Receptance) = Yer değiştirme / Kuvvet
- Akselerans (Mobility) = Hız / Kuvvet
- İnerans (Accelerance) = İvme / Kuvvet
- Dinamik rijitlik (Dynamic Stiffness) = 1/Reseptans
- Empedans (Impedance) = 1/ Akselerans
- Dinamik kütle (Dynamic Mass) = 1/ İnerans

Ölçülen zaman verileri, herhangi bir sinyal işleme analiz cihazında ve bilgisayar yazılım paketlerinde bulunan bir hızlı fourier dönüşümü algoritması kullanılarak zaman alanından frekans alanına dönüştürülür. Bu dönüşüm nedeniyle, fonksiyonlar karmaşık değerli sayılar haline gelir; fonksiyonlar, fonksiyonu tanımlamak için gerçek ve hayali bileşenleri veya büyüklük ve faz bileşenlerini içerir. (Avitabile, 2001).

Modal parametrelerin belirlenebilmesi için ölçülen giriş uyarı ve tepki verilerinin işlenerek test ve modal parametre tahmin yöntemlerine uygun bir forma getirilmesi gerekmektedir (Ewins, 2009). Verilerin dijital olarak işlenmesi, modsal veri toplamada çok önemli bir adımdır (e Silva ve Maia, 2012). Bir analog sinyali bir dizi dijital değer olarak temsil etme süreci, modern dijital sinyal işleme analizörlerinin temel bir gerekliliğidir. Pratikte, analogdan dijitale dönüştürme sürecinin amacı, frekans, büyüklük ve faz bilgisi açısından yeterli doğruluğu koruyarak dönüşümü elde etmektir. Analog cihazlar, imalat sırasında optimize edilir ve tatmin edici performans özellikleri, amaç için doğru ekipmanın seçilmesi ile elde edilir. Analog cihazların ötesinde, analogdan dijitale dönüştürmenin özellikleri birincil endişe kaynağıdır. Analogdan dijitale dönüştürme işlemi iki ayrı kavram içerir: örnekleme ve niceleme. Her konsept, bir dijital sinyal işleme analizörünün dinamik performansı ile ilgilidir. Örnekleme ile ilgili hususlar tek başına frekans doğruluğunu etkilerken hem örnekleme hem de niceleme hususları büyüklük ve faz doğruluğunu etkilemektedir (De Silva, 2006).

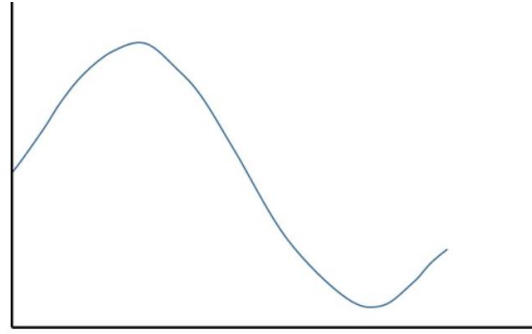
## Örnekleme

Örnekleme, bir sinyali ayrık zaman veya uzayın bir fonksiyonu olarak sayısal bir diziye dönüştürme işlemidir (De Silva, 2006). Analog sinyallerin bilgisayarlarda işlenebilmesi için “dijital” forma dönüştürülmesi gerekir. Analog bir sinyal hem zaman hem de genlik bakımından sürekli iken, dijital bir sinyal hem zaman hem de genlik bakımından ayrıktır. Bir sinyali sürekli zamandan ayrık zamana dönüştürmek için örnekleme adı verilen bir süreç kullanılır. Sinyalin değeri zaman içinde belirli aralıklarla ölçülür. Her ölçüm bir numune olarak anılır. Sinyal yüksek frekans bileşenleri içeriyorsa, sinyaldeki yüksek frekans bilgilerini kaybetmemek için daha yüksek hızda örnekleme yapılması gerekir. Bilginin sinyalde belirli bir frekansa kadar korunması gerekiyorsa, sinyalin hedef frekansının iki katı kadar örnekleme yapılması gerekir. Bu Nyquist oranı olarak bilinir. Örnekleme teoremi, bir sinyalin  $F$  frekansında örneklenmesi durumunda tam olarak yeniden üretilebileceğini belirtir; burada  $F$ , sinyaldeki maksimum frekansın iki katından büyüktür (Allemang, 1999).

## Niceleme (Quantization)

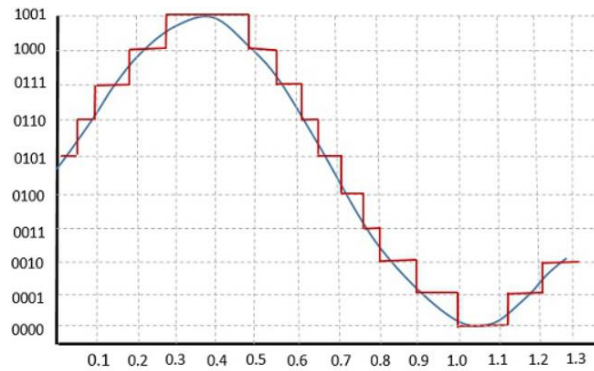
Analog sinyallerin sayısallaştırılması, yaklaşık olarak analog değerlere eşit olan değerlerin yuvarlanmasını içerir. Örnekleme yöntemi, analog sinyal üzerinde birkaç nokta seçer ve ardından bu noktalar, değeri neredeyse stabilize bir değere yuvarlamak için birleştirilir. Böyle bir işleme niceleme (Quantization) denir.

Analogdan dijitale dönüştürücüler, verilen analog sinyalden bir dizi dijital değer oluşturmak için bu tür bir işlevi yerine getirir. Şekil 4.12’de bir analog sinyali örneği gösterilmektedir. Bu sinyalin dijitale dönüştürülmesi için örnekleme ve niceleme işlemlerinden geçmesi gerekir.



Şekil 4.12. Analog sinyal örneği (Anonymous, 2022)

Bir analog sinyalin nicelenmesi, sinyalin bir dizi niceleme seviyesiyle ayrıştırılması ile yapılır. Niceleme, genliğin örneklenmiş değerlerini sonlu bir seviye seti ile temsil eder; bu, sürekli genlikli bir numunenin ayırık zamanlı bir sinyale dönüştürülmesi anlamına gelir. Şekil 4.13’te bir analog sinyalin nasıl nicelendiğini gösterilmektedir. Mavi çizgi analog sinyali, kahverengi çizgi ise nicelenmiş sinyali temsil eder.



Şekil 4.13. Niceleme yapılmış analog sinyal örneği (Anonymous, 2022)

Hem örnekleme hem de niceleme bilgi kaybına neden olur. Bir niceleme (Quantizer) çıktısının kalitesi, kullanılan niceleme seviyelerinin sayısına bağlıdır.

Frekans davranış fonksiyonunun doğru ölçümü, dijital sinyal işlemeyle ilgili hataların en aza indirilmesine bağlıdır. Deneysel verilerden tam olarak yararlanmak için ölçümdeki hataların kabul edilebilir seviyelere düşürülmesi gerekir. Ölçülen frekans davranış fonksiyonlarının kalitesinin, öncelikle gürültü ve sistematik hatalar olmak üzere birçok faktörden olumsuz etkilendiği iyi bilinmektedir. Ölçülen FRF'leri kullanan çeşitli analizlerin doğruluğunun ve güvenilirliğinin, büyük ölçüde ölçülen verilerin kalitesine bağlı olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle FRF'yi etkileyen faktörler sırasıyla aşağıda gösterilmiştir (Karakan, 2008):

1. Yapının Sınır Koşulları
  - Serbest
  - Sabit
2. Ölçüm Gürültüsü
  - Ekipman sorunu (güç kaynağı paraziti)
  - Kablo sorunları
  - Kablo hareketleri
3. Doğrusal Olmama
4. Dijital Sinyal İşleme Hataları
  - Aliasing,
  - Sızıntı
  - Pencereleme
  - Filtreleme
  - Yakınlaştırma
  - Ortalama alma
5. Kalibrasyon (operatör hatası)
  - Komple sistem kalibrasyonu
  - Dönüştürücü kalibrasyonu
6. Dönüştürücüler ve Amplifikatörler
  - İvmeölçer hassasiyeti
  - Dönüştürücülerin takılması ve yeri



Frekans davranış fonksiyonlarını değerlendirmeden önce unutulmaması gereken önemli noktalar şunlardır:

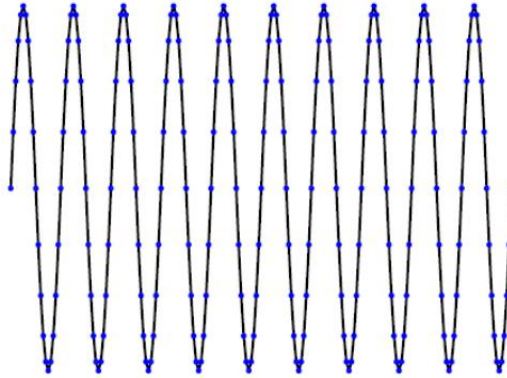
1. Sistem (o test için sınır koşullarıyla birlikte) verilen giriş/çıkış konumları için frekans davranış fonksiyonlarını belirler.
2. Veri toplanırken tüm hataların (örtüşme, sızıntı, gürültü, kalibrasyon vb.) ortadan kaldırılması veya en azından en aza indirilmesi önemlidir.
3. Modal parametreler tahmini frekans davranış işlevlerinden hesaplandığından, modal parametreler yalnızca tahmini frekans davranış fonksiyonu kadar doğrudur (Karakan, 2008).

### Analogdan dijitale dönüştürme (ADC) hataları

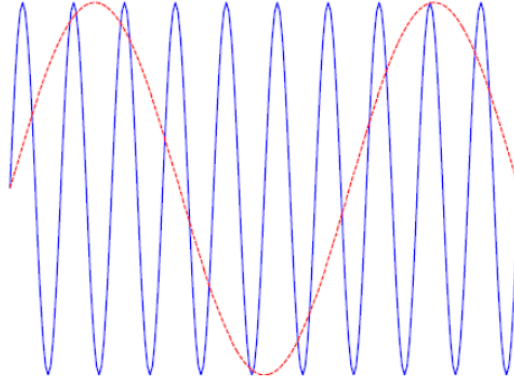
Çoğu modern veri toplama sistemi, ortalama kullanıcının analogdan dijitale dönüştürülme (ADC) hatalarıyla ilgilenmesine gerek kalmadığı ölçüde, verilerin ADC ile ilgili hataları en aza indirir (Jimin ve Zhi-Fang, 2001). Birincil ADC hataları, örtüşme ve niceleme hatalarıdır.

### Örtüşme hatası (Aliasing)

Örtüşme bir sinyal, analog sinyalin zayıf bir temsilini oluşturur. Örtüşme, bir sinyalin örneklenmiş verilerinde yanlış bir düşük frekans bileşeninin görünmesine neden olur. Yeterli örneklenmiş sinyal Şekil 4.14'te gösterilirken yetersiz örneklenmiş sinyal Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Şekil 4.15'te gösterilen yetersiz örneklenmiş sinyal, yeterli örneklenmiş sinyalden daha düşük bir frekansa (on döngü yerine iki döngü) sahip görünmektedir (Karakan, 2008).



Şekil 4.14. Yeterli örneklenmiş sinyal (Karakan, 2008)



Şekil 4.15. Yetersiz örneklenmiş sinyal (Karakan, 2008)

Örnekleme sıklığının artırılması, belirli bir zaman diliminde elde edilen veri noktalarının sayısını artırır. Genellikle, hızlı bir örnekleme frekansı, orijinal sinyalin daha yavaş bir örnekleme frekansından daha iyi temsilini sağlar. Belirli bir örnekleme frekansı için, örtüşme olmaksızın doğru bir şekilde temsil edilebilecek maksimum frekans, Nyquist frekansıdır. Nyquist frekansı, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi, örnekleme frekansının yarısına eşittir (Karakan, 2008).

$$f_N = (f_s/2) \quad (4.36)$$

$f_N$  = Nyquist frekansı

$f_s$  = Örnekleme frekansı

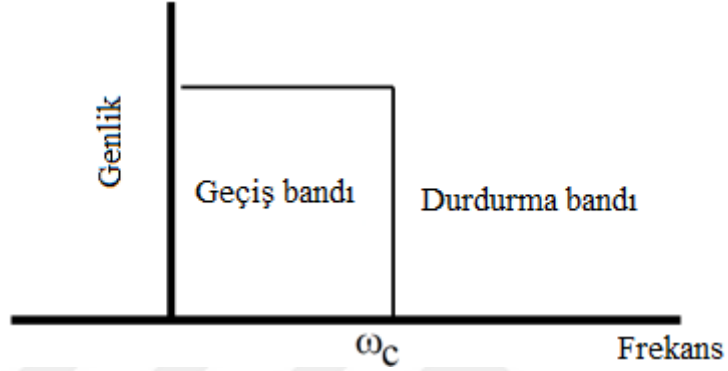
Örtüşme olan bir sinyalde, gerçekte Nyquist frekansının üzerindeki frekans bileşenleri, Nyquist frekansının altındaki frekans bileşenleri olarak görünür. Örnekleme frekansının yarısından büyük olan frekanslardaki tüm bileşenlerin kaldırılmasıyla örtüşme önlenir. Bu yöntem yapının tamamıyla lineer kabul edilmesine göre uygun bir tetikleme sinyali ile yapılabilir.

### Örtüşme önleme filtreleri (Anti-Aliasing Filters)

Alınan veri analog olduğu için sistemden gelen veri tüm frekans spektrumuna sahiptir. Yüksek frekanslı sinyal bileşenlerinin örneklemeden sonra ihtiyaç duyulan düşük frekanslı sinyallerle örtüşmesini önlemek için, analog veriler örtüşme önleme filtresi aracılığıyla kaydedilmeden önce filtrelenmelidir.

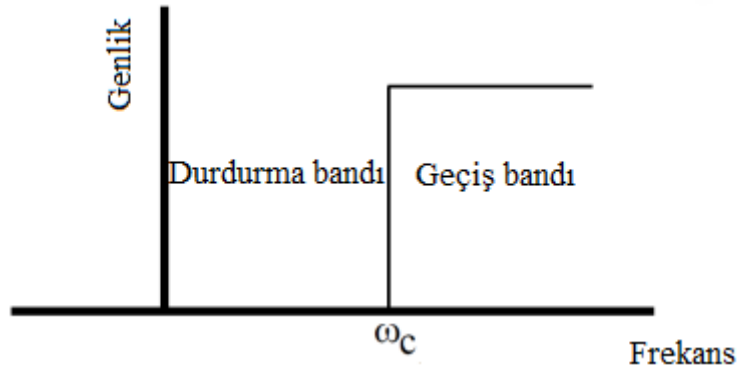
Filtreleme, dijital sinyal işlemede çeşitli şekillerde kullanılır. Filtreler frekans alanı özelliklerine göre alçak geçiren filtre, yüksek geçiren filtre, bant geçiren filtre ve bant eleme filtresi olarak sınıflandırılabilir (Proakis ve Manolakis, 1995):

I. Alçak geçiren filtre (LPF), düşük frekanslı sinyalleri geçiren ancak kesme frekansından daha yüksek frekanslara sahip sinyalleri zayıflatan / durduran (genliğini azaltan) bir filtredir (Şekil 4.16) (Devasahayam, 2012).



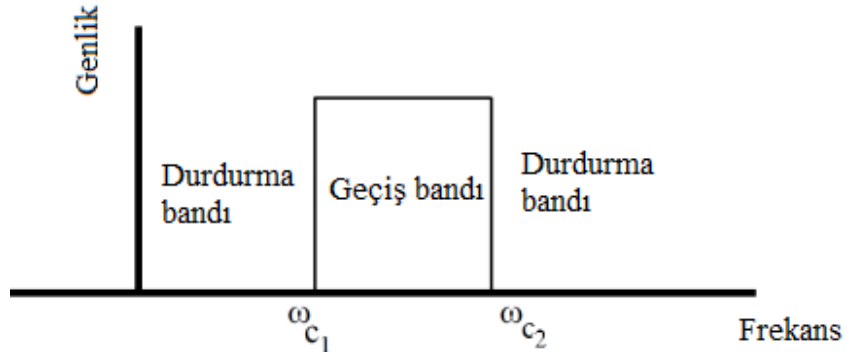
Şekil 4.16. 0 ile  $\omega_c$  arasındaki frekanslı sinyalleri geçiren ve  $\omega_c$  üzerindeki frekansları reddeden ideal LPF

II. Yüksek geçiren filtre (HPF), sinyalleri kesme frekansının üzerinde olan yüksek frekansları geçiren ve frekansı kesme değerinden daha düşük olan sinyalleri zayıflatan (genliğini azaltan) bir filtredir (Şekil 4.17) (Devasahayam, 2012).



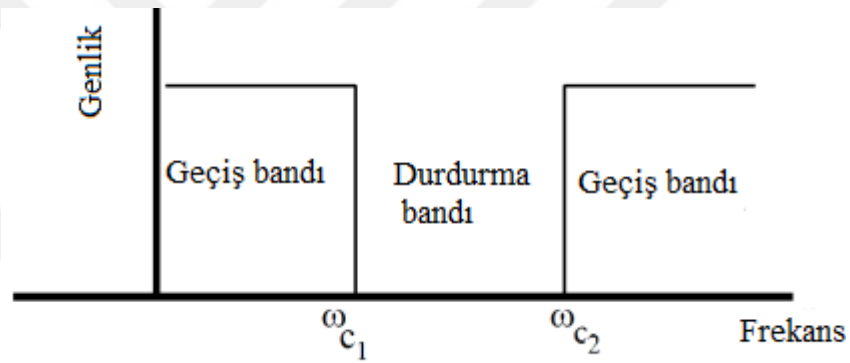
Şekil 4.17.  $\omega_c$  üzerindeki sinyalleri geçiren ve  $\omega_c$  altındaki frekansları reddeden ideal HPF

III. Bant geçiren filtre (BPF), belirli bir aralıktaki frekansları geçiren ve bu aralığın dışındaki frekansları reddeden (zayıflatan) bir filtredir (Şekil 4.18) (Devasahayam, 2012).



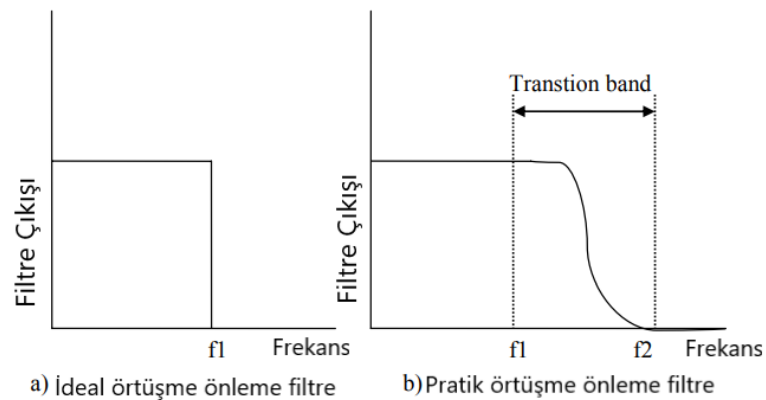
Şekil 4.18.  $\omega_{c1}$  ve  $\omega_{c2}$  arasındaki sinyalleri ileten ve  $\omega_{c1}$ 'den küçük veya  $\omega_{c2}$ 'den büyük frekansları reddeden ideal BPF

IV. Bant durdurma filtresi (BSF), bir alt kesme ile bir üst kesme noktası arasındaki frekansa sahip sinyalleri reddeden veya durduran, alt kesimden daha düşük frekanslı sinyalleri ile üst kesim frekansının üzerindeki sinyalleri geçiren filtredir (Şekil 4.19) (Devasahayam, 2012).



Şekil 4.19.  $\omega_{c1}$  ve  $\omega_{c2}$  arasındaki frekansları reddeden ve bu aralığın dışındaki frekansları geçiren ideal BSF

Alçak geçiren filtre için şekil 4.20'de hem ideal bir örtüşme önleme filtresini hem de pratik bir örtüşme önleme filtresini gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Örtüşme önleme filtreleri

Aşağıdaki bilgiler Şekil 4.20 için:

- $f_1$  maksimum giriş frekansıdır.
- $f_1$ 'den düşük frekanslar istenen frekanslardır.
- $f_1$ 'den büyük frekanslar istenmeyen frekanslardır.

Şekil 4.20'nin a bölümünde gösterilen ideal bir örtüşme önleme filtresi, istenen tüm giriş frekanslarını geçirir ve istenmeyen tüm frekansları keser. Ancak ideal bir örtüşme önleme filtresi fiziksel olarak gerçekleştirilemez. Şekil 4.20'nin b bölümü, gerçek örtüşme önleme filtresi davranışını gösterir. Pratik örtüşme önleme filtreleri,  $f_1$ 'den küçük tüm frekansları geçirir ve  $f_2$ 'den büyük tüm frekansları keser.  $f_1$  ve  $f_2$  arasındaki bölge, giriş frekanslarının kademeli bir zayıflamasını içeren geçiş bandıdır. Sadece frekansı  $f_1$ 'den düşük olan sinyallerin iletilmesi istenmektedir, geçiş bandındaki sinyaller örtüşmeye neden olabilir. Bu nedenle uygulamada, geçiş bandındaki en yüksek frekansın iki katından daha büyük bir örnekleme frekansı kullanılmaktadır. Geçiş bandındaki en yüksek frekansın iki katından daha büyük bir örnekleme frekansı kullanmak,  $f_s$ 'nin  $2 f_2$ 'den büyük olabileceği anlamına gelir (e Silva ve Maia, 2012).

### Niceleme Hatası

Niceleme hatası, gerçek analog sinyal ile ölçülen sayısallaştırılmış değer arasındaki farktır. Ortalaması alınamayan geçici olayları ölçerken, bu hata ulaşılabilir büyüklük doğruluğunu sınırlamaktadır (Allemang, 1999).

### Hızlı Fourier dönüşümü (FFT)

Hızlı Fourier dönüşümü, örneklenmiş sinyallerden yararlı bilgiler çıkarmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Brigham & Morrow, 1967). Fourier dönüşümü, bir fonksiyonu zaman alanından frekans alanına dönüştüren ana matematiksel bir prosedürdür. Tüm değerlerde (t) tanımlanan sürekli fonksiyonlar üzerinde çalışır. Bununla birlikte, dijital sinyal işleme, sürekli sinyaller yerine düzenli zaman aralıklarında örneklenen ayrık sinyalleri içerir. Fourier dönüşümünün değiştirilmiş bir şekli olan ayrık Fourier dönüşümü (DFT), örneklenmiş sinyaller için kullanılır. DFT tarafından belirlenen sinüs ve kosinüs katsayısı, orijinal sinyalin frekans bileşenlerinin her birinin genliğini temsil eder. Ancak, DFT büyük bir hesaplama süresi gerektirir. Bu

nedenle, örneklenmiş sinyaller üzerinde DFT gerçekleştirmek için Cooley ve Tukey (Cooley ve Tukey, 1965) tarafından geliştirilen ve hızlı Fourier dönüşümü olarak adlandırılan ve gerekli hesaplama süresini önemli ölçüde azaltan bir algoritma kullanılmaktadır.

### Hızlı Fourier dönüşümü formülasyonu

Bir değişken  $f(t)$ 'nin sürekli bir fonksiyonu için, Fourier dönüşümü  $F(f)$  şu şekilde tanımlanır (Sagir, 2014):

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.37)$$

ve ters dönüşüm yapılarak

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.38)$$

bulunur. ( $j$ )  $\sqrt{-1}$  'dir ve  $e$  doğal üssü belirtmek için kullanılarak:

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \cdot \sin \theta \quad (4.39)$$

yazılır. Formun  $N$  örneğini içeren karmaşık bir  $x(k)$  serisi düşünülür:

$$x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N-1} \quad (4.40)$$

( $x$ ) bir karmaşık sayı olduğundan

$$x_i = x_{gerçek} + j \cdot x_{hayali} \quad (4.41)$$

olur. Ayrıca  $0, N-1$  aralığının dışındaki serinin genişletilmiş  $N$ -periyodik olduğunu, yani tüm  $k$  için  $x_k = x_{k+N}$  olduğunu varsayılır. Bu Fourier dönüşümü  $X(k)$  olarak gösterilecektir, ayrıca  $N$  örneğe sahip olacaktır. Sonrasında,  $n=0\dots N-1$  için şu şekilde tanımlanır.

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-jk2n/N} \quad (4.42)$$

Ters dönüşüm,  $n=0\dots N-1$  için şu şekilde tanımlanır:

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{jk2n/N} \quad (4.43)$$

Buradaki fonksiyonlar karmaşık seriler olarak tanımlansa da gerçek değerli seriler, sanal kısım 0'a ayarlanarak temsil edilebilir. Genel olarak, frekans alanına dönüşüm, büyüklük ve faz ile karmaşık değerli bir fonksiyon olacaktır.

$$\text{Büyükük} = \|X(n)\| = \sqrt{x_{\text{gerçek}} * x_{\text{gerçek}} + x_{\text{hayali}} * x_{\text{hayali}}} \quad (4.44)$$

$$\text{Faz} = \tan^{-1} \left( \frac{x_{\text{hayali}}}{x_{\text{gerçek}}} \right) \quad (4.45)$$

### Sızıntı

Ölçümlerin sonlu bir gözlem süresi içerisinde yapılması nedeniyle sızıntı hataları oluşmaktadır. Sızıntı hatası temel olarak ayrık Fourier dönüşümü algoritmasının bir varsayımının ihlalden kaynaklanır. Ayrık Fourier dönüşümünde göz önüne alınan sinyalin T periyotlu periyodik sinyal olduğu kabul edilerek işlem yapılmaktadır. Bu koşul sağlanamazsa sızıntı hatası oluşur (Heylen ve ark., 1997).

Sızıntı muhtemelen en yaygın ve bu nedenle en ciddi dijital sinyal işleme hatasıdır. Örtüşme ve diğer birçok hatadan farklı olarak, sızıntının etkileri tamamen ortadan kaldırılamaz, yalnızca azaltılabilir (De Silva, 2006).

### Pencereleme

Birçok durumda, sızıntı probleminin en pratik çözümü pencerelemenin kullanımını içerir ve farklı sınıf problemler için bir dizi farklı pencere türü vardır

(Ewins, 2000). Kullanılacak pencere türü, alınan sinyalin türüne ve uygulamaya bağlıdır. Doğru pencereyi seçmek, analiz edilecek sinyal hakkında bilgi gerektirir.

Pencereler, birçok ölçüm durumunda gerekli bir kötülüktür. Araştırmacılar herhangi bir pencere kullanmak zorunda kalmamayı tercih etse de sızıntı ihtimali kesinlikle kabul edilemez. Sızıntısız ölçümler sağlayacak ve herhangi bir pencere kullanımını gerektirmeyen, başarıyla uygulanabilecek çeşitli uyarma yöntemleri vardır. Ancak, özellikle saha testleri yapılırken ve işletim verileri toplanırken, pencere kullanımının gerekli olduğu birçok zaman vardır. Günümüzde kullanılan en yaygın pencereler Dikdörtgen, Hanning, Flattop, Exponansiyel ve Blackman pencerelerdir. Tüm pencereleri detaylandırmak yerine, her birinin deneysel mod testi için ne zaman kullanıldığı kısaca açıklanmıştır (Avitabile, 2001):

Dikdörtgen pencere (Uniform Pencere veya penceresiz olarak da adlandırılır), temel olarak bir örnek veya veri kaydındaki tüm sayısallaştırılmış veri noktalarına uygulanan bir birim kazanç ağırlıklandırma işlevidir. Bu pencere, tüm sinyalin bir örnek veya veri kaydında yakalandığı veya verilerin FFT sürecinin periyodiklik gereksinimini karşılamasının garanti edildiği verilere uygulanır. Bu pencere, girdi ve yanıt sinyallerinin toplanan veri örneğinde tamamen gözlemlendiği darbe testi için kullanılabilirken aynı zamanda patlama, rastgele, sözde rastgele ve dijital kademeli sinüs gibi sinyallerle sarsma uyarma testleri yapılırken de kullanılabilir; bu sinyallerin tümü genellikle FFT işleminin periyodiklik gereksinimini karşılar.

Hanning penceresi, temel olarak, numune aralığının başlangıcını ve sonunu yoğun bir şekilde sıfıra ağırlık vermeye zorlayan kosinüs biçimli bir ağırlıklandırma işlevidir (çan biçimli). Bu, genellikle FFT işleminin periyodiklik gereksinimini karşılamayan sinyaller için kullanışlıdır. Rastgele uyarılar ve genel alan sinyalleri genellikle bu kategoriye girer ve Hanning penceresi gibi bir pencerenin kullanılmasını gerektirir.

Flattop penceresi en çok FFT işleminin periyodiklik gereksinimini karşılamayan sinüzoidal sinyaller için kullanışlıdır. Çoğu zaman bu pencere, deneysel modal analizde her şeyden çok kalibrasyon amacıyla kullanılır.

Exponansiyel pencereler, tipik olarak, FRF'leri elde etmek için darbe uyarımı gerçekleştirirken kullanılır. Temel olarak, Exponansiyel penceresi, darbeleri uyarımın meydana geldiği örnek aralığının bir kısmı üzerinde hareket eden bir birim kazanç



penceresidir. Exponansiyel pencere, yanıt sinyali örnek aralığı içinde sönmediğinde kullanılır. Exponansiyel pencere, yanıtı FFT sürecinin periyodiklik gereksinimini daha iyi karşılamaya zorlamak için uygulanır.

Blackman penceresi, pencere uzunluğu olarak adlandırılan tek bir bağımsız parametreye sahip sabit penceredir. Filtre tasarımında ve spektral analizde en çok kullanılan pencerelerden biridir. Blackman penceresi, sonuçtaki sonlu dürtü yanıtı (FIR) filtresinde Hanning penceresinden daha da düşük bir maksimum durdurma bandı dalgalanması (yaklaşık 74 dB aşağı) sergiler (Lai, 2003).

Pencerelerin her biri, verilerin frekans temsiline bir etkisine sahiptir. Genel olarak, pencereler, fonksiyonun tepe genişliğinin doğruluğunda bir bozulmaya neden olacak ve gerçek ölçümde gerçekte var olandan daha fazla sönümlenmeye sahip gibi görünecektir. Bu hatalar tamamen istenmese de sızıntıdan kaynaklanabilecek önemli bozulmalardan çok daha kabul edilebilirdir (Avitabile, 2001).

### **Ortalama**

Ölçümler sonucu elde edilen verilerin doğruluğunu ispatlamak ve sinyallere karışan ortam gürültülerinin etkisini azaltmak amacıyla ortalama kullanılır (Türker, 2005). Genel olarak, ortalama alma, öncelikle frekans davranış fonksiyonlarının tahminindeki hatayı azaltmak için bir yöntem olarak kullanılır. Bu hata genel olarak girişte ve/veya çıkışta gürültü olarak kabul edilebilir. Bu hata, rastgele ve çapraz bileşenlerinin toplamı olarak düşünülebilir (Phillips ve Allemang, 2003). Rastgele hatalar, genel ortalama alma yaklaşımı, karekök (RMS) spektral ortalama alma yoluyla etkin bir şekilde en aza indirilebilir. Ancak, çapraz hataları genellikle tek başına bu ortalama alma biçimiyle etkin bir şekilde en aza indirilemez (Karakan, 2008).

### **Tutarlılık**

Tutarlılık temel olarak çıkış sinyalinin ne kadarının giriş sinyalinden (sistemde diğer sinyallerde olabilir) geldiğini gösterir. Bu diğer sinyaller kötü mesnet koşullarının, sistemdeki gürültünün veya rezonansların sonucu olabilir. Tutarlılık,

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (4.46)$$

ile hesaplanabilir. Burada x girişteki sinyaldir, y çıkıştaki sinyaldir.

$G_{xx}(f)$  = x 'in otomatik spektrumu

$G_{yy}(f)$  = y 'nin otomatik spektrumu

$G_{xy}(f)$  = x ve y sinyallerinin çapraz spektrumu

Bu nedenle, girdi ve çıktı arasındaki mükemmel ilişki 1 tutarlılık değerini verecektir. Net FRF eğrileri elde etmek için tutarlılık makul olmalıdır. Sinyal çok gürültülü ise, o zaman FRF elde edilen veriler yanlış olacaktır (Treszkai ve ark., 2020).

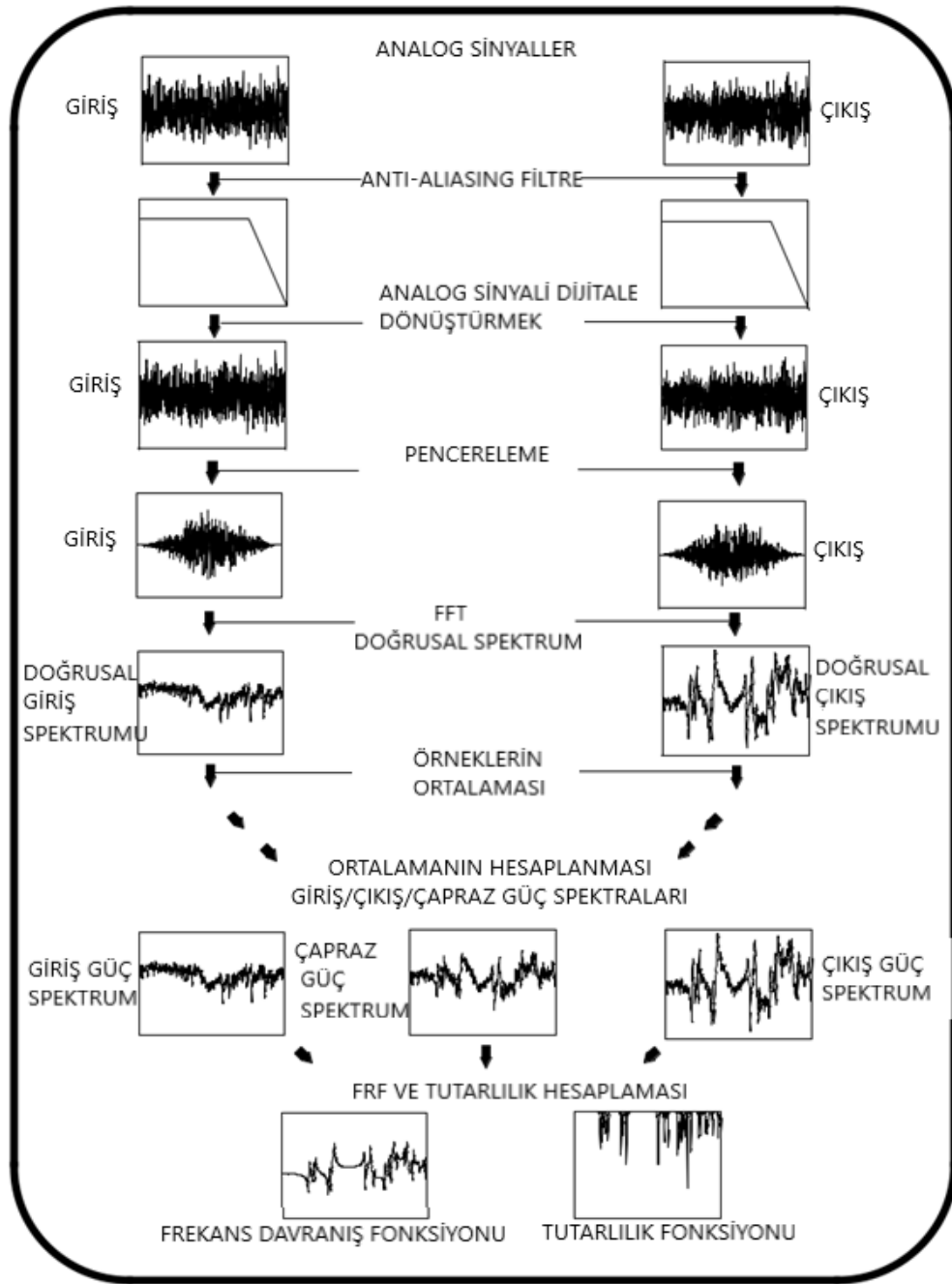
FRF'yi elde etmek için yukarıda açıklanan aşamalar maddeler şeklinde özetlenmiştir (Avitabile, 2001):

- İlk olarak, ölçüm cihazlarımızdan elde edilen analog sinyaller vardır. Bu analog sinyaller, analiz frekans aralığından daha yüksek frekansların örtüşmesini önlemek için filtrelenmelidir. Bu genellikle, analizörün ön ucundaki örtüşme önleme filtreleri adı verilen bir dizi analog filtrenin kullanılmasıyla yapılır. İşlevleri, sinyalde bulunabilecek herhangi bir yüksek frekans sinyalini ortadan kaldırmaktır.
- Bir sonraki adım, gerçek sinyalin dijital bir temsilini oluşturmak için analog sinyali sayısallaştırmaktır. Bu, ADC adı verilen analogdan dijitale dönüştürücü tarafından yapılır. Pratikte, analogdan dijitale dönüştürme (ADC) sürecinin amacı, frekans, büyüklük ve faz bilgisi açısından yeterli doğruluğu korurken dönüşümü elde etmektir (e Silva ve Maia, 2012). Genel olarak bu sayısallaştırma işleminde 10, 12 veya 16 bit dönüştürücüler kullanılır; ne kadar fazla bit mevcutsa, sayısallaştırılmış sinyalde mümkün olan çözünürlük o kadar iyi olur. Başlıca endişelerden bazıları, potansiyel olarak sayısallaştırılmış yaklaşıma sızabilecek örnekleme ve niceleme hatalarında yatmaktadır. Örnekleme hızı, sinyallerin zaman ve frekans gösterimindeki çözünürlüğü kontrol eder. Niceleme, yakalanan sinyalin büyüklüğünün doğruluğu ile ilişkilidir. Öncelikle, örnekleme ile ilgili hususlar tek başına frekans doğruluğunu etkilerken hem

örnekleme hem de niceleme hususları büyüklük ve faz doğruluğunu etkiler (Ewins, 2009).

- Hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak zaman verilerinin frekans alanına dönüştürülmesinden sızıntı meydana gelir. Fourier dönüşümü işlemi, örneklenen verilerin tüm zamanlar için verilerin eksiksiz bir temsilinden oluşmasını veya ölçülen verilerin periyodik bir tekrarını içermesini gerektirir. Bu sağlandığında, Fourier dönüşümü, frekans alanındaki verilerin uygun bir temsilini üretir. Ancak durum böyle olmadığında, sızıntı frekans alanındaki verilerin ciddi şekilde bozulmasına neden olacaktır. Sızıntı nedeniyle bozulmayı en aza indirmek için, örneklenen verilerin FFT'nin periyodiklik gereksinimini daha iyi karşıladığını göstermek için pencere adı verilen ağırlıklandırma işlevleri kullanılır. Pencere sızıntı etkisini büyük ölçüde azaltırken, tamamen ortadan kaldırmaz.
- Veriler örneklendikten sonra, giriş uyarımı ve çıkış yanıtının doğrusal spektrumlarını oluşturmak için FFT hesaplanır. Tipik olarak, doğrusal spektrumlardan elde edilen güç spektrumları üzerinde ortalama alma yapılır. Hesaplanan ana ortalama spektrumlar, giriş gücü spektrumu, çıkış gücü spektrumu ve çıkış ve giriş sinyalleri arasındaki çapraz spektrumdur. Bu işlevlerin ortalaması alınır ve modsal veri toplama için kullanılan iki önemli işlevi hesaplamak için kullanılır: Frekans davranış fonksiyonu ve tutarlılık. Tutarlılık işlevi, çıkış sinyalinin ne kadarının ölçülen giriş sinyaliyle ilişkili olduğunu tanımlayan bir veri kalitesi değerlendirme aracı olarak kullanılır. FRF, sistem frekansı ve sönümlenme ile ilgili bilgileri içerir ve bir FRF koleksiyonu, ölçülen konumlarda sistemin mod şekli ile ilgili bilgileri içerir.

Şekil 4.21'de açıklanan bu adımlar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.21. FRF analizörünün anatomisi (Avitabile, 2001)

### TSDS için FRF'nin analitik formu

Tek serbestlik dereceli sistemlerin uyarımı için sunulan formülasyonlar Sipple ve Sanayei'nin çalışmasındaki üretmeye dayanmaktadır (Sipple ve Sanayei, 2014).

Formülasyon, denklem (4.48)'da gösterildiği gibi Ewins (Ewins, 2009) tarafından tanımlanan FRF matrisi ile denklem (4.47)'teki zorlanmış titreşim yanıtının frekans alanındaki genel bir formuyla başlar.

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (4.47)$$

$[H(\omega)]$  = FRF matrisi

$\{F(\omega)\}$  = Frekans alanındaki uyarım kuvveti

$\{X(\omega)\}$  = Yanıt kuvveti

$$[H(\omega)] = [a(\omega)] = (-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])^{-1} \quad (4.48)$$

$[M]$  = Kütle matrisi

$[C]$  = Sönüm matrisi

$[K]$  = Rijitlik matrisi

FRF'nin büyük, karmaşık yapılar için sınırlı bu formülasyonunu verimli hale getiren bir ters çevirme gereklidir. Bu verimsizliğin üstesinden gelmek için, mod şekillerinin, doğal frekansların ve modal sönüm oranlarının bir fonksiyonu olan, denklem (4.48)'in ayrıştırılmış bir versiyonu türetilir. Denklem (4.48)'in ayrıştırılmış versiyonunun türetilmesi aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

İlk adım, her iki tarafın tersini almak ve önce  $[\hat{\Phi}]^T$  ile çarpmak ve sonradan  $[\hat{\Phi}]$  ile çarpmaktır,

$[\hat{\Phi}]$  = Kütle normalleştirilmiş mod şekil matrisi

$$[\Phi]^T (-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])[\hat{\Phi}] = [\hat{\Phi}]^T [a(\omega)]^{-1}[\hat{\Phi}] \quad (4.49)$$

Diyagonal matrisler  $[\Omega]$  ve  $[\xi]$ , sırasıyla her bir mod için doğal frekansları ve modal sönüm oranlarını içerir.

$$(-\omega^2[I] + 2i\omega[\Omega][\xi] + [\Omega^2]) = [\Phi]^T [a(\omega)]^{-1}[\hat{\Phi}]^1 \quad (4.50)$$

Denklem (4.50)'de hala mevcut olan inversiyonu ortadan kaldırmak için, ilk adım, denklemin her tarafını kütle normalleştirilmiş mod şekillerinin ters devriği ile çarpmak sonra da her iki tarafı kütle normalleştirilmiş mod şekillerinin tersi ile çarpmaktır.

$$[\hat{\Phi}]^{-T} (-\omega^2[I] + 2i\omega[\Omega][\xi] + [\Omega^2])[\hat{\Phi}]^{-1} = [\hat{\Phi}]^{-T} [\hat{\Phi}]^T [a(\omega)]^{-1}[\hat{\Phi}][\hat{\Phi}]^{-1} \quad (4.51)$$

Denklem (4.52) ile sonuçlanan denklem (4.51)'deki terimler toplanılıp basitleştirilir.

$$[\hat{\Phi}]^{-T}(-\omega^2[I] + 2i\omega[\Omega][\xi] + [\Omega^2])[\hat{\Phi}]^{-1} = [I][a(\omega)]^{-1}[I] \quad (4.52)$$

Ardından, her iki tarafın tersi alınarak denklem (4.53) elde edilir.

$$[\hat{\Phi}](-\omega^2[I] + 2i\omega[\Omega][\xi] + [\Omega^2])^{-1}[\hat{\Phi}]^T = [a(\omega)] \quad (4.53)$$

Denklem (4.53), (4.54) nolu denklemdeki tüm mod şekillerinin toplamı olarak ayrıca ayrıştırılır. Denklem (4.54)'te gösterilen form, FRF matrisinde bir giriş verir. Bu girdi, a düğümündeki yanıt ve b düğümündeki uyarıdan oluşur.

$$a_{a,b}(\omega) = \frac{X_a(\omega)}{F_b(\omega)} = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{\Phi}_{ai}\hat{\Phi}_{bi}}{-\omega^2 + 2i\omega\Omega_i\xi_i + \Omega_i^2} \quad (4.54)$$

$i = 1$ 'den  $n$ 'ye kadar kinematik serbestlik derecesi sayısı arasında değişen mod şekli ve doğal frekans sayısı

$\hat{\Phi}_{ai}$  = Yanıt düğümü a'daki mod şekli  $i$ 'nin skaler değeri

$\hat{\Phi}_{bi}$  = Uyarı düğümü b'deki mod şekli  $i$ 'nin skaler değeri

$\Omega_i$  = Mod  $i$  için doğal frekans skaler değeri

$\xi_i$  = Mod  $i$  için modal sönümlenme oranı

FRF matrisi artık herhangi bir inversiyon gerektirmeyen bir formdadır.

Yapısal testler sırasında tüm serbestlik derecelerini ve tüm doğal frekans aralığını ölçmek mümkün değildir. Bu nedenle, gereksiz bilgileri hariç tutmak için denklem (4.54)'te gösterilen biçimde bir serbestlik derecesi alt kümesi ile azaltılmış sayıda mod şekli kullanılabilir. Bu yaklaşım denklem (4.55)'te gösterilmektedir,  $n$  toplam kinematik serbestlik derecesi sayısıdır ve bu nedenle maksimum mod sayısı ve  $m$  modların bir alt kümesidir. Formülasyona, tipik olarak ölçülenden daha fazla, yeterli mod şeklini dahil etmek için özel dikkat gösterilmelidir.

$$a_{a,b}(\omega) \cong \sum_{i=1}^m \frac{\hat{\Phi}_{ai}\hat{\Phi}_{bi}}{-\omega^2 + 2i\omega\Omega_i\xi_i + \Omega_i^2} \quad m < n \quad (4.55)$$

Reseptans,  $a_{a,b}(\omega)$ , (4.56)'da, her ikisi de frekans alanında olmak üzere, a düğümündeki  $X(\omega)$  yer değiştirmesinin uyarma bölümü, b düğümündeki  $F(\omega)$  kuvveti olarak yanıtır.

$$H_{a,b}(\omega) = a_{a,b}(\omega) = \frac{X_a(\omega)}{F_b(\omega)} \cong \sum_{i=1}^m \frac{\hat{\Phi}_{ai}\hat{\Phi}_{bi}}{-\omega^2 + 2i\omega\Omega_i\xi_i + \Omega_i^2} \quad (4.56)$$

Akselerans,  $Y_{a,b}(\omega)$ , (4.57)'de, her ikisi de frekans alanında olmak üzere, b düğümündeki kuvvet olarak uyarıya bölünen a düğümündeki hız  $V(\omega)$  olarak yanıtır.

$$H_{a,b}(\omega) = Y_{a,b}(\omega) = \frac{V_a(\omega)}{F_b(\omega)} \cong \sum_{i=1}^m \frac{-i\omega(\hat{\Phi}_{ai}\hat{\Phi}_{bi})}{-\omega^2 + 2i\omega\Omega_i\xi_i + \Omega_i^2} \quad (4.57)$$

İnertans,  $A_{a,b}(\omega)$ , (4.58)'te, her ikisi de yine frekans alanında olmak üzere, a düğümündeki  $A(\omega)$  ivmesinin uyarıya bölünmesiyle, b düğümündeki kuvvet olarak yanıtır.

$$H_{a,b}(\omega) = A_{a,b}(\omega) = \frac{A_a(\omega)}{F_b(\omega)} \cong \sum_{i=1}^m \frac{-\omega^2(\hat{\Phi}_{ai}\hat{\Phi}_{bi})}{-\omega^2 + 2i\omega\Omega_i\xi_i + \Omega_i^2} \quad (4.58)$$

(Sipple & Sanayei, 2014)' in türettiği model güncelleme yöntemi, analitik ve ölçülen miktarlar arasında tutarlı olduğu sürece, kullanılan FRF türünden bağımsızdır. Ayrıca FRF değerleri desibel ölçeğinde büyüklük olarak kullanılacaktır. Bu varsayımlar, model güncelleme için kullanılan FRF'nin a düğümünde yanıt ve b düğümünde uyarma biçimi olan (4.59)'da  $\bar{H}$  olarak gösterilmiştir.

$$\bar{H}_{a,b}(\omega) = 20 \times \log_{10}(|H_{a,b}(\omega)|) \quad (4.59)$$

## Frekans davranış fonksiyonlarının grafiksel gösterimi

FRF'nin grafiksel gösterimi, modal analizde önemli bir rol oynamaktadır. FRF'lerin karmaşık fonksiyonlardan oluşmasından dolayı tek formatta grafik çizilmesi mümkün değildir. FRF'lerin en yaygın 3 grafiksel gösterimi:

1. Bode grafikleri [büyüklük(magnitüd)-frekansın ve faz-frekansın çizimi]
2. Co-Quad grafikleri (gerçek bileşene karşı frekans ve hayali bileşene karşı frekans çizimi)
3. Nyquist grafikleri (sonunda eşit frekans artışlarında işaretlerle birlikte hayali ve gerçek kısım).

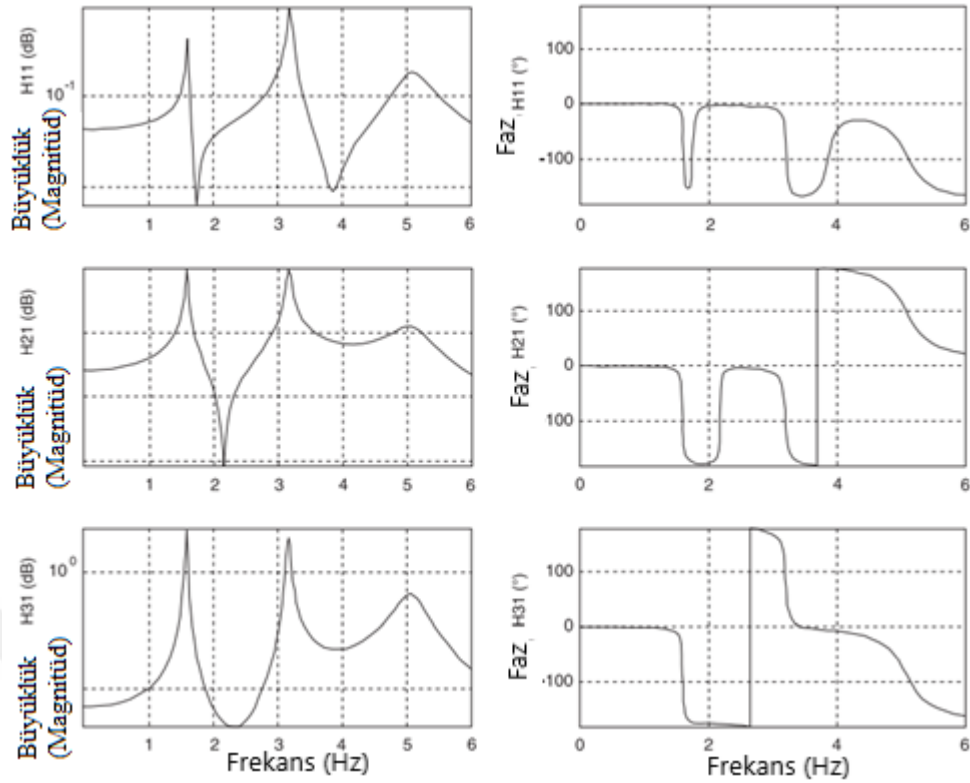
Çizilen nicelikler, reseptans, akselerans ve inertans gibi hareket/kuvvet tipi fonksiyonların yanı sıra bunların tersi dinamik rijitlik, empedans ve dinamik kütleli içerir (Radeş, 2001). Bode grafikleri sönümlü ve sönümsüz bütün yapı sistemlerine uygulanabildiği için FRF grafiksel gösteriminde en çok kullanılan diyagramlardır. Diğer grafiksel çizim yöntemleri sadece sönümlü sistemlere uygulanabilmektedir (Sert, 2019).

### Genlik- Faz grafikleri

Büyüklük (magnitüd)-faz grafiği iki bölümden oluşmaktadır: FRF'nin frekansa karşı büyüklüğü ve faza karşı frekans. Faz grafiği, faz bilgisi, büyüklük verilerinin yaptığı gibi sayısal olarak işlenemediğinden fazla çeşitliliğe sahip değildir. Bu nedenle, ana odak, bir FRF'nin büyüklük (magnitüd) grafiği üzerinde olacaktır (Karakan, 2008).

Şekil 4.22'de, serbestlik derecesi 1'de uygulanan zorlama nedeniyle serbestlik derecesi 1, 2 ve 3'te ölçülen yer değiştirme tepkisi ile tipik bir sönümlü yapının reseptans FRF'si için Bode grafiklerinin bölümleri gösterilmektedir. Büyüklük (magnitüd) grafikleri için logaritmik dikey ölçeğe dikkat edilmesi gerekir, anti rezonanslarda sergilenen tepkinin alt seviyelerindeki detayları ortaya çıkarmak için gereklidirler.

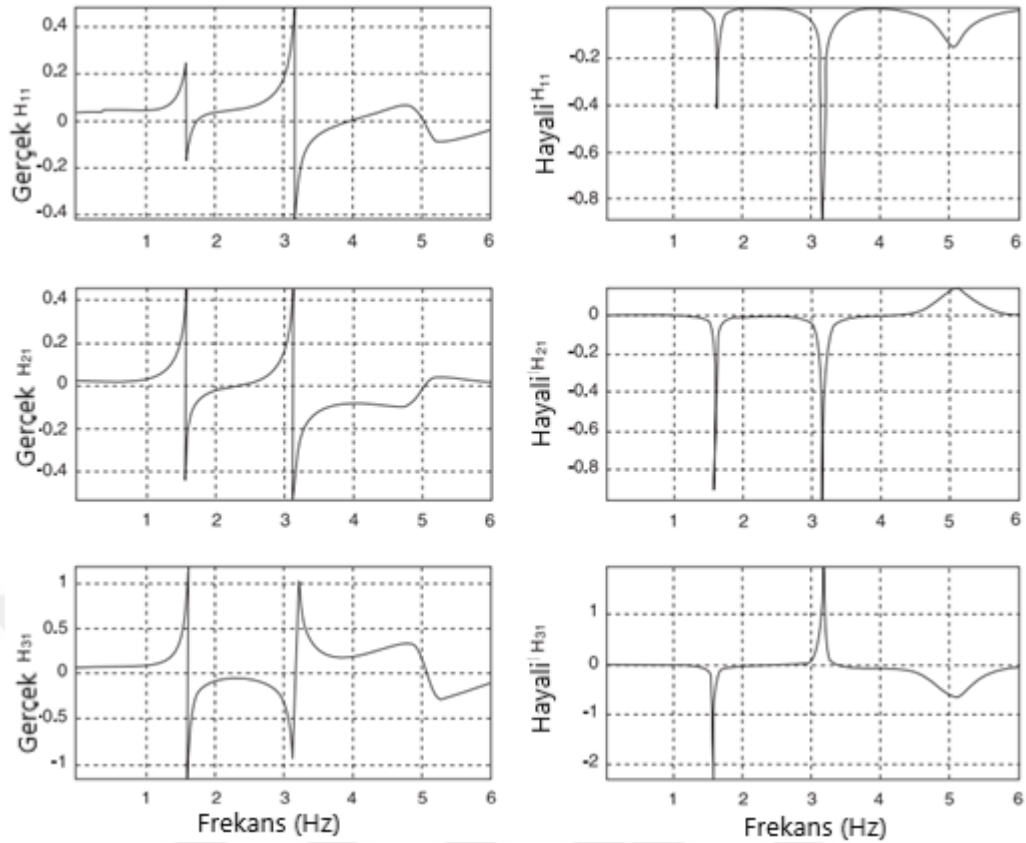




Şekil 4.22. Basit bir yapının reseptansının büyükük (magnitüd) ve faz formatında çizimi (Radeş, 2001)

### Co-Quad grafikleri

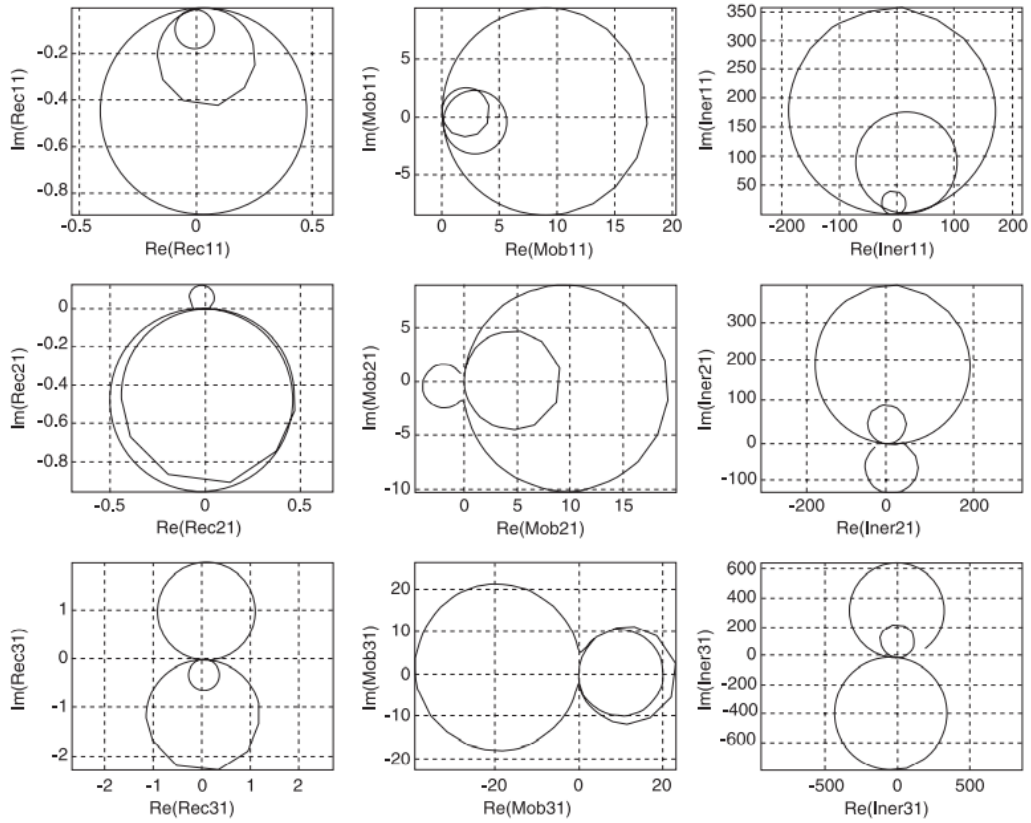
Gerçek ve hayali grafikler iki kısımdan oluşur: FRF'nin frekansa karşı gerçek kısmı ve FRF'nin frekansa karşı hayali kısmı. Doğal frekans, gerçek kısım sıfır olduğunda ortaya çıkar. Bu gözlem görüldüğünden daha az kullanışlıdır çünkü deneysel FRF verileri sıfır gerçek parçanın yerini tam olarak belirlemek için yeterli frekans çözünürlüğüne sahip olmayabilir. Şekil 4.23'te reseptansın gerçek ve hayali bileşenlerinin ilgili çizimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Basit bir yapının reseptansının gerçek ve hayali formatta çizimi (Radeş, 2001)

### Nyquist grafikleri

Gerçek ve hayali kısımların Nyquist çizimlerinde çizilmesinde genellikle daire tarzı bir grafik oluşmaktadır. Nyquist grafikleriyle göreceli olarak iyi ayrılmış doğal frekanslara sahip hafif sönümlü sistemler için, rezonanslara yakın tepkinin dairesel döngülerle yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Şekil 4.24'teki ilk sütun reseptanslara karşılık gelen Nyquist çizimlerini göstermektedir. Karşılaştırma yapabilmek için ikinci ve üçüncü sütünlarda sırasıyla akselerans ve inertans grafikleri gösterilmiştir.



**Şekil 4.24.** Basit bir yapının reseptansının (Rec), akseleransının (Mob) ve inertansının (Iner) Nyquist grafikleri (Radeş, 2001)

Genel olarak ölçülen verilerden modal özellikleri tahmin etmek için matematiksel algoritmalar kullanılır. Genellikle eğri uydurma olarak adlandırılan modal parametre tahmin aşaması, çıkarma işlemini basitleştirmek için bilgisayar yazılımı kullanılarak uygulanır. Bu eğri uydurma teknikleri, verileri çıkarmak için farklı yöntemler kullanır. Bazı teknikler zaman alanı verilerini kullanırken diğerleri frekans alanı verilerini kullanır. En yaygın yöntemler, çok modlu analitik modeller kullanır, ancak bazen çok basit tek modlu yöntemler, çoğu mühendislik analizi için oldukça iyi sonuçlar verir. Temel olarak, tüm tahmin algoritmaları, ölçülen verileri, ölçülen verileri oluşturan temel bileşenlere, yani frekans, sönümlenme ve mod şekillerine ayırmaya çalışır (Avitabile, 2001).

Bu tez çalışmasında FRF üzerinden doğal titreşimleri bulmak için tepe genlik yöntemi, sönüm oranları bulmak için ise yarım güç bant genişliği yöntemi kullanılmıştır.

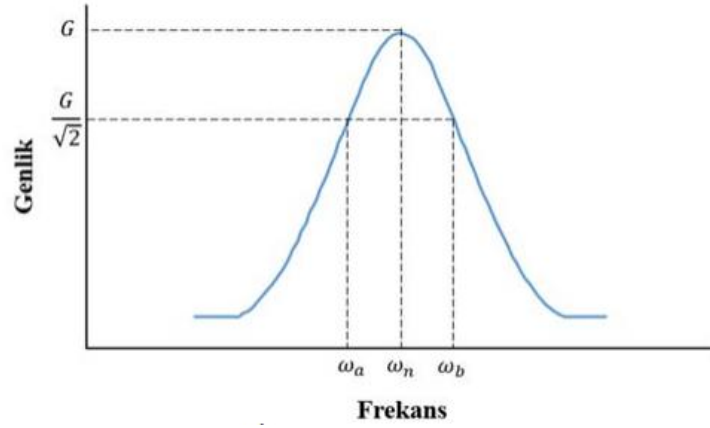
### **Tepe genlik yöntemi (PP)**

Frekans alanına dayalı tepe genlik yöntemi (PP), sistem çıktı verilerinden bir yapının modal özelliklerini tahmin etmek için bilinen en basit tekniktir. PP analizi, belirli bir sistemin FRF'sinin, o sistemin modal frekansları çevresinde aşırı değerler deneyimleyeceği gerçeğine dayanmaktadır (Ewins, 1984). Beyaz gürültü uyarımı varsayarsak,  $k$ ,  $H_k(j\omega)$  sensör konumundaki bir yapının FRF'si, o sensörde toplanan yanıt verilerinin Fourier spektrumuna eşdeğer olarak kabul edilebilir. Bu spektrum, hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak ölçülen ivmelerin frekans alanına dönüştürülmesiyle formüle edilebilir (Zimmerman ve ark., 2008). Bu nedenle, FRF'deki baskın frekanslar, yapının doğal frekanslarıdır. Ayrıca, yapı, rezonanslardaki modların doğru ölçümlerinin elde edilmesi zor olacak kadar hafif sönümlü değilse ve aynı anda, bir rezonanstaki yanıtın birden fazla mod tarafından güçlü bir şekilde etkilendiği kadar ağır bir şekilde sönümlenmiyorsa, sistemin FRF'lerini kullanarak tepe genlik yöntemiyle mod şekilleri belirlenebilir (Zimmerman ve ark., 2008).

### **Yarım güç bant genişliği**

Sönüm tahmini, deneysel modal analizinin çok önemli bir görevidir. Özellikle yarım güç bant genişliği yöntemi, sistemdeki sönüm miktarını belirlemek için en uygun tekniklerden biridir. Bu teknikte sönüm faktörü, yer değiştirme genliklerinin  $(1/\sqrt{2})$ 'sine eşit olduğu frekanslardan belirlenir.

Yarım güç bant genişliği yönteminde Şekil 4.25'teki grafik yardımıyla (4.60) nolu denklem kullanılarak sönüm oranı tespit edilmektedir. Frekans davranış eğrisi kullanarak, frekans ekseninden  $(1/\sqrt{2})$  uzaklıkta yatay bir çizgi çizilir. Bu yatay çizgi, sönüm oranını ( $\xi$ ) belirlemek için denklem (4.60)'da kullanılan  $\omega_a$  ve  $\omega_b$  frekanslarını tanımlayan iki noktada frekans davranış eğrisini keser.



Şekil 4.25. İvme transfer fonksiyonu (Karaahmetli ve Dündar, 2017)

$$2\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_n} \quad (4.60)$$

$\omega_a, \omega_b = G/\sqrt{2}$  noktasından çizilen doğrunun eğriyi kestiği noktalara karşılık gelen frekans değerleri

$\omega_n$  = Doğal frekans

$\xi$  = Sönüm oranı

#### Yarım güç bant genişliği formülasyonu

Doğrusal bir TSD viskoz sönümlü sistemde, reseptans FRF (yer değiştirme/kuvvet) aşağıdaki forma sahiptir:

$$H(\omega) = \frac{1}{-M\omega^2 + jC\omega + K} \quad (4.61)$$

M = Kütle sabiti

C = Sönüm sabiti

K = Rijitlik sabiti

Sönümsüz doğal frekans  $\bar{\omega} = \sqrt{K/M}$  ve sönüm oranı  $\xi = C/(2\sqrt{KM})$  dahil edildiğinde, denklem (4.61):

$$H(\omega) = \frac{1}{M(-\omega^2 + j2\xi\bar{\omega}\omega + \bar{\omega}^2)} \quad (4.62)$$

olur.  $H(\omega)$  ifadesi, kısmi kesirli fonksiyonların toplamı olarak da yazılabilir:

$$H(\omega) = \frac{1/(2j\tilde{\omega}M)}{j\omega - (\tilde{\sigma} + j\tilde{\omega})} - \frac{1/(2j\tilde{\omega}M)}{j\omega - (\tilde{\sigma} - j\tilde{\omega})} \quad (4.63)$$

$$\tilde{\omega} = \bar{\omega}\sqrt{1 - \xi^2} \quad (\tilde{\omega} = \text{Sönümlü doğal frekans})$$

$$\tilde{\sigma} = -\bar{\omega}\xi \quad (\tilde{\sigma} = \text{Sönüm faktörü})$$

$\omega_{\max}$  doğal frekansa yakın tepe genlik frekansı kabul edilerek

$$\omega_{\max} = \bar{\omega}\sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (4.64)$$

yazılır.  $H_{\max} = |H(\omega_{\max})|$ ,  $\omega_{\max}$ 'da  $H(\omega)$ 'nin yerel maksimum genliği,

$$H_{\max} = \frac{1}{2M\bar{\omega}^2\xi\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (4.65)$$

Kuvvet oranı aşağıdaki denklemlerle tanımlanır:

$$\alpha = \alpha(\omega) = \frac{|H(\omega)|^2}{H_{\max}^2} \quad (4.66)$$

Burada  $|H|$  herhangi bir  $\omega$  için  $H$ 'nin büyüklüğünü temsil eder. Çözümü basitleştirmek için ters kuvvet oranı tanımlanırsa;

$$\beta = \beta(\omega) = \frac{1}{\alpha(\omega)} = \frac{H_{\max}^2}{|H(\omega)|^2} \quad (4.67)$$

(4.62) ve (4.65) nolu denklemler dikkate alınarak aşağıdaki  $\beta$  ifadesi elde edilebilir:

$$\beta = \frac{(\omega^2 - \bar{\omega}^2)^2 + 4\xi^2\bar{\omega}^2\omega^2}{4\xi^2(1 - \xi^2)\bar{\omega}^4} \quad (4.68)$$

$\Omega$  boyutsuz değişkeni tanımlanarak

$$\Omega = \frac{\omega^2}{\bar{\omega}^2} \quad (4.69)$$

ters güç oranının ifadesi daha basit hale getirilir:

$$\beta = \frac{(\Omega - 1)^2 + 4\xi^2\Omega}{4\xi^2(1 - \xi^2)} \quad (4.70)$$

Böylece, güç oranının belirli bir değerine karşılık gelen frekanslar, aşağıdaki ikinci derece denklemi çözülerek belirlenebilir:

$$\Omega^2 + 2(2\xi^2 - 1)\Omega + 1 - 4\xi^2(1 - \xi^2)\beta = 0 \quad (4.71)$$

Bu denklemin diskriminantı

$$\Delta = 16\xi^2(1 - \xi^2)(\beta - 1) \quad (4.72)$$

ikinci dereceden denklemin  $\Omega_a$  ve  $\Omega_b$  iki köküne şu şekilde bağlıdır:

$$\Delta = (\Omega_b - \Omega_a)^2 \quad (4.73)$$

burada  $\Omega_a$  ve  $\Omega_b$  (4.69) nolu denklem ile tanımlanır.

$$\Omega_a = \frac{\omega_a^2}{\bar{\omega}^2}, \quad \Omega_b = \frac{\omega_b^2}{\bar{\omega}^2} \quad (4.74)$$

Burada hem  $\beta$  hem de  $\Delta$  biliniyorsa, sönüm oranı (4.72) nolu denklem çözülerek aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\xi^4 - \xi^2 + \frac{\Delta}{16(\beta - 1)} = 0 \quad (4.75)$$

$0 < \xi < \sqrt{2}/2$  için, son denklemin kökü

$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta}{4(\beta - 1)}}} \quad (4.76)$$

(4.73) nolu denklem dikkate alındığında, TSD sistem için tam bant genişliği sönüm oranı formülü elde edilir:

$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{(\Omega_b - \Omega_a)^2}{4(\beta - 1)}}} \quad (4.77)$$

Bu kesin formül, klasik yaklaşık formüle benzetilir.

$$\xi \approx \frac{\Omega_b - \Omega_a}{4(\beta - 1)} \quad (4.78)$$

Aslında, bu yaklaşık formül, seri halinde geliştirilerek ve yüksek dereceli terimler ihmal edilerek tam formülden çıkarılabilir. Son olarak, aşağıdaki yaklaşım eklenerek:

$$\omega_a + \omega_b \approx 2\bar{\omega} \quad (4.79)$$

(4.80) nolu denklem elde edilir.

$$\xi \approx \frac{\omega_b - \omega_a}{2\bar{\omega}(\beta - 1)} \quad (4.80)$$

burada  $\bar{\omega}$ ,  $\omega_{\max}$  yaklaşık olarak alınabilir. Uygulamada,  $\alpha$  yarısı alınır, dolayısıyla  $\beta = \beta(\omega_a) = \beta(\omega_b) = 2$  olur. Böylece (4.80) nolu denklemden iyi bilinen yarım güç bant genişliği formülü bulunur (Yin, 2008):

$$\xi \approx \frac{\omega_b - \omega_a}{2\bar{\omega}} \quad (4.81)$$

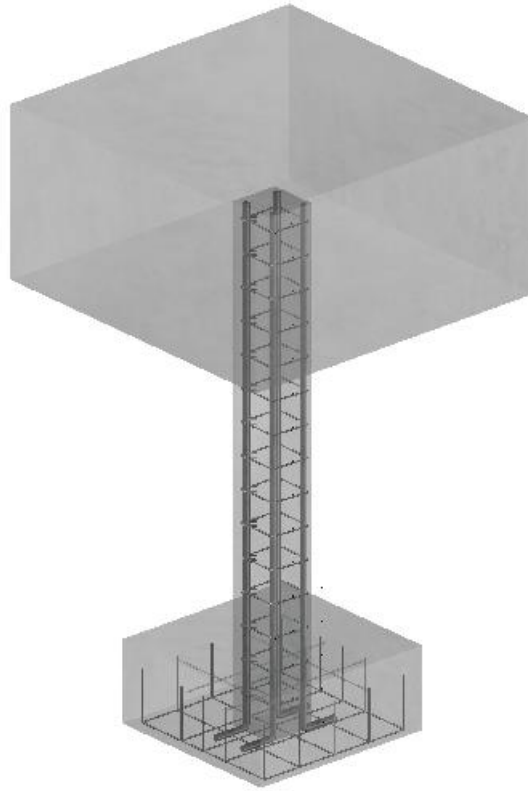


## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

### 5.1. Deney Numuneleri Hakkında Genel Bilgi

Bu tez çalışmasında test parametreleri, etriye aralığı ve donatı sınıfı olarak belirlenmiştir. Test parametrelerinden olan, etriye aralığı ve donatı sınıfı değiştirilerek kolonlar sarsma tablası üzerinde test edilmiştir. Çalışma için planlanan tüm deneyler Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı ve Deprem Laboratuvarında yürütülmüştür.

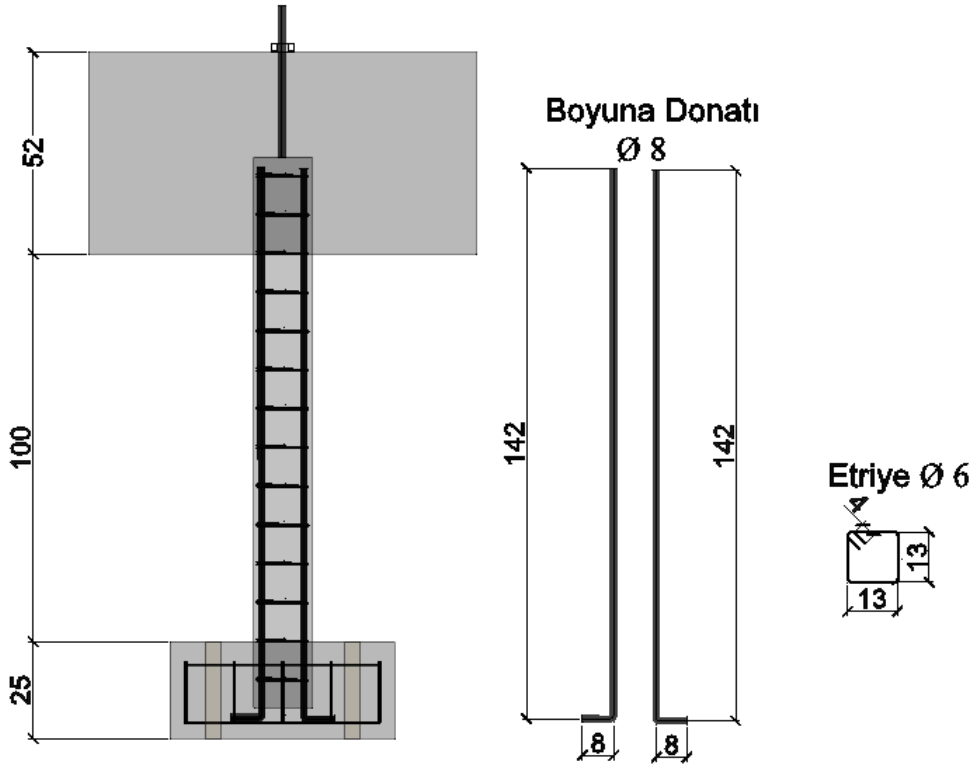
Deneye tabi tutulacak betonarme kolonlar kare en kesitli (15 x 15 cm) tasarlanmıştır. Şekil 5.1'de betonarme kolon numunesinin üç boyutlu görünüşü gösterilmiştir.



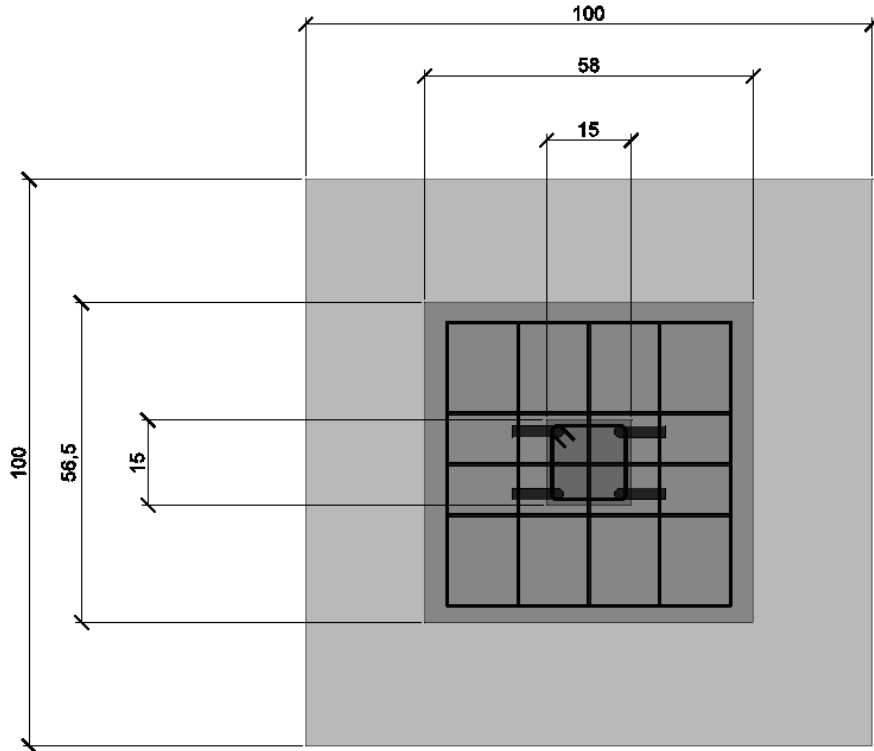
Şekil 5.1. Deney numunelerinin 3 boyutlu görünüşü

Deney numunesi kolonların üzerine, eksenel yükü ve atalet kuvveti idealize edebilmesi için literatür çalışması neticesinde boyutları (100 x 100 x 52 cm) olan beton blok oluşturulmuştur. Beton blok ile deney numunelerinde, normal bir yapıda bulunan kolonun mesnet koşullarının oluşturulması amaçlanmıştır. Bütün numunelerde C18 beton sınıfı, 4Ø8 boyuna donatı ve Ø6 enine donatı kullanılmıştır. Enine donatılarda kanca boyu 4 cm; pas payı 1 cm alınmıştır. Boyuna donatılarda 8 cm gönye

tasarlanmıştır (Şekil 5.2). Deney numunesi kolonların üst görünüşü Şekil 5.3'te sunulmuştur.

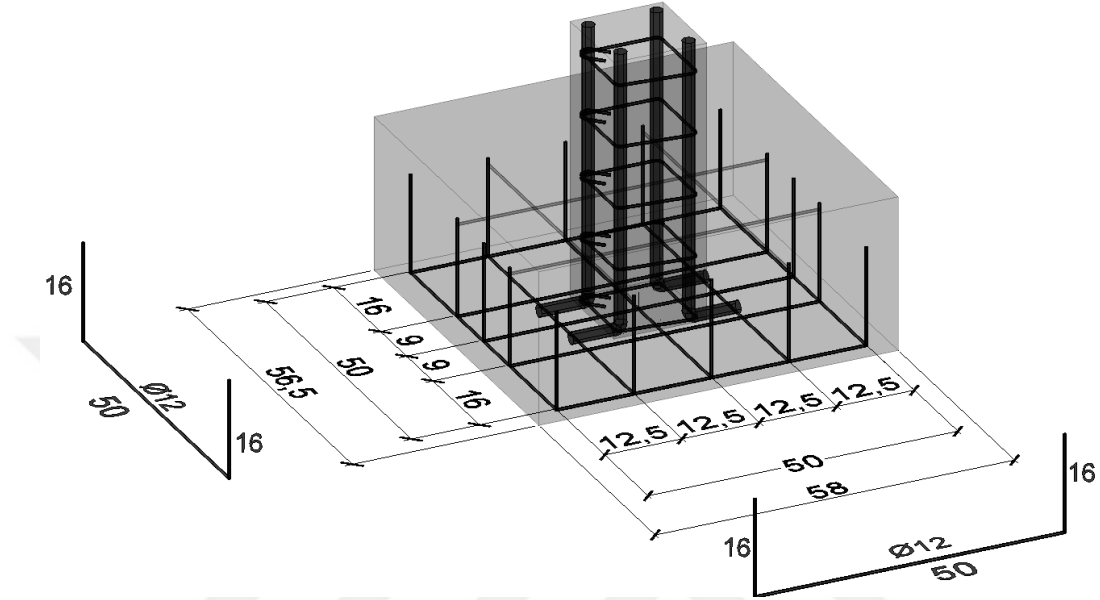


Şekil 5.2. Deney numunesi kolonların yan görünüşü ve donatı detayı (ölçüler cm cinsindedir)



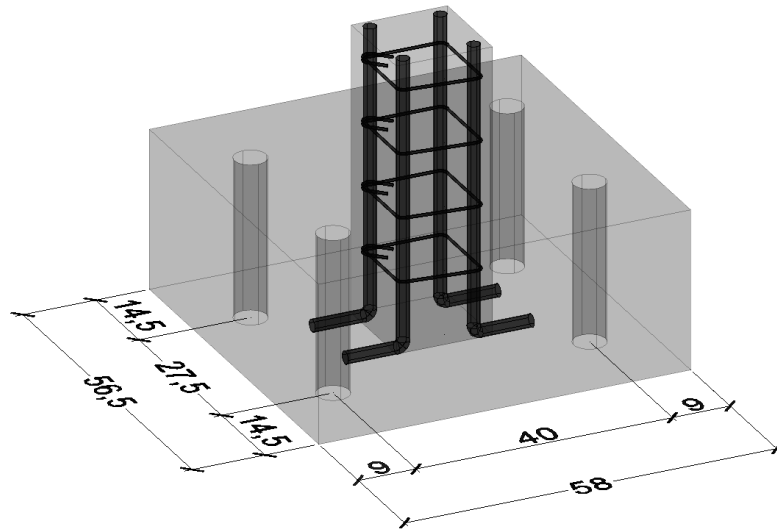
Şekil 5.3. Deney numunesi kolonların üst görünüşü (ölçüler cm cinsindedir)

Temelde meydana gelen oturma ve dönmeler çalışma kapsamında dikkate alınmayacağı için, boyutları (56.5 × 58 x 25 cm) olan rijit bir temel ayağı ile desteklenmiştir. Temelde kullanılan donatılar Ø12 olup donatı detayları Şekil 5.4' te gösterilmiştir.



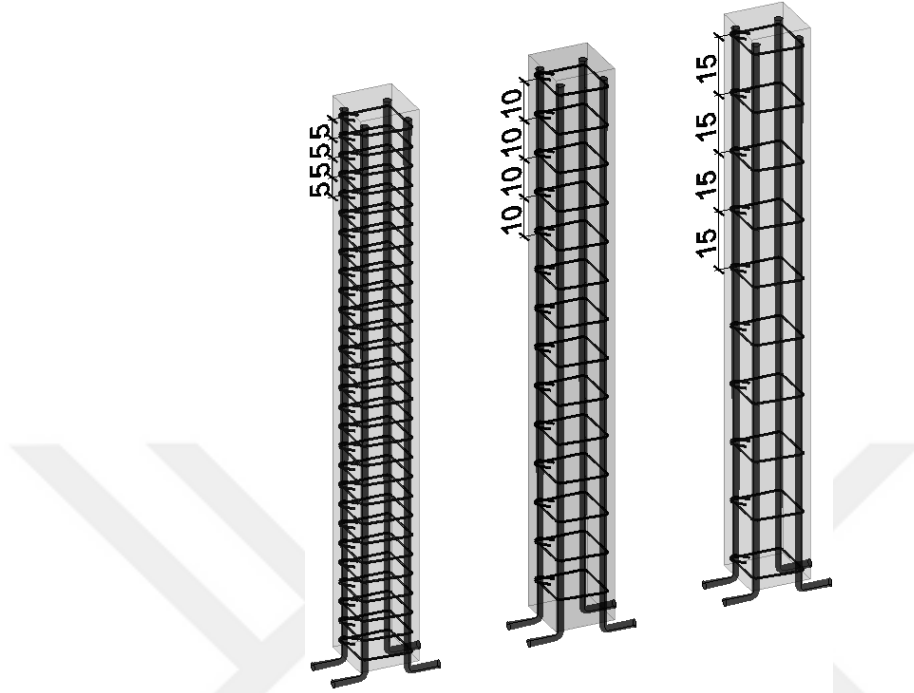
Şekil 5.4. Temel genel görünüşü ve donatı detayı (ölçüler cm cinsindedir)

Deney numunelerini sarsma tablasına sabitlemek için temellerin 4 noktadan Ø5 çapında delinmesi planlanıp temelde açılan deliklerin şematik detayları Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Deney numunelerinin sabitlenmesi için açılan deliklerin şematik detayları (ölçüler cm cinsindedir)

Ülkemizdeki yapı stoğunu daha iyi temsil edebilmesi için deney numunelerinde etriye aralığı 5 cm-10 cm- 15 cm olarak seçilmiştir (Şekil 5.6).



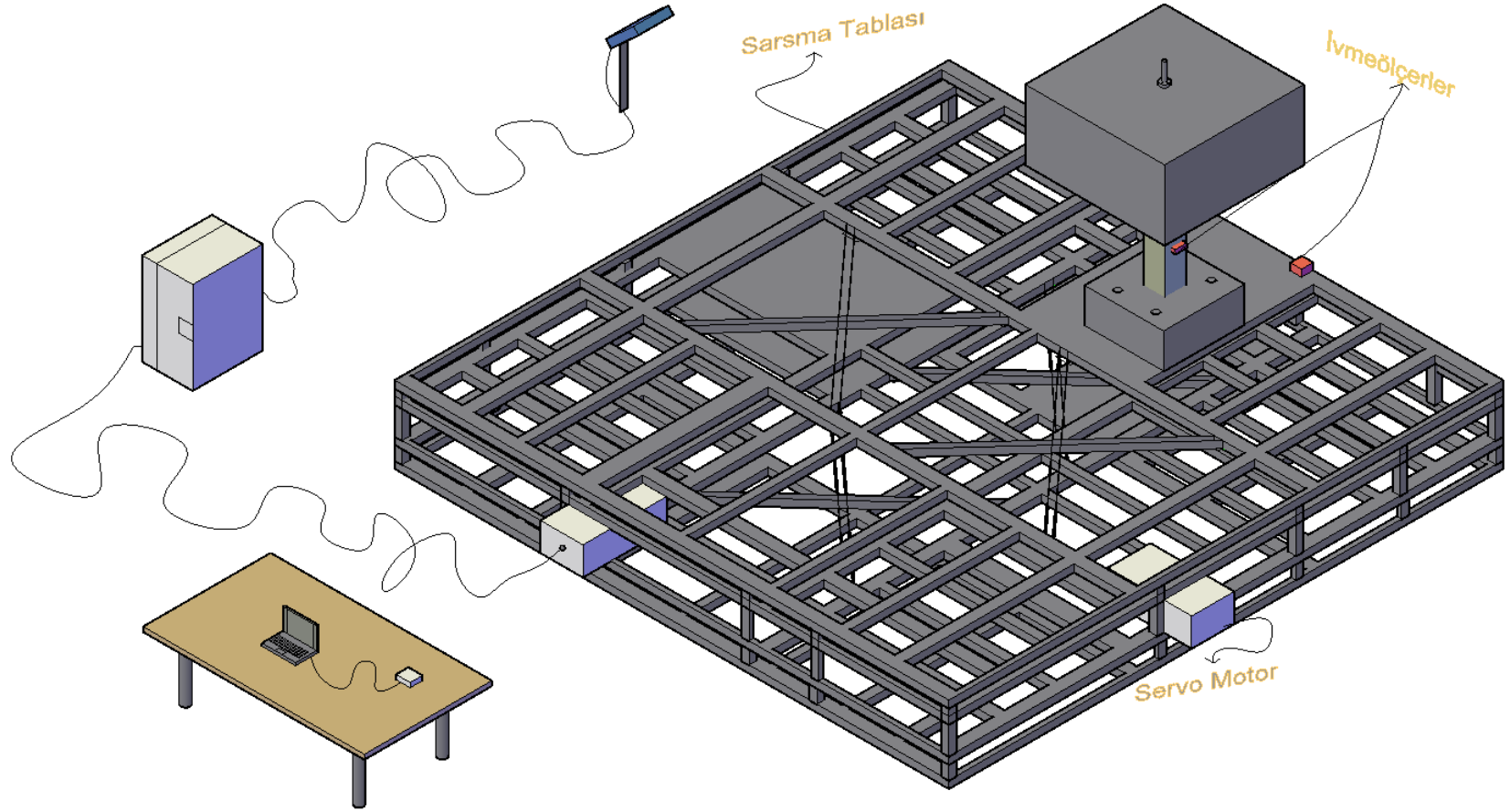
Şekil 5.6. Kolonlarda kullanılan etriye aralığı detayı

Deneyde test edilen parametrelerden biri de donatı sınıfı olduğu için 3 adet betonarme kolonda boyuna donatılar, etriyeler, temel donatıları S420 çeliğinden oluşacak şekilde seçilirken 3 adet betonarme kolondaki boyuna donatılar, etriyeler, temel donatıları S220 çeliğinden oluşacak şekilde seçilmiştir. Çizelge 5.1'de kolon numunelerine ait detaylar verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney numunelerine ait detaylar

Kolon İsmi	Kolon Adedi	Beton Sınıfı	Donatı Sınıfı	Etriye Aralığı (cm)
SE-01	1	C18	220	15
SE-02	1	C18	220	10
SE-03	1	C18	220	5
SE-04	1	C18	420	15
SE-05	1	C18	420	10
SE-06	1	C18	420	5

Deney düzeneği Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

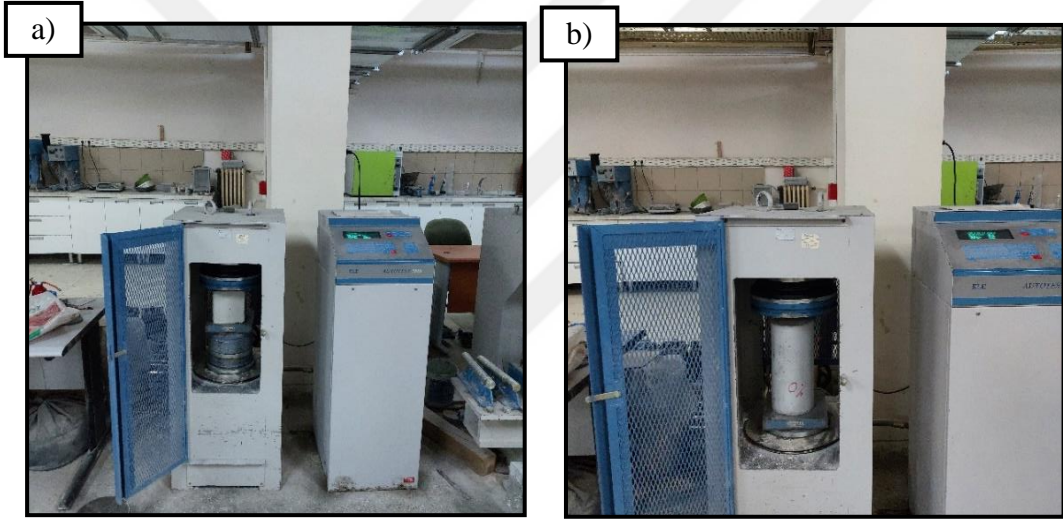


Şekil 5.7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

## 5.2. Deney Numunelerinin Üretimi

### 5.2.1. Beton basınç dayanımı deneyleri

Betonarme kolonlara hazır beton dökümü sırasında beton basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla 4 adet boyutları (150 x 150 mm) olan küp numune ve 2 adet çapı 15 cm yüksekliği 30 cm olan silindir numune alınmıştır. Farklı beton basınç dayanımının oluşmasını engellemek amacıyla betonarme deney numuneleri ve küp-silindir numuneler aynı ortamda muhafaza edilmiştir. Beton dökümünden 24 saat sonra küp-silindir numuneler kalıplarından çıkarılarak kür havuzuna yerleştirilmiştir. Küp-silindir numunelerin dayanımları Konya Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında test edilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. a) Küp beton numune dayanım testi b) Silindir beton numune dayanım testi

Küp beton numune test sonuçları Çizelge 5.2’de, silindir beton numune test sonuçları Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.2. Küp numune test sonuçları

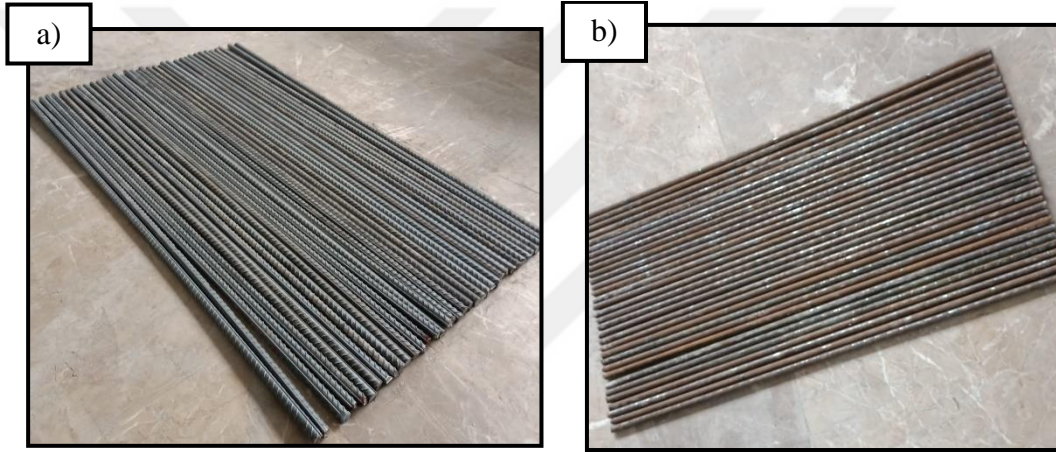
Numune No	Eşdeğer Küp (150 mm) Basınç Dayanımı (Mpa)	Ortalama
Numune 1	24.47	
Numune 2	23.16	
Numune 3	22.98	23.11
Numune 4	21.82	

Çizelge 5.3. Silindir numune test sonuçları

Numune No	Silindir (150 mm) Basınç Dayanımı (Mpa)	Ortalama
Numune 1	19.16	18.11
Numune 2	17.05	

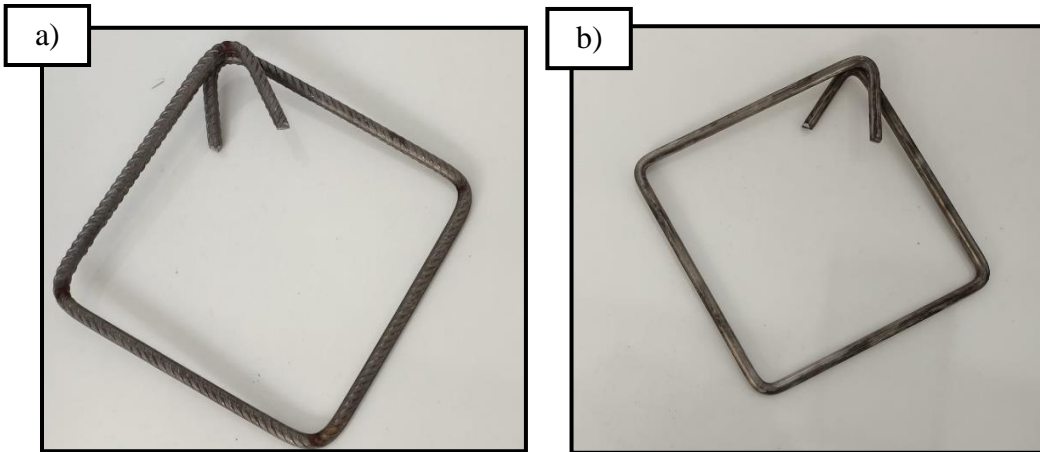
### 5.2.2. Donatılar

Çelik nervürlü ve nervürsüz donatılar tasarımda belirlenen boyutlarda el makası ile kesilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. a) Nervürlü donatı çubukları b) Nervürsüz donatı çubukları

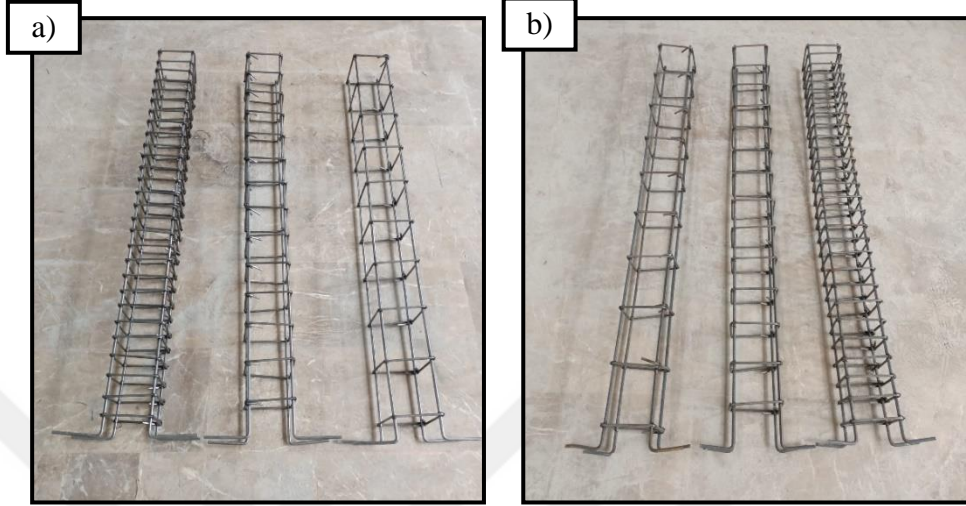
Enine donatılarda kanca açılı yönetmeliğe uygun olacak şekilde ( $135^{\circ}$ ) donatı bükme tezgahında bükülmüştür (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. a) Nervürlü etriyeler b) Nervürsüz etriyeler



Boyuna donatıların uçlarında 8 cm gönye olacak şekilde  $90^{\circ}$  açı ile bükülmüştür. Hazır hale getirilen nervürlü ve nervürsüz boyuna donatılar ve etriyeler birleştirilerek 6 adet kolon donatısı hazırlanmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Betonarme kolonların donatı detayı a) Nervürlü donatılar b) Nervürsüz donatılar

82 cm uzunluğunda kesilen nervürlü ve nervürsüz çelik çubuklar 2 ucu 16 cm gönye oluşturacak şekilde  $90^{\circ}$  açıyla bükülerek tasarımda belirlenen aralıklarda birbirine bağlanıp temel donatıları oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Ayrıca temel üst kısmında meydana gelebilecek kesme kuvvetine karşı temel üst kısmına 4 adet 52 cm boyutunda birbirine çapraz olarak yerleştirilmek üzere üst temel donatısı eklenerek bu donatılar alt temel donatılarının gönyelerine ve kolon filizlerine bağlanmıştır.

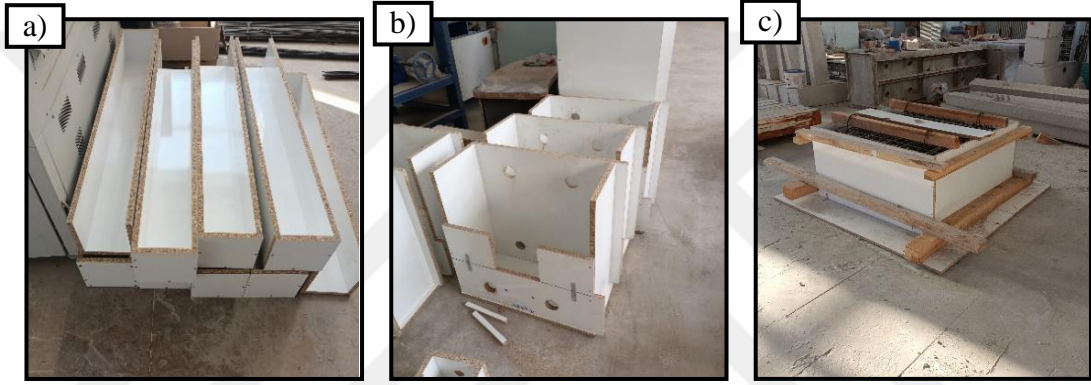


Şekil 5.12. Nervürlü ve nervürsüz temel donatıları



### 5.2.3. Kalıplar

Betonarme kolonları oluşturmak için suntalam kalıplar kullanılmıştır. Suntalamlar donatı kafeslerine uygun boyutlarda kesilerek birleştirilmiştir (Şekil 5.13). Deney numunelerini sarsma tablasına sabitlemek için temel kalıpları 4 noktadan  $\text{Ø}5$  çapında delinmiştir. Bu noktalara plastik borular yerleştirilmiştir. Deney numunelerinin vinç ile taşınabilmesi için temel kalıplarının üst kısmı iki tarafından delinerek dikdörtgen şeklinde taşıma kancaları yerleştirilmiştir. Beton blok için hazırlanan kalıbın beton dökümü sırasında beton basıncı ile açılmasını engellemek için kalıplar payandalar ile desteklenmiştir.



Şekil 5.13. a) Kolon için hazırlanan kalıplar b) Temel için hazırlanan kalıplar c) Beton blok için hazırlanan kalıp

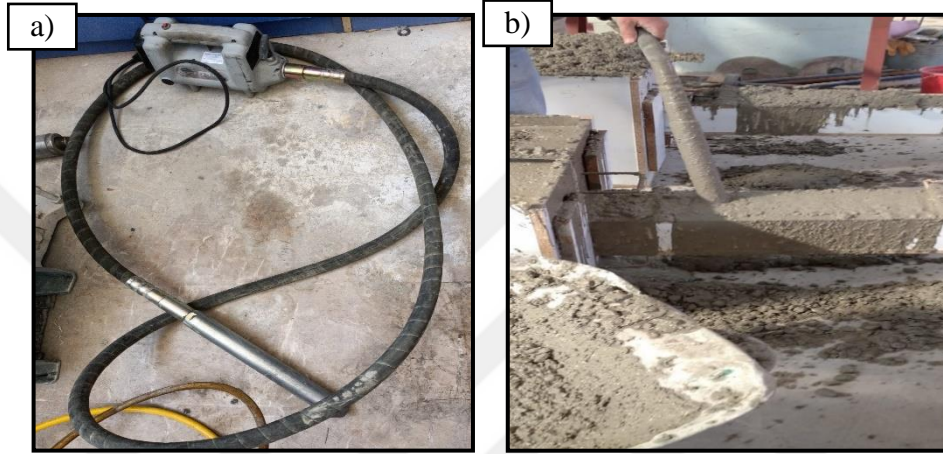
Temel kalıpları ve kolon kalıpları birleştirilerek donatıları yerleştirilmiştir. Beton dökümünden önce donatı yerleşiminin ve pas paylarının doğruluğu kontrol edilerek beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Beton dökümünden önce deney numunelerinin görünümü

#### 5.2.4. Beton dökümü

Bu tez çalışmasında Konya Hazır Beton San. ve Tic. A.Ş. tarafından üretilen C18 beton sınıfı kullanılmıştır. Yönetmeliğe uygun olacak şekilde farklı beton basınç dayanımlarının önüne geçmek için hazır beton kullanılarak yapılan döküm işlemleri aynı gün içinde gerçekleştirilmiştir. Kalıp içindeki betonun homojen dağılım göstermesi ve segregasyon oluşumunu engellemek için vibratör kullanılmıştır (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. a) Vibratör aleti b) Beton dökümü sırasında vibratör kullanımı

Betonun kalıba düzgün yerleşmesini sağlamak için beton dökümü yatay şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Beton döküldükten sonra deney numunelerinin görünümü

Beton yüzeyinde oluşacak çatlakları engellemek ve betonun beklenen dinamik hedeflere ulaşabilmesi için küreleme işlemi yapılmıştır. Beton dökümünden 5 gün sonra deney numuneleri kalıplardan çıkarılmıştır.



Şekil 5.17. Kalıplardan çıkarılmış deney numuneleri ve küreleme işlemi

Sarsma tablası deneyleri büyük ölçekli numuneler içerdiğinde, istenilen dinamik özelliği elde etmek, numunenin mukavemet kapasitesine ulaşmak ve yeterli atalet kuvveti oluşturmak için önemli miktarda kütle sağlanmalıdır. Deneyler sırasında ek kütle doğrudan numunenin üstüne kurularak cıvatalanmıştır. Bu şekilde numune üzerinde aksenal kuvveti yeniden oluşturmak mümkün olmuştur. Deney numuneleri vinçle sarsma tablası üzerine yerleştirilmiştir. Sarsma tablası ile temel arasındaki hareketi önlemek için temeller sarsma tablası üzerinde bulunan plakaya sağlam bir şekilde cıvatalanmıştır ve hareketi önlemek için bulonlar sıkıca kenetlenmiştir. (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Deney numunelerinin sarsma tablasına kurulumu



### 5.3. Dinamik Testler

#### 5.3.1.Sarsma tablası

Sarsma tablası yeni nesil sismik testlerin gerçek boyutlu ya da ölçekli yapılarda gerçekleştirilmesini sağlayan dinamik deney aletidir. Deney numunelerinin dinamik testi Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı ve Deprem Laboratuvarında bulunan iki eksenli sarsma tablası kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.19). Kolonlar tek yönde (y yönünde) sarsılmıştır. Servo motor ile hareketi sağlanan sarsma tablasının boyutu (4 x 4 m)'dir. Toplam taşıma kapasitesi 10 ton olan sarsma tablası hem x hem de y yönünde 15 cm deplasman yapabilmektedir.



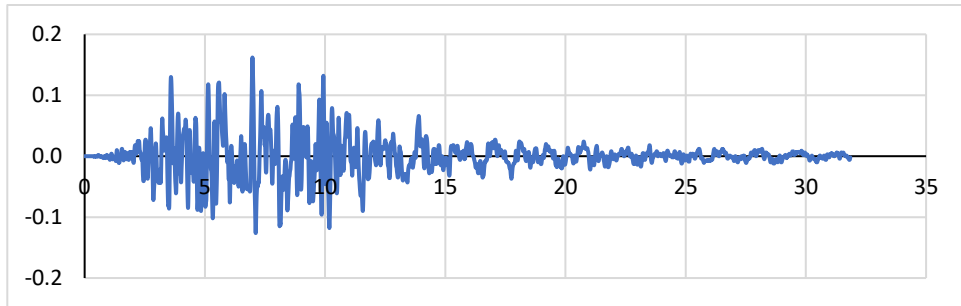
Şekil 5.19. Sarsma tablası düzeneği

Sarsma masasını komutlamak için PLC WinProladder isimli programlama yazılımı kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan dijital servo kontrol ünitesi (Controlbox) Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Controlbox elektro-mekanik verenler ile sarsma tablaları için geliştirilmiş bir sayısal servo kontrolördür.



Şekil 5.20. Dijital servo kontrol ünitesi

Çalışma kapsamında, kolon numunelerinin dinamik davranışını tespit edebilmek için bir dizi sarsma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. 1996 Kobe depremi 1107. İstasyonu (Kakogawa İstasyonu)'dan  $90^0$  yönü için okunan gerçek ivme verisi 0.5 ölçek faktörü ile çarpılarak küçültülmüştür. İvme veri kaydı yükleme prosedürü sarsma tablasına iletilmiş ve kolon numunelerinin bu veri kayıtları ile sarsılması sağlanmıştır. Çalışma kapsamında, model yapının dinamik davranışının en güvenilir sonuçlarını elde etmek için belirlenen ivme veri kaydı deney numunesine 10 kez uygulanmıştır. Uygulanan yükleme prosedürün ivme-zaman kayıtları Şekil 5.21'de gösterilmiştir

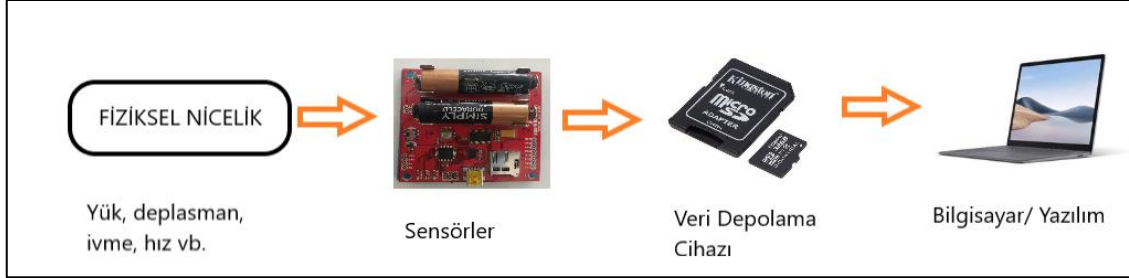


Şekil 5.21. Kolon numunesine uygulanan ivme kaydı

### 5.3.2. Veri toplama

Veri toplama bazı fiziksel özelliklerin (yük, deplasman, ivme, hız vb.) sensörler aracılığı ile elektriksel olarak algılanıp yüksek hassasiyette sayısal değerlere dönüştürülüp örneklenerek kaydedilmesi işlemidir. Bilgisayar ortamına aktarım, bilgisayarların anlayabileceği, örneğin Excel ya da Matlab ile açılacak, işlenebilecek

bir veri formatında olmakta ve sonrasında karmaşık analizler uygulanarak sonuçlar elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan veri toplama şematik gösterimi Şekil 5.22’de sunulmuştur.



Şekil 5.22. Veri toplama şematik gösterimi

Dinamik deneylerde kullanılan veri toplama sisteminin çok sayıda veriyi kısa sürede yüksek çözünürlükte göstermesi gerekir. Veri toplama uygun sensör kullanımı ile başlar. Sensör, ortamdaki değişikliği algılayan ve diğer sistemdeki bazı çıktılara yanıt veren cihazdır. Bir sensör, fiziksel bir niceliği, insan tarafından okunabilir bir ekrana dönüştürür ya da okuma veya daha fazla işlem için iletilen, ölçülebilir bir analog voltaja (veya bazen bir dijital sinyale) dönüştürür (Smith, 2020).

Bu deneysel çalışmada yapıda oluşan titreşim hareketini ölçmek için ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler bir yapının sahip olduğu ivmeyi ölçmek için kullanılan cihazlardır. Bunu yaparken içerisindeki kütlelerin dik konumunu referans alıp oluşan değişiklikleri bu referans noktalarıyla kıyaslayarak bulmaktadır. İvmeölçerler titreşim, şok, hareket, sismik, kuvvet, eğim değerlerini ölçmek için kullanılabilirler.

İvmeölçerlerden doğru sonuçlar elde edebilmek için kullanılacak ivmeölçerlerin özellikleri, deney yapılacak yapının özelliklerine (boyutu, frekans aralığı vb.) ve yapılacak ölçümün amacına uygun seçilmelidir. Aksi durumda ölçülen değerler yanlış çıkacağından elde edilen sonuçlar gerçeği yansıtmayacaktır (Güneş, 2017).

Titreşimi ve şoku ölçmek için tasarlanmış çok çeşitli ivmeölçerler vardır. İvmeölçer seçerken dikkat edilmesi gereken en önemli konular aşağıda sıralanmıştır:

- **Zemin izolasyonu:** Test edilen nesne iletken olduğunda ve toprak potansiyelinde olduğunda çok önemlidir. Enstrümantasyon ve ivmeölçer arasındaki toprak voltajı

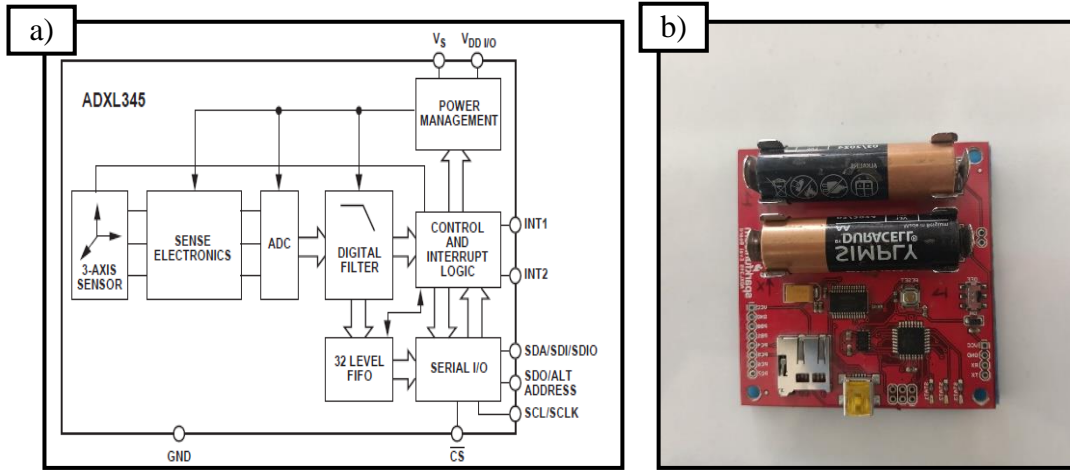
seviyelerindeki bir fark, yanlış veri okumalarına neden olan bir toprak döngüsüne neden olabilir.

- **Duyarlılık:** Ölçülmesi istenen değere uygun yüksek hassasiyette ivmeölçer seçilmelidir. Yüksek hassasiyet normalde nispeten büyük, ağır bir ivmeölçer gerektirebilir, bunun ölçülecek yapıya etkileri göz önüne alınmalıdır.
- **Düşük frekans aralığı:** İvmeölçer, ölçülmek istenilen frekanslardan daha düşük bir yüksek geçiş kesme değerine sahip olmalıdır. Örneğin, 1 ila 5 Hz frekanslı bir test yapmak için 0.3 Hz (veya daha düşük) bant genişliğine sahip bir ivmeölçer kullanılmalıdır.
- **Bant Genişliği (Frekans Aralığı):** Bu, ivmeölçerin (üst) bant genişliğidir. Küçük kütle ivmeölçerler, 180 kHz'e kadar bir rezonans frekansı sağlayabilir, ancak biraz daha büyük, daha yüksek çıkışlı, genel amaçlı ivmeölçerler için, 20 ila 30 kHz'lik rezonans frekansları tipiktir.
- **Genlik Aralığı:** Şarj ivmeölçerleri geniş genlik aralıkları sağlar (özel olarak tasarlanmış şok ivmeölçerler 100,000 g'den fazla genlik aralığına sahip olabilir), ancak IEPE ivmeölçerleri de oldukça yüksektir (1000 g'a kadar). MEMS ivmeölçerleri genellikle çok sınırlı bir aralığa sahiptir (birkaç yüz g'a kadar).
- **Artık Gürültü Seviyesi:** Bu, ivmeölçerin ölçebileceği en düşük genlik seviyesini tanımlar. Optimum ölçüm aralığına sahip bir ivmeölçer kullanılmalıdır çünkü daha yüksek menzilli ivmeölçerler de daha yüksek gürültü seviyesine sahip olacaktır.
- **Sıcaklık aralığı:** Elektronik dahil tüm ivmeölçerler, 130°C'ye kadar sınırlı bir yüksek sıcaklık aralığına sahiptir. İvmeölçer yapımında kullanılan malzemeler sıcaklığa bağlıdır, bu nedenle ortam sıcaklığındaki herhangi bir değişiklik, ivmeölçerin duyarlılığında bir değişikliğe neden olacaktır. Ayrıca bazı ivmeölçer çeşitleri ölçüm ortamında geçici sıcaklıklar olarak adlandırılan küçük sıcaklık dalgalanmalarına maruz kaldıklarında değişen bir çıktı sergilerler. Bu normalde yalnızca çok düşük seviyeli veya düşük frekanslı titreşimler ölçülürken bir problemdir. İvmeölçerler 250°C'den daha yüksek sıcaklıklardaki yüzeylere sabitlenecekse, taban ile ölçüm yüzeyi arasına bir soğutucu ve mika yıkayıcı yerleştirilebilir. 350 ila 400°C yüzey sıcaklıklarında, ivmeölçer tabanı bu yöntemle 250°C'nin altında tutulabilir.

- **Ağırlık:** Modal testlerde, kütle yükleme etkisi nedeniyle ağırlık büyük bir faktör olabilir. Yapıya eklediğimiz herhangi bir kütle, dinamik davranışını değiştirir. Genel bir kural olarak, ivmeölçer kütlesi, üzerine monte edildiği titreşen parçanın dinamik kütesinin onda birinden fazla olmamalıdır.
- **Zemin Döngüleri:** İvmeölçer ve ölçüm ekipmanı ayrı ayrı topraklandığından, topraklama devresi akımları ivmeölçer kablolarının blendajında akabilir. Topraklama döngüsü, yalıtılmış bir sensör, yalıtılmış bir amplifikatör kullanılarak veya bir yalıtım saplaması aracılığıyla ivmeölçer tabanının montaj yüzeyinden elektriksel olarak yalıtılmasıyla kırılır.
- **Kablo Gürültüsü:** Kablo gürültüsü, yüksek çıkış empedansı nedeniyle temel olarak piezoelektrik ivmeölçerlerin sorunudur. Bu rahatsızlıklar triboelektrik gürültü veya elektromanyetik gürültüden kaynaklanabilir. Triboelektrik gürültü genellikle kablonun mekanik hareketi ile ivmeölçer kablosunda indüklenir. Kabloyu oluşturan katmanların dinamik bükülmesi, sıkışması ve gerilimi nedeniyle yerel kapasite ve yük değişikliklerinden kaynaklanır. Bu sorun, uygun bir grafitize ivmeölçer kablosu kullanılarak ve ivmeölçerin mümkün olduğu kadar yakınına bantlanarak veya yapıştırılarak önlenir. Elektromanyetik gürültü, genellikle, çalışan makinelerin yakınına yerleştirildiğinde ivmeölçer kablosunda indüklenir.

Bu deneyde ADXL345 tipi ivmeölçerler kullanılarak deney numunelerinden veriler ölçülmüştür (Şekil 5.23). ADXL345, hem statik ivmeyi (yerçekimi nedeniyle) hem de dinamik ivmeyi (hareket veya şok nedeniyle) algılayan 3 eksenli bir ivmeölçerdir. Bir polisilikon levhanın üzerine inşa edilmiş bir polisilikon yüzey-mikro-işlenmiş yapıdan oluşan MEMS ivmeölçerdir. Polisilikon yaylar ön kütleli askıya alır. İvmeyi ölçmek için ispat kütlesi ile sabit çerçeve arasında diferansiyel kapasitörler kullanılır. Bir eksen boyunca herhangi bir ivme, ispat kütesini saptırır ve diferansiyel kondansatörün dengesini bozar, bu da ivme ile doğru orantılı bir sensör tepkisi ile sonuçlanır. Hızlanmanın büyüklüğünü ve polaritesini belirlemek için faza duyarlı demodülasyon kullanılır.





Şekil 5.23. a) ADXL345 ivmeölçerin fonksiyonel blok şeması (Agnihotri, 2022) b) Deneyde kullanılan ivmeölçer

Çizelge 5.4. ADXL345 İvmeölçerin genel özellikleri (Agnihotri, 2022)

ADXL345 İvmeölçer	
Eksen Sayısı	3
Ölçüm Aralığı	$\pm 2$ g, $\pm 4$ g, $\pm 8$ g, $\pm 16$ g (Kullanıcı tarafından seçilebilir)
Frekans Aralığı	0.1-3200 Hz
Hassasiyet (10 bit çözünürlük için)	$\pm 2$ g için 3.9 mg/LSB $\pm 4$ g için 7.8 mg/LSB $\pm 8$ g için 15.6 mg/LSB $\pm 16$ g için 31.2 mg/LSB
Çıkış Çözünürlüğü	10 bit-11 bit-12 bit-13 bit (Kullanıcı tarafından seçilebilir)
Şok Dayanımı	10000 g (98 km/sn <sup>2</sup> )
Besleme Voltajı	2.0V- 3.6 V
Çalışma Sıcaklığı	-40°C - +85°C

Bu tez çalışmasında yükleme yönüne göre 2 noktaya ivmeölçer konularak ölçüm yapılmıştır:

1. Yüksek modlara etkisi nedeniyle modal analiz için oldukça önemli olan tepe noktasındaki ivme değerlerini ölçmek için kolonun üst noktasına (kolon ile beton blok birleşim yerinin 10 cm aşağısına) sarsma yönüne paralel olacak şekilde ivmeölçer yerleştirilmiştir.
2. Sarsma tablasına ivmeölçer yerleştirilmiştir. Burada iki amaç vardır. Öncelikle dijital ortamdaki sarsma tablasına gönderilen sinyaller ile ivmeölçerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak sarsma tablasının çalışmasının doğruluğu kontrol

edilmiştir. Ayrıca oluşan bir sarsıntıda sarsma tablasından alınan ivmeler ile bunun deney numunesi üzerindeki boyutu ve etkisi arasında bir karşılaştırma yapılabilmektedir.



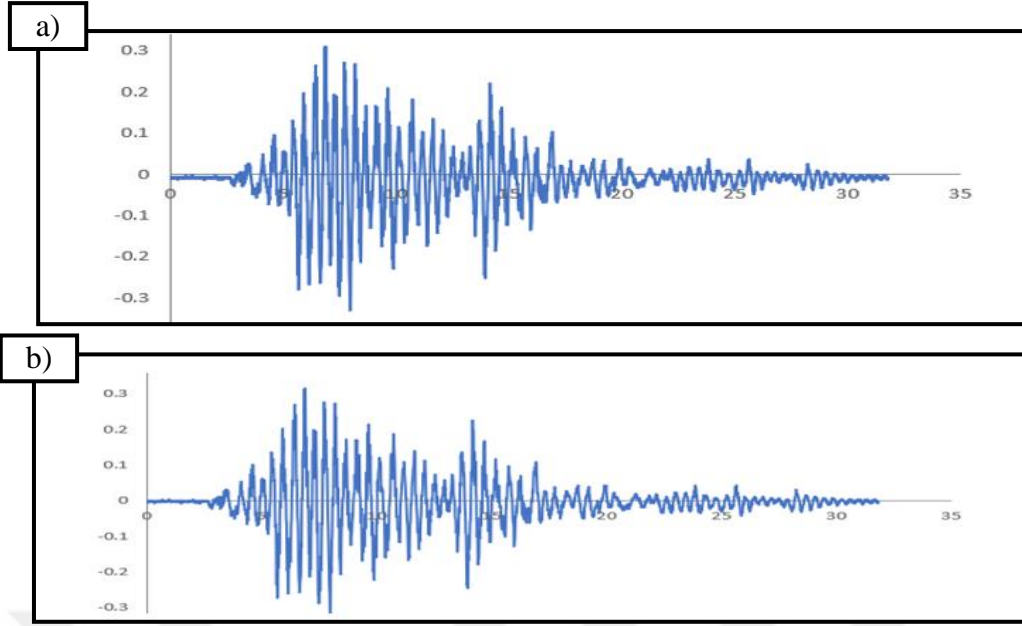
Şekil 5.24. Deneyde kullanılan ivmeölçerlerin konumları

## Veri Depolama

Hafıza kartları, fotoğraflar ve videolar gibi dijital ortamları saklayan cihazlar için bir elektronik veri saklama alanı olarak görev yaparlar. Deney numunesinden ivmeölçer ile ölçülen veriler microSD kartta depolanarak bilgisayara aktarılmıştır.

## Kalibrasyon

Ölçüm sonucundaki anlamı olmayan ara sayısal değerlerin ölçülmek istenilen fiziksel niceliğe dönüştürülme işlemine kalibrasyon adı verilmektedir (Isler, 2017). İvmeölçer ile ölçülüp microSD kartta depolanarak bilgisayar ortamına aktarılan veriler Excel’de kalibre edilmiştir. Bilgisayar ortamına “csv” formatında aktarılan veriler “xlsx” formatında kaydedilmiştir. Excel’de yapının doğal titreşim frekanslarını içeren 31.85 sn’lik alan seçilip geri kalan gürültü verileri silinerek ivme-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Global eksene göre saparak  $y=0$  ekseninin altında ya da üstünde olan veriler sıfır eksenine taşınmıştır (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. a) Sıfır ekseninin altında veriler b) Sıfır eksenine taşınmış veriler

Sinyallerin belirli frekanslarını güçlendirmek, zayıflatmak, tamamen silmek ya da gürültüyü (insan, elektronik cihaz, taşıt vb.) ayıklamak için filtreleme kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan ADXL345 tipi ivmeölçer kendi içinde filtreleme yapmıştır. Ancak bazı durumlarda ortamdaki gürültü miktarının fazla olmasından dolayı elde edilen veri üzerinde ikinci bir filtreleme yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada elde edilen veriler üzerinde filtreleme ve FFT dönüşümü yapmak için SeismoSignal ve OriginPro programı kullanılmıştır. Sızıntıyı engellemek için programda Blackman penceresi kullanılmıştır. Alçak geçiren filtre yapılarak tabla için kesme frekans değeri 14.5 Hz; kolon için 11 Hz alınmıştır. Elde edilen verilerden FRF bulmak için tabla verileri (etki) kuvvete dönüştürülmüş; kolon (tepki) verileri ivme değeri olarak kalmıştır. Tabla verilerini kuvvete dönüştürmek için kütle (1550 kg) ile çarpılmıştır. Tabla (etki) ve kolon (tepki) verileri kullanılarak FRF elde edilmiştir.

Eğri uydurma, kısıtlamalara tabi olan bir dizi veri noktasına en iyi uyan bir eğri veya matematiksel fonksiyon oluşturma işlemidir. Eğri uydurma, verilere tam bir uyumun gerekli olduğu durumlarda enterpolasyon veya yaklaşık olarak uyan bir "pürüzsüz" fonksiyonun oluşturulduğu yumuşatma içerebilir (Anonymous, 2022). Bu tez çalışmasında OrijinPro programında eğri yumuşatmada Savitzky-Golay yöntemi; eğri uydurmada ise Gauss, Voigt ve Lorentz eğri uydurma teknikleri kullanılmıştır.

## 6. TARTIŞMA VE BULGULAR

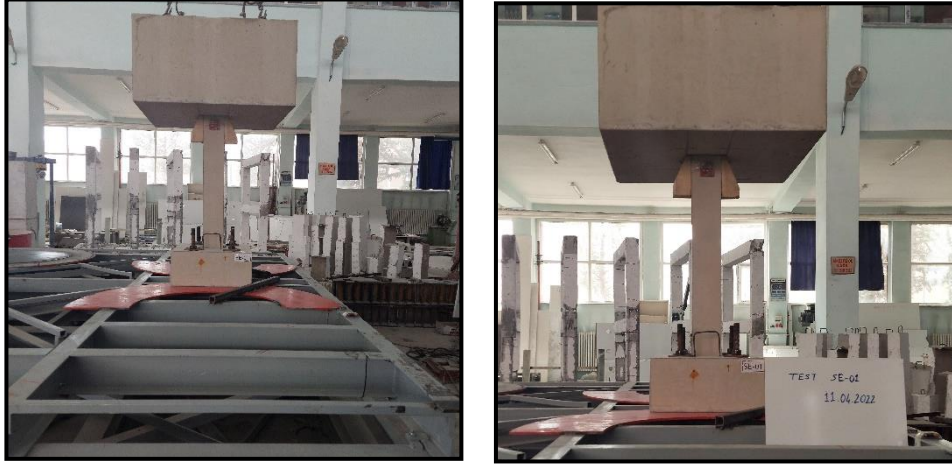
Bu çalışmada deney numunelerinin doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları tespit edilerek incelenmiştir. Frekans davranış fonksiyonunun genliği, sistemin doğal frekansında bölgesel tepe noktalarına sahiptir. Fourier dönüşümü sonuçlarından, veri toplama, dalgalanma nedeniyle düşük frekans alanında verimsiz bir eğilim göstermiştir. Bu nedenle, etkin bir frekans davranış fonksiyonu modeli elde etmek ve birinci moddaki doğal titreşim frekansını daha iyi saptamak için 5.05 Hz değerinin altındaki veriler kullanılarak FRF eğrisi oluşturulmuş ve FRF eğrisi oluşturulmadan önce FFT üzerinde OrijinPro programı kullanılarak Savitzky-Golay eğri yumuşatma yöntemi uygulanmıştır. Hazırlanan 6 adet betonarme kolon numunesi aynı ivme değeri ve aynı koşullar altında deneye tabi tutulmuştur.

Sarsma tablası testine başlamadan önce her deney numunesi büzülme, sıcaklık vb. dış etkilerden kaynaklanan herhangi bir görünür hasar olup olmadığı yönünden izlenerek denetlenmiştir. Deneyler sırasında çapraz yerleştirilmiş 2 kamera ile deney numunelerinde meydana gelen değişimler kaydedilmiştir. Fotoğraflar her deneyden sonra çekildiğini için deney sırasında oluşan veya aktif olan, daha sonra yerçekimi yükleri nedeniyle tamamen kapanan çatlakların çekilen fotoğraflarda tespit edilebilmesi amacıyla her deney sonunda çatlakların olduğu bölgeler kalem ile işaretlenmiş ve çatlakların olduğu bölgelerin üzerine deney numarası yazılmıştır.

Ölçüm hatasını azaltmak ve gürültünün (insan, elektronik cihaz, taşıt vb.) etkisini en aza indirmek için her deney numunesi on kez teste tabi tutulmuş, ölçülen FRF verileri kullanılarak elde edilen doğal titreşim frekanslarının ve sönüm oranlarının ortalaması alınıp bu değerler üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.

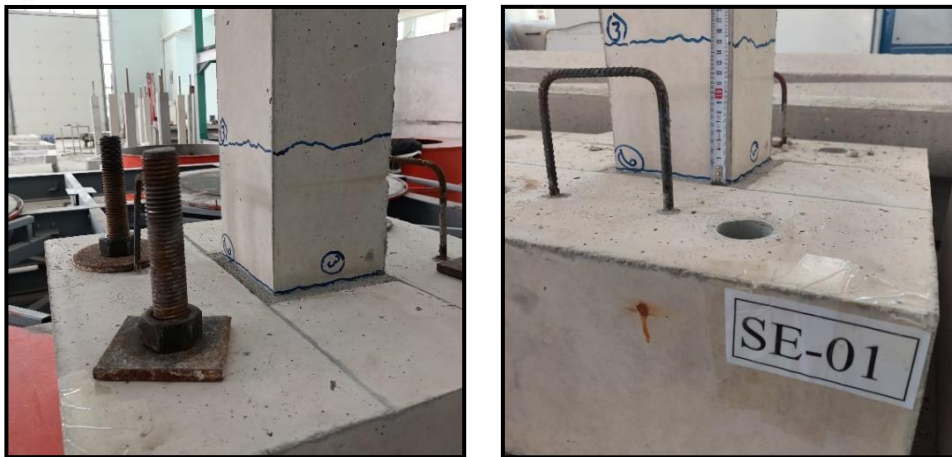
### 6.1. SE-01 Deney Numunesi

SE-01 deney numunesi 15 cm etriye aralığına ve S220 donatı sınıfına sahip kolondur (Şekil 6.1). SE-01 deney numunesi on kez teste tabi tutulmuştur.



**Şekil 6.1.** Deneye başlamadan önce SE-01 deney numunesinin sarsma tablası üzerinde genel görünümü

İlk çatlak oluşumu üçüncü test sırasında temelden yaklaşık 15 cm yukarıda ve temel-kolon birleşim bölgesinde SE-01 deney numunesinin tüm yüzeylerinde gerçekleşmiştir. Üçüncü test sırasında deney numunesinin temel-kolon birleşim bölgesinde doğu-batı yönünde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Dördüncü ve beşinci testler sırasında yeni çatlaklar oluşmamış, daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır. Altıncı test sırasında aynı tür eğilme çatlaklarının deney numunesinin kuzey ve güney yönlerinde kolon-temel birleşim bölgesinde oluştuğu görülmüştür ve deney numunesinin temel-kolon birleşim bölgesinde kuzey-güney yönünde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Devam eden testler sırasında ekstra bir çatlağın oluşmadığı, daha önce oluşan çatlakların genişliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Onuncu test sırasında kolon-temel birleşim bölgesinde ayrılmanın oluştuğu görülmüştür ve testler sonlandırılmıştır.



**Şekil 6.2.** SE-01 deney numunesinde test sonucunda oluşan çatlaklar

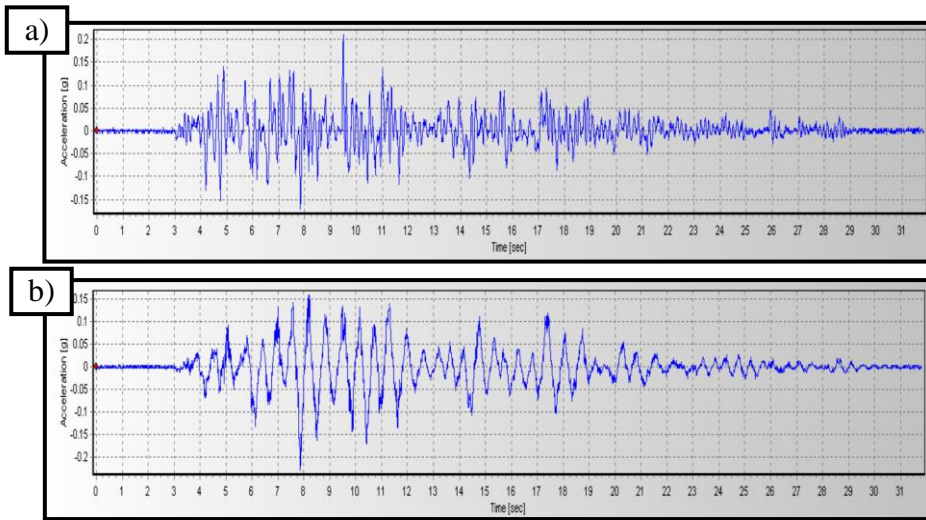


SE-01 deney numunesinin testler sırasındaki davranışı özet olarak Çizelge 6.1’de verilmiştir.

**Çizelge 6.1.** SE-01 numunesinde çatlak oluşumları

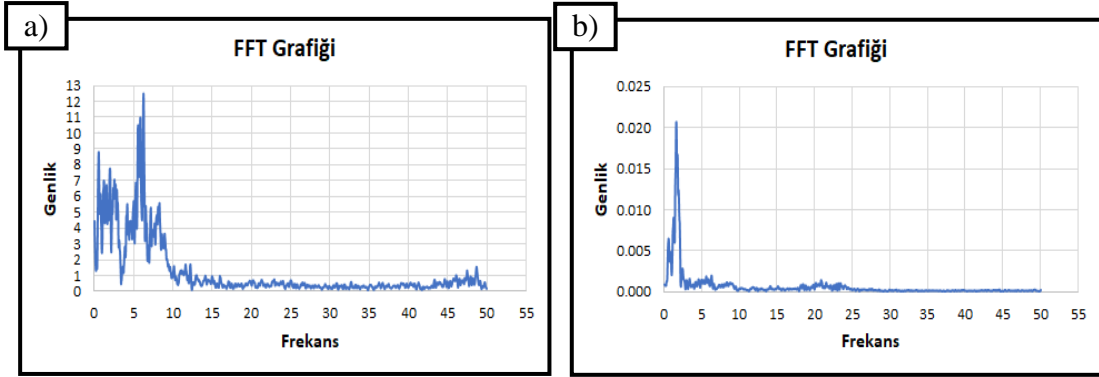
Test No	Numune Durumu
1. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
2. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
3. Test	Deney numunesinin tüm yüzeylerinde temelden 15 cm yukarıda çatlaklar oluşmuştur. Deney numunesinin doğu ve batı yüzeylerinde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlaklar oluşmuştur.
4. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
5. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
6. Test	Deney numunesinin kuzey ve güney yönlerinde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlaklar oluşmuştur. Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
7. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
8. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
9. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
10. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır. Kolon-temel birleşim bölgesinde ayrılma görülmüştür. Testler sonlandırılmıştır.

Test sonuçlarını analiz etmek için kolonun üst noktasına ve tablaya yerleştirilen üç eksenli ADXL345 ivmeölçer verileri kullanılmıştır. Şekil 6.3’te SE-01 deney numunesi için kolonda ve tablada ölçülen filtresiz ivme-zaman grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



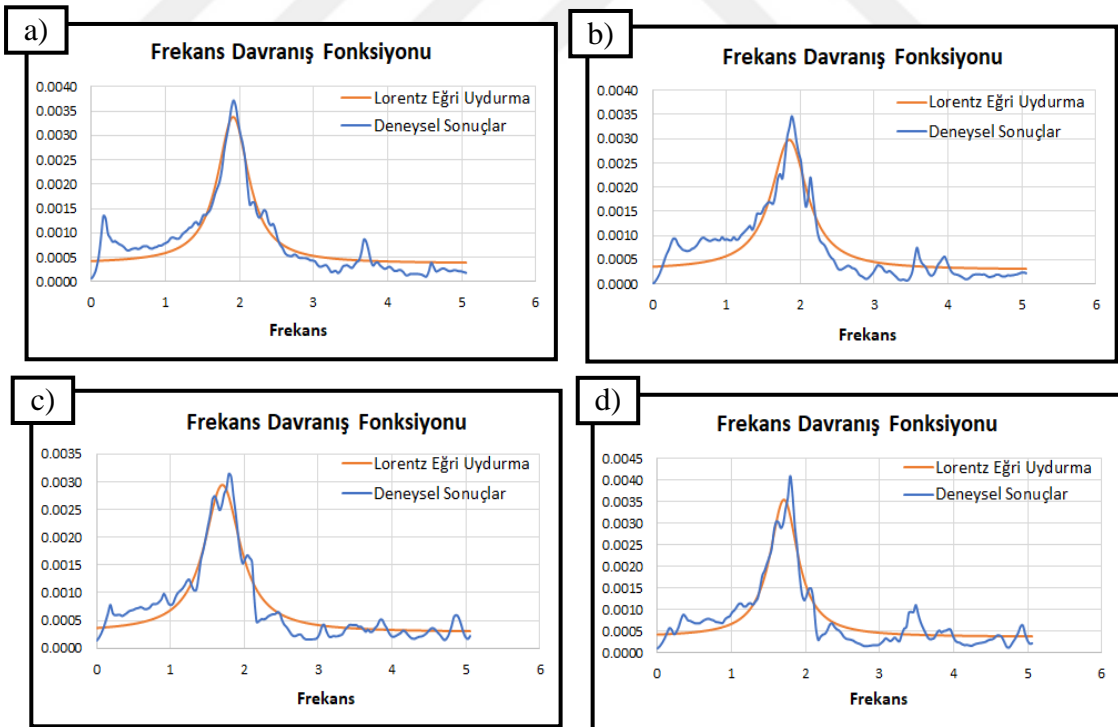
**Şekil 6.3.** SE-01 deney numunesinde a) Tabla filtresiz ivme-zaman grafiği b) Kolon filtresiz ivme-zaman grafiği

Şekil 6.4'te SE-01 deney numunesi için OrijinPro programında elde edilen Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış FFT grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.

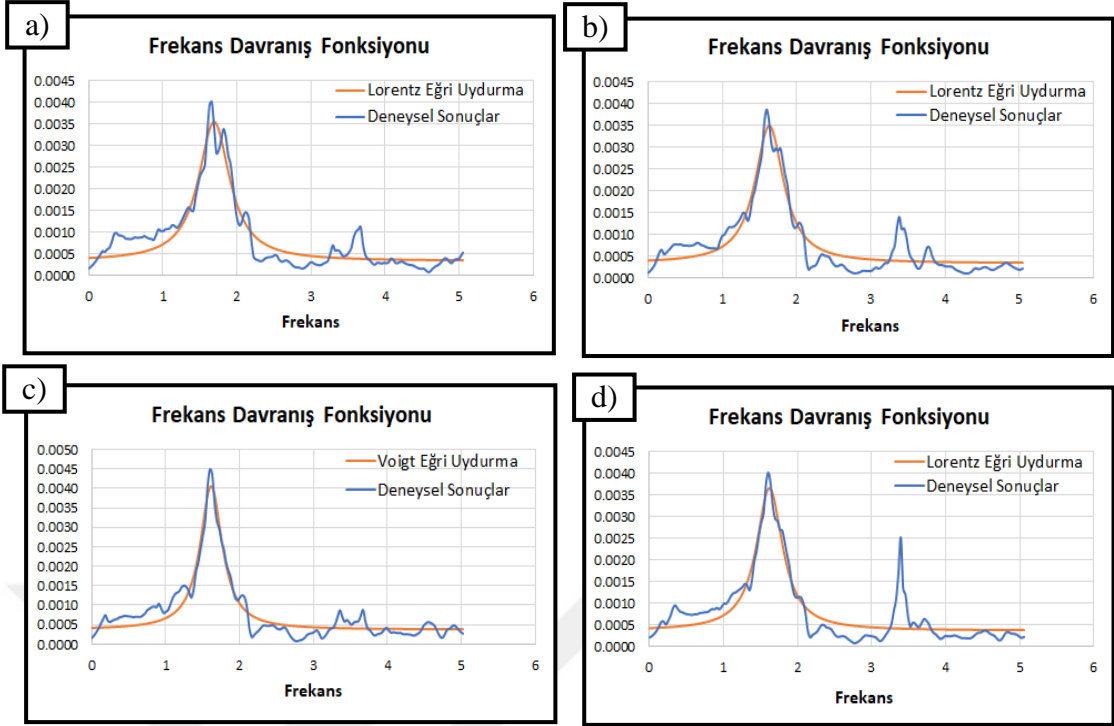


Şekil 6.4. SE-01 deney numunesi için Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış a) Tabla FFT grafiği b) Kolon FFT grafiği

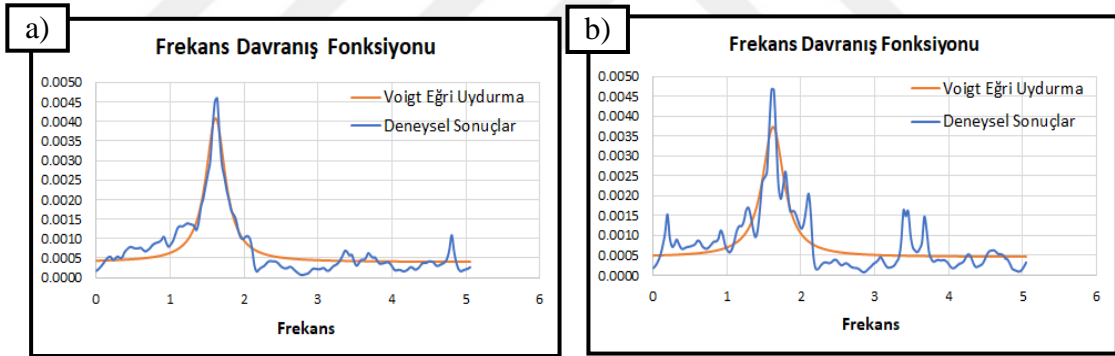
OrijinPro programı ile SE-01 kolonu için elde edilen FRF grafikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.5. a) SE-01 deney numunesi 1. test FRF grafiği b) SE-01 deney numunesi 2. test FRF grafiği c) SE-01 deney numunesi 3. test FRF grafiği d) SE-01 deney numunesi 4. test FRF grafiği



**Şekil 6.6. a)** SE-01 deney numunesi 5. test FRF grafiği **b)** SE-01 deney numunesi 6. test FRF grafiği **c)** SE-01 deney numunesi 7. test FRF grafiği **d)** SE-01 deney numunesi 8. test FRF grafiği



**Şekil 6.7. a)** SE-01 deney numunesi 9. test FRF grafiği **b)** SE-01 deney numunesi 10. test FRF grafiği

SE-01 deney numunesi için FRF grafiği üzerinden tepe genlik yöntemi ile bulunan frekans değerleri ve yarı güç bant genişliği yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranı (%) değerleri Çizelge 6.2’de gösterilmektedir.

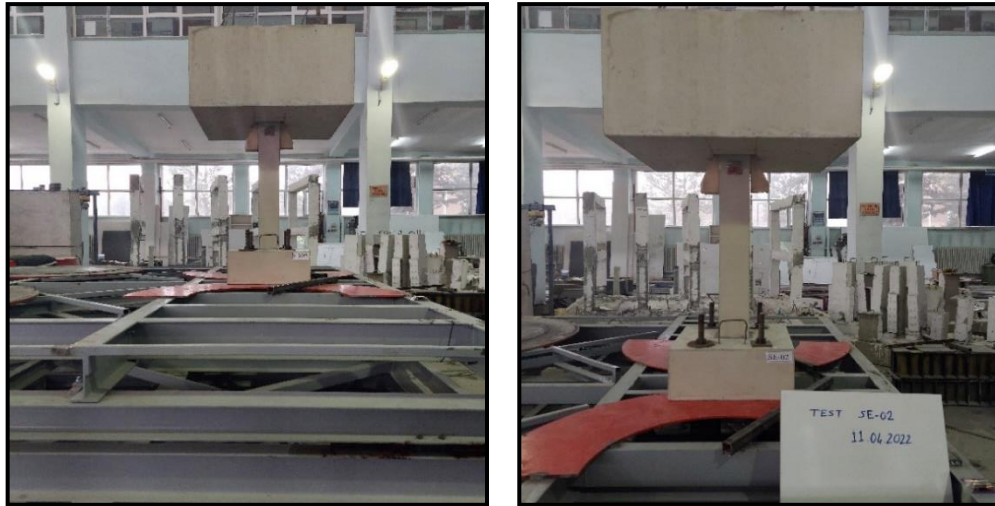


**Çizelge 6.2.** SE-01 kolonu üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans ve sönüm oranı değerleri

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1. Test	1.907	9.458
2. Test	1.851	11.009
3. Test	1.700	12.068
4. Test	1.705	9.387
5. Test	1.695	10.493
6. Test	1.639	9.961
7. Test	1.619	7.812
8. Test	1.619	9.268
9. Test	1.609	6.973
10. Test	1.624	7.723
<b>Ortalama</b>	<b>1.697</b>	<b>9.415</b>

## 6.2. SE-02 Deney Numunesi

SE-02 deney numunesi 10 cm etriye aralığına ve S220 donatı sınıfına sahip kolondur (Şekil 6.8). SE-02 deney numunesi on kez teste tabi tutulmuştur.



**Şekil 6.8.** Deneye başlamadan önce SE-02 deney numunesinin sarsma tablası üzerinde genel görünümü

Önceki deney numunesinde olduğu gibi SE-02 deney numunesinde de ilk iki test boyunca çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. İlk çatlak üçüncü test sırasında kolonun tüm yüzeylerinde kolon-temel birleşim bölgesinde oluşmuştur. Devam eden testler

süresince ekstra bir çatlağın oluşmadığı, üçüncü test sırasında temel-kolon birleşim bölgesinde oluşan çatlakların genişliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Onuncu testte deney numunesinin kolon-temel birleşim bölgesinde doğu-batı yönünde hareket ettiği gözlemlenmiş ve testler sonlandırılmıştır.



Şekil 6.9. SE-02 deney numunesinde test sonucunda oluşan çatlaklar

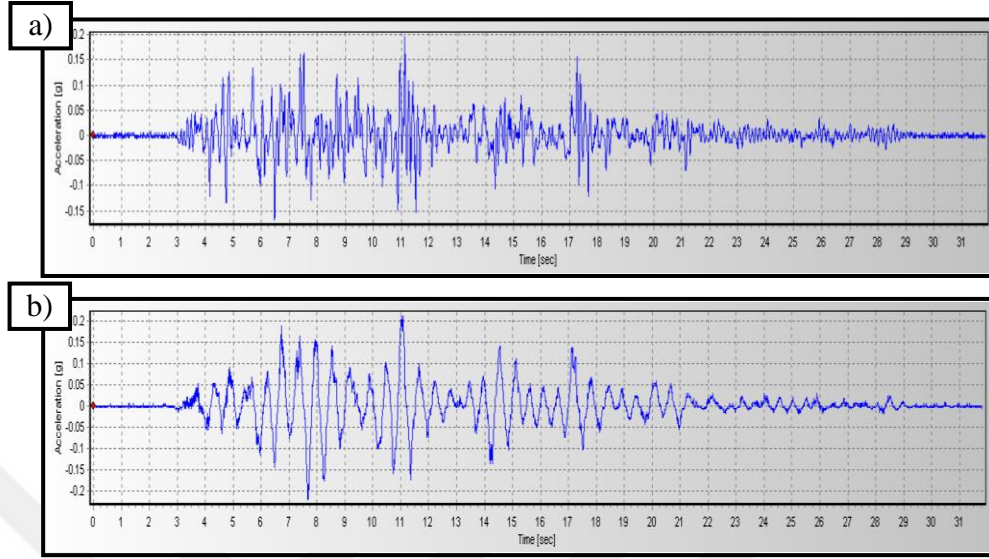
SE-02 deney numunesinin testler sırasındaki davranışı özet olarak Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. SE-02 numunesinde çatlak oluşumları

Test No	Numune Durumu
1. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
2. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
3. Test	Deney numunesinin tüm yüzeylerinde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlaklar oluşmuştur.
4. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
5. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
6. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
7. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
8. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
9. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
10. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır. Deney numunesinin temel-kolon birleşim bölgesinde doğu-batı yönünde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Testler sonlandırılmıştır.

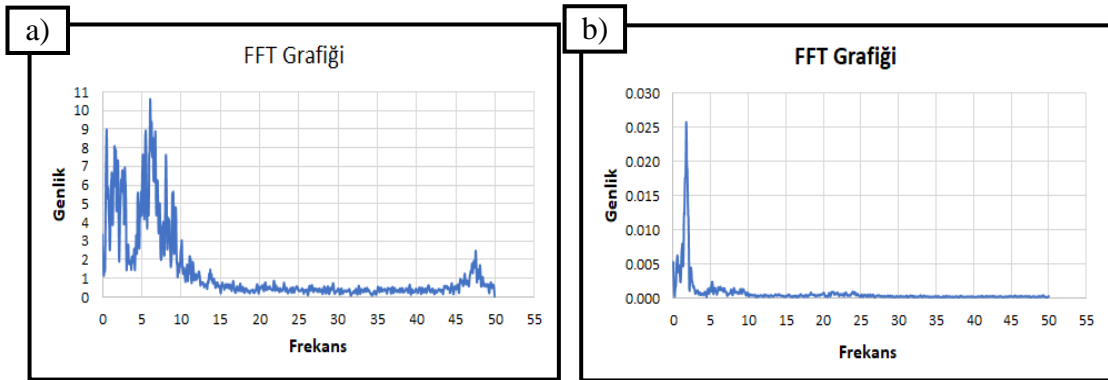
Test sonuçlarını analiz etmek için kolonun üst noktasına ve tablaya yerleştirilen üç eksenli ADXL345 ivmeölçer verileri kullanılmıştır. Şekil 6.10'da SE-02 deney

numunesi için kolonda ve tablada ölçülen filtresiz ivme-zaman grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



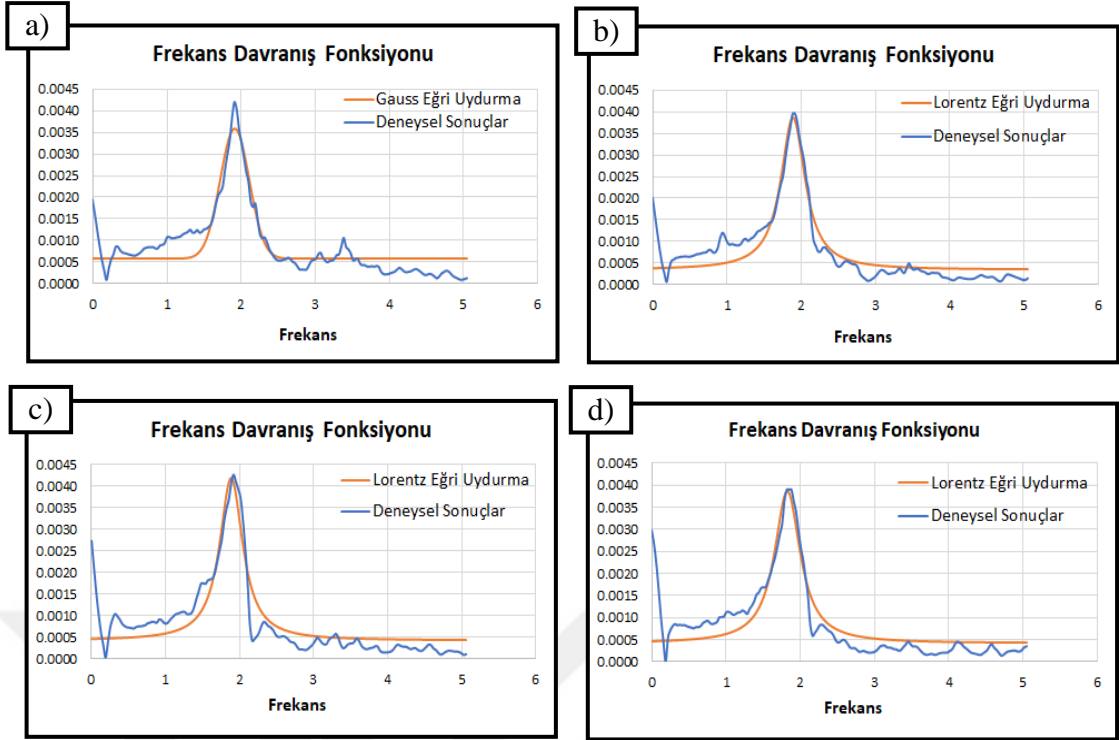
Şekil 6.10. SE-02 deney numunesinde a) Tabla filtresiz ivme-zaman grafiği b) Kolon filtresiz ivme-zaman grafiği

Şekil 6.11’de SE-02 deney numunesi için OrijinPro programında elde edilen Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış FFT grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.

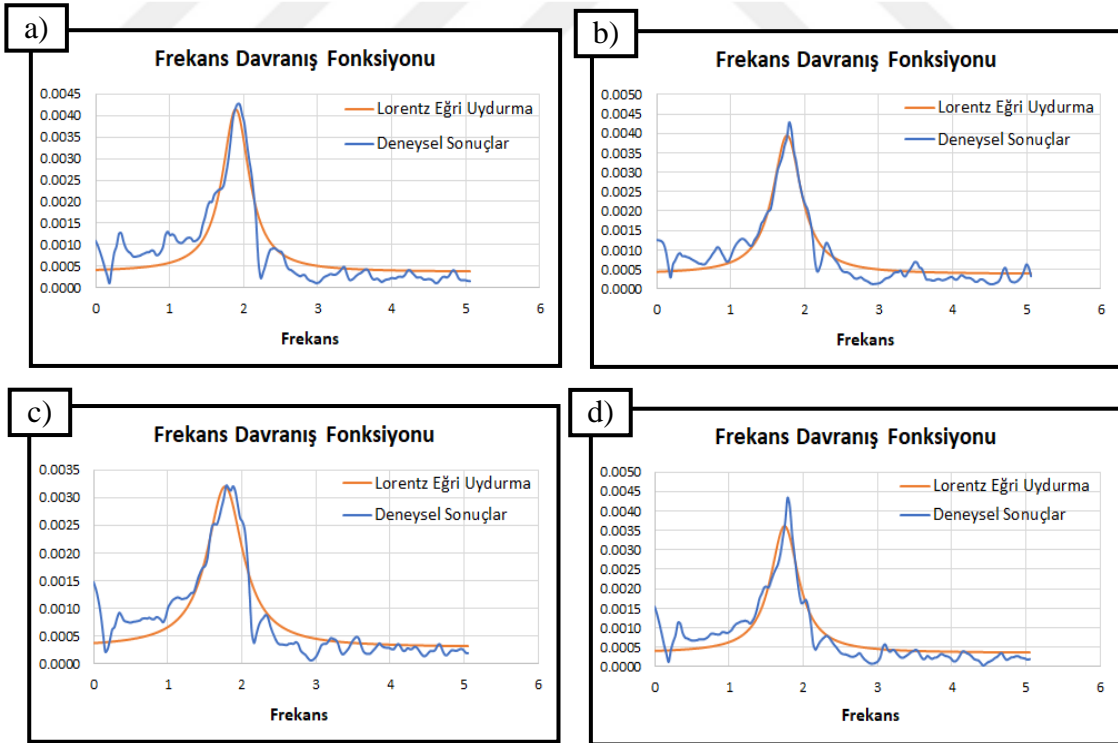


Şekil 6.11. SE-02 deney numunesi için Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış a) Tabla FFT grafiği b) Kolon FFT grafiği

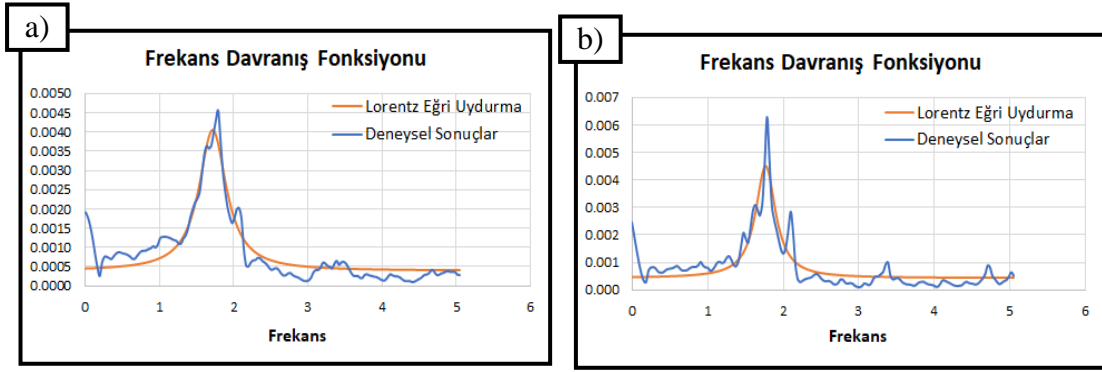
OrijinPro programı ile SE-02 kolonu için elde edilen FRF grafikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.12. a) SE-02 deney numunesi 1. test FRF grafiği b) SE-02 deney numunesi 2. test FRF grafiği c) SE-02 deney numunesi 3. test FRF grafiği d) SE-02 deney numunesi 4. test FRF grafiği



Şekil 6.13. a) SE-02 deney numunesi 5. test FRF grafiği b) SE-02 deney numunesi 6. test FRF grafiği c) SE-02 deney numunesi 7. test FRF grafiği d) SE-02 deney numunesi 8. test FRF grafiği



Şekil 6.14. a) SE-02 deney numunesi 9. test FRF grafiği b) SE-02 deney numunesi 10. test FRF grafiği

SE-02 deney numunesi için FRF grafiği üzerinden tepe genlik yöntemi ile bulunan frekans değerleri ve yarım güç bant genişliği yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranı (%) değerleri Çizelge 6.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.4. SE-02 kolonu üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans ve sönüm oranı değerleri

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1. Test	1.917	9.533
2. Test	1.892	7.282
3. Test	1.883	7.012
4. Test	1.826	8.095
5. Test	1.892	8.056
6. Test	1.760	9.242
7. Test	1.776	11.441
8. Test	1.750	9.101
9. Test	1.715	9.076
10. Test	1.770	6.271
<b>Ortalama</b>	<b>1.818</b>	<b>8.511</b>

### 6.3. SE-03 Deney Numunesi

SE-03 deney numunesi 5 cm etriye aralığına ve S220 donatı sınıfına sahip kolondur (Şekil 6.15). SE-03 deney numunesi on kez teste tabi tutulmuştur.





**Şekil 6.15.** Deneye başlamadan önce SE-03 deney numunesinin sarsma tablası üzerinde genel görünümü

Önceki deney numunelerinde olduğu gibi SE-03 deney numunesinde de ilk iki test boyunca önemli bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. İlk çatlak oluşumu üçüncü test sırasında deney numunesinin doğu yönünde temel-kolon birleşim bölgesinde oluşmuştur. Dördüncü test sırasında deney numunesinin kuzey ve batı yönlerinde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlaklar oluşmuştur. Beşinci test sırasında deney numunesinin güney yönünde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlak oluşmuştur. Devam eden testler sırasında ekstra bir çatlağın oluşmadığı daha önce oluşan çatlakların genişlediği tespit edilmiştir ve onuncu testten sonra deney sonlandırılmıştır.



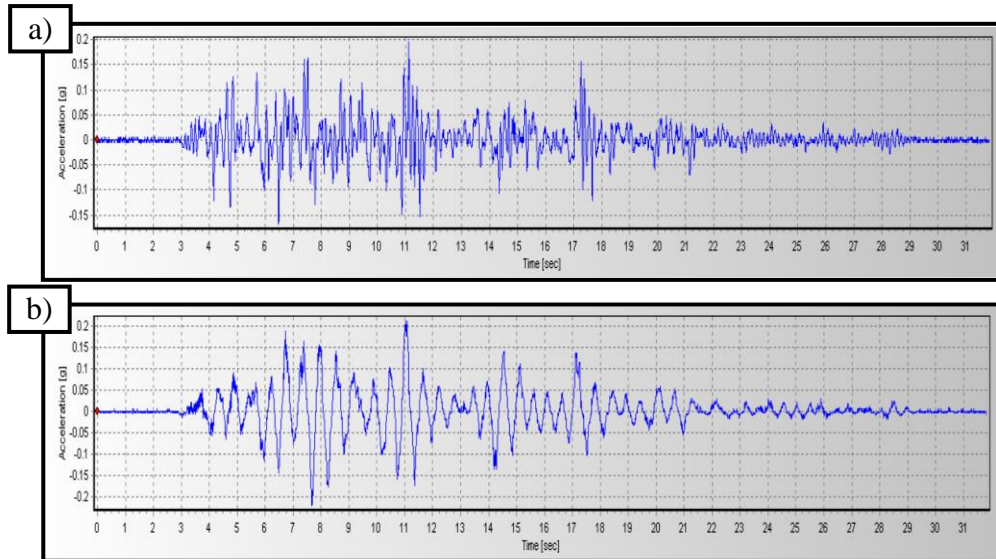
**Şekil 6.16.** SE-03 deney numunesinde test sonucunda oluşan çatlaklar

SE-03 deney numunesinin testler sırasındaki davranışı özet olarak Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. SE-03 numunesinde çatlak oluşumları

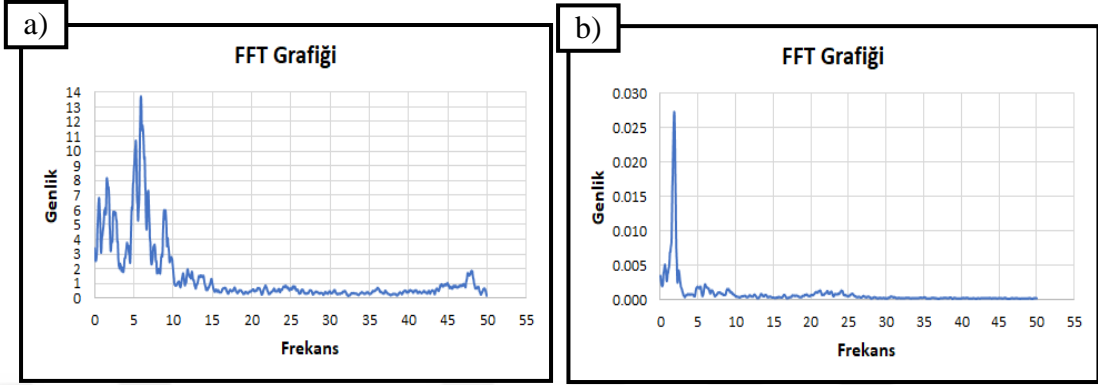
Test No	Numune Durumu
1. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
2. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
3. Test	Deney numunesinin doğu yönünde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlak oluşmuştur.
4. Test	Deney numunesinin kuzey ve batı yönünde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlak oluşmuştur.
5. Test	Deney numunesinin güney yönünde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlak oluşmuştur.
6. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
7. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
8. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
9. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
10. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır. Testler sonlandırılmıştır.

Test sonuçlarını analiz etmek için kolonun üst noktasına ve tablaya yerleştirilen üç eksenli ADXL345 ivmeölçer verileri kullanılmıştır. Şekil 6.17'de SE-03 deney numunesi için kolonda ve tablada ölçülen filtresiz ivme-zaman grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



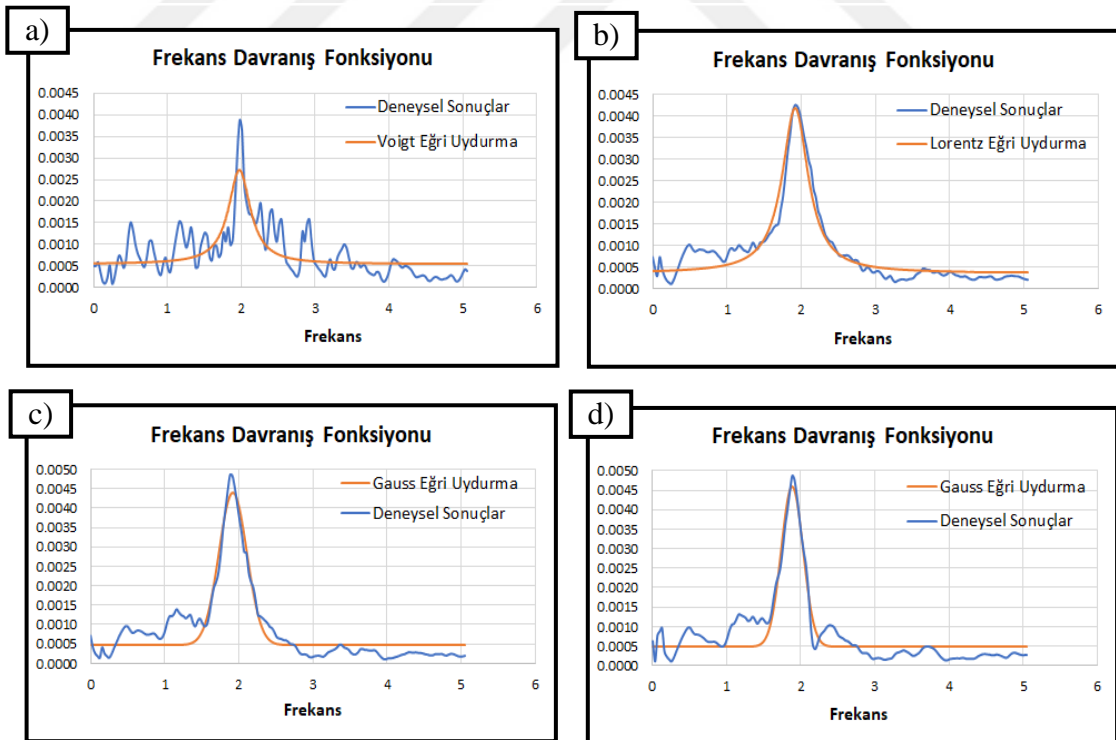
Şekil 6.17. SE-03 deney numunesinde a) Tabla filtresiz ivme-zaman grafiği b) Kolon filtresiz ivme-zaman grafiği

Şekil 6.18’de SE-03 deney numunesi için OrijinPro programında elde edilen Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış FFT grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



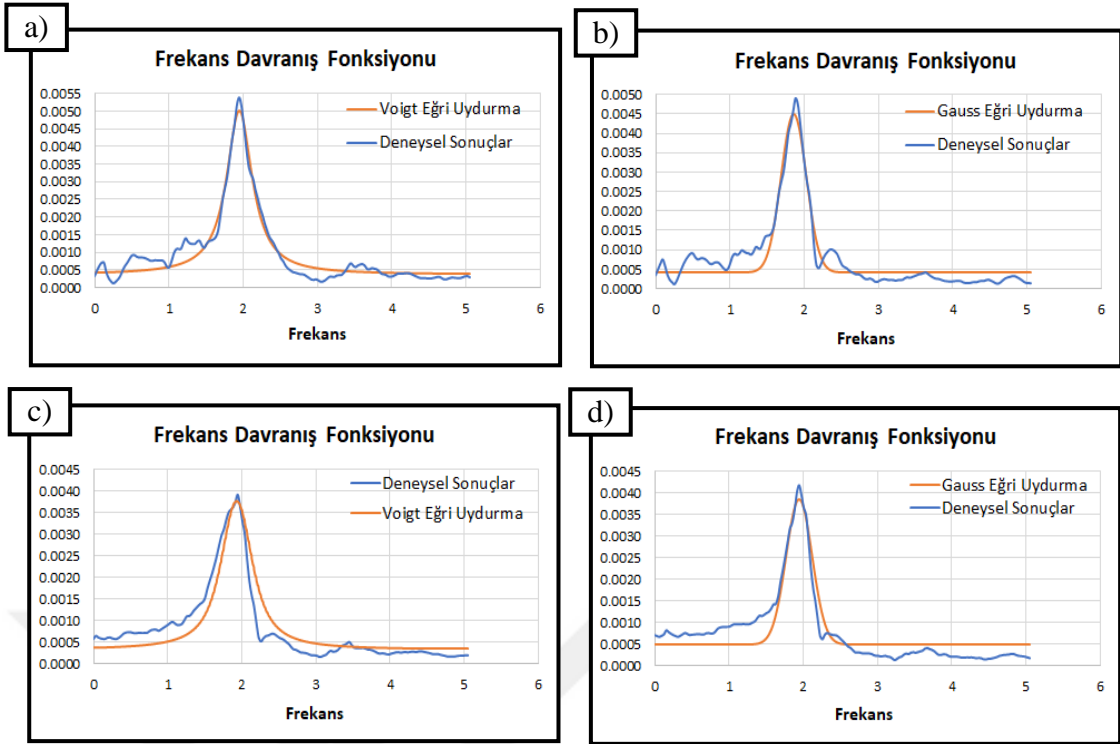
Şekil 6.18. SE-03 deney numunesi için Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış a) Tabla FFT grafiği b) Kolon FFT grafiği

OrijinPro programı ile SE-03 kolonu için elde edilen FRF grafikleri aşağıda sunulmuştur.

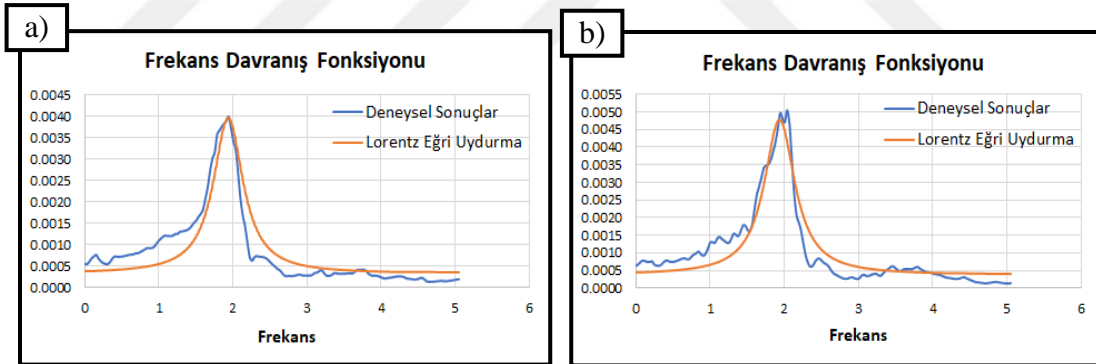


Şekil 6.19. a) SE-03 deney numunesi 1. test FRF grafiği b) SE-03 deney numunesi 2. test FRF grafiği c) SE-03 deney numunesi 3. test FRF grafiği d) SE-03 deney numunesi 4. test FRF grafiği





Şekil 6.20. a) SE-03 deney numunesi 5. test FRF grafiği b) SE-03 deney numunesi 6. test FRF grafiği c) SE-03 deney numunesi 7. test FRF grafiği d) SE-03 deney numunesi 8. test FRF grafiği



Şekil 6.21. a) SE-03 deney numunesi 9. Test FRF grafiği b) SE-03 deney numunesi 10. Test FRF grafiği

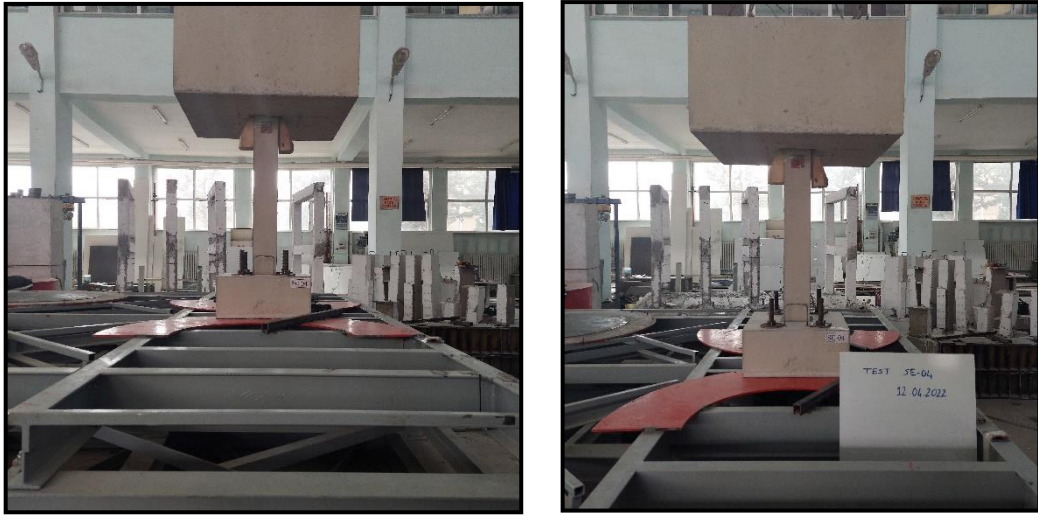
SE-03 deney numunesi için FRF grafiği üzerinden tepe genlik yöntemi ile bulunan frekans değerleri ve yarı güç bant genişliği yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranı (%) değerleri Çizelge 6.6'da gösterilmektedir.

**Çizelge 6.6.** SE-03 kolonu üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans ve sönüm oranı değerleri

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1. Test	1.977	6.872
2. Test	1.917	7.670
3. Test	1.922	8.780
4. Test	1.883	6.996
5. Test	1.947	7.340
6. Test	1.862	8.087
7. Test	1.932	9.136
8. Test	1.946	8.164
9. Test	1.942	8.586
10. Test	1.937	8.865
<b>Ortalama</b>	<b>1.927</b>	<b>8.050</b>

#### 6.4. SE-04 Deney Numunesi

SE-04 deney numunesi 15 cm etriye aralığına ve S420 donatı sınıfına sahip kolondur (Şekil 6.22). SE-04 deney numunesi on kez teste tabi tutulmuştur.



**Şekil 6.22.** Deneye başlamadan önce SE-04 deney numunesinin sarsma tablası üzerinde genel görünümü

SE-04 deney numunesinde ilk dört test boyunca çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. İlk çatlak oluşumu beşinci test sırasında temelden 15 cm yukarıda deney numunesinin tüm yüzeylerinde tespit edilmiştir ayrıca temelden yaklaşık 2 cm

yukarıda deney numunesinin kuzeybatı köşesinden kolon ortasına doğru kılcal çatlak oluşumu görülmüştür. Altıncı testte çatlak genişlikleri artmış ve yedinci test sırasında, beşinci test sırasında kuzeybatı köşesinde oluşan çatlak güneybatı köşesine doğru uzamıştır. Devam eden testler boyunca ekstra bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiş, daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır ve onuncu testten sonra deney sonlandırılmıştır.



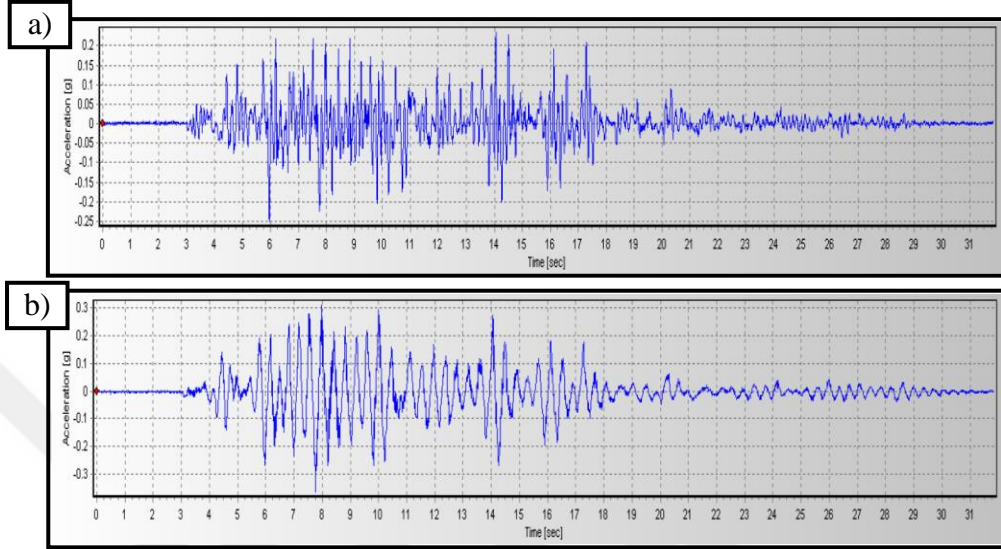
Şekil 6.23. SE-04 deney numunesinde test sonucunda oluşan çatlaklar

SE-04 deney numunesinin testler sırasındaki davranışı özet olarak Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. SE-04 numunesinde çatlak oluşumları

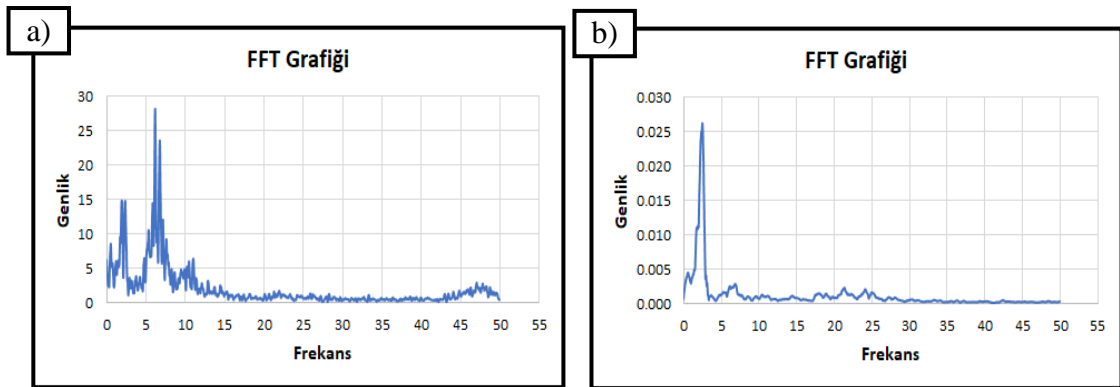
Test No	Numune Durumu
1. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
2. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
3. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
4. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
5. Test	Deney numunesinin tüm yüzeylerinde temelden 15 cm yukarıda çatlak oluşumu tespit edilmiştir ayrıca temelden yaklaşık 2 cm yukarıda deney numunesinin kuzeybatı köşesinden kolon ortasına doğru kılcal çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.
6. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
7. Test	Beşinci test süresince kuzeybatı köşesinde oluşan çatlak güneybatı köşesine doğru uzamıştır.
8. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
9. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
10. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır. Testler sonlandırılmıştır.

Test sonuçlarını analiz etmek için kolonun üst noktasına ve tablaya yerleştirilen üç eksenli ADXL345 ivmeölçer verileri kullanılmıştır. Şekil 6.24'te SE-04 deney numunesi için kolonda ve tablada ölçülen filtresiz ivme-zaman grafiğinin bir örneği verilmiştir.



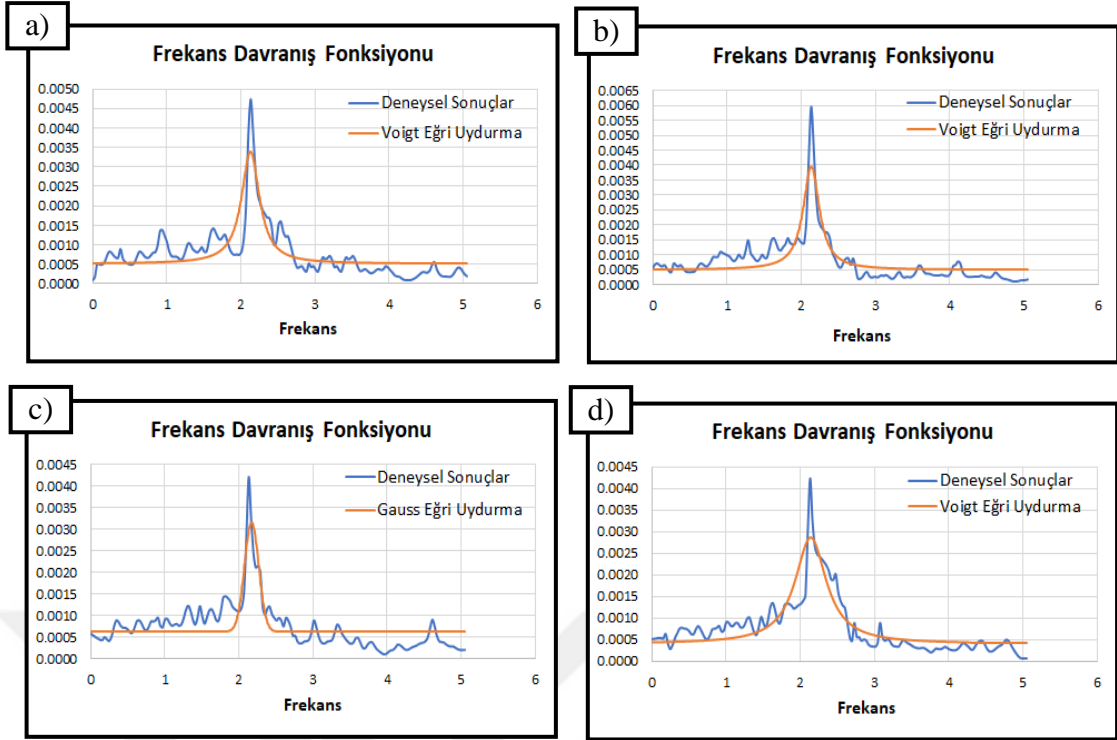
Şekil 6.24. SE-04 deney numunesinde a) Tabla filtresiz ivme-zaman grafiği b) Kolon filtresiz ivme-zaman grafiği

Şekil 6.25'te SE-04 deney numunesi için OrijinPro programında elde edilen Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış FFT grafiğinin bir örneği verilmiştir.

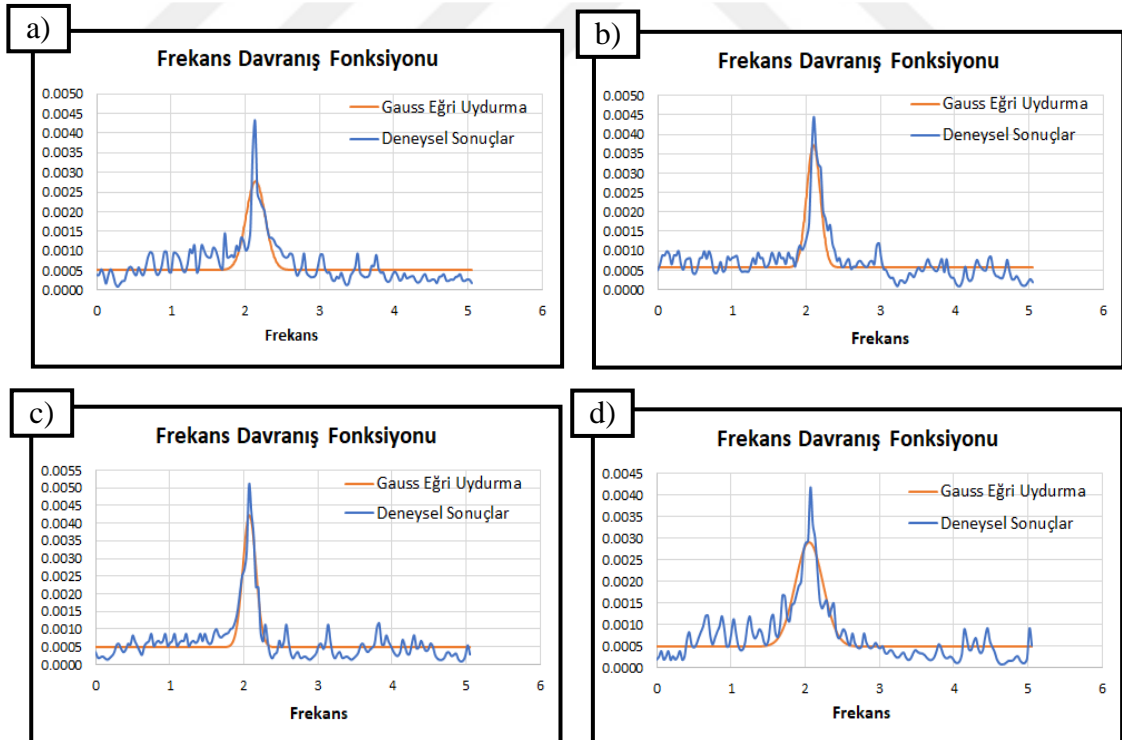


Şekil 6.25. SE-04 deney numunesi için Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış a) Tabla FFT grafiği b) Kolon FFT grafiği

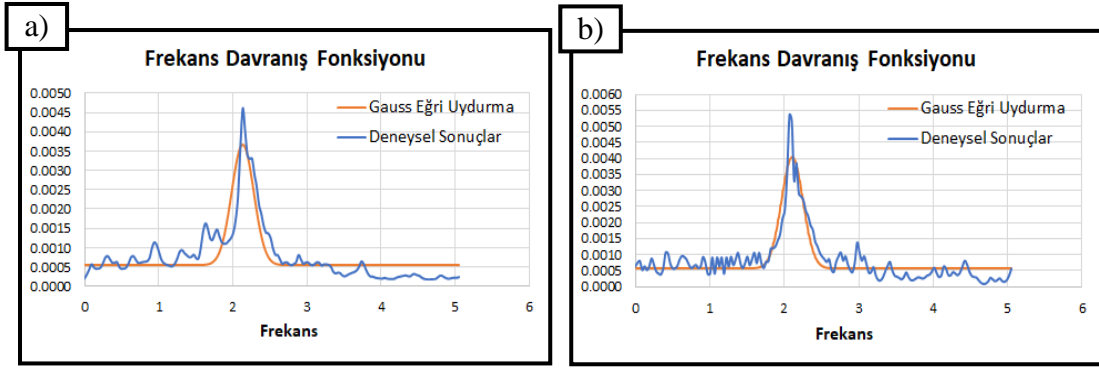
OrijinPro programı ile SE-04 kolonu için elde edilen FRF grafikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.26. a) SE-04 deney numunesi 1. test FRF grafiği b) SE-04 deney numunesi 2. test FRF grafiği c) SE-04 deney numunesi 3. test FRF grafiği d) SE-04 deney numunesi 4. test FRF grafiği



Şekil 6.27. a) SE-04 deney numunesi 5. test FRF grafiği b) SE-04 deney numunesi 6. test FRF grafiği c) SE-04 deney numunesi 7. test FRF grafiği d) SE-04 deney numunesi 8. test FRF grafiği



Şekil 6.28. a) SE-04 deney numunesi 9. Test FRF grafiği b) SE-04 deney numunesi 10. Test FRF grafiği

SE-04 deney numunesi için FRF grafiği üzerinden tepe genlik yöntemi ile bulunan frekans değerleri ve yarım güç bant genişliği yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranı (%) değerleri Çizelge 6.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.8. SE-04 kolonu üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans ve sönüm oranı değerleri

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1. Test	2.134	5.001
2. Test	2.135	4.421
3. Test	2.134	4.412
4. Test	2.145	8.515
5. Test	2.135	5.653
6. Test	2.103	4.021
7. Test	2.074	3.823
8. Test	2.054	8.497
9. Test	2.135	6.427
10. Test	2.104	6.301
<b>Ortalama</b>	<b>2.115</b>	<b>5.707</b>

### 6.5. SE-05 Deney Numunesi

SE-05 deney numunesi 10 cm etriye aralığına ve S420 donatı sınıfına sahip kolondur (Şekil 6.29). SE-05 deney numunesi on kez teste tabi tutulmuştur.





Şekil 6.29. Deneye başlamadan önce SE-05 deney numunesinin sarsma tablası üzerinde genel görünümü

SE-05 deney numunesinde ilk altı test boyunca çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. İlk çatlak oluşumu yedinci test sırasında temel-kolon birleşim bölgesinde deney numunesinin batı yönünde görülmüştür. Sekizinci ve dokuzuncu testler sırasında ekstra bir çatlak oluşumu tespit edilmemiştir. Onuncu test sırasında deney numunesinin doğu tarafında kılcal çatlak oluşumu gözlemlenmiştir ve onuncu testten sonra testler sonlandırılmıştır.



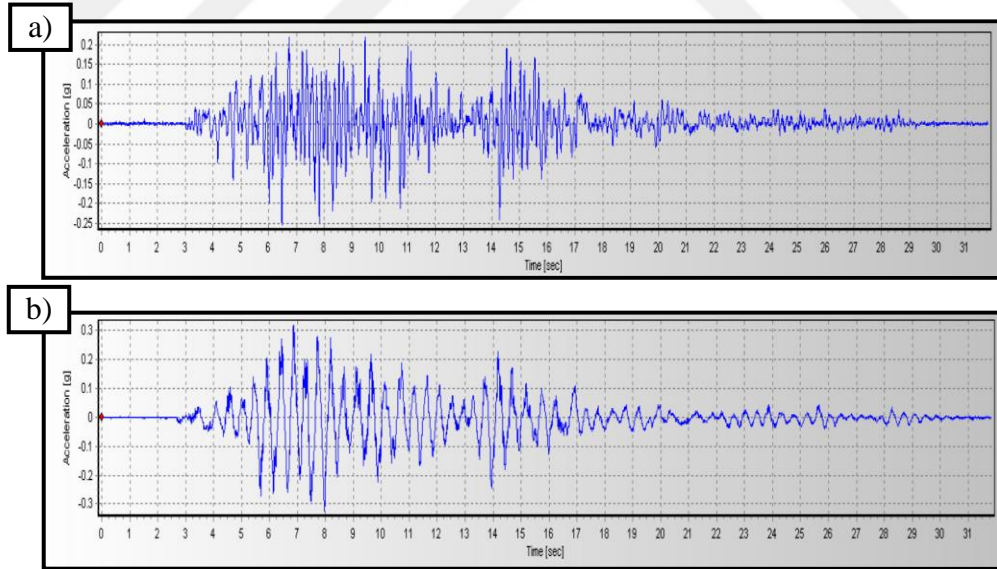
Şekil 6.30. SE-05 deney numunesinde test sonucunda oluşan çatlaklar

SE-05 deney numunesinin testler sırasındaki davranışı özet olarak Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. SE-05 numunesinde çatlak oluşumları

Test No	Numune Durumu
1. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
2. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
3. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
4. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
5. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
6. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
7. Test	Deney numunesinin batı yüzeyinde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlak oluşmuştur.
8. Test	Daha önce oluşan çatlağın genişliği artmıştır.
9. Test	Daha önce oluşan çatlağın genişliği artmıştır.
10. Test	Deney numunesinin batı yüzeyinde temel-kolon birleşim bölgesinde kılcal çatlak oluşmuştur. Testler sonlandırılmıştır.

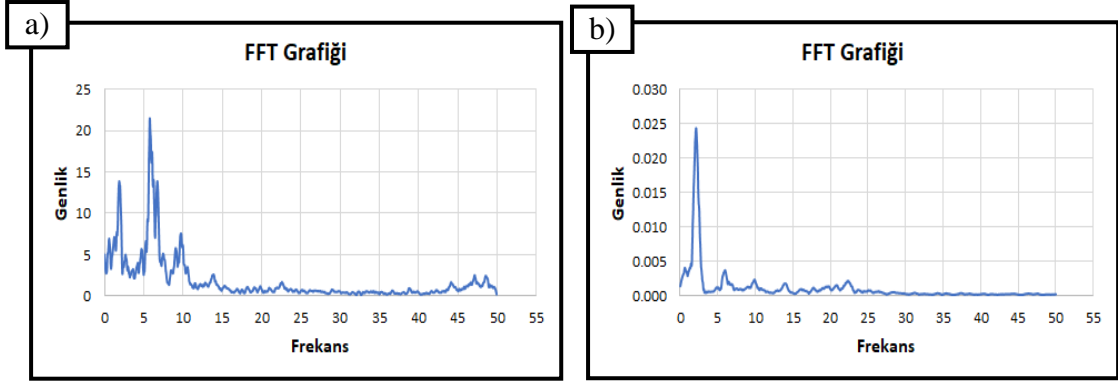
Test sonuçlarını analiz etmek için kolonun üst noktasına ve tablaya yerleştirilen üç eksenli ADXL345 ivmeölçer verileri kullanılmıştır. Şekil 6.31’de SE-05 deney numunesi için kolonda ve tablada ölçülen filtresiz ivme-zaman grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



Şekil 6.31. SE-05 deney numunesinde a) Tabla filtresiz ivme-zaman grafiği b) Kolon filtresiz ivme-zaman grafiği

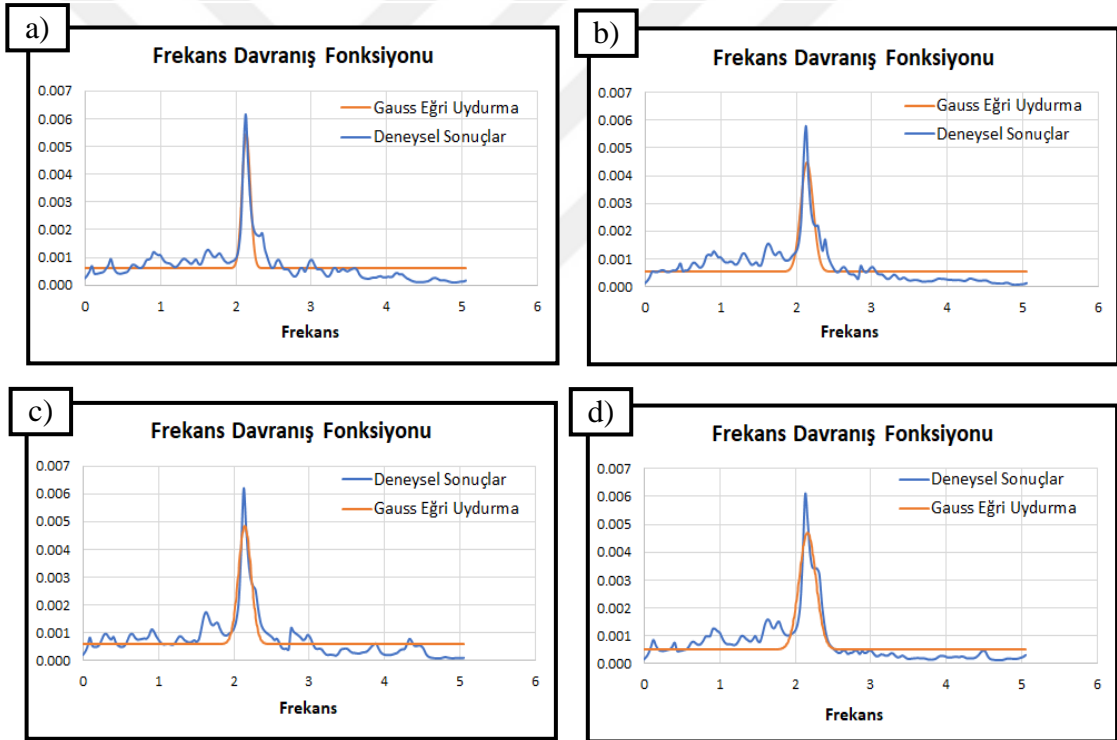
Şekil 6.32’de SE-05 deney numunesi için OrijinPro programında elde edilen Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış FFT grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



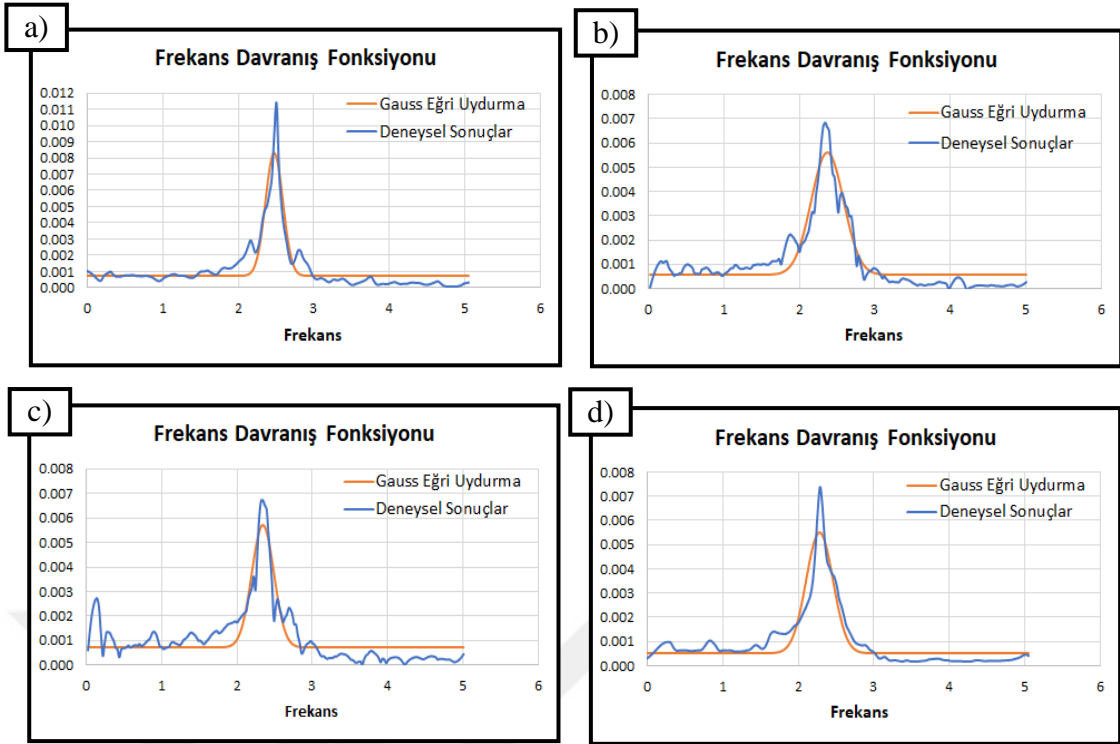


Şekil 6.32. SE-05 deney numunesi için Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış a) Tabla FFT grafiği b) Kolon FFT grafiği

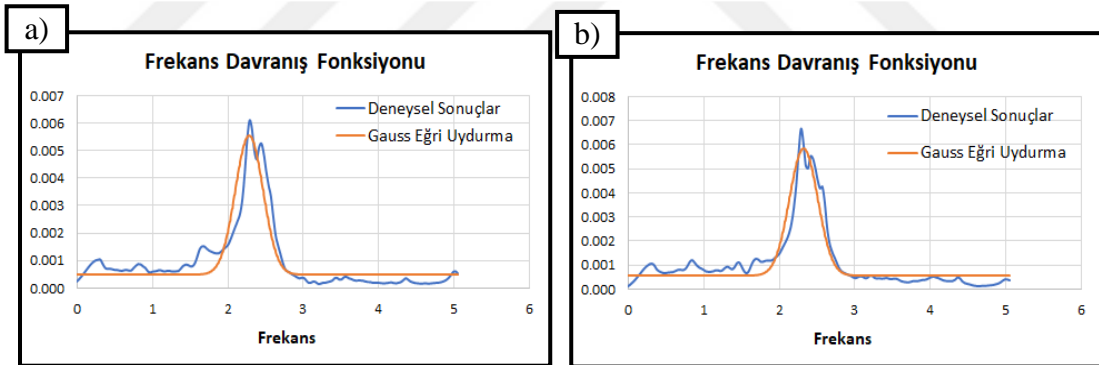
OrijinPro programı ile SE-05 kolonu için elde edilen FRF grafikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.33. a) SE-05 deney numunesi 1. test FRF grafiği b) SE-05 deney numunesi 2. test FRF grafiği c) SE-05 deney numunesi 3. test FRF grafiği d) SE-05 deney numunesi 4. test FRF grafiği



Şekil 6.34. a) SE-05 deney numunesi 5. test FRF grafiği b) SE-05 deney numunesi 6. test FRF grafiği c) SE-05 deney numunesi 7. test FRF grafiği d) SE-05 deney numunesi 8. test FRF grafiği



Şekil 6.35. a) SE-05 deney numunesi 9. Test FRF grafiği b) SE-05 deney numunesi 10. Test FRF grafiği

SE-05 deney numunesi için FRF grafiği üzerinden tepe genlik yöntemi ile bulunan frekans değerleri ve yarı güç bant genişliği yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranı (%) değerleri Çizelge 6.10'da gösterilmektedir.

**Çizelge 6.10.** SE-05 kolonu üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans ve sönüm oranı değerleri

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1. Test	2.140	2.281
2. Test	2.145	5.191
3. Test	2.145	3.592
4. Test	2.166	4.437
5. Test	2.479	4.088
6. Test	2.372	7.993
7. Test	2.342	5.671
8. Test	2.291	6.833
9. Test	2.291	7.045
10. Test	2.323	7.098
<b>Ortalama</b>	<b>2.269</b>	<b>5.423</b>

### 6.6. SE-06 Deney Numunesi

SE-06 deney numunesi 5 cm etriye aralığına ve S420 donatı sınıfına sahip kolondur (Şekil 6.36). SE-06 deney numunesi on kez teste tabi tutulmuştur.



**Şekil 6.36.** Deneye başlamadan önce SE-06 deney numunesinin sarsma tablası üzerinde genel görünümü

SE-06 deney numunesinde ilk yedi test boyunca çatlak oluşumu görülmemiştir. İlk çatlak oluşumu sekizinci test sırasında temel-kolon birleşim bölgesinde deney numunesinin doğu ve batı yönlerinde gözlemlenmiştir. Dokuzuncu test sırasında ekstra bir çatlak oluşumu tespit edilmemiştir. Onuncu test sırasında deney numunesinin kuzeydoğu ve kuzeybatı köşelerinden kolon ortasına doğru kılcal çatlak oluşumu gözlemlenmiştir ve onuncu testten sonra deney sonlandırılmıştır.



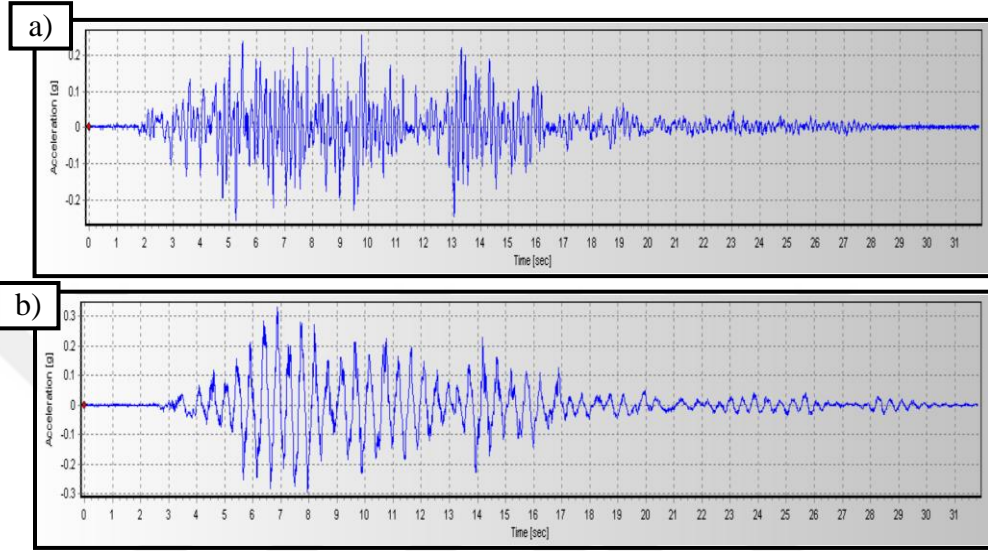
Şekil 6.37. SE-06 deney numunesinde test sonucunda oluşan çatlaklar

SE-06 deney numunesinin testler sırasındaki davranışı özet olarak Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. SE-06 numunesinde çatlak oluşumları

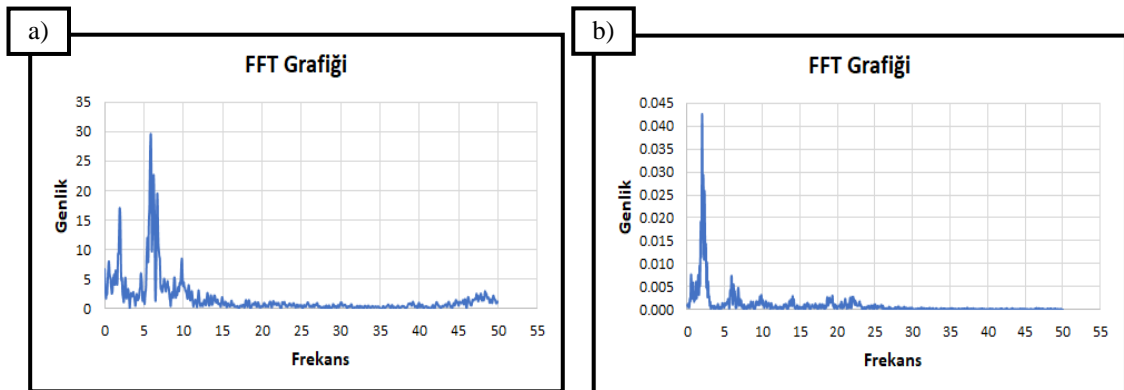
Test No	Numune Durumu
1. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
2. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
3. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
4. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
5. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
6. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
7. Test	Çatlak oluşumu gözlenmedi
8. Test	Deney numunesinin batı ve doğu yüzeylerinde temel-kolon birleşim bölgesinde çatlaklar oluşmuştur.
9. Test	Daha önce oluşan çatlakların genişlikleri artmıştır.
10. Test	Deney numunesinin kuzeydoğu ve kuzeybatı köşelerinden kolon ortasına doğru kılcal çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Testler sonlandırılmıştır.

Test sonuçlarını analiz etmek için kolonun üst noktasına ve tablaya yerleştirilen üç eksenli ADXL345 ivmeölçer tepki verileri kullanılmıştır. Şekil 6.38’te SE-06 deney numunesi için kolonda ve tablada ölçülen filtresiz ivme-zaman grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.



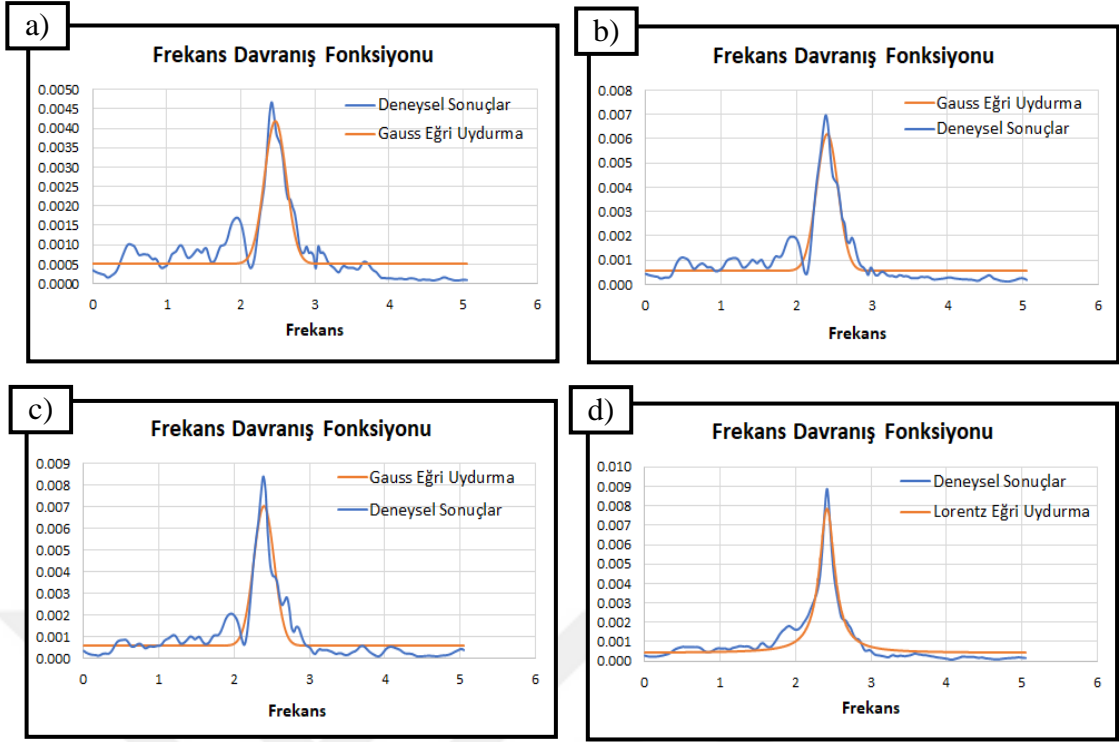
Şekil 6.38. SE-06 deney numunesinde a) Tabla filtresiz ivme-zaman grafiği b) Kolon filtresiz ivme-zaman grafiği

Şekil 6.39’da SE-06 deney numunesi için OrijinPro programında elde edilen Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış FFT grafiğinin bir örneği (8. testten elde edilen datalar) verilmiştir.

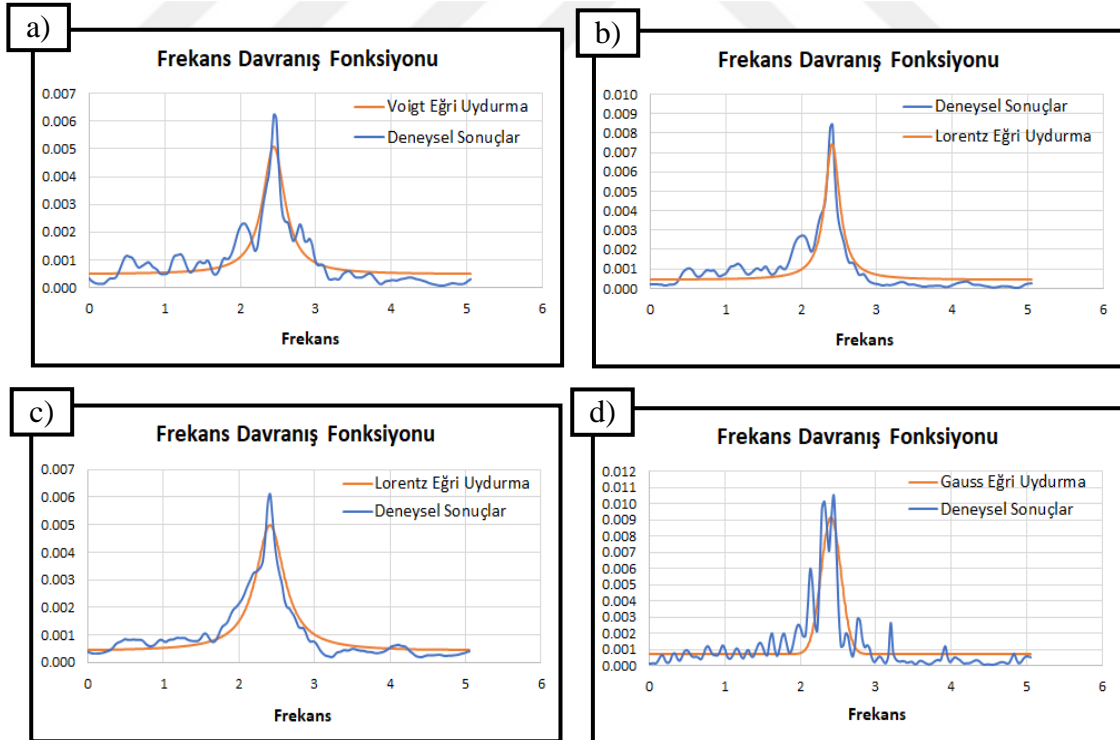


Şekil 6.39. SE-06 deney numunesi için Savitzky-Golay yumuşatma yöntemi ile yumuşatılmış a) Tabla FFT grafiği b) Kolon FFT grafiği

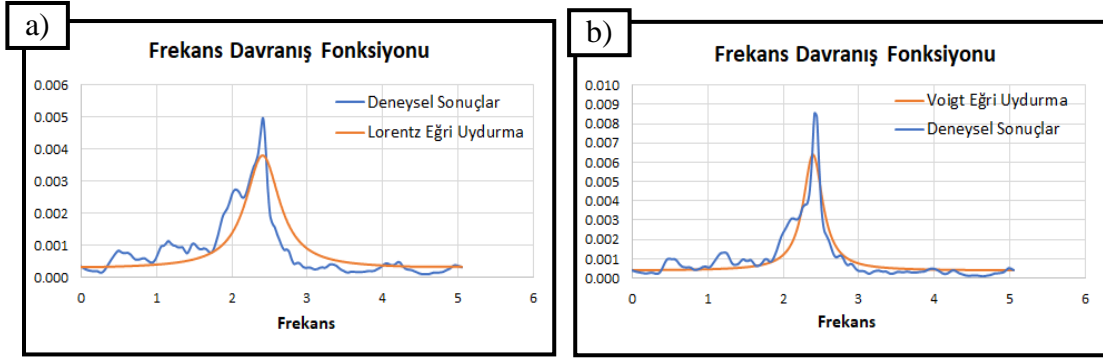
OrijinPro programı ile SE-06 kolonu için elde edilen FRF grafikleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.40. a) SE-06 deney numunesi 1. test FRF grafiği b) SE-06 deney numunesi 2. test FRF grafiği c) SE-06 deney numunesi 3. test FRF grafiği d) SE-06 deney numunesi 4. test FRF grafiği



Şekil 6.41. a) SE-06 deney numunesi 5. test FRF grafiği b) SE-06 deney numunesi 6. test FRF grafiği c) SE-06 deney numunesi 7. test FRF grafiği d) SE-06 deney numunesi 8. test FRF grafiği



Şekil 6.42. a) SE-06 deney numunesi 9. Test FRF grafiği b) SE-06 deney numunesi 10. Test FRF grafiği

SE-06 deney numunesi için FRF grafiği üzerinden tepe genlik yöntemi ile bulunan frekans değerleri ve yarım güç bant genişliği yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranı (%) değerleri Çizelge 6.12’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.12. SE-06 kolonu üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans ve sönüm oranı değerleri

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1. Test	2.469	5.417
2. Test	2.408	5.206
3. Test	2.393	4.997
4. Test	2.417	3.419
5. Test	2.448	4.964
6. Test	2.417	3.301
7. Test	2.417	6.508
8. Test	2.413	4.722
9. Test	2.413	7.722
10. Test	2.398	4.418
<b>Ortalama</b>	<b>2.419</b>	<b>5.067</b>



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada deneysel modal analiz yöntemi ile farklı etriye aralıklarına ve donatı sınıfına sahip betonarme kolonların dinamik parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla etriye aralıkları ve donatı sınıfı farklı altı adet betonarme kolon Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı ve Deprem Laboratuvarında üretilmiş ve laboratuvarında bulunan sarsma tablası üzerinde testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında frekans davranış fonksiyonunu belirleyebilmek için gerekli olan etki ve tepki verilerinin elde etmek amacıyla kolon ve sarsma tablasına ADXL345 ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçerden alınan veriler üzerinde gerekli kalibrasyon işlemleri yapıldıktan sonra OrijinPro ve SeismoSignal programları kullanılarak FFT dönüşümü yapılmıştır. FFT dönüşümü sırasında örtüşme ve sızma hataları engellemek için alçak geçiren filtre (LPF) ve Blackman penceresi uygulanmıştır. Ayrıca FFT verileri üzerinde Savitsky-Golay yöntemi ile yumuşatma yapılmıştır. Yumuşatılmış FFT dönüşümü yapılmış tepki ve etki verileri oranlanarak FRF grafiği elde edilmiştir. FRF grafiği üzerinde eğri uydurma teknikleri kullanılarak elde edilmiş grafiklerden tepe genlik yöntemi ile betonarme kolonlara ait frekans değerleri, yarım güç bant genişliği yöntemi ile sönüm oranı değerleri tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasının ana bulguları aşağıda sunulmuştur:

- ✓ Deneysel ölçümlerden kaynaklanan gürültüler yüksekse uygun sonuçlar elde edilememektedir. Bu gürültüleri azaltmak için frekans spektrumunda mümkün olduğunca çok ortalama alınmalıdır. Zaman alanında kullanılan tek ölçüm hatalara neden olabilmektedir.

- ✓ Ölçüm yapılan ortamda mevcut gürültüler ölçüm sonuçlarına olumsuz etkide bulunmaktadır. Bu deneysel çalışma için, OrijinPro programı ile sinyaller analiz edilirken meydana gelebilecek sızma hatalarının filtrelenmesinde en etkili pencereleme tekniğinin Blackman Pencereleme Tekniği olduğu gözlemlenmiştir.

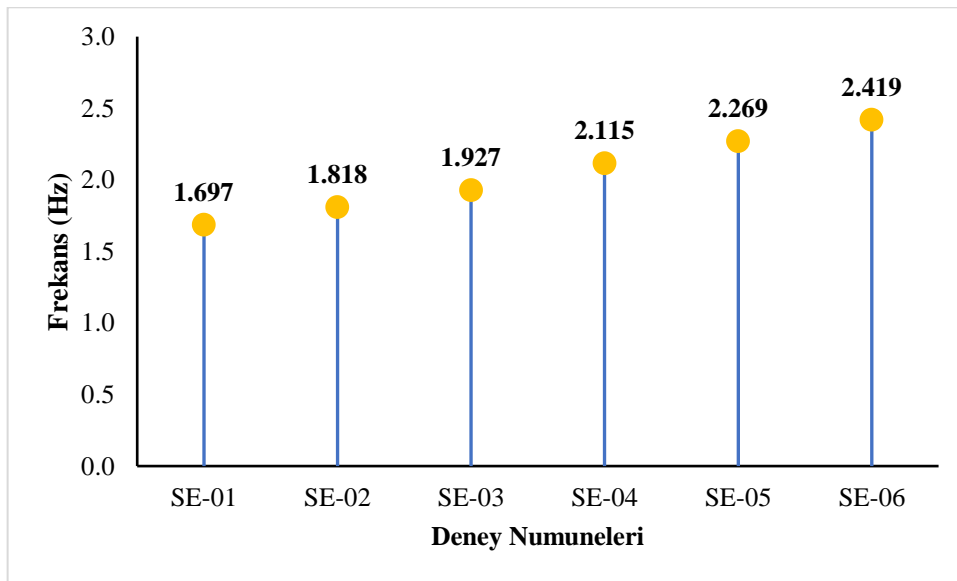
- ✓ FRF eğriliği yaklaşımının yapının doğal titreşim frekansını ve sönüm oranını tespit etmede etkili bir yöntem olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, FRF eğrilik yönteminin doğruluğu, frekans aralığının seçiminden güçlü bir şekilde etkilenmiştir.



✓ Hasar oluşumu açısından, testler süresince numunelerde devrilme ya da çökme oluşmamış, meydana gelen çatlakların genel olarak kılcal çatlak olduğu tespit edilmiştir.

✓ Altı deney numunesi için en fazla çatlak oluşumu temel-kolon birleşim bölgesinde gözlemlenmiştir. Deney numuneleri y yönünde sarsıldığı için özellikle temel-kolon birleşim bölgesinde kolonların alt doğu ve batı yönlerinde çatlaklar yoğunlaşmıştır. Maksimum yer değiştirmeler kolon üst bölgesinde gözlemlenmiştir. Tüm kolonların üst üçte iki kısmında hasar oluşumu görülmemiştir. Beton blok ve temeller de test sırasında hasar oluşumu açısından incelenmiş, hasar oluşmadığı tespit edilmiştir. Hasar oluşumları incelendiğinde en iyi performansı SE-06 deney numunesi sergilerken en fazla hasarın SE-01 deney numunesinde olduğu görülmüştür. SE-01 deney numunesinde oluşan çatlakların genişliklerinin diğer numunelere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. S220 donatıya sahip SE-01, SE-02, SE-03 deney numunelerinde başlardaki testlerde (en erken üçüncü testte) hasar oluşumu gözlemlenirken S420 donatıya sahip SE-04, SE-05, SE-06 deney numunelerinde daha sonlardaki testlerde (en erken beşinci testte) hasar oluşumu görülmüştür ve bu numunelerde oluşan çatlak genişliklerinin daha az olduğu tespit edilmiştir.

✓ Testler sonucunda bulunan deney numunelerinin frekans değerleri Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Deney numuneleri üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan frekans değerleri

✓ Deneysel numunelerin modal analizinden sonra doğal titreşim frekansı değerleri S220 donatıya sahip deney numunelerinde ortalama 1.697, 1.818 ve 1.927 bulunurken; S420 donatıya sahip deney numunelerinde ortalama 2.115, 2.269 ve 2.419 bulunmuştur. SE-01 deney numunesinden (etriye aralığı fazla, donatı sınıfı düşük) SE-06 deney numunesine (etriye aralığı az, donatı sınıfı yüksek) gidildikçe kolonların doğal titreşim frekanslarının arttığı (periyotlarının azaldığı) görülmektedir. Frekans değerlerindeki artış yüzdeleri Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 7.1.** Frekans değerlerindeki artış yüzdeleri

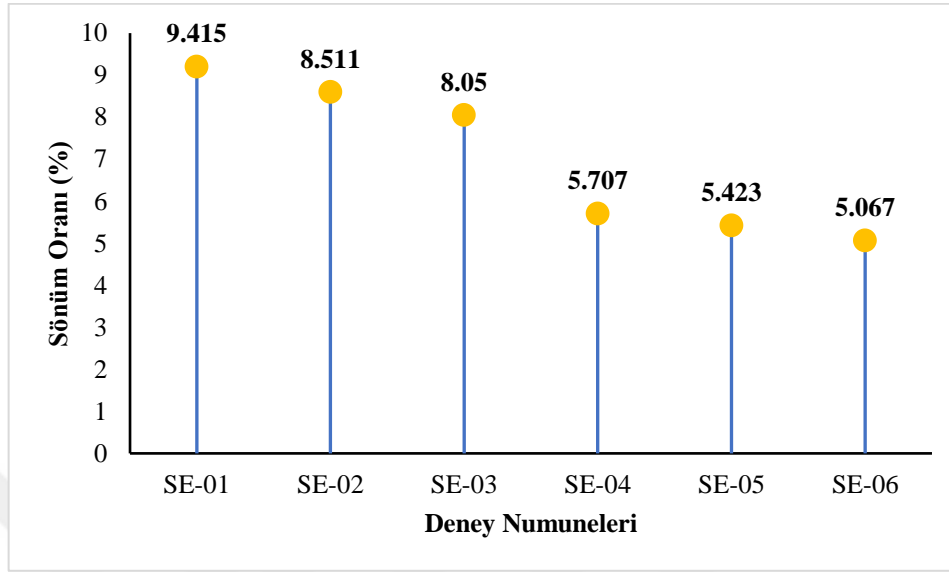
		% Artış
<b>Etriye Aralıkları Yönünden Frekans Değerlerinde Karşılaştırma</b>	SE-01 / SE-02	7.13
	SE-02 / SE-03	6.00
	SE-04 / SE-05	7.28
	SE-05 / SE-06	6.61
<b>Donatı Sınıfı Yönünden Frekans Değerlerinde Karşılaştırma</b>	SE-01 / SE-04	24.63
	SE-02 / SE-05	24.81
	SE-03 / SE-06	25.53

✓ Deney numuneleri etriye aralıkları yönünden karşılaştırıldığında S220 donatıya sahip kolonlarda etriye aralığının 15 cm’den 10 cm’ye azaltılması sonucunda frekans değerinin %7.13 oranında arttığı, 10 cm’den 5 cm’ye azaltılması neticesinde ise frekans değerinin %6 oranında arttığı görülmüştür. S420 donatıya sahip kolonlarda etriye aralığının 15 cm’den 10 cm’ye azaltılması sonucunda frekans değerinin %7.28 oranında arttığı, 10 cm’den 5 cm’ye azaltılması neticesinde ise frekans değerinin %6.61 oranında arttığı saptanmıştır.

✓ Deney numuneleri donatı sınıfı yönünden karşılaştırıldığında etriye aralığı 15 cm olan deney numunelerinde donatı sınıfının yükseltilmesi ile frekans değerinin %24.63, etriye aralığı 10 cm olan deney numunelerinde donatı sınıfının yükseltilmesi ile frekans değerinin %24.81, etriye aralığı 5 cm olan deney numunelerinde donatı sınıfının yükseltilmesi ile frekans değerinin %25.53 oranında arttığı saptanmıştır.

✓ Testler sonucunda bulunan deney numunelerinin sönüm oranı değerleri Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Deneysel numunelerin modal analizinden sonra sönüm oranı (%) değerleri S220 donatıya sahip deney numunelerinde ortalama 9.415, 8.511 ve 8.05

bulunurken; S420 donatıya sahip deney numunelerinde ortalama 5.707, 5.423 ve 5.067 bulunmuştur.



Şekil 7.2. Deney numuneleri üzerinde yapılan testler sonucunda bulunan sönüm oranı (%) değerleri

✓ SE-01'den (etriye aralığı fazla, donatı sınıfı düşük) SE-06'ya (etriye aralığı az, donatı sınıfı yüksek) gidildikçe kolonların sönüm oranı (%) değerlerinin azaldığı görülmektedir. Matematiksel modelde spektrum eğrisi için kullanılan sönüm oranı değeri %5'dir. SE-06 deney numunesinde birinci modda sönüm oranı ise %5.067 olarak tespit edilmiştir. Sönüm oranı tasarım kriteri deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sönüm oranlarını değerlerindeki azalış yüzdeleri Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. Sönüm oranı (%) değerlerindeki azalış yüzdeleri

		% Azalış
<b>Etriye Aralıkları Yönünden Sönüm Oranı Değerlerinin Karşılaştırılması</b>	SE-01 / SE-02	9.60
	SE-02 / SE-03	5.42
	SE-04 / SE-05	4.98
	SE-05 / SE-06	6.56
<b>Donatı Sınıfı Yönünden Sönüm Oranı Değerlerinin Karşılaştırılması</b>	SE-01 / SE-04	39.38
	SE-02 / SE-05	36.28
	SE-03 / SE-06	37.06

✓ Deney numuneleri etriye aralıkları yönünden karşılaştırıldığında S220 donatıya sahip kolonlarda etriye aralığının 15 cm'den 10 cm'ye azaltılması sonucunda sönüm

oranı (%) değerinin %9.6 oranında azaldığı, 10 cm'den 5 cm'ye azaltılması neticesinde ise sönüm oranı (%) değerinin %5.42 oranında azaldığı görülmüştür. S420 donatıya sahip kolonlarda etriye aralığının 15 cm'den 10 cm'ye azaltılması sonucunda sönüm oranı (%) değerinin %4.98 oranında azaldığı, 10 cm'den 5 cm'ye azaltılması neticesinde ise sönüm oranı (%) değerinin %6.56 oranında azaldığı saptanmıştır.

✓ Deney numuneleri donatı sınıfı yönünden karşılaştırıldığında etriye aralığı 15 cm olan deney numunelerinde donatı sınıfının yükseltilmesi ile sönüm oranı (%) değerinin %39.38, etriye aralığı 10 cm olan deney numunelerinde donatı sınıfının yükseltilmesi ile sönüm oranı (%) değerinin %36.28, etriye aralığı 5 cm olan deney numunelerinde donatı sınıfının yükseltilmesi ile sönüm oranı (%) değerinin %37.06 oranında azaldığı saptanmıştır.

✓ Yapısal hasar tespitinde doğal titreşim frekansı ve sönüm oranı değişimi yaygın kullanılan hasar stratejilerindedir. Yapıda hasar oluştuğunda rijitlik azalır ve bu da sistemin doğal titreşim frekansının azalmasına ve sönüm oranının artmasına neden olur. Kolonlarda gelişen kılcal çatlakların sonucu olarak yapısal rijitliğin SE-06 deney numunesinden SE-01 deney numunesine doğru azaldığı ve bunun frekans ve sönüm oranı değerlerine yansıdığı görülerek yapılan deneysel çalışmanın tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

✓ Elde edilen veriler neticesinde yapının doğal titreşim frekansını ve sönüm oranını donatı sınıfı değişiminin etriye aralığı değişimine göre daha fazla etkilediği saptanmıştır.

✓ Elde edilen bu sonuçların, yapıların dinamik davranışı sırasında oluşan sönüm etkilerinin modellenmesi ve doğal titreşim frekansının EMA yöntemi ile belirlenmesi çalışmalarına ışık tutacağı düşünülmektedir.

✓ Deney sonucunda yapılan değerlendirmeler etriye aralığı ve donatı sınıfı farklı altı adet numune içindir. Daha genel bilgiye sahip olmak, kolonların tasarım detaylarını iyileştirmek ve doğrulamak için kapsamlı daha fazla deneysel çalışma yapılmalıdır.

## 7.2. Öneriler

Tasarım ve inşaat yapımı aşamasında alınacak bazı önlemlerle yapının dinamik davranışına etki eden parametrelerin değişimi ile yapıdaki tepkilerin mühendislik açısından daha etkili olarak tespit edilebileceği düşünülmektedir. Bunlar:

- ❖ Yeterli kalınlıkta pas payının bırakılması
- ❖ Beton dökümünde vibratörün dikkatli kullanımı ve döküm sırasında donatı yerleşimini bozabilecek davranışlardan kaçınılarak projelendirmedeki donatı detaylarına uygun beton yerleşimin sağlanması
- ❖ Numunelerin testi sırasında ortam titreşimlerinin dikkate alınarak minimum düzeyde ortam gürültüsü altında deneylerin gerçekleştirilmesi
- ❖ Geleneksel deneysel modal analiz deneylerinde gerekli veri toplama ünitelerinin temin edilerek operatör hata payının en aza indirilmesi
- ❖ Deneysel analizlerden elde edilen verilerin bilgisayar ortamında işleme süresi uzun ve karmaşık olduğu için verilerin işlenmesini hızlandıracak ve kolaylaştıracak ARTeMIS Modal Basic vb. yazılımların tedarik edilerek dijital sinyal işleme hatalarının oluşmasının engellenmesi
- ❖ FRF eğrilik yönteminin doğruluğu frekans aralığının seçiminden güçlü şekilde etkilendiği için en uygun frekans aralığının belirlenmesi
- ❖ Deney ölçüm aletlerinin istenilen veriyi elde edebilecek hassasiyette ve düzenekte seçilmesi

olarak sıralanabilir.

Bu tez çalışmasında ölçekli altı adet kolon numunesi EMA ile test edilmiştir. Bununla birlikte EMA yöntemiyle özellikle sarsma tablasında ülkemizde daha önce yapılmış çok az araştırma olduğundan ek testler önerilir. Gelecekteki araştırmalar için önerilerden bazıları şunlardır:

- ❖ Bu çalışmada 1996 Kobe depremi 1107. İstasyonu (Kakogawa İstasyonu)'dan 90<sup>0</sup> yönü için okunan gerçek ivme verisi 0.5 ölçek faktörü ile çarpılarak küçültülmüş ivme veri kaydı yüklenme prosedürü deney numunelerine y yönünde uygulanmış, deney numunelerinde aşırı hasar ya da göçme gözlemlenmemiştir. Başka bir kayıt kümesi farklı sonuçlara yol açabilir. Bu amaçla, farklılıkları gözlemlemek için farklı kayıt setleri kullanılabilir. Daha büyük ivme değerleri

ya da deprem kayıtları yapılara uygulanarak elde edilen verilerin analizi sonucunda bulunan dinamik parametrelerden yola çıkılarak hangi güçlendirme tekniğinin kullanılabileceği, yapılarda güçlendirilmesi gereken bölgelerin belirlenebilmesi gibi konular hakkında değerlendirme yapılabilir.

- ❖ Deneysel çalışmada yapının tepkisini ölçmek için kolon numunesi üzerine maddi yetersizlikten dolayı bir adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer sayısının az olmasından dolayı mod şekilleri tespit edilememiştir. Daha fazla sayıda ivmeölçerin yapı üzerine yerleştirilmesiyle yapıların mod şekilleri bulunup karşılaştırma yapılabilir.
- ❖ Bu çalışmada etriye aralığının ve donatı sınıfının kolonun dinamik davranışına etkisi tespit edilmiştir. Diğer bir öneri, farklı parametreler (kolon yüksekliği, donatı çapı, kolon türü, eksenel yük, sıcaklık-nem gibi çevresel koşullar, zemin durumu vb.) değiştirilerek bu parametrelerin kolon dinamik davranışına etkisi araştırılabilir.
- ❖ Yapılarda doğrusal olmama, mühendisliğin hala büyük ölçüde belirsiz olan bir yönüdür. Bu nedenle, farklı doğrusal olmama yaklaşımlarının benzer sonuçlarla sonuçlanıp sonuçlanmadıkları test edilebilir. Bu amaçla EMA test yöntemi yapı elemanları yerine bir yapı/çerçeve üzerinde uygulanarak ülkemizdeki tasarım kriterleri deneysel sonuçlarla doğrulanabilir ya da elde edilen bilgiler güncellenmesi gereken yönetmeliklere veri tabanı oluşturabilir.

## KAYNAKLAR

- Agnihotri, N., 2022, How to use the ADXL345 accelerometer sensor [Online], <https://www.engineersgarage.com/adxl345-accelerometer-sensor-how-to-use/> [5.03.2022]
- Ahmad, N., Shahzad, A., Rizwan, M., Khan, A. N., Ali, S. M., Ashraf, M., Alam, B., 2019, Seismic performance assessment of non-compliant SMRF-reinforced concrete frame: shake-table test study. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(3), 444-462.
- Aksoylu, C., ve Arslan, M. H., 2019, Çerçeve türü betonarme binaların periyod hesaplarının farklı ampirik bağıntılara göre irdelenmesi, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 569-581.
- Allemang, R. J., 1999, Vibrations: Experimental modal analysis, *Structural Dynamics Research Laboratory, Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering*, University of Cincinnati.
- Anonymous, 2022, Curve fitting [Online], [https://en.wikipedia.org/wiki/Curve\\_fitting](https://en.wikipedia.org/wiki/Curve_fitting) [20.03.2022]
- Anonymous, 2022, Digital Communication-Quantization [Online], [https://www.tutorialspoint.com/digital\\_communication/digital\\_communication\\_quantization.htm](https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_quantization.htm) [24.02.2022]
- Astroza, R., Conte, J., Restrepo, J., Ebrahimian, H., and Hutchinson, T., 2013, Shake table testing of a full-scale five-story building: system identification of the five-story test structure, *Paper presented at the Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession*.
- Avitabile, P., 2001, Experimental modal analysis, *Sound and vibration*, 35(1), 20-31.
- Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Sevim, B., and Türker, T., 2011, Seismic response of a historical masonry minaret using a finite element model updated with operational modal testing, *Journal of vibration and control*, 17(1), 129-149.
- Birdal, F., 2015, Betonarme yapıların sismik davranışlarının sarsma tablasında deneysel olarak incelenmesi ve analitik olarak modellenmesi, Doktora, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
- Birinci, F., 2010, Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 6-13.
- Bolt, B. A., 1973, Duration of strong ground motion, *Paper presented at the Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering*, America.
- Brigham, E. O., and Morrow, R., 1967, The fast Fourier transform., *IEEE spectrum*, 4(12), 63-70.

- Campbell, K., 1985, Strong Ground Motions attenuation Relations, *A ten-year Perspective*, Earthquake Spectra, vol. 1, No4, 759-804.
- Cantieni, R., 2004, Experimental Methods Used in System Identification of Civil Engineering Structures, 2° *Workshop: Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzione meccaniche*, Perugia.
- Cao, M., Sha, G., Gao, Y., and Ostachowicz, W., 2017, Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features. *Smart Materials and structures*, 26(4), 043001.
- Chen, M. C., Astroza, R., Restrepo, J. I., Conte, J. P., Hutchinson, T., and Bock, Y., 2017, Predominant period and equivalent viscous damping ratio identification for a full-scale building shake table test, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(14), 2459-2477.
- Chopra, A. K., 1995, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, *Prentice Hall*, USA.
- Ciupala, A., Pilakoutas, K., Papastergiou, P., Garcia, R., Hajirasouliha, I., and Guadagnini, M., 2020, Full-Scale Shaking Table Tests on Deficient Rc Buildings Strengthened With FRP Composites, *Paper presented at the 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Japan.
- Clough, R., and Penzien, J., 1993, *Dynamics of Structures*, McGraw Hill, New York.
- Cooley, J. W., and Tukey, J. W., 1965, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematics of computation*, 19(90), 297-301.
- De Silva, C. W., 2006, *Vibration: fundamentals and practice*: CRC press.
- Devasahayam, S. R., 2012, Signals and systems in biomedical engineering: signal processing and physiological systems modeling, *Springer Science and Business Media*.
- Dimig, J., Shield, C., French, C., Bailey, F., and Clark, A., 1999, Effective force testing: A method of seismic simulation for structural testing, *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 1028-1037.
- E Silva, J. M. M., and Maia, N. M., 2012, Modal analysis and testing, Vol. 363, *Springer Science and Business Media*.
- Ersoy, U., 2001, Betonarme: temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk deprem yönetmeliğine (1998) göre hesap, *Evrin Yayınevi*.
- Ewins, D., 1984, Modal testing: theory and practice, *Research Studies Press*, England.
- Ewins, D. J., 2009, Modal testing: theory, practice and application: John Wiley and Sons.



- Garcia, R., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M., Helal, Y., Jemaa, Y., Pilakoutas, K., Ilki, A., 2014, Full-scale shaking table tests on a substandard RC building repaired and strengthened with Post-Tensioned Metal Straps. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(2), 187-213.
- Ge, X., Dietz, M. S., Alexander, N. A., and Kashani, M. M., 2020, Nonlinear dynamic behaviour of severely corroded reinforced concrete columns: shaking table study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(4), 1417-1443.
- Göker, K. A., 2017, Betonarme kolonların deprem performansını etkileyen parametrelerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 22-24.
- Grgić, N., Radnić, J., Matešan, D., and Banović, I., 2017, Stirrups effect on the behavior of concrete columns during an earthquake: Auswirkung der Haltebügel auf das Verhalten von Betonsäulen bei Erdbeben. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 48(5), 406-419.
- Grgić, N., Radnić, J., Matešan, D., and Buzov, A., 2016, Effect of mass on the behavior of concrete columns under seismic load: Einfluss der Masse auf das Verhalten von Betonsäulen unter Erdbebenbelastung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 47(5-6), 483-494.
- Grgić, N., Radnić, J., Smilović, M., & Baloević, G., 2018, The shake-table study of the effect of longitudinal reinforcement ratio on the behavior of concrete cantilever columns: Rütteltischuntersuchung über den Einfluss des Längsbewehrungsverhältnisses auf das Verhalten von Betonkragarmen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 49(5), 606-618.
- Güneş, S., 2017, Operasyonel modal analiz tekniği ile yığma yapıların dinamik davranışının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14-22.
- Havaldar, S. S., Sharma, R. S., Raghupathy, V., and Adiga, M., 2012, Evaluation of Dynamic parameters of adhesively bonded steel and aluminium plates. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(6).
- Heylen, W., Lammens, S., and Sas, P., 1997, Modal analysis theory and testing, *Katholieke Universiteit Leuven Leuven*, Vol. 200, Belgium.
- Hou, S., Zhang, H., Han, X., and Ou, J., 2017, Damage monitoring of the RC frame shaking table test and comparison with FEM results, *Procedia engineering*, 210, 393-400.
- Işıltan, Ö., 2010, Betonarme kolonlar için DBYBHY 2007, Eurocode 8 ve FEMA 356 ile yapılan performans değerlendirmelerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-13.

- Isler, C., 2017, Veri Toplama'nın ABC'si [Online], <https://silo.tips/download/veri-toplama-nn-abc-si>, [12.02.2022]
- Jennings, P. C., 1985, Ground motion parameters that influence structural damage. *Strong ground motion simulation and engineering applications, EERI Publication*, 85-02.
- Joyner, W. B., and Boore, D. M., 1988, Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, *Paper presented at the Earthquake Engineering and Soil Dynamics II, Proc. Am. Soc. Civil Eng. Geotech. Eng. Div. Specialty Conf.*, Pasadena, CA, 43-103.
- Jung, D., Wilcoski, J. and Andrawes, B., 2018, Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals, *Engineering structures*, 160, 171-185.
- Karaahmetli, S. ve Dündar, C., 2017, Yapı sönüm oranının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi, 4. *Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Eskişehir.
- Karaahmetli, S. ve Dündar, C., 2017, Yapıların Dinamik Analizinde Kullanılan Sönüm Modellerinin İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23-36.
- Karakan, E., 2008, *Estimation of Frequency Response Function for Experimental Modal Analysis*, Izmir Institute of Technology, İzmir.
- Kashani, M. M., Ge, X., Dietz, M. S., Crewe, A. J. and Alexander, N. A., 2019, Significance of non-stationary characteristics of ground-motion on structural damage: shaking table study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(9), 4885-4907.
- Kramer, S. L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, *Pearson Education India*.
- Krawinkler, H., 2000, A Perspective On Experimental Research III Earthquake Engineering.
- Lai, E., 2003, Practical digital signal processing, *Elsevier*.
- Lu, X., Cui, Y., Liu, J., and Gao, W., 2015, Shaking table test and numerical simulation of a 1/2-scale self-centering reinforced concrete frame, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 44(12), 1899-1917.
- Lu, X., Fu, G., Shi, W. and Lu, W., 2008, Shake table model testing and its application, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 181-201.
- Mahin, S., Sakai, J., Jeong, H., Espinoza, A., Hachem, M., and Buckman, B., 2005, Shake table and analytical investigations of single column bents, *Paper presented at the Proc., Caltrans Bridge Research Conf., California*

*Transportation Foundation, Sacramento, CA, and California Dept. of Transportation, Los Angeles.*

- Matsumoto, T., Okstad, E., Kawashima, K. and Mahin, S., 2008, Seismic Performance of Rectangular Columns and Interlocking Spiral Columns, *Paper presented at the 14th World Congress on Earthquake Engineering, Beijing, China.*
- Nagae, T., Ghannoum, W., Kwon, J., Tahara, K., Fukuyama, K., Matsumori, T. and Nishiyama, M., 2015, Design implications of large-scale shake-table test on four-story reinforced concrete building. *ACI Structural Journal*, 112(2), 135.
- Nguyen, X.-H., Pham, X.-D., and Luong, X.-C., 2015, Shaking table test on seismic performance of L-and V-sectioned reinforced concrete columns, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 9(04), 1550010.
- Nishida, H. and Unjoh, S., 2004, Dynamic response characteristic of reinforced concrete column subjected to bilateral earthquake ground motions. *Paper presented at the Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.*
- Ozcelik, O., Luco, J., Conte, J., Trombetti, T. and Restrepo, J., 2008, Experimental characterization, modeling and identification of the NEES-UCSD shake table mechanical system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(2), 243-264.
- Özkul, B., 2009, Betonarme kolonların aksenal yük altındaki davranışı ve elastisite modülü önerisi, Doktora, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 30-33.
- Phillips, A. W. and Allemang, R. J., 2003, An overview of MIMO-FRF excitation/averaging/processing techniques, *Journal of Sound and vibration*, 262(3), 651-675.
- Proakis, J. G. and Manolakis, D. G., 1995, Digital signal processing: principles, algorithms, and edition, *Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.*
- Qiao, Y.M., Lu, D.G. and Yu, X.H., 2020, Shaking table tests of a reinforced concrete frame subjected to mainshock-aftershock sequences, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-30.
- Quintana Gallo, P., Akgüzel, U., Pampanin, S. and Carr, A., 2011, Shake table tests of non-ductile as-built and repaired RC frames.
- Radeş, M., 2001, Displays of Vibration Properties, *Universitatea Politehnica Bucuresti, Romania*, 413-431
- Radnić, J., Grgić, N., Matešan, D. and Baloević, G., 2015, Shake table testing of reinforced concrete columns with different layout size of foundation: Rüttelprüfung von Stahlbetonstützen bei unterschiedlicher Größe der Gründung, *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*, 46(4-5), 348-367.

- Rizwan, M., Ahmad, N., Khan, A. N., Qazi, S., Akbar, J. and Fahad, M., 2020, Shake table investigations on code non-compliant reinforced concrete frames, *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 349-367.
- Sagir, A., 2014, Real-time monitoring of a steel building and its performance analysis, *Zirve University Graduate School Of Natural And Applied Sciences*, Gaziantep.
- Şahin, A., 2009, Yapıların deneysel ve operasyonel modal analizleri için sayısal sinyal işleme, dinamik karakteristik belirleme ve sonlu eleman model iyileştirme yazılımları: Signalcad-Modalcad-Femup, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Sarıbaş, İ., 2013, Enine Donatı Detaylarındaki Yetersizliklerin Betonarme Kolonların Eksenel Yükler Altındaki Performansına Etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 22-24.
- Schwarz, B. J. and Richardson, M. H., 1999, Experimental modal analysis, *CSI Reliability week*, 35(1), 1-12.
- Sert, A., 2019, Yapı tanılama algoritmalarıyla özgün yapı dinamik özelliklerinin tahmini, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Shabana, A. A., 1991, Theory of vibration, Vol. 2, *Springer*.
- Shang, S. and Wang, Z., 2020, Dynamic analysis of a spring-asphalt three-dimensional isolation system based on cyclic simple shear and shaking table tests, *Applied Sciences*, 10(18), 6530.
- Sipple, J. D. and Sanayei, M., 2014, Finite element model updating using frequency response functions and numerical sensitivities. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(5), 784-802.
- Smith, G. M., 2020, What Is A Sensor and What Does It Do? [Online], <https://dewesoft.com/daq/what-is-a-sensor>
- Sugimoto, K., Yonezawa, K., Katsumata, H. and Fukuyama, H., 2016, Shaking Table Test of Quarter Scale 20 Story RC Moment Frame Building Subjected to Long Period Ground Motions, *Journal of Disaster Research*, 11(1), 97-105.
- Sümer, G., 2009, Betonarme Elemanlarda Donatı Düzenleme İlkeleri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 83-85.
- Tayfur, B., Emin, U., Ömer, C., Cihan, A. and Öztekin, E., 2 Eksenli Sarsma Tablası Tasarımı ve İmalatı, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 131-137.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara.

- Tekin, G., Tanırcan, G. B. and Şafak, E., 2010, Probabilistic earthquake response analysis of single degree of freedom structures, *Paper presented at the 14th European Conference on Earthquake Engineering*.
- Tirkey, N. and Kumar, G.B.R., 2019, Experimental on the Residential Building of Earthquake Prone Areas using Shake Table Test, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, İndia-2019,260-261.
- Toledo, S., 2019, Basic Dynamic Analysis User's Guide, *Tel-Aviv University*.
- Treszkai, M. F., Sipos, D. and Feszty, D., 2020, Damping Determination by Half-Power Bandwidth Method for a Slightly Damped Rectangular Steel Plate in the Mid-Frequency Range, *Acta Technica Jaurinensis*, 13(3), 177-196.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G., 1975, A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626.
- TS-708, 2018, Çelik-Betonarme için- Donatı Çeliği, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2010).
- Turan, F. N., 2012, Dengeli konsol betonarme köprülerin dinamik karakteristiklerinin çevresel titreşim verileri kullanılarak belirlenmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Türker, T., 2005, Çelik çerçeve sistemlerin dinamik karakteristiklerinin deneysel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Türker, T., 2011, Çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Vanmarcke, E. H., 1976, Structural response to earthquakes, *In Developments in geotechnical engineering*, Elsevier, Vol. 15, pp. 287-337.
- Wang, D. Y., Wang, Z. Y., Yu, T. and Li, H., 2017, Shake table tests of large-scale substandard RC frames retrofitted with CFRP wraps before earthquakes, *Journal of Composites for Construction*, 21(1), 04016062.
- Xiao, J., Wang, C., Li, J. and Tawana, M. M., 2012, Shake-table model tests on recycled aggregate concrete frame structure, *ACI Structural Journal*, 109(6), 777.
- Yang, C., Yang, T.Y. and Yang, Z., 1986, Random vibration of structures: Wiley-Interscience, 295.

- Yanik, Y., Yilmaz, G. K. and Türker, T, Betonarme Binalarda Hasar Tespiti ve Hasar Belirleme Yöntemleri, *Journal of Investigations on Engineering and Technology*, 1(2), 30-36.
- Yılmaz, H. Ç., 2021, Yapı sağlığı izleme sistemleri ile yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Hatay.
- Yin, H., 2008, A new theoretical basis for the bandwidth method and optimal power ratios for the damping estimation, *Mechanical systems and signal processing*, 22(8), 1869-1881.
- Yu, K., Li, L., Yu, J., Xiao, J., Ye, J. and Wang, Y., 2018, Feasibility of using ultra-high ductility cementitious composites for concrete structures without steel rebar, *Engineering Structures*, 170, 11-20.
- Zhou, Y., Chen, P., Zhang, L., Wang, C. and Lu, Z., 2019, Shaking table tests and numerical analysis of an over-track multi-tower building, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(2), 230-243.
- Zimmerman, A. T., Shiraishi, M., Swartz, R. A. and Lynch, J. P., 2008, Automated modal parameter estimation by parallel processing within wireless monitoring systems, *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 102-113.
- Żóltowski, M. and Napieraj, K., 2017, Experimental modal analysis in research, *Budownictwo i Architektura*, 16(3), 005-012.