

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## HASAR SEVİYELERİNİN YAPI DİNAMİK PARAMETRELERİ İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer SEMİZ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : YAPI  
Tez Danışmanı : Dr.Öğr.Üyesi Zeki ÖZCAN

Ocak 2020

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASAR SEVİYELERİNİN YAPI DİNAMİK  
PARAMETRELERİ İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer SEMİZ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ


Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 20/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi  
Zeki ÖZCAN  
Jüri Başkanı

Dr. Öğr. Üyesi  
Hakan ÖZTÜRK  
Üye

Dr. Öğr. Üyesi  
Osman KIRTEL  
Üye



## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ömer SEMİZ

/01/2020

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Zeki ÖZCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca beni her daim destekleyen, beni güzel temennileriyle teşvik eden sevgili eşim Elif SEMİZ'e ve eğitim hayatım boyunca yanımda olan tüm aileme teşekkürü borç bilirim. Ayrıca desteklerinden dolayı Oğuz Necati SERTSÖZ ve Recep UYGUN'ada teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
BÖLÜM 3.	
YAPILARIN TİTREŞİMİ.....	7
3.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler.....	7
3.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler.....	11
BÖLÜM 4.	
HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ.....	15
4.1. Yapı Hasarları.....	15

4.1.1. Hasar yok.....	15
4.1.2. Hafif hasar.....	15
4.1.3. Orta hasar.....	16
4.1.4. Ağır hasar.....	16
4.1.5. Çok ağır hasar.....	16
4.2. Türkiye Deprem Yönetmeliği 2018 Bina Performans Düzeyleri...	16
4.2.1. Kesintisiz kullanım performans düzeyi.....	16
4.2.2. Sınırlı hasar performans düzeyi.....	17
4.2.3. Kontrollü hasar performans düzeyi.....	17
4.2.4. Göçmenin önlenmesi performans düzeyi.....	17
4.3. Yapı Hasar Tespitinde Kullanılan Deneysel Yöntemler.....	19
4.3.1. Deneysel modal analiz yöntemi.....	19
4.3.1.1. Genel kurallar.....	20
4.3.2. Operasyonel modal analiz yöntemi.....	20
4.3.3. Modal analiz yöntemleri kullanım alanları.....	21
4.3.4. Test düzeni bileşenleri.....	21
4.3.4.1. Titreştiriciler.....	22
4.3.4.2. İvmeölçerler.....	23
4.3.4.3. Veri toplama cihazları ve veri işleme.....	24
4.3.5. Çalışmada kullanılan yazılımlar.....	26
4.3.5.1. Sap 2000 yazılımı.....	26
4.3.5.2. Seismosignal yazılımı.....	26
4.3.6. Filtreleme yöntemi.....	27

## BÖLÜM 5.

YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
5.1. Model Yapının Geometrik Özellikleri ve Boyutları.....	28
5.2. Hasar Senaryoları.....	29
5.2.1. 1. Senaryo hasarsız durum.....	31
5.2.2. 2.Senaryo orta hasar durumu.....	33

5.2.2.1. 1 Kolon orta hasar oluşması durumu.....	34
5.2.2.2. 2 Çapraz kolonda orta hasar oluşması durumu.....	36
5.2.2.3. 2 Kolonda orta hasar oluşması durumu.....	38
5.2.2.4. Orta hasarlı yapı için değerlerin karşılaştırılması...	41
5.2.3. 3.Senaryo ağır hasar durumu.....	42
5.2.3.1. 1. Kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	42
5.2.3.2. 2 Kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	45
5.2.3.3. 3 Kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	47
5.2.3.4. 2 Çapraz kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	50
5.2.3.5. Ağır hasarlı yapı için değerlerin karşılaştırılması...	52
5.2.4. Sönüm oranları.....	53
5.3. Çalışmada Kullanılan Yapının Sonlu Elemanlar Modeli.....	55
5.4. Sonlu Elemanlar Model İyileştirme Yöntemi.....	56
5.5. Model Yapının Teorik Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.	57
5.6. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Yöntemi.....	59
5.6.1. 1. Senaryo hasarsız durum.....	60
5.6.2. 2. Senaryo orta hasar durumu.....	61
5.6.2.1. 1 Kolonda orta hasar oluşması durumu.....	61
5.6.2.2. 2 Çapraz kolonda orta hasar oluşması durumu.....	62
5.6.2.3. 2 Kolonda orta hasar oluşması durumu.....	63
5.6.3. 3. Senaryo ağır hasar durumu.....	63
5.6.3.1. 1 Kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	63
5.6.3.2. 2 Kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	64
5.6.3.3. 3 Kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	65
5.6.3.4. 2 Çapraz kolonda ağır hasar oluşması durumu.....	65
5.6.4. Zaman tanım alanında elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	66
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR.....	68

KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	74



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$c$	: Yapının sönümü
$c_{cr}$	: Kritik sönüm
$[C]$	: Sönüm matrisi
$d_b$	: Boyuna donatı çapı
$F$	: Dış kuvvet
$F_d$	: Sönüm kuvveti
$F_I$	: Atalet kuvveti
$f(t)$	: Yapıya uygulanan kuvvet
$F_s$	: Yayda olan kuvvet
$\{f(t)\}$	: Zamana bağlı kuvvet vektörü
$\{F\}$	: Sütun vektör
FOA	: Frekans ortamında ayrışım
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$k$	: Yapı jitleği
$L_p$	: Plastik mafsal boyu
$L_s$	: Kesme açıklığı
$[M]$	: Kütle matrisi
$m$	: Yapı kütlesi
$n$	: Mod sayısı
OMA	: Operasyonel modal analiz
$P$	: Maksimum plastik dönme durumunda çelik kesitte bulunan aksenal yük
$P_c$	: Çelik elemanın beklenen aksenal basınç dayanımı
$s$	: Karmaşık sayı
SAB	: Stokastik altalan belirleme

SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SHM	: Structural health monitoring
SUM	: Structural monitoring
t	: Zaman
TBDY	: Türkiye bina deprem yönetmeliği
$[\alpha(\omega)]$	: Frekans davranış fonksiyonu
$ \alpha(\omega) $	: Frekans davranışa ait genlik değeri
$\theta_\alpha$	: Frekans davranış fonksiyonuna ait faz değeri
$\theta_p^{(GÖ)}$	: Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı
$\theta_p^{(KH)}$	: Kontrollü hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı
$\theta_p^{(SH)}$	: Sınırlı hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı
$\theta_y$	: Akma dönmesi
$\xi$	: Sönüm oranı
$\Phi_u$	: Göçme öncesi eğrilik
$\Phi_y$	: Akma eğriliği
$\omega$	: Sönümsüz doğal açısal frekans
$\omega_d$	: Sönümlü doğal açısal frekans
X	: Yer değiştirme
$\{x(t)\}$	: Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	: Zamana bağlı hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	: Zamana bağlı ivme vektörü
$\{X\}$	: Nx1 boyutunda zamandan bağımsız genlik
x(t)	: Yerdeğiştirme vektörü
$\dot{x}(t)$	: Hız vektörü
$\ddot{x}(t)$	: İvme vektörü
ZTA	: Zaman tanım alanı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Tek serbestlik dereceli sistem modeli.....	7
Şekil 3.2. Çok serbestlik dereceli sistem modeli.....	12
Şekil 4.1. Çekiç.....	22
Şekil 4.2. Test box 2010 dinamik veri toplama cihazı .....	24
Şekil 4.3. Yapı modeli, ivmeölçer ve data toplama ünitesi.....	25
Şekil 5.1. Yapı modeli.....	29
Şekil 5.2. Kolon numaralandırma.....	29
Şekil 5.3. Hasar senaryolarına ait dönme açılarının TBDY 2018 göre yerleri.....	30
Şekil 5.4. Hasarsız durum filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği.....	31
Şekil 5.5. Hasarsız durum filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	32
Şekil 5.6. Hasarsız durum filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	32
Şekil 5.7. Hasarsız durum filtrelenmiş yerdeğiştirme- zaman grafiği.....	33
Şekil 5.8. Hasarsız durum fourier genliği.....	33
Şekil 5.9. 1 Kolon orta hasar durumu filtrelenmemiş ivme-zaman grafiği.....	34
Şekil 5.10. 1 Kolon orta hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	34
Şekil 5.11. 1 Kolon orta hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	35
Şekil 5.12. 1 Kolon orta hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	35
Şekil 5.13. 1 Kolon orta hasar fourier genliği.....	36
Şekil 5.14. 2 Çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği.....	36
Şekil 5.15. 2 Çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	37
Şekil 5.16. 2 Çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	37

Şekil 5.17. 2 Çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	38
Şekil 5.18. 2 Çapraz kolon orta hasar fourier genliği.....	38
Şekil 5.19. 2 Kolon orta hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği.....	39
Şekil 5.20. 2 Kolon orta hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	39
Şekil 5.21. 2 Kolon orta hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	40
Şekil 5.22. 2 Kolon orta hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	40
Şekil 5.23. 2 Kolon orta hasar fourier genliği.....	41
Şekil 5.24. Orta hasar durumu karşılaştırmalı veriler yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	41
Şekil 5.25. 1 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği....	43
Şekil 5.26. 1 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	43
Şekil 5.27. 1 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	44
Şekil 5.28. 1 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	44
Şekil 5.29. 1 Kolon ağır hasar fourier genliği.....	45
Şekil 5.30. 2 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği....	45
Şekil 5.31. 2 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	46
Şekil 5.32. 2 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	46
Şekil 5.33. 2 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	47
Şekil 5.34. 2 Kolon ağır hasar fourier genliği.....	47
Şekil 5.35. 3 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği....	48
Şekil 5.36. 3 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	48
Şekil 5.37. 3 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	49
Şekil 5.38. 3 Kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	49
Şekil 5.39. 3 Kolon ağır hasar fourier genliği.....	50
Şekil 5.40. 2 Çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği.....	50

Şekil 5.41. 2 Çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme - zaman grafiği.....	51
Şekil 5.42. 2 Çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız - zaman grafiği.....	51
Şekil 5.43. 2 Çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	52
Şekil 5.44. 2 Çapraz kolon ağır hasar fourier genliği.....	52
Şekil 5.45. Ağır hasar durumu karşılaştırmalı veriler yerdeğiştirme - zaman grafiği.....	53
Şekil 5.46. 2.Senaryo durumu hesaplanan sönüm oranları.....	54
Şekil 5.47. 3.Senaryo durumu hesaplanan sönüm oranları.....	54
Şekil 5.48. Hasarsız yapının sonlu eleman modeli.....	55
Şekil 5.49. Hasarlı yapının sonlu eleman modeli.....	56
Şekil 5.50. Moment değişim grafiği.....	59
Şekil 5.51. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ramp fonksiyonu.....	60
Şekil 5.52. Zaman tanım alanında analiz yöntemi giriş bilgileri.....	60
Şekil 5.53. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile hasarsız durum yerdeğiştirme zaman karşılaştırmalı grafiği.....	61
Şekil 5.54. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 1 kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiği.....	62
Şekil 5.55. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 çapraz kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiğ.....	63
Şekil 5.56. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiği.....	63
Şekil 5.57. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 1 kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiği.....	64
Şekil 5.58. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiği.....	65
Şekil 5.59. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 3 kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiği.....	66
Şekil 5.60. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 çapraz kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme- zaman karşılaştırmalı grafiği.....	66

Şekil 6.1. Hasar durumuna göre deneysel titreşim parametrelerinin değişim grafiği.....

69



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Yeni betonarme bina elemanları için izin verilen dönme sınırları...	17
Tablo 4.2. Çelik kolonlarda plastik dönme sınırları.....	18
Tablo 4.3. Çelik kirişlerde plastik dönme sınırları .....	18
Tablo 5.1. Modele ait plastik dönme sınırları.....	30
Tablo 5.2. Orta hasar durumuna ait veriler.....	42
Tablo 5.3. Ağır hasar durumuna ait veriler .....	53
Tablo 5.4. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan orta hasarlı modelin periyotları.....	57
Tablo 5.5. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan ağır hasarlı modelin periyotları.....	58
Tablo 5.6. Moment değişim tablosu.....	58
Tablo 5.6. Deneysel yöntem ve sayısal yöntem ile elde edilen yerdeğişirmelerin değişimi.....	67
Tablo 6.1. Hasar durumuna göre deneysel titreşim parametrelerinin değişimi.	68
Tablo 6.2. Sayısal veriler ile yapının deneysel verilerinin karşılaştırılması....	69

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Hasar tespiti, yapı sağlığı izleme, deneysel modal analiz, operasyonel modal analiz.

Bu alışmada Modal Analiz Yöntemleri ile mevcut yapıların yapı sağlığı tespiti ve incelenmesi, hasar tespitlerinin yapılması ve dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Tez alışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde yapı sağlığı izlemenin önemi, ikinci bölümde konuyla ilgili yapılan çalışmalar, üçüncü bölümde yapıların titreşimi hakkında genel bilgilerden, dördüncü bölümde yapı hasar tanımları, hasar tespit yöntemleri olan Deneysel Modal Analiz Yöntemi, Operasyonel Modal Analiz yöntemi ve kullanılan programlardan bilgiler verilmiş olup beşinci bölümde yapılan çalışmalar ve son bölümde sonuçlar sunulmaktadır. Yapılan alışma ile yapı sağlığı izlemede deneysel yöntemlerin kolaylıkla kullanılabilceği, hızlı bir şekilde hasar belirleme yapılarak yapı davranışının tespit edilebileceği gösterilmiştir.

# **DETERMINATION OF DAMAGE LEVELS BY USING STRUCTURE DYNAMIC PARAMETERS**

## **SUMMARY**

Keywords: Damage assessment, structural health monitoring, experimental modal analysis, operational modal analysis

Aim of this study is to determine and analysis structural health of the current structures, to make damage assessment and to obtain dynamic characteristics using Modal Analysis Methods. This thesis consists of six chapters. In chapter one importance of the structural health monitoring is explained, in chapter two there are previous studies about this subject, chapter three includes general information about vibration of structures and chapter four includes information about damage assesment methods such as Experimental Modal Analysis Method, Operational Modal Analysis Method and also computer programs used, chapter five includes experimental studies and the final chapter includes results and references. With this study, it is emphasized that experimental methods can easily be used for accurate monitoring of structural health, quick damage assessment and determining structural behavior.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanoğlunun Dünya üzerinde yaşamaya başladığı tarihten itibaren kendine ilk olarak barınma amaçlı olmak üzere bir yapı oluşturması ihtiyacı hayatında her zaman önemli bir yer tutmuştur. İlk çağlardan beri insanlar belli sebepler ile bir yerden bir yere göç etmiş, ticaret amaçlı taşınmış veya savaş gibi nedenlerle göçme ihtiyacı duymuşlardır. Bu sebeple barınma ve dolayısıyla yapı inşa etme gereksinimi her zaman insan hayatında önemli bir rol oynamaktadır.

Dünya üzerinde çok farklı yapısal ve mimari bakımdan zenginlik gösteren yapılar inşa edilmiş olup insanoğlunun amacı bu yapıları dış yükler veya diğer etkenler altında bile ayakta tutmayı sağlamak olmuştur.

Yapıların sağlığını etkileyen en büyük dış etkenlerden biri depremlerdir. Dünya üzerinde şimdiye kadar olmuş depremlerden dolayı ağır can ve mal kayıpları yaşanmıştır ve yaşanmaya da devam etmektedir.

Ülkemizin de büyük bir bölümü aktif deprem kuşağında bulunmakta olup yapılarımız depremlere maruz kalmaktadırlar. Ayrıca derin metro kazıları, patlatmalı faaliyetler, önlem alınmadan yapılan inşaat faaliyetleri gibi etkenlerde yapı sağlığını tehdit eden unsurlardır. Bu sebeplerle mevcut yapılar üzerinde oluşan hasarların zamana bağlı gelişimleri ve performans değerlendirmeleri yapılamaması sebebi ile ciddi kayıplar yaşanmaktadır.

Mevcut yönetmelikler ile yapılan teorik çalışmalardaki sınır şartları, malzeme özellikleri ve yapım şartlarındaki belirsizlikler sebebi ile yapı davranışlarının belirlenmesi ve yapı sağlığının takip edilip yorumlanabilmesi için deneysel çalışmalar ve sonuçları önemli olmaktadır.

Deneysel çalışmalarla mevcut yapının dinamik özelliklerini belirleyerek yapının inşası sırasında yapım hatalarından kaynaklı değişimlerin veya zaman içinde oluşan hasarların yapı dinamik özelliklerini nasıl değiştirdiğini ve hangi etkileri meydana getirdiğini anlamaktayız. Yapının dinamik davranışını gösteren doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarını belirlemek için deneysel yöntemlere başvurulmaktadır. Bu yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesiyle “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” ve “Operasyonel Modal Analiz Yöntemi” gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Bu yöntemler genel olarak tahribatsız inceleme ile yapılan teknolojik yöntemler olup genel işleyişleri, yapı üzerinden alınan titreşimlerden faydalanılarak dinamik parametreleri belirlemek ve yapının durumunun ve hasarının tespit edilmesine dayanmaktadır.

## **BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ**

İnsanoğlu yeryüzü üzerinde yapısal ve mimari açıdan zengin çeşitlilik gösteren yapılar inşa etmiş ve bunların çeşitli etkiler altında bile ayakta kalmasını sağlamaya çalışmıştır. Bu etkilerden en önemlisi depremlerdir diyebiliriz. Depremlerden dolayı meydana gelen hasar, can, mal kayıpları ekonomik ve sosyolojik kayıplara yol açmakta bunların önüne geçebilmek adına mevcut yapıların durumlarının bilinmesi ve takip edilmesi önem arz etmektedir. Bu bölümde literatürde mevcut yapıların sağlığının tespit edilmesi konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Farrar ve ark., (1997) büyük yapılarda test yapmanın zorluklarından bahsetmişlerdir. Yaptıkları çalışmada Rio Grande köprüsünde gerçekleştirdikleri deneysel modal analiz ölçümlerini ve elde ettikleri sonuçları sunmuşlardır.

Xia ve ark., (2000) hasarın yeri ve tespiti amacıyla yaptıkları çalışmada modal analiz verilerinin önem arz ettiğini belirtmişlerdir. Hasar tespiti için yaptıkları ölçümlerde 2 katlı ve 6 m. x 4 m. ebatlarındaki modelin ilk 7 modu listeleterek hasarın, hasar matrisi ve gürültü matrisine bağlı olarak bulunabileceği üzerinde çalışmışlardır.

Köprü ve binaları bir çekiç veya titreştirici ile harekete geçirmenin zor ve pahalı bir yöntem olması sebebiyle modal analiz yapılması ihtiyacı ilk olarak İnşaat Mühendisliğinde ortaya çıkmıştır. Trafik ve rüzgardan kaynaklı oluşan doğal titreşim değerlerini aşan durumlardaki yapay titreşim değerleri de bu yöntem ile bulunabilir. Bununla beraber Makine Mühendisliğinde Operasyonel Modal Analiz Yönteminin çok kullanışlı olduğu ispatlanmıştır (Peeters ve ark., 2001).

Hwang ve ark.,(2004) hasar yerlerini, derecelerini belirlemek ve hasar tespit metotlarını geliştirmek için bir konsol kiriş ve helikopter kanadı üzerinde hasar oluşması durumunda rijitlikte azalma olacağı kabulüne göre çalışmalar yapmışlardır.

Bayraktar ve ark., (2005) yaptıkları çalışmada düzlem çerçevelerin doğal frekansının deneysel olarak belirlenmesi için 3 katlı bir düzlem çerçeveyi darbe çekici ile titreştirerek deneysel ve teorik sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu sonuçlar arasında maksimum % 6,38 fark olduğu ve deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların birbirine yakın olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında deneysel modal analiz yönteminin mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceği ve deprem güvenliklerinin daha doğru olarak belirlenebileceği sonucuna varmışlardır.

Beyen., (2007) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar alan ve İstanbul il merkezinde bulunan Fatih camiiinin hasar tespiti üzerine yaptığı çalışmada, çevresel titreşim yöntemi ile yapının dinamik karakteristiklerini belirlemiş ve bu veriler ışığında tamir ve güçlendirme yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışmada yapının tarihi eser olması sebebi ile yapı statik dengesinin korunması adına hasarsız bir yöntem olan çevresel etkileşim yöntemi seçilmiş yapıya zarar verilmeden yapı dinamik karakteristikleri belirlenmiştir.

Bayraktar ve ark., (2007) Yığma Taş Minarelerin analitik ve deneysel yöntemlerle yapı güvenliğinin belirlenmesi amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile hasar tespiti ve iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Ayrıca bu çalışmada Operasyonel Modal Analiz Yönteminde yapının çevresel etkiler (rüzgar, taşıt, vb.) ile uyarıldığı, Deneysel Modal Analiz Yönteminde ise yapı bilinen bir etki yada titreşirici ile uyarıldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak yapının bu etkilere verdiği tepki belirlenmektedir.

Mevcut yapıların dinamik özellikleri olan doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranlarının belirlenmesinde “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” ve “Operasyonel Modal Analiz Yöntemi” olmak üzere başlıca iki yöntem kullanan Bayraktar ve ark.,

(2008) Trabzon il Merkezinde bulunan İskenderpaşa camiinde yaptıkları deneysel çalışmalarda operasyonel modal analiz yöntemi ve sonlu eleman yöntemi ile elde edilen analitik sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçlar arasındaki farklar sebebi ile sonlu elemanlar modeli kalibre edilerek bu farklar minimize edilmiştir.

Bayraktar ve ark., (2009) yaptıkları çalışmada teorik ve deneysel modal analizleri ile belirlenen, bir kulenin doğal frekansları, birbiri ile karşılaştırıldığında görülmüştür ki ilk beş titreşim modu uyumaktadır. Bu çalışmanın uzun vadede amacı analitik modeli test sonuçlarına göre güncellemek ve kulenin yapı sağlığını tahmin etmek olduğunu ifade etmişlerdir.

Bayraktar ve ark., (2010) farklı inşaat durumlarındaki betonarme binaların üzerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile ölçümler yaparak modal davranışları karşılaştırıp, çevresel etkilere göstermiş olduğu tepkileri ölçerek bunların değerlendirmesinde başlıca iki yöntem olan Frekans Ortamında Ayrışım (FOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemlerini kullanılmışlardır. Çalışma sonucunda binaların inşaat aşamalarındaki dinamik karakteristiklerinin nasıl değişim gösterdiği irdelenmiş olup ayrıca hasar durumları için ölçüm sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılabileceğini ifade etmişlerdir.

Güneş ve ark.(2011) tek katlı tek açıklıklı betonarme çerçeve modeli üzerinde elastisite modulünü %25 ve % 50 azaltmak suretiyle hasar senaryoları simule etmiş ve hasarsız sonuçlar ile hasarlı sonuçları karşılaştırmışlardır. Titreşim verilerine dayalı değerlendirme yöntemlerinin sağlayacağı yararların göz ardı edilemeyeceği sonucuna varmışlardır.

İ. Çalık ve ark., (2013) tarafından Rize Merkez Büyük Gülbahar Camii'sinde çevresel etkileşim testi yöntemi (Operasyonel Modal Analiz Yöntemi) ile yapının dinamik karakteristikleri OMA yazılım programı ile elde edilmiş ve yapılacak güçlendirmeler ile alakalı olarak sonuçlar irdelenmiştir. Tarihi yapıların yapı sağlığını çevresel titreşim testleri ile sürekli olarak izlenmesinin gerekliliğini vurgulamışlardır.

Özçelik ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada hasar tanımlama yöntemlerinin dört farklı seviyede tanımlanabileceğinden bahsetmişlerdir. Bunlardan ilki hasarın varlığını tespit eden yöntemler, ikincisi hasarın yerini bulan yöntemler, üçüncüsü hasarın miktarını bulan yöntemler ve son olarak hasar gören yapının kalan ömrünü tespit eden yöntemlerdir. Çalışmalarında 3 katlı model yapı üzerinde hasar senaryoları oluşturarak hasar durumunun varlığı ve yerini tespit etmişlerdir.

Yetkin, M., (2016) yaptığı çalışmada 5 katlı betonarme bir yapının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanarak çevresel titreşimler ile yapı dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Deneysel verilerden yararlanarak yapının sonlu elemanlar modelinin iyileştirmesini yapmış ve güncel analitik model oluşturmuştur. Gerçek yapıları en iyi şekilde temsil edebilecek sonlu eleman modelinin oluşturulabileceğini uygulamalı olarak göstermiştir.

Döven ve ark., (2018) Kütahya Yeşil camii üzerinde yaptıkları çalışmada çevresel titreşim deneyi uygulayarak deney sonuçlarını sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmada deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında % 9 hata yüzdesi ile deneysel sonuçların kabul edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır. Minarenin balkon seviyesindeki kütle artışından dolayı yıkıcı hasarların olabileceğini gözlemlemişlerdir.

Maso ve ark.,(2019) yaptıkları çalışmada CRFP ile güçlendirdikleri duvarlar üzerinde deneysel modal analiz yöntemi kullanarak dinamik parametreleri bulmuşlardır. Sonuç olarak da deneysel modal analizin CRFP uygulanmış elemanlar içinde kullanılabilir olduğunu ifade etmişlerdir.

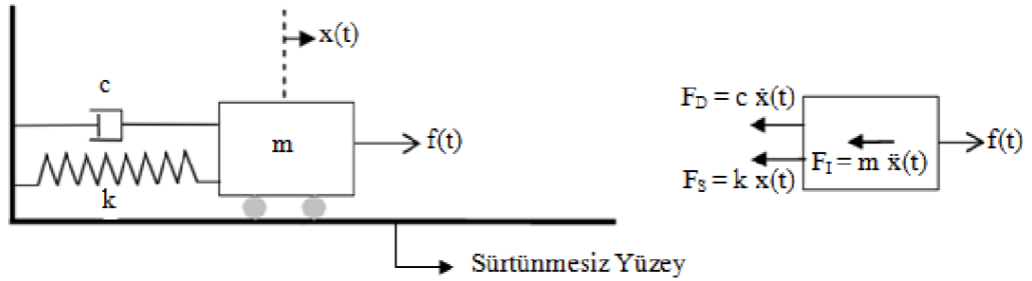
## BÖLÜM 3. YAPILARIN TİTREŞİMİ

Bir yapının yer hareketi altında incelenmesi sırasındaki ilk adım basit bir model ile temsil edilmesidir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin çoğu basit yaklaşım ile tek serbestlik dereceli kabul edilerek uygun yaklaşımda sonuçlar elde edilebilir. Sistem dinamik davranışının belirlenebilmesi için sistemin hareket denkleminin yazılması gerekmektedir (Celep, Z., Kumbasar, N., 2004).

Bu bölümde tek serbestlik dereceli sistemler ile çok serbestlik dereceli sistemler ile alakalı bilgiler verilecektir.

### 3.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli genel olarak Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tek serbestlik dereceli sistem modeli.

Yukarıdaki sistemin denklemi yazılırsa,

$$F_I + F_D + F_S = f(t) \quad (1.1)$$

Yazılır. Bu formülde  $f(t)$  zamana bağlı dış kuvveti,  $F_D$  sönüm kuvvetini,  $F_I$  atalet kuvvetini,  $F_S$  yay kuvvetini göstermektedir (Türker, 2005). Tek serbestlik dereceli sistemler için hareket denklemi ise,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1.2)$$

olarak ifade edilir. Bu formülde  $m$  yapının kütesini,  $c$  sönümünü,  $k$  rijitliği,  $\ddot{x}(t)$  yapının ivmesini,  $\dot{x}(t)$  yapının hızını,  $x(t)$  yapının yer değiştirmesini,  $f(t)$  kuvveti ifade etmekte olup yapıda sönüm olmaması halinde (1.2) denkleminde  $c=0$  yazılır ve denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1.3)$$

ifadesine dönüşür. Yapının bu hali ile serbest titreşim yaptığı yani herhangi bir kuvvet olmaması durumunda  $f(t) = 0$  yazılarak denklem yeniden yazılırsa,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (1.4)$$

elde edilir (Chopra, 2006). Bu denklem çözümlerse,

$$k - \omega^2 m = 0 \quad (1.5)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.6)$$

Sönümsüz doğal açısal frekansı yani  $\omega$  elde edilir.

Söz konusu yapının viskoz sönümlü olması durumunda ise hareket denklemi (1.2) deki denklem ile ifade edilir.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1.7)$$

ifadesiyle verilir. Serbest titreşim durumunda bu denklem,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (1.8)$$

ifadesine dönüşür ve bu denklemin çözümü için,

$$x(t) = X e^{st} \quad (1.9)$$

olduğu kabulü ile ( $s$  karmaşık sayı) hareket denklemi,

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (1.10)$$

olur. Denklemin çözümünde,

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

$$= -\omega\xi \pm i\omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (1.11)$$

$$= -\omega\xi \pm i\omega_d$$

Burada;  $\omega$  sönümsüz doğal açısal frekansı,  $\omega_d$  sönümlü doğal açısal frekansı,  $\xi$  ise sönüm oranıdır. Bu ifadede geçen sönümlü doğal açısal frekans ve sönüm oranı ise,

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (1.12)$$

ve

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (1.13)$$

Şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $c_{cr}$  kritik sönümü göstermektedir. Buradan elde edilen  $s_{1,2}$  değerleri (1.9) denkleminde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} x(t) &= X e^{(-\omega\xi \pm i\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \\ &= X e^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Bu denklemde  $\omega\xi$  ifadesi gerçek kısmı,  $\omega\sqrt{1-\xi^2}$  olarak yazılan kısım ise sanal kısmı ifade etmektedir. Yapının zorlanmış titreşim yaptığı düşünülürse hareket denklemi (1.2)'de verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü,

$$f(t) = Fe^{i\omega t} \quad (1.15)$$

ve

$$x(t) = Xe^{i\omega t} \quad (1.16)$$

olarak kabul edilirse ve bu ifadeler (1.7) denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(-\omega^2 m + i\omega c + k) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.17)$$

Denklemini elde edilir. Bu denklemden zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü bir yapının frekans davranış fonksiyonu  $H(\omega)$ ,

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(\omega c)} \quad (1.18)$$

şeklinde elde edilir. Frekans davranış fonksiyonunun genlik ve faz açısı,

$$|\alpha(\omega)| = \frac{|X|}{|F|} = \frac{1}{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2} \quad (1.19)$$

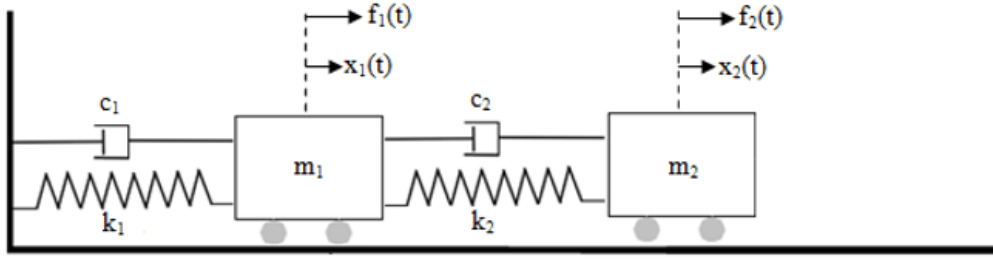
ve

$$\angle \alpha(\omega) = \angle X - \angle F = \text{tg}^{-1} (-\omega c / (k - \omega^2 m)) = -\theta_\alpha \quad (1.20)$$

İfadesi ile elde edilir. Burada  $|\alpha(\omega)|$  frekans davranış fonksiyonuna ait genlik,  $\theta_\alpha$  frekans davranış fonksiyonuna ait faz değerini göstermektedir.

### 3.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Çok serbestlik dereceli sistemlerde skaler büyüklükler vektörlerle ve matris büyüklükleriyle tanımlanır (Chopra, 2006). İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Çok serbestlik dereceli sistem modeli

n serbestlik derecesine sahip sistemin genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.21)$$

denklemi ile verilebilir. Burada  $[K]$ ,  $[C]$ ,  $[M]$  matrisleri sırasıyla rijitlik, sönüm ve kütle matrisleri olarak verilmiş olup,  $\{f(t)\}$ ,  $\{x(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$ ,  $\{\ddot{x}(t)\}$  vektörleri ise sırası ile kuvvet, yerdeğiştirme, hız, ivme vektörlerini göstermektedir.

Yapıda sönüm olmaması halinde (1.21) denkleminde  $[C] = 0$  yazılır ve denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.22)$$

olur ve denklemin çözümü için,

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (1.23)$$

olduğu varsayılır. Burada  $\{X\}$   $n \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız genliği göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapılarak (1.23) varsayımıyla (1.22) çözüldüğünde,

$$([K] - \omega^2[M])\{X\}e^{i\omega t} = 0 \quad (1.24)$$

bulunur ve bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det[[K] - \omega^2[M]] = 0 \quad (1.25)$$

olmalıdır. Burada denklemin çözümünden N serbestlik derecesi kadar özvektör, buna bağlı olarak açısal frekanslar ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N$ ) elde edilmiş olur. Herbir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, modşekili olarak tanımlanmaktadır. Doğal frekanslarda en küçük frekans temel frekans, buna karşılık gelen mod şekli ise temel mod şekli olarak isimlendirilir (Petyt, 1990).

Yapının tepki modelini oluşturabilmek için söz konusu yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştiği varsayılırsa yer değiştirme ve kuvvet vektörleri,

$$\{f(t)\} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (1.26)$$

ve

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (1.27)$$

olarak kabul edilir. Burada  $\{F\}$ ,  $\{X\}$  vektörleri  $n \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız, kompleks genlikli vektörler olarak isimlendirilir. Bu ifadeler (1.22) formülünde yerine yazılır ve düzenlenirse,

$$([K] - \omega^2[M])\{X\}e^{i\omega t} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (1.28)$$

bilinmeyen tepkinin bulunabilmesi için düzenlenen formül,

$$\{X\} = ([K] - \omega^2[M])^{-1}\{F\} \quad (1.29)$$

ve

$$\{X\} = [\alpha(\omega)]\{F\} \quad (1.30)$$

elde edilir. Burada  $[\alpha(\omega)]$   $n \times n$  boyutunda frekans davranış fonksiyonudur.



## **BÖLÜM 4. HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ**

### **4.1. Yapı Hasarları**

Depremden hemen sonra daha büyük can ve mal kayıplarının önüne geçmek için yapı hasarlarının belirlenmesi çok önemlidir ancak bu işlem ortamın bir afet bölgesi olmasından dolayı zordur. Kısa zamanda ve uzman ekiplerce yapılması gereken hasar tespitinde uzman ekipleri bir araya toplamak zor ve zaman alıcıdır. Bu da tespitini hemen yapılmasını ve neticenin çabuk ortaya çıkmasını engeller.

Söz konusu tespit için ilgili kuruluşlarca yapı bilgi formları oluşturulmuş olup yapılacak güçlendirme çalışmalarında da bu formlardan yararlanılmaktadır.

Yapıların hasar dereceleri belirlenirken aşağıdaki 5 sınıfa göre değerlendirmenin uygun olduğu ifade edilmiştir (Celep, Z., Kumbasar, N., 2004).

#### **4.1.1. Hasar yok**

Taşıyıcı elemanlarda görünür çatlak yoktur. Duvar ve duvar ile çerçevenin birleşim bölgelerinde çizgisel çatlaklar var.

#### **4.1.2. Hafif hasar**

Duvar ve tavanda çatlaklar, sıva dökülmesi, taşıyıcı elemanlarda deprem dayanımını etkilemeyen küçük çatlaklar var.

### **4.1.3. Orta hasar**

Taşıyıcı duvarlarda köşegen veya diğer çatlaklar, kolon, kiriş ve perdelerde büyük çatlaklar mevcut.

### **4.1.4. Ağır hasar**

Duvarlarda ezilmeli büyük çatlaklar, kolon kiriş ve perdelerde küçük ayrılmalar mevcut.

### **4.1.5. Çok ağır hasar**

Taşıyıcı elemanlar ve birleşim bölgelerinde çok fazla hasar ve ayrılmalar binanın tümünde çarpılma, kısmen veya tamamen göçme mevcut.

## **4.2. Türkiye Deprem Yönetmeliği 2018 Bina Performans Düzeyleri**

TDY 2018'de hasar durumları bina performans düzeyleri olarak 4 başlık altında toplanmıştır.

### **4.2.1. Kesintisiz kullanım (KK) performans düzeyi**

Bu performans düzeyi, bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı duruma karşılık gelmektedir.

#### 4.2.2. Sınırlı hasar (SH) performans düzeyi

Bu performans düzeyi, bina taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği diğer deyişle doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı hasar düzeyine karşılık gelmektedir.

#### 4.2.3. Kontrollü hasar (KH) performans düzeyi

Bu performans düzeyi, can güvenliğini sağlamak üzere bina taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyine karşılık gelmektedir.

#### 4.2.4. Göçmenin önlenmesi (GÖ) performans düzeyi

Bu performans düzeyi, bina taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi duruma karşı gelmektedir. Binanın kısmen veya tamamen göçmesi önlenmiştir.

2018 Türkiye Deprem Yönetmeliğine göre izin verilen şekil değiştirme sınırları yeni betonarme bina elemanları için Tablo 4.1.'de, çelik kolonlar için plastik dönme sınırları Tablo 4.2.'de, çelik kiriş plastik dönme sınırları Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Yeni betonarme bina elemanları için izin verilen dönme sınırları [TBDY 2018]

Göçmenin önlenmesi performans düzeyi	$\theta_p^{(GÖ)} = 2/3[(\phi_u - \phi_y)L_p(1-0,5L_p/L_s)+4,5\phi_u d_b]$
Kontrollü hasar performans düzeyi	$\theta_p^{(KH)} = 0,75\theta_p^{(GÖ)}$
Sınırlı hasar performans düzeyi	$\theta_p^{(SH)} = 0$

Tablo 4.1.'de verilen formüllerde kullanılan  $\theta_p^{(GÖ)}$  göçmenin önlenmesi performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırını,  $\theta_p^{(KH)}$  kontrollü hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırını,  $\theta_p^{(SH)}$  sınırlı hasar performans düzeyi

için izin verilen plastik dönme sınırını,  $\phi_u$  göçme öncesi eğriliği,  $\phi_y$  akma eğriliğini,  $L_p$  plastik mafsalsal boyunu,  $L_s$  kesme açıklığını,  $d_b$  boyuna donatı çapını, göstermektedir.

Tablo 4.2. Çelik kolonlarda plastik dönme sınırları [TBDY 2018]

Kolon (eğilme)	Plastik dönme sınırları ( rad.)		
	SH	KH	GÖ
$P/P_c < 0,20$			
Süneklik düzeyi yüksek	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$9\theta_y$
Süneklik düzeyi sınırlı	$0,25\theta_y$	$3\theta_y$	$4\theta_y$
$0,20 < P/P_c < 0,50$			
Süneklik düzeyi yüksek	$1,5(1-1,66 P/P_c)\theta_y$	$9(1-1,66 P/P_c)\theta_y$	$13,5(1-1,66 P/P_c)\theta_y$
Süneklik düzeyi sınırlı	$0,25\theta_y$	$0,7\theta_y$	$1\theta_y$
Kayma bölgesi	$1\theta_y$	$9\theta_y$	$12\theta_y$

Tablo 4.2.'de ve Tablo 4.3.'de verilen P maksimum plastik dönme durumunda çelik kesitte bulunan eksenel yükü,  $P_c$  çelik elemanın beklenen eksenel basınç dayanımını,  $\theta_y$  akma dönmesini göstermektedir.

Tablo 4.3. Çelik kirişlerde plastik dönme sınırları [TBDY 2018]

Kiriş (eğilme)	Plastik dönme sınırları ( rad.)		
	SH	KH	GÖ
Süneklik düzeyi yüksek	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$9\theta_y$
Süneklik düzeyi sınırlı	$0,25\theta_y$	$3\theta_y$	$4\theta_y$

Çelik kolonlar için akma dönmesi  $\theta_y$  (4.1.) formülü ile hesaplanır.

$$\theta_y = \frac{W_P F_{ye} l_k}{6 E I_k} \times \left[ 1 - \frac{P}{P_{ye}} \right] \quad (4.1)$$

Formülde kullanılan  $W_p$  plastik dönme mukavemetini,  $F_{ye}$  yapı çeliğinin beklenen akma gerilmesini,  $l_k$  kolon boyunu,  $E$  yapı çeliği elastisite modülünü,  $I_k$  kolon kesit eylemsizlik momentini,  $P_{ye}$  çelik elemanın beklenen aksel akma kuvvetini göstermektedir.

### **4.3. Yapı Hasar Tespitinde Kullanılan Deneysel Yöntemler**

Yapının dinamik davranışını gösteren doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarını belirlemek için deneysel yöntemlere başvurulmaktadır. Bu deneysel yöntemlerden ikisi “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” ve “Operasyonel Modal Analiz Yöntemi”dir.

#### **4.3.1. Deneysel modal analiz yöntemi**

Deneysel Modal Analiz Yöntemi yapıya uygulanan bir etki sonucu ortaya çıkan titreşimleri dikkate alarak o yapının doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranlarının deneysel olarak tespit edilmesinde kullanılan bir yöntemdir.

Birçok Mühendislik alanında uygulanabilen deneysel modal analiz yöntemi çalışmaları 1940’lı yıllara dayanmaktadır. Demiryollarında raylar titreştirilerek hasarları belirlemek ve uçak parçalarının dinamik karakteristiklerini belirlemek için kullanılmaya başlanmıştır (Yetkin, 2016).

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan yapı analizleri belirli kabuller yapılarak oluşturulmakta fakat zaman ile yapı üzerindeki çeşitli etkiler sonucu bu kabullerin sınır şartları değişebilmektedir. Dolayısı ile oluşturulan sonlu elemanlar yöntemi sonuçları zaman içerisinde gerçek yapı modelini temsil edememektedir. Bu durumda yapının mevcut durumunu temsil edecek dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi gerekir. Bu ise Deneysel Modal Analiz yöntemi ile yapılmaktadır (Türker, 2005).

#### **4.3.1.1. Genel kurallar**

Deneysel Modal Analiz Yöntemi beş ana başlık altında toplamak mümkündür (Ercan ve ark., 2009).

1. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi,
2. Yapının etki ile titreştirilmesi ve verilerin toplanması,
3. Yapıya ait frekans davranış fonksiyonunun çıkarılması,
4. Modal parametrelerin bulunması,
5. Sonuçlar ve değerlendirmelerin yapılmasıdır.

#### **4.3.2. Operasyonel modal analiz yöntemi**

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde yapı belirli bir kuvvet ile uyarılmak yerine taşıt yükü, rüzgar veya yaya gibi bilinmeyen çevresel etkiler ile uyarılmakta ve yapının bu etkiler altındaki titreşimlerinin zaman frekans ortamında işlenmesi ile doğal frekans, sönüm oranları, mod şekilleri gibi yapının dinamik analizi elde edilmektedir.

Bu yöntemde yapı belirli bir kuvvetle uyarılmadığı için yapı üzerinde herhangi bir hasar oluşma durumu söz konusu değildir. Bu sebeple Operasyonel Modal Analiz Yöntemi daha çok tarihi köprü, baraj, cami, kubbe gibi yapılarda tercih edilmektedir(Bayraktar ve ark., 2011).

Yapıların dinamik karakteristikleri deneysel yöntemler veya teorik yöntemler ile belirlenir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde elde edilen veriler direk yapı üzerinden deneysel olarak belirlenmesi sebebi ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen teorik verilerden daha güvenilir ve gerçekçidir.

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sadece İnşaat Mühendisliği alanında değil diğer Mühendislik alanlarında da kullanılan ve tercih edilen bir yöntemdir. Operasyonel modal analizde ölçümlerden elde edilen veriler işlenip modal analiz programına aktarılır. Bu programda yapı parametreleri frekans ortamında ayrışım ve stokastik altalan belirleme yöntemleri ile bulunmaktadır. Buradan elde edilen verilere göre yapı dinamik karakteristikleri belirlenebilir.(Bayraktar ve ark., 2010).

#### **4.3.3. Modal analiz yöntemleri kullanım alanları**

Küçük ve orta hacimli yapılarda büyüklüğü bilinen bir kuvvetin çekiç veya titreştirici ile uygulanması durumunda yapı dinamik karakteristikleri kolay bir şekilde belirlenebilir. Fakat yüksek binalar, köprüler veya hacim olarak büyük binalarda titreşim oluşturmak zor ve maliyetli olduğundan bu tür yapıları titreştirmek ciddi zorlukları beraberinde getirir. Bu tür yapılarda çevresel titreşimlerin kullanılarak dinamik karakteristiklerin belirlenmesi gerekir (Yetkin, 2016). Yapılarda belirli bir kuvvet etkisiyle meydana gelen titreşimlerden dolayı oluşan etkilerin belirlenmesi, dinamik karakteristiklerin tespit edilmesi deneysel modal analiz yöntemi ile yapılmaktadır.

#### **4.3.4. Test düzeni bileşenleri**

Modal Analiz Yöntemlerinde kullanılan ekipmanı titreştiriciler, ivmeölçerler, veri toplama cihazları ile veri işleme ve yazılımlar olarak 4 başlık altında toplamak mümkündür.

#### 4.3.4.1. Titreştiriciler

Modal Analiz Yöntemlerinde yapıyı titreştirmek önem arz etmektedir. Mevcut yapının titreştirilmesi çekiç, titreştirici gibi yapay olarak sağlanır veyahut çevresel etkilerden kaynaklı titreştirilir.

Deneysel Modal Analiz Yönteminde genel olarak kullanılan titreştiriciler; sarsma tablası, titreştirici veya çekiçtir. Bunlar yapının büyüklükleri ile doğru orantılı olarak seçilmelidir. Bu durum söz konusu analizin maliyetini etkileyen faktörlerden biridir.

Çekiç kullanılması durumunda yapıyı titreştirici kullanımına göre daha kolay titreştirmek mümkün olup yapının hacimsel büyüklüğü de dikkate alınmalıdır. Çekiçler içerisinde yapıya aktarılan kuvvetlerin ölçümü yine çekiç üzerinde olan sensörler ile ölçmek mümkündür. Bu sensörler ile ölçülen uygulama kuvvetinin yapıya uygulanan kuvvet ile aynı olduğu kabul edilmektedir. Şekil 4.1.'de örnek bir çekiç verilmiştir.



Şekil 4.1. Çekiç(Osmancıklı, 2012)

Çekiç ucunun yumuşak olması kuvvetin tamamen yapıya geçmesini ve çekicinin teperek yapıya birkaç kez vurulmasını engeller.

Titreştirici kullanımı seçilmesi durumunda büyük kuvvetlerden dolayı yapıda hasar oluşmaması ve başka sonuçlar ortaya çıkmaması adına seçilen titreştirici ve

uygulama kuvveti seçimi önem arz etmektedir. Ayrıca titreştiricinin yapı üzerinde ankastre olarak mesnetlenmesi gerekir.

Bu analizde bir diğer yöntemde yapının belli bir ölçekli modelini sarma tablası üzerinde dinamik analizleri yapılarak sonuçları gerçek yapı tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılıp değerlendirilmesidir. Burada en önemli nokta uygun bir ölçekleme faktörü belirlemektir. Çok büyük bir ölçekleme faktörü seçmek küçük bir modelin ortaya çıkmasına yol açacak ve buda sonuçların güvenilirliğini azaltacaktır. Çok küçük bir ölçekleme faktörü seçiminde maliyetli bir modelin ortaya çıkmasına neden olacaktır. Sarsma tablasının taşıyabileceği azami yükte unutulmamalıdır. Seçilen modele sarma tablası üzerinde kayıtlı deprem ivme kayıtları uygulanarak değerlendirmelerde yapılabilir.

#### **4.3.4.2. İvmeölçerler**

Dinamik analiz, kimliklendirme ve yapı sağlı tespiti ve takibi çalışmalarında yapı titreşimlerini ölçmek için kullanılan aletlerdir. İvmeölçerler kolay kullanım olanakları sunmasıyla beraber yapının frekans aralığına uygun istenen bilgileri verecek şekilde seçilmelidir. Deneysel Modal Analiz Yönteminde çoklukla tercih edilen ivmeölçer piezoelektrik ivmeölçerleridir. Doğru verilerin elde edilebilmesi için ivmeölçer seçimine dikkat edilmelidir (Altunışık, 2010).

İvmeölçerler tek eksenli, iki eksenli, üç eksenli olarak çeşitleri olup çalışmalarda kullanılacak bütün ivmeölçerlerin üç eksenli olarak seçilmesi durumunda pek çok eksenden ölçüm ve veri akışı olacağından bilgi kirliliğine sebep olunacaktır.

İvmeölçerlerin yapıya bağlanma yöntemleri ise civatalı bağlantı, mıknatıslı bağlantı, mum tabakası ile bağlama, kablo bağı ile bağlama veya el ile tutma yöntemleridir.

#### 4.3.4.3. Veri toplama cihazları ve veri işleme

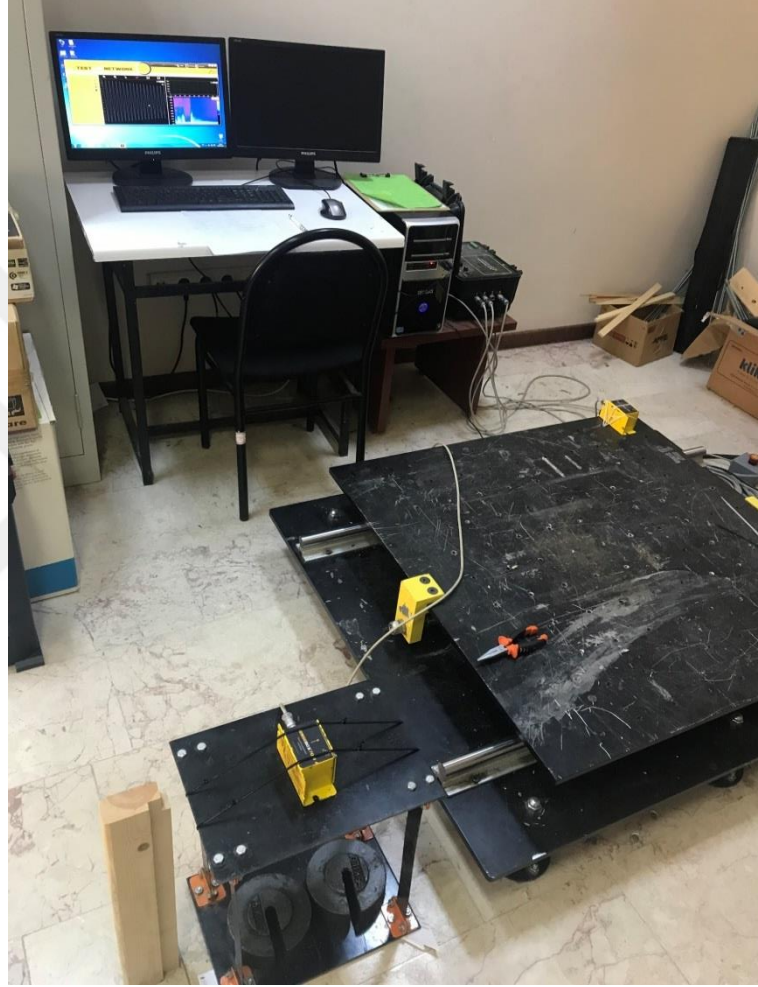
Veri toplama cihazları; veri toplama ünitesi ve bilgisayarlardan oluşur. Veri toplama ünitesi yardımıyla ivmeölçerlerden gelen veriler bilgisayara aktarılır. İvmeölçerler yapıdan gelen tepki sinyallerini aktarsalar da bu sinyaller içerisinde aynı zamanda ortamdaki gürültüleri de (insan, kuş, rüzgar vb.) alırlar. Bu sebeple yapının dinamik karakteristiklerinin doğru olarak belirlenebilmesi için söz konusu sinyallerin filtrelenmesi gerekir. Filtrelenecek olan sinyaller seçilen frekans aralığının üstünde kalan yüksek frekans sinyalleridir (Türker, 2011). Şekil 4.2.'de çalışmada kullanılan veri toplama cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Test box 2010 dinamik veri toplama cihazı

Yapıların doğal frekans, periyot, sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ivmeölçerlerden gelen bilgilerin veri toplama cihazına buradan da bilgisayar ortamına işlenmesiyle başlar ve çeşitli yazılımlar ile sonuçlar elde edilir.

Bu tez çalışmasında Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi 24 bit testbox 2010 veri toplama cihazı ve sensebox7001 ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerlerden alınan sinyallerin bilgisayar ortamına işlenmesi ve kayıt altına alınması ise easytest-network veri toplama ve analiz yazılımı ile yapılmıştır.



Şekil 4.3. Yapı modeli, ivmeölçer ve data toplama ünitesi

### 4.3.5. Çalışmada kullanılan yazılımlar

#### 4.3.5.1. SAP 2000 programı

SAP 2000 yazılımı yapı sistemi modelleme ve modellerin geliştirilmesi, analizlerinin yapılması için kullanılan genel amaçlı bir analiz programıdır. Çalışma prensibi sonlu elemanlar yöntemidir. Bu program ile tasarım yapılması sırasında aşağıdaki yollar izlenir,

1. Sistem modelinin oluşturulması
2. Malzeme özelliklerinin tanımlanması
3. Kesit özelliklerinin tanımlanması
4. Yüklerin tanımlanması
5. Çözüm (Analiz)
6. Boyutlandırma

SAP 2000 programında tasarım program analiz sonuçlarına göre optimum düzeyde yapılmakta ve Uluslararası standartlar ile örtüşen betonarme, çelik, Alüminyum, Donatı çeliği, öngerme kablosu gibi malzemelerle yapılar tasarlanmaktadır (Özmen ve ark. 2009).

#### 4.3.5.2. Seismosignal yazılımı

Seismosignal mühendis ve sismologların ihtiyaç duydukları birçok tasarım parametresini üretme ve filtreleme özelliğine sahip güçlü hareket verilerini işlemeye yarayan bir bilgisayar programıdır. Hızlı fourier dönüşümleri ile (FFT) birçok yapı parametrelerine ve diyagramlarına bu program ile ulaşılabilir. Bu çalışmada da filtreleme yöntemi olarak bu program kullanılmıştır.

#### 4.3.6. Filtreleme Yöntemi

Bu tez çalışmasında verilerin filtrelenmesinde bandpass filtreleme kullanılmıştır. Bu yöntem, belirlenen iki frekans değerinin arasında kalan harmonik fonksiyonların yeniden ifadesi için kullanılmaktadır. Birinci frekans değerinden küçük ve ikinci frekans değerinden büyük hareketler gürültü olarak ayıklanmaktadır (Hakkak. 2012). 01.00 Hz'den küçük ve 10.00 Hz'den büyük olan hareketler gürültü olarak filtrelenmiştir.



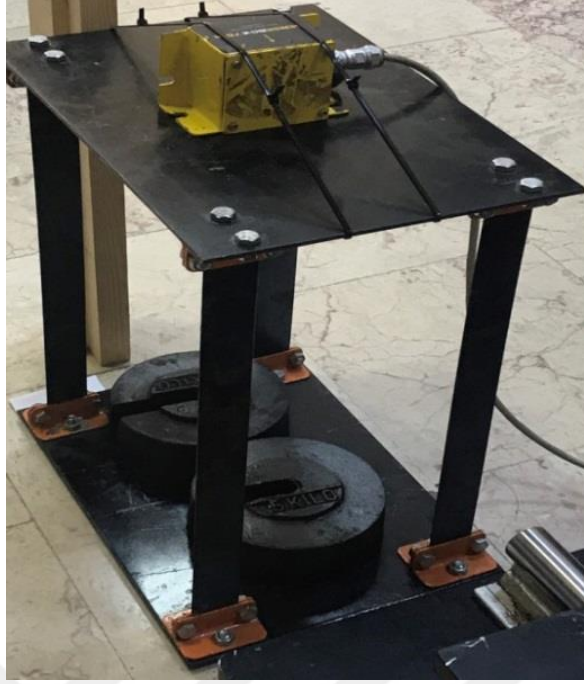
## **BÖLÜM 5. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Bölüm 4'de verilen bilgiler ışığında Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak model yapı üzerinde çeşitli hasar senaryolarına göre ivme ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler Seismosignal programı ile işlenmiştir. Ayrıca yapı modeli SAP 2000 programı ile de analiz edilerek dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

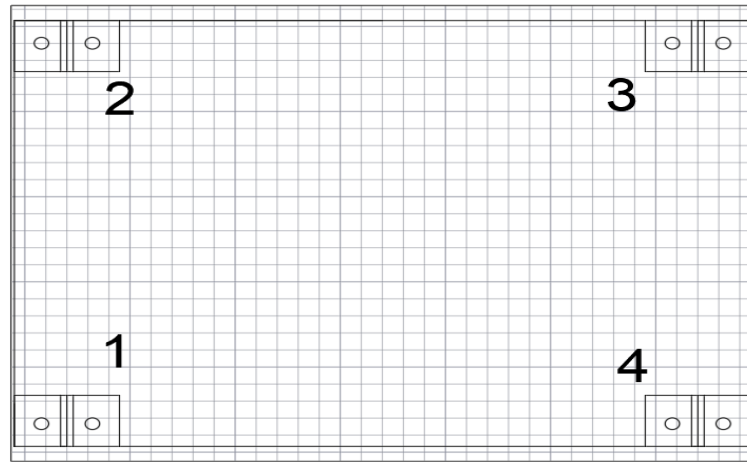
### **5.1. Model Yapının Geometrik Özellikleri ve Boyutları**

Çalışmada kullanılan model tek katlı tek açıklıklı olarak tasarlanmış olup model kenar uzunlukları 350x250mm. olan rijit diyafram ve uzunlukları 350 mm. olan dört adet kolondan oluşmaktadır. Rijit diyafram 4 mm kalınlığında çelik levhadan, kolonlar ise 1 mm. et kalınlığında 35 mm. genişliğinde C75 yay çeliğinden imal edilmiştir. Yay çeliğinin elastisite modülü 200 GPa'dır. Her bir kolon kat düzlemlerine 2 adet köşebent ve 4 adet civata ile ankastre bağlanmıştır. Modelin toplam ağırlığı 7334 gr. dir.

Üzerine ivmeölçer yerleştirilmiş yapı modeli Şekil 5.1.'de verilmiştir. Şekil 5.2.'de kolon numaralandırma gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Yapı modeli



Şekil 5.2. Kolon numaralandırma

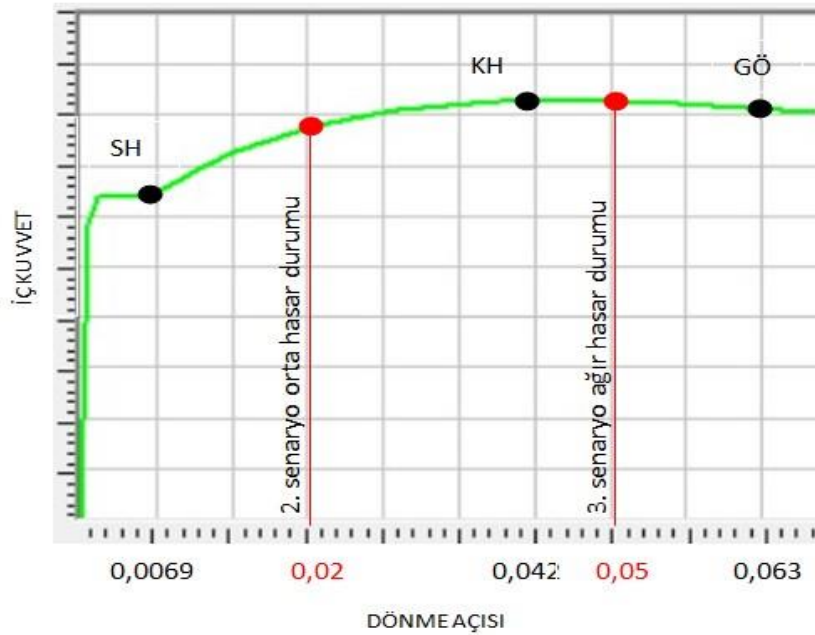
## 5.2. Hasar Senaryoları

Deneysel çalışmalarda model yapının hasarsız, orta hasarlı ve ağır hasarlı durumları incelenmiştir. Orta ve ağır hasar durumları için denklem 4.1.'de (TBDY 2018)

verilen bağıntılar kullanılarak hasar sınırları belirlenmiştir. Modelin fiziksel özellikleri dikkate alınarak  $\theta_y = 0,0069$  rad.(denklem 4.1) hesaplanmış olup Tablo 5.1.'de modelin plastik dönme sınırları ve Şekil 5.3.'de dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 5.1. Modele ait plastik dönme sınırları

	Plastik dönme sınırları (rad.)		
	SH	KH	GÖ
Süneklik düzeyi yüksek	0,0069	0,0414	0,0621
Süneklik düzeyi sınırlı	0,00173	0,0207	0,0276



Şekil 5.3. Hasar senaryolarına ait dönme açılarının TBDY 2018 göre yerleri

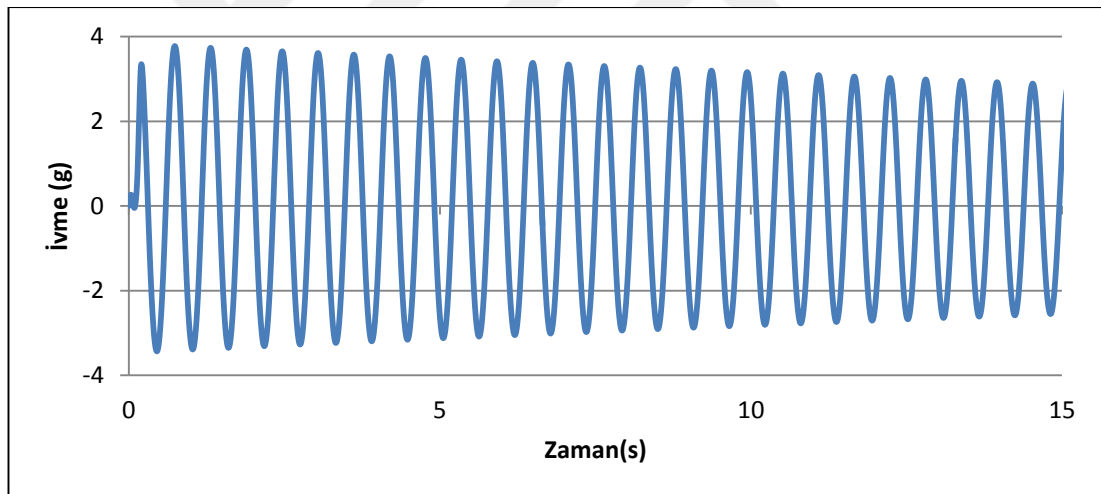
Yukarıda verilen Tablo 5.1. ve Şekil 5.3.'e göre TBDY 2018'e göre izin verilen sınırlar içerisinde dönme açıları seçilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda ilk önce model yapının hasarsız durumuna ait dinamik karakteristikler belirlenmiş olup daha sonra Şekil 5.2.'de verilen kolon numaralarına

göre model yapı kolonlarında çeşitli hasar senaryolarına göre irdeleme yapılmıştır. Yapılan çalışmalar 3 grupta toplanmıştır. Mafsalların kolon alt uçlarında meydana geldiği kabul edilmiştir.

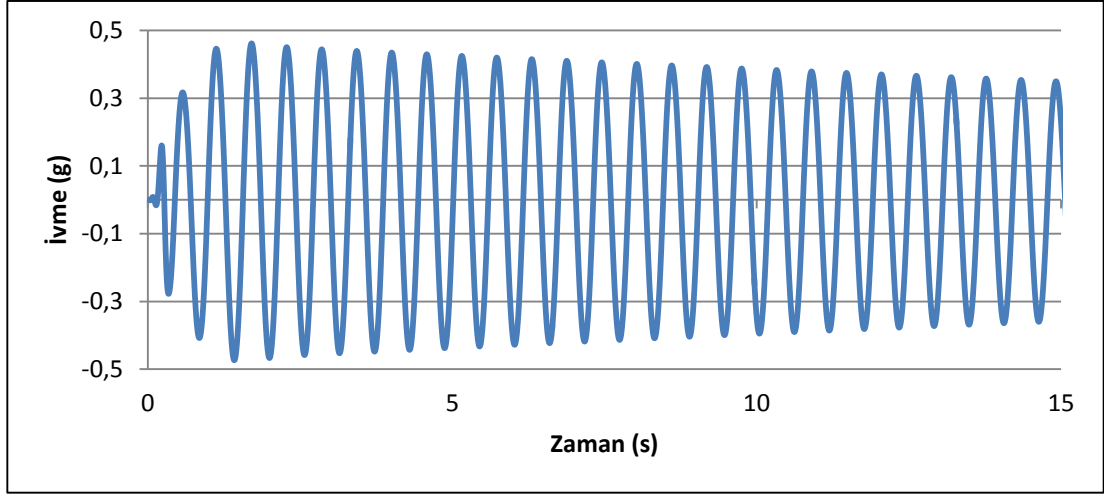
### 5.2.1. 1. Senaryo hasarsız durum

Bu senaryoda kolonlar levhaya köşebent ve civatalarla ankastre olarak bağlanmıştır. Kat hizasından 40 mm. yerdeğiştirme verilerek model yapı serbest titreşime bırakılmıştır. İvmeölçer ile zamana bağlı ivme kayıtları kaydedilmiş olup Şekil 5.3.'de ivme - zaman grafiği verilmiştir. Daha sonra seismosignal programı ile elde edilen ivme – zaman grafiğinin integrasyonundan hız- zaman grafiği elde edilmiş bu grafiğin integrasyonundan yerdeğiştirme - zaman grafiği elde edilmiştir.

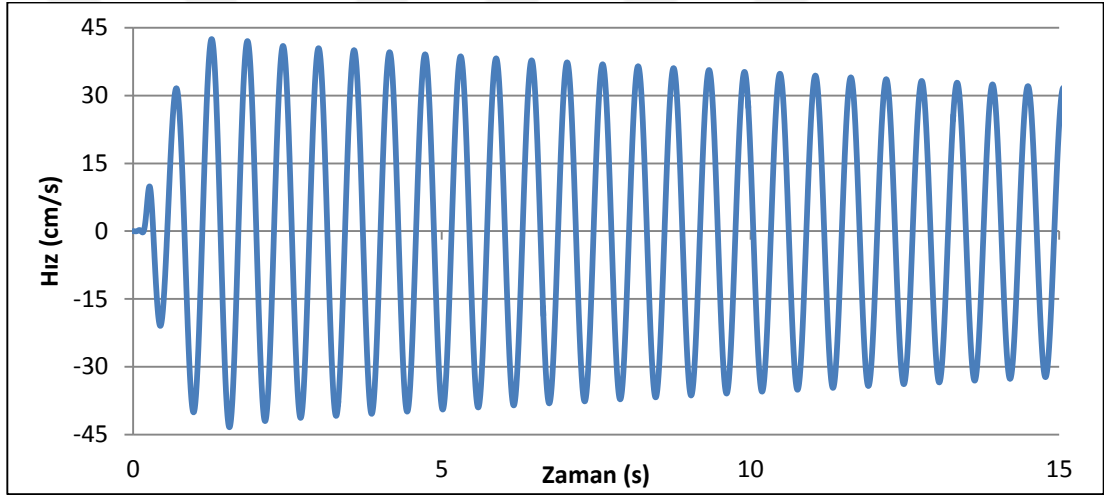


Şekil 5.4. Hasarsız durum filtrelenmemiş ivme – zaman grafiği

Seismosignal programı ile bu veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme – zaman grafiği Şekil 5.4.'de, hız –zaman grafiği Şekil 5.5.'de, yerdeğiştirme – zaman grafiği Şekil 5.6.'da ve Şekil 5.7.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Fourier genliğinin tepe noktası yapının doğal titreşim frekansını vermektedir. Bu tez çalışmasında fourier dönüşümü için Seismosignal programı kullanılmıştır. Şekil 5.7.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,754 Hz olarak görülmektedir.

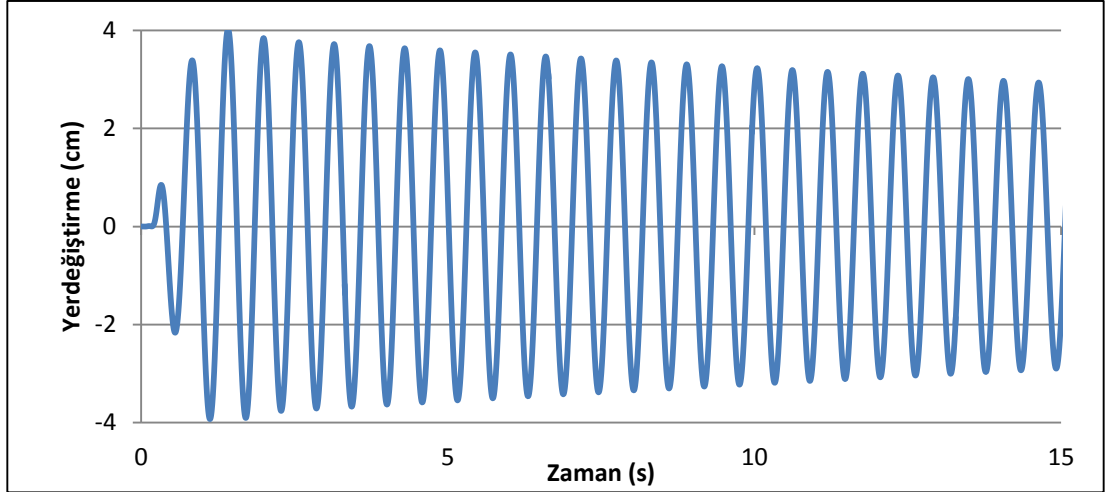


Şekil 5.5. Hasarsız durum filtrelenmiş ivme - zaman grafiği

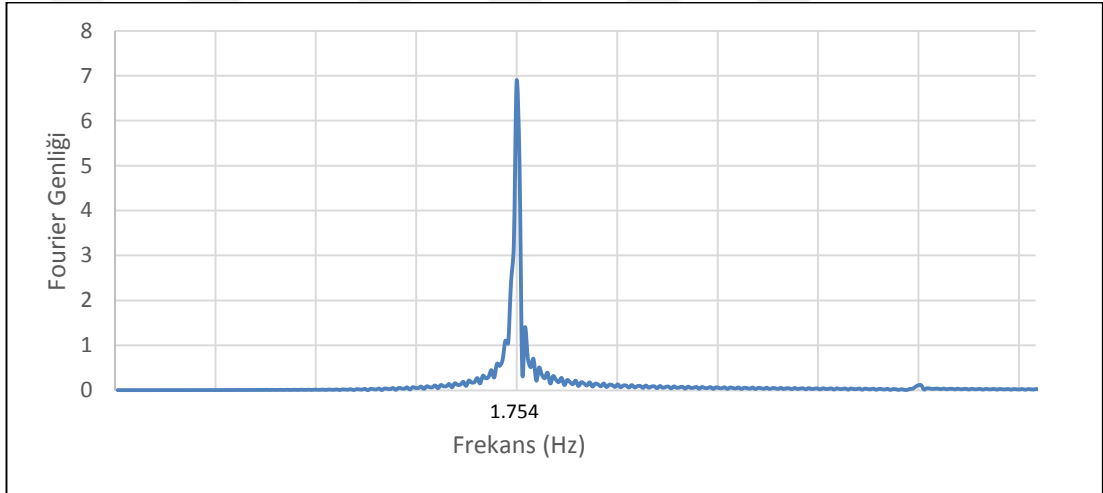


Şekil 5.6. Hasarsız durum filtrelenmiş hız - zaman grafiği

Bina yüksekliğine göre verilen 40 mm. başlangıç yerdeğiştirmesi yüksekliğe göre büyük bir değer olması sebebi ile filtresiz hız ve ivme değerlerleri yüksek çıkmaktadır.



Şekil 5.7. Hasarsız durum filtrelenmiş yerdeğiştirme - zaman grafiği



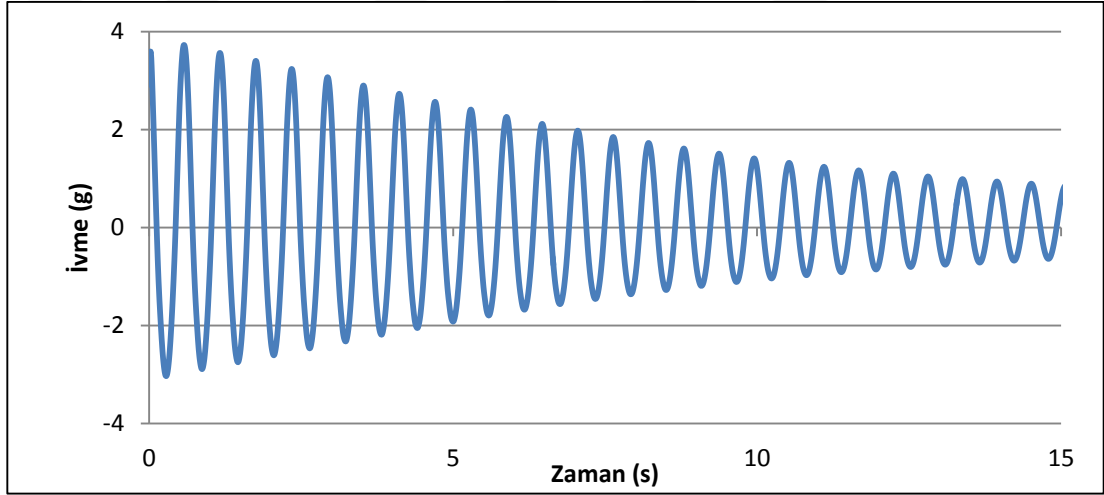
Şekil 5.8. Hasarsız durum fourier genliği

### 5.2.2. 2. Senaryo orta hasar durumu

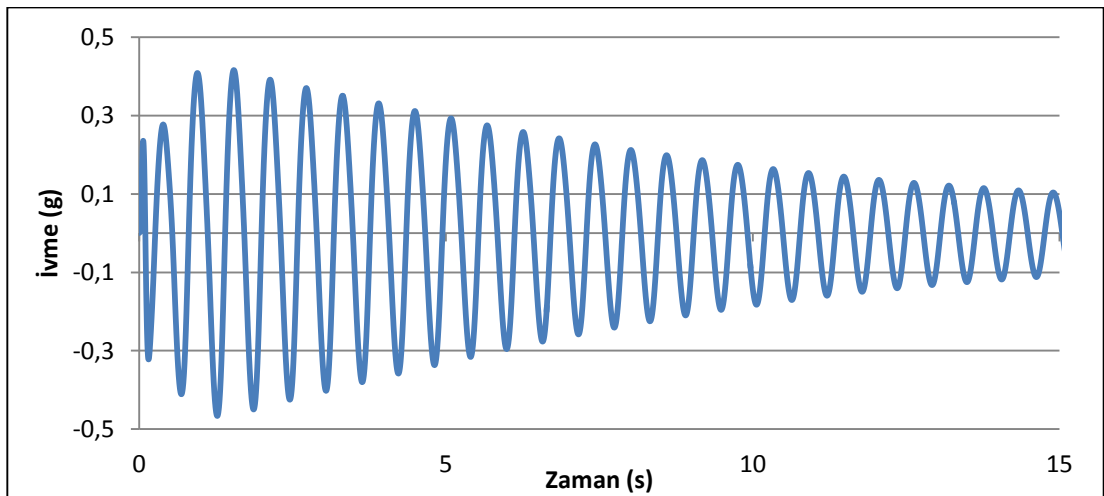
Çalışmada oluşturulan ikinci senaryoda temel bağlantı noktalarındaki köşebentler arasına kauçuk yerleştirilip kolon yatay hareketleri engellenerek 0,02 rad. dönmesine müsaade edilmiştir. Kat hizasından 40 mm. yerdeğiştirme verilerek model yapı serbest titreşime bırakılmıştır. Bu durumda orta hasar düşünülmüş olup diğer kolonlara da uygulanarak sistem dinamik parametreleri bulunmuştur.

### 5.2.2.1. 1 kolonda orta hasar oluşması durumu

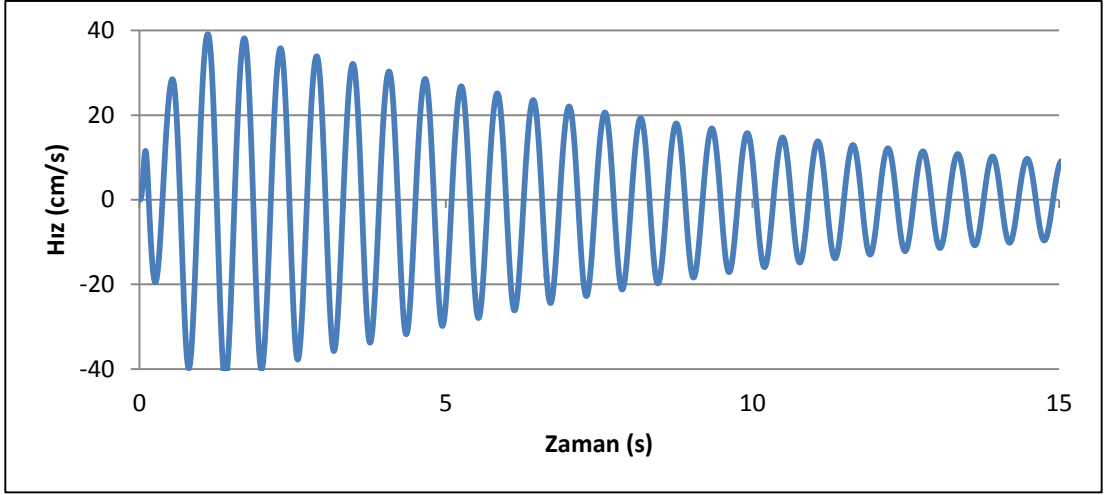
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre sadece 1. kolonda orta hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.8.'de verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme – zaman grafiği Şekil 5.9.'da, hız – zaman grafiği Şekil 5.10.'da, yerdeğiştirme – zaman grafiği Şekil 5.11.'de ve Şekil 5.12.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.12.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,724 Hz olarak görülmektedir.



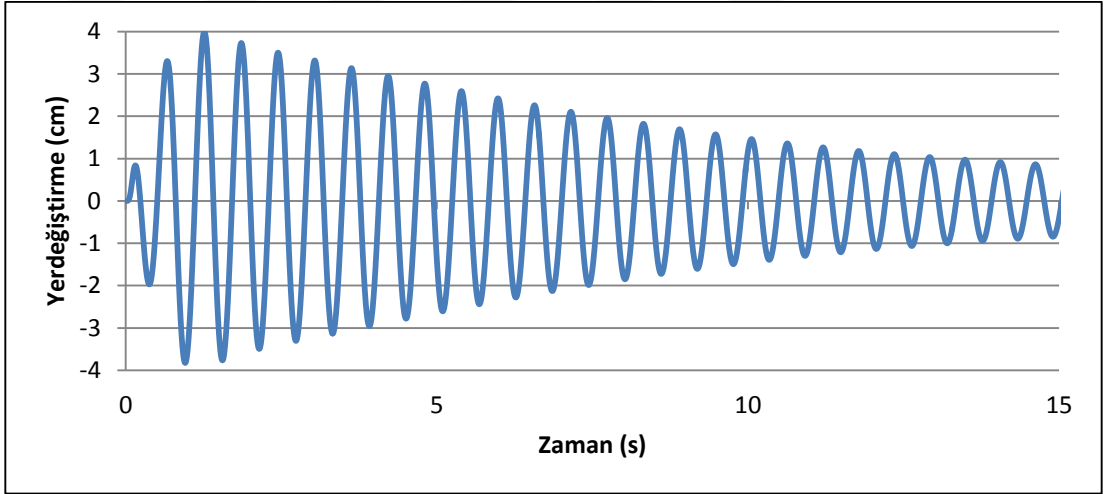
Şekil 5.9. 1 kolon orta hasar durumu filtelenmemiş ivme – zaman grafiği



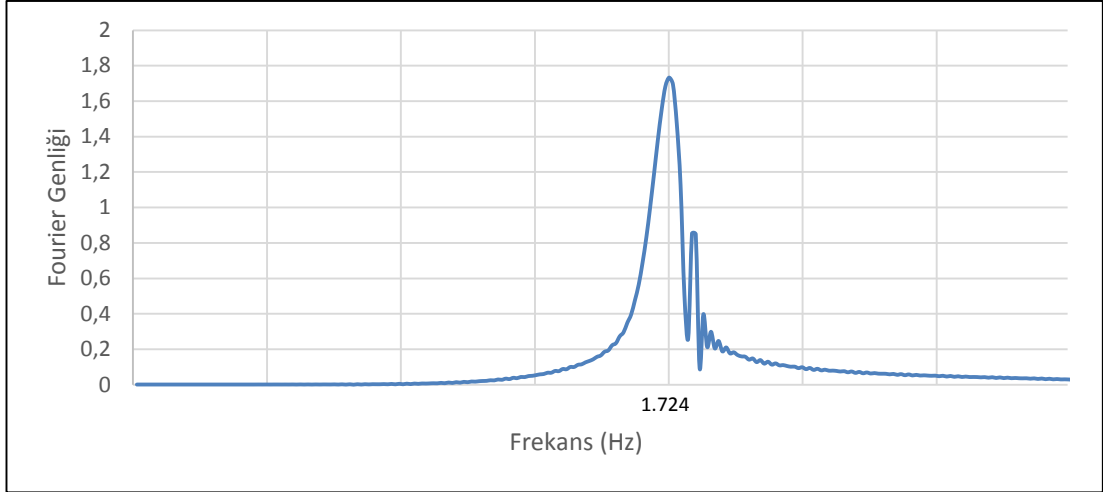
Şekil 5.10.1 kolon orta hasar durumu filtelenmiş ivme– zaman grafiği



Şekil 5.11.1 kolon orta hasar durumu filtrelenmiş hız – zaman grafiği



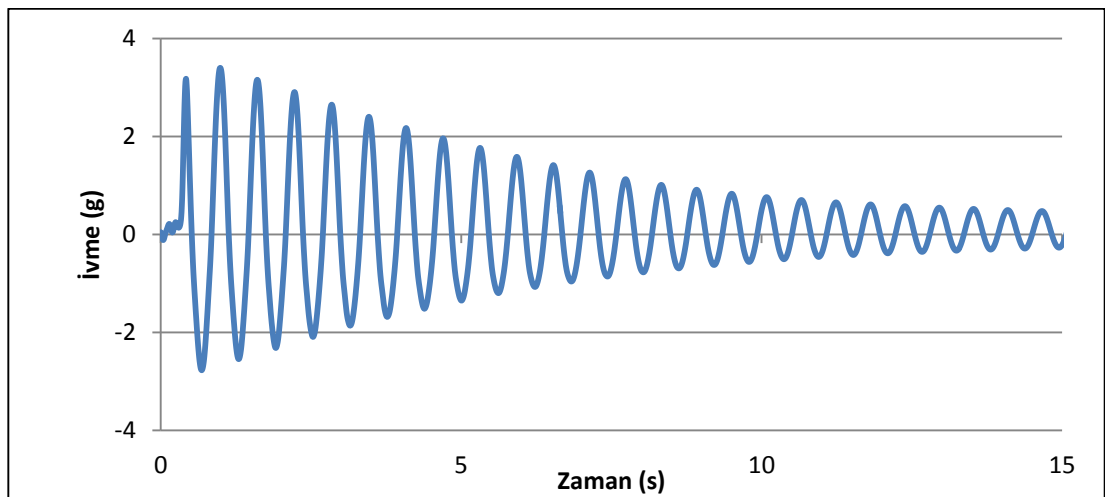
Şekil 5.12.1 kolon orta hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



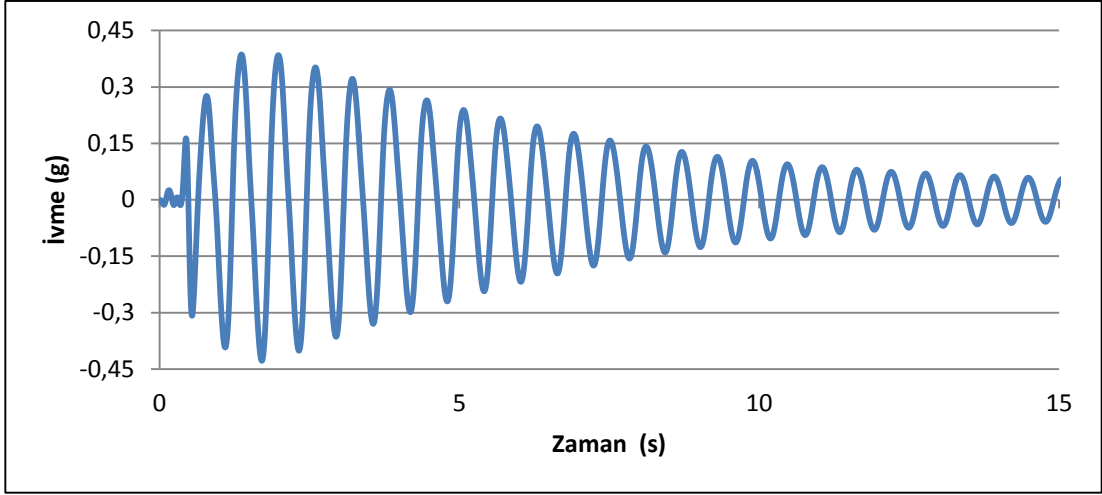
Şekil 5.13. 1 kolon orta hasar fourier genliği

### 5.2.2.2. 2 çapraz kolonda orta hasar oluşması durumu

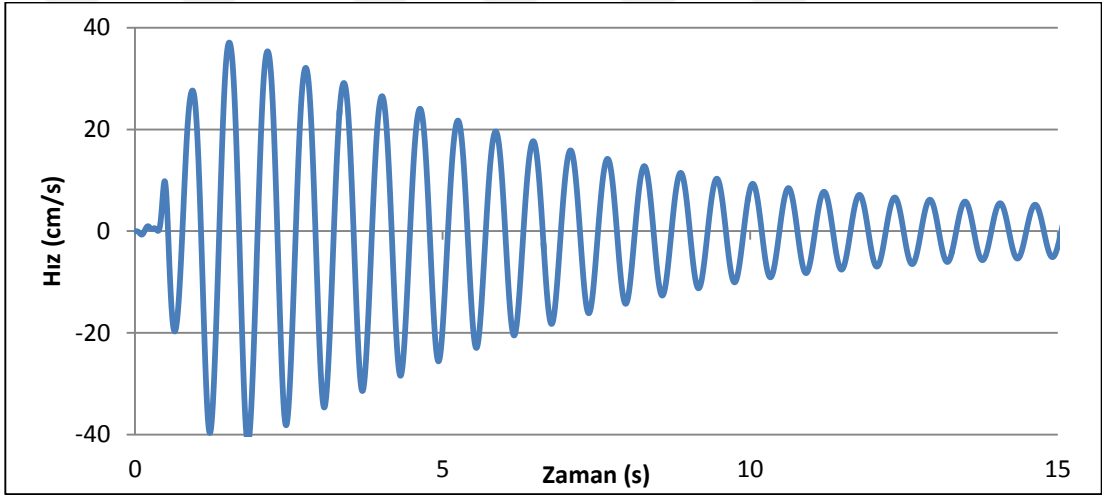
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre 1. ve 3. kolonda orta hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.13.'de verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme - zaman grafiği Şekil 5.14.'de, hız - zaman grafiği Şekil 5.15.'de, yerdeğiştirme - zaman grafiği Şekil 5.16.'da ve Şekil 5.17.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.17.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,635 Hz olarak görülmektedir.



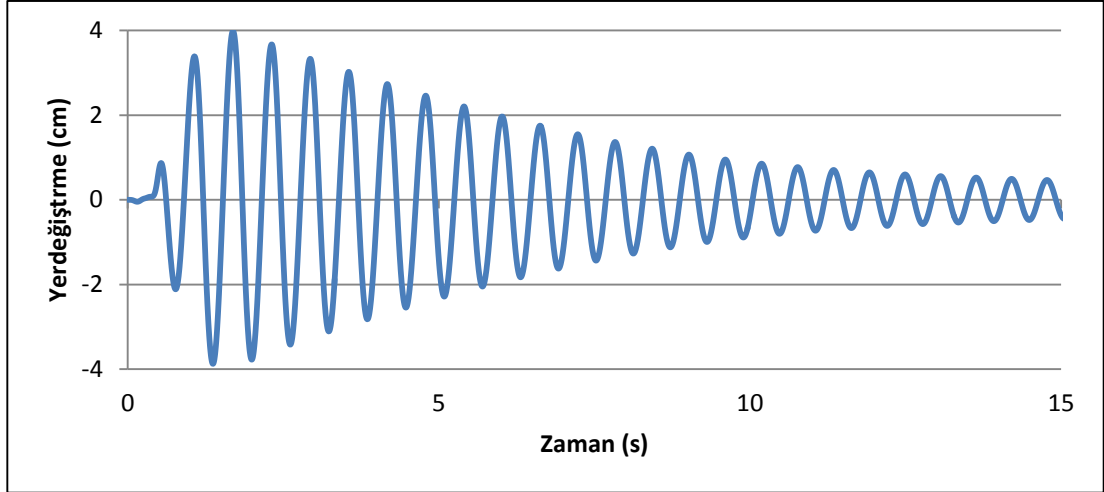
Şekil 5.14. 2 apraz kolon orta hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği



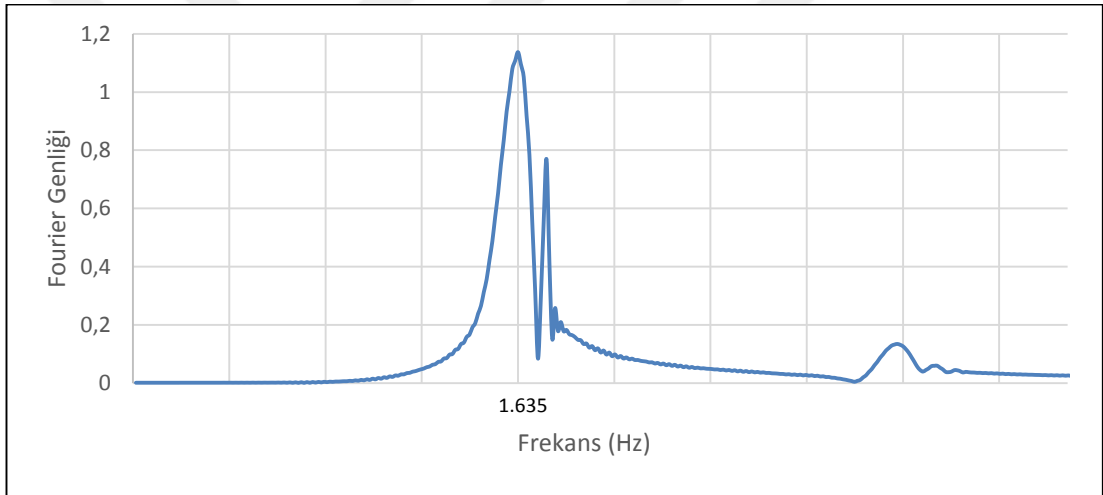
Şekil 5.15. 2 çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmiş ivme – zaman grafiği



Şekil 5.16. 2 çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmiş hız – zaman grafiği



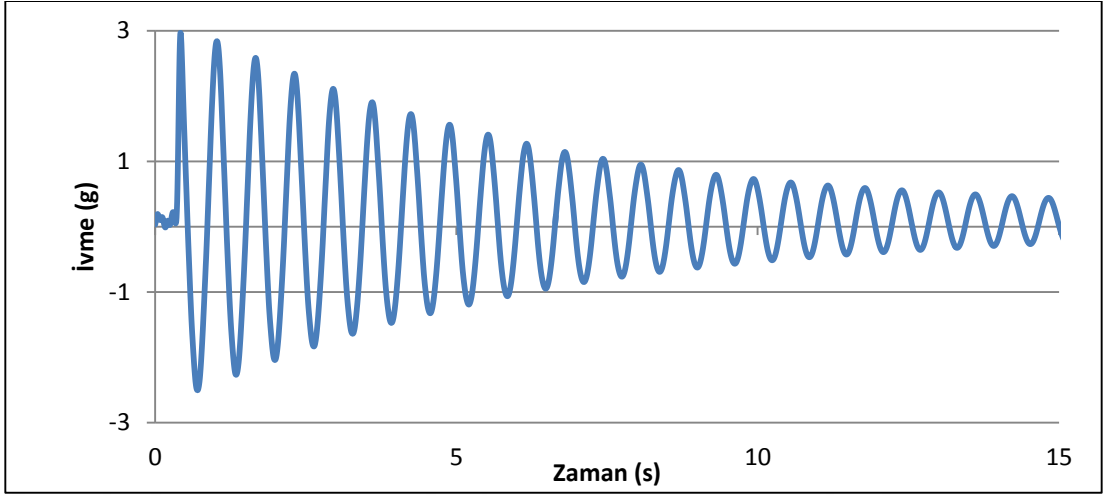
Şekil 5.17. 2 çapraz kolon orta hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



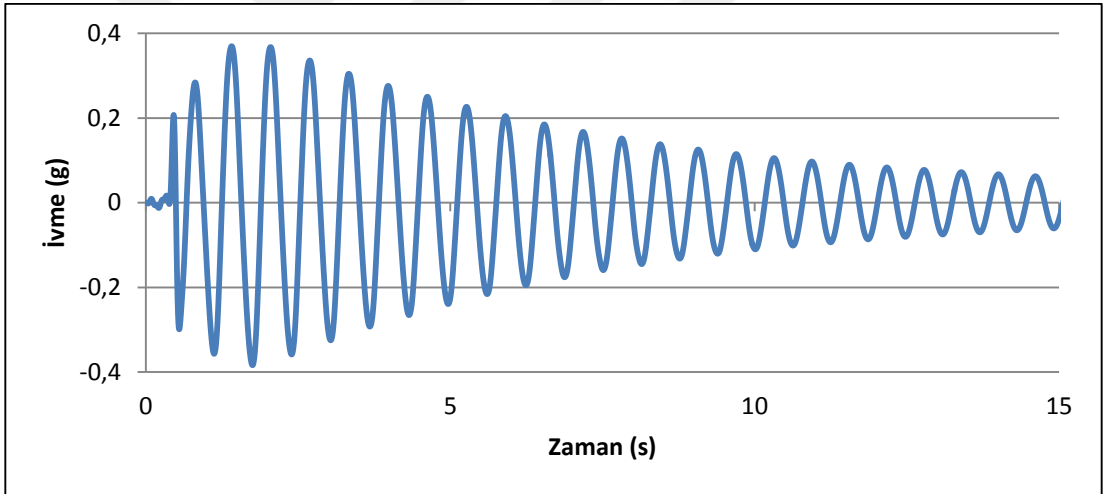
Şekil 5.18. 2 çapraz kolon orta hasar fourier genliği

### 5.2.2.3. 2 kolonda orta hasar oluşması durumu

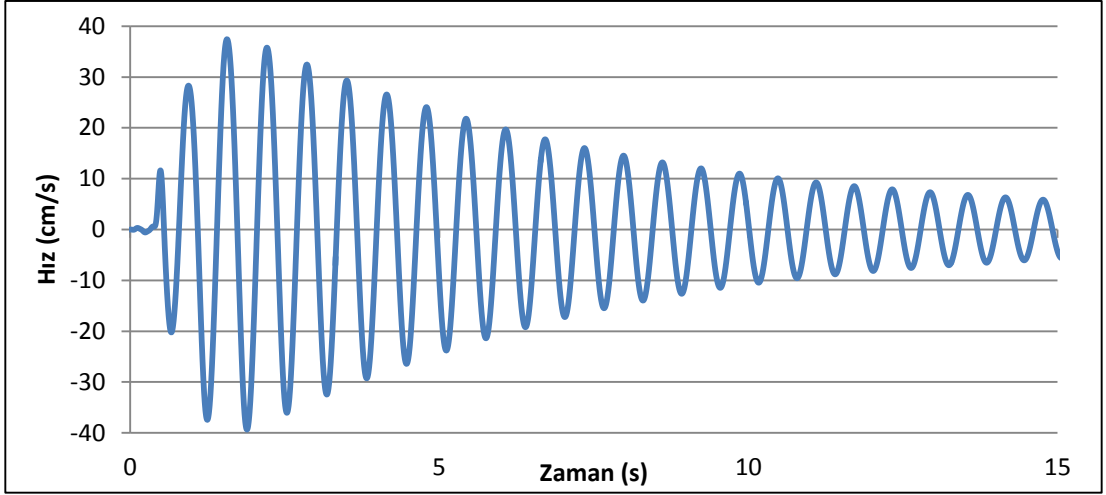
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre 1. ve 2. kolonda orta hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.18.'de verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme – zaman grafiği Şekil 5.19.'da, hız – zaman grafiği Şekil 5.20.'de, yerdeğiştirme – zaman grafiği Şekil 5.21.'de ve Şekil 5.22.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.22.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,587 Hz olarak görülmektedir.



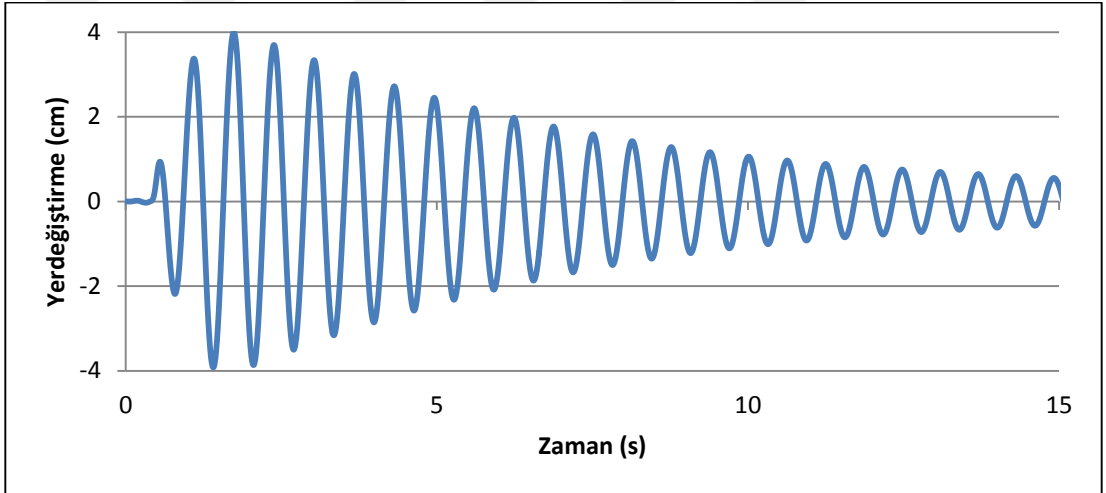
Şekil 5.19. 2 kolon orta hasar durumu filtrenmemiş ivme – zaman grafiği



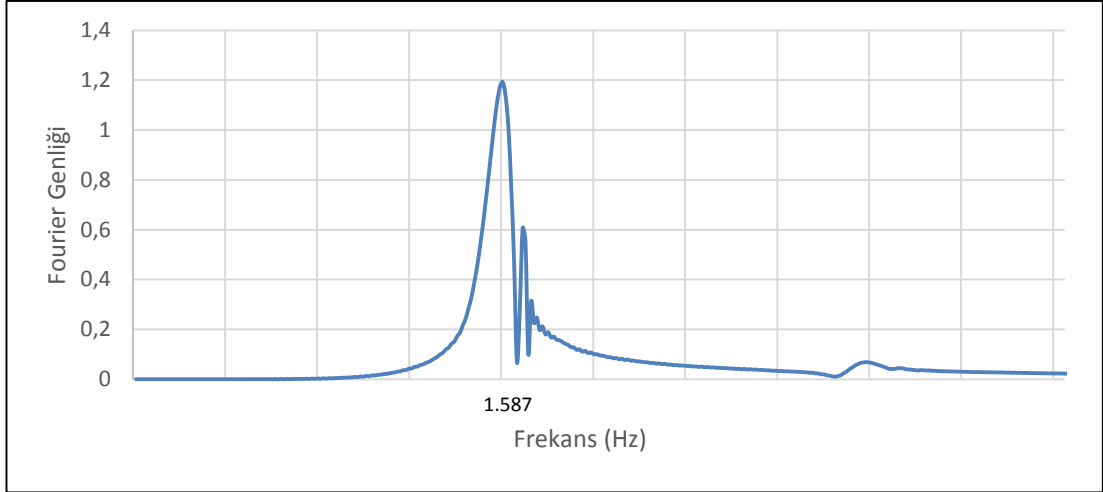
Şekil 5.20. 2 kolon orta hasar durumu filtrenmiş ivme – zaman grafiği



Şekil 5.21. 2 kolon orta hasar durumu filtrelenmiş hız – zaman grafiği



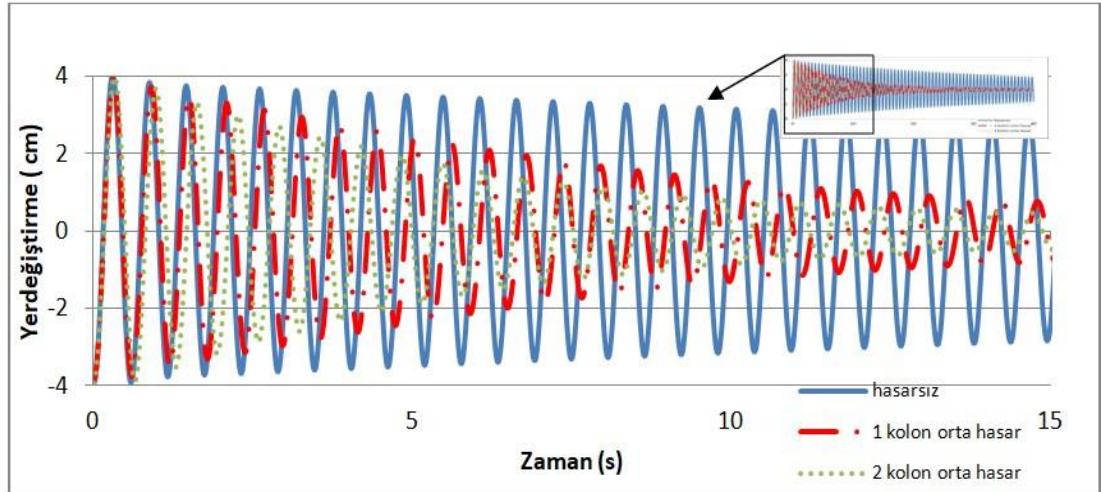
Şekil 5.22. 2 kolon orta hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



Şekil 5.23. 2 kolon orta hasar fourier genliği

#### 5.2.2.4. Orta hasarlı yapı için elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Orta hasar durumuna ait bulunan veriler Tablo 5.1.'de ve ilk 15 sn. yerdeğiştirme zaman grafikleri ise Şekil 5.23.'de verilmiştir.



Şekil 5.24. Orta hasar durumu karşılaştırmalı veriler yerdeğiştirme – zaman grafiği

Tablo 5.1. Orta hasar durumuna ait veriler

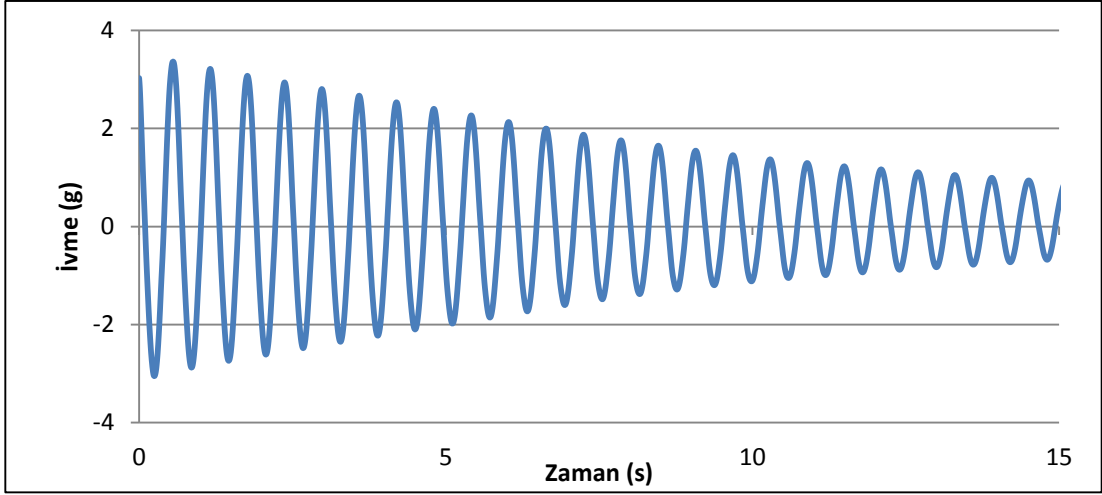
Senaryo	Frekans (hz)	Periyot (sn)	% Değişim
Hasarsız durum	1,754	0,57	-
1 Kolon orta hasar durumu	1,724	0,58	1,754
2 Çapraz kolon orta hasar durumu	1,635	0,61	6,557
2 Kolon orta hasar durumu	1,587	0,63	9,523

### 5.2.3. 3.Senaryo ağır hasar durumu

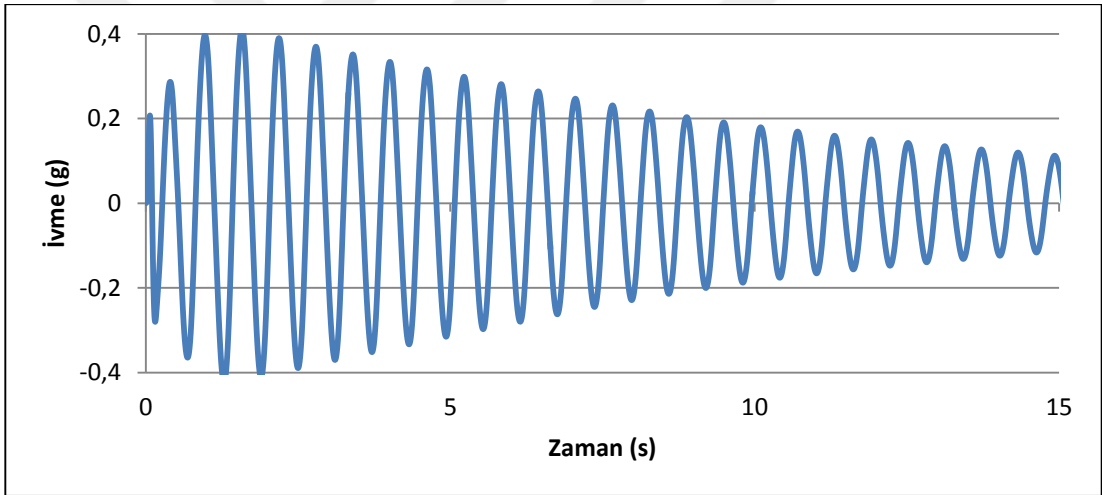
Çalışmada üçüncü senaryo olarak temel bağlantı noktalarının 0,05 rad. dönmesine müsaade edilmesiyle ağır hasar durumu oluşturulmuştur. Kat hizasından 40 mm. yerdeğiştirme verilerek model yapı serbest titreşime bırakılmıştır. Bu senaryo diğer kolonlara da uygulanarak sistem dinamik parametreleri bulunmuştur.

#### 5.2.3.1. 1 kolonda ağır hasar oluşması durumu

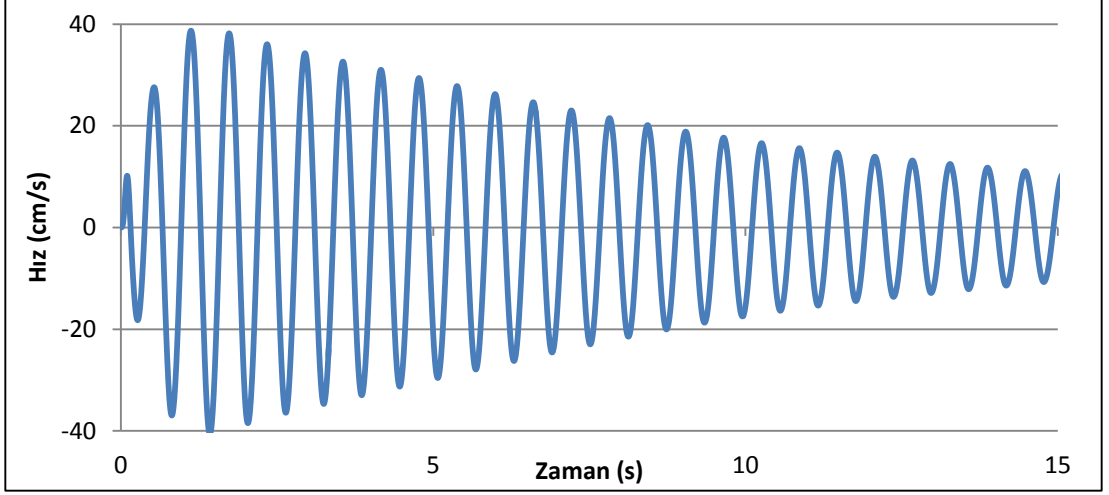
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre sadece 1. kolonda ağır hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.24.'de verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme - zaman grafiği Şekil 5.25.'de, hız - zaman grafiği Şekil 5.26.'da, yerdeğiştirme - zaman grafiği Şekil 5.27.'de ve Şekil 5.28.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.28.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,648 Hz olarak görülmektedir.



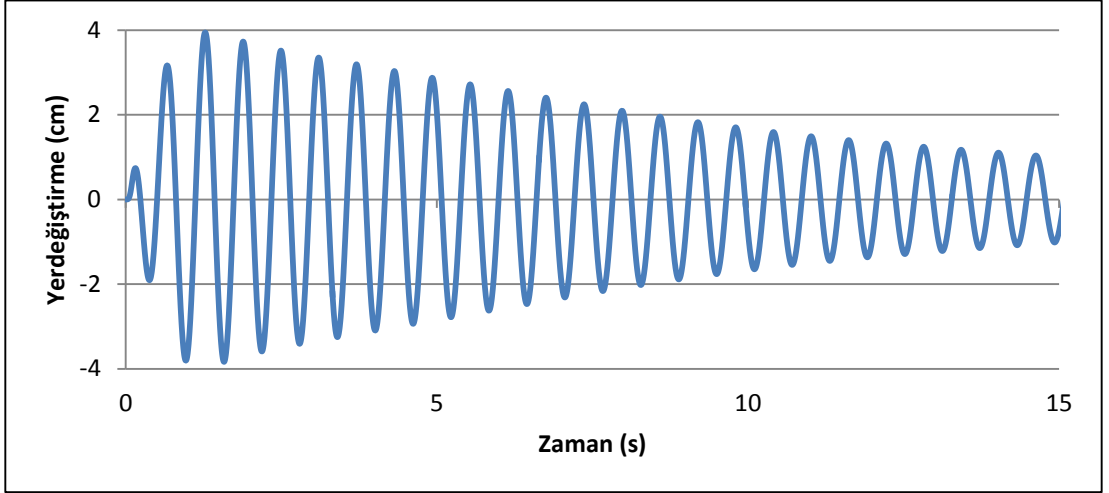
Şekil 5.25. 1 kolon ağır hasar durumu filtrelenmemiş ivme – zaman grafiği



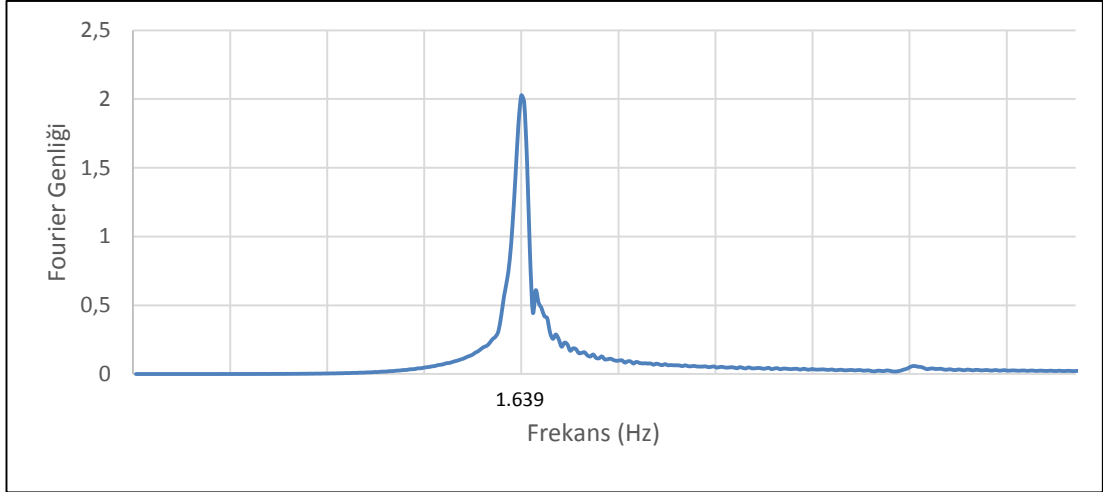
Şekil 5.26. 1 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme – zaman grafiği



Şekil 5.27. 1 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız – zaman grafiği



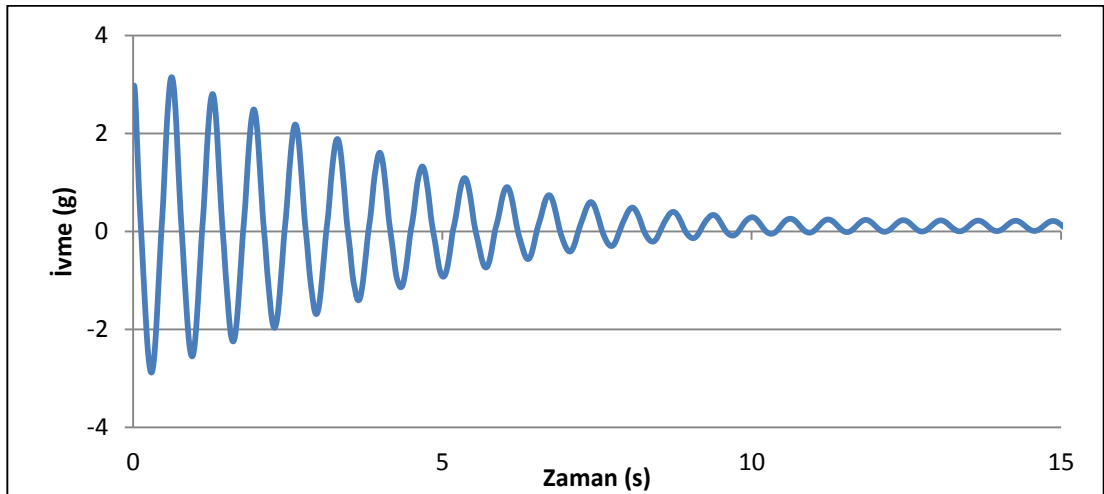
Şekil 5.28. 1 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



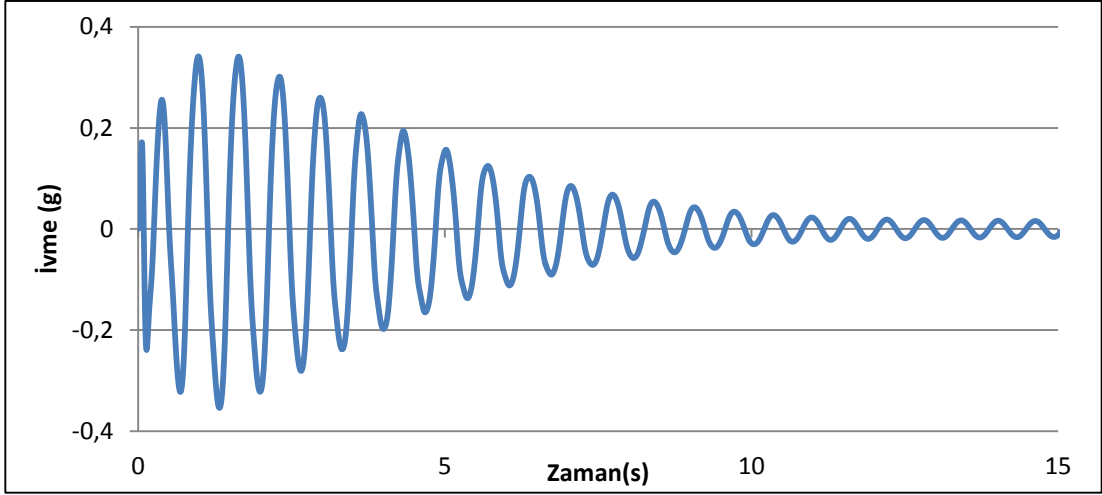
Şekil 5.29. 1 kolon ağır hasar fourier genliği

### 5.2.3.2. 2 kolonda ağır hasar oluşması durumu

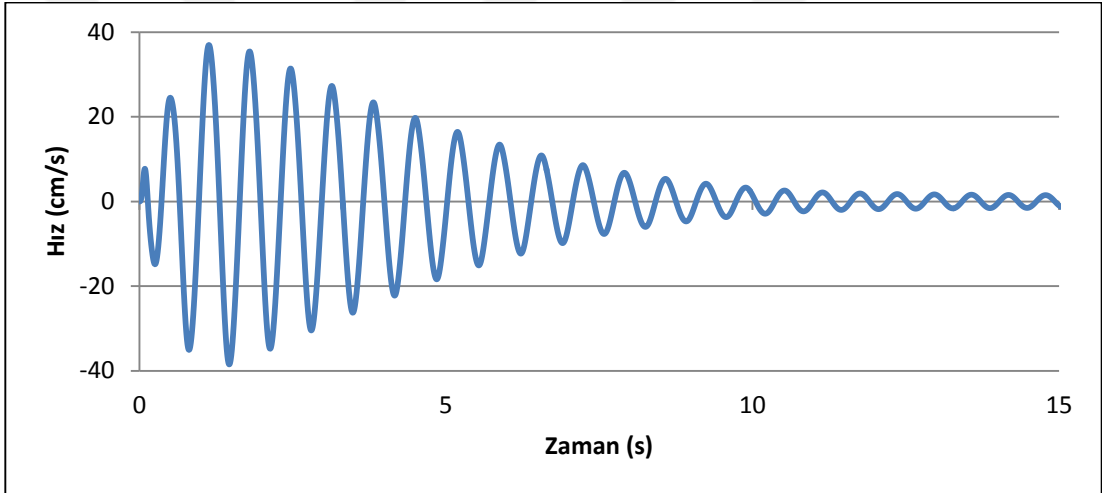
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre 1. ve 2. kolonlarda ağır hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.29.'da verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme - zaman grafiği Şekil 5.30.'da, hız - zaman grafiği Şekil 5.31.'de, yerdeğiştirme - zaman grafiği Şekil 5.32.'de ve Şekil 5.33.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.32.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,492 Hz olarak görülmektedir.



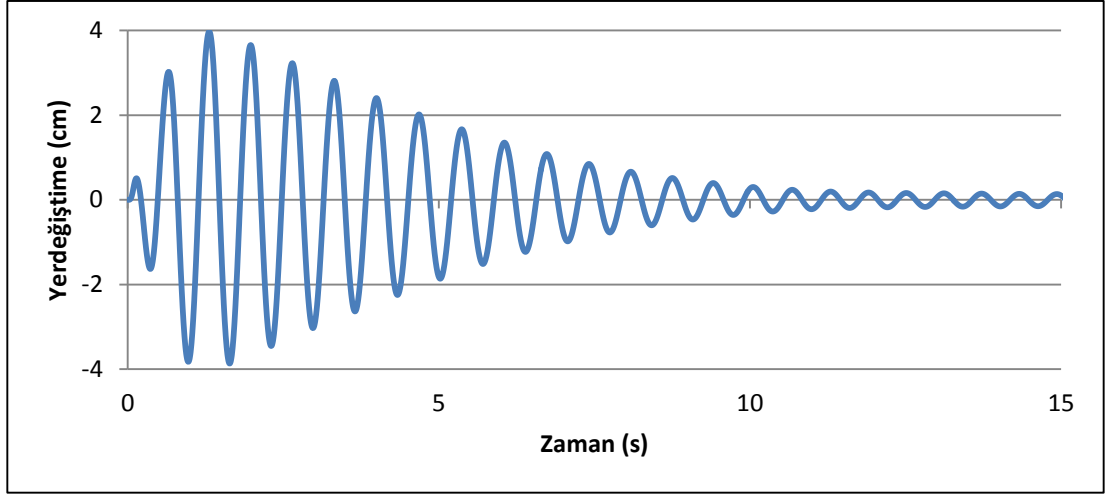
Şekil 5.30. 2 kolon ağır hasar durumu filtelenmemiş ivme - zaman grafiği



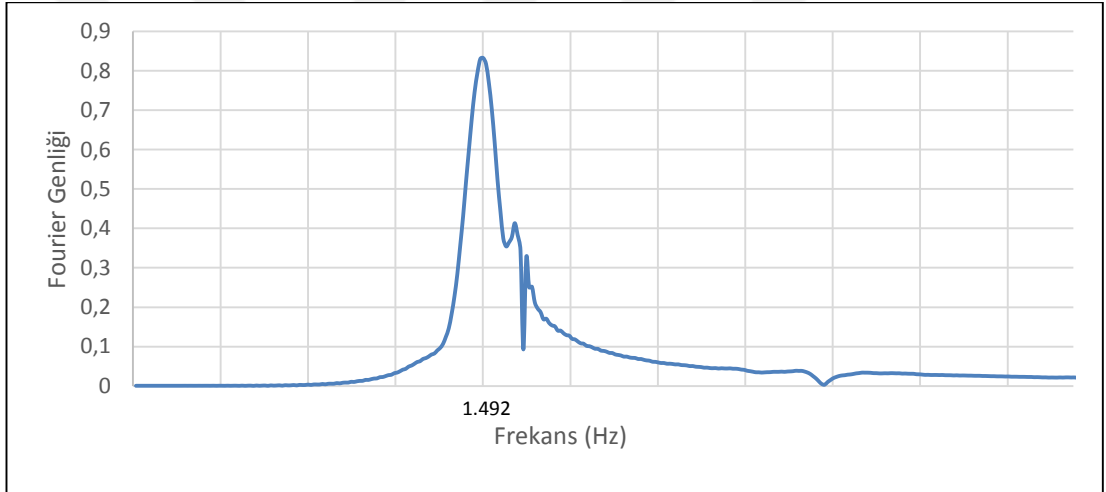
Şekil 5.31. 2 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme– zaman grafiği



Şekil 5.32. 2 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız– zaman grafiği



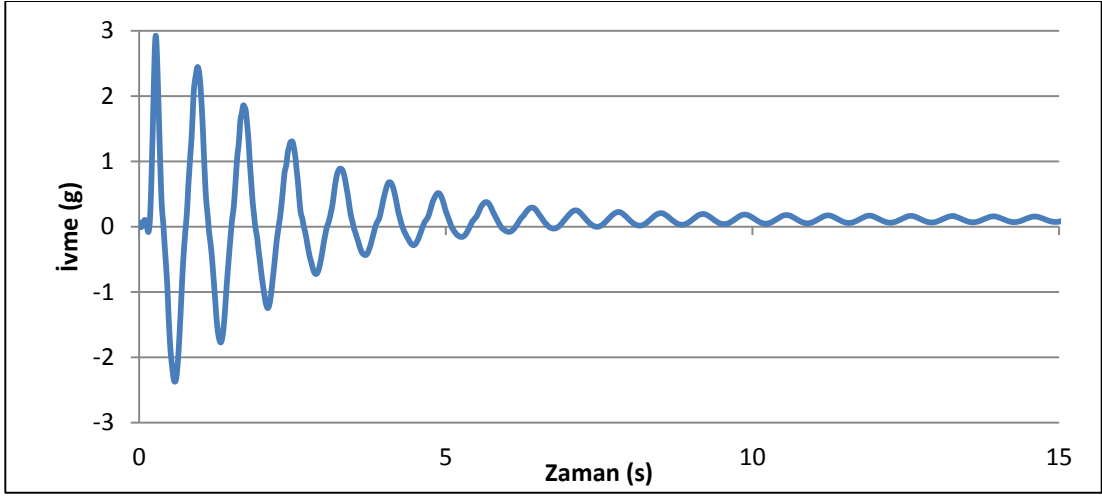
Şekil 5.33. 2 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



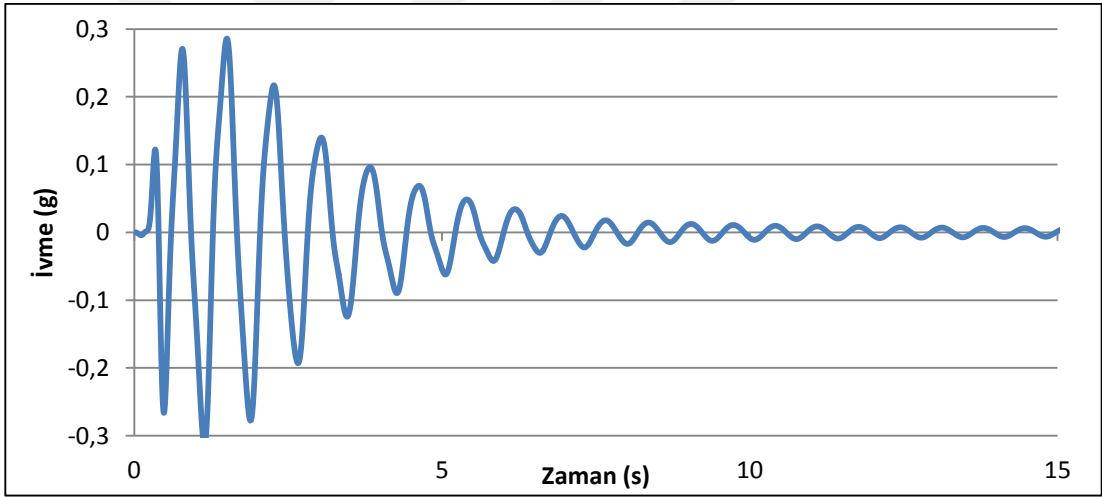
Şekil 5.34. 2 kolon ağır hasar fourier genliği

### 5.2.3.3. 3 kolonda ağır hasar oluşması durumu

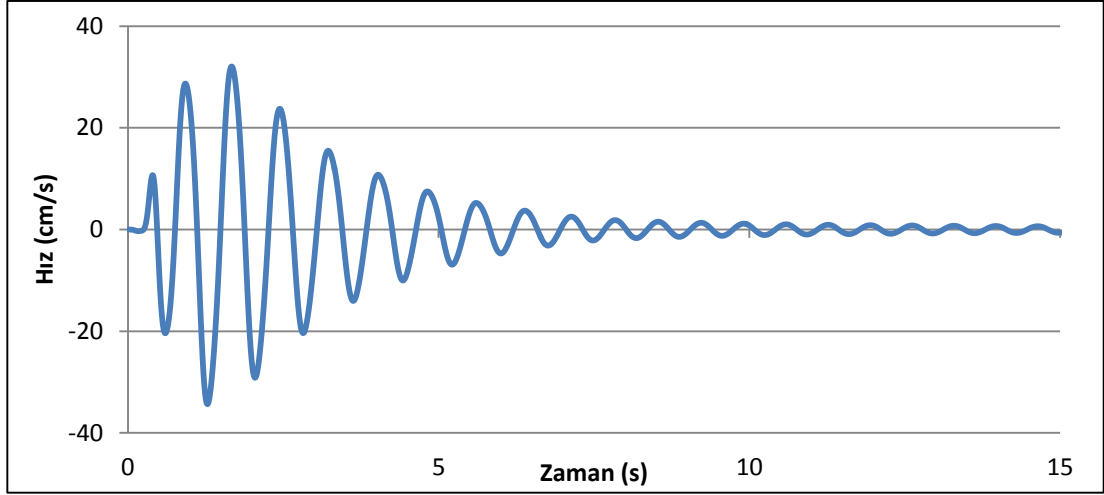
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre 1., 2. ve 3. kolonlarda ağır hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.34.'de verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme – zaman grafiği Şekil 5.35.'de, hız – zaman grafiği Şekil 5.36.'da, yerdeğiştirme – zaman grafiği Şekil 5.37.'de ve Şekil 5.38.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.38.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,298 Hz olarak görülmektedir.



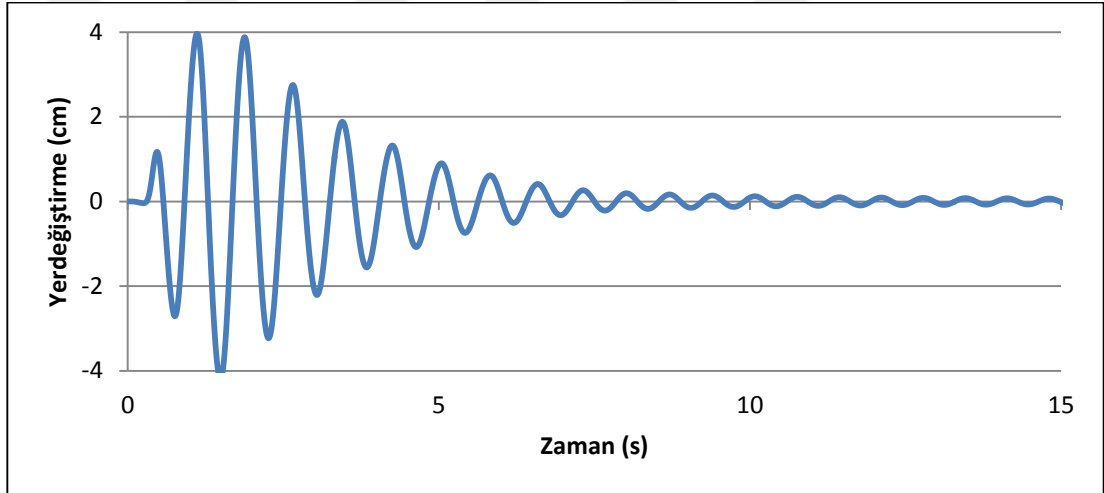
Şekil 5.35. 3 kolon ağır hasar durumu filtrenmemiş ivme – zaman grafiği



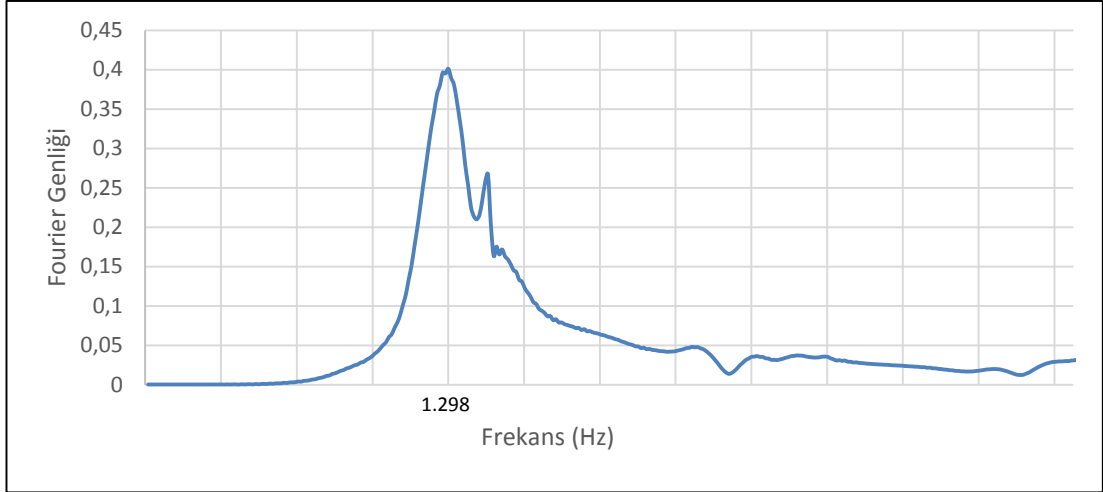
Şekil 5.36. 3 kolon ağır hasar durumu filtrenmiş ivme– zaman grafiği



Şekil 5.37. 3 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız – zaman grafiği



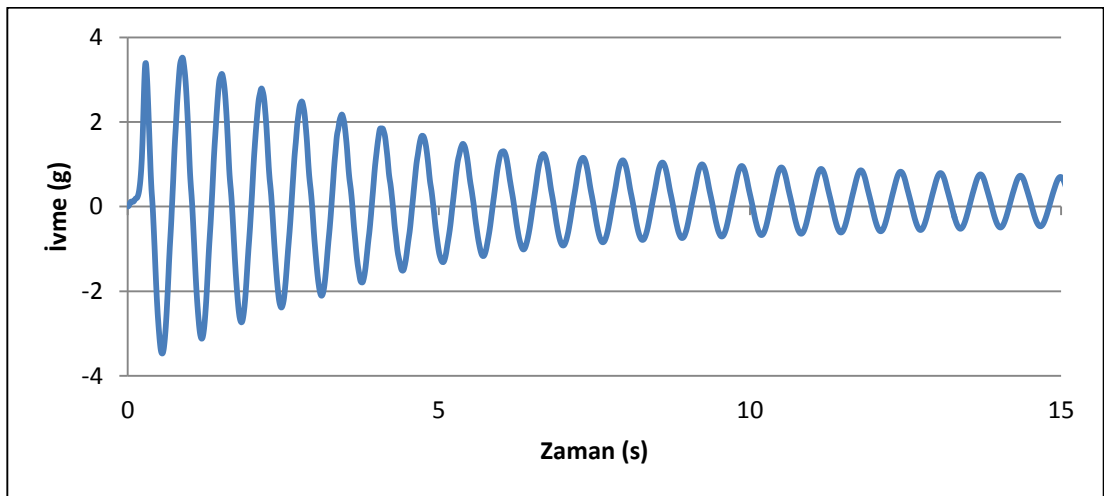
Şekil 5.38. 3 kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



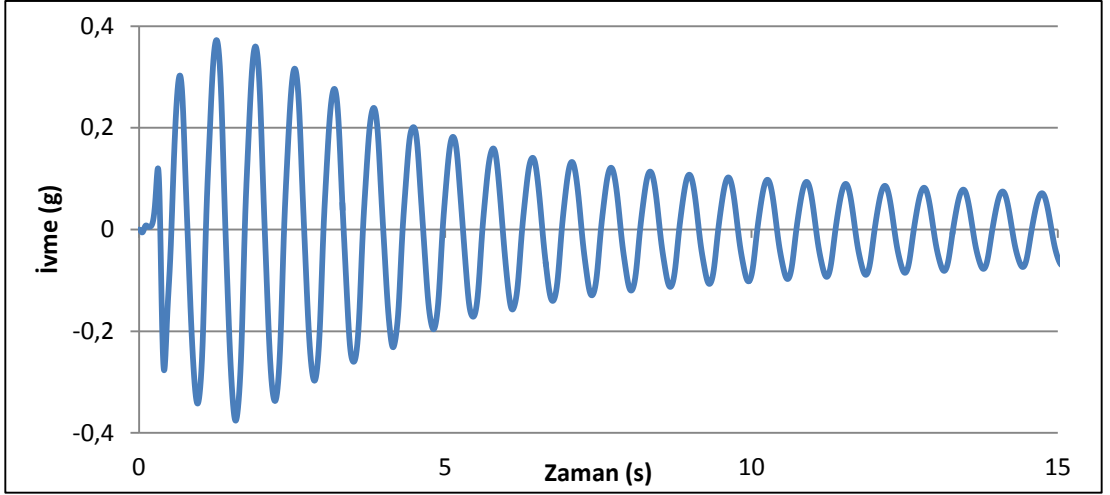
Şekil 5.39. 3 kolon ağır hasar fourier genliği

#### 5.2.3.4. 2 çapraz kolonda ağır hasar oluşması durumu

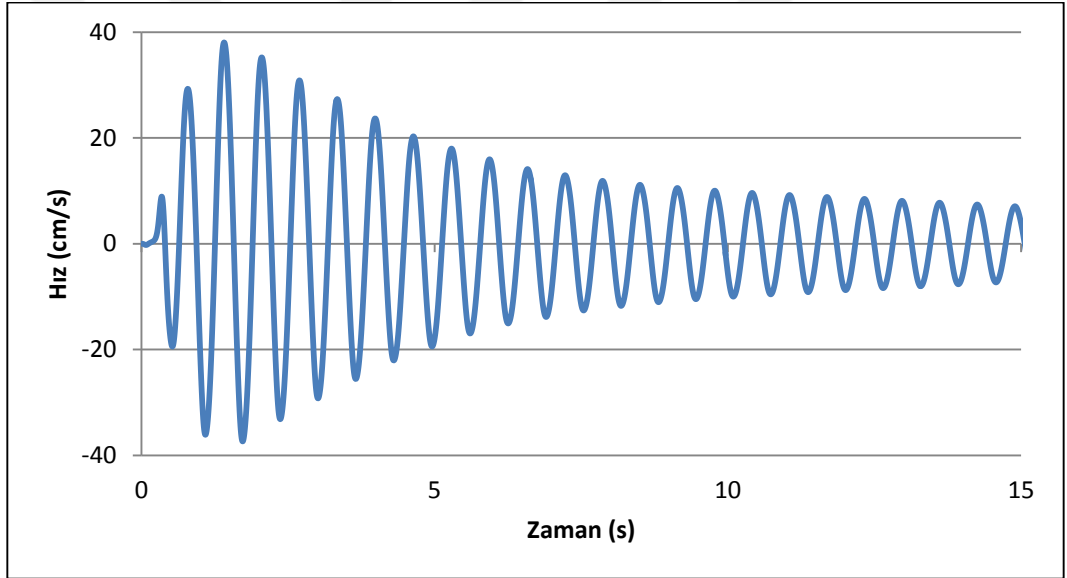
Şekil 5.2.'deki yerleşime göre 1. ve 3. kolonlarda ağır hasar senaryo durumu gerçekleştirilmiştir. Hasarsız durum veri işleme adımları aynen uygulanmış olup ivme - zaman grafiği Şekil 5.39.'da verilmiştir. Veriler filtre edilerek ilk 15 sn ivme - zaman grafiği Şekil 5.40.'da, hız - zaman grafiği Şekil 5.41.'de, yerdeğiştirme - zaman grafiği Şekil 5.42.'de ve Şekil 5.43.'de fourier genliği grafiği verilmiştir. Şekil 5.43.'de görüldüğü gibi yapı frekansı 1,538 Hz olarak görülmektedir.



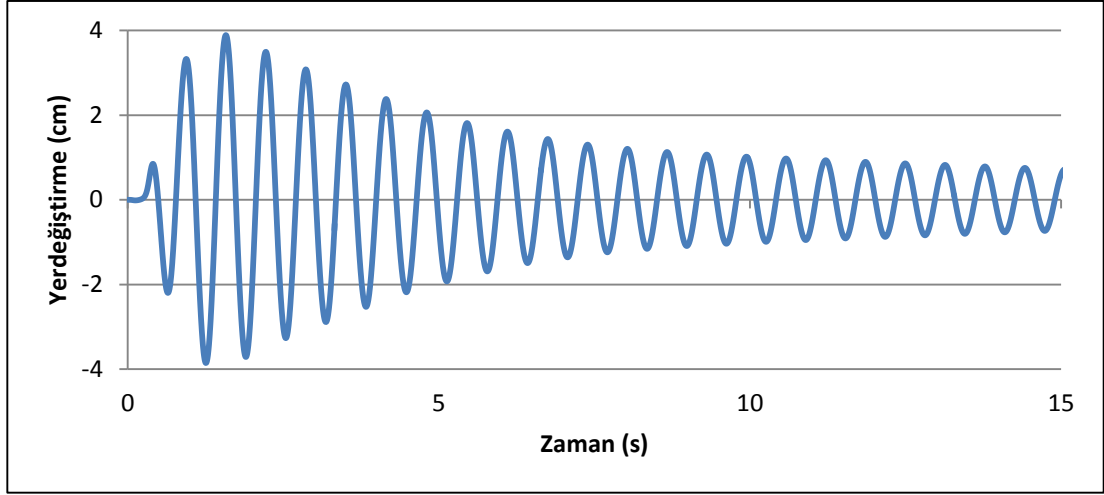
Şekil 5.40. 2 çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmemiş ivme - zaman grafiği



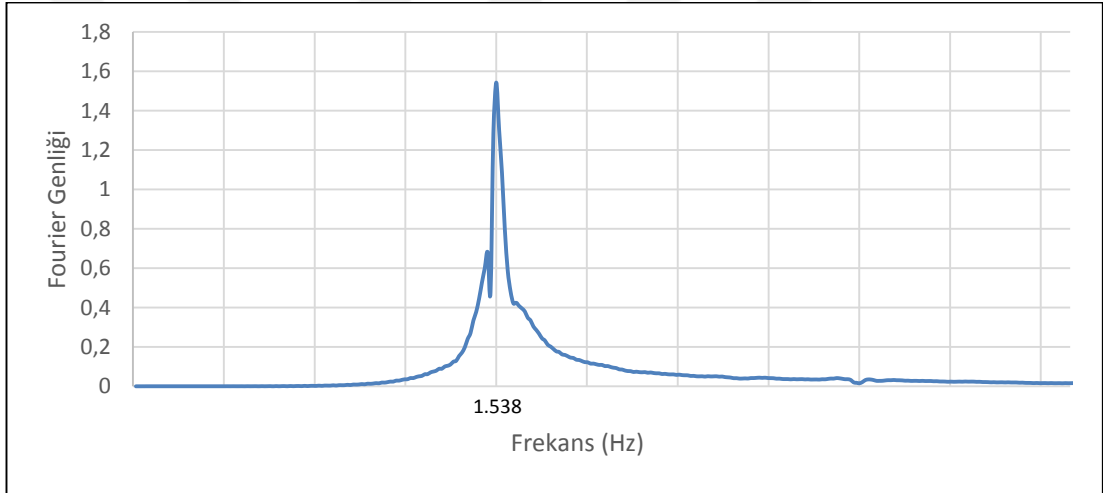
Şekil 5.41. 2 çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş ivme – zaman grafiği



Şekil 5.42. 2 çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş hız– zaman grafiği



Şekil 5.43. 2 çapraz kolon ağır hasar durumu filtrelenmiş yerdeğiştirme – zaman grafiği



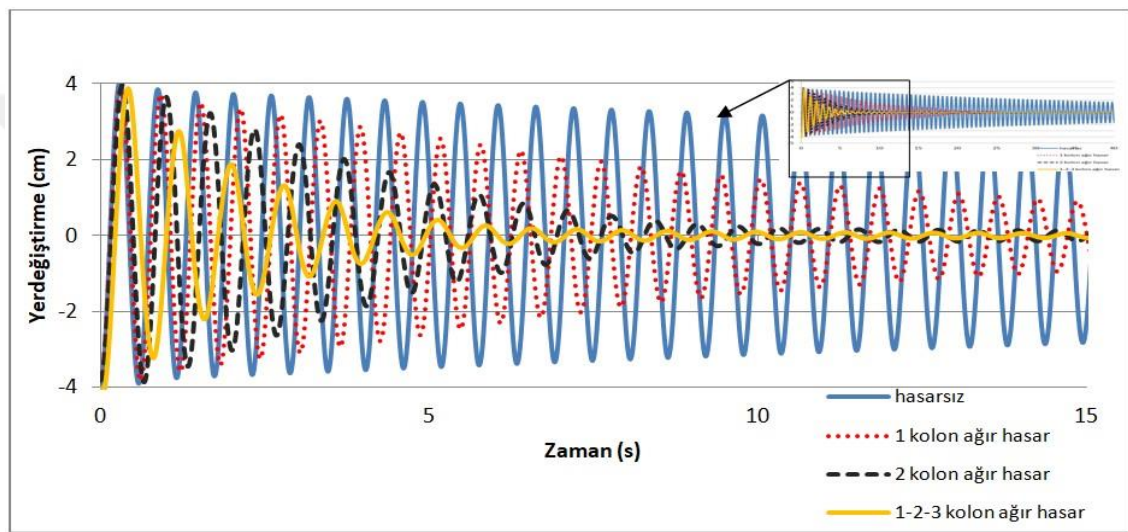
Şekil 5.44. 2 çapraz kolon ağır hasar fourier genliği

### 5.2.3.5. Ağır hasarlı yapı için elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Ağır hasar durumuna ait bulunan veriler Tablo 5.2.'de ve ilk 15 sn. yer değiştirme zaman grafikleri ise Şekil 5.44.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Ağır hasar durumuna ait veriler

Senaryo	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	% Değişim
Hasarsız durum	1,754	0,57	-
1 kolon ağır hasar durumu	1,639	0,61	6,557
2 kolon ağır hasar durumu	1,492	0,67	14,925
3 kolon ağır hasar durumu	1,298	0,77	25,974
2 çapraz kolon ağır hasar durumu	1,538	0,65	12,307



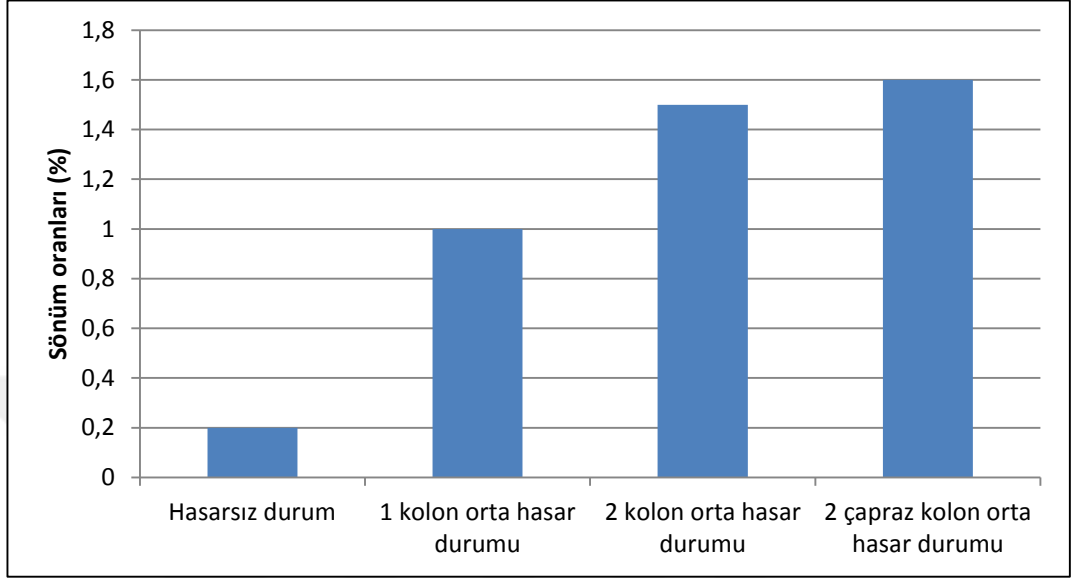
Şekil 5.45. Ağır hasar durumu karşılaştırmalı veriler yerdeğiştirme – zaman grafiği

#### 5.2.4. Sönüm oranları

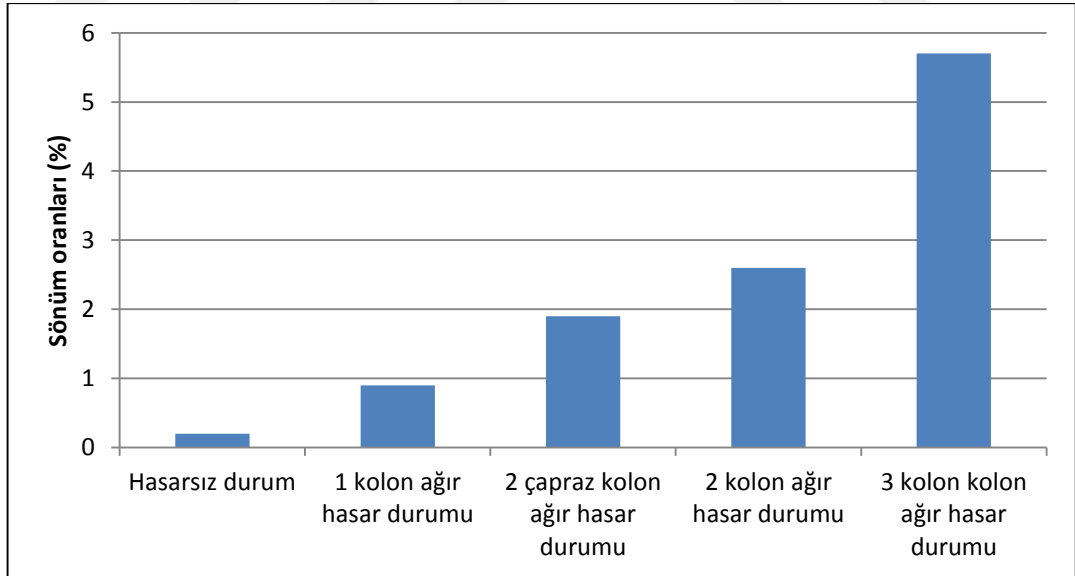
Yapı modeline ait filtrelenmiş serbest titreşim kayıtlarından faydalanarak logaritmik azalım yöntemi ile senaryolara ait sönüm oranları (5.1.) formülü ile hesaplanmıştır (Celep, 2011). 2. senaryo sönüm oranları Şekil 5.45.'de ve 3. senaryo sönüm oranları Şekil 5.46.'da verilmiştir.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \quad (5.1)$$

Denklemden  $\xi_{i+1}$  ve  $\xi_{i+2}$  sırasıyla  $i$ . ve  $i+1$ . genlik değerlerini,  $j$  dikkate alınan devir sayısını,  $\xi$  ise sönüm oranını göstermektedir.



Şekil 5.46. 2. Senaryo durumu için hesaplanan sönüm oranları grafiği

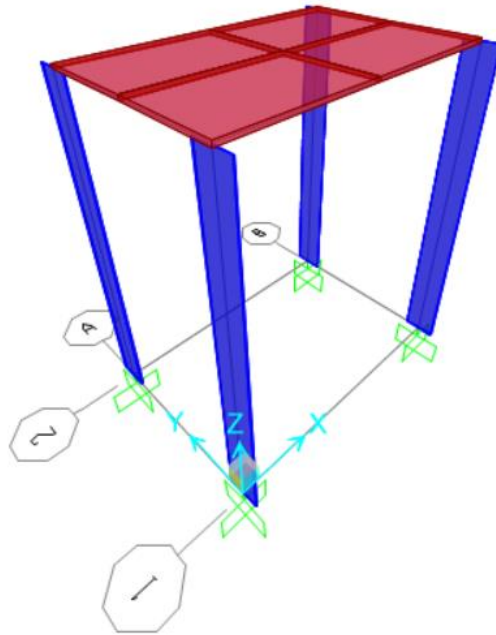


Şekil 5.47. 3. Senaryo durumu için hesaplanan sönüm oranları grafiği

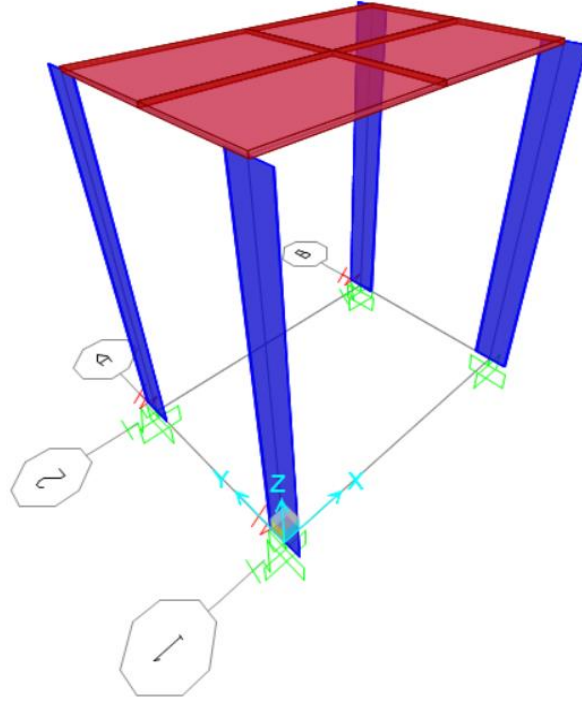
### 5.3. Çalışmada Kullanılan Yapının Sonlu Eleman Modeli

Deneysel çalışmaların değerlendirilmesi ve teorik olarak model yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sayısal modelin üretiminde SAP 2000 V16 programı kullanılmıştır. Yapı modeli, deneylerde kullanılan yapının fiziksel ve geometrik özellikleri esas alınarak üretilmiştir. (Şekil 5.47.) Yapı kolonları frame elemanlarla, kat döşemesi rijit diyafram olarak tanımlanmıştır. Her bir hasar durumu (hasar senaryosu) için kolon alt uçlarına mafsalları karakterize eden yaylar tanımlayarak kısmi dönme serbestlikleri verilmiştir.

Orta hasar durumunu karakterize eden modelde kolon alt ucunun 0,02 rad. dönebilmesi için  $k_x=50$  N/mm ve  $k_{\theta y}=12000$  N/mm yayları, ağır hasar durumunda 0,05 rad. dönebilmesi için  $k_x=50$  N/mm ve  $k_{\theta y}=1650$  N/mm yayları tanımlanmıştır. Şekil 5.48.'de deney yapısının sonlu eleman modeli verilmiştir. Yay sabitlerinin değerleri, deney sonuçları ile sayısal sonuçların karşılaştırılması sonucu uyumlu olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.48. Hasarsız yapının sonlu eleman modeli



Şekil 5.49. Hasarlı yapının sonlu eleman modeli

#### 5.4. Sonlu Elemanlar Model İyileştirme Yöntemi

Mevcut yapıların dinamik karakteristikleri kullanılan malzemelerin özellikleri, belirlenen sınır şartları ve boyutlandırılması ile sonlu eleman modelinde teorik çözümlerle belirlenmektedir. Bu şartlar belirlenirken zamanla malzemenin özelliklerinde ki değişim, imalat hataları ve çevresel etkenler göz ardı edilmekte ve zamanla bu sebeplerden ötürü yapı dinamik karakteristikleri teorik çözümlerden uzaklaşmaktadır.

Bu sebep ile teorik olarak hesaplanan parametreler yapının deprem sırasında göstereceği davranışı tam olarak yansıtmayacağı düşünülmektedir. Teorik veriler ile yapının güncel verileri karşılaştırılmalı ve bu karşılaştırmada dinamik karakteristikler arasındaki farkın %5 – %10 arasında olması durumunda deneysel verilerin teorik sonuçlar yansıttığı kabul edilmektedir (Türker, 2011).

Deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların uyumlu hale getirilmesinde kullanılan yöntem de sınır şartları için belirlenen değerler ile sistemin sonlu elemanlar modeli oluşturularak çözülür ve deneysel verilerde ki sonuçlara yaklaşmak adına belirli bir aralıktaki sınır şartları ile teorik model tek tek analiz edilir. Deneysel verilere en yakın sonuçlar iyileştirilmiş sonlu elemanlar modeli adını alır (Osmancıklı, 2012).

### 5.5. Model Yapının Teorik Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Deneyde kullanılan yapının sonlu elemanlar modeli hasarsız durumun birinci periyodu 0,571 sn bulunmuştur.

Deneyde kullanılan yapının sonlu elemanlar modeli orta hasar durumu periyotları Tablo 5.3.'de ağır hasar durumu periyotları ise Tablo 5.4.'de verilmiştir.

Tablo 5.3.Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan orta hasarlı modelin periyotları

Senaryo	Periyot (sn)	% Değişim
Hasarsız durum	0,57	-
1 kolon orta hasar durumu	0,59	3,389
2 çapraz kolon orta hasar durumu	0,61	6,557
2 kolon orta hasar durumu	0,61	6,557

Tablo 5.4. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan ağır hasarlı modelin periyotları

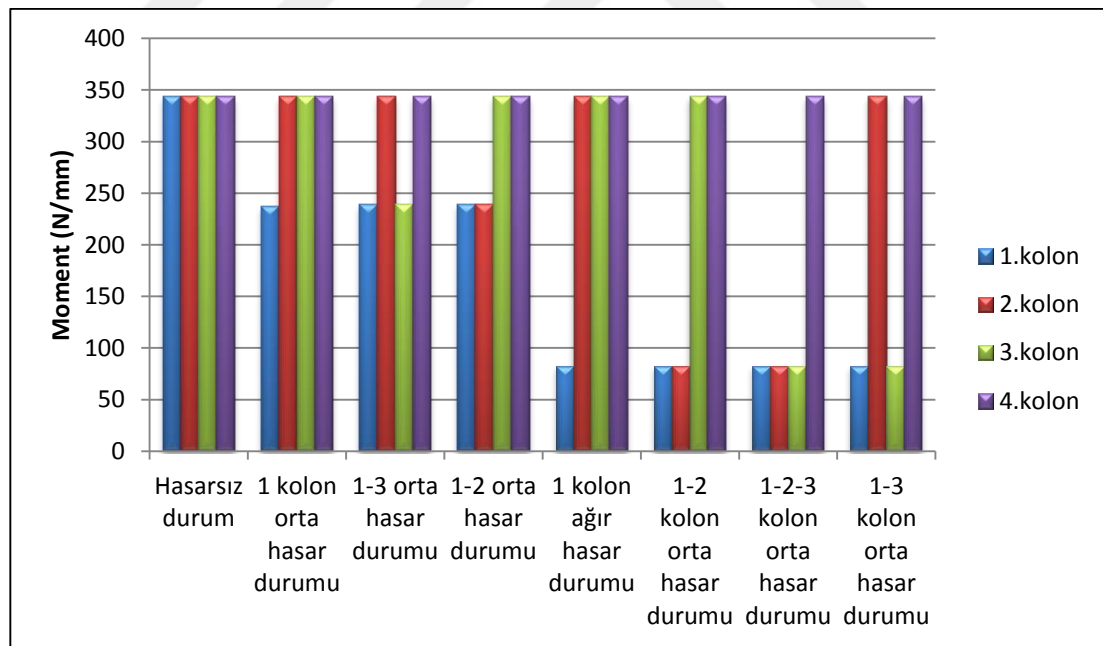
Senaryo	Periyot (sn)	% Değişim
Hasarsız durum	0,57	-
1 kolon ağır hasar durumu	0,62	8,06
2 kolon ağır hasar durumu	0,68	16,17
3 kolon ağır hasar durumu	0,75	24,00
2 çapraz kolon ağır hasar durumu	0,68	16,17

Teorik çözümde orta hasar ve ağır hasar durumları kolon alt uçlarındaki moment değişimleri ise Tablo 5.5.'de verilmiştir.

Tablo5.5. Moment (N/mm) değişim tablosu

Senaryo	1.Kolon	2.Kolon	3.Kolon	4.Kolon
Hasarsız durum	343,29	343,29	343,29	343,29
1 kolon orta hasar durumu	236,98	343,29	343,29	343,29
2 çapraz kolon orta hasar durumu	239,16	343,29	239,16	343,29
2 kolon orta hasar durumu	239,16	239,16	343,29	343,29
1 kolon ağır hasar durumu	82,71	343,29	343,29	343,29
2 kolon ağır hasar durumu	82,71	82,71	343,29	343,29
3 kolon ağır hasar durumu	82,71	82,71	82,71	343,29
2 çapraz kolon ağır hasar durumu	82,71	343,29	82,71	343,29

Tablo 5.5.'de verilen momentlerin grafik olarak gösterimi ise Şekil 5.49.'da verilmiştir.

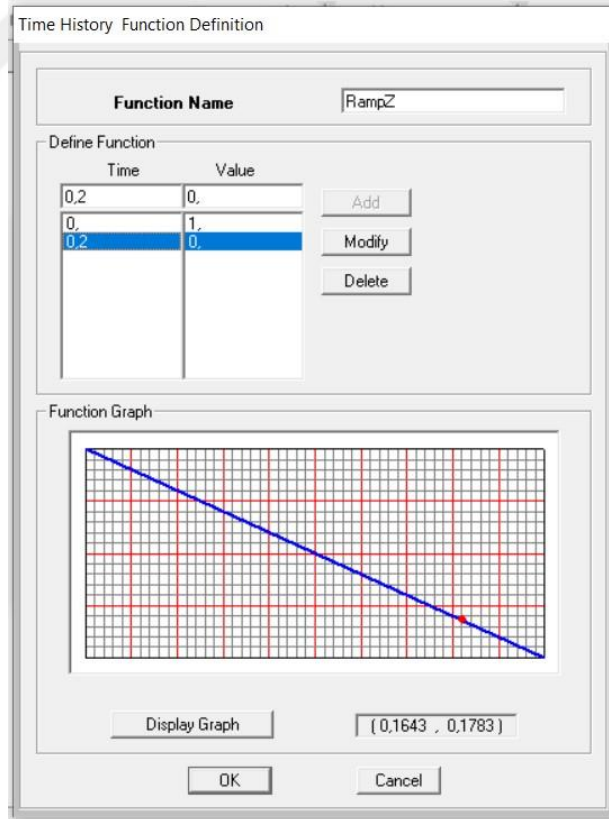


Şekil 5.50. Moment değişim grafiği

### 5.6. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz Yöntemi

Zaman tanım alanında doğrusal analiz yöntemi SAP 2000 programı kullanılarak yapılmıştır. Veri girişleri Şekil 5.50. ve Şekil 5.51.'de senaryolardan biri için örnek olarak verilmiştir. Deneyde uygulanan başlangıç koşulları zaman tanım alanında analizin başlangıç koşulları olarak tanımlanması gerektiğinden bu koşullar Ramp fonksiyon özelliği kullanılarak yapılmıştır. Zaman tanım alanında analiz tipi olarak lineer ve modal seçenekleri seçilmiştir. Yükleme  $u_1$  doğrultusunda ivme cinsinden yapılmıştır. Her bir senaryo için hesaplanan sönüm oranları ayrı ayrı kullanılmış ve 0,01 sn aralıkla 15 sn'lik seçim yapılmıştır.

Bu analiz yöntemi kullanılarak her bir senaryoya ait tepe noktası yerdeğiştirme – zaman grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.51. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ramp fonksiyonu

Load Case Data - Linear Modal History

Load Case Name: TH\_ZZZZ

Notes:

Load Case Type: Time History

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	RampZ	5000.
Accel	U1	RampZ	5000.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps: 1500

Output Time Step Size: 0,01

Other Parameters:

Modal Damping: Constant at 0.015

Analysis Type:  Linear  Nonlinear

History Type:  Transient  Periodic

Solution Type:  Modal  Direct Integration

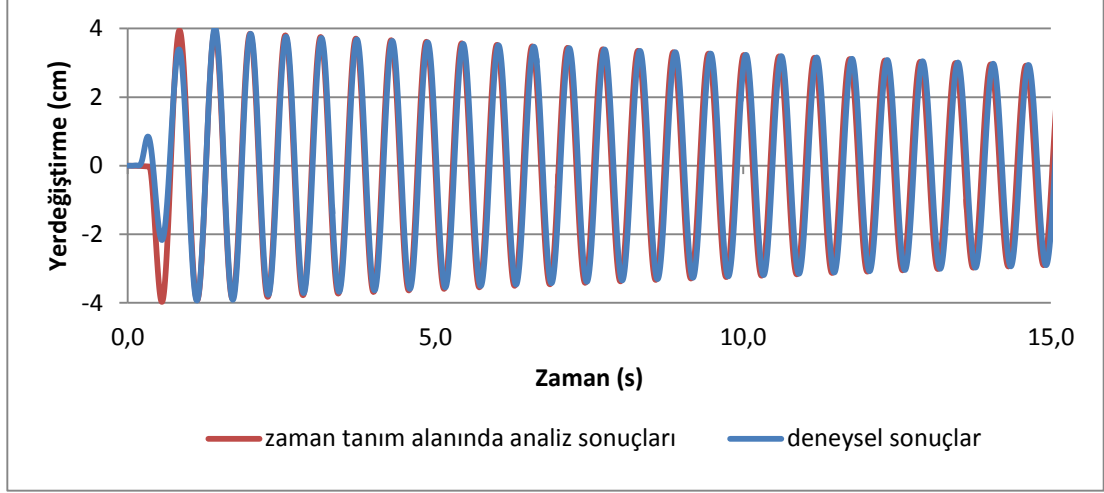
Mass Source: Previous (MSSSRCT)

Şekil 5.52. Zaman tanım alanında analiz yöntemi giriş bilgileri

Deneysel sonuçlar ve ZTA elde edilen sonuçlar her bir senaryo için karşılaştırmalı grafikler şeklinde verilmiştir.

### 5.6.1. 1. Senaryo hasarsız durum

Bu durum, deneysel çalışmada olduğu gibi, kolonlar levhalara köşebent ve civata ile ankastre olarak bağlanmıştır. Deneysel çalışmada kat hizasından uygulanan 40 mm. yerdeğiştirme bu analizde ramp fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Karşılaştırmalı yerdeğiştirme - zaman grafiği Şekil 5.52.'de verilmiştir.



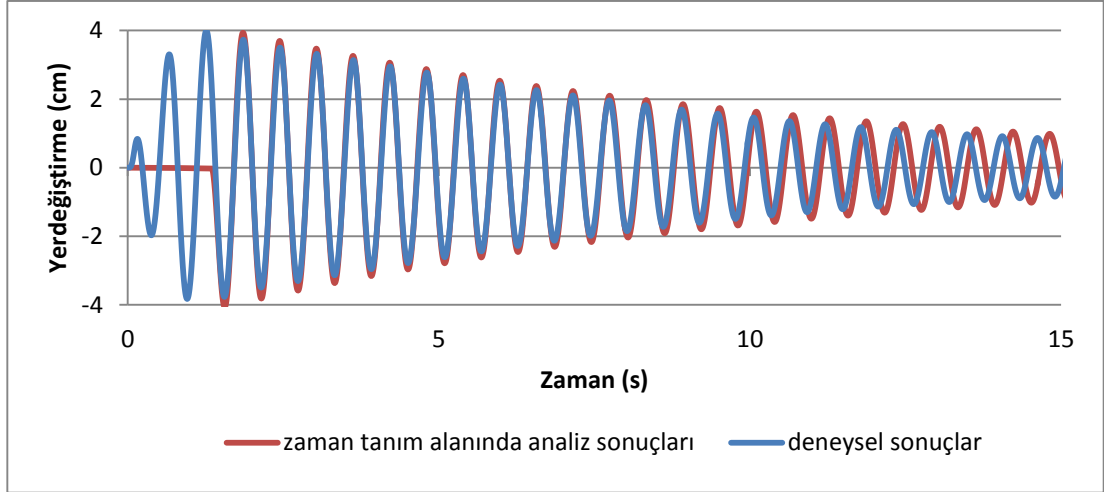
Şekil 5.53. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile hasarsız durum yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

## 5.6.2. 2. Senaryo orta hasar durumu

Deneysel çalışmada tarif edilmiş olan orta hasar durumu için zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.

### 5.6.2.1. 1 kolonda orta hasar oluşması durumu

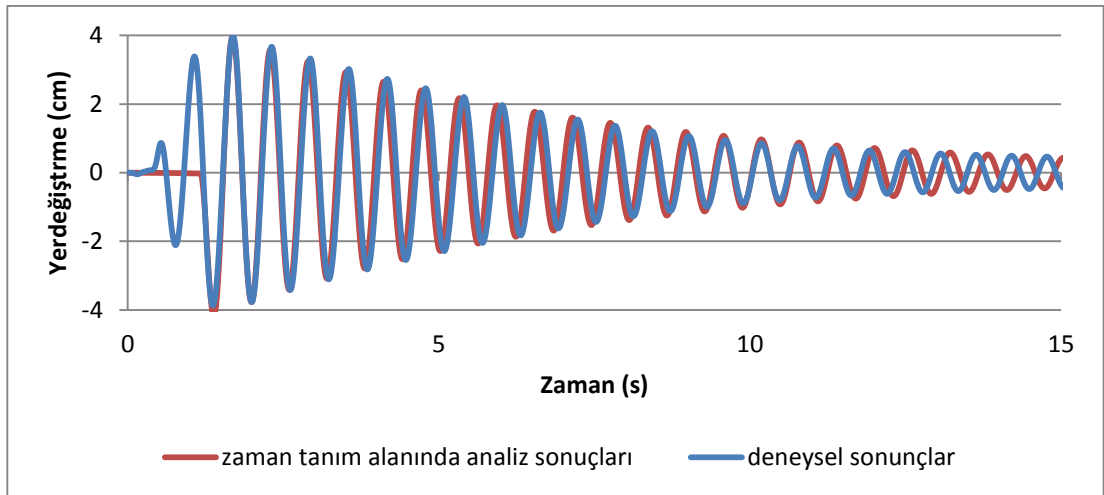
Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1. kolonda orta hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.53.'de verilmiştir.



Şekil 5.54. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 1 kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

#### 5.6.2.2. 2 çapraz kolon orta hasar oluşması durumu

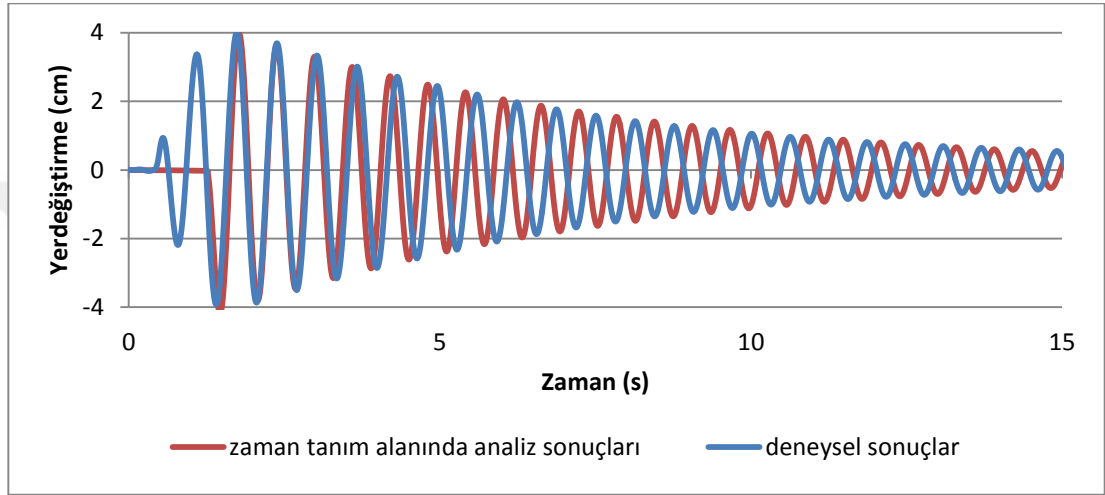
Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1. ve 3. kolonda orta hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.54.'de verilmiştir.



Şekil 5.55. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 çapraz kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

### 5.6.2.3. 2 kolonda orta hasar oluşması durumu

Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1. ve 2. kolonda orta hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.55.'de verilmiştir.



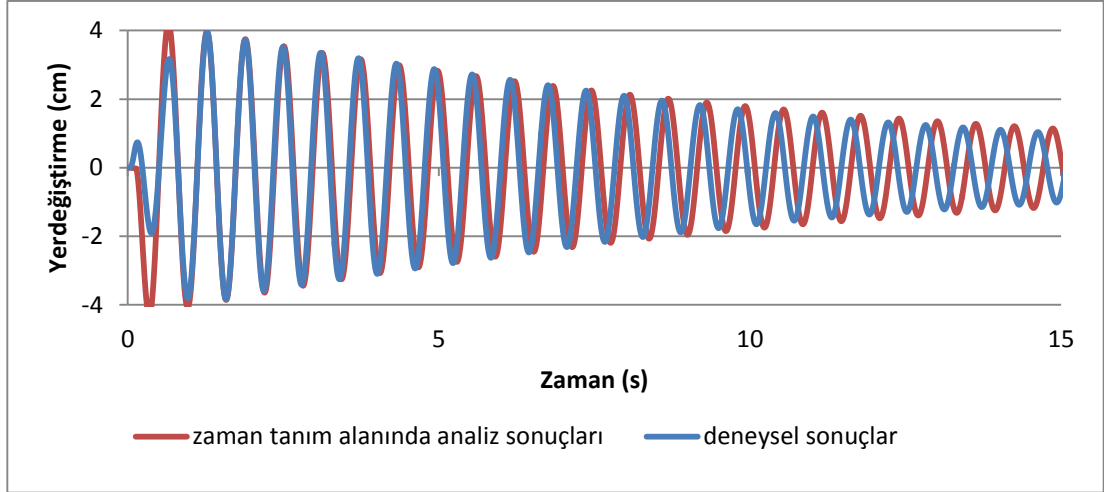
Şekil 5.56. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 kolon orta hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

### 5.6.3. 3. Senaryo ağır hasar durumu

Deneysel çalışmada tarif edilmiş olan ağır hasar durumu için zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.

#### 5.6.3.1. 1 kolonda ağır hasar oluşması durumu

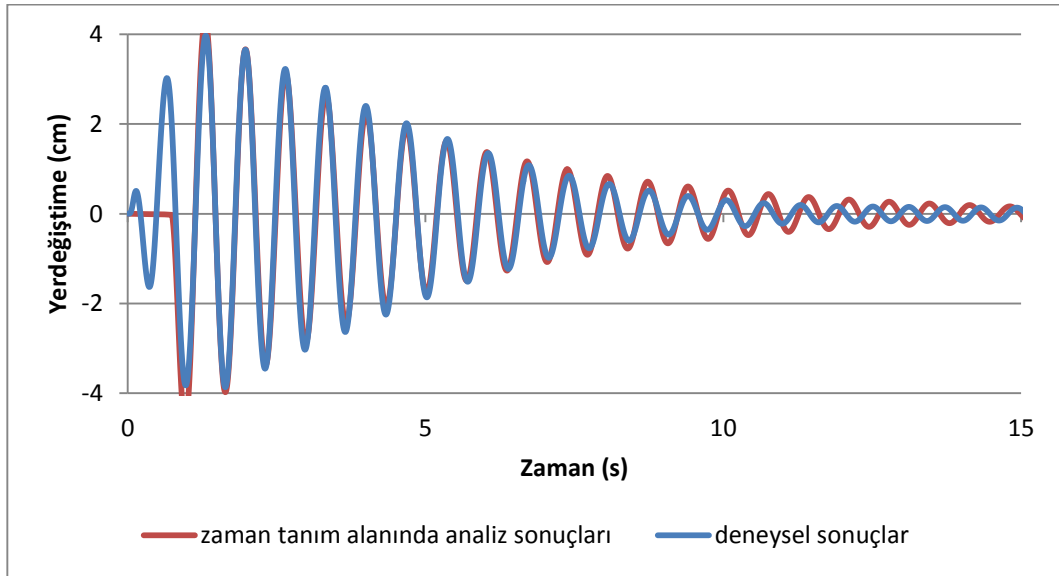
Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1. kolonda ağır hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.56.'da verilmiştir.



Şekil 5.57. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 1 kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

### 5.6.3.2. 2 kolonda ağır hasar oluşması durumu

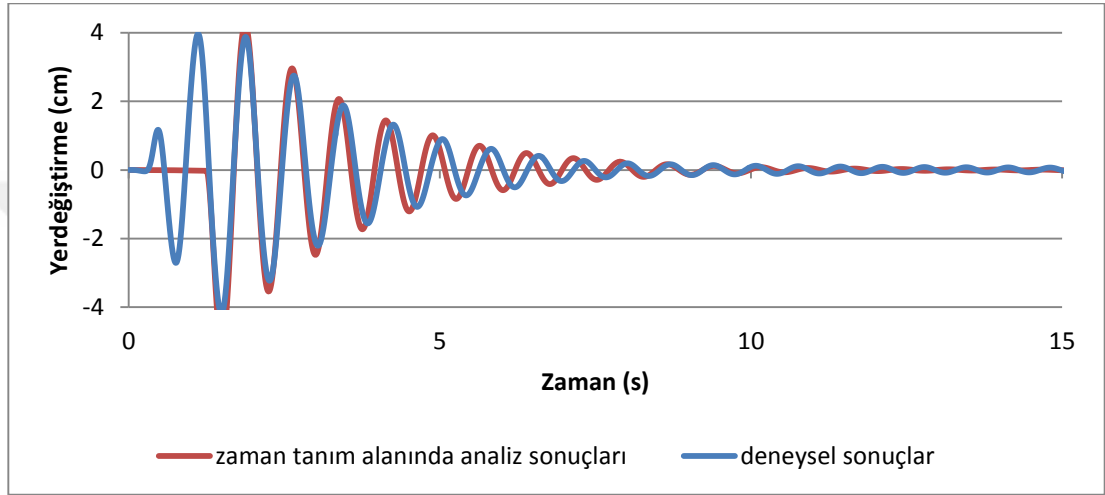
Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1. ve 2. kolonda ağır hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.57.'de verilmiştir.



Şekil 5.58. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

### 5.6.3.3. 3 kolonda ağır hasar oluşması durumu

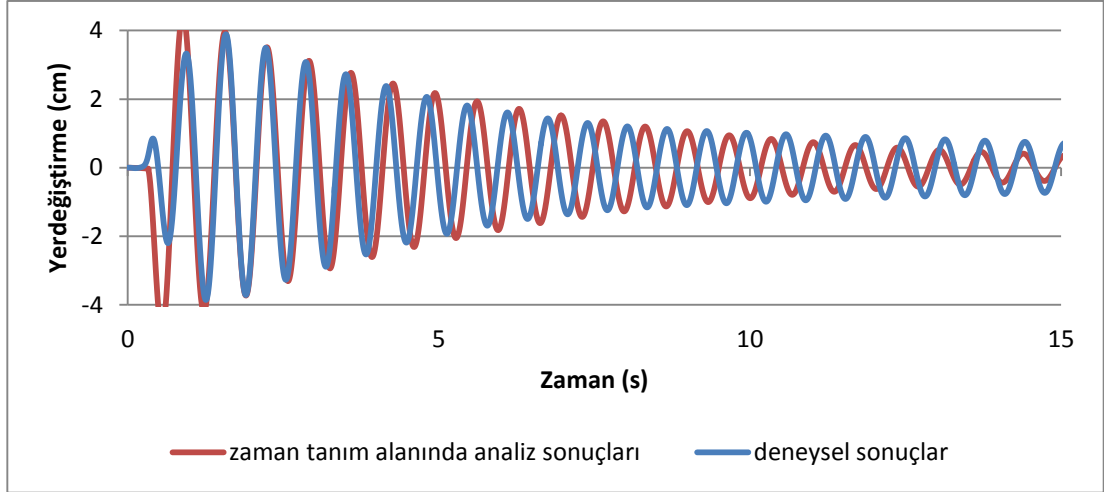
Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1., 2. ve 3. kolonda ağır hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.58.'de verilmiştir.



Şekil 5.59. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 3 kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

### 5.6.3.4. 2 çapraz kolonda ağır hasar oluşması durumu

Şekil 5.2.'de kolon yerleşim durumuna göre 1. ve 3. kolonda ağır hasar durumuna ait zaman tanım alanında analiz yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.59.'da verilmiştir.



Şekil 5.60. Zaman tanım alanında analiz yöntemi ile 2 çapraz kolon ağır hasar durumu yerdeğiştirme – zaman karşılaştırmalı grafiği

#### 5.6.4. Zaman tanım alanında elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Zaman Tanım alanında analiz sonuçları ile yapının deneysel sonuçları karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmada yerdeğiştirme –zaman grafikleri arasındaki farkın %5-%10 arasında olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5.6.). Bu durumda deneysel sonuçların teorik sonuçları yansıttığı kabul edilmiştir.

Tablo 5.6. Deneysel yöntem ve sayısal yöntem ile elde edilen yerdeğıştirmelerin değişimi

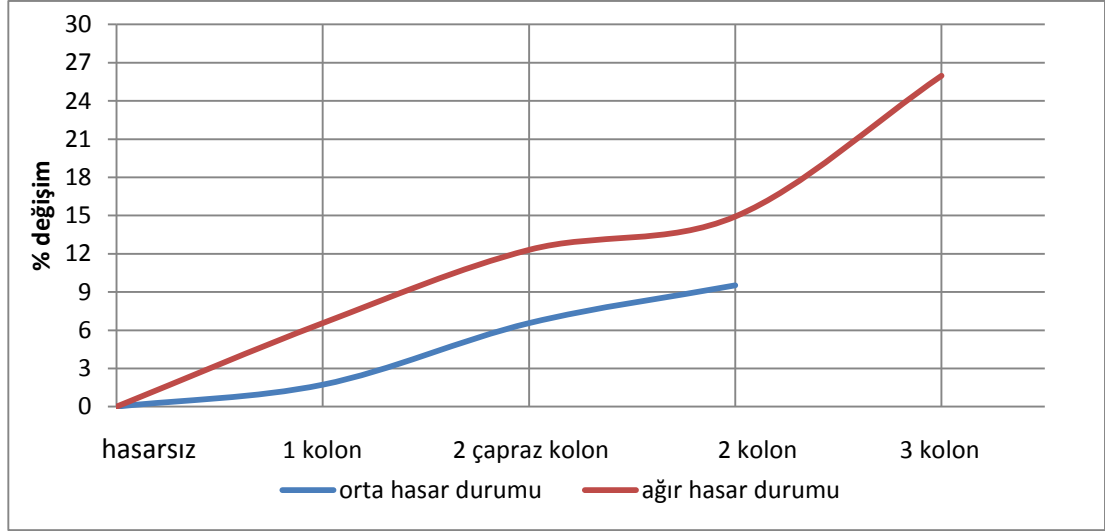
	Zaman (sn)	Yerdeğıştirmeler (mm)		Fark (%)
		Deneysel yöntem	Sayısal yöntem	
Hasarsız	1,41	38,9	37,1	4,6
	4,80	33,6	34,5	2,6
1 kolon ağır hasar	1,235	39,2	39,6	1,02
	4,975	27,4	28,2	2,91
1-2 kolon ağır hasar	1,23	32,1	34,1	6,23
	4,645	19,1	19,0	0,52
1-3 kolon ağır hasar	1,525	38,0	37,3	1,84
	4,905	19,4	20,7	6,75
1-2-3 ağır hasar	1,845	37,8	41,4	9,52
	4,940	08,8	09,2	4,54
1 kolon orta hasar	1,845	36,3	39,2	7,98
	4,77	25,6	25,6	-
2 kolon orta hasar	1,73	37,7	36,5	3,18
	2,98	30,0	31,8	6,00
1-3 kolon orta hasar	1,665	39,7	38,8	2,26
	3,51	27,5	28,7	4,36

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel yöntem ile belirleyerek bu bilgilerin hasar tespitinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiş, bu sonuçlarla deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak Tablo 6.1.'de verilmiştir. Şekil 6.1.'de sayısal sonuçlar grafik olarak ifade edilmiştir.

Tablo 6.1. Hasar durumuna göre deneysel titreşim parametrelerinin değişimi

Senaryo	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	% Değişim
Hasarsız durum	1,754	0,57	–
1 kolon orta hasar durumu	1,724	0,58	1,724
2 çapraz kolon orta hasar durumu	1,635	0,61	6,557
2 kolon orta hasar durumu	1,587	0,63	9,523
1 kolon ağır hasar durumu	1,639	0,61	6,557
2 kolon ağır hasar durumu	1,492	0,67	14,925
3 kolon ağır hasar durumu	1,298	0,77	25,974
2 çapraz kolon ağır hasar durumu	1,538	0,65	12,307



Şekil 6.1. Hasar durumuna göre deneysel titreşim parametrelerinin değişimi grafiği

Sayısal sonuçlar ile yapının deneysel sonuçları karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmada dinamik karakteristikler arasındaki farkın en fazla % 4,41 olduğu olduğu belirlenmiştir (Tablo 6.2.). Bu durumda deneysel sonuçların teorik sonuçları yansıttığı kabul edilmiştir.

Tablo 6.2. Sayısal veriler ile yapının deneysel verilerinin karşılaştırılması

Senaryo	Periyot(sn)		% Değişim
	Deneysel	SEY	
Hasarsız durum	0,57	0,57	-
1 kolon orta hasar durumu	0,58	0,59	1,69
2 çapraz kolon orta hasar durumu	0,61	0,61	-
2 kolon orta hasar durumu	0,63	0,61	3,27
1 kolon ağır hasar durumu	0,61	0,62	1,61
2 kolon ağır hasar durumu	0,67	0,68	1,47
3 kolon ağır hasar durumu	0,77	0,75	2,66
2 çapraz kolon ağır hasar durumu	0,65	0,68	4,41

Yapılan çalışmada kolon alt uçları için deneysel ve teorik verilerin karşılaştırılmasına ait sonuçlar aşağıda çıkarılmıştır. Bu sonuçlar çalışmada kullanılan dönme değerlerinin deney sırasında tam olarak tespit edilmesi ile daha sağlıklı olacaktır.

- 1- Yapı Periyodunda %1,724 artım olduğunda kolonların %25'inde orta hasar ve kolon alt uç momentinde %30 azalma olabileceği,
- 2- Yapı Periyodunda %6,557 artım olduğunda çapraz kolonların %50'inde orta hasar ve iki kolonunda alt uç momentinde %30 azalma olabileceği,
- 3- Yapı Periyodunda %9,523 artım olduğunda birbirine komşu iki kolonda %50 orta hasar ve iki kolonunda alt uç momentinde %30 azalma olabileceği,
- 4- Yapı Periyodunda %6,557 artım olduğunda kolonların %25'inde ağır hasar ve kolonun alt uç momentinde %76 azalma olabileceği,
- 5- Yapı Periyodunda %14,925 artım olduğunda birbirine komşu iki kolonda %50 ağır hasar ve iki kolonunda alt uç momentinde %76 azalma olabileceği,
- 6- Yapı Periyodunda %25,974 artım olduğunda kolonların %75'inde ağır hasar ve üç kolonunda alt uç momentinde %76 azalma olabileceği,
- 7- Yapı Periyodunda %12,307 artım olduğunda çapraz kolonların %50'inde ağır hasar ve iki kolonunda alt uç momentinde %76 azalma olabileceği,

Sonuçlarına varılmış olup deneysel yöntem ile elde edilen dinamik karakteristiklerin yapı hasar tespitlerinde kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Altunışık., A.C. 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Lisans Tezi.
- Bayraktar, A., Türker, T. 2005. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. 2007. Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1 Bildiriler Kitabı, s.415-428.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M., Coşkun, N. 2008. Modal Analysis, Experimenta Validation and Calibration of a Historical Masonary Minaret, Journal of Testing and Evolution, 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evolution 28:37-47.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A., Sevim, B., Şahin, A., Özcan, D.M. 2010. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi.
- Bayraktar, A., Türker, T., Turan, F.N., Uçak, Ş., Osmancıklı, G. 2011. Investigation of Restoration Effects on the Dynamic Characteristics of the Hagia Sophia Bell-tower by Ambient Vibration Test, Construction and Building Materials 29 (2012) 564-572.
- Beyen, K. 2007. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Alan Fatih Camiinin Dinamik Karakteristiklerinin Tanımlanması, 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Celep, Z., Kumbasar, N. 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, 76-500.

- Celep, Z., 2011. Yapı Dinamiği, 59-70.
- Chopra, A. 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 4th- Edition, Prentice Hall, USA, 995p.
- Çalık, İ. Bayraktar, A., Türker, T. 2013. Tarihi yığma yapıların dinamik karakteristiklerine restorasyon etkisinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle Belirlenmesi: Rize Merkez Büyük Gülbahar Camisi Örneği. 2. Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay.
- TBDY, (2018). Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Döven, M.S., Serhatoğlu, C., Kaplan, O., Livaoğlu, R. 2018. Kütahya Yeşil Minarenin Kapalı ve Açık Şerefeli Dinamik Davranışının Karşılaştırılması, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir.
- Ercan, E., Arısoy, B., Nuhoglu, A. 2009. Mevcut yapıların Deprem Davranışlarının Belirlenmesinde ve Güçlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler, İzmir Afet Riskini Azaltma Sempozyumu, İzmir, Bildiriler Kitabı: 179-199.
- Farrar, C.R., Doebling, S.W., 1997. Lessons Learned From Applications of Vibration Based Damaged Identification Methods to Large Bridge Structures, Proc. Of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 351-370.
- Güneş, B., Güneş, O., Andiç, H.İ. 2011. Titreşim Verileri Kullanılarak Deprem Sonrası Hasar Tespiti: Son Gelişmeler ve Güncel Araştırmalar, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara.
- Hakkak, E.C. 2012. Ayaklı Çelik Su Deposunun Dinamik Davranışının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Hwang, H.Y., Kim, C. 2004. Damage Detection in Structures Using a Few Frequency response measurements, Journal of Sound and Vibration 270 1-14.
- Maso, E.B., Gil, L. 2019. Assessing the Performance of CFRP Strengthening on Masonry Walls Using Experimental Modal Analysis, Engineering Structures 193, 184-193.
- Osmancıklı, G. 2012. Prefabrik Yapıların Dinamik Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

- Özçelik, Ö., Mısır, İ.S., Yücel, U. 2013. Model Bir Yapının Hasar Tanımlaması ve Model – Sarsıcı Etkileşiminin Azaltılması İçin Kullanılan Offline İterasyon Tekniği, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay.
- Özmen, G.,Orakdöğen, E., Darılmaz, K.2009. Örneklerle Sap-2000-V12, Birsen Yayınevi, sayfa 1,2.
- Peeters, B.,Roeck, de G. 2001. Stochastic System Identification for Operational Analysis:AReview, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control vol.123, 659-667.
- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis Cambridge University Press, Cambridge.
- SAP2000 Manuel. 2005. Integrated structural analysis and design software, Computer and StructuresInc., Berkeley, California.
- Seismosignal, 2010. Seismosoft, Earthquake Engineering Software Solutions, Messina, Italy.
- Türker, T. 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Türker, T. 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Xia, Y.,Hao, H. 2000. Measurement Selection for Vibration Based Structural Damage Identification, Journal of sound on Vibration 236(1), 89-104.
- Yetkin, M. 2016. Betonarme Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışının İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

## ÖZGEÇMİŞ

Ömer SEMİZ, 25.02.1982'da Niğde'de doğdu. İlk öğretimi Niğde 23 Nisan Havacılar İlköğretim Okulu, liseyi Niğde Atatürk Süper Lisesi'nde tamamladıktan sonra 2000 yılında girdiği Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2004 yılında bitirdi. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2006 yılında mühendis olarak çalışmaya başladığı Kara Kuvvetleri Komutanlığından sonra 2007 yılından beri Türkiye Vagon Sanayi Anonim Şirketinde mühendis olarak görev yapmaktadır.