



Betonarme Yapılarda Yapısal Hasarların Yapı Dinamik Özelliklerine Olan Etkilerinin Araştırılması ve Titreşim Analizleri ile Hasar Tespiti Yapılması

Program Kodu: 1001

Proje No: 116M254

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Fuat ARAS

Araştırmacı(lar):

Dr. Öğr. Üyesi Seyit Çeribaşı

Danışman(lar):

Prof. Dr. Necati ÇATBAŞ

Bursiyer(ler):

Tolga Akbaş

Ezel Kefeli

KASIM 2019
İSTANBUL



ÖNSÖZ

116M254 numaralı projemiz kapsamında yapısal eleman hasarlarının bina dinamik özelliklerine olan etkisi ve betonarme yapılarda titreşim analizi tabanlı hasar belirleme yöntemleri araştırılmıştır. Çalışmada İstanbul'da bulunan ve yıkılması planlanan iki adet betonarme bina deney numunesi olarak kullanılmıştır. Yürütülen çalışma bu nedenle tam ölçekli deneysel bir çalışmadır. Benzer bir çalışmayı en iyi laboratuvarlarda bile yapmak mümkün değildir.

Projemizin önerisi Mart 2016 döneminde yapılmış, kabul edildikten sonra 01 Temmuz 2017'de başlamıştır. Toplam 24 aylık sürede tamamlanması planlanan projemizde deney numunesi olarak kullanılması planlanan binaların zorunlu olarak değiştirilmesi nedeniyle, deneylerin başlamasında 12 aydan daha uzun bir süre gecikme yaşanmıştır. Bu durumun projeye olumsuz etki yapması, projenin gelişme ve sonuç raporları için talep edilen ve komisyonca kabul edilen üç aylık ötelenmeler ve proje ekibinin özverili çalışmaları sayesinde önlenmiştir. Ayrıca yeni binaların bulunması ve deneylerin yapılmasında Kadıköy Belediyesi ve 2T Mühendislik Ltd. Şti. önemli destekler vermiştir.

Proje, elde edilen sonuçlar itibariyle, deprem riski yüksek ve mevcut yapılarının büyük bir çoğunluğu betonarme olan ülkemiz için çok önemlidir. Çalışmayı MAG 116M254 nolu ARDEB 1001 projesi kapsamında desteklemiş olan TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. CİHAZ ALIMI VE BİNALARDA ÖN İNCELEME	8
4. MEVCUT BİNALARDA KİRİŞ KALDIRMA VE DUVAR YIKIMI AŞAMALARI İÇİN TİTREŞİM ANALİZLERİNİN UYGULANMASI	10
4.1 Binaların bağ kirişleriyle bağlı olma durumları için çevresel titreşim analizleri	11
4. 2. Binaların bağlayan bağ kirişlerinin kaldırılması ve tekrarlanan çevresel titreşim analizleri	19
4. 3. B Blok Binasında zemin kat bölme duvarların kaldırılması ve çevresel titreşim analizleri	27
5. ÇALIŞMA KAPSAMINDA TANIMLANAN HASAR DURUMLARI	33
6. A BLOK BİNASINA HASAR VERİLMESİ VE TİTREŞİM ANALİZLERİ	35
6.1. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1’de incelenmesi	35
6.2. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de incelenmesi	37
6.3. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3’te incelenmesi	39
6.4. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de incelenmesi	41
6.5. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de incelenmesi	44
7. B BLOK BİNASINA HASAR VERİLMESİ VE TİTREŞİM ANALİZLERİ	47
7.1. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1’de incelenmesi	47
7.2. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de incelenmesi	49
7.3. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3’te incelenmesi	51
7.4. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de incelenmesi	53
7.5. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de incelenmesi	55
8. FREKANS DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ	58

9. A VE B BLOK BİNALARINDA HASAR ETKİLERİNİN DÜŞEY İVME KAYITLARIYLA ANALİZ EDİLMESİ	61
9.1. A Blok Binasının düşey yönlü dinamik özellikleri	61
9.1.1. A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 1’de incelenmesi	62
9.1.2. A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 2’de incelenmesi	62
9.1.3. A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 3’te incelenmesi	63
9.1.4. A Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 1’de incelenmesi	63
9.1.5. A Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 2’de incelenmesi	64
9.2. B Blok Binasının düşey yönlü dinamik özellikleri	66
9.2.1. B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 1’de incelenmesi	67
9.2.2. B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 2’de incelenmesi	67
9.2.3. B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 3’te incelenmesi	68
9.2.4. B Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 1’de incelenmesi	68
9.2.5. B Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 2’de incelenmesi	69
9.3. Düşey Yönde alınan ivme kayıtlarının incelemesinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	70
10. HASARLARIN LOKAL ÖLÇÜMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ	72
11. BİNALARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL ANALİZLERLE BELİRLENMESİ	74
11.1. Sayısal modellerin mazırlanması	74
11.2. A Blok Binası sayısal dinamik analizleri	77
11.3. B Blok Binası sayısal dinamik analizleri	79
11.4. Sayısal ve deneysel yollarla elde edilen dinamik özelliklerin karşılaştırılması	81
11.4.1. A Blok Binası için sayısal ve deneysel yollarla elde edilen dinamik özelliklerin karşılaştırılması	81
11.4.2. B Blok Binası için sayısal ve deneysel yollarla elde edilen dinamik özelliklerin karşılaştırılması	82
11.5. Hasar etkilerinin sayısal olarak irdelenmesi	84
12. TİTREŞİM ANALİZLERİ İLE HASAR BELİRLEME ÇALIŞMASI	87
13. BETONARME YAPILARDA TİTREŞİM ESASLI HASAR TESPİTİ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEM	93
13.1. Önerilen yöntemin A Blok Binası için denenmesi	94
13.2. Önerilen yöntemin B Blok Binası için denenmesi	98
14. SONUÇ	101
KAYNAKLAR	104

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1. Betonarme yapı elemanlarında hasar sınıfları (Maeda vd., 2014)	7
Tablo 2. Binaların bağlı olma durumları için A Blok Binasında elde edilen dinamik özellikler	14
Tablo 3. Binaların bağlı olma durumları için B Blok Binasında elde edilen frekans değerleri	19
Tablo 4. A Blok Binasının elde edilen modal değerleri	22
Tablo 5. B Blok Binasının modal değerleri	26
Tablo 6. B Blok Binasının duvarsız halinin modal değerleri	30
Tablo 8. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için modal değerleri	36
Tablo 7. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için modal değerleri	38
Tablo 9. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için modal değerleri	41
Tablo 10. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için modal değerleri	44
Tablo 11. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için modal değerleri	46
Tablo 12. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için modal değerleri	49
Tablo 13. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için modal değerleri	50
Tablo 14. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için modal değerleri	53
Tablo 15. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için modal değerleri	55
Tablo 16. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için modal değerleri	57
Tablo 17. Farklı hasar durumları için A Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (TNS)	59
Tablo 18. Farklı hasar durumları için A Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (Artemis, GFOA)	59
Tablo 19. Farklı hasar durumları için B Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (TNS)	59
Tablo 20. Farklı hasar durumları için B Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (Artemis, GFOA)	60
Tablo 21. A Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde dinamik özellikler	62
Tablo 22. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey yönde dinamik özellikleri	64
Tablo 23. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey yönde dinamik özellikler	65
Tablo 24. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde dinamik özellikler	67

Tablo 25. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey yönde dinamik özellikleri	69
Tablo 26. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde dinamik özellikler	70
Tablo 27. A Blok Binasının sayısal olarak elde edilen dinamik özellikleri	78
Table 28. B Blok Binasının sayısal olarak elde edilen dinamik özellikleri	80
Tablo 29. A Blok Binasının elde edilen dinamik modları ve Modal Eşleştirme	82
Tablo 30. B Blok Binasının elde edilen dinamik modları ve Modal Eşleştirme	83
Tablo 31. A Blok Binası için farklı hasar seviyelerinde sayısal analizlerden elde edilen frekanslar	85
Tablo 32. B Blok Binası için farklı hasar seviyelerinde sayısal analizlerden elde edilen frekanslar	85
Tablo 33. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda X yönü Modal Yer Değiştirmeleri	94
Tablo 34. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda X yönü Görelî Modal Yer Değiştirmeleri	95
Tablo 35. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda X yönünde Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin değişimi	96
Tablo 36. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Modal Yer Değiştirmeleri	97
Tablo 37. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmeleri	97
Tablo 38. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin değişimi	97
Tablo 39. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda X yönündeki Modal Yer Değiştirmeleri	98
Tablo 40. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda X yönündeki Görelî Modal Yer Değiştirmeleri	99
Tablo 41. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda X yönündeki Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin değişimi	99
Tablo 42. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Modal Yer Değiştirmeleri	100
Tablo 43. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmeleri	100
Tablo 44. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin değişimi	100

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1. Projede kullanılan binalar	2
Şekil 2. Projede kullanılan binaların yapısal sistemi	9
Şekil 3. Projede kullanılan binaların mimari planları	9
Şekil 4. Dinamik tanımlama için ivmeölçer konumları	11
Şekil 6. A Blok binasının X Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	12
Şekil 7. A Blok binasının Y Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	12
Şekil 8. A Blok binasının X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi	13
Şekil 9. A Blok Binasının B Blok Binası ile bağlı olma durumu için SYTD gösterimi	14
Şekil 10. A Blok Binasının B Blok Binası ile bağlı olma durumu için elde edilen mod şekilleri	15
Şekil 11. A Blok Binasının B Blok Binası ile bağlı olma durumunda elde edilen modların MAC değerleri	15
Şekil 12. B Blok Binasının X Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	16
Şekil 13. B Blok Binasının Y Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	16
Şekil 14. B Blok Binasının X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi	17
Şekil 15. B Blok Binasının A Blok Binası ile bağlı olma durumu için SYTD gösterimi	17
Şekil 16. B Blok Binasının A Blok Binası ile bağlı olma durumu için elde edilen mod şekilleri	18
Şekil 17. B Blok Binasının A Blok Binası ile bağlı olma durumunda elde edilen modların MAC değerleri	18
Şekil 18. Binaları birbirine bağlayan bağ kirişleri	20

Şekil 19. Binaların bağ kirişli ve bağ kirişsiz hali	20
Şekil 20. A Blok binasının bağ kiriş kırımından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	20
Şekil 21. A Blok binasının bağ kiriş kırımından sonra Y yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	21
Şekil 22. A Blok binasının bağ kiriş kırımından sonra X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi	21
Şekil 23. A Blok Binası için SYTD gösterimi	22
Şekil 24. A Blok Binasının mod şekilleri	23
Şekil 25. A Blok Binasının modlarının MAC değerleri	23
Şekil 26. B Blok Binasının bağ kiriş kırımından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	24
Şekil 27. B Blok Binasının bağ kiriş kırımından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	24
Şekil 28. B Blok Binasının bağ kiriş kırımından sonra X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi	25
Şekil 29. B Blok Binasının SYTD gösterimi	25
Şekil 30. B Blok Binasının mod şekilleri	26
Şekil 31. B Blok Binasından modların MAC değerleri	27
Şekil 32. B Blok Binasında gerçekleştirilen zemin kat duvar yıkımı	28
Şekil 33. B Blok Binasının zemin kat duvarlarının kaldırılmasından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	28
Şekil 34. B Blok Binasının zemin kat duvarlarının kaldırılmasından sonra Y yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi	29
Şekil 35. B Blok Binasının zemin kat duvarlarının kaldırılmasından sonra X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi	29
Şekil 36. B Blok Binasının duvarsız hali için SYTD gösterimi	30
Şekil 37. B Blok Binasının duvarsız halinin mod şekilleri	31
Şekil 38. B Blok Binasından duvarsız hali modların MAC değerleri	32
Şekil 39. Binalara uygulanan hasar senaryosu ve sırası	34
Şekil 40. Hasar analizlerinde kullanılması planlanan ilave ivmeölçer konumları	34
Şekil 41. A blokta iki köşe kolona verilen hafif hasarlar	35
Şekil 42. A Blok binasının Hafif Hasar – 1’de baskın frekansları	36
Şekil 43. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için SYTD gösterimi	37
Şekil 44. A Blok Binasında üç kolona verilen hafif hasar ve üçüncü kolondaki	37

hasar detayları

Şekil 45. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de baskın frekansları	38
Şekil 46. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için SYTD gösterimi	39
Şekil 47. A Blok Binasında hafif hasarlı kolonları birleştiren kirişe verilen hasar detayları	39
Şekil 48. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3’te baskın frekansları	40
Şekil 49. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için SYTD gösterimi	41
Şekil 50. A Blok Binasına Ağır Hasar – 1’de verilen köşe kolon hasarları	42
Şekil 51. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de baskın frekansları	42
Şekil 52. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için SYTD gösterimi	43
Şekil 53. A Blok Binasında Ağır Hasar – 1’de belirlenen mod şekilleri	43
Şekil 54. A Blok Binasında Ağır Hasar – 2 durumu ve Ağır Hasarlı kenar kolon	44
Şekil 55. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de baskın frekansları	45
Şekil 56. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için SYTD gösterimi	45
Şekil 57. B Blok Binasında iki köşe kolona verilen hafif hasar	47
Şekil 58. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1’de baskın frekansları	48
Şekil 59. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için SYTD gösterimi	48
Şekil 60. B Blok Binasına Hafif Hasar – 2’de verilen kenar kolon hasarları	49
Şekil 61. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de baskın frekansları	50
Şekil 62. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için SYTD gösterimi	51
Şekil 63. B Blok Binasında Hafif Hasar – 3 için kirişe verilen hasar.	51
Şekil 64. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3’te baskın frekansları	52
Şekil 65. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için SYTD gösterimi	53
Şekil 66. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de durumu ve hasar verilen köşe kolonlar	54
Şekil 67. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de baskın frekansları	54
Şekil 68. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için SYTD gösterimi	55
Şekil 69. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de durumu ve hasar verilen kenar kolon	56
Şekil 70. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de baskın frekansları	56
Şekil 71. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için SYTD gösterimi	57
Şekil 72. A Blok Binasının orijinal hali için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	61
Şekil 73. A Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri	61

Şekil 74. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	62
Şekil 75. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	63
Şekil 76. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	63
Şekil 77. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	64
Şekil 78. A Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri	64
Şekil 79. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	65
Şekil 80. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey yönde elde edilen mod şekilleri	65
Şekil 81. B Blok Binasının orijinal hali için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	66
Şekil 82. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri	66
Şekil 83. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	67
Şekil 84. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	68
Şekil 85. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	68
Şekil 86. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	69
Şekil 87. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri	69
Şekil 88. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi	70
Şekil 89. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey yönde elde edilen mod şekilleri	70
Şekil 90. A ve B Blok Binalarında Ağır Hasarlara bağlı olarak oluşan düşey modlar	71
Şekil 91. Hasarlı bölgelere yerleştirilen ivmeölçerler	72
Şekil 92. A Blok 1. Kat Köşe noktasından alınan ölçümlerin FFT gösterimleri	73
Şekil 93. B Blok 1. Kat Köşe noktasından alınan ölçümlerin FFT gösterimleri	74
Şekil 94. A Blok Binası için hazırlanan sayısal model	76

Şekil 95. B Blok Binası için hazırlanan sayısal model	76
Şekil 96. A Blok Binasının sayısal olarak elde edilen ilk altı dinamik mod şekli	77
Şekil 97. B Blok Binasının sayısal olarak elde edilen ilk altı dinamik mod şekli	79
Şekil 98. A Blok Binası için hasar indeksinin değişim	89
Şekil 99. A Blok Binası için modal frekansların değişimi	89
Şekil 100. B Blok Binası için hasar indeksinin değişimi	90
Şekil 101. B Blok Binası için modal frekansların değişimi	90

ÖZET

Betonarme binaların yapısal hasarlar karşısında davranış değişikliklerinin belirlenmesi, oluşabilecek yapısal hasarların varlığının ve yerinin tespit edilmesi önemli bir konudur. Bu projede, yıkılması planlanan iki adet altı katlı betonarme yapıya, yapıların hasarsız ve beş farklı kademede hasarlı halleri için Operasyonel Modal Analiz (OMA) prensipleriyle titreşim analizleri uygulanmıştır. Çalışılan binalardan birisinin zemin katında bölme duvarları yoktur. Proje kapsamında üç adet kolon ve bir adet kirişe verilen hasarlar; Hafif Hasar – 1 (HH1), Hafif Hasar – 2 (HH2), Hafif Hasar – 3 (HH3), Ağır Hasar – 1 (AH1) ve Ağır Hasar – 2 (AH2) olarak isimlendirilmiştir. Hafif Hasar ismi yapı elemanlarında darbeli olarak pas payı dökülmesi ve donatının ortaya çıkarılması durumu için kullanılırken, Ağır Hasar ismi elemanın çekirdek betonu kırılıncaya kadar darbeye maruz kalması için kullanılmıştır.

Yapı dinamik modlarında hasar bölgesinin dinamik hareketi birinci modda ortaya çıktığı için değerlendirmelerin birinci modda en belirgin şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. Hasar nedeni frekans azalması zemin katında bölme duvarları olmayan binada %4'ü geçmekteyken diğer binada %3'e ulaşmaktadır. Hasarlar yapıların mod şekillerinde belirgin değişikliğe neden olmazken, AH1 ve AH2 her iki yapıda modlara düşey yönde yer değiştirme kazandırmıştır. Gerçekleştirilen analizler sayısal olarak da doğrulanmıştır.

Hasarlı yapılardan elde edilen titreşim kayıtlarının, yapıların hasarsız durumu için titreşim kayıtlarının elde olmaması durumunda kullanılabilirliği sorgulanmıştır. Hasarın yapıda genel davranışta beklenmeyen bir mod oluşturması durumunda hasar varlığını işaret edebileceği tespit edilmiştir.

Bu proje kapsamında elde edilen sonuçlara ve çalışılan yapıların genel özelliklerine göre hasar tespit yöntemi olarak dinamik mod şekillerini baz alan bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde, yapı dinamik mod şekillerinde hasar seviyelerinde oluşacak değişimler Görelî Modal Yer Değiştirmelerin Değişimine bağlanmıştır. Önerilen yöntemin hasarlı bölgenin hareketini içeren dinamik mod dikkate alındığında iyi sonuçlar verdiği, ancak uygun eşik değerlerin tespiti için bu konuda daha fazla deney yapılması gerekliliği görülmüştür.

Belirtilen sonuçlarla 116M254 numaralı proje tüm amaçlarına ulaşarak tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme binalar, hasar tespiti, titreşim analizleri, yapısal hasarlar



ABSTRACT

The existence of the damage, their location and the determination of the changes in the behaviour of Reinforced concrete buildings with respect to experienced structural damages are important subjects. In this project, Operational Modal Analysis (OMA) based vibration surveys are applied into two six-story reinforced concrete buildings with their undamaged and five progressive damaged phases. One of the studied buildings does not have infills on its ground floor. Three columns and one beam in each building experienced the damages which are named as Light Damage – 1 (LD1), Light Damage – 2 (LD2), Light Damage – 3 (LD3), Heavy Damage – 1 (HD1), Heavy Damage – 2 (HD2) in this project. Light Damage represents the spalling of clear cover and appearance of reinforcement bars, while Heavy Damage denotes the cracking of core concrete of element with impacts.

It is seen that, the evaluation is valid for the first dynamic mode of the building since the damaged zone is active in this mode. Induced by the experienced damage, the frequency decrease is 4% for the building without infills in its ground floor, while it is about 3 % for the other. The damages do not cause any significant change in the mode shapes but HD1 and HD2 make the mode has displacement in vertical direction for the damaged zone. The numerical analyses also confirmed the obtained experimental results.

The use of the vibration records obtained from a damaged building without having the records from its undamaged phase for damage detection is questioned. It is concluded that, if the records indicate an unexpected dynamic mode, the damage may be identified.

A method, based on the mode shapes is proposed as damage detection of buildings, as the result of the performed project. In this method the changes on the mode shapes are evaluated with the Variation of Modal Drifts. It is seen that, the proposed method is working well when the mode representing the movement of the damaged zone is accounted. However, it is seen that more experimental research should be performed for the limit values.

With the mentioned results the project 116M254 is completed successfully.

Keywords: Reinforced Concrete buildings, damage identification, vibration surveys, structural damages

1. GİRİŞ

Türkiye yapı stokunun büyük bir bölümünü betonarme yapılar oluşturmaktadır ve şehir nüfusu bu çok katlı betonarme yapılarda yaşamaktadır. Son depremlerde, deprem odağına yakın mesafede bulunan bu yapıların birçoğu yıkılarak geniş yıkım ve can kaybına neden olmuştur. Bu nedenlerle betonarme binaların yapı davranışlarının incelenmesi son derece önemli bir konudur ve bu kapsamda yürütülmüş birçok deneysel çalışma vardır. Ancak bu çalışmalar genel olarak laboratuvar ortamlarında, deneysel amaçlarla üretilmiş yapı elemanları (kolon, kiriş, birleşim noktası), küçültülmüş çerçeveler ve sarsma tablası altyapısı ile küçültülmüş üç boyutlu modeller üzerinde yapılmaktadır. Hem yüksek laboratuvar alt yapı maliyeti hem de yüksek numune hazırlama maliyetleri bu çalışmaların yürütülmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçların her zaman ölçeklendirme, hedeflenen deney numunesinin hazırlanması (malzeme ve detaylar) ve hedeflenen kuvvetin uygulanması nedeniyle tartışmaya her zaman açıktır.

Deneysel çalışmalarda karşılaşılan bu problemler gerçek yapıların deneylerde kullanılması ile çözülebilir. Bu doğrultuda, bu çalışmada Kadıköy’de bulunan iki adet altı katlı betonarme bina (Şekil 1) deney numunesi olarak kullanılmış ve farklı düzeydeki yapısal hasarların bina dinamik özelliklerine olan etkileri titreşim analizleriyle incelenmiştir. Bu çerçevede betonarme binalardaki yapısal elemanların hasar (orta – ağır) durumlarının yapının dinamik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında planlanan hasar seviyeleri binalar uygulanmadan evvel, binaları birbirine kat seviyelerinde bağlayan kırşiler kırılmış ve binalardan birinin zemin katında bulunan bölme duvarlar kaldırılmıştır. Çalışma planına göre, çalışılacak iki adet binanın hasarsız durumlarının dinamik özellikleri titreşim analizleri ile belirlenmiştir. Sonra binalarda bulunan yapı elemanlarına kademeli hasarlar verilmiştir. Proje kapsamında binalara verilen hasarlar bina yıkım işinde kullanılan iş makineleri ile vermiştir. İlk önce yapıların köşe bölgesinde bulunan ve birbirine çok yakın olan iki adet kolona, sonra bu kolonlara komşu bir kenar kolona ve son olarak bu kolonları birleştiren kirişe pas payı dökülmesi olarak tanımlanabilecek orta hasar verilmiştir. Daha sonra, iki köşe kolon ve kenar kolon darbelerle ağır hasarlı duruma getirilmiştir. Tanımlanan beş adet hasar kademesi için binalardan Operasyonel Modal Analiz (OMA) ilkelerine göre titreşim kayıtları alınmış ve bina dinamik özellikleri hasar seviyelerinde belirlenmiştir.



Şekil 1. Projede kullanılan binalar

Çalışma kapsamında titreşim analizlerine dayanan hasar belirleme teknikleri incelenmiştir. İncelenen binalardan elde edilen titreşim kayıtları bu hasar belirleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca katlar arası görelî modal yerdeğıştirmelerin hasar izleme parametresi olarak kullanılması önerilmiştir.

Son olarak, hasar öncesi titreşim kaydı bulunmayan yapıların sadece mevcut (hasarlı) durumlarından alınacak titreşim kayıtları ile hasar belirleme işinin yapılabilirliğı incelenmiştir. Bunun için yapılardan titreşim frekansı ve mod şekilleri gibi dinamik parametrelerin belirlenmesi için gerekli olan yanal titreşimler yanında düşey titreşim kayıtları da önem taşımaktadır. Hasarlı binalardan alınan düşey titreşim sinyallerinin özelliklerinin değışimi irdelenmiş ve yapıda var olan hasarlar ile eşleştirilmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın yapılacağı binalar Türkiye mevcut yapı stokunu temsil edecek niteliktedir. Altı katlı, betonarme çerçevelerden oluşan bu yapılar çift daire olarak tabir edilen genel apartman tipi yapılardır ve 2007 deprem yönetmeliğıne göre deprem performansları yetersizdir. Bu bağlamda proje sonuçlarının deprem sonrasında hasar görebilecek yapıların hasar tespiti ve hasar durumlarının belirlenmesi için önemlidir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Betonarme binalarda deprem ve diğer dış etkilere dolayı oluşan hasarların tespiti son zamanlarda çoklukla çalışılan konular arasındadır. Özellikle deprem bölgelerinde bulunan betonarme yapıların çokluğu ve deprem sonrasında gereken hızlı ve güvenilir değerlendirme yöntemlerine olan ihtiyaç bu çalışmaların sayısının zamanla artacağını göstermektedir. Ayrıca terörist saldırılar, araç çarpmaları, mutfak tüpü patlamaları ve kısmi zemin oturmaları nedeni ile oluşabilecek hasarlar bu çalışmaların önemini artırmaktadır. Gerçek binalar üzerinde yapılan çalışmalarda deneysel modal analiz yöntemi gerçek binaların dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan tam ölçekli bir yöntem olduğu için betonarme binalardaki mevcut hasarların tespitinde de kullanılabilir.

Bu projenin konusu tam ölçekli ve hasarlı yöntemlerle gerçek binalarda farklı seviyelerdeki hasarların yapı dinamik özelliklerine olan etkilerinin araştırılması ve titreşim analizleri ile hasar tespitinin yapılması olarak özetlenebilir. Bu konu ile ilgili olarak, Di Casere vd. $M=5.4$ ve $M=5.3$ büyüklüğündeki iki depremden hasar görmüş, beş katlı betonarme bir yapının hasarlı durumu için titreşim analizlerini kullanarak hasar tespitini yapmaya çalışmış ve numerik analizlerle hasarsız binanın kütle ve rijitlik parametrelerini tahmin etmiştir (Di Casere vd. 2014). Fang ve diğ. laboratuvarında hazırlanan iki boyutlu, tek açıklıklı ve tek katlı deney numunesi üzerinde deneysel ve nümerik olarak hesaplanan modal frekans ve mod şekillerine bağlı olarak iki boyutlu hasar belirleme fonksiyonu ile hasar tespiti yapmaya çalışmıştır (Fang vd. 2008). Başka bir önemli çalışmada ise Bui vd. iki kolon ve bir kirişten oluşan betonarme bir çerçevede titreşim analizleri yardımıyla hasar belirleme çalışması yapmışlardır. İki boyutlu çerçevede bulunan kiriş orta noktasından düşey yönde yüklenmiş ve farklı hasar durumları oluşturulmuştur. Her bir hasar durumunda numuneden titreşim ve yer değiştirme kayıtları alınarak hasar tespiti çalışmaları yapılmıştır (Bui vd. 2014). Gerçek binalarda titreşim analizleri ile hasar çalışması için yapılan önemli başka bir çalışmada ise Lemnitzer vd. 2010 yılında gerçekleşen Şili depreminden sonra ($M=8.8$) dört adet betonarme yapıyı ivmeölçerlerle donatarak deprem sonrası davranışlarını incelemişlerdir. İncelenen yapıların iki tanesinde deprem hasarı yokken bir tanesi hafif, diğeri de ağır hasarlı olması binalarda artçı sarsıntıların kaydedilmesi farklı seviyede hasarlı binaların artçı sarsıntılar altında davranışları ile ilgili önemli bilgiler vermiştir (Lemnitzer vd. 2014). Türker ve Bayraktar ise $\frac{1}{2}$ oranında küçültülmüş laboratuvarında hazırlanmış tek katlı betonarme bina numunesi üzerinde hasar belirleme çalışmaları yürütmüşlerdir. Deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen dinamik özelliklerin benzeşimi yardımı ile hasar belirleme

çalışmaları yapılmış ve kullanılan yöntemin etkinliğine vurgu yapılmıştır (Türker ve Bayraktar, 2014).

Yapılarda oluşabilecek hasarın yerinin ve seviyesinin belirlenmesine yönelik de literatürde birçok çalışma daha vardır (Zheng ve dig. 2015; Kaveh ve Zolghadr, 2015; Dessi and Camerlengo, 2015). Zheng ve dig. Güç Spektral Yoğunluğu (power spectral density) fonksiyonuna bağlı olarak geliştirdikleri bir metotla hasarın yerini ve derecesini belirlemeye çalışmışlardır. (Zheng ve dig. 2015). Kaveh ve Zolghadr ise kafes sistemlerin hasar nedeni ile modal frekanslarında meydana gelecek değişiklikleri baz alarak hasar tespiti yapmaya çalışmıştır (Kaveh ve Zolghadr, 2015). Konu ile ilgili farklı metotların karşılaştırılması ise Dessi ve Camerlengo tarafından yapılmıştır. Hayali basit mesnetli bir kiriş kullanılarak orta bölgesi hasarlı kabul edilmiş ve hasar tespiti için farklı metotlar karşılatılmıştır (Dessi and Camerlengo, 2015). Gül ve Çatbaş (2011) tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise çeşitli hasar yeri ve derecesi belirleme yöntemleri laboratuvarında tasarlanmış çelik çerçeveli sistemde denenmiştir. Çevresel titreşim analizleri yardımı ile eleman bağlantılarındaki eksiklikler (bulon çıkarma) ve mesnet çökmeleri incelenmiş ve titreşim analizleri ile bunların tespitine çalışılmıştır. Çalışmada ele alınan modal tanımlama yöntemlerinin (RD: Random Decreament, ARX: Auto-Regressive Model with Exogenous Input) hasar belirleme için iyi performans gösterdiklerinin altı çizilmiştir (Gül ve Çatbaş 2011). Bu çalışmanın devamı olarak gösterilebilecek bir çalışmada ise aynı çelik yapıdan elde edilen titreşimlerle belirsiz sonlu elemanlar modeli doğrulama yöntemi (Fuzzy Finite Elelment Model Updating) ile belirsizlik çalışmaları yapılmıştır (Erdoğan vd. 2014). Bu bağlamda hasar tanımlama çalışmalarına verilecek örnekler çoğaltılabilir. Ancak bu çalışmaların hepsi genel olarak basit sistemler için gerçekleştirilen sayısal analizlerle sınırlı kalmıştır.

Bu projede uygulanan titreşim analizleri ile dinamik özelliklerin belirlenmesi işi tam ölçekli deneysel analiz olarak bilinmektedir ve bilimsel problemlerin araştırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Titreşim analizlerinde yapılar ya bilinen bir etki ile titreştirilmekte ya da çevresel titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılabilmektedir (Bayraktar vd., 2010). Ölçümlerde kullanılan titreşim kuvvetinin değeri bilinmiyorsa (trafik ve rüzgar gibi etkiler) Çevresel Titreşim Analizi, titreşim etkisi biliniyorsa (yapıya uygulanan kuvvet veya titreştirici etkileri) dış etki altında titreşim analizi olarak ikiye ayrılır.

Mühendislik yapılarının deprem, rüzgâr, taşıt ve insan hareketleri, makine titreşimleri gibi genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinmeyen titreştiriciler tarafından tetiklendiği bilinmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve elektronik imkânlar, titreşimlere maruz

mühendislik yapılarının ölçümünde bir titreştirici kullanmak yerine yapıdaki mevcut titreşimleri dikkate alarak ölçüm yapılabilmeyi mümkün kılmaktadır. Çok hassas sensörler yardımı ile zaman tanım alanında alınan ivme, hız veya yer değiştirme ölçümleri bilgisayarlar sayesinde uygulamaları basitleşen matematiksel işlemlerle (Fourier Transform (FT), Power Spectral Density (PSD)) frekans alanına çevrilebilmekte ve yapının titreşim modlarına ait frekansları elde edilebilmektedir. Her bir titreşim moduna karşı gelen sönüm oranları ise yine kayıtların frekans alanında elde edilen dönüşümlerinden hesaplanabilir (Aras 2016).

Ancak mod şekillerinin belirlenmesi frekans ve sönüm oranlarının belirlenmesi kadar kolay değildir. Genel olarak bilinmeyen etki ve ölçülen tepki fonksiyonları arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(w)] = [H(w)]^* [G_{xx}(w)] [H(w)]^T \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada $[G_{xx}(w)]$ ve $[G_{yy}(w)]$ etki ve tepki sinyallerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonlarını, $[H(w)]$ ise frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Bu ifadedeki * ve T fonksiyonların eşlenik ve transpozisini göstermektedir. Bu bağıntıda etkinin beyaz gürültü olduğu varsayılarak etki sinyaline ait spektral yoğunluk fonksiyonu sabit alınmıştır. Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrık değerler olarak,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; U_i , u_{ij} tekil vektörlerinden (mod vektörlerinden) oluşan birim matrisi, S_i , s_{ij} tekil değerlerden (öz değerlerden) oluşan diyagonal matrisi göstermektedir. Bu yöntemde yapıyı titreştirmek amacıyla uygulanan kuvvetin genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinemediğinden dolayı, ölçümler yapının ölçüm yapılan frekans aralığında tahrik edilmesini temin edebilecek kadar uzun süreli alınmalıdır. Ölçümlerde sadece yapıya ait tepkiler zaman ortamında belirli noktalardan ölçülmekte ve farklı yöntemler kullanılarak yapı dinamik parametreleri elde edilmektedir (Bayraktar vd., 2010).

Çevresel titreşim analizleri İnşaat Mühendisliği yapılarında, normal analiz yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda sıklıkla kullanılmakla beraber, teknolojik altyapının artmasıyla beraber kullanımı giderek genişlemektedir. Yapı malzeme özelliklerinin normal testlerle belirlenemediği tarihi binalarda (Aras vd., 2011), sınır koşullarının (mesnet şartları veya eleman bağlantıları) tam belli olmadığı yapılarda, dinamik özelliklerin yapı kullanımı için çok önemli olduğu köprülerde (Macdonald ve Daniell (2005), Bayraktar vd., 2008), deprem

güvenliğinin çok büyük önem arz ettiği mevcut barajlarda (Sevim ve dig. 2011) veya hasar durumunun belirlenemediği özel yapılarda (Ramos vd., 2010; Shiradhonkar ve Shrikhande, 2011; Chellini vd., 2010) sıklıkla kullanılmaktadır. Bu analizler için gerçek yapının beklenen dinamik davranışına göre ölçüm yerleri belirlenmekte ve titreşim kayıtlarının analiz edilmesinden sonra bu ölçüm yerlerine bağlı olarak yapı dinamik özellikleri elde edilmektedir. Elde edilen dinamik parametreler yapının sayısal modelinin doğrulanmasında kullanılmakta ve bu işlem dinamik tanımlama veya sistem tanımlama olarak adlandırılmaktadır (Cantieni, 2005).

İnşaat mühendisliği alanında titreşim analizleri son yıllarda birçok araştırmada kullanılmıştır. Ivanovic vd. (2000) deprem etkisi altında hasar görmüş betonarme bir yapıya çevresel titreşim analizi uygulamıştır. Betonarme yapılar ile ilgili bir başka çalışma ise Ventura vd., (2003) titreşim analizlerini çok katlı yüksek binalar için kullandığı çalışmadır. Gentile ve Saisi (2007) titreşim analizleri ile 17. Yüzyılda inşa edilmiş 74 metre yüksekliğindeki tarihi yağma bir kulenin mevcut durumunu incelemişlerdir. Ayrıca çelik binalar (Nateghi–A, 1997), köprüler (Altunışık vd., 2011) ve silolar (Amiri ve Sabbagh–Yazdi, 2011) içinde çevresel titreşim analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında deprem etkisi altında en çok zorlanan kat olan zemin kattaki yapı elemanlarına orta ve ağır zarar verilmesi planlanmıştır. Bu noktada hasar derecelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, Japonya’da deprem sonrasında betonarme binaların hasar değerlendirmesinde kullanılan hasar sınıflandırma sisteminden yararlanılmıştır (Maeda vd., 2014). Betonarme yapı elemanlarında görülebilecek hasar durumlarını açıklayıcı olarak ele alması ve bu çalışmada yapı elemanlarına verilmek hasar durumlarına örtüşmesi nedeni ile bu sınıflandırma tercih edilmiştir. Tablo 1 belirtilen hasar sınıflandırmasını göstermektedir. Tanımlanan hasar durumları yanal yük etkisinde betonarme binalarda oluşmuştur.

Bu çalışma kapsamında tanımlanan hasar derecelerinin iş makinasıyla oluşturulması çok zordur. Ancak Hasar IV ve Hasar V yapı elemanlarında tutturulabilir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında kullanılacak iki farklı eleman hasarı Tablo 1’de görülen IV ve V numaralı hasarlara denk gelmektedir.

Tablo 1. Betonarme yapı elemanlarında hasar sınıfları (Maeda vd., 2014)

Hasar Sınıfı	Yapı elemanlarında gözlemlenen hasar
I	Görünür dar çatlaklar mevcut (Çatlak genişliği 0,2 mm'den küçük)
II	Beton yüzeyinde açıkça görünen çatlaklar (Çatlak genişliği 0,2 – 1 mm arasında)
III	Pas payı betonunun lokal ezilmesi Belirgin geniş çatlaklar (Çatlak genişliği yaklaşık 1 2 mm)
IV	Pas payında belirgin ezilme ve donatıların ortaya çıkması Pas payı dökülmesi (Çatlak genişliği 2 mm'den büyük)
V	Donatı burkulması Çekirdek betonunda çatlama Kolon ve/veya duvarlarda görünür düşey ve/veya yatay yer değiştirme Binada görünür oturma ve/veya düşey akstan kayma

Türkiye’de gerçek betonarme binalar üzerinde yapılan en önemli çalışmalardan birisi İlki vd’nin 2014 yılında tamamladıkları İstanbul Fikirtepe kentsel dönüşüm bölgesinde bulunan ve yıkılması planlanan bir binada gerçekleştirdikleri çalışmadır. Bu çalışmada yıkılacak bir bina, beton kesme yoluyla küçültülerek, üç katlı ve her iki yönde tek açıklıklı bir test numunesi elde edilmiştir. Yapılan statik ve dinamik deneylerle bilimsel içerikli ve gerçekçi birçok bilgi elde edilmiştir (İlki vd. 2014).

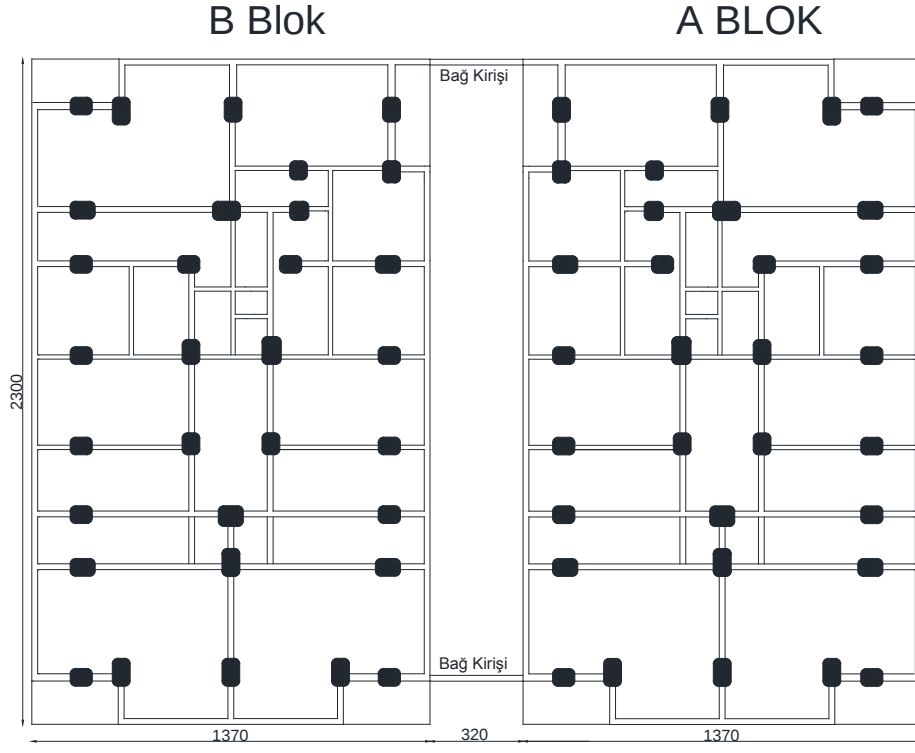
3. CİHAZ ALIMI VE BİNALARDA ÖN İNCELEME

Projede kullanılması öngörülen, çevresel titreşim analizi yapmaya elverişli ivmeölçerler satın alınmıştır. Bu bağlamda beş adet SARA – Acebox ivmeölçerleri tercih edilmiştir. İvmeölçerlerin her biri kendi ağına çalışabilen, kendi içinde hafızası olan ve GPS anteni ile kontrol edilebilen cihazdır. Her bir cihazın üç eksenine yerleştirilmiş üç sensörü bulunmaktadır. Sensörler $\pm 2g$ aralığında ivme kaydetmektedir ve gürültü seviyesi 20 ng/ $\sqrt{Hz}$ 'de azdır. Bu özellikleriyle satın alınan sensörler binalarda operasyonel modal analiz yapmaya uygundur. Satın alınan ivmeölçerler kullanılarak proje yürütücüsü tarafından 9 katlı bir binanın yıkımı süresince dinamik özelliklerin değişimi izlenmiş ve sonuçlar bilimsel makale olarak yayınlanmıştır (Aras, 2019).

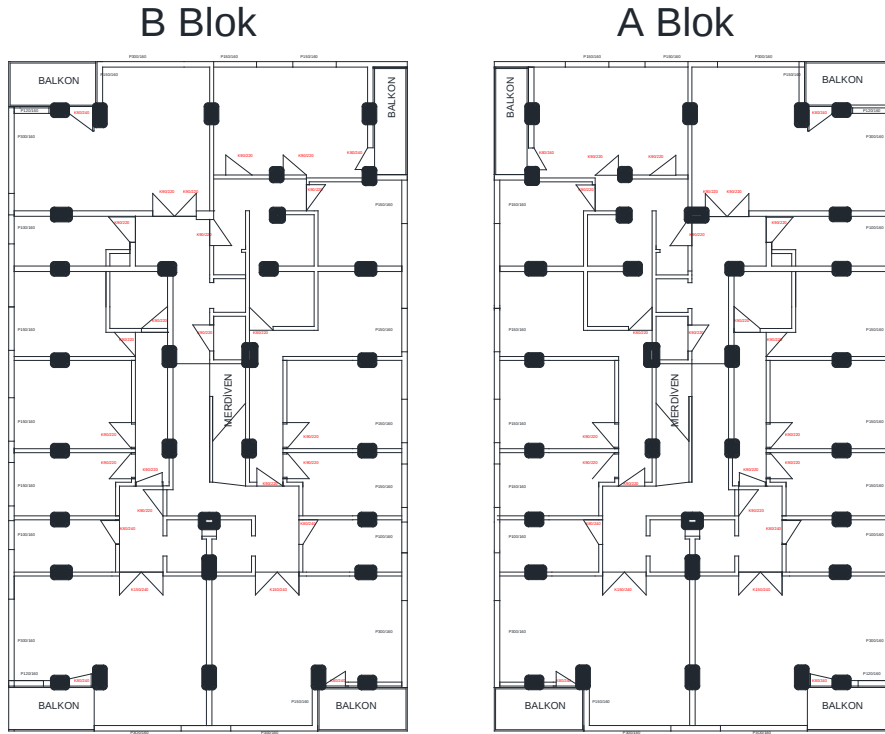
Çalışmanın yapılacağı binalar Kadıköy ilçesi sınırlarındadır ve projede planlanan deneylerin yapılması için Kadıköy Belediyesinden izin alınmıştır. Bu binalar yapısal sistem olarak birbirinin simetriğidir. Ayrıca her kat seviyesinde bağ kirişleri ile birbirine bağlı durumdadır. Bu nedenle yapıların dinamik özelliklerinin birbirinden etkileneceği açıktır. Proje kapsamında planlanan deneylerin yapılması için bu binaların birbirinden ayrılması gerekmektedir.

Ön inceleme safhasında binaların her biri için öncelikle beton sınıfı belirleme çalışması yapılmıştır. Beton deneylerinin detayları Ek1'de gösterilmiştir. A Blok için yapılan deneyler sonucunda karot numunelerinin ortalama küp basınç dayanımı 16.11 MPa, sonuçların standart sapması 8 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı değerler B Blok için 15,1 MPa ve 3,62 MPa olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında bu değerler ileride yapılar için kurulacak sonlu elemanlar modeli gibi sayısal analizlerde kullanılacaktır.

Yapıların ayrıca taşıyıcı sistem ve mimari planların hazırlanması çalışmaları yapılmıştır. Bunun için Kadıköy Belediyesinden yapının planları temin edilmiştir. Yapı mevcut sistemi bu planlarla kontrol edilmiş ve sonrasında yapı planları bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 2 ve Şekil 3 bina taşıyıcı sistemi ve mimari planlarını göstermektedir.



Şekil 2. Projede kullanılan binaların yapısal sistemi



Şekil 3. Projede kullanılan binaların mimari planları

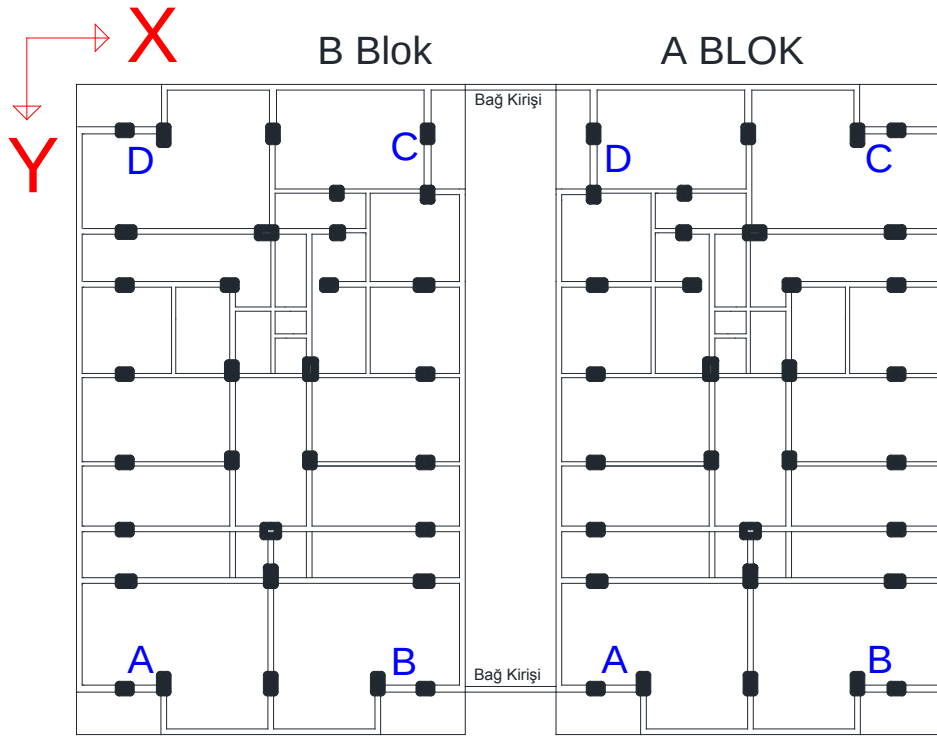
4. MEVCUT BİNALARDA KİRİŞ KALDIRMA VE DUVAR YIKIMI AŞAMALARI İÇİN TİTREŞİM ANALİZLERİNİN UYGULANMASI

Projenin deneysel kısmının ilk bölümünde taşıyıcı sistem ve mimari detayları aynı olan, ancak birinin zemin katında bölme duvarları olmayan 6 katlı iki adet binanın dinamik özelliklerinin çevresel titreşim analizleriyle belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, projede çalışılan binaların öncelikle birbirinden ayrılması, sonrasında birisinin zemin katında bulunan duvarlarının yıkılması işleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle birbirine bağlı olan binalarda çevresel titreşim analizi yapılmıştır. Sonra binaları bağlayan bağ kirişleri kesilerek iki bina birbirinden tamamen ayrılmıştır. Bu durum için her iki binada bir titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak binalardan B Blok olarak isimlendirilen binanın zemin katında bulunan tüm bölme duvarlar yıkılmıştır ve bu binanın zemin katında bölme duvarları olmayan hali için bir titreşim analizi daha yapılmıştır. Binalarda gerçekleştirilen üç farklı titreşim analizleriyle bağ kirişlerinin bina dinamik özelliklerine olan katkısı ve bölme duvarların bina dinamik özelliklerine olan etkisi konularında önemli bilgiler elde edilmiştir (Aras ve Tufan 2019, Aras vd 2019a, b).

Her bir safhada dinamik özelliklerin belirlenmesi için proje kapsamında kullanılan beş adet Acebox–SARA kuvvetli yer hareketi ölçer sensörlerden oluşan üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden birisi referans ivmeölçeri olarak kullanılırken diğer dört tanesi katların köşe noktalarına konumlandırılmıştır. Her bir set ölçümde 20 dakikalık kayıtlar alınmıştır. Şekil 4 ivmeölçer konumlarını yapı planlarında göstermektedir. Dinamik tanımlama için alınan ölçümlerin kontrol edilebilmesi için binaların her bir köşesi A, B, C ve D harfleriyle isimlendirilmiştir. A blok için beşinci kat A köşesi (5A) referans noktası olarak alınırken B Blok için beşinci kat B köşesi (5B) referans noktası alınmıştır. Bu noktalar iki blokta birbirinin karşısına gelen noktalardır.

Ölçümler sonunda elde edilen ivme kayıtları literatürde sıklıkla kullanılan Tepe Noktası Seçimi, TNS (Peak Picking, PP) ve Frekans ortamında ayrışma, FOA (Frequency Domain Decomposition, FDD) yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Bu yöntemler yürütücü tarafından daha önce İstanbul’da bulunan betonarme bir binada bölme duvar etkilerinin incelenmesi için başarıyla uygulanmıştır (Aras 2018a, Aras 2018b). Analizlerde MATLAB programı (2012) kullanılmıştır. Ayrıca proje kapsamında satın alınan ARTEMİS Modal yazılımı (2019) ile de sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Dinamik tanımlama için ivmeölçer konumları

4.1 Binaların bağ kirişleriyle bağlı olma durumları için çevresel titreşim analizleri

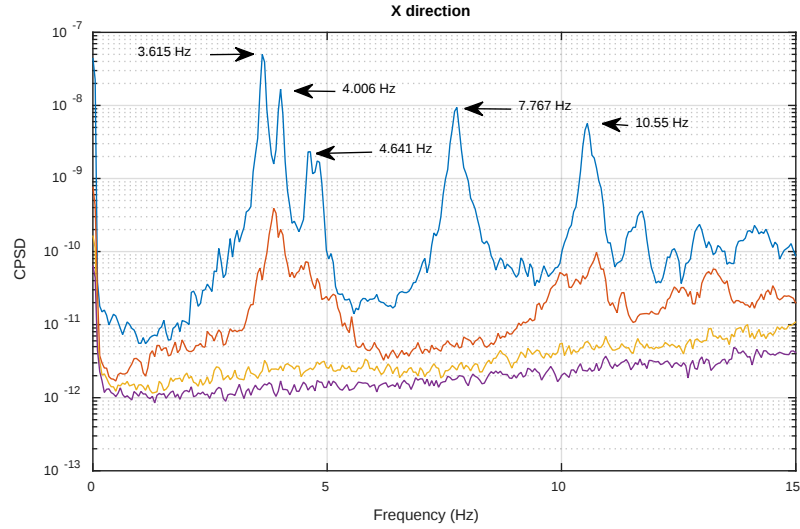
Bu bölüm binaların proje kapsamında kullanımlarıyla ilgili olarak alınan ilk ölçümler ve bu ölçümlerin analizini kapsamaktadır. Şekil 5 proje kapsamında binalardan ölçüm alınmasını göstermektedir.



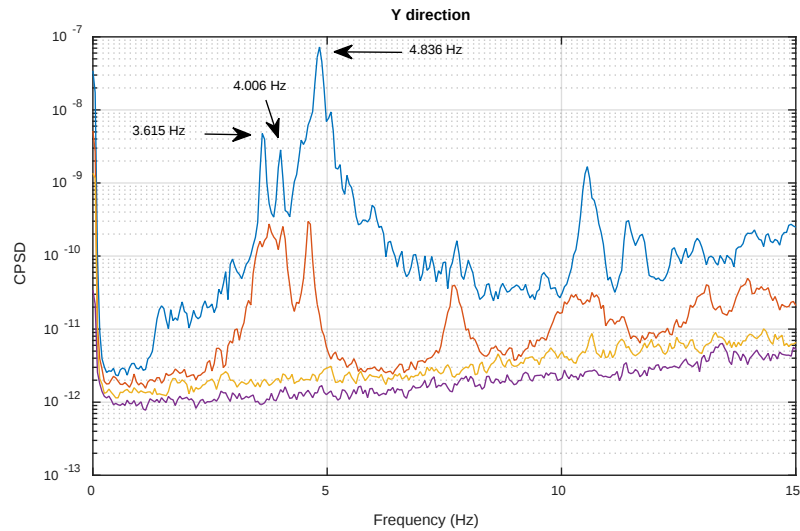
Şekil 5. Binalardan ölçüm alınması

Alınan ölçümler frekans ortamında kullanılan en yaygın yöntemler olan TNS ve FOA yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Şekil 6 ve 7, A Blok binasının baskın frekanslarının FOA yöntemi ile X ve Y yönü için belirlenmesini göstermektedir. Şekil 8 ise yine değerlerin TNS

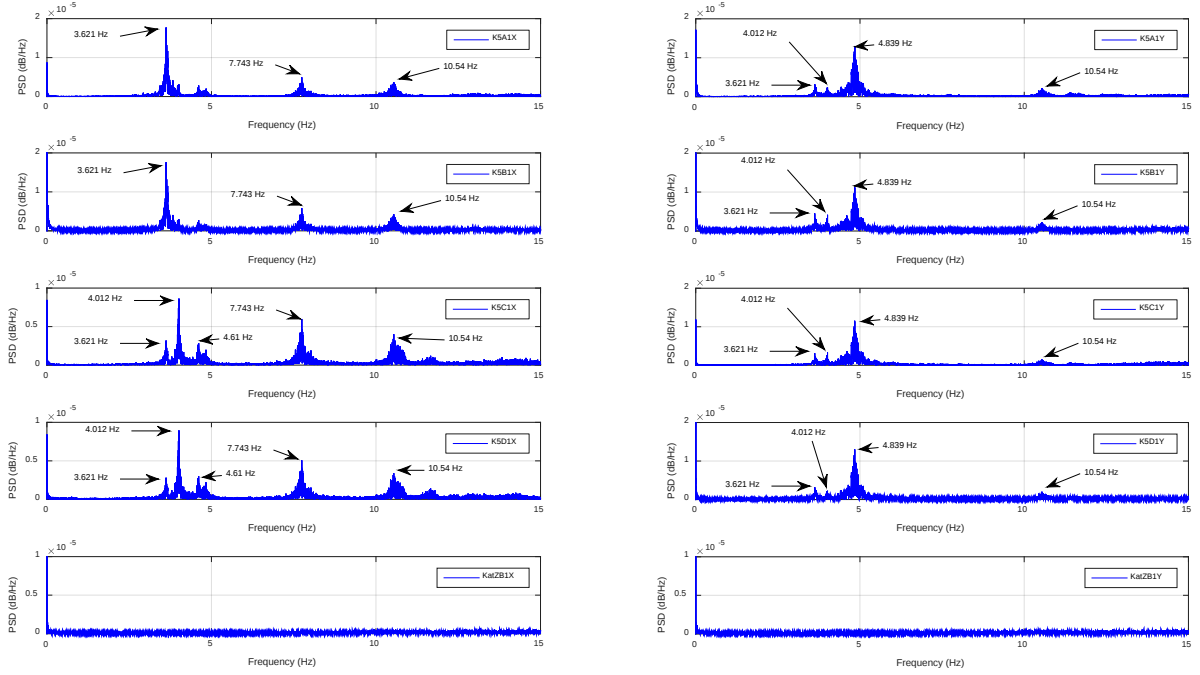
yöntemi ile elde edilmesini göstermektedir. Görüldüğü üzere binanın X yönünde 3,6 Hz, 4 Hz, 4,6 Hz, 7,8 Hz ve 10,6 Hz civarlarında baskın frekansları mevcuttur. Bina nın Y yönündeki baskın frekansları ise 3,2 Hz, 4 Hz ve 4,8 Hz civarlarındadır. Her iki yönde görülen ortak frekanslar binanın burulma modunu temsil etmektedir. Ancak frekans güçleri arasındaki büyüklük farklılıkları vardır. Bu nedenle bu modlar tam burulma modu değildir. Deplasman modları ve buruma modları beraber görülmektedir denilebilir.



Şekil 6. A Blok binasının X Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi



Şekil 7. A Blok binasının Y Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi



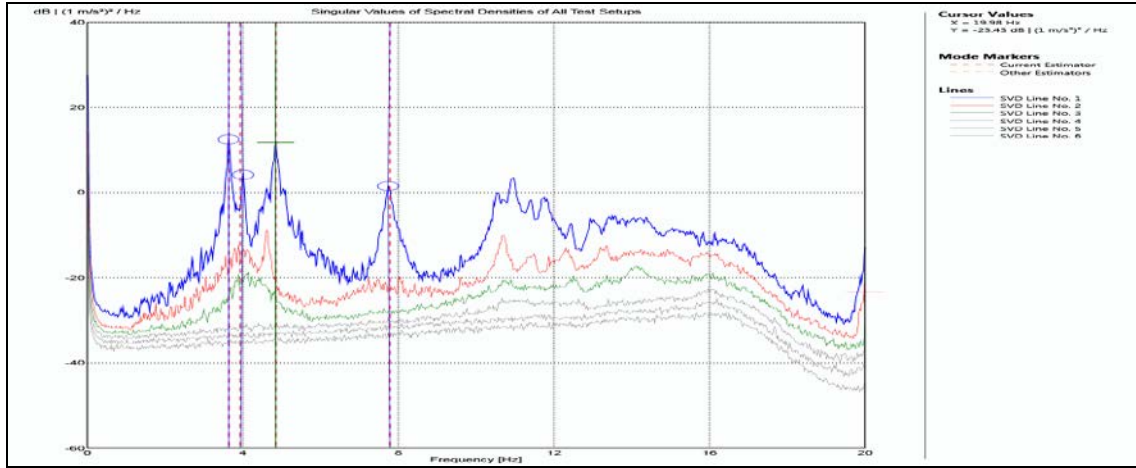
Şekil 8. A Blok binasının X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi

Proje kapsamında incelenen A ve B Blok Binalarından alınan ivme kayıtları Artemis Modal Pro. 6.0. yazılımı ile incelenmiştir. Program modal analiz için hazırlanmış ve hem frekans tabanında, hem de zaman taban alanında değerlendirme yapabilen bir yazılımdır. Bu proje kapsamında programın Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrışma, GFOA (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) tekniği kullanılmıştır. Baskın frekanslar 0 – 20 Hz aralığında belirlenerek gösterilmiş ve 0 – 10 Hz aralığındaki modlar detaylı olarak resmedilerek açıklanmıştır.

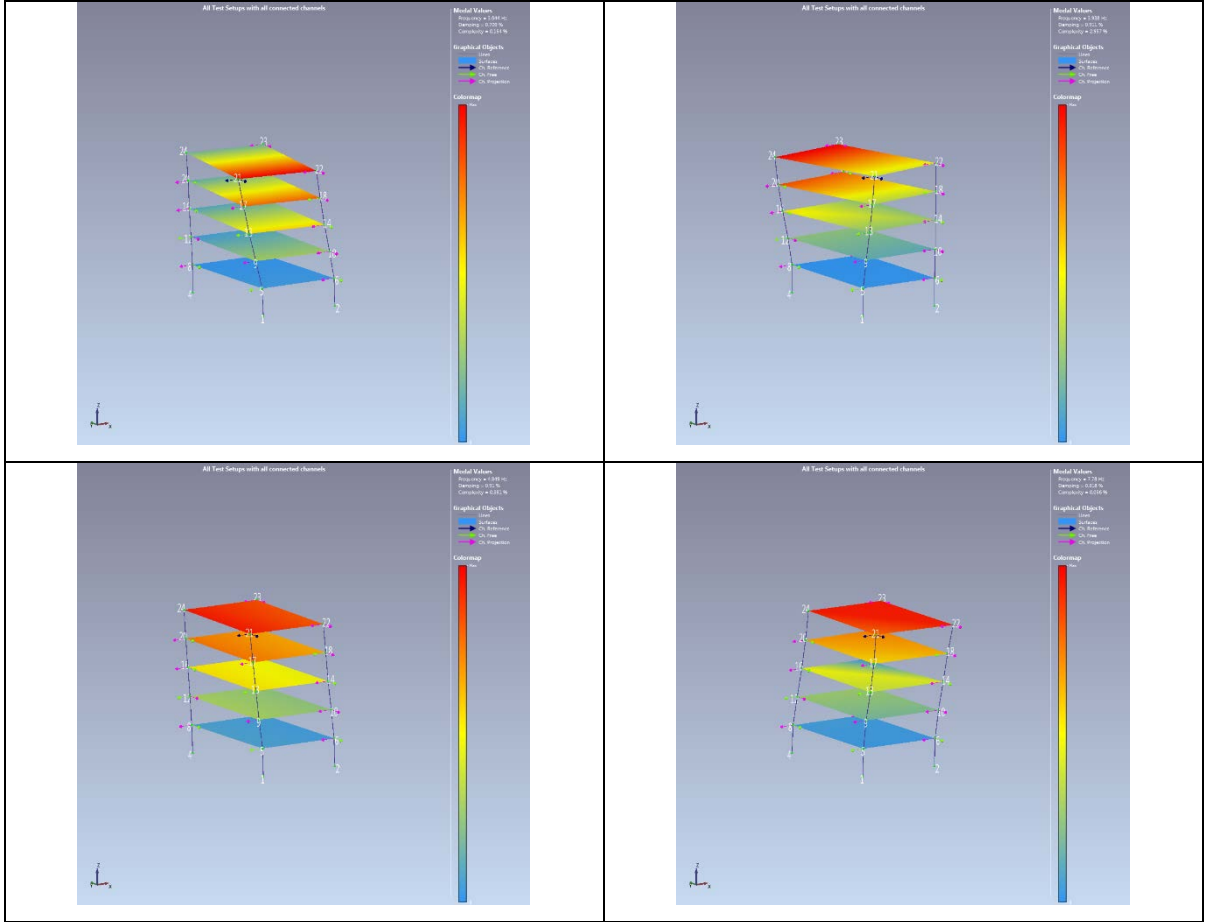
A Blok Binasından alınan ölçümler sonucunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD (Singular values of Spektral Densities, SV of SD) Şekil 9’da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 10 elde edilen ilk dört modu göstermektedir. Şekil 11 modların Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) değerlerini göstermektedir (Allemang 2003). Artemis yazılımı ile elde edilen mod şekilleri Tepe Noktası Seçimi (Peak Picking) ve Frekans Ortamında Ayrışma (Frequency Domain Decomposition) yöntemlerinden elde edilen frekans gösterimlerinin doğru okunduğu ve yapının mod şekillerinin doğru olarak çıkarıldığını göstermektedir. Elde edilen baskın frekans değerlerinde küçük farklılıklar vardır. Tablo 2 binaların bağlı olma durumları için A Blok Binasından elde edilen titreşimlerin farklı yöntemlerle analizi sonucunda açığa çıkarılan frekans değerlerini göstermektedir.

Tablo 2. Binaların bağılı olma durumları için A Blok Binasında elde edilen dinamik özellikler

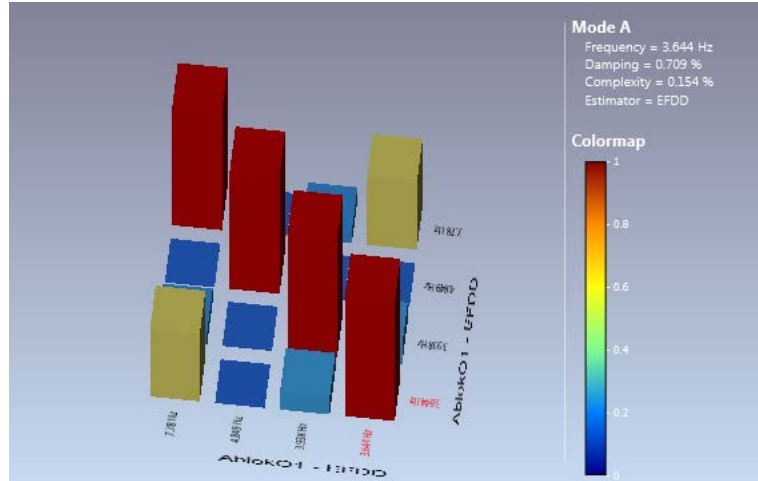
A Blok Binası					
Mod No	Modun Tanımı	Elde edilen Frekans değeri, Hz			Sönüm Oranı
		TNS	FOA	GFOA – Artemis	% – Artemis
1	Bina ön yüzünün X yönü hareketi	3.621	3.615	3.644	0.709
2	Bina arka yüzünün X yönü hareketi	4.012	4.006	3.938	0.911
3	Binanın Y yönünde hareketi	4.839	4.836	4.849	0.91
4	Binanın X yönünde hareketi	7.743	7.767	7.78	0.818



Şekil 9. A Blok Binasının B Blok Binası ile bağılı olma durumu için SYTD gösterimi



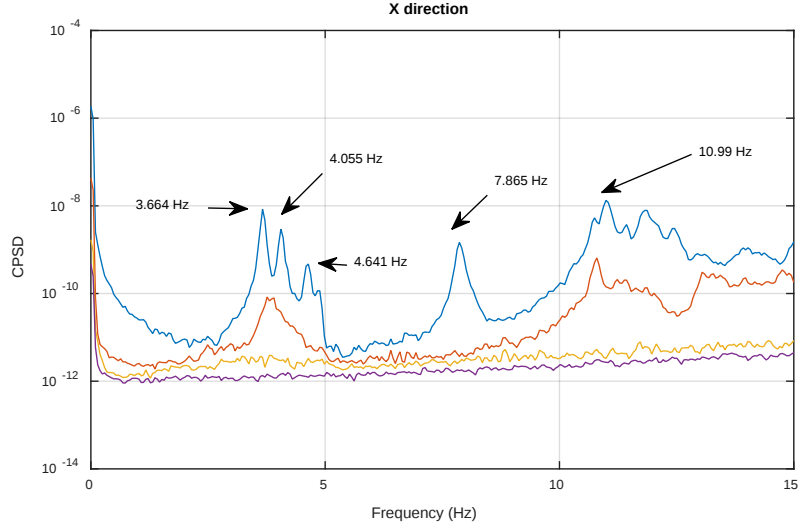
Şekil 10. A Blok Binasının B Blok Binası ile bağlı olma durumu için elde edilen mod şekilleri



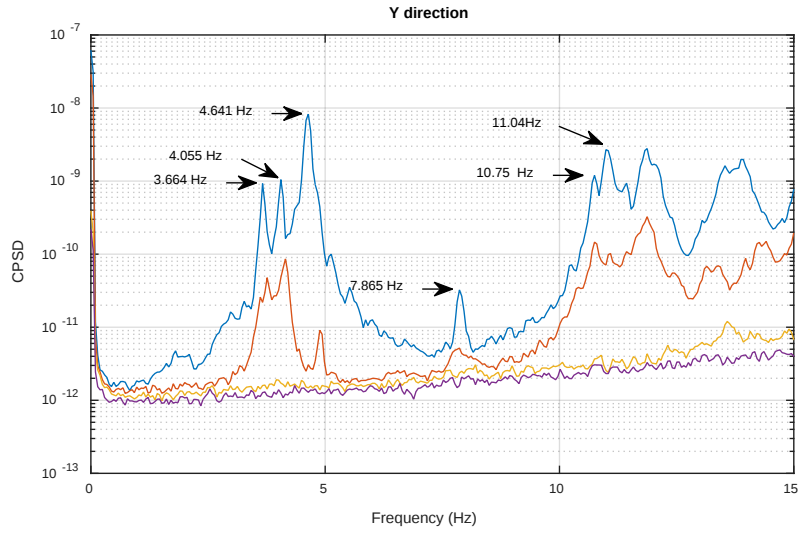
Şekil 11. A Blok Binasının B Blok Binası ile bağlı olma durumunda elde edilen modların MAC değerleri

A Blok binasında yapılan dinamik ölçümlerin aynısı B Blok Binasında da yapılmıştır. Şekil 12 ve 13, B Blok Binasının baskın frekanslarının FOA ile elde edilmesini göstermektedir. Bu frekanslar üçüncü kattan elde edilen kayıtların analizinden elde edilmiştir. Binanın diğer

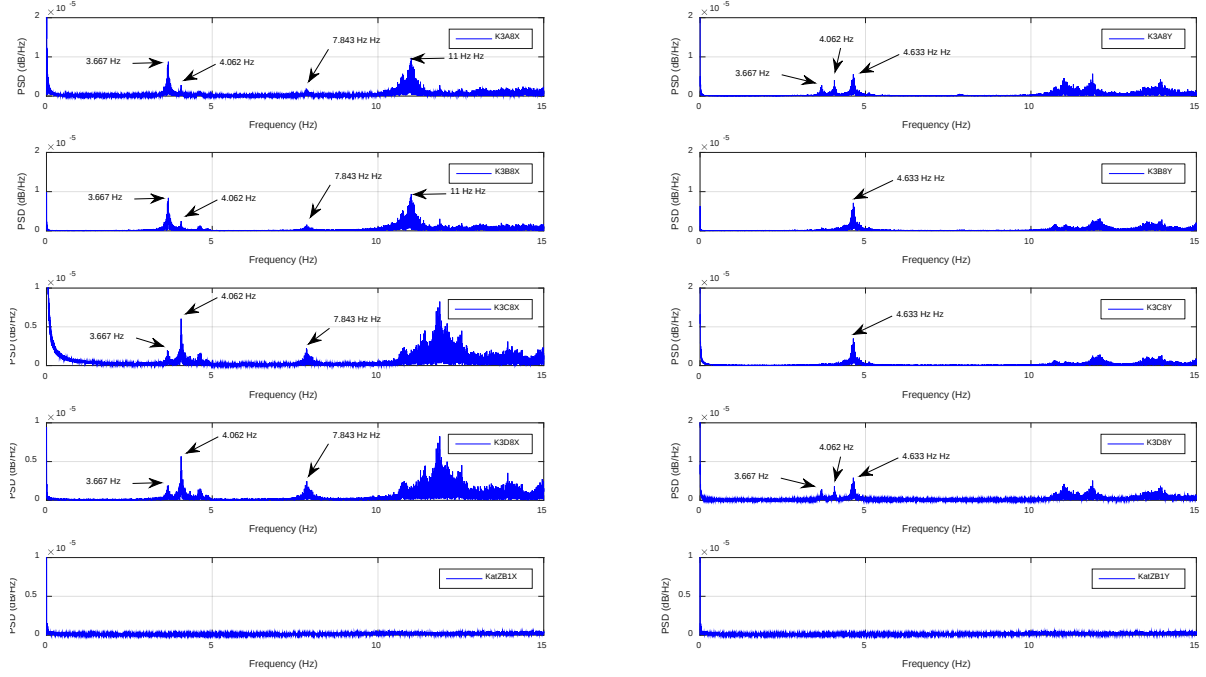
katlarından elde edilen kayıtların analizleri de aynı sonuçları vermektedir. Şekil 14, B Blok Binasının baskın frekanslarının TNS yöntemiyle elde edilmesini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre binanın X ve Y yönündeki frekansları genel olarak ortaktır. Ancak frekans güçleri arasında çok fark vardır.



Şekil 12. B Blok Binasının X Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi

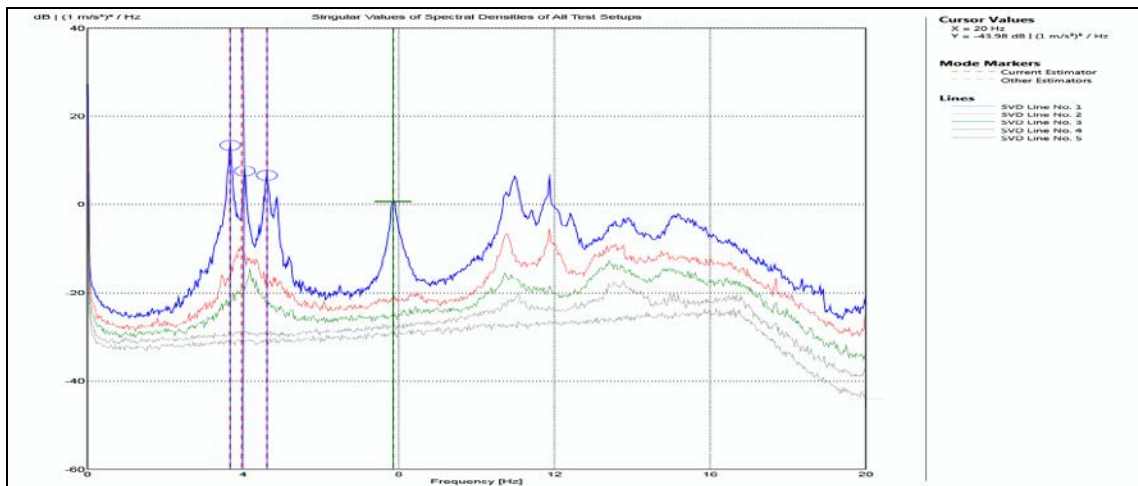


Şekil 13. B Blok Binasının Y Yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi

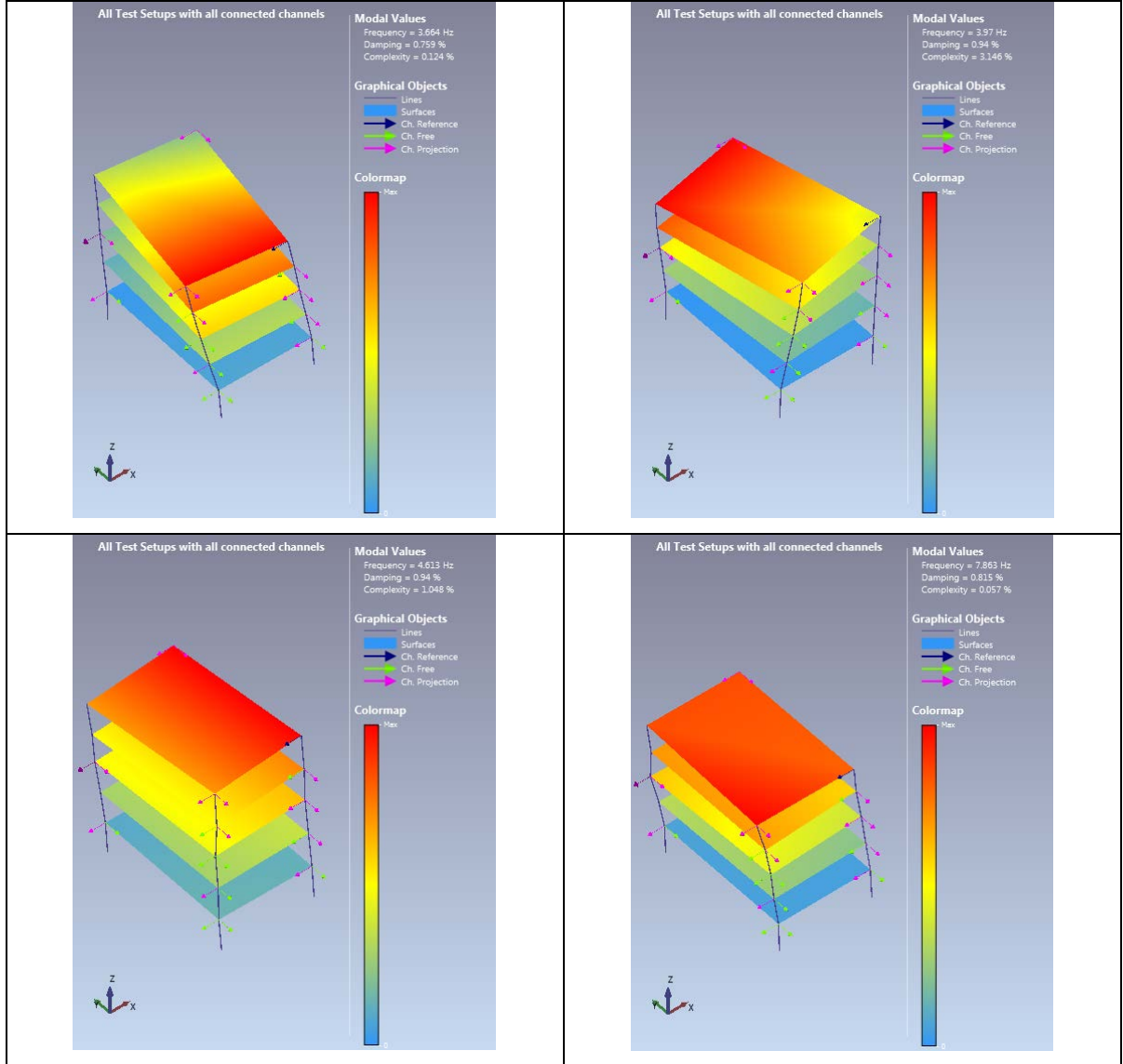


Şekil 14. B Blok Binasının X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi

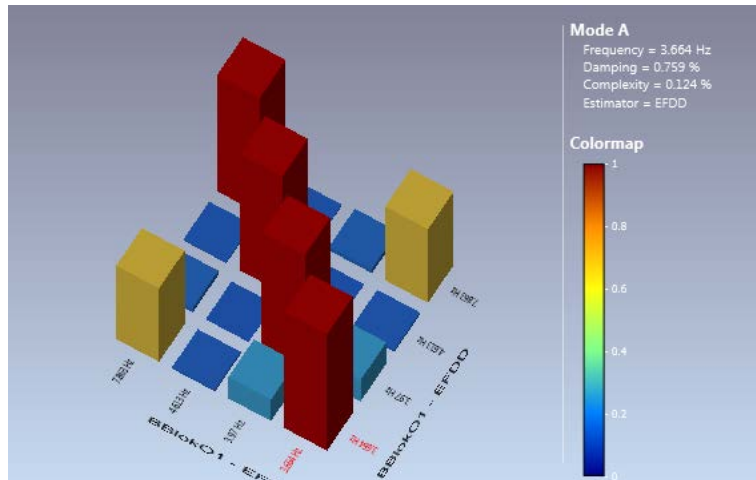
Artemis programıyla B Blok Binasından alınan ölçümler sonucunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD (Singular values of Spektral Densities, SV of SD) Şekil 15'te gösterilmiştir. Şekil 16 elde edilen ilk dört modu göstermektedir ve modların MAC değerleri Şekil 17'de gösterilmiştir. Tablo 3 binaların bağlı olma durumları için B Blok Binasından elde edilen titreşimlerin farklı yöntemlerle analizi sonucunda açığa çıkarılan frekans değerlerini göstermektedir.



Şekil 15. B Blok Binasının A Blok Binası ile bağlı olma durumu için SYTD gösterimi



Şekil 16. B Blok Binasının A Blok Binası ile bağlı olma durumu için elde edilen mod şekilleri



Şekil 17. B Blok Binasının A Blok Binası ile bağlı olma durumunda elde edilen modların MAC değerleri

Tablo 3. Binaların bağlı olma durumları için B Blok Binasında elde edilen frekans değerleri

B Blok Binası					
Mod No	Modun Tanımı	Elde edilen Frekans değeri, Hz			Sönüm Oranı
		TNS	FOA	GFOA – Artemis	% – Artemis
1	Bina ön yüzünün X yönü hareketi	3.667	3.664	3.664	0.759
2	Bina arka yüzünün X yönü hareketi	4.062	4.055	3.97	0.94
3	Binanın Y yönünde hareketi	4.633	4.641	4.613	0.94
4	Binanın X yönünde hareketi	7.843	7.865	7.863	0.815

A ve B Blok Binalarının davranışlarına beraber bakıldığında, binalar için belirlenen modların aynı olduğu ancak baskın frekanslarda farklılıklar olduğu görülmektedir. Y yönündeki modda görülen frekans farkının X yönündeki modlarda belirlenen frekans farkına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

4. 2. Binaları bağlayan bağ kirişlerinin kaldırılması ve tekrarlanan çevresel titreşim analizleri

Her kat seviyesinde binaların ön ve arka yüzünde bulunan kirişler Şekil 18’de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu aşamada binaları birbirine bağlayan kirişler kırılarak kaldırılmıştır. Şekil 19 ise binaların bağ kirişli ve bağ kirişsiz hallerini göstermektedir.

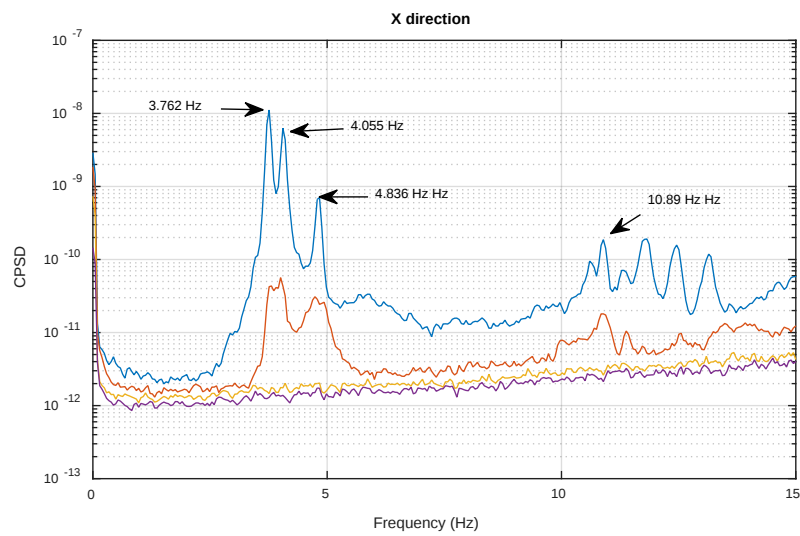
A Blok binasının beşinci katından alınan titreşim kayıtlarının FOA yöntemiyle analizi sonucunda elde edilen baskın frekanslar Şekil 20 ve 21’de X ve Y yönleri için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bina dinamik davranışı X ve Y yönlerinde 3,76 Hz, 4,06 Hz ve 4,84 Hz’lik üç ortak modda belirlenmiştir. Bu modlar burulma modunu işaret etmekle beraber ilk iki modun X doğrultusunda, üçüncü modun ise Y doğrultusunda baskın olduğu görülmektedir. Şekil 22 aynı sinyallerin FFT’lerini göstermektedir ve mod şekilleri ile ilgili daha açıklayıcı bilgiler sunabilir. Bu doğrultuda binanın birinci modunun genel olarak bina ön yüzünün X doğrultusunda hareketi, ikinci modunun bina arka yüzünün X doğrultusunda hareketi, üçüncü modunun ise binanın Y doğrultusunda hareketi olduğu görülmektedir. Bu modların hepsi burulma da içermektedir.



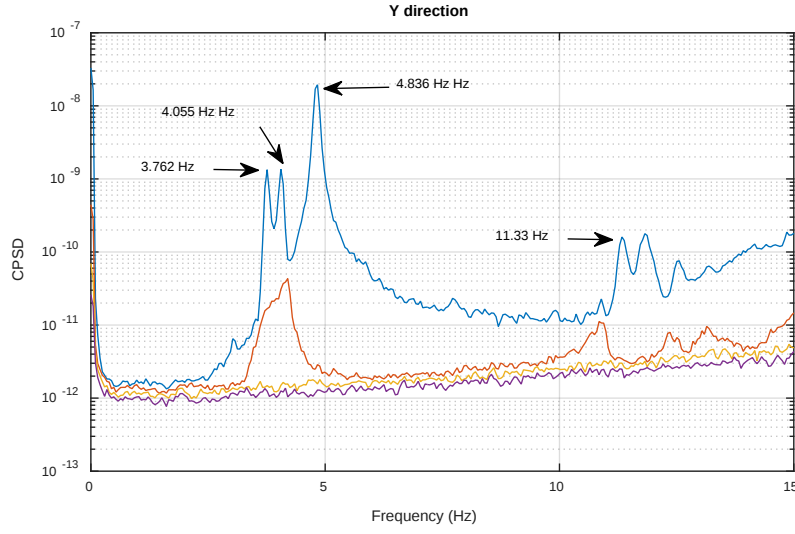
Şekil 18. Binaları birbirine bağlayan bağ kirişleri



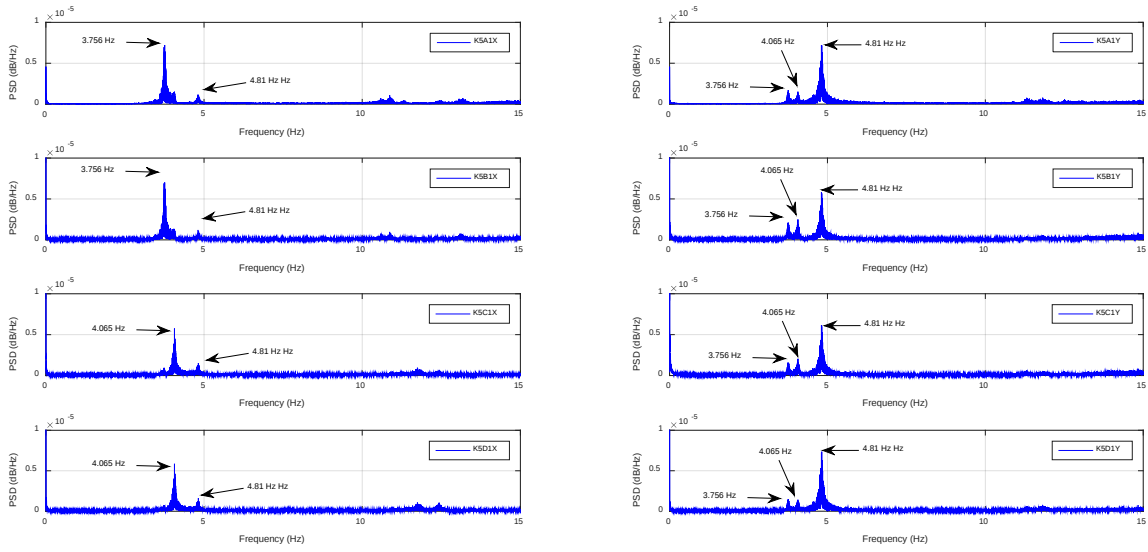
Şekil 19. Binaların bağ kirişli ve bağ kirişsiz hali



Şekil 20. A Blok binasının bağ kiriş kırımından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi



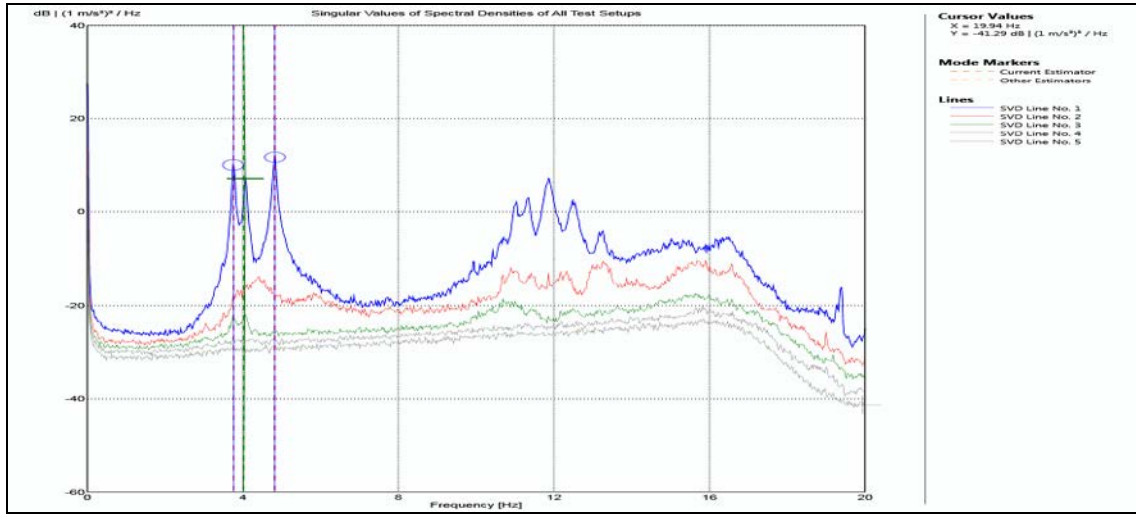
Şekil 21. A Blok binasının bağ kiriş kırımından sonra Y yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi



Şekil 22. A Blok binasının bağ kiriş kırımından sonra X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi

A Bloktan alınan ölçümlerin ARTEMİS Modal yazılımında analizi sonucunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD (Singular values of Spektral Densities, SV of SD) Şekil 23'Te gösterilmiştir. 0–10 Hz aralığında üç adet belirlenmiştir ve bunlar Şekil 24'Te gösterilmiştir. Şekil 25 bu modaların karşılıklı MAC değerlerini göstermektedir. Tablo 4 elde edilen modal parametreleri göstermektedir.

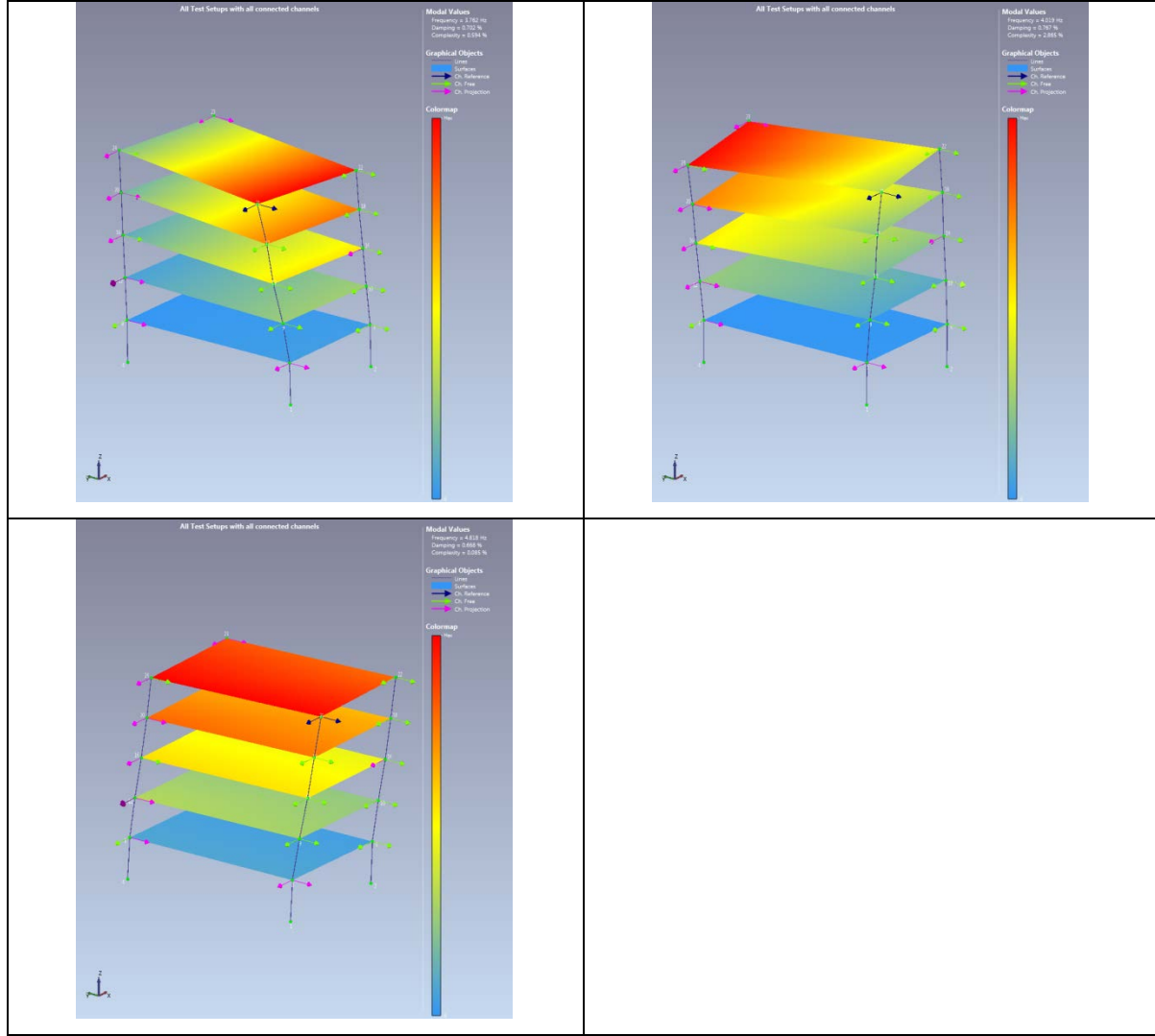
B Blok Binasının beşinci katından alınan titreşim kayıtlarının FOA yöntemiyle analizi sonucunda elde edilen baskın frekanslar Şekil 26 ve 27’de X ve Y yönleri için gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bina dinamik davranışı X ve Y yönlerinde 3,52 Hz, 3,91 Hz ve 4,64 Hz’lik üç ortak modda belirlenmiştir. Bu modlar burulma modunu işaret etmekle beraber ilk iki modun X doğrultusunda, üçüncü modun ise Y doğrultusunda baskın olduğu görülmektedir. Şekil 28 aynı sinyallerin FFT’lerini göstermektedir ve mod şekilleri ile ilgili daha açıklayıcı bilgiler sunabilir. Bu doğrultuda binanın dinamik davranışı A Blok binası ile benzerdir ve birinci modunun genel olarak bina ön yüzünün X doğrultusunda hareketi, ikinci modunun bina arka yüzünün X doğrultusunda hareketi, üçüncü modunun ise binanın Y doğrultusunda hareketi olduğu görülmektedir. Bu modların hepsi burulma da içermektedir



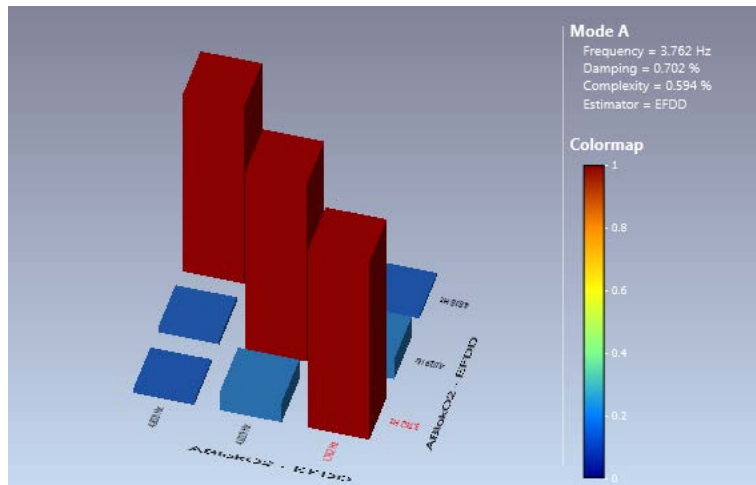
Şekil 23. A Blok Binası için SYTD gösterimi

Tablo 4. A Blok Binasının elde edilen modal değerleri

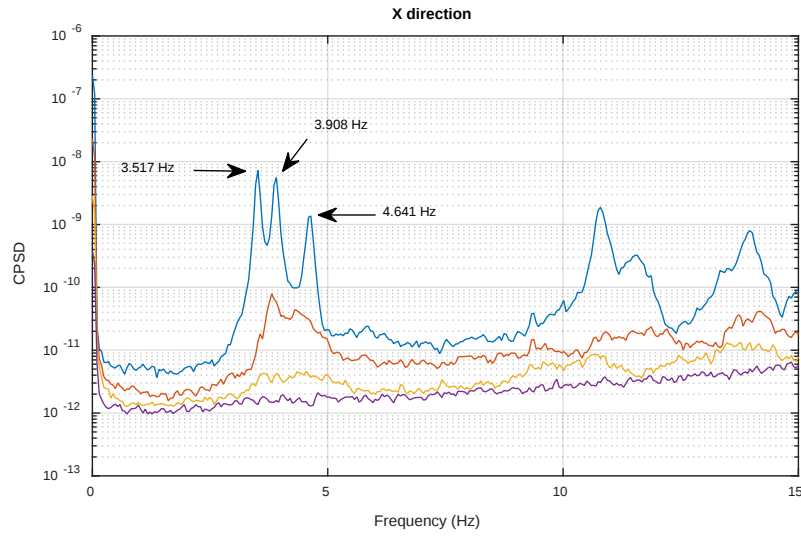
Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.762	0.702	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	4.019	0.767	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.818	0.668	Binanın Y yönünde hareketi



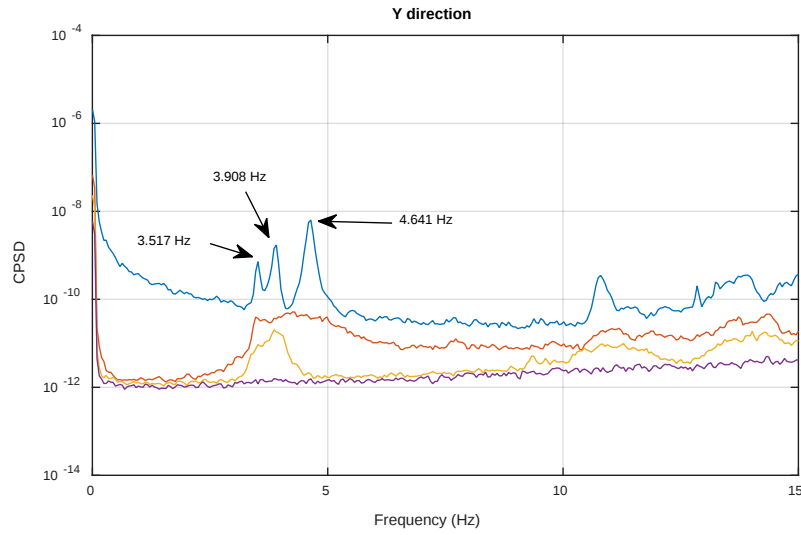
Şekil 24. A Blok Binasının mod şekilleri



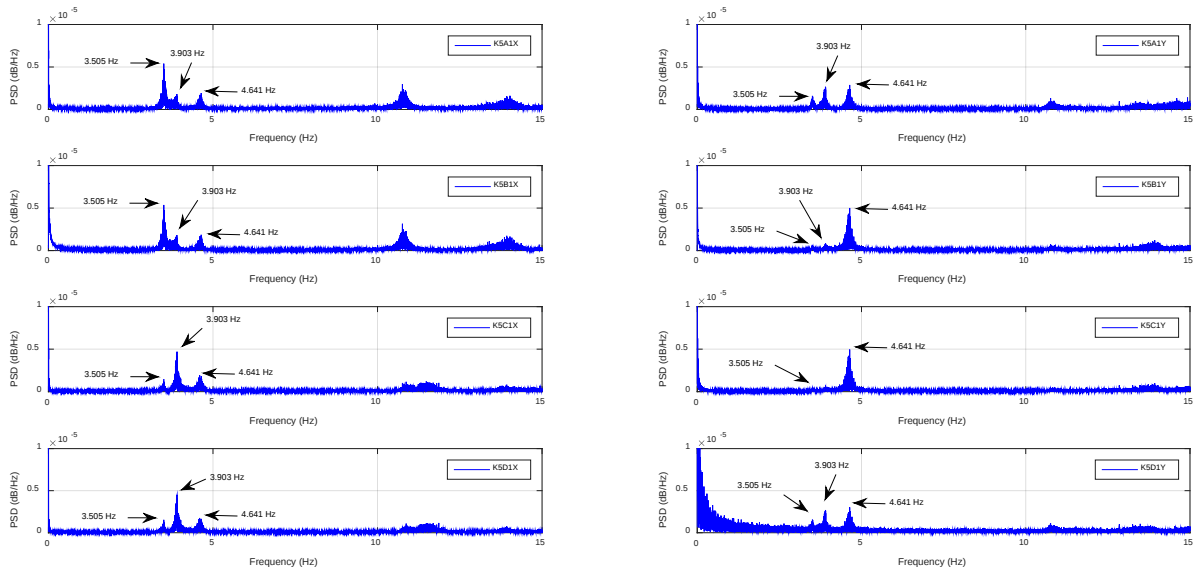
Şekil 25. A Blok Binasının modlarının MAC değerleri



Şekil 26. B Blok Binasının bağ kiriş kırımından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi

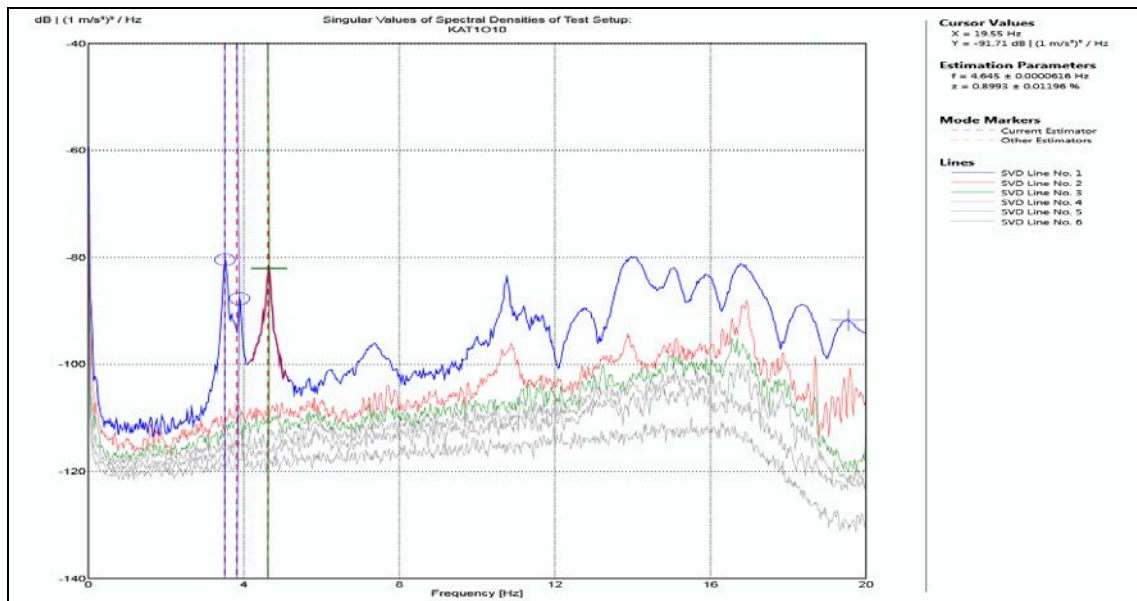


Şekil 27. B Blok Binasının bağ kiriş kırımından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi

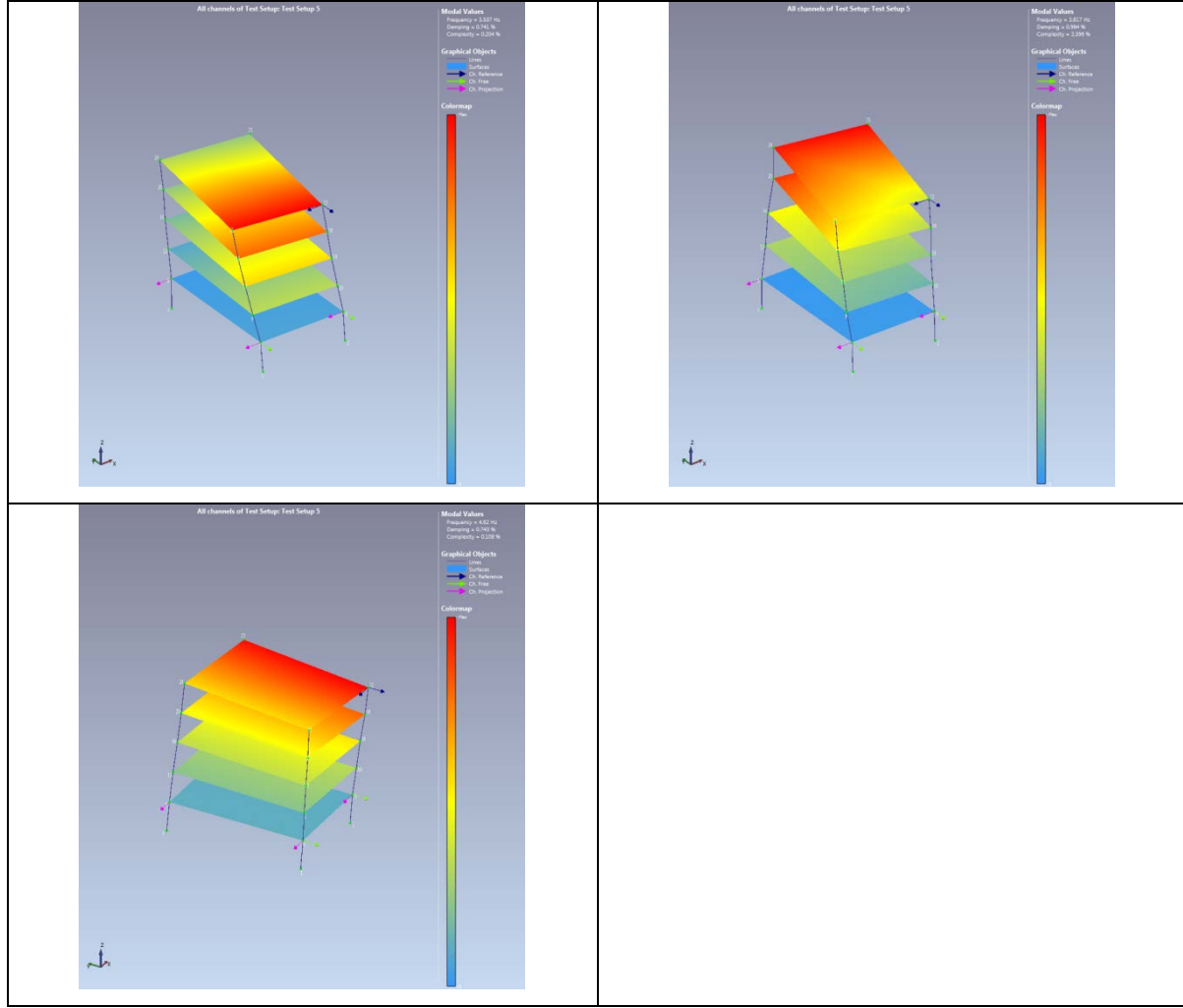


Şekil 28. B Blok Binasının bağ kiriş kırımından sonra X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi

B Blok Binasından alınan ölçümlerin ARTEMİS Modal yazılımı ile analizi sonucunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD (Singular values of Spektral Densities, SV of SD) Şekil 29'da gösterilmiştir. Şekil 30, 0 – 10 Hz aralığında elde edilen üç modu göstermektedir. Bu modların MAC değerleri Şekil 31'de gösterilirken, Tablo 5 elde edilen modal değerleri göstermektedir.



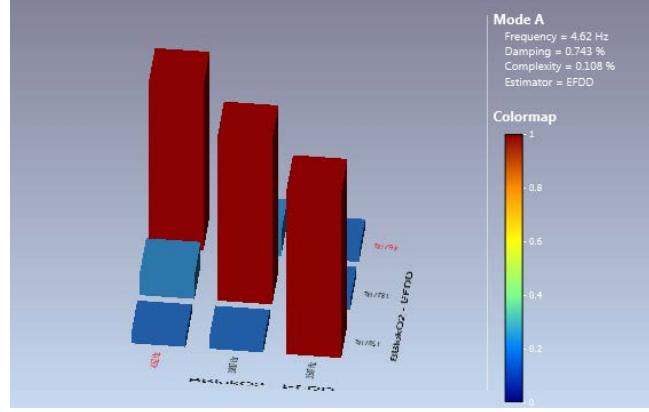
Şekil 29. B Blok Binasının SYTD gösterimi



Şekil 30. B Blok Binasının mod şekilleri

Tablo 5. B Blok Binasının modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.507	0.741	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	3.817	0.964	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.62	0.743	Binanın Y yönünde hareketi



Şekil 31. B Blok Binasından modların MAC değerleri

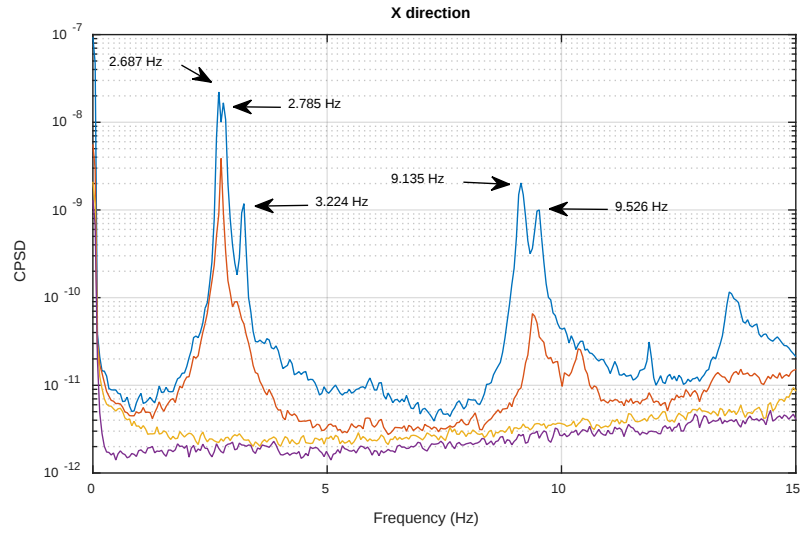
4. 3. B Blok Binasında zemin kat bölme duvarların kaldırılması ve çevresel titreşim analizleri

Projenin hedeflerinden birisi de zemin katında bölme duvarları bulunmayan binalarda hasarların yapı dinamik özelliklerine olan etkisinin incelenmesiydi. Bu nedenle çalışılan binalardan birisinde hasar çalışmaları başlamadan önce zemin kat bölme duvarlarının yıkılması planlanmıştır. Üzerinde çalışılan binalardan B Blok Binası ilgili çalışma için seçilmiş ve zemin katında bulunan bölme duvarlar yıkılmıştır. Şekil 32 B Blok Binasında gerçekleştirilen duvar yıkımlarını göstermektedir. Yıkım sonrasında zemin katta kolon-kiriş çerçevesi içinde dinamik özellikleri etkileyecek hiçbir duvar kalmamıştır.

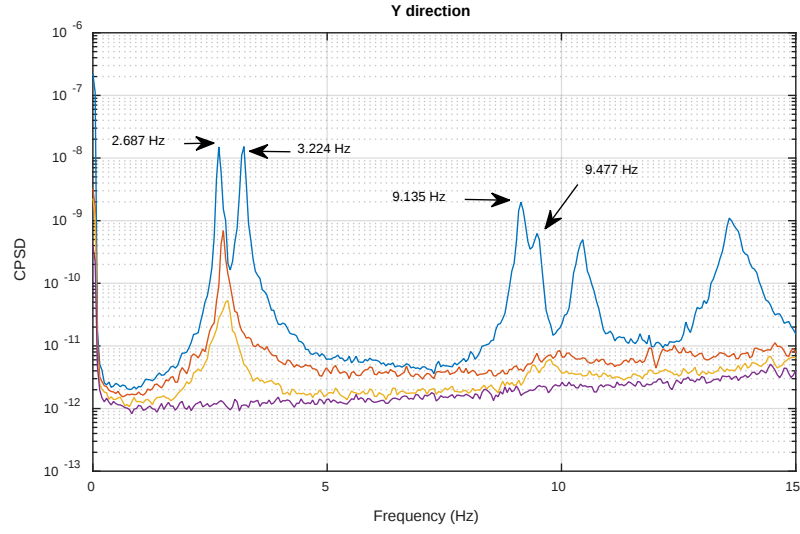
B Blok Binasında zemin katta bulunan bölme duvarlar kaldırıldıktan sonra dinamik ölçümler alınmıştır. Daha önce açıklanan prensipler dâhilinde alınan ölçümler yardımıyla zemin katında bölme duvarları olmayan binanın dinamik özellikleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda Şekil 33 ve Şekil 34 zemin katında bölme duvarları olmayan B Blok Binasının beşinci katından alınan titreşim kayıtlarının FOA yöntemiyle analizi sonuçlarını X ve Y yönleri için göstermektedir. Baskın frekanslar X yönünde 2,687 Hz, 2,785 Hz, 3,224 Hz, 9,135 Hz ve 9,526 Hz olarak belirlenirken, Y yönünde de 2,687 Hz, 3,224 Hz, 9,135 Hz ve 9,477 Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 35'te gösterilen FFT kayıtlarına göre binanın birinci modu burulma modudur. İkinci modu bina arka kısmının X yönündeki hareketidir ve bina ön yüzü hareket etmediğinden bu modda da burulma davranışı vardır. Bina üçüncü modu ise Y yönündeki hareketi temsil etmektedir.



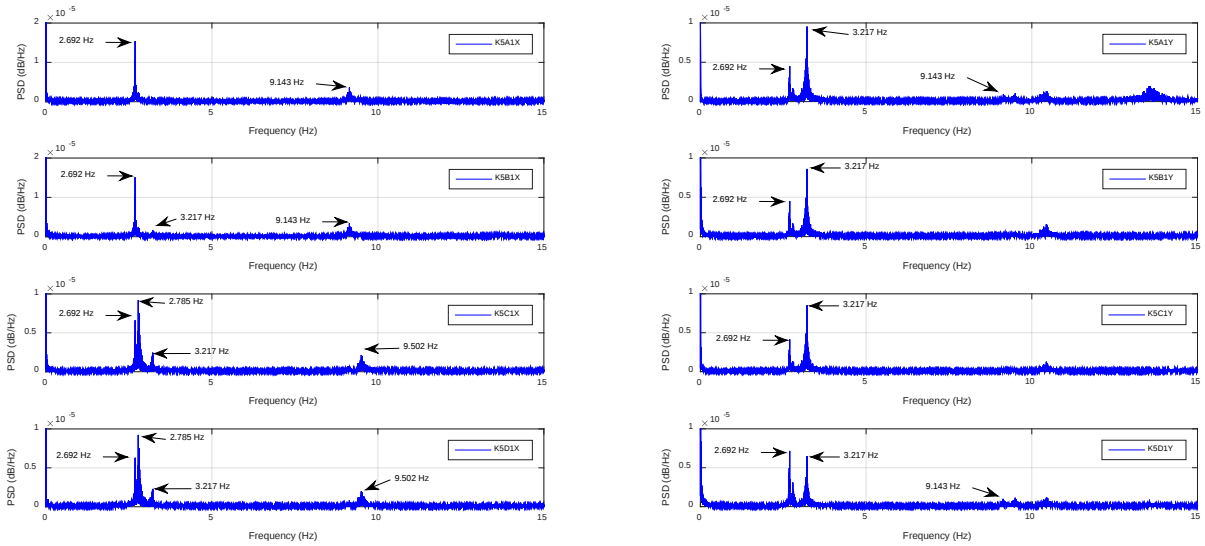
Şekil 32. B Blok Binasında gerçekleştirilen zemin kat duvar yıkımı



Şekil 33. B Blok Binasının zemin kat duvarlarının kaldırılmasından sonra X yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi

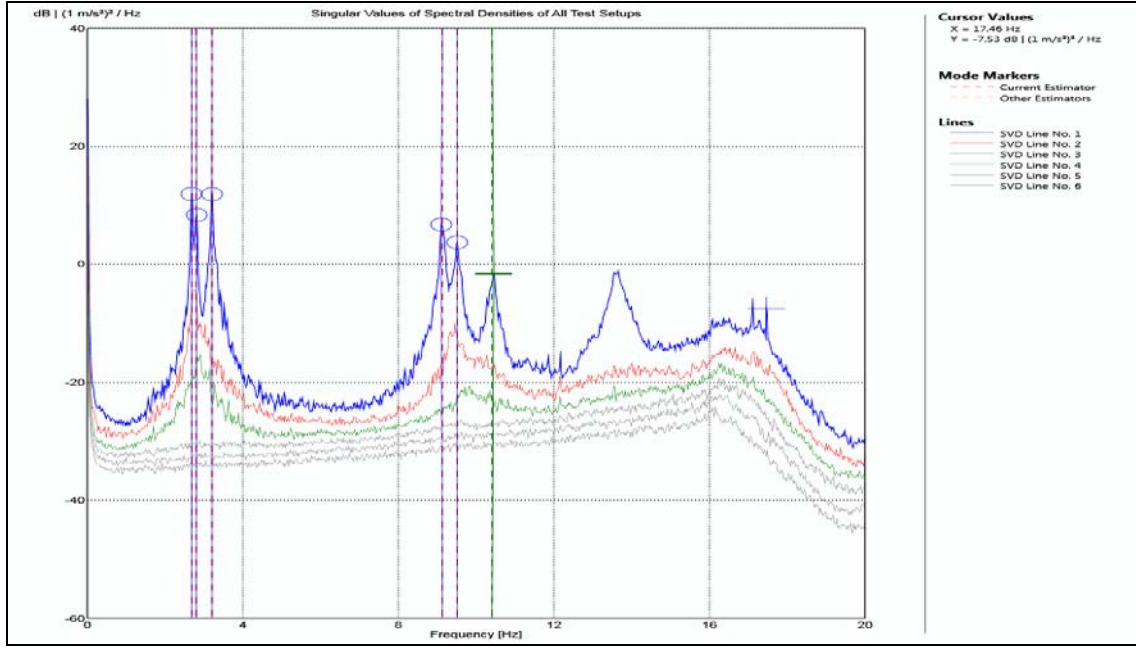


Şekil 34. B Blok Binasının zemin kat duvarlarının kaldırılmasından sonra Y yönündeki baskın frekanslarının FOA ile belirlenmesi



Şekil 35. B Blok Binasının zemin kat duvarlarının kaldırılmasından sonra X ve Y Yönündeki baskın frekanslarının TNS ile belirlenmesi

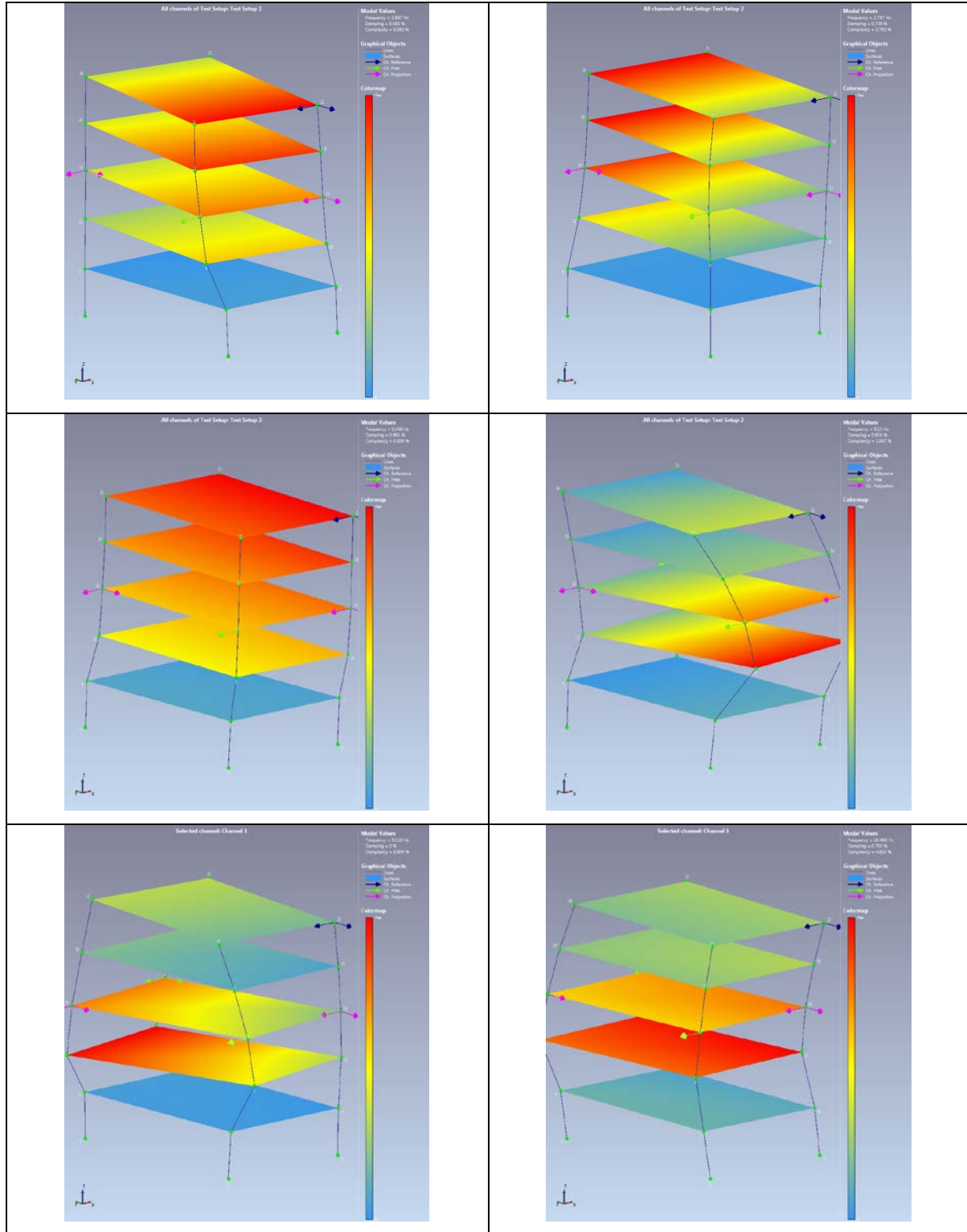
B Blok Binasından alınan kayıtların ARTEMİS MODAL yazılımı ile analizi sonucunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD (Singular values of Spektral Densities, SV of SD) Şekil 36'da gösterilmiştir. Şekil 37 0 – 10 Hz aralığında elde edilen altı modunu göstermektedir. Bu modların MAC değerleri Şekil 38'de gösterilirken, Tablo 6 elde edilen modal değerleri göstermektedir.



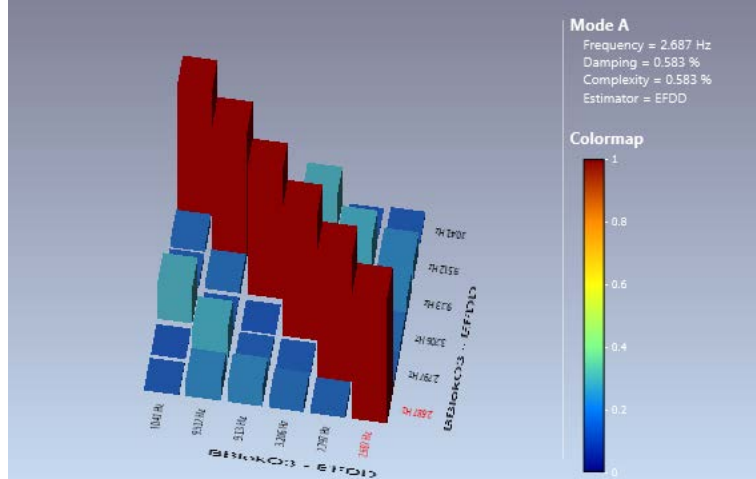
Şekil 36. B Blok Binasının duvarsız hali için SYTD gösterimi

Tablo 6. B Blok Binasının duvarsız halinin modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	2.687	0.583	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	2.797	0.739	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	3.206	0.681	Binanın Y yönünde hareketi
4	9.13	0.618	Bina ön yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
5	9.512	0	Bina arka yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
6	10.406	0.755	Binanın iki eğrilikli Y yönü hareketi



Şekil 37. B Blok Binasının duvarsız halinin mod şekilleri



Şekil 38. B Blok Binasından duvarsız hali modların MAC değerleri

Elde edilen modal frekanslar, binanın zemin katında bölme duvarlarının bulunması hali için elde edilen frekanslarla karşılaştırılarak, zemin kat bölme duvarlarının bina dinamik özelliklerine olan katkısı ortaya çıkarılabilir. FFT sonuçlarına göre X yönünde 3,50 Hz'ten 2,69 Hz'e, Y yönünde 4,64 Hz'ten 3,22 Hz'e düşen frekans değerleri X yönünde % 23'lük bir azalmaya, Y yönünde ise %31'lik bir azalmaya işaret etmektedir.

X yönündeki azalma: $(3,50 - 2,69) / 3,50 = 0,23$

Y yönündeki azalma: $(4,64 - 3,22) / 4,64 = 0,31$

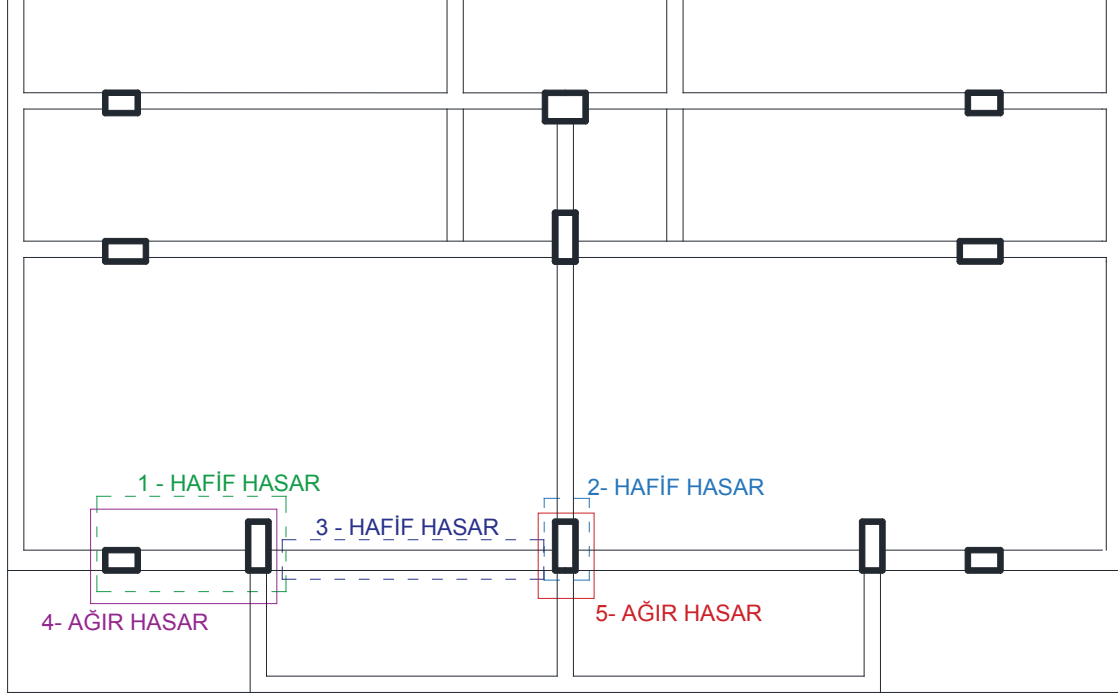
5. ÇALIŞMA KAPSAMINDA TANIMLANAN HASAR DURUMLARI

Binaların birbirinden ayrılması ve B Blok Binasının zemin kat duvarlarının yıkılmasından sonra, yapısal hasar etkilerinin bina dinamik özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi için hasarların yapılara verilmesine ve titreşim ölçümlerinin alınmasına geçilebilir. Bu doğrultuda planlanan hasar seviyeleri aşağıda özetlenmiştir.

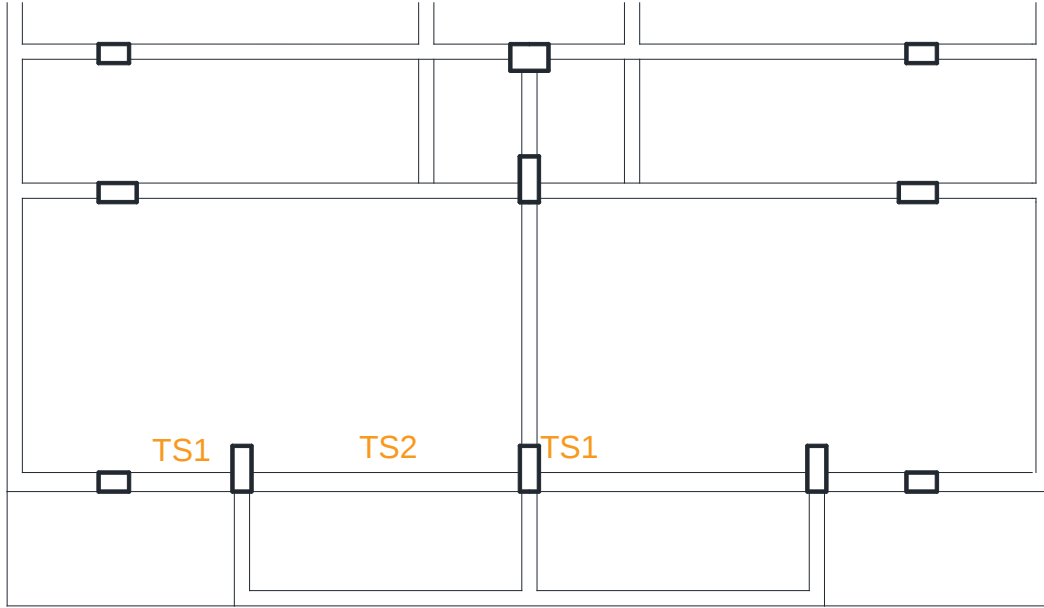
- Mevcut yapılarda iki köşe kolonuna hafif hasar verilmesi ve dinamik ölçümlerin alınması,
- Komşu kenar kolona hafif hasar verilmesi ve dinamik ölçümlerin alınması,
- Orta hasarlı kolonları birleştiren kirişe hafif hasar verilmesi ve dinamik ölçümlerin alınması,
- Orta hasarlı köşe kolonların hasarının ağırlaştırılması ve dinamik ölçümlerin alınması,
- Köşe kolonlara komşu kenar kolonun hasar seviyesinin ağırlaştırılması ve dinamik ölçümlerin alınması,

Projede takip edilecek hasar senaryosu Şekil 39'da özetlenmiştir. Hasar tespitinin detaylı olarak incelenmesi için hasar bölgelerine TSA–SMA ivmeölçerleri konumlandırılmıştır. Bu ivmeölçerler yürütücü tarafından tamamlanan 214M235 numaralı 3501 Kariyer projesi kapsamında edinilmiştir. Kullanılan bu ivmeölçerler hasarın verildiği zemin kat kolonlarının hemen üzerinde olmak üzere Şekil 40'ta gösterildiği gibidir.

Yapı elemanlarına verilecek hasarın kontrol edilmesi de önem taşımaktadır. Maeda vd. (2014) Betonarme yapı elemanlarında gözlemlenen hasarları Tablo 1'de olduğu gibi sınıflandırmıştır. Bu hasar sınıfları ile uyumlu olarak projede iki çeşit hasar için deneyler yapılmıştır. Proje kapsamında Hafif Hasar olarak nitelendirilen hasar seviyesi pas payının dökülmesi ve donatıların ortaya çıkması olarak tanımlanmıştır. Bu hasar Tablo 1'de görülen Hasar sınıfı IV'e karşılık gelmektedir. Projede tanımlanan Ağır Hasar durumu ise Tablo 1'de görülen Hasar Sınıfı V, donatı burkulması, çekirdek betonun çatlaması kolonlarda görünür yer değiştirme olarak hedeflenmiştir.



Şekil 39. Binalara uygulanan hasar senaryosu ve sırası



Şekil 40. Hasar analizlerinde kullanılması planlanan ilave ivmeölçer konumları

Yukarıda açıklanan ilkeler çerçevesinde projede çalışılan binaların dinamik davranışları farklı hasar durumları için belirlenmiş ve aşağıda ayrıntılı açıklanmıştır.

6. A BLOK BİNASINA HASAR VERİLMESİ VE TİTREŞİM ANALİZLERİ

A Blok Binası için planlanan hasarlar yapıya uygulanmış ve her hasar seviyesinde ölçümler alınarak dinamik özellikler belirlenmiştir.

6.1. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1’de incelenmesi

A Blok binası zemin katında bölme duvarları olan binadır. Hafif Hafif – 1 yapıda iki köşe kolonuna pas payı dökülmesi oluşturacak şekilde hasar verilmesini içermektedir. Proje kapsamında iki adet kolona verilen hasarlar Şekil 41’de gösterilmiştir.



Şekil 41. A blokta iki köşe kolona verilen hafif hasarlar

Belirtilen hasar durumunda A Blok binasının dinamik özellikleri titreşim analizleriyle daha önce açıklanan prensipler dâhilinde belirlenmiştir. Şekil 42 binanın en üst katından ve birinci kat B köşesinden alınan ivme kayıtlarının FFT’lerini göstermektedir. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinin takibi açısından binalarda farklı hasar seviyelerinde X ve Y yönlerindeki en baskın titreşim frekansının değişimi izlenecektir. En baskın titreşim frekansı FFT gösterimindeki güç yoğunluğu en yüksek olan titreşim frekansıdır. Bu bağlamda binanın X yönündeki titreşim en baskın frekansının 3,756 Hz, Y Yönündeki en baskın frekansının ise 4,794 Hz olduğu görülmektedir. Bu değerler A Blok binasının hasarsız durumu için 3,756 Hz ve 4,810 Hz olarak belirlenmişti. Bu nedenle bu safhada yapıya verilen Hafif Hasar – 1’in binanın X yönündeki frekansını değiştirmedeği ve Y yönündeki frekansını 4.810 Hz’den 4,756 Hz’e indirdiği görülmektedir.

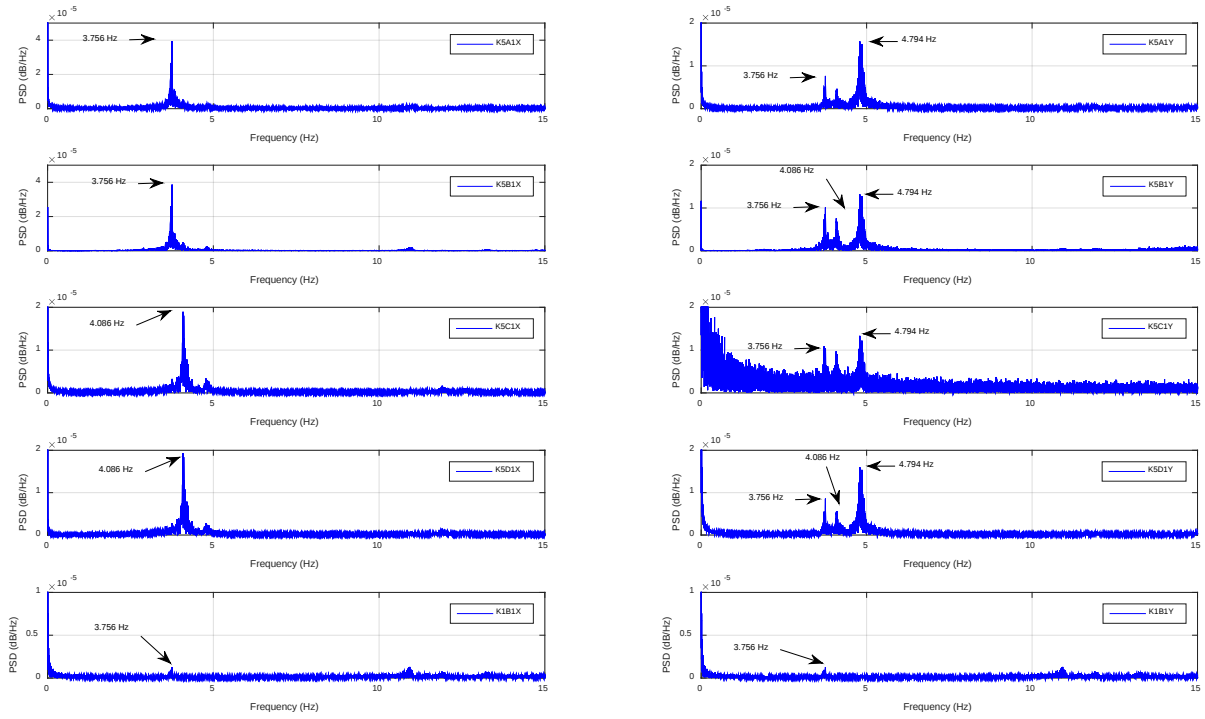
A Blok Binası Hafif Hasar – 1’de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında üç adet mod belirlenmiştir. Hafif Hasar – 1 durumunda elde edilen Spektral

Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 43'te gösterilmiştir. Tablo 7 elde edilen modal değerleri göstermektedir.

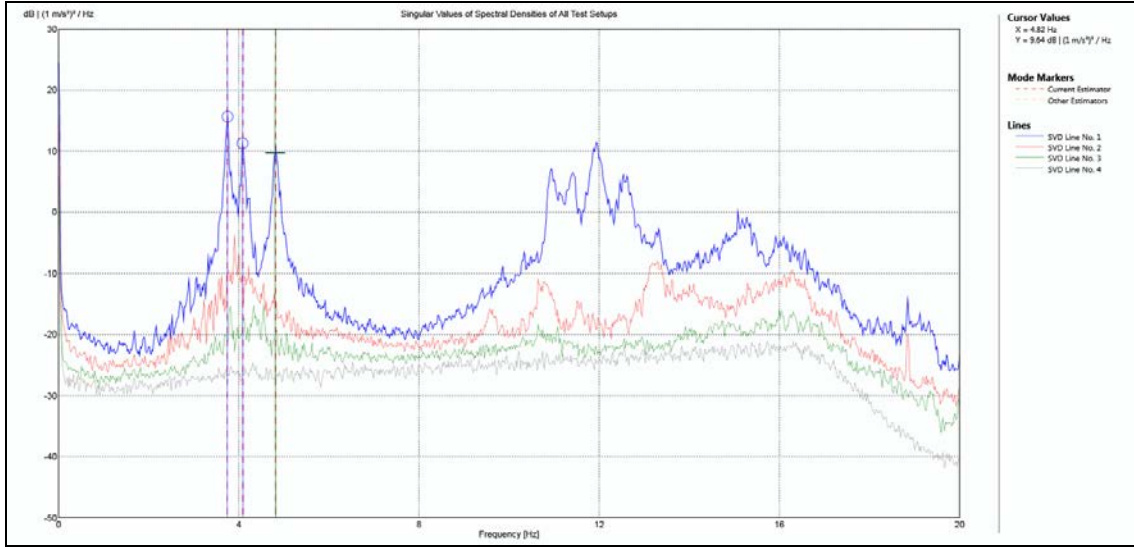
Tablo 7. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.744	0.652	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	4.092	0.934	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.818	0.858	Binanın Y yönünde hareketi

Yapılan analizlere göre Hafif Hasar – 1'in yapı dinamik mod şekillerine etkisi olmazken, frekanslarda çok küçük azalmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 42. A Blok binasının Hafif Hasar – 1'de baskın frekansları



Şekil 43. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için SYTD gösterimi

6.2. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de incelenmesi

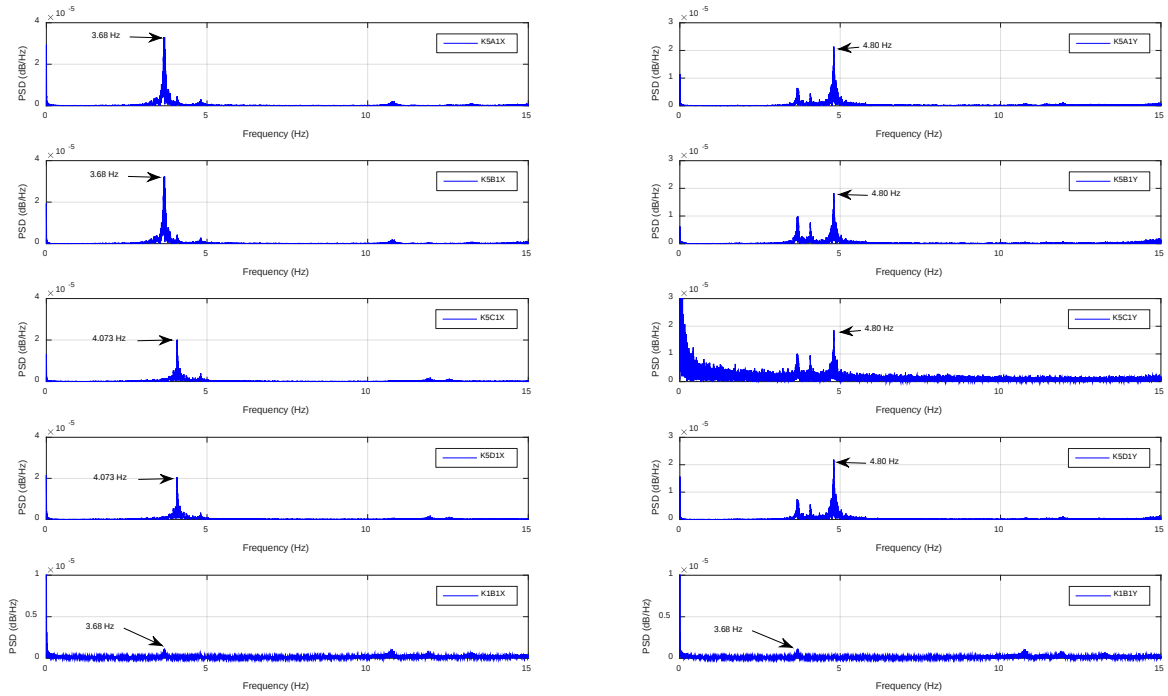
İkinci hasar durumu olarak bina ön yüzünde köşe kolonlara komşu olan kenar kolona hafif hasar verilmiştir. Şekil 44 verilen hasarı göstermektedir.



Şekil 44. A Blok Binasında üç kolona verilen hafif hasar ve üçüncü kolondaki hasar detayları

A Blok binasının Hafif Hasar – 2 durumunda belirlenen dinamik özellikleri Şekil 45’te gösterilmiştir. Buna göre binanın X yönündeki en baskın frekansı 3.68 Hz, Y yönündeki en baskın frekansı ise 4.80 Hz olarak belirlenmiştir. Binanın bir önceki hasar durumu olan Hafif Hasar – 1’de baskın frekansları X yönünde 3,756 Hz, Y yönünde ise 4,794 Hz olarak

bulunmuştu. İki hasar seviyesinin karşılaştırılması sonucunda X yönünde belirgin frekans azalması varken Y yönünde küçükte olsa bir frekans artışını göstermektedir.

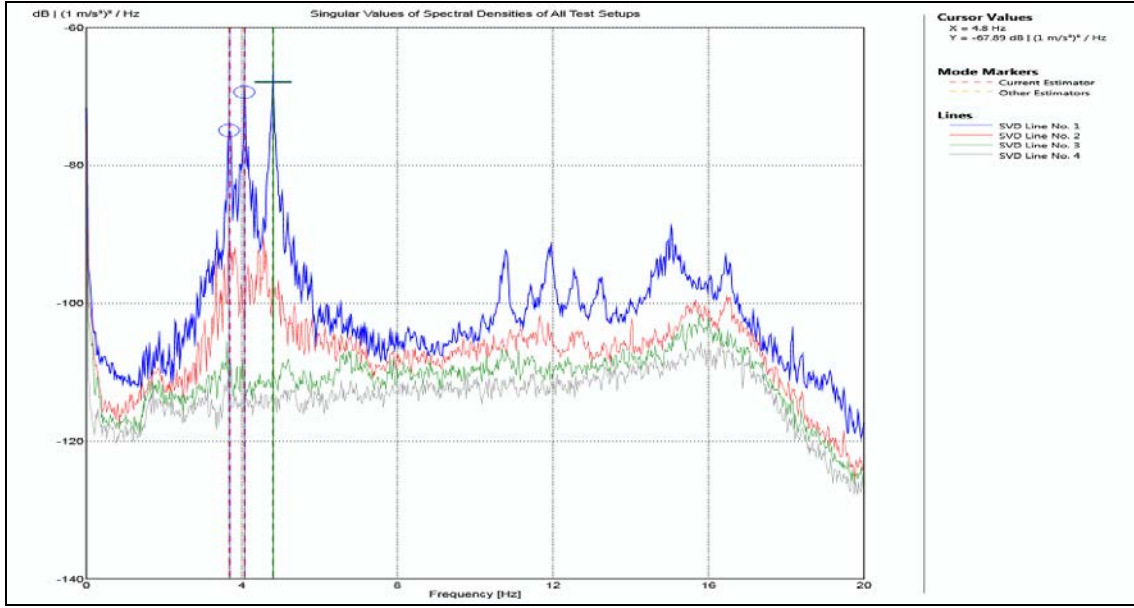


Şekil 45. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de baskın frekansları

A Blok Binası Hafif Hasar – 2’de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında üç adet mod belirlenmiştir. Hafif Hasar – 2 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 46’da gösterilmiştir. Tablo 8 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.

Tablo 8. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.672	0.875	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	4.063	0.293	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.801	0.661	Binanın Y yönünde hareketi



Şekil 46. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için SYTD gösterimi

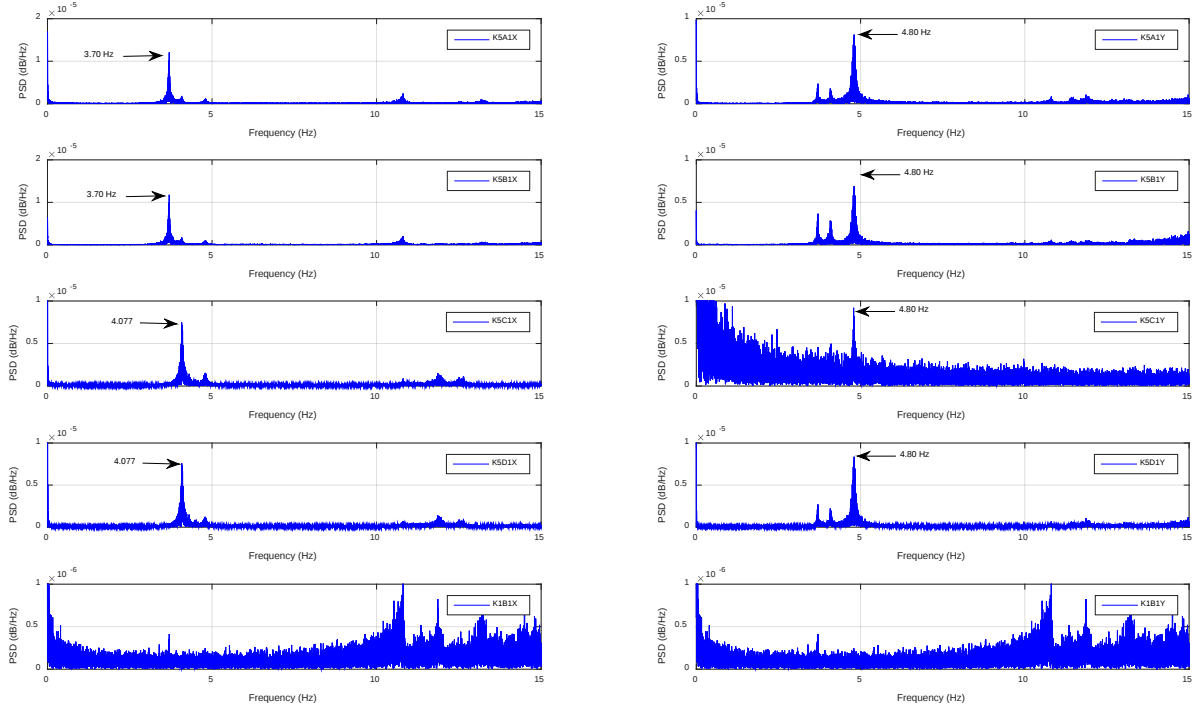
6.3. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3'te incelenmesi

Hafif Hasar – 3 durumu hafif hasarlı iki köşe kolonu ile bir kenar kolon arasındaki kirişe hafif hasar verilmesi olarak tanımlanmıştı. Bina yıkım makinesi ile bu hasar verilmeye çalışılırken kiriş çekirdek betonunun delinmesi durumu gerçekleşmiş ve kirişte delikler açılmıştır. Bu nedenle kirişte oluşturulan hasarın hedeflenen hafif hasarın önüne geçtiği söylenebilir. Şekil 47 kirişte oluşturulan hasarı göstermektedir.



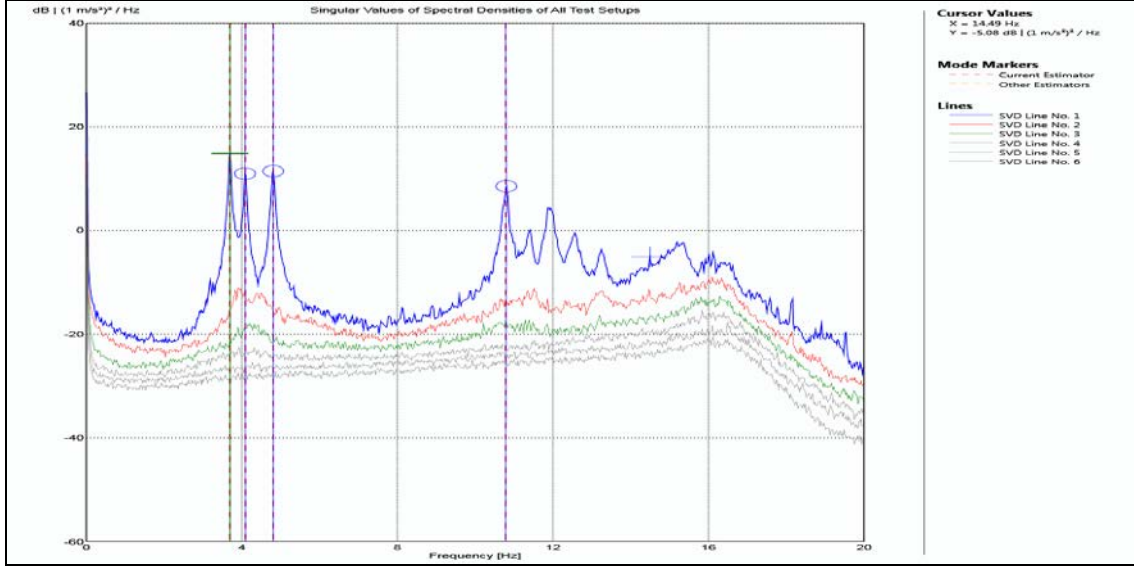
Şekil 47. A Blok Binasında hafif hasarlı kolonları birleştiren kirişe verilen hasar detayları

Binanın bu durumdaki baskın frekansları daha önce açıklanan prensipler dahilinde belirlenmiştir. Şekil 48’de gösterilen FFT kayıtlarına göre X Yönündeki baskın frekans 3,70 Hz, Y yönündeki baskın frekans ise 4,80 Hz’dir. Bir önceki hasar seviyesine göre X yönündeki frekansta artış varken Y yönündeki frekans aynı kalmıştır.



Şekil 48. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3’te baskın frekansları

A Blok Binasına Hafif Hasar – 3’te ARTEMİS Modal ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında üç adet mod belirlenmiştir. Hafif Hasar – 3 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 49’da gösterilmiştir. Tablo 9 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.



Şekil 49. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için SYTD gösterimi

Tablo 9. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.691	0.652	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	4.093	0.769	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.805	0.567	Binanın Y yönünde hareketi

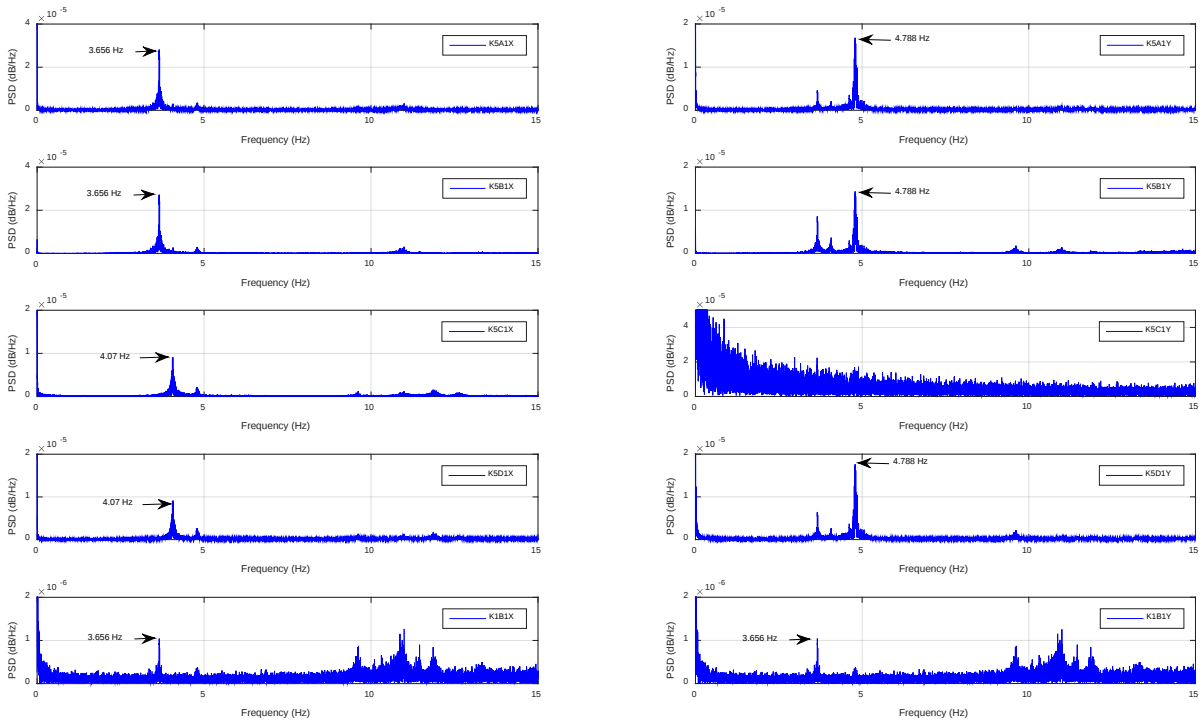
6.4. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de incelenmesi

Bu hasar durumunda köşe kolonların hasarları ağırlaştırılmıştır. Çekirdek betonuna vurulan darbelerle çekirdek betonu parçalanmıştır. Ayrıca düşey donatılar burkulmuştur. Şekil 50 binanın bu durumunu resmetmektedir.

Binanın bu durumdaki dinamik özellikleri titreşim analizleriyle daha önce açıklanan prensipler dahilinde belirlenmiştir. Şekil 51 binanın en üst katından alınan ivme kayıtlarının FFT’lerini göstermektedir. Binanın X yönündeki en güçlü frekansı 3,656 Hz’de, Y Yönündeki en güçlü frekansı ise 4.788 Hz’de belirlenmiştir. Bir önceki hasar durumuna göre baskın frekanslarda azalmalar vardır.

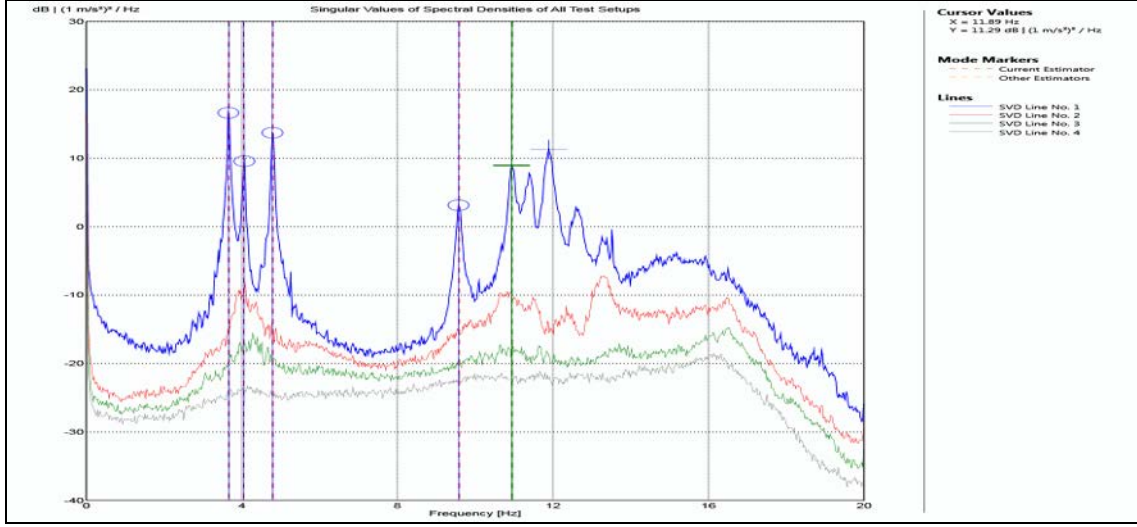


Şekil 50. A Blok Binasına Ağır Hasar – 1’de verilen köşe kolon hasarları

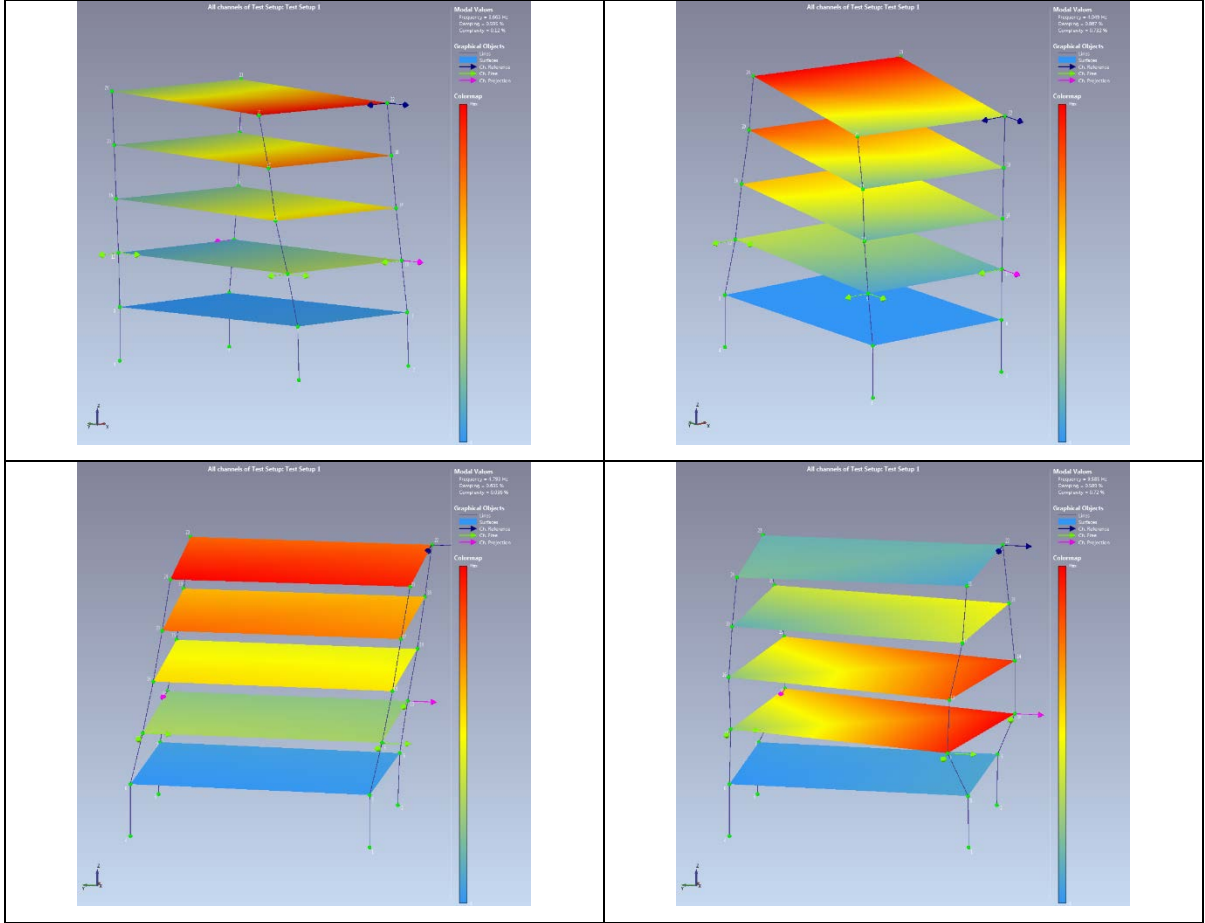


Şekil 51. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de baskın frekansları

A Blok Binasına Ağır Hasar – 1’de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında üç adet mod belirlenmiştir. Ağır Hasar – 1 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 52’de gösterilmiştir. Tablo 10 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur. Ancak 0–10 Hz aralığında belirlenen mod sayısı dört olmuştur. Bu nedenle belirlenen modlar Şekil 53’te gösterilmiştir.



Şekil 52. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için SYTD gösterimi



Şekil 53. A Blok Binasında Ağır Hasar – 1’de belirlenen mod şekilleri

Tablo 10. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.663	0.595	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	4.049	0.867	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.793	0.635	Binanın Y yönünde hareketi
4	9.585	0.589	Binanın iki eğrilikli X yönü hareketi

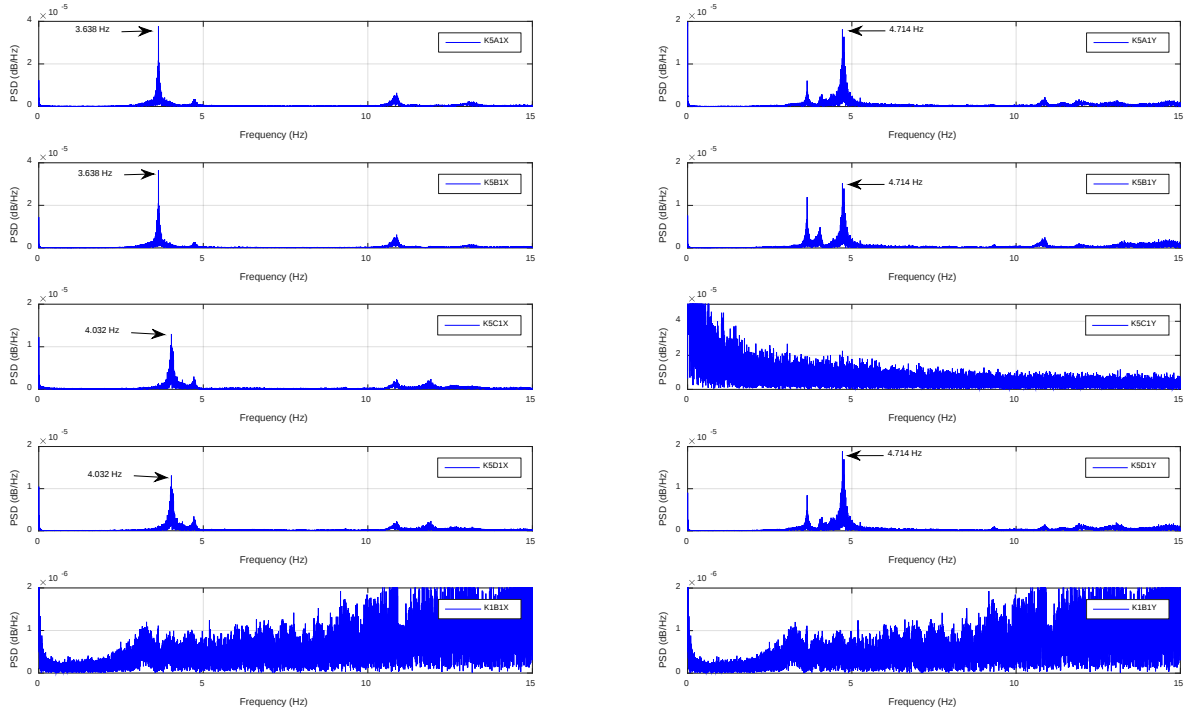
6.5. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de incelenmesi

Bu hasar durumu proje kapsamında çalışılan binaya verilen en ağır hasar durumudur. Binanı üç kolonu ağır hasarın ötesinde tamamen etkisizleştirilmiştir. Köşe kolonlar ile kenar kolonu birleştiren kiriş hafif hasarın ötesinde bir hasara maruz kalmıştır. Binanın durumu Şekil 54’te gösterilmiştir.



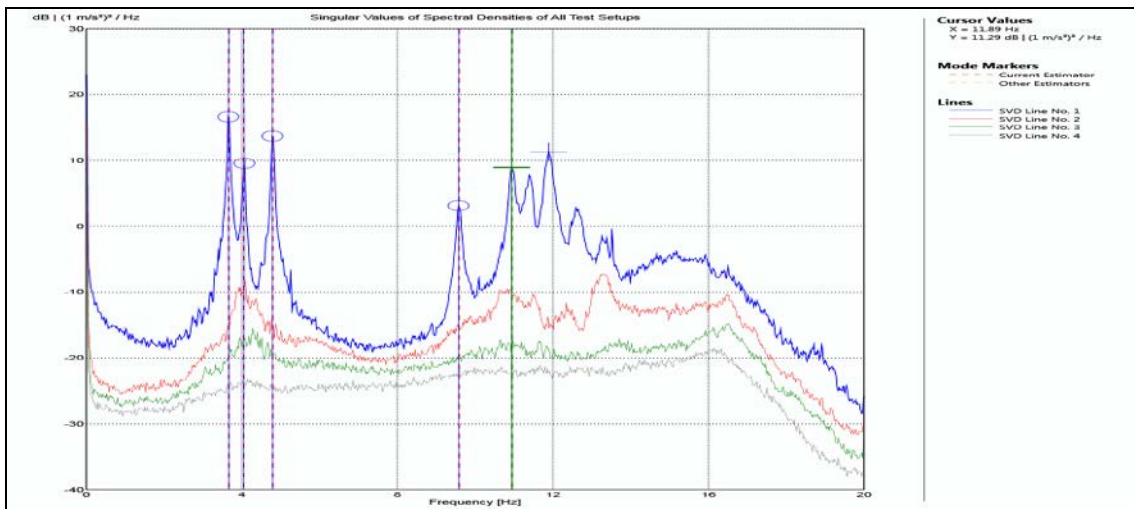
Şekil 54. A Blok Binasında Ağır Hasar – 2 durumu ve Ağır Hasarlı kenar kolon

Ağır Hasar – 2 durumunda binanın dördüncü katından alınana sinyallerin FFT’leri Şekil 55’te gösterilmiştir. Binanın X yönündeki en güçlü frekansı 3,638 Hz’de, Y Yönündeki en güçlü frekansı ise 4.714 Hz’de belirlenmiştir. Bir önceki hasar durumuna göre baskın frekanslarda azalmalar vardır.



Şekil 55. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de baskın frekansları

A Blok Binasına Ağır Hasar – 2’de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında dört adet mod belirlenmiştir. Ağır Hasar – 2 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 56’da gösterilmiştir. Tablo 11 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.



Şekil 56. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için SYTD gösterimi

Tablo 11. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	3.651	0.654	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	4.065	0.838	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	4.755	0.773	Binanın Y yönünde hareketi
4	9.368	0.398	Binanın iki eğrilikli X yönü hareketi

7. B BLOK BİNASINA HASAR VERİLMESİ VE TİTREŞİM ANALİZLERİ

B Blok Binası zemin katında bölme duvarları olmayan binadır. Planlanan hasarlar yapıya uygulanmış ve her hasar seviyesinde ölçümler alınarak dinamik özellikler belirlenmiştir.

7.1. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1’de incelenmesi

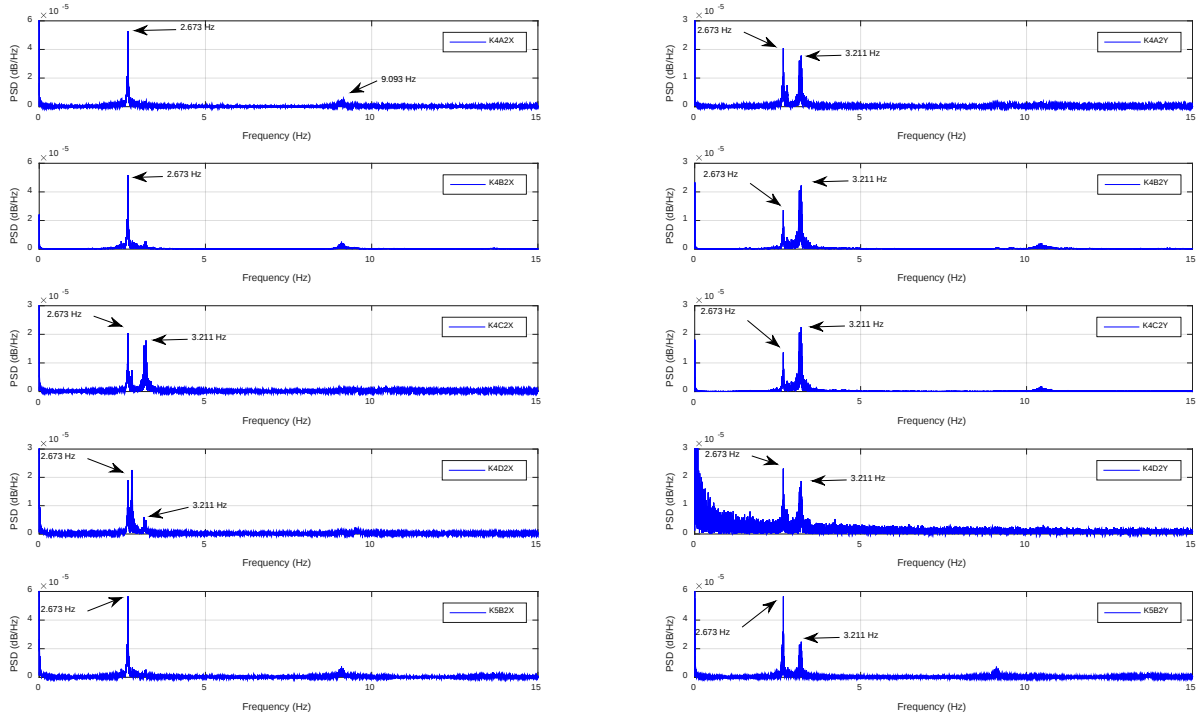
Hafif Hafif – 1 yapıda iki köşe kolonuna pas payı dökülmesi oluşturacak şekilde bölgesel hasar verilmesini içermektedir. Proje kapsamında iki adet kolona verilen hasarlar Şekil 57’de gösterilmiştir.



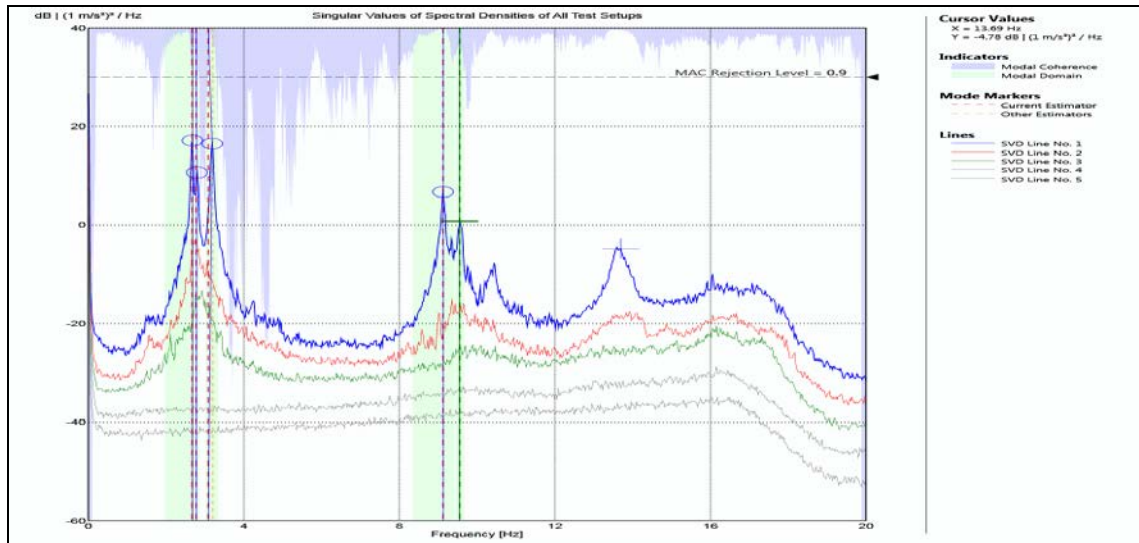
Şekil 57. B Blok Binasında iki köşe kolona verilen hafif hasar

Binanın bu durumdaki dinamik özellikleri titreşim analizleriyle daha önce açıklanan prensipler dâhilinde belirlenmiştir. Şekil 58 binanın dördüncü katının dört köşe noktasından ve en üst katının referans noktasından alınan kayıtların FFT’lerini göstermektedir. Binanın iki yönündeki dinamik modları da burulma modudur. Baskın frekanslar 2,673 Hz ve 3,211 Hz’dir. Bina ön yüzünün 3,211 Hz’lik frekansta hareketsiz kaldı açıktır. Elde edilen bu değerler binanın hasarsız durumu için elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında frekans değerlerindeki düşüş olduğu ve FFT şekillerinin aynı kaldığı görülmektedir.

B Blok Binasına Hafif Hasar – 1’de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında beş adet mod belirlenmiştir. Hafif Hasar – 1 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 59’da gösterilmiştir. Tablo 12 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.



Şekil 58. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1’de baskın frekansları



Şekil 59. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için SYTD gösterimi

Tablo 12. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	2.676	0.654	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	2.793	0.707	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	3.184	0.745	Binanın Y yönünde hareketi
4	9.12	0.58	Bina ön yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
5	9.551	0	Bina arka yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi

7.2. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2’de incelenmesi

Bu hasar durumu hafif hasarlı köşe kolonlarından sonra, bu kolonlara komşu olan ve bina ön yüzünde bulunan kenar kolona da hafif hasar verilmesi durumudur. Böylelikle binada üç adet kolonda bölgesel olarak pas payı sıyrılması vardır. Şekil 60 binadaki bu hasar durumunda hafif hasar verilen kenar kolonu göstermektedir.

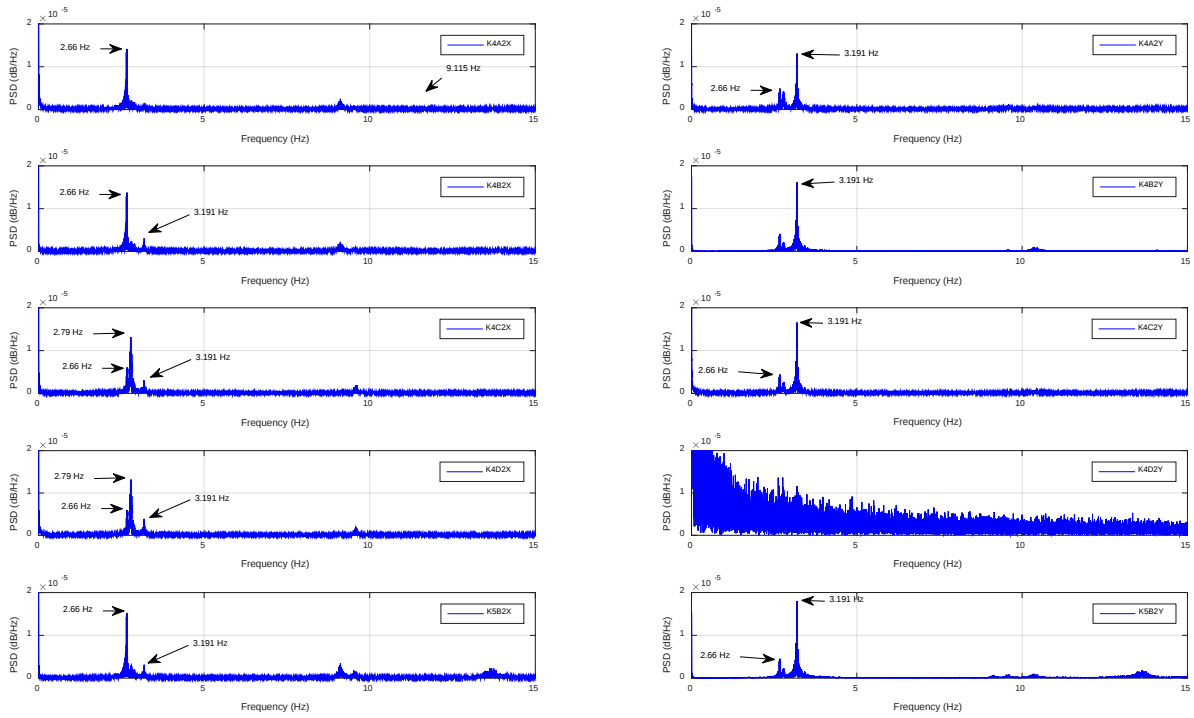


Şekil 60. B Blok Binasına Hafif Hasar – 2’de verilen kenar kolon hasarları

B Blok Binasının bu durumdaki dinamik özellikleri titreşim analizleriyle daha önce açıklanan prensipler dâhilinde belirlenmiştir. Şekil 61 binanın dördüncü katının dört köşe noktalarından ve en üst katının referans noktasından alınan kayıtların FFT’lerini göstermektedir. Binanın iki yönündeki dinamik modlarında da burulma davranışı vardır. Baskın frekanslar 2,66 Hz ve

3,191 Hz'dir. Elde edilen bu değerler binanın Hafif Hasar – 1 durumu için elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında frekans değerlerindeki düşüş olduğu ve FFT şekillerinin aynı kaldığı görülmektedir. Bu nedenle ilave hasarın mod şekillerini değiştirmediği, ancak bina rijitliğinde azalmaya neden olduğu açıktır.

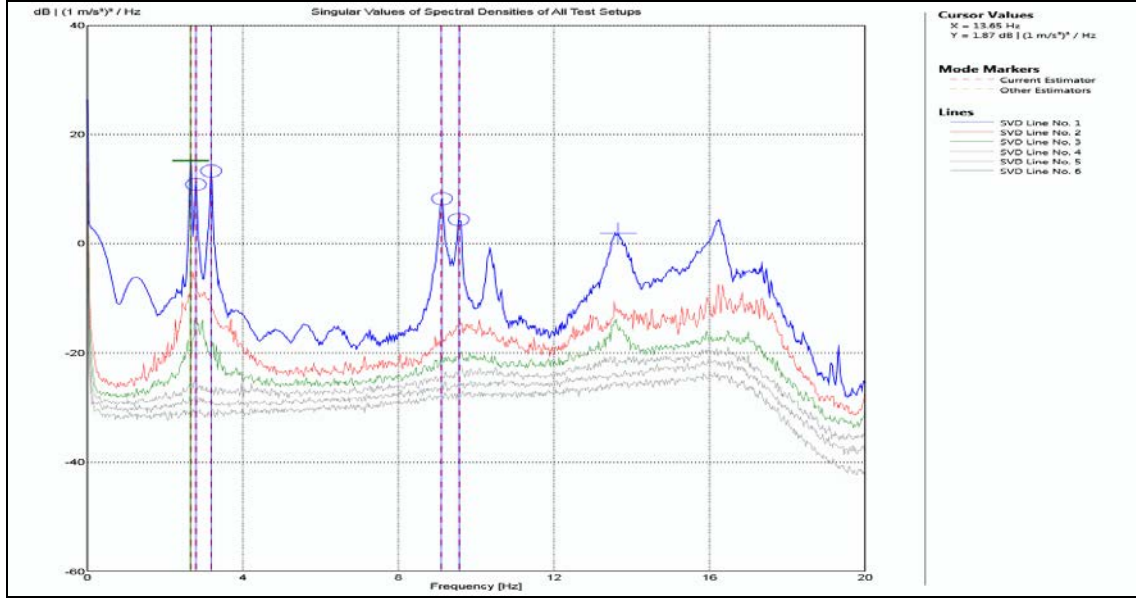
B Blok Binasına Hafif Hasar – 2'de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında beş adet mod belirlenmiştir. Hafif Hasar – 2 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 62'de gösterilmiştir. Tablo 13 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.



Şekil 61. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2'de baskın frekansları

Tablo 13. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	2.659	0.648	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	2.793	0	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	3.187	0.648	Binanın Y yönünde hareketi
4	9.103	0.508	Bina ön yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
5	9.564	0.433	Bina arka yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi



Şekil 62. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için SYTD gösterimi

7.3. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3'te incelenmesi

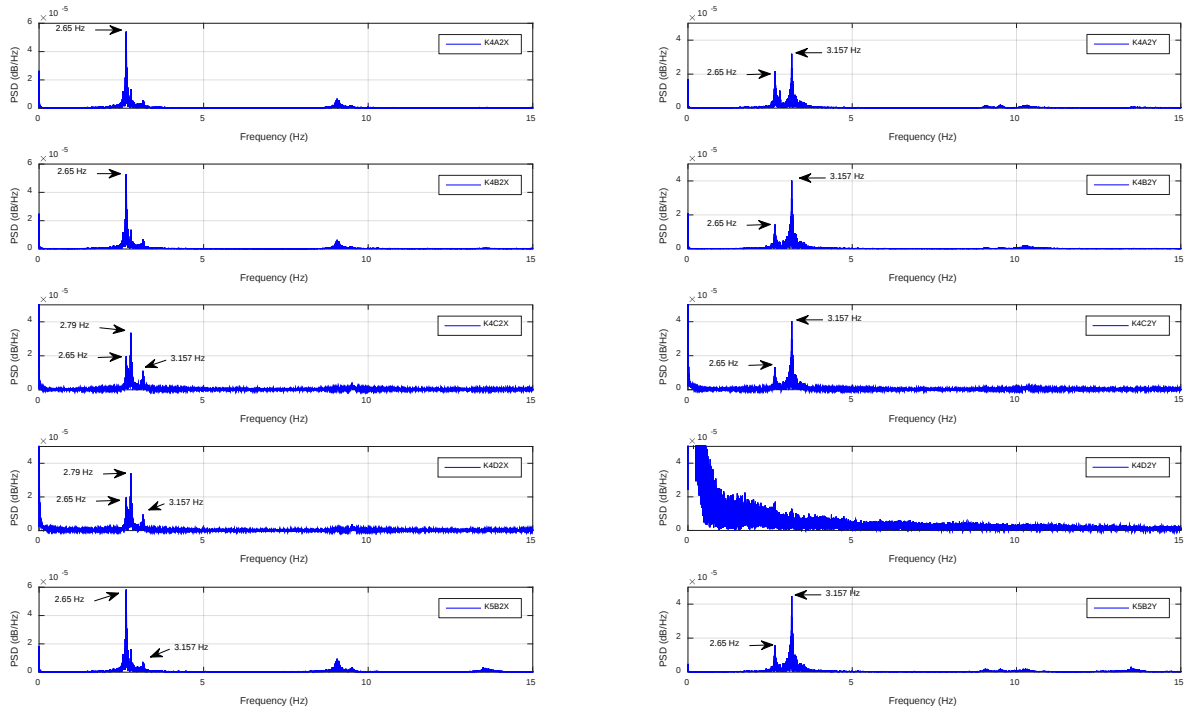
Bu hasar durumu hafif hasarlı köşe kolonlar ile hafif hasarlı kenar kolonu birleştiren kirişe hafif hasar verilmesi sonucu elde edilen durumdur. Bina yıkım makinesi ile söz konusu kirişe vurulan darbeler, betonun zayıf olması ve kiriş elemanın düzlemi dışında yüklenmesi nedeniyle verilmesi düşünülen hasardan daha ağır bir hasara neden olmuştur. Sonuç olarak kirişin orta ve kenar bölgelerinde delikler açılmıştır. Bu nedenle bu hasar durumunda kirişin hasar seviyesinin çalışma kapsamında tanımlanan orta hasarı aşarak ağır hasara geçtiği görülmektedir. Hasar verilen kirişin resmi Şekil 63'te gösterilmiştir.



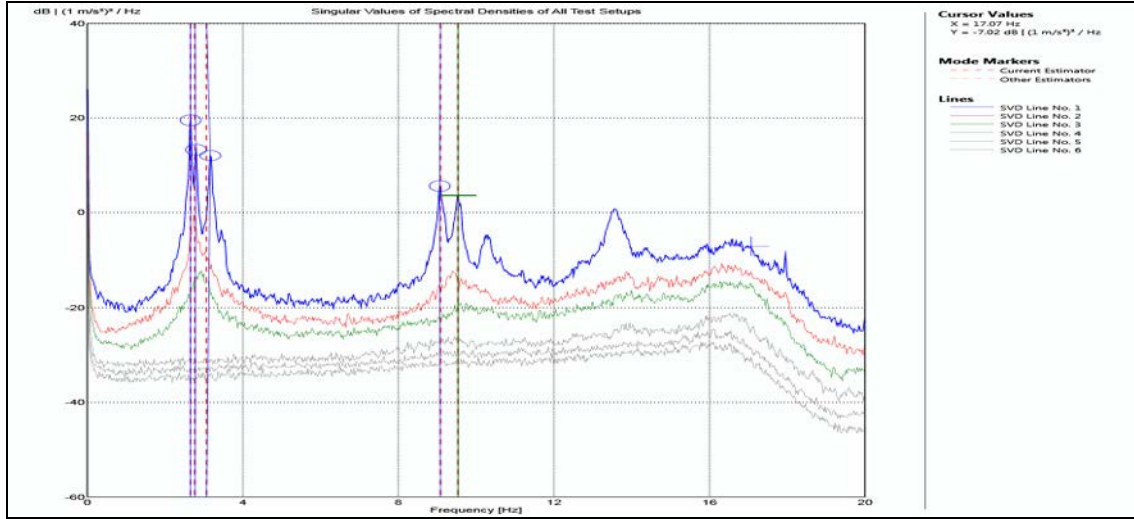
Şekil 63. B Blok Binasında Hafif Hasar – 3 için kirişe verilen hasar.

Şekil 64 binanın dördüncü katının dört köşe noktalarından ve en üst katının referans noktasından alınan kayıtların FFT'lerini göstermektedir. Bina dinamik davranışı önceki hasar sdurumları için açıklanan ile aynıdır. Baskın frekanslar 2,65 Hz ve 3,157 Hz'dir. Elde edilen bu değerler binanın Hafif Hasar – 2 durumu için elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında frekans değerlerindeki düşüş olduğu görülmektedir. Binanın arka yüzünde bulunan C ve D köşe noktalarının baskın frekansları değişmemiştir. Bu durum, belirtilen noktaların hasar yerine uzak olmalarıyla ilişkili olmalıdır.

B Blok Binasına Hafif Hasar – 3'te ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında beş adet mod belirlenmiştir. Hafif Hasar – 3 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 65'te gösterilmiştir. Tablo 14 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.



Şekil 64. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3'te baskın frekansları



Şekil 65. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için SYTD gösterimi

Tablo 14. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	2.656	0.635	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	2.793	0.673	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	3.164	0.825	Binanın Y yönünde hareketi
4	9.081	0.592	Bina ön yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
5	9.531	0	Bina arka yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi

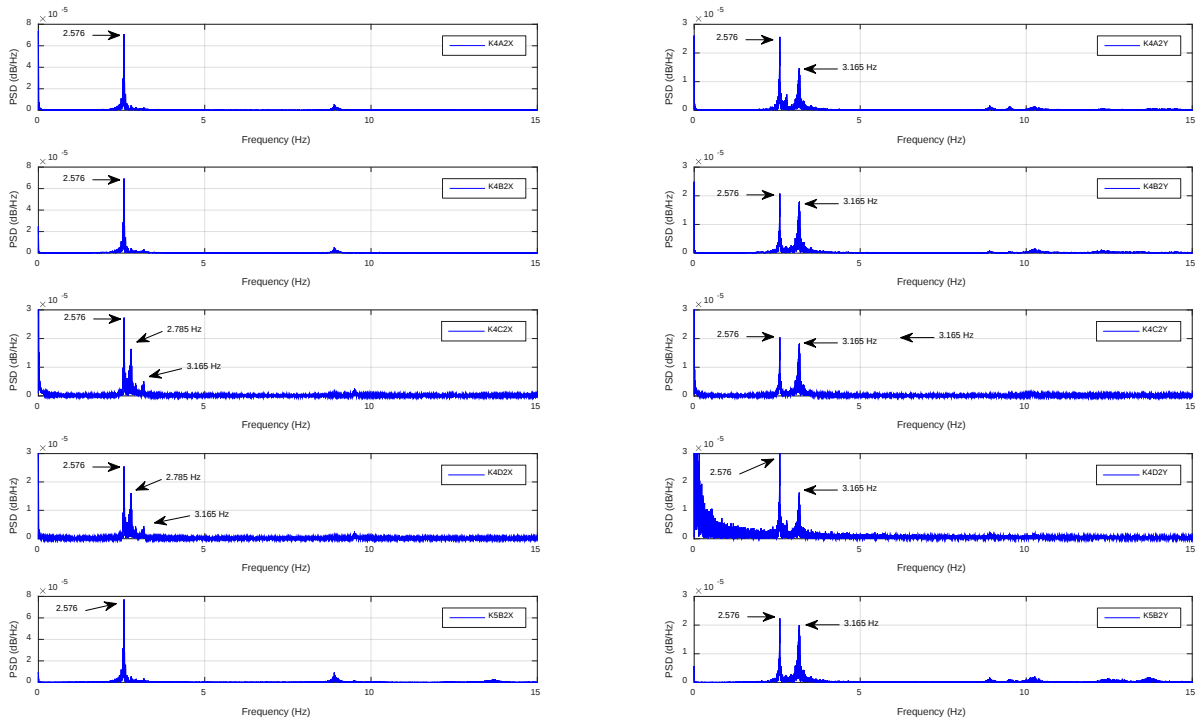
7.4. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de incelenmesi

Ağır Hasar – 1 B Blok Binasının köşe kolonlarına, Hafif Hasar – 3’ün üzerine ağır hasar verilmesi durumudur. Köşe kolonlara bina yıkım makinası ile çekirdek betonu parçalanıncaya ve boyuna donatılar burkuluncaya kadar hasar verilmiştir. Verilen hasarlar Şekil 66’da gösterilmiştir.



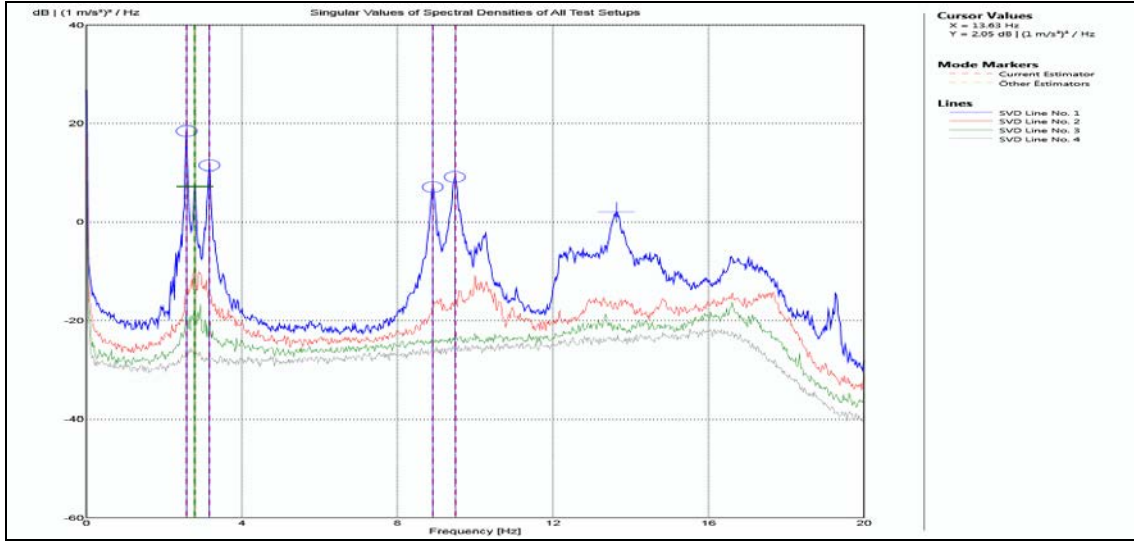
Şekil 66. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de durumu ve hasar verilen köşe kolonlar

Binanın bu durumdaki dinamik özellikleri titreşim analizleriyle daha önce açıklanan prensipler dâhilinde belirlenmiştir. Şekil 67 B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’deki baskın frekanslarını göstermektedir. Şekil 64 ve Şekil 67’nin beraber incelenmesi sonucunda iki şekil arasında frekans değişimleri yanında önemli farklılıkların olduğu görülecektir. Binaın baskın frekansları 2.576 Hz ve 3,165 Hz olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 67. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1’de baskın frekansları

B Blok Binasına Ağır Hasar – 1’de ARTEMİS Modal yazılım ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında beş adet mod belirlenmiştir. Ağır Hasar – 1 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 68’de gösterilmiştir. Tablo 15 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur.



Şekil 68. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için SYTD gösterimi

Tablo 15. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	2.576	0.549	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	2.787	0.81	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	3.165	0.636	Binanın Y yönünde hareketi
4	8.913	0.476	Bina ön yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
5	9.494	0.581	Bina arka yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi

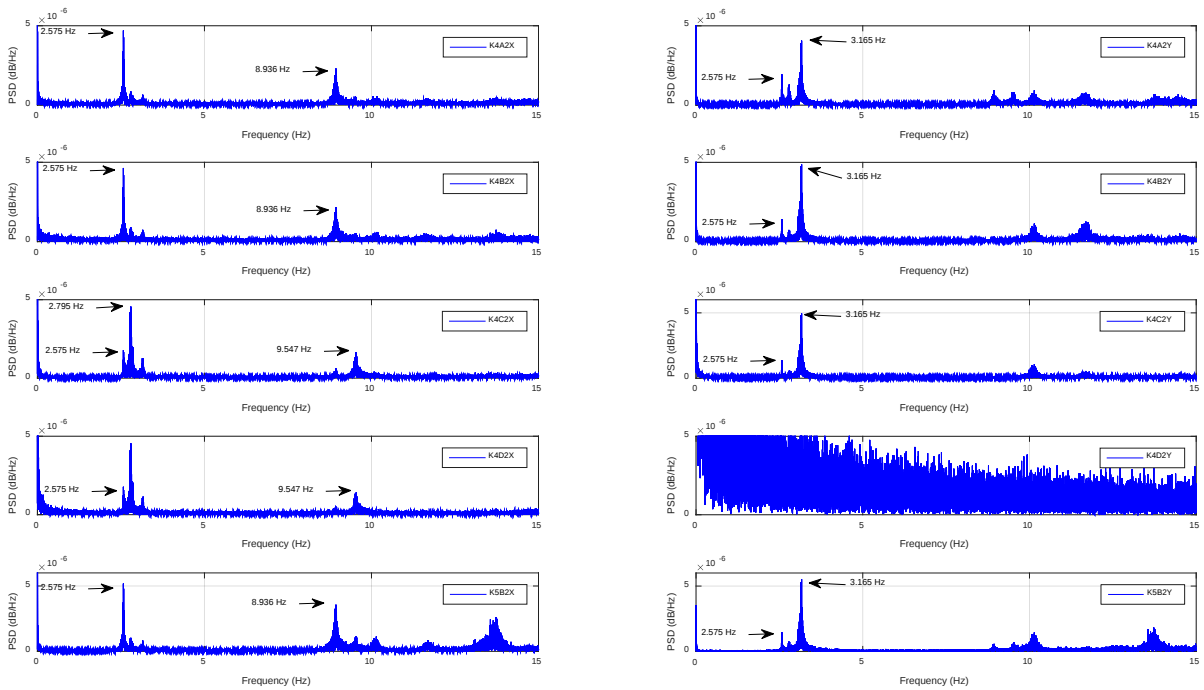
7.5. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de incelenmesi

Ağır Hasar – 2 durumunda Ağır Hasar – 1 durumu üzerine hafif hasarlı kenar kolona da ağır hasar verilmektedir. Bina yıkım makinası ile gerçekleştirilen hasar sonrasında bina ve yapı elemanlarının durumu Şekil 69’da gösterilmiştir.

B Blok binasından alınan titreşim kayıtlarının FFT gösterimleri Şekil 70’de verilmiştir. Yorumlanan X ve Y yönü baskın frekansların 2.575 Hz ve 3,165 Hz’de olduğu görülmektedir. Bu değerler bir önceki hasar durumuna göre oldukça düşük değişimler içermektedir.



Şekil 69. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de durumu ve hasar verilen kenar kolon

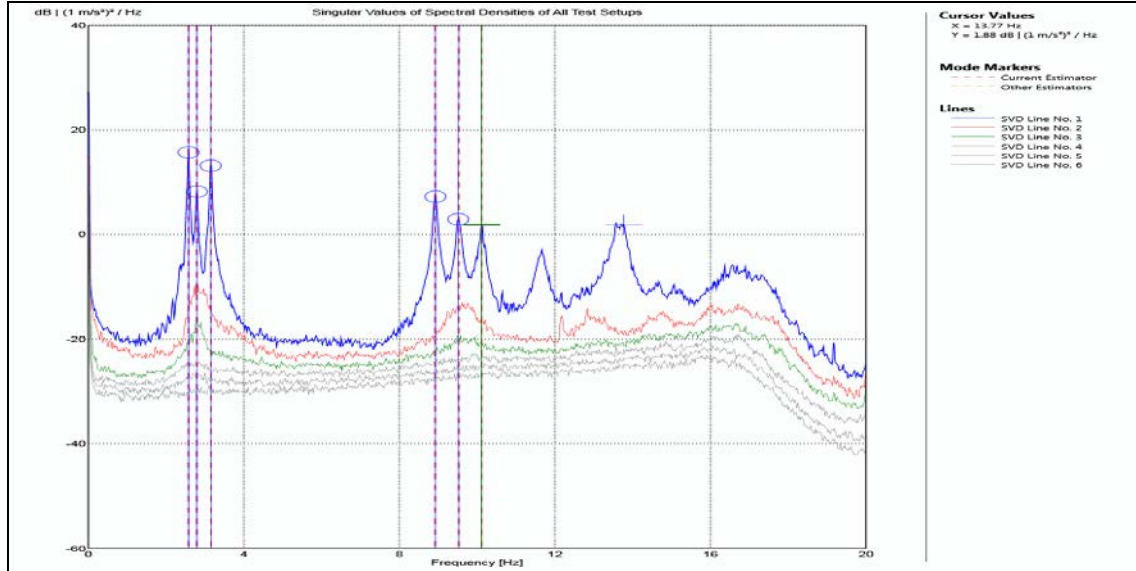


Şekil 70. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2’de baskın frekansları

B Blok Binasına Ağır Hasar – 2’de ARTEMİS Modal yazılımı ile incelenmiş ve 0 – 10 Hz aralığında beş adet mod belirlenmiştir. Ağır Hasar – 2 durumunda elde edilen Spektral Yoğunlukların Tekil Değerleri, SYTD Şekil 71’de gösterilmiştir. Tablo 16 elde edilen modal değerleri göstermektedir. Mod şekillerinde belirtilen hasarın neden olduğu belirgin bir değişiklik yoktur. Ancak 0–10 Hz aralığından hemen sonra 10.116 Hz’de bir mod daha belirgin hale gelmiştir. Mod şekilleri binanın hasar almamış hali için verilen şekillerin aynısıdır.

Tablo 16. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için modal değerleri

Mod	Frekans [Hz]	Sönüm oranı [%]	Açıklama
1	2.576	0.707	Bina ön yüzünün X yönü hareketi
2	2.789	0.778	Bina arka yüzünün X yönü hareketi
3	3.154	0.662	Binanın Y yönünde hareketi
4	8.921	0.401	Bina ön yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
5	9.527	0.611	Bina arka yüzünün iki eğrilikli X yönü hareketi
6	10.116	0.816	Binanın iki eğrilikli Y yönü hareketi



Şekil 71. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için SYTD gösterimi

8. FREKANS DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ

Proje kapsamında iki binaya yapılan müdahaleler sonucunda elde edilen frekans değerleri A ve B Blok Binaları için ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca analizlerde Matlab ve Artemis Modal yazılımlarıyla elde edilen frekans değerlerinde küçük farklılıkların olması nedeniyle frekans değişimleri iki araçla elde edilen sonuçlar için kendi içlerinde değerlendirilmiştir. A Blok Binasında elde edilen frekanslar ve yapının orijinal haline göre temsil ettikleri değişimler Tablo 17 ve Tablo 18'de Tepe Noktası Seçimi yöntemi ve Artemis Modal, GFOA yöntemine göre ayrı ayrı olmak üzere gösterilmiştir. B Blok Binasında elde edilen frekanslar ve yapının orijinal haline göre temsil ettikleri değişimler ise Tablo 19 ve Tablo 20'de Tepe Noktası Seçimi yöntemi ve Artemis Modal, GFOA yöntemine göre gösterilmiştir.

Daha önce açıklanan ve Tablo 1'de özetlenen bilgiler ışığında çalışılan binalara uygulanan hasarlar bina dinamik özelliklerinde çok büyük değişikliklere neden olmamıştır. Çalışılan binaların her birisinde 32 adet kolon bulunmaktadır. Proje kapsamında bu kolonlardan üç tanesine ağır hasar verilmiş, diğer kolonlara dokunulmamıştır. Özellikle hafif hasarların eleman rijitliklerine ve dolayısıyla bina dinamik özelliklerine etkisi gerçekten oldukça düşüktür. Bu nedenle de ilerleyen hasar durumuna karşı bina frekanslarında düşüşün gözlemlenmediği adımlar mevcuttur. Benzer durum birbirini takip eden Ağır Hasar senaryoları için de geçerlidir. Rijitlik azalmasının karekökü oranında frekansları değiştirdiği düşünüldüğünde hasar senaryoları arasında oluşan çok küçük frekans değişimleri anlaşılabilir.

Verilerin analiz edilmesinde ikinci bir hususta oluşabilecek gürültü ve çevresel etkilerin sonuçlar üzerinde etkili olabileceği gerçeğidir. Yürütücü tarafından daha önce yapılan çalışmalara göre Çevresel titreşim analizlerinde titreşimin büyüklüğü yapı genel dinamik özellikleri üzerinde etkilidir (Aras 2016). Ayrıca ortam sıcaklığı da yapı dinamik özelliklerini etkilemektedir. Yürütülen deneysel çalışmalar birbirini takip eden iki hafta içerisinde tamamlanmıştır. Bu nedenle ortam sıcaklığında çok büyük değişiklikler yoktur. Ayrıca titreşim verileri alınırken yapı ve çevresinde yüksek titreşimlere neden olabilecek kaynaklar bulunmamaktadır.

Tablo 17. Farklı hasar durumları için A Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (TNS)

Bina Durumu	Tespit edilen Frekanslar			Frekans Değişimleri		
	F1	F2	F3	Df1	Df2	Df3
Orijinal Bina	3.756	4.065	4.81			
Hafif Hasar – 1	3.756	4.086	4.794	0.00	0.52	-0.33
Hafif Hasar – 2	3.68	4.073	4.8	-2.02	0.20	-0.21
Hafif Hasar – 3	3.7	4.077	4.8	-1.49	0.30	-0.21
Ağır Hasar – 1	3.656	4.07	4.788	-2.66	0.12	-0.46
Ağır Hasar – 2	3.638	4.032	4.714	-3.14	-0.81	-2.00

Tablo 18. Farklı hasar durumları için A Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (Artemis, GFOA)

Bina Durumu	Tespit edilen Frekanslar			Frekans Değişimleri		
	F1	F2	F3	Df1	Df2	Df3
Orijinal Bina	3.762	4.019	4.818			
Hafif Hasar – 1	3.744	4.092	4.818	-0.48	1.82	0.00
Hafif Hasar – 2	3.672	4.063	4.801	-2.39	1.09	-0.35
Hafif Hasar – 3	3.691	4.093	4.805	-1.89	1.84	-0.27
Ağır Hasar – 1	3.663	4.049	4.793	-2.63	0.75	-0.52
Ağır Hasar – 2	3.651	4.065	4.755	-2.95	1.14	-1.31

Tablo 19. Farklı hasar durumları için B Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (TNS)

Bina Durumu	Tespit edilen Frekanslar			Frekans Değişimleri		
	F1	F2	F3	Df1	Df2	Df3
Orijinal Bina	2.692	2.785	3.217			
Hafif Hasar – 1	2.673	2.789	3.211	-0.71	0.14	-0.19
Hafif Hasar – 2	2.66	2.79	3.191	-1.19	0.18	-0.81
Hafif Hasar – 3	2.65	2.79	3.157	-1.56	0.18	-1.87
Ağır Hasar – 1	2.576	2.785	3.165	-4.31	0.00	-1.62
Ağır Hasar – 2	2.575	2.795	3.165	-4.35	0.36	-1.62

Tablo 20. Farklı hasar durumları için B Blok Binasında belirlenen frekans değişimleri (Artemis, GFOA)

Bina Durumu	Tespit edilen Frekanslar			Frekans Değişimleri		
	F1	F2	F3	Df1	Df2	Df3
Orijinal Bina	2.687	2.797	3.206			
Hafif Hasar – 1	2.676	2.793	3.184	–0.41	–0.14	–0.69
Hafif Hasar – 2	2.659	2.793	3.187	–1.04	–0.14	–0.59
Hafif Hasar – 3	2.656	2.793	3.164	–1.15	–0.14	–1.31
Ağır Hasar – 1	2.576	2.787	3.165	–4.13	–0.36	–1.28
Ağır Hasar – 2	2.576	2.789	3.154	–4.13	–0.29	–1.62

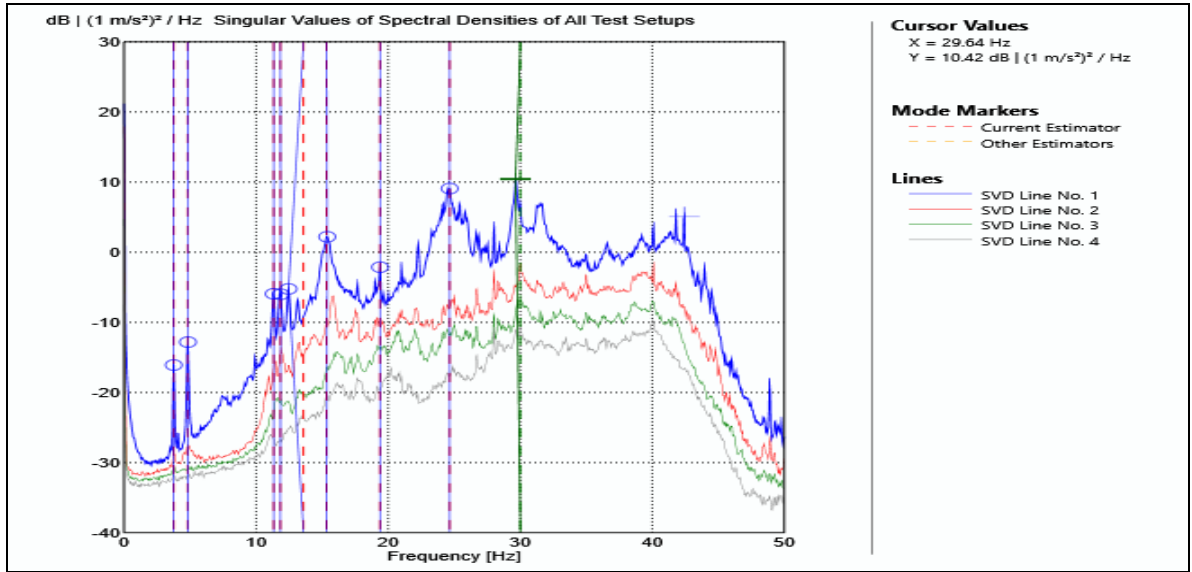
Sonuç olarak hasar senaryoları arasında gerçekleşen çok küçük frekans değişimleri bina rijitliğinde gerçekleşen çok küçük değişimlerin sonucunda ortaya çıkmaktadır. Tanımlanan hasarlar binaların ön yüzünde bulunan yapı elemanlarına verilmişti. Bu nedenle bina önyüzünün hareketi olarak tanımlanan dinamik modda (1. mod) verilen hasarların etkileri daha belirgin olarak görülmektedir. Hatta bina ön yüzüne verilen hasarların, binanın arka yüzü hareketini temsil eden bina ikinci modunda frekans artışı yarattığı görülmektedir. Son olarak binanın üçüncü modu olan Y yönündeki harekette hasar kaynaklı frekans düşüşü birinci moda göre daha azdır.

9. A VE B BLOK BİNALARINDA HASAR ETKİLERİNİN DÜŞEY İVME KAYITLARIYLA ANALİZ EDİLMESİ

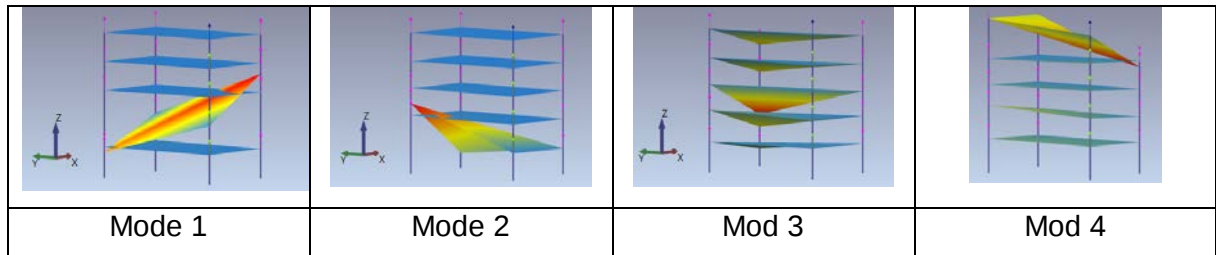
Dinamik tanımlamada kullanılan ivmeölçerler üç eksenlidir. Binaların genel davranışlarını yorumlamak için iki yatay yönlü ivme kayıtları kullanıldı. Bu bölümde ise hasar belirleme çalışmalarına yardımcı olması nedeniyle sadece düşey yönü kayıtlar kullanılmıştır. Alınan kayıtlar Artemis Modal programıyla analiz edilmiş ve mod şekilleri çıkarılmıştır.

9.1. A Blok Binasının düşey yönlü dinamik özellikleri

Binanın düşey yöndeki ivme kayıtları ile elde edilen SYTD gösterimi Şekil 72’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen baskın frekans değerlerinin güçleri çok düşüktür. Bina mod şekillerinde de genel davranışı temsil edecek herhangi bir mod bulunamamıştır (Şekil 73). Bu nedenle binanın düşey yönde kayda değer bir modu yoktur. SYTD gösteriminde elde edilen modların özellikleri Tablo 21’de gösterilmiştir.



Şekil 72. A Blok Binasının orijinal hali için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi



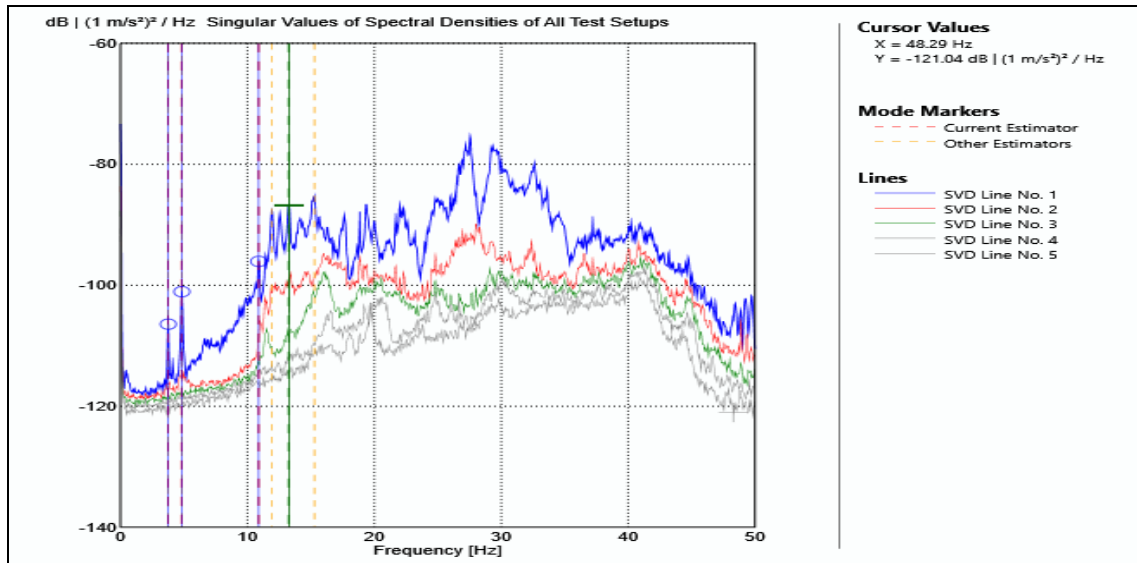
Şekil 73. A Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri

Tablo 21. A Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde dinamik özellikler

Frequency [Hz]	Damping [%]	Complexity [%]
3.761	1.081	13.511
4.819	1.033	93.821
11.323	0.618	74.929
11.832	0.699	95.047
13.582	0.763	1.8
15.338	1.76	4.151
19.385	0	55.007
24.658	0	7.24
30.013	0.705	66.067

9.1.1. A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 1’de incelenmesi

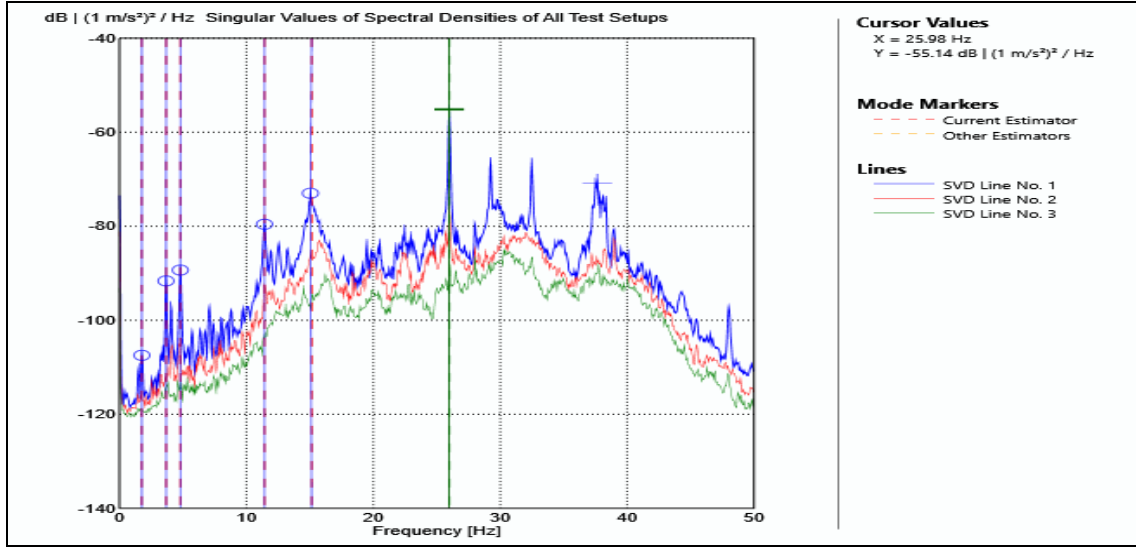
A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 1’de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 74’de gösterilmiştir. Yapılan incelemede düşey yönde ivme kayıtlarıyla elde edilecek herhangi bir modun olmadığı saptanmıştır.



Şekil 74. A Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi

9.1.2. A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 2’de incelenmesi

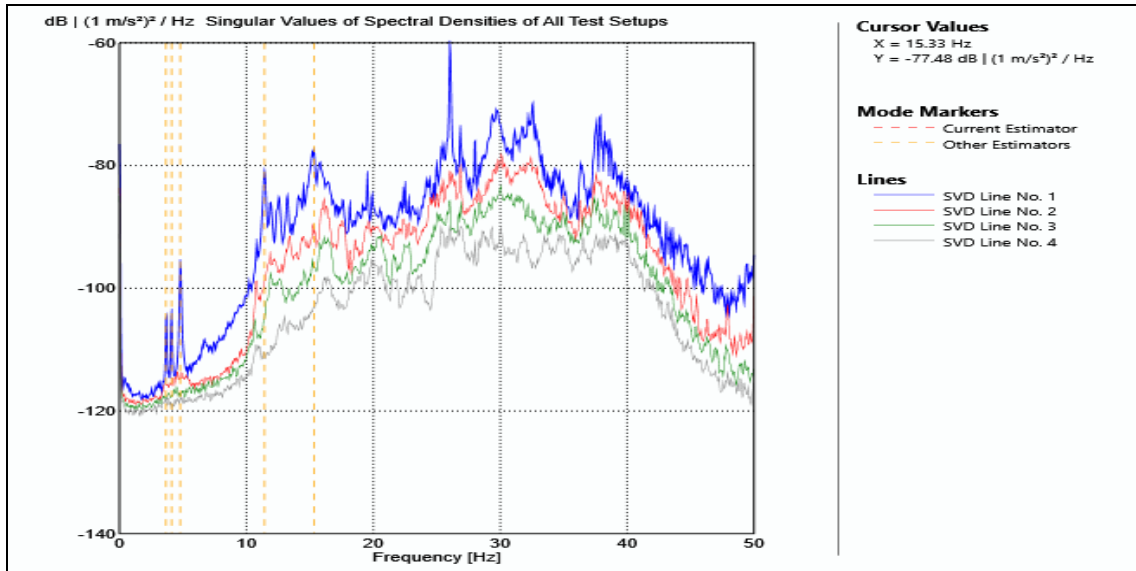
A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 2’de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 75’te gösterilmiştir. Yapılan incelemede düşey yönde ivme kayıtlarıyla elde edilecek herhangi bir modun olmadığı saptanmıştır.



Şekil 75. A Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi

9.1.3. A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 3'te incelenmesi

A Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 3'te incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 76'da gösterilmiştir. Yapılan incelemede düşey yönde ivme kayıtlarıyla elde edilecek herhangi bir modun olmadığı saptanmıştır.

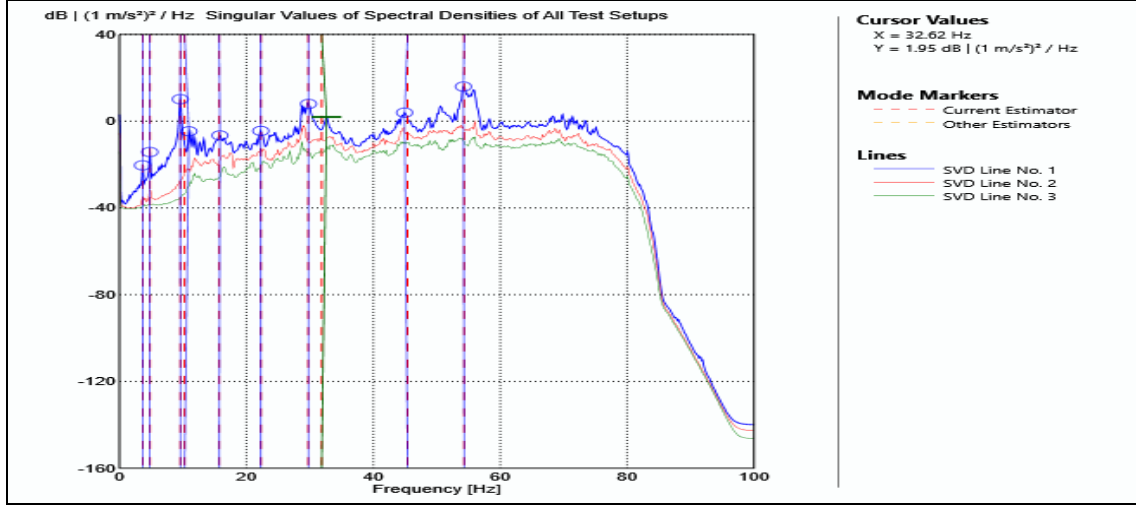


Şekil 76. A Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi

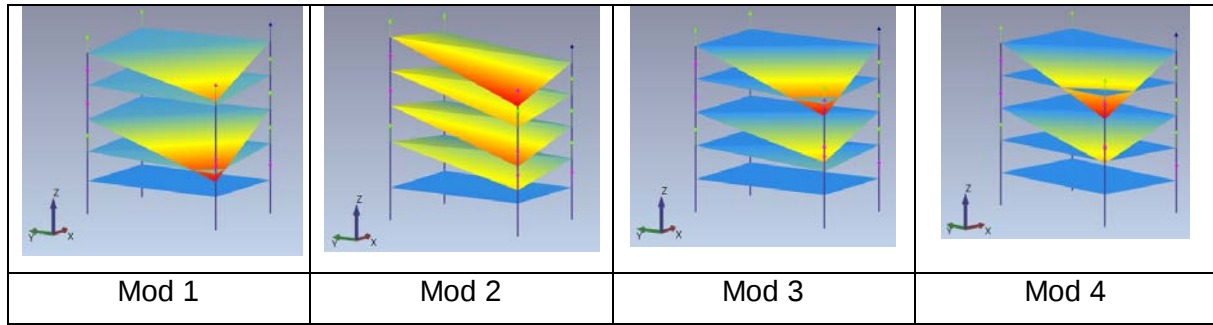
9.1.4. A Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 1'de incelenmesi

A Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 1'de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 77'de gösterilmiştir. Yapılan incelemede binanın ilk dört modunun binadaki

hasar ile uyumlu olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Elde edilen modlar Şekil 78’de gösterilmiştir. Tablo 22 SYTD gösteriminde belirlenen modların özelliklerini göstermektedir.



Şekil 77. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi



Şekil 78. A Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri

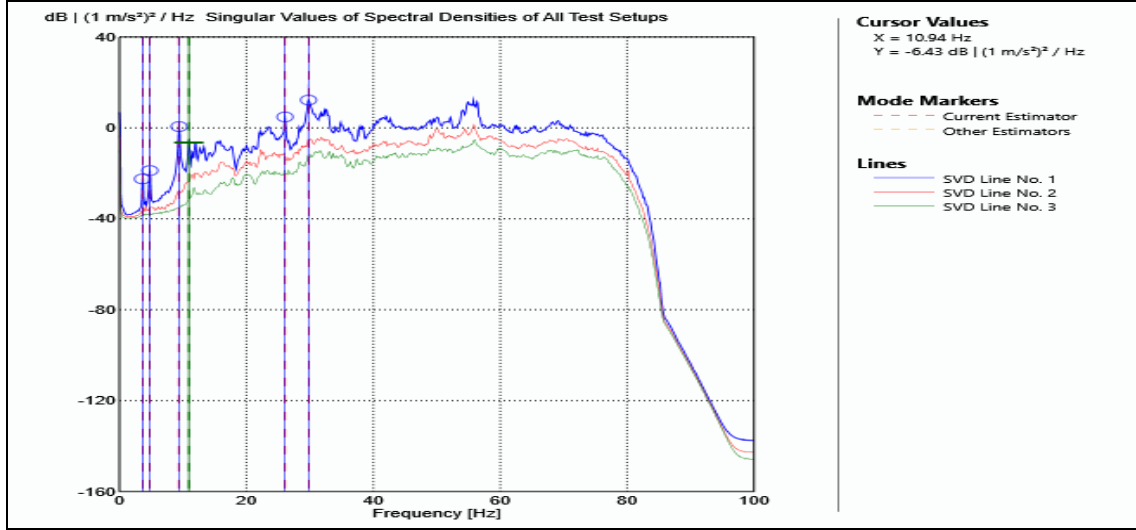
Tablo 22. A Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey yönde dinamik özellikleri

Frequency [Hz]	Damping [%]	Complexity [%]
3.669	1.941	0.309
4.793	1.611	1.689
9.6	1.157	15.268
10.258	0.875	11.88
15.703	1.704	20.794
22.265	0.845	17.788
29.754	1.091	17.566
31.863	1.016	23.517
45.389	0.951	9.453
54.321	0.433	78.598

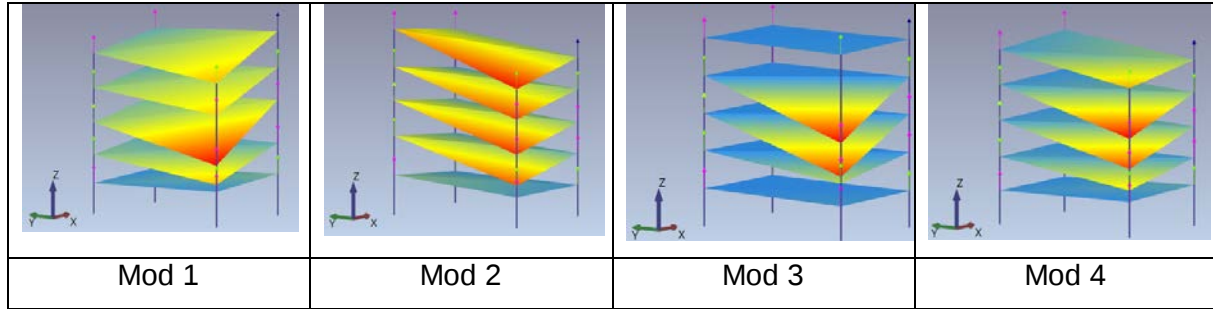
9.1.5. A Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 2’de incelenmesi

A Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 2’de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 79’da gösterilmiştir. Yapılan incelemede binanın ilk dört modunun binadaki

hasar ile uyumlu olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Elde edilen modlar Şekil 80’de gösterilmiştir. Tablo 23 SYTD gösteriminde belirlenen modların özelliklerini göstermektedir.



Şekil 79. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi



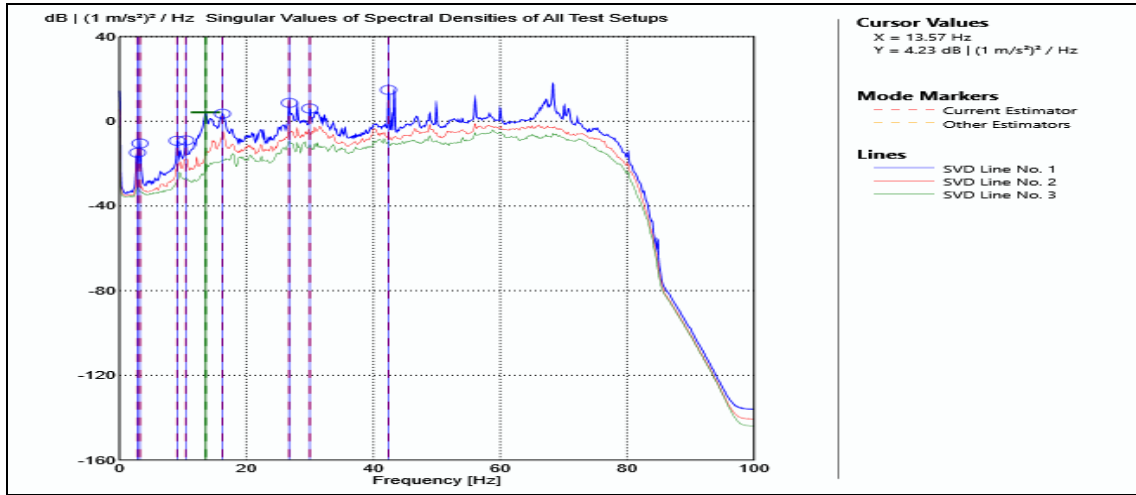
Şekil 80. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey yönde elde edilen mod şekilleri

Tablo 23. A Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey yönde dinamik özellikler

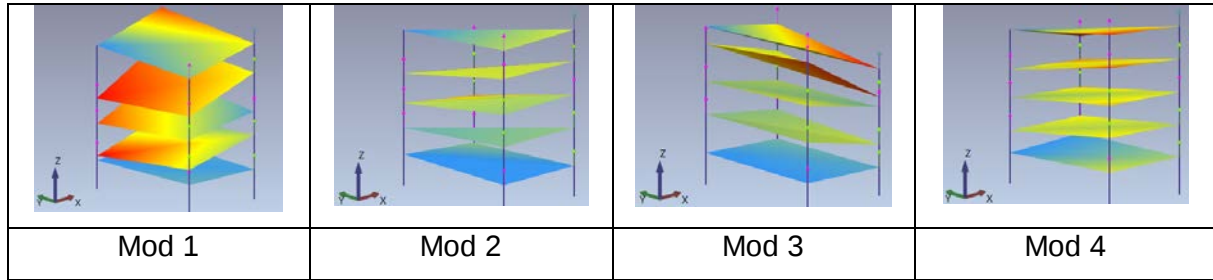
Frequency [Hz]	Damping [%]	Complexity [%]
3.656	1.754	2.717
4.756	1.642	2.919
9.351	0.907	8.378
10.942	0.938	9.64
26.074	0	87.221
29.841	1.083	36.229

9.2. B Blok Binasının düşey yönlü dinamik özellikleri

Binanın düşey yöndeki ivme kayıtları ile elde edilen SYTD gösterimi Şekil 81'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen baskın frekans değerlerinin güçleri çok düşüktür. Bina mod şekillerinde de genel davranışı temsil edecek herhangi bir mod bulunamamıştır (Şekil 82). Bu nedenle binanın düşey yönde kayda değer bir modu yoktur. SYTD gösteriminde elde edilen modların özellikleri Tablo 24'te gösterilmiştir.



Şekil 81. B Blok Binasının orijinal hali için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi



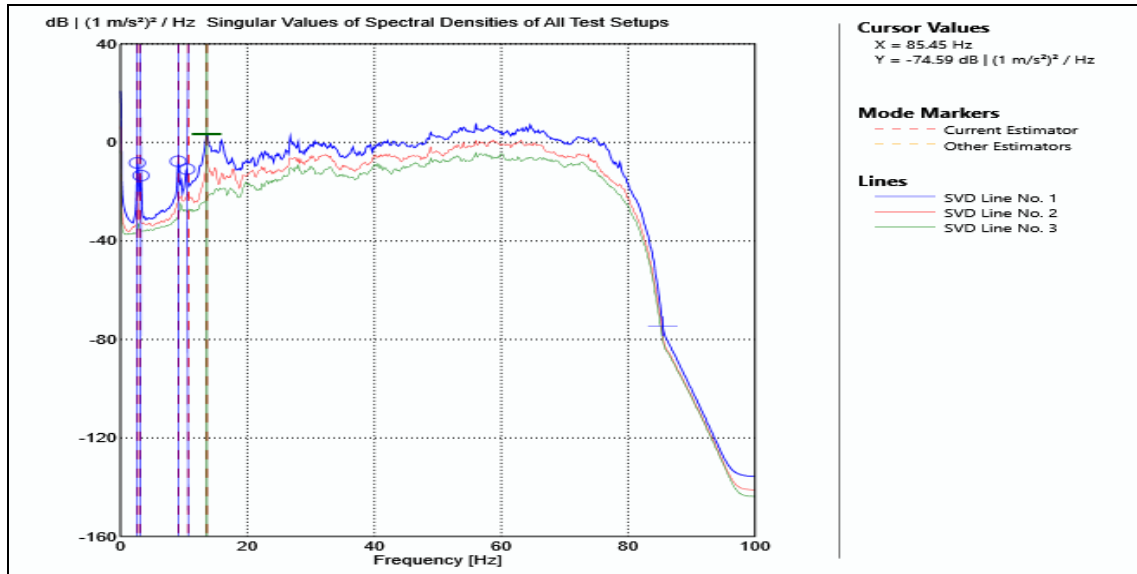
Şekil 82. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri

Tablo 24. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde dinamik özellikler

Frequency [Hz]	Complexity [%]
2.832	2.262
3.223	0.204
9.082	1.218
10.449	1.248
13.574	6.679
16.211	17.893
26.758	30.014
29.98	25.438
42.383	69.507

9.2.1. B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 1’de incelenmesi

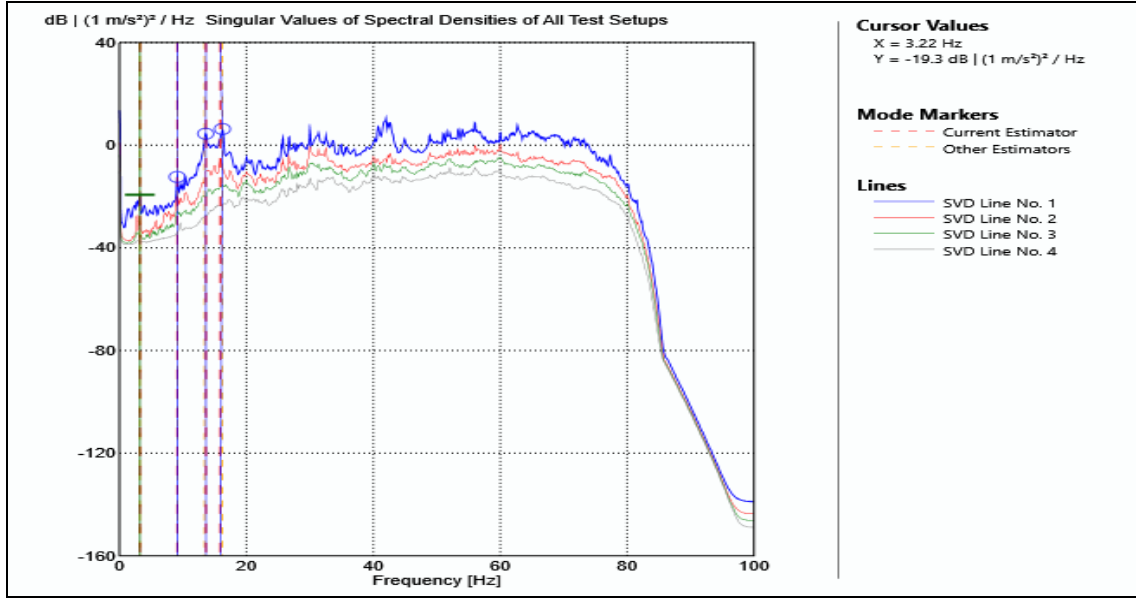
B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 1’de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 83’te gösterilmiştir. Yapılan incelemede düşey yönde ivme kayıtlarıyla elde edilecek herhangi bir modun olmadığı saptanmıştır. Elde edilen lokal modlarda hasar yönelik bir şekil gözlemlenmemiştir.



Şekil 83. B Blok Binasının Hafif Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi

9.2.2. B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 2’de incelenmesi

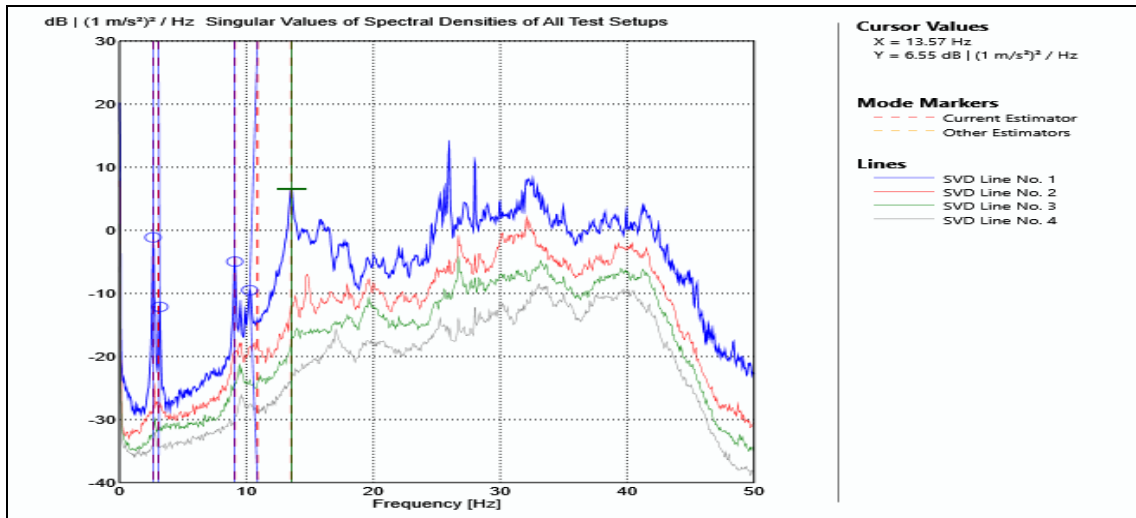
B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 2’de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 84’de gösterilmiştir. Yapılan incelemede düşey yönde ivme kayıtlarıyla elde edilecek herhangi bir modun olmadığı saptanmıştır.



Şekil 84. B Blok Binasının Hafif Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi

9.2.3. B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 3'te incelenmesi

B Blok Binasının düşey yönde Hafif Hasar – 3'te incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 85'te gösterilmiştir. Yapılan incelemede düşey yönde ivme kayıtlarıyla elde edilecek herhangi bir modun olmadığı saptanmıştır.

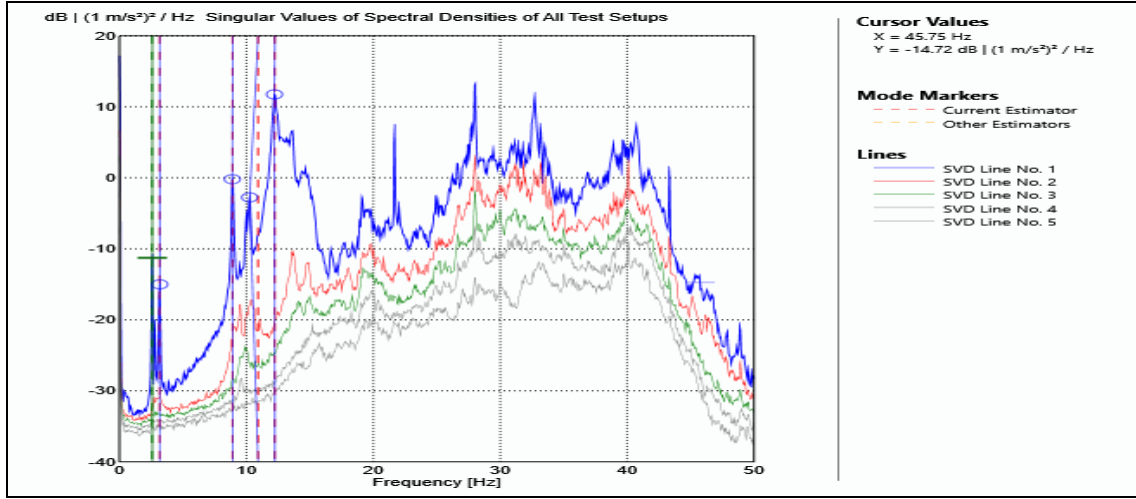


Şekil 85. B Blok Binasının Hafif Hasar – 3 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi

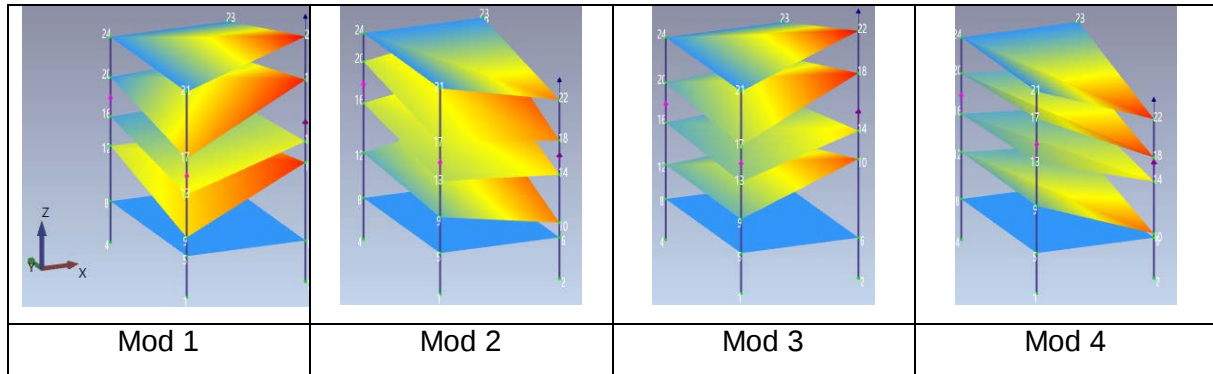
9.2.4. B Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 1'de incelenmesi

B Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 1'de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 86'da gösterilmiştir. Yapılan incelemede binanın modlarının binadaki hasar

ile uyumlu olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Elde edilen modlar Şekil 87'de gösterilmiştir. Tablo 25 SYTD gösteriminde belirlenen modların özelliklerini göstermektedir.



Şekil 86. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi



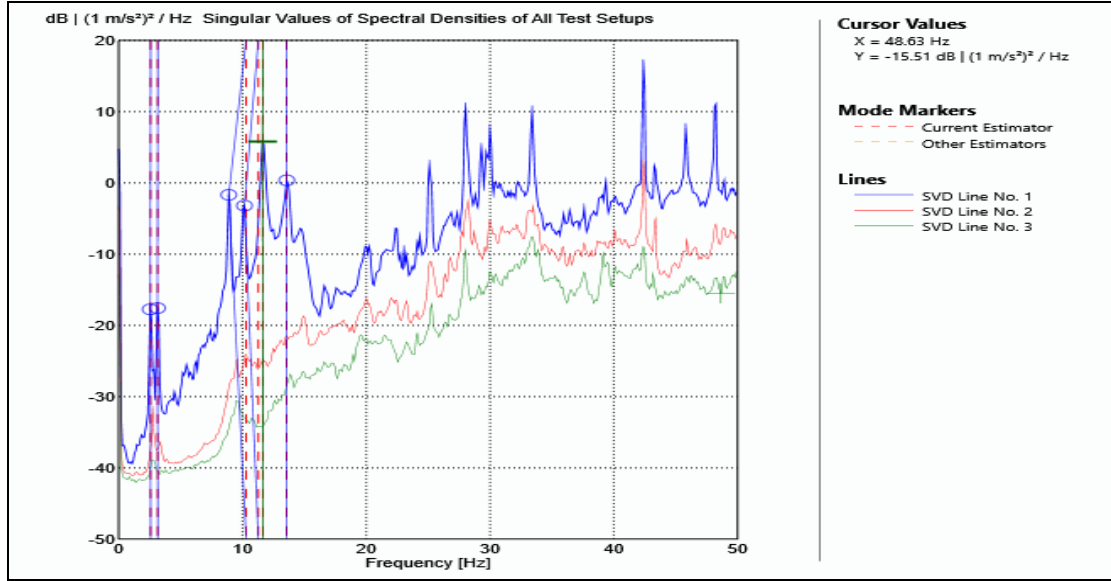
Şekil 87. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde elde edilen mod şekilleri

Tablo 25. B Blok Binasının Ağır Hasar – 1 için düşey yönde dinamik özellikleri

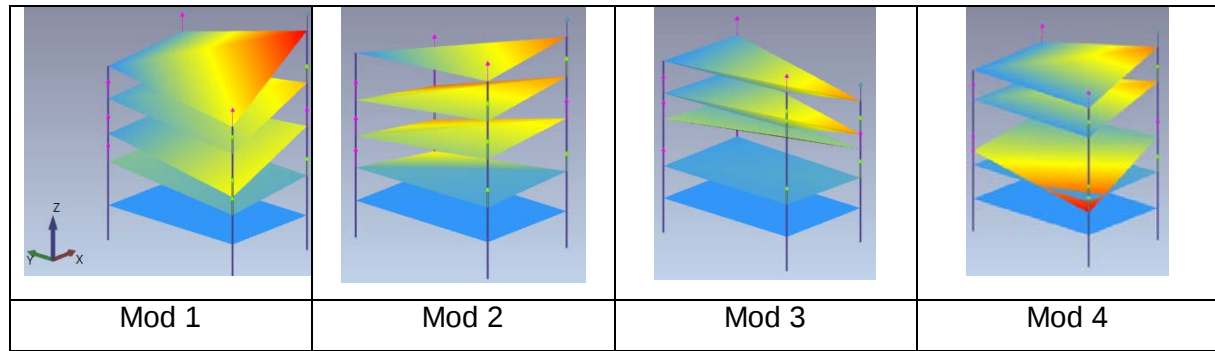
Frequency [Hz]	Damping [%]	Complexity [%]
2.574	1.215	2.829
3.162	1.192	0.397
8.91	0.58	0.859
10.914	1.595	7.678

9.2.5. B Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 2'de incelenmesi

B Blok Binasının düşey yönde Ağır Hasar – 2'de incelenmesi sonucunda elde edilen SYTD gösterimi Şekil 88'de gösterilmiştir. Yapılan incelemede binanın ilk dört modunun binadaki hasar ile uyumlu olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Elde edilen modlar Şekil 89'da gösterilmiştir. Tablo 26 SYTD gösteriminde belirlenen modların özelliklerini göstermektedir.



Şekil 88. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey ivme kayıtlarının SYTD gösterimi



Şekil 89. B Blok Binasının Ağır Hasar – 2 için düşey yönde elde edilen mod şekilleri

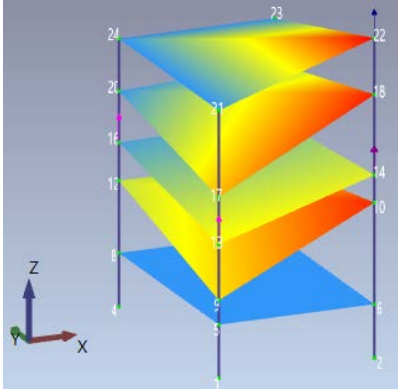
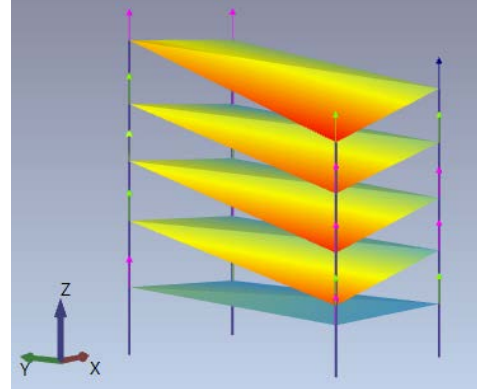
Tablo 26. B Blok Binasının orijinal hali için düşey yönde dinamik özellikler

Frequency [Hz]	Damping [%]	Complexity [%]
2.575	2.535	11.016
3.156	2.004	0.778
10.288	0.877	3.863
11.27	1.117	2.589
11.652	1.161	7.782
13.569	1.404	8.317

9.3. Düşey Yönde alınan ivme kayıtlarının incelemesinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

A ve B Blok Binalarından alınan düşey yöndeki ivme kayıtlarının incelemesi sonucunda Hafif Hasar seviyelerinde binalarda düşey mod oluşmadığı ve Ağır Hasar seviyeleri için

binalarda hasar yerleri ile ilişkili belirgin düşey modların oluştuğu tespit edilmiştir. Binalar için elde edilen hasar ve mod şekilleri karşılaştırması Şekil 90'da yapılmıştır.

Açıklama	B Blok Binası	A Blok Binası
Binaların ilk durumu		
Ağır Hasar verilmiş kolonlar		
Ağır Hasar verilen kolonların detayları		
Ağır Hasarlı binaların düşey yönlü mod şekilleri		

Şekil 90. A ve B Blok Binalarında Ağır Hasarlara bağlı olarak oluşan düşey modlar

10. HASARLARIN LOKAL ÖLÇÜMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Projede incelenen binaların birinci katında Kinometrics TSA–SMA ivmeölçerlerinin konumlandırıldığı belirtilmiştir. Şekil 91 kullanılan ivmeölçerleri göstermektedir. Bu bölümde bu ivmeölçerlerden alınan kayıtların analizleri açıklanmıştır. İvmeölçerler her bir hasar seviyesinde kayıt almaları için ayarlanmıştır. Saniyede 200 okuma alacak şekilde ivme kayıtları alınmıştır. Alınan kayıtların analizi FFT dönüşümleri ile yapılmıştır. İvmeölçerler binanın sadece hasar verilen bölümlerinden kayıt aldığı için mod şekilleri bu cihazlarla elde edilemez. Bu nedenle FOA veya GFOA metodlarının kullanılmasına gerek yoktur.

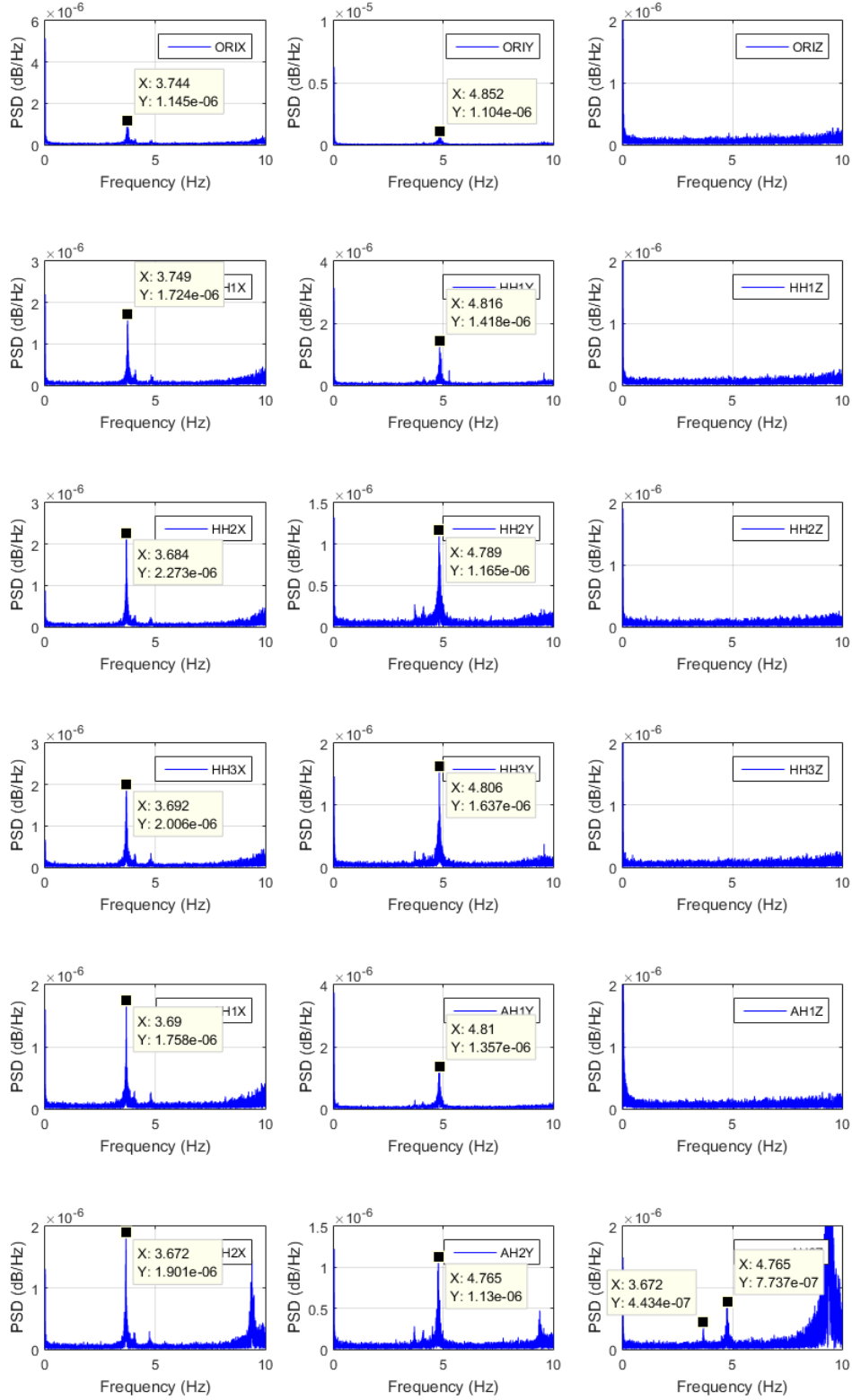


Şekil 91. Hasarlı bölgelere yerleştirilen ivmeölçerler

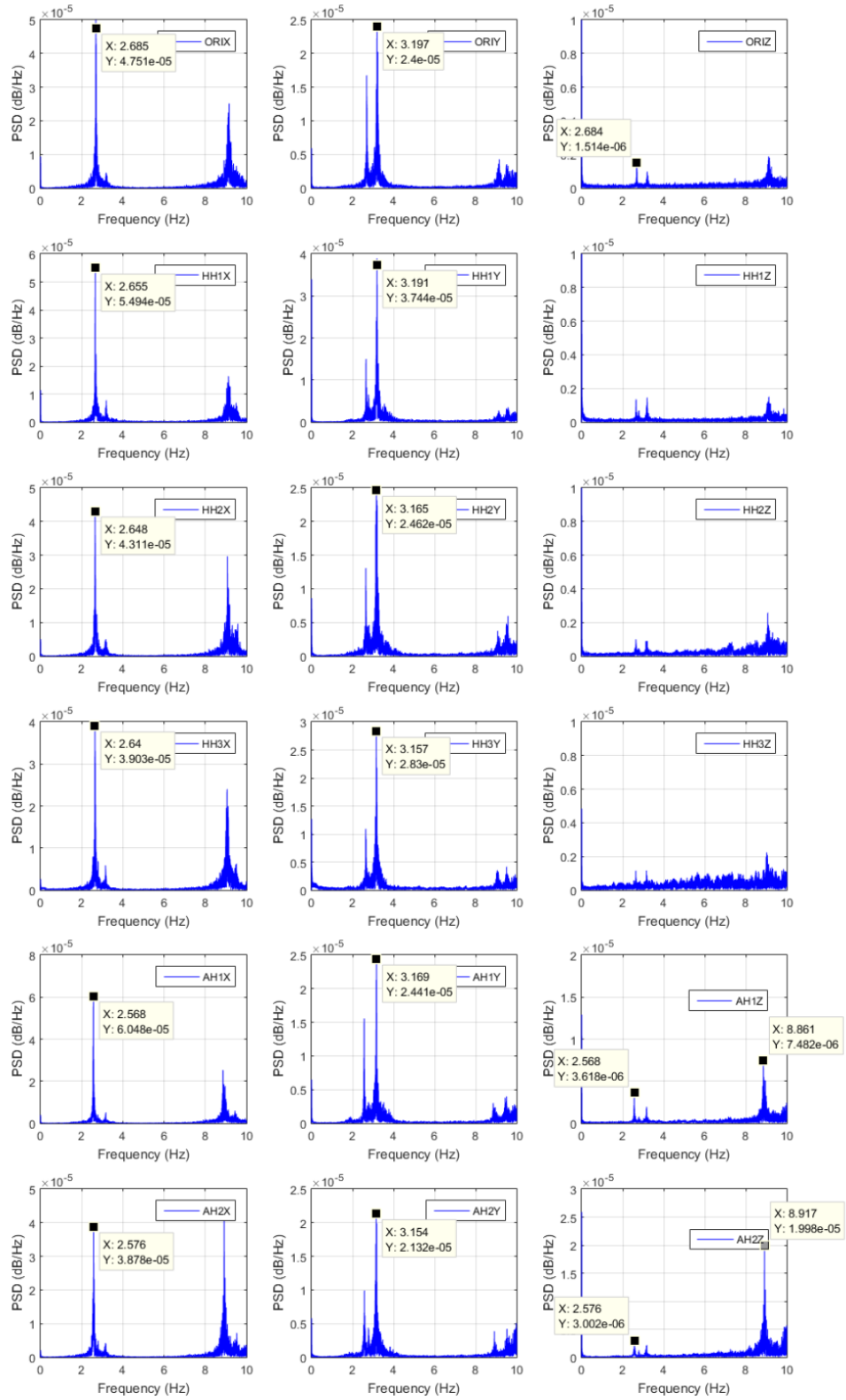
Şekil 92, A Blok Binasının köşe noktasına yerleştirilen ivmeölçerin farklı hasar seviyeleri için X, Y ve Z yönlerinde kaydettiği titreşimlerin FFT'lerini göstermektedir. Belirtilen cihaz Şekil 39'da TS1 ile gösterilen ivmeölçerdir. TS2 ve TS3'den elde edilen sonuçlarda benzerdir. Şekilde binanın orijinal hali ORI, farklı hasar seviyeleri hafif hasarlar HH, ağır hasarlar AH kısaltmalarıyla gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre binanın 3,744 Hz olan ilk mod frekansı hasarların etkiyle 3,672 Hz'e inmektedir. Y yönündeki frekansı 4,85 Hz'den 4.765 Hz' inmektedir. Son olarak binada Ağır Hasar – 2'de düşey modların olduğu görülmektedir.

Şekil 93, B Blok Binası için TS1 ivmeölçerinden alınan ivme kayıtlarının farklı hasar seviyeleri için FFT analizlerini göstermektedir. Sonuçlara göre 2,685 Hz olan ilk baskın mod frekansı hasarlarla beraber 2,576 Hz'e inmektedir. Bina'nın Y yönündeki modunun frekansı ise 3,197 Hz'den 3,154 Hz'e inmiştir. Hasar seviyeleri ağırlaşırken frekans artışlarına da rastlanmıştır. Hasar seviyelerinin yükselmesiyle beraber düşey modların güçlerinde artışlar görülmektedir.

Sonuç olarak binaların hasarlı bölgelerinden alınan ölçümlerden elde edilen sonuçların, tam dinamik tanımlama yöntemiyle elde edilen sonuçlarla örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 92. A Blok 1. Kat Köşe noktasından alınan ölçümlerin FFT gösterimleri



Şekil 93. B Blok 1. Kat Köşe noktasından alınan ölçümlerin FFT gösterimleri

11. BİNALARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL ANALİZLERLE BELİRLENMESİ

Proje kapsamında incelenen A ve B Blok Binalarının sayısal modelleri SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle hazırlanmıştır. Eigen Value analiz ile binaların dinamik özellikleri belirlenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

11.1. Sayısal modellerin hazırlanması

Proje kapsamında incelenen A ve B Blok Binaları birbirinin simetriği olan iki binadır. Başka bir deyişle binaların tüm geometrik özellikleri birbiriyle aynıdır. Sadece daire sahipleri tarafından yapılan balkon genişletme, balkonu odaya katma ve balkonu duvarla çevirme gibi değişiklikler görülmüştür. Bu nedenle binalar için bir model hazırlanmış ve bahsedilen değişiklikler her bir bina için modele yansıtılmıştır. Ayrıca binalarda gerçekleştirilen malzeme çalışmalarının sonuçları iki bina için farklılıklar göstermektedir.

SAP2000 programında kolon ve kirişler çubuk eleman, döşeme ve duvar ise kabuk elemanlar olarak modellenmiştir. Binalar temel seviyesinde ankastre mesnetli olarak kabul edilmiştir. Gerçekten de daha önce yapılan dinamik testler sonucunda zemine konulan ivmeölçerlerden herhangi bir baskın frekans elde edilmemiştir.

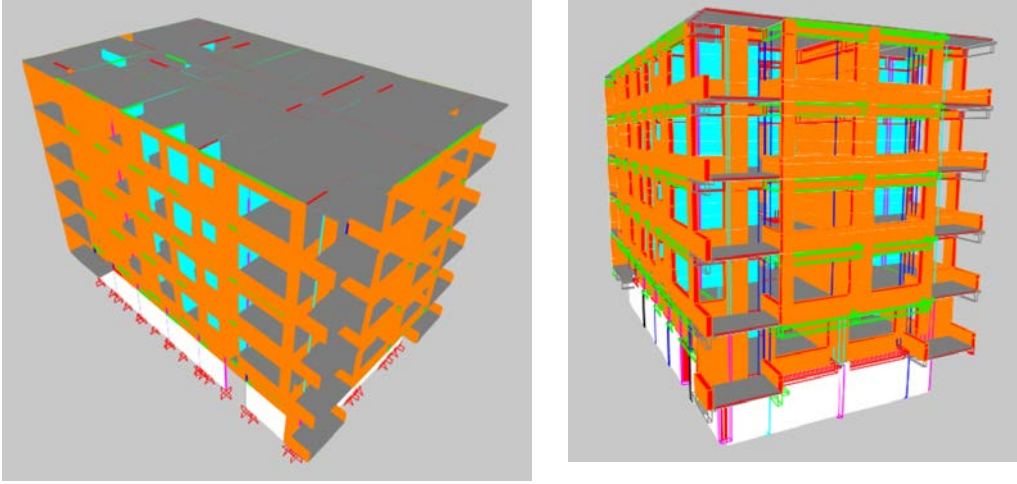
Betonarme malzemenin elastisite modülü binalardan alınan karot numuneleri sonucunda elde edilen beton basınç mukavemetine göre belirlenmiştir. Dinamik özellikleri belirlemeye yönelik olarak karot numunelerinin ortalaması binaların beton basınç dayanımı olarak alınmış ve TS500'de bulunan Denklem 1 yardımıyla beton elastisite modülü hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda A Blok Binasının ortalama beton basınç mukavemeti 16.11 MPa, B Blok Binasının ortalama beton basınç mukavemeti 15.10 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak A Blok Binasının beton elastisite modülü 27000 MPa, B Blok Binasının ortalama beton elastisite modülü 26600 MPa olarak belirlenmiştir.

$$E_c = 3250\sqrt{f_c} + 14000 \quad (3)$$

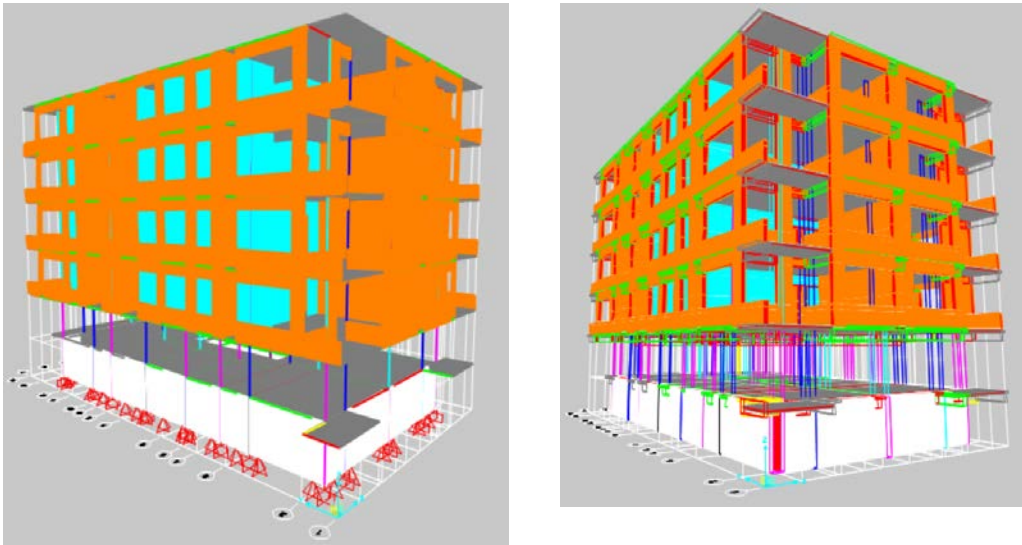
Yapıda bulunan bölme duvarlar ve mekanik özellikler de önemlidir. Yapıların iç ve dış bölme duvarlarının farklı kalınlıkta tuğlalardan yapıldığı görülmüştür. Bu nedenle yapı sayısal modellerinde bu farklılık göz önüne alınmıştır. Bölme duvarların mekanik özellikleri daha önce tamamlanan 214M235 numaralı projede incelenen bina gerçekleştirilen deneylere dayanarak alınmıştır. Bu projede yine İstanbul'da bulunan 6 katlı bir binadan duvar birim

hacim ağırlığı 9.45 kN/m^3 ve elastisite modülü 3400 MPa olarak belirlenmişti. Bu bina ve şimdiki binalarda kullanılan tuğla ve örme tekniğinin aynı olması ve binaların aynı dönemde inşa edilmeleri nedeniyle bölme duvar özellikleri doğrudan kullanılmıştır.

Belirtilen kurallar çerçevesinde binaların sayısal modelleri oluşturulmuştur. B Blok Binası için oluşturulan bina modelinden zemin kat bölme duvarları silinerek zemin katında bölme duvarları olmayan bina elde edilmiştir. Elde edilen bina modelleri A Blok Binası için Şekil 94'te, B Blok Binası için Şekil 95'te gösterilmiştir.



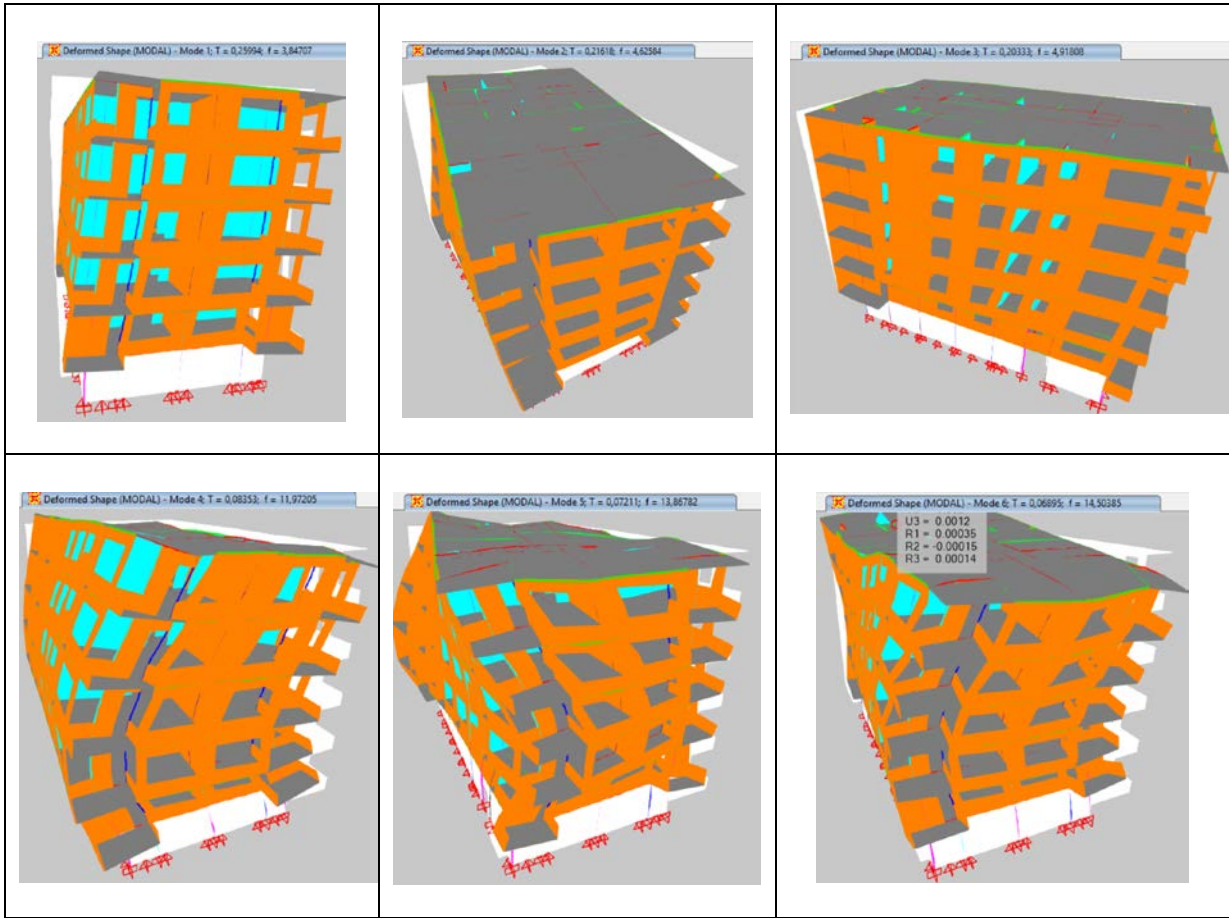
Şekil 94. A Blok Binası için hazırlanan sayısal model



Şekil 95. B Blok Binası için hazırlanan sayısal model

11.2. A Blok Binası sayısal dinamik analizleri

A Blok Binası için yapılan sayısal analizler sonucunda binanın dinamik özellikleri elde edilmiş ve elde edilen mod şekilleri Şekil 96'da gösterilmiştir. Buna göre binanın birinci mod şekli, X yönünde 3.85 Hz'lik frekansla hareketi göstermektedir. İkinci mod burulma modudur ve frekans değeri 4.62 Hz'dir. Üçüncü mod 4.92 Hz ile Y yönündeki harekettir. Dördüncü ve üst modlar 10 Hz'in üzerinde gerçekleşmiştir ve binanın iki eğrilikli karmaşık modlarını temsil etmektedir.



Şekil 96. A Blok Binasının sayısal olarak elde edilen ilk altı dinamik mod şekli

Elde edilen sayısal mod şekillerinin dinamik analiz sonucunda elde edilen deneysel mod şekilleri ile karşılaştırılmasıyla iki yöntem sonuçlarının birbirine benzediği sonucu ortaya çıkmaktadır. Deneysel analizler sonucundan binanın ilk modu ön bina tarafının X yönünde hareket, ikinci modu bina arka tarafının X yönünde hareketi, üçüncü mod ise binanın Y yönünde hareketiydi. Deneysel sonuçlarla bu modlar tanımlanırken hepsinde burulma davranışı olduğu da belirtilmişti. Deneysel olarak elde edilen ilk iki modun sayısal olarak elde edilen ilk iki moda karşı geldiği, üçüncü modların da birbirinin aynı olduğu

değerlendirmesini yapmak mümkündür. Bu nedenle sayısal modelin deneysel sonuçları destekleyecek doğrulukta olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca her iki yöntemde de dördüncü ve üst sayılı modlar 10 Hz'in ötesinde belirlenmiştir.

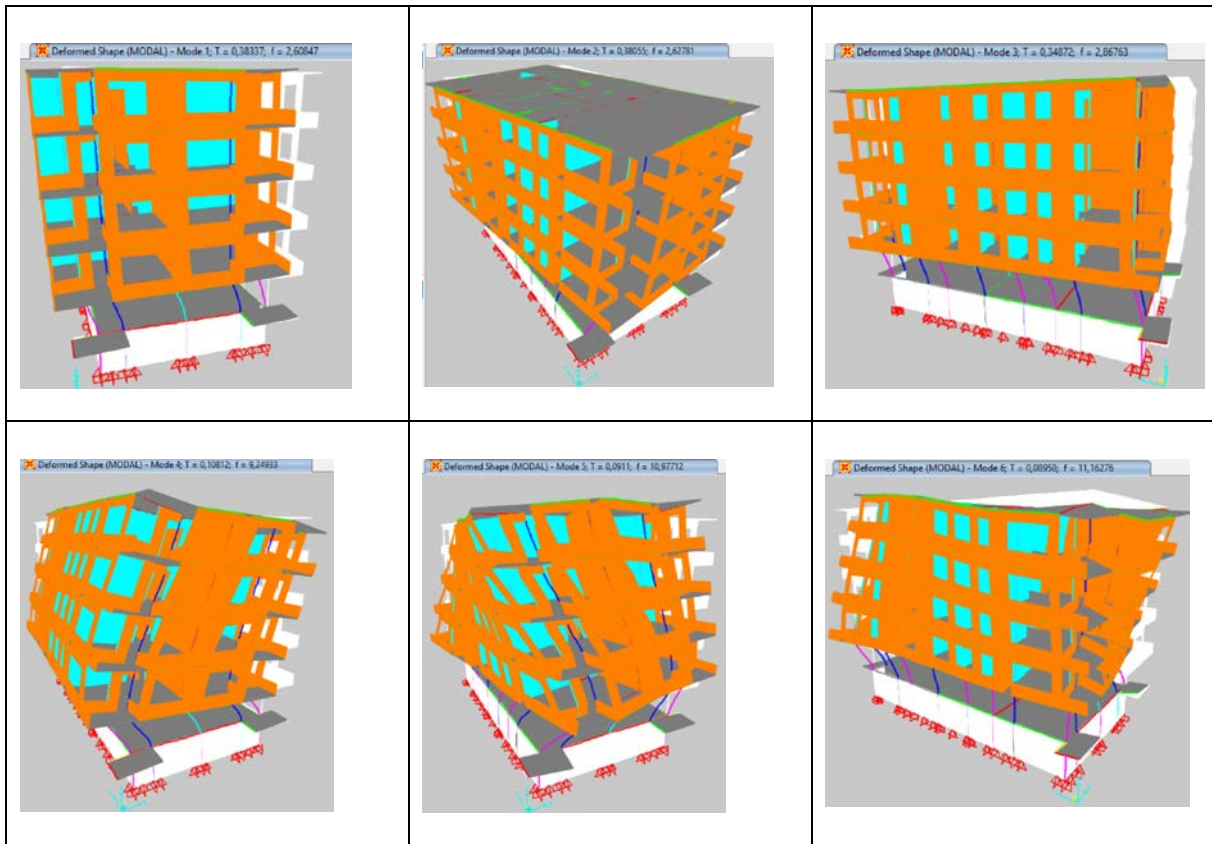
Modal frekanslar arasındaki ufak farklılıklar sayısal modelde kullanılan beton elastisite modülü ile ilişkilidir ve çalışmada model ayarlaması yapılırken uygun elastisite modülü seçimiyle fark en aza indirilecektir. Model ayarlama işlemi B Blok Binasının değerlendirilmesinde sonra yapılacaktır. Çünkü B Blok Binasının dinamik özellikleri ağırlıklı olarak beton malzemeye bağımlıyken, A Blok Binasında beton ve yığma duvarlar benzer öneme sahiptir. A Blok Binasının sayısal dinamik analizler sonucunda belirlenen dinamik parametreleri Tablo 27'de gösterilmiştir.

Tablo 27. A Blok Binasının sayısal olarak elde edilen dinamik özellikleri

Mod	Frekans	Periyod	Kütle Katılımları			Toplam Kütle Katılımları		
Numarası	Hz	San	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
1	3,847	0,260	0,747	0,000	0,000	0,747	0,000	0,000
2	4,626	0,216	0,012	0,114	0,000	0,759	0,114	0,000
3	4,918	0,203	0,005	0,657	0,000	0,764	0,772	0,000
4	11,972	0,084	0,149	0,000	0,001	0,913	0,772	0,001
5	13,868	0,072	0,007	0,017	0,000	0,920	0,789	0,001
6	14,504	0,069	0,001	0,113	0,000	0,920	0,902	0,001
7	17,363	0,058	0,000	0,000	0,835	0,920	0,902	0,836
8	18,391	0,054	0,000	0,000	0,001	0,920	0,902	0,837
9	19,246	0,052	0,000	0,003	0,003	0,921	0,905	0,840
10	19,884	0,050	0,002	0,001	0,009	0,922	0,905	0,849
11	20,117	0,050	0,000	0,000	0,000	0,923	0,906	0,850
12	20,215	0,049	0,000	0,001	0,009	0,923	0,906	0,859
13	20,305	0,049	0,000	0,000	0,000	0,923	0,906	0,859
14	20,357	0,049	0,000	0,000	0,000	0,923	0,906	0,859
15	20,374	0,049	0,001	0,000	0,001	0,924	0,907	0,860
16	20,377	0,049	0,000	0,000	0,000	0,924	0,907	0,860
17	21,083	0,047	0,000	0,001	0,000	0,925	0,907	0,860
18	21,129	0,047	0,000	0,000	0,000	0,925	0,907	0,860

11.3. B Blok Binası sayısal dinamik analizleri

B Blok Binası için yapılan sayısal analizler sonucunda binanın dinamik özellikleri elde edilmiş ve elde edilen mod şekilleri Şekil 97’de gösterilmiştir. Buna göre binanın birinci mod şekli, X yönünde 2.61 Hz’lik frekansla hareketi göstermektedir. İkinci mod burulma modudur ve frekans değeri 2.63 Hz’dir. Üçüncü mod 2.87 Hz ile Y yönündeki harekettir. Dördüncü mod 9,24 Hz’lik frekansla binanın X yönünde çift eğrilikli hareketini göstermektedir. Beşinci ve üst modlar 10 Hz’in üzerinde gerçekleşmiştir ve binanın karmaşık modlarını temsil etmektedir.



Şekil 97. B Blok Binasının sayısal olarak elde edilen ilk altı dinamik mod şekli

Elde edilen sayısal mod şekillerinin dinamik analiz sonucunda elde edilen deneysel mod şekilleri ile karşılaştırılmasıyla iki yöntem sonuçlarının birbirine benzediği sonucu ortaya çıkmaktadır. Deneysel analizler sonucundan binanın ilk modu ön bina tarafının X yönünde hareket, ikinci modu bina arka tarafının X yönünde hareketi, üçüncü mod ise binanın Y yönünde hareketiydi. Deneysel sonuçlarla bu modlar tanımlanırken hepsinde burulma davranışı olduğu da belirtilmişti. Deneysel olarak elde edilen ilk iki modun sayısal olarak elde edilen ilk iki moda karşı geldiği, üçüncü modların da birbirinin aynı olduğu değerlendirmesini yapmak mümkündür. Bu nedenle sayısal modelin deneysel sonuçları

destekleyecek doğrulukta olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca deneysel analizlerde olduğu gibi sayısal analizlerde de dördüncü 10 Hz'in altında gerçekleşirken, beşinci ve üst sayılı modlar 10 Hz'in ötesinde belirlenmiştir.

Modal frekanslar arasındaki ufak farklılıklar sayısal modelde kullanılan beton elastisite modülü ile ilişkilidir ve çalışmada model ayarlaması yapılırken uygun elastisite modülü seçimiyle fark en aza indirilecektir. B Blok Binasının sayısal dinamik analizler sonucunda belirlenen dinamik parametreleri Tablo 28'de gösterilmiştir.

Table 28. B Blok Binasının sayısal olarak elde edilen dinamik özellikleri

StepNu m	Frequen cy	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Unitless	Hz	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	2,608	0,383	0,830	0,000	0,000	0,830	0,000	0,000
2	2,628	0,381	0,001	0,048	0,000	0,831	0,049	0,000
3	2,867	0,349	0,001	0,790	0,000	0,832	0,839	0,000
4	9,244	0,108	0,034	0,000	0,000	0,866	0,839	0,000
5	10,975	0,091	0,000	0,006	0,000	0,866	0,845	0,000
6	11,160	0,090	0,000	0,011	0,000	0,866	0,856	0,001
7	14,919	0,067	0,000	0,000	0,007	0,866	0,856	0,008
8	15,549	0,064	0,000	0,000	0,008	0,866	0,856	0,016
9	16,005	0,062	0,000	0,000	0,829	0,866	0,856	0,845
10	18,606	0,054	0,000	0,000	0,000	0,866	0,856	0,845
11	18,873	0,053	0,001	0,000	0,001	0,866	0,856	0,845
12	19,189	0,052	0,000	0,000	0,001	0,867	0,856	0,847
13	19,550	0,051	0,000	0,000	0,000	0,867	0,856	0,847
14	19,757	0,051	0,000	0,000	0,007	0,867	0,856	0,853
15	20,112	0,050	0,000	0,000	0,000	0,867	0,856	0,853
16	20,182	0,050	0,000	0,000	0,001	0,867	0,856	0,854
17	20,200	0,050	0,000	0,000	0,000	0,867	0,856	0,854
18	20,226	0,049	0,000	0,000	0,000	0,867	0,856	0,854

11.4. Sayısal ve Deneysel Yollarla Elde Edilen Dinamik Özelliklerin Karşılaştırılması

Proje kapsamında yürütülen her iki bina için dinamik özellikler deneysel ve sayısal yollarla elde edilmiştir. Bu bölümde elde edilen özellikler karşılaştırılarak benzeşimleri değerlendirilecektir.

11.4.1. A Blok Binası için sayısal ve deneysel yollarla elde edilen dinamik özelliklerin karşılaştırılması

A Blok Binasının sayısal ve deneysel yollarla elde edilen dinamik özellikleri Tablo 29'da gösterilmiştir. Görüleceği gibi deneysel analizler ilk modu binanın ön yüzünün X yönündeki hareketi, ikinci modu binanın arka yüzünün X yönündeki hareketi, binanın üçüncü modunu ise binanın Y yönündeki hareketi olarak vermektedir. Diğer taraftan sayısal analizler birinci modu binanın X yönündeki hareketi, ikinci modu burulma modu, üçüncü modu ise binanın Y yönündeki hareketi olarak vermektedir.

Mod şekillerinin karşılaştırılması göstermektedir ki, binanın Y yönündeki modu tam olarak ortaya çıkarılmışken X yönündeki mod deneysel analizlerde iki ayrı mod olarak burulma davranışı ile beraber ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle deneysel analizler binanın X yönündeki modunu iki ardışık mod olarak vermektedir. Bu modlarda burulma davranışı da görülmektedir. Bu nedenle binanın deneysel olarak hesaplanan ilk iki modu aslında tek mod olarak alınabilir ve sayısal analizlerdeki ilk mod ile karşılaştırılabilir.

Sayısal olarak hesaplanan ikinci mod binanın burulma modudur. Kütle katılımı birinci ve üçüncü moda göre düşüktür. Binanın deneysel olarak tespit edilen burulma modu değerlendirmede birleştirilen ilk iki mod içinde göz önüne alındığı için sayısal olarak elde edilen ikinci mod zaten değerlendirilmiş sayılacaktır. Bu modun sayısal analizlerde deneysel analizlerde olduğu gibi birinci mod beraber değerlendirilmelidir. Bu nedenle sayısal ikinci mod ile sayısal birinci modlar da birleştirilmelidir. Birleştirilmiş modun frekans değeri kütle katılım oranlarına bağlı ağırlıklı ortalama ile hesaplanabilir (Aras ve diğ. 2011).

Belirtilen nedenlerle deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre binanın X yönündeki modu burulma da ihtiva etmektedir ve frekansı deneysel olarak elde edilen ilk iki modun frekanslarının ortalaması olarak 3,89 Hz olarak hesaplanmıştır. Binanın sayısal olarak elde edilen ilk iki modu da birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sonucunda bu modun frekansı Aras ve diğ. (2011) tarafından önerilen kütle katılımlarına göre ağırlıklı ortalama dayanan Denklem 2 ile hesaplanmıştır. Denklem 4'te T_a birleştirmiş modun ortalama periyodunu, T_i

ayrık modların periyotlarını, PF_i ise ayrık modların kütle katılımlarını göstermektedir. Periyot tabanında verilen Denklem 4, frekans tabanında da aynı şekilde uygulanabilir. Buna göre sayısal olarak elde edilen mod X yönünde ortaya çıkmaktadır ve burulma da ihtiva etmektedir. Bu modun frekansı 3,95 Hz'dir. Bu modun kütle katılımı oranı X yönünde 0,759, Y yönünde ise 0,114 olarak ortaya çıkacaktır.

$$T_a = \left(\frac{T_1 * PF_1 + T_2 * PF_2 + + T_n * PF_n}{PF_1 + PF_2 + + PF_n} \right) \quad (4)$$

Tablo 29. A Blok Binasının elde edilen dinamik modları ve Modal Eşleştirme

	Deneyisel Analiz		Sayısal Analiz		Eşleştirme		
	Tanım	Fre, Hz	Tanım	Fre, Hz	Tanım	Deneyisel Fre, Hz	Sayısal Fre, Hz
1	X, T – Ön	3.762	X	3,847	X, T	3,89	3,95
2	X, T – Arka	4.019	T	4.626			
3	Y	4.818	Y	4.918	Y	4,82	4,92

11.4.2. B Blok Binası için sayısal ve deneyisel yollarla elde edilen dinamik özelliklerin karşılaştırılması

A Blok Binasının deneyisel ve sayısal yollarla elde edilen dinamik özellikleri için yapılan değerlendirmeler aynı şekilde B Blok Binası için de geçerlidir. Bu nedenle yapılan dinamik özelliklerin karşılaştırılması bir önceki başlıkta açıklanan temeller üzerine gerçekleşmiştir. Tablo 30 B Blok Binası için deneyisel ve sayısal yolla elde edilen dinamik özellikleri ve Modal Eşleştirmeyi göstermektedir.

Tablo 30. B Blok Binasının elde edilen dinamik modları ve Modal Eşleştirme

	Deneysel Analiz		Sayısal Analiz		Eşleştirme		
	Tanım	Fre, Hz	Tanım	Fre, Hz	Tanım	Deneysel Fre, Hz	Sayısal Fre, Hz
1	X, T – Ön	2.687	X	2,608	X, T	2,74	2,61
2	X, T – Arka	2.797	T	2,628			
3	Y	3.206	Y	2,867	Y	3,21	2,87

A ve B Blok Binaları için elde edilen sonuçlar değerlendirildiği zaman deneysel ve sayısal analizler sonucunda elde edilen değerler arasındaki yakınlık dikkat çekmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçların tutarlılığının değerlendirilmesi için frekans farkları yüzde olarak Denklem 5 ile değerlendirilebilir.

$$\delta_i = \frac{f_i^E - f_i^N}{f_i^E} \quad (5)$$

Denklem 3'te δ her bir mod için deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki frekans farkını, f_i^E deneysel olarak elde edilen frekans değerini, f_i^N sayısal olarak elde edilen frekans değerini göstermektedir. A Blok Binasının X ve Y yönlerindeki davranışı için δ değerleri 0,015 ve 0,02 olarak hesaplanmıştır. B Blok Binasının için değerler 0,05 ve 0,10 olarak hesaplanmıştır. A Blok Binasının dinamik özellikleri %2'lik bir fark ile tahmin edilmişken, B Blok Binasında farklar X yönü için %5, Y yönü için ise %10'a çıkmaktadır.

Yürütülen projenin asıl amacı betonarme yapılarda hasar etkilerinin bina dinamik özelliklerine olan etkisinin incelenmesi olduğu için ve farklar kabul edilebilir seviyede olduğu için bu farkları azaltmaya yönelik bir çalışma bu rapor kapsamında yapılmayacaktır. Ancak her iki bina için model ayarlaması konusunda bilimsel dergilerde makale hazırlanması planlanmıştır.

11.5. Hasar etkilerinin sayısal olarak irdelenmesi

Bu bölümde proje kapsamında çalışılan binalara deneysel olarak verilen hasarlar, sayısal modellere yansıtılarak, yapı dinamik özellikleri üzerinde neden oldukları değişimler incelenecektir. Proje kapsamında yapı elemanlarına verilen hasarlar sadece verildikleri yapı elemanının özellikleri üzerinde etkilidir. Bir başka deyişle verilen hasarlar başka elemanlar üzerinde etkili değildir. Bu nedenle çalışılan yapıların hasarlı durumları incelenirken sonlu eleman modelleri üzerinde sadece hasarlı elemanların özellikleri değiştirilecektir.

Hasar etkileri sonlu elemanlar modeline iki şekilde göz önüne alınacaktır. Hafif Hasar olarak tanımlanan hasar elemanlarda pas payı dökülmesine neden olan hasar olarak tanımlanmıştır. Öte yandan Ağır Hasar yapı elemanının çekirdek betonu çatlamasının ötesinde kırılıp etkisizleşene kadar hasar verilmesi olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda Hafif Hasar durumu için yapı elemanlarının kesit özelliklerinin azalma miktarı (oransal olarak) belirlenerek sonlu elemanlar modeline azaltma olarak girilecektir. Ağır Hasar durum için ise bu hasarı alan yapı elemanları yok sayılacaktır.

Hafif Hasar – 1 durumunda hasar gören 50*25 cm²'lik köşe kolonun boyutu 44*19 cm²'ye düşmüştür. Kolon alanındaki küçülme oranı $(19*44)/(25*50) = 0,67$ olarak hesaplanmıştır. Atalet momentlerindeki azalma oranları $19*44^3/25*50^3 = 0,52$ ve $44*19^3/50*25^3 = 0,39$ olarak hesaplanmıştır.

Hafif Hasar – 1 durumunda hasar gören 25*60 cm²'lik köşe kolonun boyutu 19*54 cm²'ye düşmüştür. Kolon alanındaki küçülme oranı $(19*54)/(25*60) = 0,68$ olarak hesaplanmıştır. Atalet momentlerindeki azalma oranları $19*54^3/25*60^3 = 0,55$ ve $54*19^3/60*25^3 = 0,40$ olarak hesaplanmıştır.

Hafif Hasar – 2 durumunda hasar gören 25*80 cm²'lik köşe kolonun boyutu 19*74 cm²'ye düşmüştür. Kolon alanındaki küçülme oranı $(19*74)/(25*80) = 0,70$ olarak hesaplanmıştır. Atalet momentlerindeki azalma oranları $19*74^3/25*80^3 = 0,60$ ve $74*19^3/80*25^3 = 0,41$ olarak hesaplanmıştır.

Hafif Hasar – 3 durumunda hasar gören ve hasarlı kolonları birleştiren kiriş 80 cm tabla genişliğine, 10 cm tabla yüksekliğine (döşeme yüksekliği), 50 cm kiriş yüksekliğine ve 25 cm kiriş genişliğine sahipti. Bu yapı elemanının alanı 1800 cm² ve atalet momenti 417800 cm⁴ olarak hesaplanmıştır. Yapı elemanı hasar gördükten sonra gövdesini tamamen kaybettiği

varsayılmıştır. Çünkü hasar durumunda elemana uygulanan darbeler neticesinde giriş gövdesi delinmiştir. Bu nedenle hasarlı elemanın yeni boyutu tabla olarak göz önüne alınmıştır. Bu durumda yapı elemanın alanındaki küçülme $80 \cdot 10 / 1800 = 0,44$, atalet momentindeki küçülme oranı $80 \cdot 10^3 / 12 / 417800 = 0,02$ olarak hesaplanmıştır.

Ağır Hasar durumlarında bu hasarı alan elemanlar yok sayılmıştır.

Belirtilen prensipler altında A Blok Binası ve B Blok Binası sayısal modelleri hasar seviyelerini ihtiva edecek şekilde düzenlenmiş ve binaların dinamik özellikleri elde edilmiştir. Mod şekillerinde hasar kaynaklı değişiklik gözlemlenmemiştir. Buna karşın her hasar seviyesi için modal frekanslarda küçük değişimler tespit edilmiştir. Sonuçlar her A Blok Binası için Tablo 31’de, B Blok Binası için Tablo 32’de gösterilmiştir.

Tablo 31. A Blok Binası için farklı hasar seviyelerinde sayısal analizlerden elde edilen frekanslar

Hasar Durumu	Frekans, Hz, Sayısal Analizler				Frekans, Hz, Deneysel Analizler		
	Mod 1	Mod 2	Mod 3		Mod 1	Mod 2	Mod 3
Orijinal	3.847	4.626	4.918		3.762	4.019	4.818
Hafif Hasar – 1	3.844	4.622	4.916		3.744	4.092	4.818
Hafif Hasar – 2	3.842	4.62	4.908		3.672	4.063	4.801
Hafif Hasar – 3	3.84	4.617	4.908		3.691	4.093	4.805
Ağır Hasar – 1	3.831	4.609	4.894		3.663	4.049	4.793
Ağır Hasar – 2	3.828	4.596	4.851		3.651	4.065	4.755

Tablo 32. B Blok Binası için farklı hasar seviyelerinde sayısal analizlerden elde edilen frekanslar

Hasar Durumu	Frekans, Hz, Sayısal Analizler				Frekans, Hz, Deneysel Analizler		
	Mod 1	Mod 2	Mod 3		Mod 1	Mod 2	Mod 3
Orijinal	2.608	2.628	2.867		2.687	2.797	3.206
Hafif Hasar – 1	2.55	2.614	2.844		2.676	2.793	3.184
Hafif Hasar – 2	2.518	2.613	2.817		2.659	2.793	3.187
Hafif Hasar – 3	2.517	2.613	2.817		2.656	2.793	3.164
Ağır Hasar – 1	2.419	2.608	2.769		2.576	2.787	3.165
Ağır Hasar – 2	2.39	2.607	2.664		2.576	2.789	3.154

Görüldüğü gibi sayısal analizler sonucunda elde edilen frekans değişimleri de deneysel analizler sonucunda elde edilen değerlere benzer olarak küçük mertebededir. Öte yandan sayısal analizlerde hasar artışına bağlı olarak her mod için bir frekans azalması varken deneysel analizlerde artan hasar karşısında artan (A Blok Binasının ikinci modu) veya değişmeyen (B Blok Binasının birinci modu için Ağır Hasar 1 ve Ağır Hasar – 2) frekans değerleri görülmektedir. Buna göre teorik olarak olması beklenen frekans değişimlerinin sınırlı hasarlar için binanın genel davranışını gösteren ilk dinamik modlarda görülemeyebileceği sonucu çıkarılabilir.

12. TİTREŞİM ANALİZLERİ İLE HASAR BELİRLEME ÇALIŞMASI

Yapı güvenliği ve bütünlüğünün sağlanması çok önemli bir konu olduğu için yapıların izlenmesi ve hasar tespiti konularına oldukça önem verilmiş ve bu konuda farklı tekniklerle yeni metodlar geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda ultrasonik, radyografik ve termografik yöntemlerde kullanılmaktadır (Drinkwater ve Wilcox 2006, Kolkoori vd. 2014, Bull vd. 2013, 2014, Maier vd. 2014, Theodorakeas vd. 2015). Bunların dışında, bu projenin de konusu olan titreşime bağlı hasar belirleme yöntemleri daha yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu doğrultuda literatür taraması bölümünde verilen önemli kaynaklar çoğaltılabilir (Das vd. 2016, Fan ve Qiao 2010, Yan vd. 2007, Farrar ve Worden 2010). Belirtilen çalışmalarda farklı hasar belirleme indisleri tanımlanmaktadır ve bu indisler genellikle çalışılan yapının rijitliği, mod şekilleri, modal güvence kriterleri veya mod koordinatı güvence kriterleri, baskın frekansları veya sönüm oranlarına bağlı olmaktadır (Radzienski 2011, Weng 2013, Na ve Lee 2012, Kim ve Ryu 2003, Farrar, C.R. Jauregui 1998, Lee ve Chung 2000, Viola vd. 2001, Shi vd. 1998, Duffey vd. 2001 Sohn ve Law 2000). Ayrıca rastgele altalan tanımlama yöntemleri ve istatistiksel model filtreleme yöntemleri zaman tanım alanında geliştirilen yöntemler olarak dikkat çekmektedir (Abdelghani vd. 1997, Basseville 1997, 2003, El-OuafiBahlous 2007).

Yapılan çalışmalar sonucunda frekans ortamında elde edilen sonuçlar daha önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bölüm 9'da özetlenen bilgilerde farklı hasar seviyeleri bina baskın frekanslarında azalmalar ortaya çıkarmaktadır. Belirlenen azalmalar hasar yerinin aktif olduğu dinamik modda daha belirgin ortaya çıkmaktadır. Hatırlanacağı üzere yapısal hasarlar binaların ön yüzüne verilmişti ve hasar seviyelerinin binanın ön yüzünün hareketi olarak tanımlanan birinci modda bina baskın frekanslarında belirgin değişimler meydana getirmiş durumdadır. Öte yandan binanın arka yüz hareketi olan ikinci moda bina ön yüzüne verilen hasarların frekans artışına neden olduğu görülmektedir. Son olarak binanın Y yönünde hareketi olan binanın üçüncü moduna verilen hasarların bina birinci moduna göre etkisi daha az olarak saptanmıştır. Bu sonuçlar göstermektedir ki, binalardaki lokal hasarlar binaların ilgili lokasyonun etkili olduğu mod için değişimlere neden olmaktadır. Hasar lokasyonundan başka yerlerin hareketini gösteren dinamik modların incelenmesi ile hasarla ilgili çıkarımlar yapmak pek mümkün görünmemektedir.

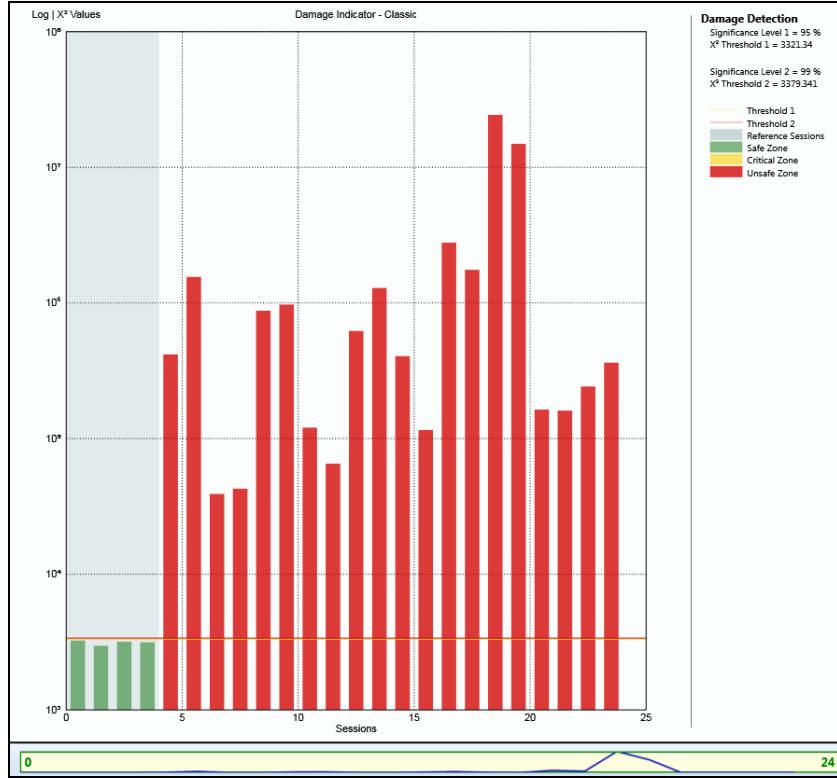
Binalardan alınan düşey ivme kayıtlarının frekans ortamında incelenmesi ile de yapının ağır hasarlı kolonlarının olması durumunda, kolonların olduğu köşelerde düşey modların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durumda hasar etkilerinin ve yerinin tamamen belirlenebildiği

açıktır. Hatta yapının hasarsız halinin dinamik ölçümlerinin elde olmaması halinde bile hasarın sadece dinamik ölçümlerle belirlenebileceği görülmektedir. Bu nedenle hasarlı yapılarda yapılacak dinamik ölçümler sonucunda elde edilecek beklenmedik modların hasarı göstereceği sonucuna varılabilir.

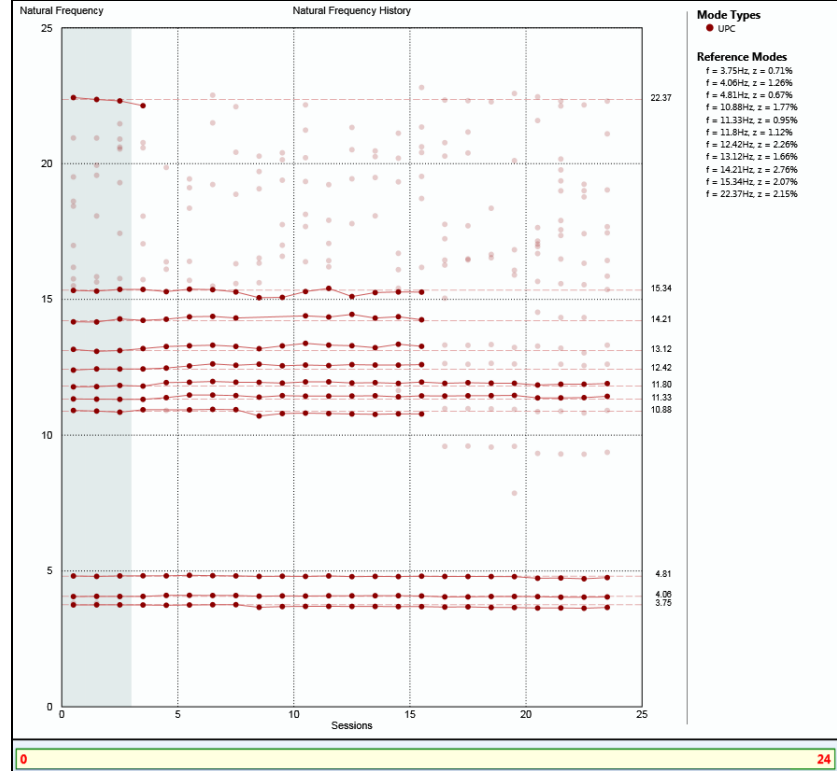
Bu proje kapsamında elde edilen ölçümler ayrıca ARTEMİS Modal yazılımının hasar belirleme özelliği kullanılarak da incelenmiştir. Yazılımın hasar belirleme modülü zaman tanım alanı için geliştirilmiş rastgele altalan tanımlama (Stochastic Subspace Identification, SSI) yöntemine dayanmaktadır. Yapının hasarsız durumundan alınan ölçümlerden elde edilen Gözlemlenebilirlik Matrislerini (Observability Matrix) yapının hasarlı durumlarından alınan ölçümlerden elde edilenlerle karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

Proje kapsamında farklı hasar durumları için yapılardan alınan titreşim kayıtları A Blok için dört, B Blok için üç parçaya bölünerek sayıca fazlalaştırılmıştır. Bu sayede hem referans hem de hasar durumları için birden fazla kayda sahip olunmuştur. Bu şekilde elde edilen ölçümler ARTEMİS Modal yazılımı ile işlenmiştir. Şekil 98 A Blok Binasından alınan dört adet referans ölçümünün ve 20 adet binanın hasarlı durumundan alınan ölçümlerin işlenmesi ile oluşturulmuştur. Hasar indeksi yapının hasarsız durumundan alınan ölçümlerle tanımlanmakta ve ilave ölçümlerden bulunan değerler değerlendirilmektedir. Şekil 97 açıkça göstermektedir ki, binanın hasarlı durumdan alınan ölçümlerden hasar tespit edilebilmektedir. Ancak sıralı olarak görülen hasar durumlarının (Hafif Hasar – 1, 2, 3, Ağır Hasar – 1, 2) mertebesinin tahmininde çok başarılı değildir. Artemis yazılımının Modal History özelliği kullanılarak baskın frekansların değişimi de incelenmiştir. Şekil 99, A Blok Binası için baskın frekansların değişimini göstermektedir. Ağır hasarların binaya tatbik edilmesinden sonra dördüncü mod frekanslarının 10 Hz'in altına düştüğü açıkça görülmektedir. Ancak ARTEMİS Modal yazılımı frekans değerlerini bulmasına karşılık 10 Hz'in altına düşen frekansların dördüncü moda ait olduğunu belirleyememiştir. Bu nedenler de, ARTEMİS Modal yazılımının hasar belirleme modülünün çok başarılı olduğu söylenemez.

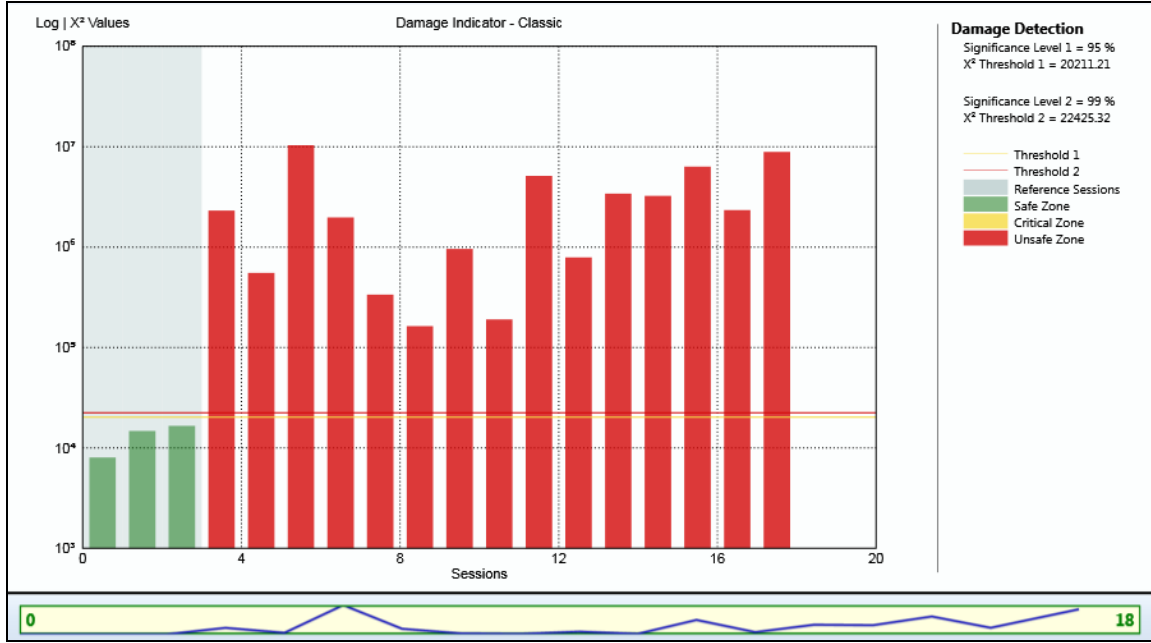
Şekil 100 ve Şekil 101 B Blok Binası için hasar indeksi ve modal frekansların değişimini göstermektedir. A Blok Binası için yapılan yorumların hepsi B Blok Binası için de geçerlidir.



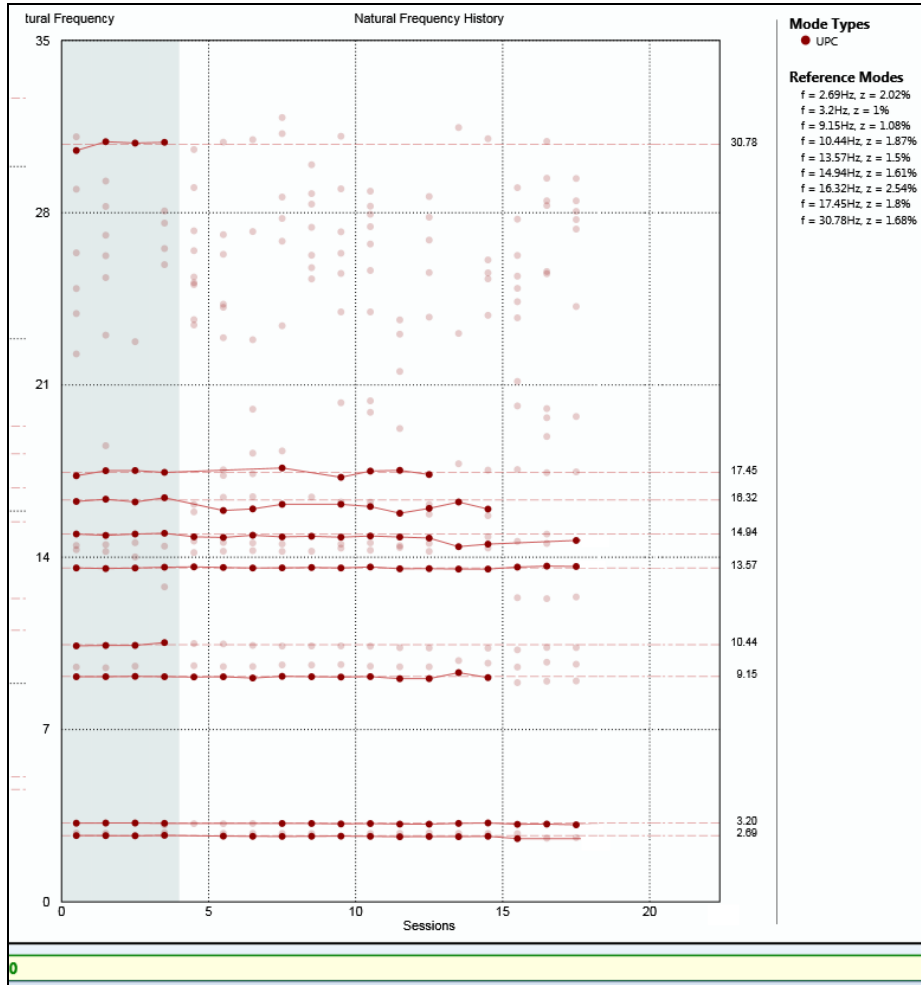
Şekil 98. A Blok Binası için hasar indeksinin değişim



Şekil 99. A Blok Binası için modal frekansların değişimi



Şekil 100. B Blok Binası için hasar indeksinin değişimi



Şekil 101. B Blok Binası için modal frekansların değişimi

Literatürde rastlanan hasar tespiti için önerilen yaklaşımlar betonarme binalar dışında, daha basit yapıya sahip kirişler, köprüler ve laboratuvarlarda inşa edilmiş ölçekli modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Döhler vd. (2014) Avusturya'da bulunan bir köprüye iki aşamalı hasar vermiş ve titreşim analizleriyle hasarın varlığını SSI yöntemleriyle belirlemeye çalışmıştır. Köprüye verilen hasarlar bir kolonun alt kısmı kesilerek mesnetlenme durumu değiştirilmiş ve öngerme kablolarından birisi kesilmiştir. Yapılan analizlerde köprünün düşey yöndeki modları dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre uygulanan metodlar yapı sisteminin değişime uğraması koşulu ile hasar tespitinde kullanılabileceği yönündedir.

Bir başka çalışmada Dilena ve Morassi (2011) İtalya'da bulunan ve yaşanan sel olayı nedeniyle zarar gören ve yıkılması planlanan Dogna Köprüsünde bir dizi hasarlı deneyler yapmıştır. Köprünün basit mesnetli olarak nitelendirilen ve bir açıklığında yapılan deneylerde köprü kirişleri beton testeresiyle kesilerek hasarlar oluşturulmuş ve düşey yönde ölçümler alınmıştır. hasar seviyelerine karşı gelen baskın frekans değişimleri incelenmiştir. Ayrıca mod şekilleri elde edilmiş ve şekiller üzerindeki eğrilik değişimleriyle hasar yerinin tespitine çalışılmıştır. Elde edilen Hasar Seviyesi – Frekans ilişkisi çok tutarlı olmamakla beraber mod şekilleri üzerinde saptanan eğrilik değişimlerinin hasar yerinin yaklaşık olarak belirlenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Aynı köprüden alınan ölçümler üzerinde gerçekleştirilen bir başka çalışmada Dilena vd (2011) baskın frekansların hasar karşısında değişmemesi üzerinde durulmuş ve Dilena ve Morassi (2011) sonuçları doğrulanmıştır.

Gerçek yapılar üzerinde yürütülen bu değerli çalışmalarla bu proje kapsamında incelenen yapılar için yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında, bu projede yapılan çalışmaların çok daha detaylı olduğu görülecektir. Literatürdeki çalışmalar basit köprüler üzerinde yapılmış ve yapıların genel özellikleri nedeniyle sadece düşey yöndeki modlar dikkate alınmıştır. Bu nedenle bu yöntemlerin gerçek betonarme binalar için uygulanmasında zorluklar bulunmaktadır. Örnek olarak, betonarme binalar için yapılan çalışmalar öncelikle birçok yerden alınan ivme kayıtlarının değerlendirmesini gerektirmektedir. Eldeki ivmeölçer sayısının ölçüm yapılacak nokta sayısından az olması nedeniyle referans ivmeölçeri yaklaşımının kullanılması zorunluluktur ve ivmeölçerlerin farklı noktalarda farklı zamanlarda ölçüm almasını gerektirmektedir. Analizler sırasında, ARTEMİS Modal yazılımı yetkilileriyle yapılan görüşmelerde ivmeölçerlerin yerlerinin değiştirilmesinin, yani bina dinamik özelliklerinin birden fazla ölçüm setiyle ortaya çıkarılmasının yanlış hasar indeksinin hesaplanmasına neden olacağı bildirilmiş bu nedenle tek bir ölçüm için hasar indeksinin hesaplanması önerilmiştir. Bu nedenle betonarme binalarda hasar etkilerinin dinamik özelliklerle elde edilmesi için binaların basit dinamik özelliklerine (mod şekli veya modal

frekans) bağılı parametrelerin kullanılması yerinde olacaktır. Geçekleştirilen çalışmada hasarlı yapıların düşey ivme kayıtlarının değerlendirilmesi sonucu elde edilen düşey modlar, bir hasar tespit ve hasar yeri belirleme parametresi olarak kullanılabileceği gösterilmişti. Bu gerçek ışığında betonarme yapıların hasar tespitinde kullanılmak üzere mod şekillerinin doğrudan kullanılması önerilmiş ve aşağıdaki başlıkta detaylı olarak açıklanmıştır.

13. BETONARME YAPILARDA TİTREŞİM ESASLI HASAR TESPİTİ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEM

Proje kapsamında incelenen binalarda her katta dört köşe noktasında ölçümler alınmış ve bu doğrultuda her katta her köşe noktasında modal yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Bu nedenle, çalışılan binaların her hasar seviyesi için, her köşe noktasında modal yer değiştirmelerin hesaplı olarak elimizde olduğu söylenebilir.

Mevcut ve yeni yapılacak betonarme binaların değerlendirilmesinde veya projelendirilmesinde deprem yükleri altında kat ötelenmelerinin farklı şekillerde ele alındığı bilinmektedir. Yapılardaki düzensizliklerin kontrol edilmesi veya ikinci mertebe etkilerinin kontrol edilmesi kat ötelenmelerinin farklı amaçlarla kullanımına örnek gösterilebilir. Bu proje kapsamında betonarme binaların hasar tespitinde kullanılmak üzere önerilen yöntem mod şekillerinin deprem yönetmeliklerinde tanımlanan görelî kat ötelenmeleri tanımlarına uygun olarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Görelî kat ötelenmelerinin modal yer değiştirmeler için hesaplanması ve değişimlerinin izlenmesi yapısal hasarın varlığı açısından önemli ipuçları verecektir.

Daha önce tamamlanan 214M235 numaralı, Betonarme Yapılarda Bölme Duvarların Yapıların Dinamik Davranışlarına Etkilerinin Tam Ölçekli Ve Hasarlı Deneylerle Araştırılması isimli projede mode şekillerinden yola çıkılarak betonarme yapıların herhangi bir katında bölme duvar olmaması nedeniyle yumuşak kat düzensizliğinin ortaya çıkacağı gösterilmiştir. Bu doğrultuda Türk Deprem Yönetmeliğinde (DBYBHY 2007) kullanılan komşu katlar arası rijitlik düzensizliği tanımı binaların mod şekillerine göre uyarlanarak kullanılmıştır (Aras 2018). Bu nedenle belirtilen düzensizlik tanımında kullanılan görelî kat ötelenmesi tanımının farklı hasar seviyelerinde çalışılan binalarda değişimi incelenecektir. Bu doğrultuda $\Phi_{i,j}$ i modunda j noktasındaki modal yer değiştirme olmak üzere görelî kat modal yer değiştirmesi, $\Delta_{i,j}$ Denklem 6 ile hesaplanacaktır

$$\Delta_{i,j} = \Phi_{i,j} - \Phi_{i,j-1} \quad (6)$$

Hesaplamalar yapılırken X, Y ve Z yönlerindeki modal yer değiştirmeler ayrı ayrı alınabileceği gibi bu değerler karelerin toplamının karekökü yöntemiyle tek bir yer değiştirmeye de indirgenebilir.

Yapılacak değerlendirmede önemli olan bir husus değerlendirmede kullanılacak mod sayısı ve değişimin izleneceği ölçüm noktasının iyi seçilmesidir. Proje kapsamında çalışılan bina gibi simetri eksenin olmadığı binalarda burulma davranışı nedeniyle belirtilen seçim daha fazla önem kazanmaktadır. Hasar bölgelerinden alınan ölçümlerin, hasar bölgelerinin hareketini içeren modlarda değerlendirilmesi gerekecektir. Hasar bölgesi üzerinde, hasar bölgesinin hareketini içermeyen bir modda çalışmanın sonuca götürmeyeceği açıktır. Bu nedenlerle bu çalışma kapsamına A Blok Binası için A köşe noktasının hareketinin birinci modda değerlendirilmesi, B Blok Binası için ise B köşe noktasının birinci modda değerlendirilmesi gerekir. Bina ikinci modu binaların arka yüzünün hareketidir. C ve D noktaları üzerinde yapılacak analizlerin hasar bildirmesi beklenmemelidir. Bina üçüncü modu yapının Y yönündeki hareketidir. Bu yönde yapılacak analizler hasar yerinin belirlenmesi için uygun olacaktır.

13.1. Önerilen yöntemin A Blok Binası için denenmesi

A Blok Binasından elde edilen ölçümler FOA yöntemiyle analiz edilerek modal yer değiştirmeler elde edilmiştir. Modal yer değiştirmelerden Görelî Modal Yer Değiştirmeleri elde edilmiştir. Son olarak farklı hasar seviyelerinde elde edilen Görelî Modal Yer Değiştirmelerin binanın hasarsız durumu için elde edilen Görelî Modal Yer Değiştirmelerine göre değişimi belirlenmiştir. Tablo 33 A Blok Binası A noktası için binanın farklı durumları için birinci modda elde edilen modal yer değiştirmeleri göstermektedir. Gösterilen değerler binanın en büyük modal yer değiştirmesi 1 olacak şekilde normalize edilerek hesaplanmıştır. Tablo 34 yine A Blok Binası için Görelî Modal Yer değiştirmeleri göstermektedir.

Tablo 33. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda X yönü Modal Yer Değiştirmeleri

KAT	Modal Yer Değiştirmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0.042251	0.033	0.0326	0.036986	0.03285	0.035996
1	0.262778	0.2605	0.261	0.29863	0.302897	0.315155
2	0.545136	0.541	0.5351	0.563014	0.557941	0.572069
3	0.759687	0.754	0.7457	0.786301	0.777289	0.786034
4	1	1	1	1	1	1

Tablo 34. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda X yönü Görelî Modal Yer Değişîrmeleri

KAT	Görelî Modal Yer Değişîrmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0.042251	0.033	0.0326	0.036986	0.03285	0.035996
1	0.220528	0.2275	0.2284	0.261644	0.270047	0.27916
2	0.282358	0.2805	0.2741	0.264384	0.255044	0.256913
3	0.214551	0.213	0.215	0.223288	0.219348	0.213966
4	0.240313	0.246	0.2499	0.213699	0.222711	0.213966

Betonarme yapıların titreşim analizleri ile izlenmesi ve hasar tespitinin yapılması için bu çalışmada Görelî Modal Yer Değişîrmelerinin bir parametre olacağı ve dorudan hasarın varlığı ve yerinin tespiti için kullanılabileceği ileri sürülmektedir. Tablo 34 bu çalışma kapsamında A Blok Binasının 1. Katta hasar verilen yapı elemanlarına en yakın konum olan A köşesi boyunca Görelî Modal Yer Değişîrmelerin (GMYD) değişimini göstermektedir. Her hasar seviyesinde elde edilen görelî GMYD değerlerinden binanın hasarsız hali için elde edilen GMYD değerlerinin çıkarılması ile Tablo 35 oluşturulmuştur. Tabloda bulunan pozitif değerler GMYD değerlerinin arttığını, negatif değerlerde GMYD değerlerinin azaldığını göstermektedir. Hesaplanan değerlerin dinamik mod şekilleri üzerinde tepe deplasmanı bir (1) olacak şekilde normalize edildiği düşünüldüğü zaman hasar nedeniyle elde edilecek GMYD değerlerinin artacağı, hasar olmayan bölgelerdeki GMYD değerlerinin azalacağı anlaşılabilmektedir.

Tablo 35'teki değerlere bakıldığı zaman GMYD değerlerinin değişiminin pozitif olarak görüldüğü satır yapının birinci katına denk gelen 1. Kat satırıdır. Zemin seviyesinde görülen GMYD değişimleri negatiftir. 2. Kat GMYD değişimleri negatiftir, 3. Kat GMYD değişimlerinde hem pozitif hem de negatiftir değerler vardır, 4. Kat GMYD değişimlerinde yine hem negatif değerler hem de pozitif değerler vardır.

Yukarıda açıklanan hasar yeri tespiti ilkeleri ışığında yapının birinci kat seviyesi altında artan GMYD değişimleri nedeniyle hasar olduğu söylenebilir. GMYD değişim değerlerinin yüküklüğüne bakarak hasarın birbirlerine göre mertebbesi hakkında karar da verilebilir. Tablo 35 Sonuçlarına göre Hasarsız (Ori) binadan HH1 (Hafif Hasar – 1), HH2 (Hafif Hasar – 2), HH3 (Hafif Hasar – 3), AH1 (Ağır Hasar – 1) ve AH2 (Ağır Hasar – 2)'ye doğru gittikçe GMYD değişimleri artmaktadır.

Tablo 35. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda X yönünde Görelî Modal Yer Değişîrmelerinin değışimi

KAT	Görelî Modal Yer Değişîrmelerin Değişimi					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0	-0.00925	-0.00965	-0.00526	-0.0094	-0.00625
1	0	0.006972	0.007872	0.041116	0.049519	0.058632
2	0	-0.00186	-0.00826	-0.01797	-0.02731	-0.02544
3	0	-0.00155	0.000449	0.008737	0.004797	-0.00058
4	0	0.005687	0.009587	-0.02661	-0.0176	-0.02635

Ancak, yapılan açıklamalara ters düşecek durum binanın 3. ve 4. katlarında tespit edilen pozitif GMYD değışim değeri leridir. Bu katlarda her hangi bir hasar olmamasına karşılık pozitif yönlü değışimler vardır. Tespit edilen pozitif sayılar mertebe olarak HH3, AH1 ve AH2 için tespit edilen GMYD değışimlerinden çok küçük, HH1 ve HH2 GMYD değışim katsayılarından büyüktür. Bu nedenlerle elde hesaplanan GMYD değeri ler için limit değeri lerin tanımlanması uygun olacaktır. Tablodaki değeri lere göre pozitif GMYD değışim değeri lerinin 0,01'den büyük olması durumunda hasarı işaret edeceği anlaşılmaktadır. Bu ilkeler ışığında önerilen yöntemin A Blok Binasında HH3, AH1 ve AH2 hasar durumları için hasarın yerini tespit edeceği ve birbirlerine göre hasar kıyaslaması yapabileceği açıktır.

Önerilen hasar tespit yöntemi A Blok Binasında birinci modda A köşesi boyunca modal yer değışîrmelerin X, Y ve Z yönlerindeki değeri lerin karelerinin toplamının karekökü olarak birleştirilmesi sonucunda elde edilen değeri lere göre yapılabilirliği de araştırılmıştır. Modal yer değışîrmeler özellikle burulma içeren davranışları temsil eden modlarda negatif işaretli olmaktadır. Yapı yüksekliği boyunca hem pozitif hem de negatif işaretli değeri lerin değeri lendirilmesi bu nedenle zorlaşmaktadır. Bu nedenle önerilen yöntemin modal yer değışîrmelerin X, Y ve Z yönlerindeki değeri lerin karelerinin toplamının karekökü olarak birleştirilmesi sonucunda elde edilen değeri lere göre yapılması daha pratiktir. Ayrıca incelemenin üç doğrultuda da değeri leri ihtiva etmesi gerçek davranışın ortaya çıkarılması açısından önemli olacaktır. Bu doğrultuda Tablo 36 A Blok Binasının A köşesi boyunca birinci modda modal yer değışîrmelerin X, Y ve Z yönlerindeki değeri lerin karelerinin toplamının karekökü olarak birleştirilmesi sonucunda elde edilen modal yer değışîrme değeri lerini göstermektedir. Tablo 37 bu değeri lere göre hesaplanan GMYD değeri lerini, Tablo 38 GMYD değeri lerinin değışimini göstermektedir.

Tablo 36. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Modal Yer Değiştirmeleri

Kat	Modal Yer Değiştirmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0.043296	0.0333	0.033	0.037726	0.032978	0.036064
1	0.263923	0.261	0.262	0.302032	0.310985	0.327938
2	0.554254	0.554	0.54	0.57377	0.577947	0.594625
3	0.769759	0.764	0.76	0.803307	0.787849	0.793527
4	1.025196	1.02	1.025	1.020603	1.018892	1.019786

Tablo 37. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmeleri

Kat	Görelî Modal Yer Değiştirmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$
Temel	0			0	0	0
Zemin	0.043296	0.0333	0.033	0.037726	0.032978	0.036064
1	0.220627	0.2277	0.229	0.264306	0.278008	0.291874
2	0.29033	0.293	0.278	0.271738	0.266962	0.266687
3	0.215505	0.21	0.22	0.229537	0.209902	0.198902
4	0.255437	0.256	0.265	0.217296	0.231043	0.226259

Tablo 38. A Blok Binası A Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin değişimi

Kat	Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin Değişimi					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0	-0.01	-0.0103	-0.00557	-0.01032	-0.00723
1	0	0.007073	0.008373	0.043679	0.05738	0.071247
2	0	0.00267	-0.01233	-0.01859	-0.02337	-0.02364
3	0	-0.00551	0.004495	0.014032	-0.0056	-0.0166
4	0	0.000563	0.009563	-0.03814	-0.02439	-0.02918

Tablo 37’de gösterilen sonuçlara göre Tablo 34 için yapılan yorumların birisi dışında hepsi geçerlidir. İstisnai durum HH3 durumunda 3. Katta ortaya çıkmaktadır. Buradaki değer 0,014032 olarak 0,01’den daha büyük bir değer olarak ortaya çıktığı için hatalı olarak hasar varlığına işaret edecektir. Bu nedenle GMYD değişimlerinin limit değerleri için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç olduğu söylenebilir. Bu noktaya kadar elde edilen sonuçlara bu limit değeri 0,14’den büyük olmalıdır.

13.2. Önerilen yöntemin B Blok Binası için denenmesi

Proje kapsamında BBlok Binasından alınan ölçümler hasar tespitine yönelik olarak incelenmiş ve GMYD değişiminin hasar tespit parametresi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda A Blok Binası için oluşturulan tablolar B Blok Binasının hasar verilen köşesi olan B Köşesi için hazırlanmıştır. Öncelikle B Köşesinin aktif olduğu mod olan birinci modda, aktif yön olan X yönündeki modal yer değiştirmelere dayalı inceleme yapılmıştır. Tablo 39 B Blok Binası B Köşesinin 1. Modda X yönünde elde edilen modal yer değiştirmelerini, Tablo 40 bu modlardan elde edilen GMYD değerlerini, Tablo 41 ise GMYD değerlerinin değişimini göstermektedir.

Önerilen yöntemin etkinliği Tablo 40’ın detaylı incelemesinden sonra anlaşılabacaktır. A Blok Binasının değerlendirilmesinde kabul edilen pozitif GMYD değişim katsayısı limitine göre (0,14) görülmektedir ki, tüm hasar seviyeleri için B Blok Binasına verilen hasarların varlığı ve yeri doğru olarak tespit edilebilmektedir. Genel olarak GMYD değişim sayılarının mertebesi hasarın seviyesi ile de uyumludur. Ancak hasarlı kolonların bir üst katında da hasar olmamasına rağmen HH1, HH2 ve HH3’te hasar göstermektedir. Hesaplanan GMYD değişim katsayıları da 0,14’e yakındır.

Tablo 39. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda X yönündeki Modal Yer Değiştirmeleri

Kat	Modal Yer Değiştirmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0.055222	0.056505	0.05225	0.055819	0.052692	0.042715
1	0.588836	0.606307	0.604499	0.605991	0.616838	0.622771
2	0.730101	0.758739	0.758345	0.760681	0.765464	0.757
3	0.892557	0.911432	0.899129	0.908005	0.897337	0.892264
4	1	1	1	1	1	1

Tablo 40. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda X yönündeki Görelî Modal Yer Değişîrmeleri

Kat	Görelî Modal Yer Değişîrmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$
Temel	0			0	0	0
Zemin	0.055222	0.056505	0.05225	0.055819	0.052692	0.042715
1	0.533613	0.549803	0.55225	0.550172	0.564146	0.580056
2	0.141266	0.152431	0.153846	0.15469	0.148625	0.13423
3	0.162455	0.152694	0.140784	0.147324	0.131873	0.135263
4	0.107443	0.088568	0.100871	0.091995	0.102663	0.107736

Tablo 41. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda X yönündeki Görelî Modal Yer Değişîrmelerinin değışimi

Kat	Görelî Modal Yer Değişîrmelerin Değişimi					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0	0.001283	-0.00297	0.000597	-0.00253	-0.01251
1	0	0.016189	0.018636	0.016558	0.030533	0.046443
2	0	0.011165	0.01258	0.013423	0.007359	-0.00704
3	0	-0.00976	-0.02167	-0.01513	-0.03058	-0.02719
4	0	-0.01888	-0.00657	-0.01545	-0.00478	0.000293

Yapılan analizlerin X Y ve Z yönlerindeki modal deplasmanları karelerin toplamının kare kökü yöntemiyle birleştirilmesiyle elde edilen birleştirilmiş modal yer değışîrmelerle yapılabîlîrlîğinin araştırılması için Tablo 42, Tablo 43 ve Tablo 44 hazırlanmıştır. Tablo 43’de yer alan GMYD değışimleri ve daha önce tanımlanan limit değeri ne göre AH1 ve AH2 hasar seviyeleri doğru olarak tespit edilebilmektedir.

Yapılan ölçümlerin gerç ek bir yapıdan alınması nedeniyle çevresel etkilerin alınan ölçümlere etkisi hiçbir zaman tam olarak ortadan kaldırı lamaz. Ayrıca ivmeölçerlerin konumlanması sırasında oluşabilecek terazi hataları ve ölçümler arasında ivmeölçer konumlarının sürekli değışmesi nedeniyle oluşacak etkiler nedeniyle gürültüler söz konusudur. Belirtilen nedenler gerç ek yapıların izlenmesi sırasında ivmeölçerlerin sabit tutulacağı ve izlemenin sürekli yapılacağı düşünüldüğünde ortadan kalkacaktır. Bu nedenle yapı sağlığı izleme işlerinde GMYD Değışîmlerinin izlenmesi yönteminin güvenli olarak çalışacağı düşünölmektedir.

Tablo 42. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Modal Yer Değiştirmeleri

KAT	Modal Yer Değiştirmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$	$\Phi_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0.056416	0.056309	0.051705	0.054459	0.058	0.042141
1	0.619801	0.618253	0.6137	0.607678	0.64327	0.62869
2	0.758	0.752862	0.749985	0.752344	0.77887	0.755188
3	0.931654	0.926106	0.901253	0.908036	0.926021	0.898487
4	1.03229	1.013455	1.00092	0.999276	1.028404	1.002643

Tablo 43. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmeleri

KAT	Görelî Modal Yer Değiştirmeler					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$	$\Delta_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0.056416	0.056309	0.051705	0.054459	0.058	0.042141
1	0.563385	0.561944	0.561995	0.553219	0.58527	0.586549
2	0.138199	0.134608	0.136285	0.144665	0.1356	0.126498
3	0.173654	0.173244	0.151267	0.155692	0.147151	0.143299
4	0.100636	0.087349	0.099667	0.091241	0.102383	0.104156

Tablo 44. B Blok Binası B Köşesinin 1. modda birleştirilmiş Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin değişimi

KAT	Görelî Modal Yer Değiştirmelerinin Değişimi					
	Ori	HH1	HH2	HH3	AH1	AH2
	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$	$D-\Delta_{1,A}$
Temel	0	0	0	0	0	0
Zemin	0	-0.00011	-0.00471	-0.00196	0.001584	-0.01427
1	0	-0.00144	-0.00139	-0.01017	0.021885	0.023164
2	0	-0.00359	-0.00191	0.006466	-0.0026	-0.0117
3	0	-0.00041	-0.02239	-0.01796	-0.0265	-0.03035
4	0	-0.01329	-0.00097	-0.0094	0.001746	0.00352

14. SONUÇ

116M254 numaralı, Betonarme Yapılarda Yapısal Hasarların Yapı Dinamik Özelliklerine Olan Etkilerinin Araştırılması ve Titreşim Analizleri ile Hasar Tespiti Yapılması isimli proje gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizlerle amaç ve hedeflerine ulaşarak sonuçlandırılmıştır. Proje kapsamında elde edilen bilimsel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Proje kapsamında incelenen binalara Operasyonel Modal Analizleri (OMA) için ivme kayıtları alınmıştır. Alınan kayıtlar Tepe Noktası Seçimi, Frekans Ortamında Ayırışma, Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırışma yöntemleri ile incelenmiştir. Aşağıda detayları açıklanan çalışmalarda kullanılan bu yöntemlerin aynı sonuçları verdiği görülmüştür.

Proje kapsamında incelenen binaların (A Blok Binası ve B Blok Binası) ilk hali birbirine kat seviyelerinden iki kirişle bağlı altı katlı, birbirine dik iki yönde simetri ekseni olmayan iki adet binaydı. Proje kapsamında bu binalara uygulanan OMA yöntemi ile yapıların dinamik özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra bağlantı kirişleri kırılmış ve OMA yöntemi binalar için tekrarlanmıştır. Analizler sonucunda binaları bağlayan kirişlerin, bina dinamik özelliklerini kiriş bağlantı yönünde (X) etkiledikleri ortaya çıkarılmıştır.

Proje amaç ve hedeflerine göre analizler gerçekleştirmek üzere binalardan B Blok Binasının zemin katında bulunan bölme duvarlar yıkılarak kaldırılmıştır. B Blok Binasının zemin katında bölme duvarları olmayan hali için OMA tekrarlanmış ve duvar etkileri ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bölme duvarların yıkılması B Blok Binasının X yönündeki frekansını %23, Y yönündeki frekansını ise %31 düşürmüştür.

Çalışılan yapılara beş farklı seviyede yapısal hasar verilmiştir. Bu hasarlar; Hafif Hasar – 1 (HH1), Hafif Hasar – 2 (HH2), Hafif Hasar – 3 (HH3), Ağır Hasar – 1 (AH1) ve Ağır Hasar – 2 (AH2) olarak isimlendirilmiştir. Hafif Hasar ismi, yapı elemanlarında darbeye maruz kalması için kullanılırken, Ağır Hasar ismi elemanın çekirdek betonu kırılıncaya kadar darbeye maruz kalması için kullanılmıştır. Tanımlanan her hasar seviyesi için binaların dinamik özellikleri belirlenerek dinamik davranış karşılaştırılmıştır. Yapı dinamik modlarında hasar bölgesinin dinamik hareketi birinci modda ortaya çıktığı için değerlendirmelerin birinci modda en belirgin şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. Yapıların ikinci modu, hasar bölgelerine uzak bölgenin hareketi olarak ortaya çıktığı için bu modun değerlendirmeye alınmasının hasar etkileri bakımından çok doğru sonuçlar vermeyeceği görülmüştür. Yapı üçüncü modu ise yapının tümünün

hareketini temsil ettiğinden hasar değerlendirmesinde kullanılabileceği görülmüştür. Bu doğrultuda hasar etkilerinin net ortaya çıkarılması için sonuç ve çıkarımlar yapı birinci moduna göre değerlendirmeler yapılmıştır.

A Blok Binasında oluşturulan hasarlar karşısında frekans azalmaları görülmüştür. HH3'te tespit edilen frekans azalması HH2'de tespit edilen frekans azalmasından daha az olması şaşırtıcı bir sonuçtur. AH2'de ortaya çıkan frekans azalmasını mertebesi %3'tür. Yapıya verilen hasarlar yapı dinamik mod şekillerinde bir değişikliğe neden olmamıştır. Düşey ivme kayıtlarının ayrı incelenmesi sonucunda AH1 ve AH2 hasarlarının sonrasında hasarlı bölgede düşey titreşimlerin mod şekillerine katıldığı görülmüştür.

Her iki yapının hasarsız ve hasarlı halleri sayısal olarak modellenmiş ve her durum için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dinamik özelliklerin karşılaştırılması sonucunda artan hasar seviyelerine karşın yapıların birinci, ikinci ve üçüncü modal frekanslarında azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Hasar seviyelerinin yapıların sayısal olarak elde edilen dinamik mod şekillerini değiştirmedeği tespit edilmiştir.

B Blok Binasında oluşturulan hasarlar karşısında frekans azalmaları görülmüştür. Frekans azalmaları ile uygulanan hasarların seviyeleri arasında beklenen ilişki kurulabilmiştir. Hasar seviyesi ağırlaştıkça frekans düşüşü artmaktadır. AH2'de ortaya çıkan frekans azalmasını mertebesi %4'ü geçmektedir. Yapıya verilen hasarlar yapı dinamik mod şekillerinde bir değişikliğe neden olmamıştır. Düşey ivme kayıtlarının ayrı incelenmesi sonucunda AH1 ve AH2 hasarlarının sonrasında hasarlı bölgede düşey titreşimlerin mod şekillerine katıldığı görülmüştür.

Hasarlı yapılardan elde edilen titreşim kayıtlarının, yapıların hasarsız durumu için titreşim kayıtlarının elde olmaması durumunda kullanılabilirliği sorgulanmıştır. Hasarın yapıda genel davranışta beklenmeyen bir mod oluşturması durumunda hasar varlığını işaret edebileceği tespit edilmiştir. Çalışılan binalarda bu durum eleman kayıplarıyla oluşturulan AH1 ve AH2'de düşey modların ortaya çıkmasıyla görülmüştür.

Yapıların hasarsız ve hasarlı durumları zaman tanım alanında geliştirilen Rastgele Alt-alan Tanımlama metodu ile ARTEMİS Modal yazılımla analiz edilmiştir. Her iki yapıda belirtilen yöntemin hasarın varlığına işaret ettiği ancak seviyesini görel olarak da tespit edemediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca yapılan analizler her durum için tek ölçüm setiyle gerçekleştirildiği için hasar yerinin tespit edilme imkânı zaten yoktur.

Yapılan literatür çalışmasına göre, dinamik ölçümlere dayanan hasar tespit yöntemleri daha çok köprüler ve laboratuvar ortamında modeli yapılan basit kirişler gibi basit yapılara odaklanmıştır. Proje kapsamında incelenen binalar gibi büyük ölçekli ve çok serbestlik dereceli sistemler üzerinde çalışılmamıştır. Bu proje kapsamında elde edilen sonuçlara ve çalışılan yapıların genel özelliklerine göre hasar tespit yöntemi olarak dinamik mod şekillerini baz alan bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde, yapı dinamik mod şekillerinde hasar seviyelerinde oluşacak değişimler Görelî Modal Yer Değiştirmelerin (GMYD) değişimine bağlanmıştır. GMYD genel olarak deprem yönetmeliklerinde kullanılan, yapıların deprem yükleri altındaki görelî kat ötelemelerinin dinamik mod şekillerine uyarlanmış halidir.

A Blok Binasında gerçekleştirilen analizlere göre önerilen yöntem uygun limit değerlerinin seçimi halinde HH3, AH1 ve AH2 hasar seviyelerini ve hasarın yerini tespit edebilmektedir. A Blok Binası için hasar varlığını gösteren GMYD değişim değeri sadece X yönü modal yer değiştirmeleri göz önüne alındığı zaman 0,1 olarak belirlenmiştir. Noktasal modal yer değiştirmeler X, Y ve Z yönleri modal yer değiştirmelerin birleştirilerek analize katılması durumunda 0,14 olarak belirlenmiştir.

B Blok Binası için X yönü modal yer değiştirmelerle hesap yapıldığı zaman yine uygun limit değerlerinin seçilmesi halinde tüm hasar durumlarında hasar yerinin doğru bir şekilde saptanacağı görülmüştür. B Blok Binası için hasar varlığını gösteren GMYD değişim değeri sadece X yönü modal yer değiştirmeleri göz önüne alındığı zaman 0,14 olarak belirlenmiştir. Noktasal modal yer değiştirmeler X, Y ve Z yönleri modal yer değiştirmelerin birleştirilerek analize katılması durumunda HH1, HH2 ve HH3'te hasar varlığının tespit edilemediği görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda Görelî Modal Yer Değiştirme Değişimlerinin betonarme binalarda yapı sağlığı izleme yöntemi olarak kullanılabileceği ispatlanmıştır. Ancak özellikle limit değerlerin kesinleştirilebilmesi için fazlaca deneysel çalışmaya ihtiyaç olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

Abdelghani, M., Basseville, M., Benveniste, A., 1997 “In–operation damage monitoring and diagnostics of vibrating structures, with applications to off shore structures and rotating machinery”, Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, pp.1815–1822.

Allemang R.J. 2003 “The modal assurance criterion – twenty years of use and abuse”. Sound Vib. 2003;37(8):14-23.

Altunışık, A. C., Bayraktar, A., Sevim, B., Özdemir, H. 2011. “Experimental and analytical system identification of Eynel arch type steel highway bridge”, Journal of Constructional Steel Research, 67, 1912–21.

Amiri, M., Sabbagh–Yazdi S. R. 2011. “Ambient vibration test and finite element modeling of tall liquid storage tanks”, Thin–Walled Structures, 49, 974–83.

Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., Taskov L. 2011. “Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace.”, Cons Build Mat. 25, 81–91.

Aras, F., 2016. “Ambient and Forced Vibration Testing with Numerical Identification for RC Buildings”, Earthquakes and Structures, 11 (5), 809 – 822. DOI: 10.12989/EAS.2016.11.5.809.

Aras, F., Investigation of Effects of Infill Walls in Reinforced Concrete Buildings with Full–Scaled Experiments, Teknik Dergi, Publication of Turkish Chamber of Civil Engineers, 2018; 29(5). DOI: 10.18400/tekderg.317218. (In Turkish)

Aras, F., 2018, “Laboratory Tests and Vibration Surveys for the Mechanical Properties of Infill Walls”, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32(1), 04017117, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943–5509.0001115.

Aras F., 2019. “Monitoring the dynamic properties of a nine–story reinforced concrete building during its demolition”. Struct Control Health Monit. 11:e2456. <https://doi.org/10.1002/stc.2456>

Aras F ve Tufan T. 2019 “Vibration Surveys for the Validation of Infill Wall Effects in the Behaviour of RC Buildings”. 2nd International Conference On Life And Engineering Sciences, İstanbul, Turkey Icoles 2019

Aras F, Çeribaş S, ve Akbaş T. 2019. “Vibration Surveys for the Validation of Infill Wall Effects in the Behaviour of RC Buildings”. 2nd International Conference On Life And Engineering Sciences, İstanbul, Turkey Icoles 2019

Aras F, Çeribaş S, ve Akbaş T. 2019, “İki binayı kat seviyelerinde bağlayan betonarme kirişlerin dinamik özelliklere olan etkilerinin araştırılması”, 5. Uluslararası Deprem Mühendisliği Ve Sismoloji Konferansı 8–11 Ekim 2019 – ODTÜ – Ankara

ARTEMIS Pro. 6.1 2019. Structural Vibration Solutions A/S. NOVI Science Park, DK–9220 Aalborg East Denmark

Basseville, M. 1997. “Information criteria for residual generation and fault detection and isolation”, Automatica 33, 783–803.

Basseville, M. Mevel, L. Goursat, M. 2003 “Statistical model–based damage detection and localization: subspace–based residuals and damage–to–noise sensitivity ratios”, Journal of Sound and Vibration 275, 769–794.

Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T., Adanur, S. 2008. “Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway Bridges using Modal Testing”. 8th International Congress in Advances in Civil Engineering, Famagusta, North–Cyprus.

Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B., Şahin, A., Özcan, D. M. 2010. “Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi”. İMO Teknik Dergi, 5185–205..

Bui, Q. B., Mommessin, M., Perrotin, P., Plassiard, J. P., Plé, O. 2014. “Assessing Local–Scale Damage In Reinforced Concrete Frame Structures Using Dynamic Measurements”, Engineering Structures, 79, 22–31.

Bull, D. Helfen, L. Sinclair, I. Spearing, S. Baumbach, T. 2013. "A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage", *Compos. Sci. Technol.* 75, 55–61.

Bull, D.J. Spearing, S.M. Sinclair, I. Helfen, L. 2013 "Three-dimensional assessment of low velocity impact damage in particle toughened composite laminates Using micro-focus X-ray computed tomography and synchrotron radiation laminography", *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 52, 62–69.

Cantieni, R. 2005, "Experimental Methods used in System Identification of Civil Engineering Structures". In *Proceedings of 1st Int Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Copenhagen, Denmark, 249–260.

Chellini, G., De Roeck, G., Nardini, L., Salvatore, W. 2010. "Damage analysis of a steel-concrete composite frame by finite element model updating". *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 398–411.

Das, S. Saha, P. Patro, S.K. 2016. "Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review", *J. Civil Struct. Health Monit.* 6, 1–31.

DBYBHY 2007, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar*. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Türkiye, 2007.

Dessi, D., Camerlengo, G. 2015 "Damage identification techniques via modal curvature analysis: Overview and comparison", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52–53, 81–205.

Di Cesare, A., Ponzo, F.C., Vona, M., Dolce, M., Masi, A., Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., 2014, "Identification of the structural model and analysis of the global seismic behaviour of a RC damaged building", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 6, 131–141.

Dilena, M., Morassi, A., 2011. "Dynamic testing of a damaged bridge", *Mech. Syst. Signal Process.*, 25, 1485–1507, 10.1016/j.ymssp.2010.12.017

Dilena, M., Morassi, A., Perin M. 2011. "Dynamic identification of a reinforced concrete damaged bridge", *Mech. Syst. Signal Process.*, 25, 2990–3009.

Dohler M, Hille F, Mevel L. Rucker, W. 2014. "Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 Bridge", Engineering Structures 69, 183–193.

Drinkwater, B.W. Wilcox, P.D. 2006. "Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review", NDT E Int. 39 (2006) 525–541.

Duffey, T.A. Doebling, S.W. Farrar, C.R. Baker W.E. Rhee ,W.H., 2001. "Vibration-based damage identification in structures exhibiting axial and torsional response, Journal of Vibration and Acoustics" 123, 84–91

El-OuafiBahlous, S., Abdelghani, M., Smaoui, H., El-Borgi, V S. 2007. "A modal filtering and statistical approach for damage detection and diagnosis in structures using ambient vibrations measurements", Journal of Vibration and Control 13, 281–308.

Erdogan, Y., Gul, M., Catbas, F., and Bakir, P. 2014. "Investigation of Uncertainty Changes in Model Outputs for Finite-Element Model Updating Using Structural Health Monitoring Data." J. Struct. Eng., 140(11), 04014078.

Fan, W. Qiao, P. 2010. "Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study", Structural Health Monitoring 9, 83–111.

Fang, S., Perera, R., De Roeck, G., 2008, "Damage identification of a reinforced concrete frame by finite element model updating using damage parameterization", Journal of Sound and Vibration, 313, 544–559.

Farrar, C.R. Jauregui, D.A. 1998 "Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment, Smart Materials and Structures 7, 704–719.

Farrar, C.R. Worden K., 2010. "An introduction to structural health monitoring", Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci. 365, 303–315.

Gentile, G., Saisi, A. 2007 "Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment". Constr Build Mater, 21, 1311–21.

Gul, M. and Catbas, F. 2011. "Damage Assessment with Ambient Vibration Data Using a Novel Time Series Analysis Methodology." *J. Struct. Eng.*, 137(12), 1518–1526.

İlki, A., Göksu, C., Demir, C., 2014, "Seismic performance assessment of existing building through full scale tests", International Workshop on Large–Scale and on–site structural testing for seismic performance assessment, 20 Kasım 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ivanovic, S. S., Trifunac, M. D., Novikovic, E. I., Gladkovic, A. A., Todorovska, M. I. 2000. "Ambient vibration tests of a seven–story reinforced concrete building in Van Nuys, California, damaged by the 1994 Northridge earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 391–411.

Kaveh, A., Zolghadr, A. 2015, "An improved CSS for damage detection of truss structures using changes in natural frequencies and mode shapes", *Advances in Engineering Software*, 80, 93–100.

Kim, J.T. Ryu, Y.S. Cho, H.M. Stubbs, N. 2003. "Damage identification in beam–type structures: frequency–based method vs mode–shape–based method", *Eng. Struct.* 25, 57–67.

Kolkoori, S. Hoehne, C. Prager, J. Rethmeier, M. Kreutzbruck, M. 2014. "Quantitative evaluation of ultrasonic C–scan image in acoustically homogeneous and layered anisotropic materials using three dimensional ray tracing method", *Ultrasonics* 54 (2014) 551–562.

Lee, Y.S. Chung M.J., 2000. "A study on crack detection using eigen frequency test data", *Computers and Structures* 77, 327–342.

Lemnitzer, A., Massone, L. M., Skolnik, D. A., Martin, J. C., Wallace, J. W. 2014, "After shock response of RC buildings in Santiago, Chile, succeeding the magnitude 8.8 Maule earthquake", *Engineering Structures*, 76, 324–338

Macdonald, J. H. G., Daniell, W. E. 2005. "Variation of modal parameters of a cable–stayed bridge identified from ambient vibration measurements and FE modeling", *Engineering Structures*, 27, 1916–30.

Maeda, M., Matsukawa, K., Ito, Y. 2014, "Revision of guideline for post-earthquake damage evaluation of RC buildings in Japan", Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering July 21–25, Anchorage, Alaska.

Maier, A. Schmidt, R. Oswald-Tranta, B. Schledjewski, R. 2014. "Non-destructive thermography analysis of impact damage on large-scale CFRP automotive parts", Materials 7, 413–429.

Matlab. 2012 The MathWorks, Inc., Natick. Massachusetts: United States; 2012.

Na, S. Lee, H.K. 2012. "A technique for improving the damage detection ability of the electro-mechanical impedance method on concrete structures", Smart Mater. Struct. 21, 85024–85032.

Nateghi-A, F. 1997. "Seismic upgrade design of a low-rise steel building", Engineering Structures, 19, 954–963.

Radzienski, M. Krawczuk, M. Palacz, M. 2010. "Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters", Mech. Syst. Sig. Process. 25, 2169–2190.

Ramos, L. F., De Roeck, G., Lourenço, P. B., Campos-Costa, A. 2010., "Damage identification on arched masonry structures using ambient and random impact vibrations". Engineering Structures, 32, 146–162.

Sevim, B., Altunışık, A. C., Bayraktar, A., 2012. "Earthquake behavior of Berke arch dam using ambient vibration test results", Journal of performance of constructed facilities, 26(6), 780–92.

Shi, Z.Y. Law S. Zhang ,L.M., 1998, "Structural damage localization from modal strain energy change", Journal of Sound and Vibration 218, 825–844.

Shiradhonkar, S. R., Shrikhande, M. 2011. "Seismic damage detection in a building frame via finite element model updating", Computers and Structures, 89, 2425–2438.

Sohn, H. Law, K.H. 2000, "Application of load-dependent Ritzvectors to Bayesian probabilistic damage detection", Probabilistic Engineering Mechanics 15, 139–153.

- Theodorakeas, P. Avdelidis, N.P. Hatzioannidis, I. Cheilakou, E. Marini, R. Kou, M. 2015. "Comparative evaluation of aerospace composites using thermography and ultrasonic NDT techniques", Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 9485, 1–12.
- Turker, T., Bayraktar, A. 2014, "Vibration based damage detection in a scaled reinforced concrete building by FE model updating", Computers & Concrete, 14(1), 73–90.
- Ventura, C., Laverick, B., Brincker, R., Andersen, P. 2003. "Comparison of Dynamic Characteristics of Two Instrumented Tall Buildings". In Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC), Kissimmee, Florida.
- Viola, E. Federici, L., Nobile, L. 2001. "Detection of crack location using cracked beam element method for structural analysis", Theoretical and Applied Fracture Mechanics 36, 23–35.
- Weng, S, Zhu, H.P. Xia, Y. Mao, L. 2013. "Damage detection using the eigenparameter decomposition of substructural flexibility matrix", Mech. Syst. Sig. Process. 34, 19–38.
- Yan, Y.J. Cheng, L. Wu, Z.Y. Yam, L.H. 2007. "Development in vibration-based structural damage detection technique", Mech. Syst. Sig. Process. 21, 2198–2211.
- Zheng, Z. D., Lu, Z. R., Chen, W. H., Liu, J. K. 2015, "Structural damage identification based on power spectral density sensitivity analysis of dynamic responses", Computers and Structures, 146, 176–184.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. FUAT ARAS
Proje No:	116M254
Proje Başlığı:	Betonarme Yapılarda Yapısal Hasarların Yapı Dinamik Özelliklerine Olan Etkilerinin Araştırılması Ve Titreşim Analizleri İle Hasar Tespiti Yapılması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	SEYİT ÇERİBAŞI
Danışmanlar:	F. NECATİ ÇATBAŞ (Yurt Dışı)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İSTANBUL MEDENİYET Ü. MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/07/2017 - 01/10/2019
Onaylanan Bütçe:	370922.0
Harcanan Bütçe:	271472.0
Öz:	Betonarme binaların yapısal hasarlar karşısında davranış değişikliklerinin belirlenmesi, oluşabilecek yapısal hasarların varlığının ve yerinin tespit edilmesi önemli bir konudur. Bu projede, yıkılması planlanan iki adet altı katlı betonarme yapıya, yapıların hasarsız ve beş farklı kademede hasarlı halleri için Operasyonel Modal Analiz (OMA) prensipleriyle titreşim analizleri uygulanmıştır. Çalışılan binalardan birisinin zemin katında bölme duvarları yoktur. Proje kapsamında üç adet kolon ve bir adet kirişe verilen hasarlar; Hafif Hasar ? 1 (HH1), Hafif Hasar ? 2 (HH2), Hafif Hasar ? 3 (HH3), Ağır Hasar ? 1 (AH1) ve Ağır Hasar ? 2 (AH2) olarak isimlendirilmiştir. Hafif Hasar ismi yapı elemanlarında darbeli olarak pas payı dökülmesi ve donatının ortaya çıkarılması durumu için kullanılırken, Ağır Hasar ismi elemanın çekirdek betonu kırılıncaya kadar darbeye maruz kalması için kullanılmıştır. Yapı dinamik modlarında hasar bölgesinin dinamik hareketi birinci modda ortaya çıktığı için değerlendirmelerin birinci modda en belirgin şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. Hasar nedeni frekans azalması zemin katında bölme duvarları olmayan binada %4'ü geçmekteyken diğer binada %3'e ulaşmaktadır. Hasarlar yapıların mod şekillerinde belirgin değişikliğe neden olmazken, AH1 ve AH2 her iki yapıda modlara düşey yönde yer değiştirme kazandırmıştır. Gerçekleştirilen analizler sayısal olarak da doğrulanmıştır. Hasarlı yapılardan elde edilen titreşim kayıtlarının, yapıların hasarsız durumu için titreşim kayıtlarının elde olmaması durumunda kullanılabilirliği sorgulanmıştır. Hasarın yapıda genel davranışta beklenmeyen bir mod oluşturmaması durumunda hasar varlığını işaret edebileceği tespit edilmiştir. Bu proje kapsamında elde edilen sonuçlara ve çalışılan yapıların genel özelliklerine göre hasar tespit yöntemi olarak dinamik mod şekillerini baz alan bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemde, yapı dinamik mod şekillerinde hasar seviyelerinde oluşacak değişimler Görelî Modal Yer Değiştirmelerin Değişimine bağlanmıştır. Önerilen yöntemin hasarlı bölgenin hareketini içeren dinamik mod dikkate alındığında iyi sonuçlar verdiği, ancak uygun eşik değerlerin tespiti için bu konuda daha fazla deney yapılması gerekliliği görülmüştür.
Anahtar Kelimeler:	Betonarme binalar, hasar tespiti, titreşim analizleri, yapısal hasarlar
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır