



# **Demiryolu Köprülerinin Umumi ve Periyodik Kontrollerinin İyileştirilmesi İçin Çelik Bir Demiryolu Köprüsünün Yapı Sağlığının Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi Tekniği İle İzlenmesi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 214M029**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Serap KAHRAMAN**

## Araştırmacılar:

Doç. Dr. Özgür ÖZÇELİK (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Carmen AMADDEO (İzmir Ekonomi Üniversitesi)

## Bursiyerler:

Doruk YORMAZ (Doktora, Mezun)

Özgür GİRGİN (Yüksek Lisans, Devam)

Gülser ERYILMAZ (Lisans, Mezun)

Mustafa USLU (Lisans, Mezun)

KASIM 2017  
İZMİR



## ÖNSÖZ

Sunulan projenin temel amacı, sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı hasar tahmin yönteminin Uşak ili sınırları içerisindeki Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan; yüz yılı aşkın süredir hizmet altındaki Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik kafes demiryolu köprüsüne uygulanmasıdır. Böylece, hâlen düzenli olarak yapılmakta olan köprü kontrollerinin sayısallaşabilir/modellenebilir yöntemlerle iyileştirilmesi; olası gizli hasarların belirlenmesi, yapının hasar görülebilirliği konusundaki mevcut belirsizliğin azaltılması hedeflenmektedir. Proje kapsamında, duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesine dayanan bir yöntemin çalışılması hedeflenmiştir. Bu yöntemde, yapının sonlu elemanlar modelinin fiziksel parametreleri – dolayısıyla modal parametreleri, yapının farklı zamanlara (veya hasar durumuna) denk gelen ve yerinde ölçümler ile belirlenen modal parametreleriyle eşleşmesi sağlanacak şekilde güncellenmektedir. Güncelleme işlemi modal parametrelerin bir fonksiyonu olan objektif fonksiyonunun optimizasyon problemi çerçevesinde minimize edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Güncellenmiş olan bu modal parametreler hasarın varlığını, yerini ve miktarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Modal parametrelerin güncellenmesine dayanan bu yöntemde deney anındaki ortamsal sıcaklığın bu köprü özelinde modal parametrelerin tahminine ve bunun sonuçlara olan etkisi de araştırılmıştır. Projede yapılan tüm çalışmalara ait finansal destek 214M029 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafında sağlanmıştır.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖNSÖZ	i
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – LİTERATÜR ÖZETİ</b>	<b>3</b>
<b>BÖLÜM ÜÇ – TEORİK ARKAPLAN</b>	<b>6</b>
3.1 Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi Tabanlı Hasar Tahmin Yöntemi	6
3.1.1 Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Hazırlanması	7
3.1.2 Parametrizasyon İşlemi ve Hasar Fonksiyonu Tanımlanması	7
3.1.3 Amaç Fonksiyonu ve Duyarlık Matrislerinin Oluşturulması	9
3.1.4 Optimizasyon Algoritması ile Çözüm Aşaması	11
3.1.5 Uygulanan Yönteme Ait Akış Şeması	11
3.2 Sistem Tanımlama Yöntemleri	13
3.2.1 NExT-ERA Yöntemi	14
3.2.2 EFDD Yöntemi	15
3.2.3 SSI-Data Yöntemi	16
3.3 ARTEMIS® Hasar Tespit Yöntemi	17
3.4 Modal Güvence Kriteri	19
<b>BÖLÜM DÖRT – YÖNTEM</b>	<b>19</b>
4.1 Genel Değerlendirmeler: Saha Çalışmaları ve Modal Parametre Tahmini	20
4.2 Analitik/Sayısal Model ve Sonlu Elemanlar Modeli Güncelleme Çalışmaları	21

<b>BÖLÜM BEŞ – 199+325 ÇELİK DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN ÖZELLİKLERİ</b>	<b>21</b>
<b>BÖLÜM ALTI – SAHA ÇALIŞMALARI</b>	<b>25</b>
6.1 Köprü Testi Çalışmaları (Test-1/Kış Ölçümleri)	25
6.1.1 Köprü Testi Öncesi Çalışmalar (Test-1/Kış Ölçümleri)	26
6.2 Köprü Testi Çalışmaları (Test-2/İlk Bahar ve Test-3/Yaz Testleri)	30
6.2.1 Köprü Testi Öncesi Çalışmalar (Test-2 ve Test-3)	31
6.3 Ölçüm Ekipmanları	33
<b>BÖLÜM YEDİ – TEST SONUÇLARI</b>	<b>34</b>
7.1 Sistem Tanımlama Çalışmaları (Modal Parametre Tahminleri)	34
7.2 Test-1 Sonuçları	35
7.3 Test-2 Sonuçları	39
7.4 Test-3 Sonuçları	42
7.5 Sistem Tanımlama Yöntemleri ile Elde Edilen Deneysel Köprü Modları	45
7.6 Sıcaklık Değişiminin Modal Parametre Tahmin Sonuçlarına Etkisi	51
<b>BÖLÜM SEKİZ – SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI</b>	<b>54</b>
8.1 Giriş	54
8.2 SAP2000 Modeli: Köprü Başlangıç Detaylı Modeli	56
8.3 FEDEASLab Modeli: Köprü Başlangıç Modeli	62
8.4 CSI Bridge Modeli: Köprü Başlangıç Modeli	66
<b>BÖLÜM DOKUZ – CSI BRIDGE MODELİ ve ARTEMIS HASAR TAHMİN MODÜLÜ KULLANILARAK YAPILAN HASAR TESPİT ÇALIŞMALARI</b>	<b>75</b>
9.1 Giriş	75
9.2 Zaman Tanım Alanı Analizleri	78
9.3 Verilerin İşlenmesi	80
9.4 Hasar Senaryoları	82

<b>BÖLÜM ON – SONLU ELEMANLAR MODELİ GÜNCELLEME/OPTİMİZASYON ve HASAR TESPİT ÇALIŞMALARI</b>	<b>87</b>
10.1 Sayısal Modeller Üzerinde Model Güncelleme ve Hasar Tahmin Çalışmaları	87
10.1.1 Sayısal Uygulama - 1	87
10.1.2 Sayısal Uygulama - 2	91
10.1.3 Sayısal Uygulama - 3	95
10.1.4 Sayısal Model Çalışmalarına İlişkin Ara Sonuçlar	99
10.2 199+325 Çelik Demiryolu Köprüsünün Duyarlık Tabanlı Sonlu Elemanlar Model Güncelleme Çalışmaları ve Hasar Senaryoları	99
10.2.1 Hasar Senaryosu - 1	103
10.2.2 Hasar Senaryosu - 2	105
10.2.3 Hasar Senaryosu - 3	106
<b>BÖLÜM ON BİR – DANIŞMAN/RAPORTÖR GÖRÜŞLERİ DOĞRULTUSUNDA HAZIRLANAN EK DEĞERLENDİRME</b>	<b>108</b>
<b>BÖLÜM ON İKİ – SONUÇLAR</b>	<b>117</b>
<b>BÖLÜM ON ÜÇ – GELECEKTE YAPILMASI PLANLANAN ÇALIŞMALAR</b>	<b>121</b>
<b>BÖLÜM ON DÖRT – SAĞLANAN ALTYAPI OLANAKLARININ BİLİM ALANLARINDAKİ KATKILARI</b>	<b>122</b>
<b>BÖLÜM ON BEŞ – SAĞLANAN ALTYAPI OLANAKLARININ EĞİTİM ALANLARINDAKİ KATKILARI</b>	<b>122</b>
<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>123</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>123</b>
<b>EKLER</b>	<b>128</b>
<b>EK-1</b>	<b>129</b>
<b>EK-2</b>	<b>130</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.199+325 Çelik demiryolu köprüsü genel görünümü	2
Şekil 2. Boyutsuz {ae} güncelleme faktörlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki hasar dağılımının elde edilmesinde kullanılacak hasar parametreleri (Teughels, 2003)	8
Şekil 3. Programa ait akış şeması	13
Şekil 4. 199+325 köprüsü ilk hal projesi (yıl 1896)	22
Şekil 5. 199+325 demiryolu çelik köprüsü	22
Şekil 6.199+325 Demiryolu çelik köprüsü eleman detayları: (a) kafes kirişlerin kolon üstündeki mesnetleri, (b) köprünün iki kolon ayağı arasındaki bir açıklığı, (c)kolonların kâgir temeller üzerindeki mesnet detayı ve (d) temel içindeki galeride bulunan rod ankraj detayı	24
Şekil 7. 199+325 köprüsü platformu	24
Şekil 8. Test-1 – 02.12.2015 (1. gün)	25
Şekil 9. Test-1 – 04.12.2015 (2. gün)	26
Şekil 10. Test-1 / setup 0	27
Şekil 11. Test-1 / setup 1_1	27
Şekil 12. Test-1 / Setup-1	28
Şekil 13. Test-1 / Setup-2	28
Şekil 14. Test-1 / Setup-3	29
Şekil 15. Test-1 / Setup-4	29
Şekil 16. Köprüye ulaşım içi kullanılan mobil araç ve seyahat aşamaları	30
Şekil 17. Test-2 – 16.05.2016	30
Şekil 18. Test-3 – 28.07.2016	31
Şekil 19. Test-2 ve Test-3 / Setup-1	32
Şekil 20. Test-2 ve Test-3 / Setup-2	32
Şekil 21. Test-2 ve Test-3 / Setup-3	32
Şekil 22. Test-2 ve Test-3 / Setup-4	33
Şekil 23. Veri toplama cihazı	34
Şekil 24. Ana kiriş üzerine monte edilmiş ivmeölçer	34
Şekil 25. Referans ivmeölçerlerin gösterimi	35
Şekil 26. Test-1 yatay baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği	36
Şekil 27. Test-1 yatay baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı	37
Şekil 28. Test-1 düşey/burulma baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği	37
Şekil 29. Test-1 düşey/burulma baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı	38

Şekil 30. Test-2 yatay baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği	39
Şekil 31. Test-2 yatay baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı	40
Şekil 32. Test-2 düşey/burulma baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği	40
Şekil 33. Test-2 düşey/burulma baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı	41
Şekil 34. Test-3 yatay baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği	42
Şekil 35. Test-3 yatay baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı	43
Şekil 36. Test-3 düşey/burulma baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği	43
Şekil 37. Test-3 düşey/burulma baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı	44
Şekil 38. Köprü 1. enine modu	45
Şekil 39. Köprü 2. enine modu	46
Şekil 40. Köprü 3. enine modu	46
Şekil 41. Köprü 4. enine modu	46
Şekil 42. Köprü 5. enine modu	47
Şekil 43. Köprü 6. enine modu	47
Şekil 44. Köprü 7. enine modu	47
Şekil 45. Köprü 1. burulma modu	48
Şekil 46. Köprü 2. burulma modu	48
Şekil 47. Köprü 3. burulma modu	48
Şekil 48. Köprü 4. burulma modu	48
Şekil 49. Köprü 5. burulma modu	48
Şekil 50. Köprü 6. burulma modu	48
Şekil 51. Köprü 1. düşey modu	49
Şekil 52. Köprü 2. düşey modu	49
Şekil 53. Köprü 3. düşey modu	49
Şekil 54. Enine modlara ait modal parametre tahminlerinin yöntemden yöntemde değişimi (a) Test-1 ve (b) Test-2 sonuçları	50
Şekil 55. Test-1 ve Test-2 için (a) enine, (b) burulma ve (c) düşey modlara ilişkin tahmin değerleri (sıcaklık etkisine yakından bakış)	53
Şekil 56. 199+325 köprüsü taşıyıcı makas görünümü	54
Şekil 57. 199+325 köprüsü taşıyıcı makas eleman enkesitleri	55
Şekil 58. 199+325 köprüsü birleşim bölgesi örneği	55
Şekil 59. 199+325 köprüsü başlangıç analitik modeli	57
Şekil 60. Birleşim bölgelerinde yapılan kesit model çalışma örneği: a) güçlendirilmemiş çerçeve eleman kesiti, b) çelik plakalar ile güçlendirilmiş çerçeve eleman kesiti	57
Şekil 61. 199+325 köprüsü yay elemanlı analitik modeli	58

Şekil 62. Köprü ayağı numaraları	58
Şekil 63. Köprü kolon ayaklarının X-yönünde 10 kN (1 ton) yük altında şekil değiştirmiş durumları: (a) Köprü Ayağı-1, (b) Köprü Ayağı-2, (c) Köprü Ayağı-3, (d) Köprü Ayağı-4, (e) Köprü Ayağı-5	60
Şekil 64. Köprü ayağı mesnetleri	61
Şekil 65. Köprü ayaklarının yaylar ile modellenmesi için kullanılan model detayı	61
Şekil 66. 199+325 Köprüsünün 3-boyutlu 6 açıklıklı FEDEASLab modeli	62
Şekil 67. FEDEASLab modeline ait 1. yatay mod şekli ve frekans değeri (2.298 Hz)	63
Şekil 68. FEDEASLab modeline ait 2. yatay mod şekli ve frekans değeri (2.541 Hz)	63
Şekil 69. FEDEASLab modeline ait 3. yatay mod şekli ve frekans değeri (3.181 Hz)	64
Şekil 70. FEDEASLab modeline ait 4. yatay mod şekli ve frekans değeri (3.614 Hz)	64
Şekil 71. 199+325 çelik demiryolu köprüsü 3-boyut tek açıklık yaya yolu bulunmayan sayısal modeli	67
Şekil 72. 199+325 CSI Bridge modelinin yandan görünümü	67
Şekil 73. 199+325 CSI Bridge modelinin üstten görünümü	67
Şekil 74. 199+325 çelik demiryolu köprüsü CSI Bridge modeli yay elemanlar ve düğüm noktası yükleri	68
Şekil 75. Kabuk (shell-thin component) elemanlar ile güçlendirilmiş düğüm noktası	68
Şekil 76. (a) Çelik plakalar ile güçlendirilmiş çerçeve elemanı en kesiti (birleşim noktalarında kullanıldı), (b) güçlendirilmemiş çerçeve elemanı (birleşim elemanlarının dışında kalan kısımlar) en kesiti	69
Şekil 77. 199+325 çelik demiryolu köprüsü CSI Bridge modeli stabilite çaprazı detayı	69
Şekil 78. 199+325 çelik demiryolu köprüsü 3 boyut tek açıklık yaya yolu eklenmiş analitik modeli	70
Şekil 79. Yaya yolu ile köprü arasındaki bağlantı detayı	70
Şekil 80. (a) Korkuluk yüklerinin düğüm noktalarına tekil kuvvet olarak etki ettirilmesi, (b) çelik plakaların yaya yolu elemanlarına yayılı yük olarak etki ettirilmesi	71
Şekil 81. Yatay kurba sahip 199+325 Köprüsünün CSI Bridge programı ile oluşturulmuş 3-boyutlu 6 açıklıklı sayısal modeli	71
Şekil 82. Köprü açıklıklarının oturduğu platform ve köprü ayaklarını temsil eden farklı yönlerdeki yay elemanlar	72
Şekil 83. Farklı özelliklere sahip yay elemanlar	72
Şekil 84. Yol şeridi (tren yolu)	73
Şekil 85. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli - şekil değiştirmemiş durum	73



Şekil 86. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli:1.yatay mod şekli (2.089 Hz)	73
Şekil 87. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 2. yatay mod şekli (2.320 Hz)	73
Şekil 88. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 3. yatay mod şekli (2.780 Hz)	74
Şekil 89. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 4. yatay mod şekli (3.079 Hz)	74
Şekil 90. Referans model	76
Şekil 91. White noise sinyali	79
Şekil 92. Zaman tanım alanı analizi	80
Şekil 93. Sensör yerleşim planı (sayısal modelden toplanan veriler de bu noktalara karşılık gelmektedir)	80
Şekil 94. 1 nolu kanala ilişkin çıktı/tepki ivme verisi	81
Şekil 95. Referans model için stabilizasyon diyagramı	81
Şekil 96. Hasar senaryosu-1	83
Şekil 97. Hasar senaryosu-2	83
Şekil 98. Hasar senaryosu-3	83
Şekil 99. Referans eşik değeri	86
Şekil 100. Hasar senaryoları grafiği	86
Şekil 101. İki ucu ankastre sayısal kiriş modeline ilişkin parametreler	88
Şekil 102. Kiriş eleman uzunluğu boyunca tanımlanan hasar parametreleri	88
Şekil 103. Analitik Uygulama – 1 için a) mod 5 ve b) mod 7' ye ait başlangıç durum, hasarsız durum, hasarlı durum ve güncellenmiş son duruma ait görseller	90
Şekil 104. Tek kat – tek açıklıklı analitik yaylı çerçeve modeline ilişkin parametreler	92
Şekil 105. Analitik Uygulama – 2 için a) mod 3 ve b) mod 5' e ait başlangıç durum, hasarsız durum, hasarlı durum ve güncellenmiş son duruma ait görseller	94
Şekil 106. 5 açıklıklı kiriş modeline ilişkin parametreler	96
Şekil 107. Kiriş eleman uzunluğu boyunca tanımlanan hasar parametreleri	96
Şekil 108. Sayısal Uygulama-3 için a) 9. ve b) od 10. modlara ait başlangıç durum, hasarsız durum, hasarlı durum ve güncellenmiş son duruma ait görseller (hasarlı ve güncellenmiş durum birebir örtüşmektedir, bu nedenle grafikte tek bir çizgi ile gösterilmişlerdir)	99
Şekil 109. 199+325 Çelik demiryolu köprüsünün kolon ayak numaralarının da gösterildiği güncelleme işlemi için kullanılacak olan FEDEASLab'de modellenmiş eşdeğer kiriş modeli	102

Şekil 110. FEDEASLab eşdeğer köprü modeli için hasar senaryosu - 1	104
Şekil 111. FEDEASLab eşdeğer kiriş modeli için Hasar senaryosu - 2	105
Şekil 112. FEDEASLab eşdeğer kiriş modeli için Hasar senaryosu - 3	107
Şekil 113. Köprü modal parametreleri üzerinde etkisi olan elemanların gösterimi	109
Şekil 114. İki açıklıklı referans FEDEASLab köprü modeli için hasar senaryosu	109
Şekil 115. DMG-4 hasar senaryosu grafiği	112

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 1. Test-1 iki farklı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilen modal parametrelerin kıyaslaması	38
Tablo 2. Test-2 iki farklı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilen modal parametrelerin kıyaslaması	41
Tablo 3. Test-3 iki farklı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilen modal parametrelerin kıyaslaması	44
Tablo 4. Farklı sıcaklıkta yapılan testlere ilişkin modal parametrelerin kıyaslaması	51
Tablo 5. Köprü ayağı rijitlikleri (başlangıç rijitlikleri)	59
Tablo 6. Kolonların yaylarla modellendiği başlangıç sayısal modele ait doğal titreşim frekansları	61
Tablo 7. İlk 5 moda ait FEDEASLab-SAP2000 frekans değerleri karşılaştırması	65
Tablo 8. İlk 5 moda ait FEDEASLab-SAP2000 MAC (Modal Assurance Criterion) değerleri	66
Tablo 9. İlk 5 moda ait CSI Bridge-SAP2000-FEDEASLab modellerinden elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırması	74
Tablo 10. FEDEASLab-SAP2000-CSI Bridge programlarının benzer ve farklı özelliklerinin karşılaştırılması	75
Tablo 11. CSI Bridge modelinin deneme-yanılma yöntemi ile kalibre edilmiş durumuna ait frekansları ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	77
Tablo 12. Deneme-yanılma yöntemi ile yapılan güncelleme çalışması sonucunda elde edilen yay rijitlikleri ile başlangıç yay rijitliklerinin karşılaştırılması	78
Tablo 13. Frekans kıyaslaması	82
Tablo 14. Referans model DMG1 modeli kıyaslaması	84
Tablo 15. Referans model DMG2 modeli kıyaslaması	85
Tablo 16. Referans model DMG3 modeli kıyaslaması	85
Tablo 17. Sayısal Uygulama-1 örneğine ait hasarlı, hasarsız ve güncellenmiş modelin titreşim frekansları ve MAC değerleri	89
Tablo 18. Sayısal Uygulama-1 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin Elastisite Modülü değerleri	90

Tablo 19. Sayısal Uygulama-2 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin doğal titreşim frekans ve MAC değerleri (Durum 1: hasar parametrelerine kısıt atanmadı)	92
Tablo 20. Sayısal Uygulama-2 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin doğal titreşim frekans ve MAC değerleri (Durum 2: çerçeve elemanlarında hasar gelişmeyecek şekilde hasar parametreleri sınırlandı)	93
Tablo 21. Sayısal Uygulama-2 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin Elastisite Modülü değerleri (Durum 1 ve 2 için)	93
Tablo 22. Sayısal Uygulama-3 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin modal parametre değerleri	97
Tablo 23. Analitik Uygulama-3 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin Elastisite Modülü değerleri ve yüzde hasarları	98
Tablo 24. FEDEASLab eşdeğer giriş modeli ile deneysel sonuçlardan eşleştirilen modların MAC değerleri	102
Tablo 25. 199+325 Çelik demiryolu köprüsünün model güncellemesine ilişkin sonuçlar	103
Tablo 26. Hasar senaryosu - 1 için model güncelleme sonuçları	104
Tablo 27. Hasar senaryosu - 2 için model güncelleme sonuçları	106
Tablo 28. Hasar senaryosu - 3 için model güncelleme sonuçları	107
Tablo 29. Hasar senaryosu - 4 için model güncelleme sonuçları	110
Tablo 30. Frekans kıyaslaması	112
Tablo 31. Proje önerisinde sunulmuş proje iş paketlerini ve gerçekleştirme durumlarını gösterir tablo	120
Tablo 32. Proje önerisinde hazırlanmış olan risk tablosu	120



## ÖZET

Ülkemizde demiryolu köprüleri gibi önemli yapılarda dâhi zorunlu periyodik muayeneler gözleme dayalı olarak sürdürülmektedir. Sübjektif (kontrolü yapan teknik elemanın kişisel gayretine ve deneyimine bağlı) karar esaslı biçimde sürdürülen köprü muayenelerinin, gizli (gözle görülemeyen) hasarları teşhis etmekte yetersiz kalacağı, ya da ancak hasar ileri boyutlara ulaşmış olduğunda görsel teşhis yapılabileceği açıktır. Sayısallaşabilir/modellenebilir niteliğiyle yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) yöntemleri, gözleme dayalı değerlendirme sürecinin geliştirecek, değerlendirme sürecini objektif ölçütlere bağlayacak ve olası gizli hasarların zamanında fark edilerek gerekli önlemlerin alınmasını sağlayacaktır. Uzun süredir hizmet vermekte olan demiryolu köprüleri muayenelerinde YSİ yöntemlerinin sürece dâhil edilmesi kritik ve önemli bir boşluğu dolduracaktır.

Projenin temel amacı, önerilen sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı YSİ yönteminin Uşak ili sınırları içerisindeki Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan; yüz yılı aşkın süredir hizmet altındaki Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik kafes demiryolu köprüsüne uygulanmasıdır. Böylece, hâlen düzenli olarak yapılmakta olan köprü kontrollerinin sayısallaşabilir yöntemlerle iyileştirilmesi; olası gizli hasarların belirlenmesi, yapının hasar görülebilirliği konusundaki mevcut belirsizliğin azaltılması hedeflenmiştir.

Proje kapsamında duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesine dayanan bir hasar tahmin yöntemi çalışılmıştır. Bu yöntemde, yapının sonlu elemanlar modelinin fiziksel parametreleri – dolayısıyla modal parametreleri, yapının farklı zamanlara denk gelen ve yerinde ölçümler ile tahmin edilen modal parametreleriyle eşleşmesi sağlanacak şekilde güncellenmektedir. Güncelleme işlemi modal parametrelerin bir fonksiyonu (artık fonksiyonu) olan objektif fonksiyonunun optimizasyon problemi çerçevesinde minimize edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Güncellenmiş olan bu modal parametreler hasarın varlığını, yerini ve miktarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Modal parametrelerin güncellenmesine dayanan bu yöntemde deneyler sırasındaki ortamsal sıcaklığın modal parametrelerin tahminine ve bunun hasar tahmin sonuçlarına olan etkisi de araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik Demiryolu Köprüsü, Yapı Sağlığının İzlenmesi, Duyarlılık Tabanlı Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi, Modal Parametre Tahmini, Sıcaklık Etkisi.



## ABSTRACT

In our country Turkey visual inspection techniques are used for health and safety checks of bridges. Outcomes of such methods are highly dependent on the experience and the personal skills of the technician, and are most of the times unable to detect hidden structural damages. Detected damages by these methods are usually too severe and progressed that most of the times; it is too late to take any precaution. From this point of view, the vibration based SHM with the potential of detecting small invisible damage must be included in the standard visual inspection techniques.

The main purpose of the proposed project is to apply finite element model updating based structural health monitoring technique to the 199+325 railroad steel truss bridge on the route of Basmane-Dumlupınar which is under service for more than a century. Application of this technique will fill up critical gaps in the visual inspection techniques. With this project, it is targeted to make this technique a part of standard inspection techniques used by Turkish Republic State Railroads Department.

It is aimed that sensitivity-based finite element model updating based structural health monitoring technique is studied and applied to the aforementioned bridge. In this method, physical parameters of a finite element model are updated, which in turn updates the modal parameters of the model, by matching the analytical modal parameters with their experimental counterparts obtained at different times of the monitored structure. Updating is performed by minimizing an objective function, which is a function of the difference between analytical and experimental modal parameters, within an optimization framework. Updated physical parameters are used to identify the presence, location, and extent of the damage. Also, the effects of ambient temperature on the modal parameter estimation results, and therefore on the results on the SHM technique are also investigated.

**Keywords:** Steel Railroad Bridge, Structural Health Monitoring, Sensitivity-based Finite Element Model Updating, Modal Parameter Identification, Effect of Temperature.

## 1.GİRİŞ

Özellikle demir yolları ağında çelik köprüler sıklıkla kullanılmaktadır. Çelik köprülerin, kafes kirişli, dolu gövdeli, kemer tipi ve asma köprüler gibi birçok farklı tipte uygulamaları bulunmaktadır. Ayrıca, farklı uygulama örnekleri olarak tabliyenin alt başlıkta veya üst başlıkta olması gibi örnekler de görülmektedir. Çelik demiryolu köprülerinin birçoğunun uzun yıllar önce inşa edilmiş olduğu, bu köprülerin uzun yıllardır dış etkilere maruz olması, etkiyen yüklerin giderek artması; demiryolu trafiğindeki artış gibi unsurlar, söz konusu köprülerde daha sayısal (objektif), hassas ve güvenilir kontrol mekanizmalarının oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır.

Yapı üzerindeki sensörler aracılığıyla toplanan dinamik verinin, farklı şekillerde işlenmesi suretiyle yapı sağlığı hakkındaki bilginin belirlendiği titreşim tabanlı yapı sağlığı izleme (YSİ) yöntemleri bu eksikliği giderebilecek niteliktedir. Yöntemin ihtiyaç duyduğu parametrelerin tahribatsız olarak belirlenebilmesi nedeniyle, özellikle servis altında bulunan yapılarda kullanılması cazip niteliktedir. Sayısallaşabilir/modellenebilir niteliğiyle YSİ yöntemleri, halen gözleme dayalı (sübjektif) olarak sürdürülen kontrol sürecinin bir parçası haline gelecek, kontrol/değerlendirme sürecini objektif ölçütlere bağlayacak, olası gizli hasarların zamanında fark edilerek gerekli önlemlerin alınmasını sağlayacaktır. Özellikle, karayolu köprülerine kıyasla daha uzun süredir hizmet vermekte olan demiryolu köprüleri muayenelerinde YSİ yöntemlerinin sürece dâhil edilmesi kritik ve önemli bir boşluğu dolduracaktır.

Sunulan projenin temel amacı, önerilen sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı YSİ yönteminin Uşak ili sınırları içerisindeki Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan; yüz yılı aşkın süredir hizmet altındaki Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik kafes demiryolu köprüsüne uygulanmasıdır (Şekil 1). Böylece, hâlen düzenli olarak yapılmakta olan köprü kontrollerinin sayısallaşabilir/modellenebilir yöntemlerle iyileştirilmesi; olası gizli hasarların belirlenmesi, yapının hasar görebilirliği konusundaki mevcut belirsizliğin azaltılması hedeflenmektedir.

Düzenli olarak yapılmakta olan köprü kontrollerinin daha az belirsizlik içeren sayısal yöntemlerle yapılması; bu yöntemin demiryolları köprülerinin işletici kuruluşu olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları'na kazandırılması hedeflenmektedir. Proje kapsamında ele alınacak olan köprü çelik kafes demiryolu köprüsüdür. Ancak, yöntem diğer türlerdeki köprüler için de uygulanabilir.



Şekil 1.199+325 Çelik demiryolu köprüsü genel görünümü

Detayları raporun ilerleyen kısımlarında verilen, YSİ tabanlı hasar tespiti yöntemi gerçek köprünün sistem tanımlama yöntemleri ile tahmin edilen modal parametrelerini kullanmaktadır. Proje kapsamında, önce titreşim tabanlı sistem tanımlama yöntemleri ile köprünün modal parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler, köprünün dinamik özellikleri hakkında çok değerli bilgiler içermektedir. Köprü üzerinden toplanan veriler kullanılarak tahmin edilen ve köprünün dinamik davranışını karakterize eden bu modal parametreler ortamsal sıcaklık parametresine bağlı olarak önemli değişiklikler gösterebilmektedir. Sıcaklık etkisinin modal parametreler üzerinde yarattığı etkinin niceliksel olarak belirlenmesi hizmet vermekte olan ve incelenen demiryolu çelik köprüsünün dinamik davranışı hakkında önemli bilgiler verecektir. Sıcaklık etkisinin modal parametreler üzerinde yarattığı etki belirlendikten sonra bu etkinin hasar tespit yöntemi üzerinde yaratabileceği etki de anlaşılmış olacaktır.

Yüz yılı aşkın bir süredir hizmet veren bir çelik köprüde meydana gelme ihtimali yüksek hasar türleri; yorulma, kesit azalması, köprü malzemesinin mekanik özelliklerindeki bozulmalar, bir kaza sonrası oluşacak yapısal kusurlar ve eleman birleşim detaylarında ortaya çıkabilecek olası sorunlar olarak tanımlanabilir. Proje kapsamında, farklı hasar türlerinden birini veya birden fazlasını barındıran hasar senaryoları altında sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı YSİ yönteminin hangi hasarı daha etkin ve ne şekilde yakaladığı da incelenmeye çalışılmıştır.



Güvenilir bir YSİ yöntemi geliştirmek için, gerçekçi hasar senaryolarının modal parametrelere olan etkisinin incelenmesi gereklidir. Ancak, bu tür bir çalışma için gerçek yapılara hasar vermek gerekecektir. Böyle bir işlem ise önerilen bu projede incelenmesi hedeflenen çelik köprü gibi halen kullanılmakta olan yapılar için mümkün değildir. Bu durumda, kalibrasyonu iyi yapılmış detaylı sonlu elemanlar modellerinden elde edilen simülasyon verisinin kullanılmasından başka bir seçenek kalmamaktadır. Özellikle, bir doğal afet veya kaza sonrası oluşacak hasarların tespiti ve seyrüseferin devamlılığı önem arz ettiğinden, kalibre edilmiş bir sonlu elemanlar modelinin olması bu projenin önemli diğer hedeflerinden birisidir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Köprüler ekonomik ömürleri yüz yıl olacak şekilde inşa edilmektedir. Ülkemizde demiryolu inşaatları 19. yüzyılda Osmanlı İmparatorluğu zamanında başlamış olduğundan ve Türkiye Cumhuriyeti'nin ilk dönemlerinde hızla devam ettiğinden demiryolu ağının en önemli bileşenlerinden olan köprüler de bu dönemlerde inşa edilmeye başlanmıştır. Demiryolu ağı içerisinde elli ve yüz yılı aşkın süredir hizmet vermekte olan çok sayıda köprü bulunmaktadır. Bahse konu bu köprüler, kullanımda oldukları süre boyunca, hem artan dingil basınçları hem de çevresel koşulların yarattığı zorlayıcı durumlar nedeniyle hasara neden olan farklı türdeki etkilere maruz kalmaktadır. Bu köprülerin işletim bakım ve onarımından sorumlu olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) yapı sağlığının devamlılığı konusundaki çalışmalarını farklı periyotlarda yapılan kontroller ile sürdürmektedir. Yapılan kontroller gözlemsel olup özellikle seyrüseferin duraklamaya uğramaması açısından önemlidir. Bunlar ilkbahar ve sonbaharda olmak üzere yılda iki kez yapılan umumi kontroller ve altı yılda bir Nisan-Ağustos dönemi arasında yapılan periyodik kontrollerdir. Ayrıca herhangi bir doğal afet söz konusu olduğunda afet sonrası köprünün durumu ile ilgili münferit kontroller yapılmaktadır (Akar, 2009). Gözle yapılan bu tip kontrollerde saklı/gizli kalmış hasarları belirlemek son derece zordur. Bir hasarın gözlem yoluyla yapılan kontrollerde saptanabilmesi, ancak hasarın gözle görülebilir boyutlara ulaşması ile mümkün hale gelmektedir. Böyle bir durumda ise hasarın tespiti için geç kalınmış olunabilir. Örneğin 2012 yılı içerisinde meydana gelen Filyos Çayı Köprüsü'nün çökmesinde, köprüde oluşan hasarların önceden tespit edilememesinin payı büyüktür.

Yapı sağlığı izleme (YSİ) çalışmaları son 20 yılda üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilen ve ülkemizde de gelişme sürecinde olan bir konudur. Olası felaketler düşünüldüğünde, uzun süredir hizmette bulunan demiryolu köprülerinin yapı sağlığının izlenmesi, ivedilikle ele alınmalı ve incelenmelidir. Bu proje kapsamında yapı sağlığı izleme çalışması yapılması planlanan 199+325 demiryolu köprüsü üzerinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi araştırmacıları tarafından yapı izlemesi kapsamında analitik, yerinde dinamik ölçüm ve

deneysel çalışmalar yürütülmüş, sonuçlar bir yüksek lisans tezinde (Akın, 2012) derlenmiştir. Çalışmada, 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller kullanılarak kapasite ve güvenilirlik analizleri hesaplamaları gerçekleştirilmiş, tren/katar ve deprem yükleri altında köprüdeki yapısal elemanların durumu incelenmiş; ancak bunun için kullanılan sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonuna ilişkin bir çalışma yürütülmemiştir. Ayrıca az sayıda ivmeölçer kullanıldığı için sadece düşey moda ait (az sayıda) modal parametre elde edilmiştir. Tezde, toplanan ivme verisinin oldukça gürültülü olduğu da belirtilmiştir. Bu da modal parametre tahminindeki belirsizliği arttıran bir faktördür. Ölçümler sırasında rüzgâr, sıcaklık ve nem ölçümleri alınmış; ancak bu faktörlerin modal parametrelere olan etkisi proje kapsamının dışında olduğu için incelenmemiştir. Tez çalışmasının YSİ kapsamında bir hedefi bulunmadığından, köprü üzerinde bir YSİ çalışmasının yürütülmesine halen büyük bir ihtiyaç vardır. Daha önce aynı köprünün farklı bir kapsamda çalışılmış olması, bu projede planlanan çalışmaları destekleyecek, sonuçlar açısından kıyaslama yapma olanağı sağlayacaktır.

Türkiye’de bir grup araştırmacı tarafından genellikle de karayolu köprüleri üzerinde bir seri sistem tanımlama/operasyonel modal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Temel olarak tüm bu çalışmalarda köprüler üzerine yerleştirilen ivmeölçerler ile dinamik ölçümler alınmış, bu dinamik ölçümler kullanılarak köprülerin modal parametreleri tahmin edilmiş, sonrasında ise köprülere ait sonlu elemanlar modeli deneme-yanılma yöntemi ile kalibre edilmiştir. Çalışılan köprülerin tümü betonarme köprülerdir (Altunışık vd., 2011a; Altunışık vd., 2011b; Bayraktar vd., 2009). Bu çalışmalarda, çevresel şartların modal parametrelere olan etkisi üzerinde durulmamıştır. Ancak, çevresel şartların sistem tanımlama/operasyonel modal analiz sonuçlarına etkisi ihmal edilemeyecek seviyede olabilir. 2014 yılında yapılan bir çalışmada (Bayraktar vd., 2014), betonarme bir otoyol köprüsü olan Gülburnu Köprüsü incelenmiş; ortamsal sıcaklığın modal parametrelere olan etkisi ele alınmıştır. Bu amaçla, köprü üzerinden iki farklı tarihte, değişik ortam sıcaklıklarında veri toplanmış ve modal parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar modal parametrelerden biri olan doğal titreşim frekansı değerlerinde %14’e yaklaşan farklar olduğunu göstermiştir; ancak çevresel etkilerden biri olan sıcaklık değişiminin köprünün öznel durumuna (malzeme, geometri, mesnet şartları vs.) bağlı olabileceği de unutulmamalıdır. Bir başka deyişle her köprüde sıcaklık etkisine bağlı modal parametre değerlerinin bu ölçüde değişeceği beklenmemelidir. Nitekim, ileriki bölümlerde ayrıntısının sunulacağı gibi 199+325 köprüsü özelinde sıcaklık etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu bulgulanmıştır.

Çelik otoyol köprüsü olan Eynel Köprüsü üzerinde yapılan benzer bir çalışmada (Altunışık vd., 2012) operasyonel modal analiz yöntemleri ile modal parametreleri bulunan çelik köprünün daha sonra deneme-yanılma yöntemi ile kalibre edilmiş bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve kalibrasyondan önce ve sonra yapılan dinamik analiz sonucunda modeller arasında önemli yer değiştirme farkları olduğu bulunmuştur. Ancak, bu çalışmada da sıcaklık etkisi üzerinde durulmamıştır. Yukarı bahsi geçen tüm çalışmalarda deneme-yanılma yöntemleri ile sonlu elemanlar modeli kalibre edilmiştir; bu tip kalibrasyonun olumsuz yönlerine Yöntem kısmında ayrıntıları ile değinilmiştir.

Sunulan projede kalibrasyon işlemi, deneysel ve sayısal modal parametreler arasındaki farkın bir fonksiyonu olan objektif fonksiyonunun bir optimizasyon probleminin çözümü çerçevesinde minimize edilmesi yoluyla subjektif hiçbir müdahale gerektirmeden gerçekleştirilmiştir. Bu açılarından önerisi yapılan projenin Türkiye’de yapılan diğer çalışmalara göre önemli farkları mevcuttur.

Takip eden metinde, projede kullanılması düşünülen YSİ ve sistem tanımlama yöntemlerine ilişkin kısa bir literatür taraması verilmiştir. Yöntemlerin avantajlarına değinilmiş, bu yöntemleri kullanırken dikkat edilmesi gereken noktalar üzerinde durulmuştur.

Yapı sağlığının izlenmesi (YSİ), gözle yapılan kontrolleri ortadan kaldırmayacak ancak onu tamamlayan/bütünleyen ve yapının dinamik karakteri hakkında niceliksel bilgiler vererek geliştiren görece yeni bir teknolojidir. Titreşim tabanlı YSİ'nin temelinde yapının dinamik parametrelerinin onun fiziksel özelliklerinin (kütle, sönüm, rijitlik) bir fonksiyonu olduğu gerçeği yatmaktadır. Bu durumda fiziksel özelliklerdeki hasara bağlı değişim yapının frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri gibi dinamik parametrelerine (modal parametreler) yansımaktadır (Doebing vd.,1996a; Doebing vd.,1996b; Sohn., 2003). YSİ'nin nihai hedefi hasar tespitinin dört seviyede (artan karmaşıklıkta) yapılmasıdır: (i) hasarın varlığı, (ii) hasarın yeri, (iii) hasarın miktarı/seviyesi, ve (iv) yapının kalan faydalı ömrü (prognosis) (Rytter, 1993). Yapının kalan faydalı ömrünün belirlenmesi için hasarlı durumunu yansıtan bir sonlu elemanlar modelinin olması mutlaka gerekmektedir.

Duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesine dayanan YSİ yöntemi, literatürde mevcut yöntemlerden biridir (Friswell vd.,1995; Mottershad vd., 2011). Bu yöntemde, yapının sonlu elemanlar modelinin fiziksel parametreleri –modal parametreleri, yapının farklı zamanlara (hasar durumuna) denk gelen modal parametreleriyle eşleşecek şekilde güncellenmektedir. Güncellenmiş olan bu modal parametreleri hasarın varlığını, yerini ve

miktarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu YSİ yöntemi bazı güncel çalışmalarda gerçek yapılara (büyük ve gerçek yapıların tüm karmaşıklığını barındıran) başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Teughles vd., 2004; Reynders vd., 2007; Moaveni vd., 2008). Bu yöntemlerin sonuçlarının doğruluğu/güvenirliliği ve uzaysal çözünürlüğü (spatial resolution) hasarın yerinin tespiti için önemli, tahmin edilen modal parametrelerinin doğruluğuna ve tamlığına bağlı olmaktadır. Tahmin edilen modal parametreler genellikle belirsizlikler içermektedir. Bu belirsizlikler genelde şu faktörlere bağlıdır: (i) ölçüm gürültüsü (sinyal/gürültü oranının küçük olması), (ii) parametre tahmin hataları, ve (iii) değişen çevresel faktörler (sıcaklık, nem vb.). Bu belirsizlikler sonlu elemanlar modelinin güncellenmesi aşamasında yayılarak (propage olarak) güncellenme sonuçlarını etkilemektedir (Moaveni vd., 2009; Clinton vd., 2006; Huth vd., 2005; Magalhas vd., 2012). Tahmin edilen modal parametrelerde yarattığı değişim açısından, sayılan faktörler arasında çevresel etkiler önemlidir (Clinton vd., 2006; Huth vd., 2005; Magalhas vd., 2012; Alampalli vd., 2000). Tarihi bir demiryolu çelik köprüsünün durum tespiti için deneysel ve analitik bir çalışma (Spyrakos vd., 2004) yürütülmüştür. Gerçekleştirilen çalışma ile tarihi köprünün sismik ve deprem yüklerini taşıma kapasitesi belirlenmiş olup, köprü analitik modeli statik ve dinamik saha ölçümlerine göre güncellenmiştir.

Sonlu elemanlar modeli güncellenmesi yöntemindeki ilk adım, yapının proje bilgileri ve yerinde gözlemlerden edinilen bilgiler kullanılarak ön/başlangıç (initial) modelinin oluşturulmasıdır. Daha sonra bu başlangıç modeli, bir referans anında (belli bir referans durumu) yapı üzerinden toplanan dinamik veri kullanılarak hesaplanmış modal parametreler kullanılarak kalibre edilir. Böylece yapının gerçek durumunu (belli bir duruma karşılık gelen inşa edilmiş durumunu) yansıtan referans modeli (reference model) oluşturulmuş olur. Referans modeli yapının hasar görmemiş durumuna karşılık gelmektedir. Referans modelin kalibrasyonunun yapıldığı tarihten sonraki diğer tarihlerde, aynı yapı üzerinde toplanan diğer dinamik veriler (modal parametreler) ise bu sefer referans modelin güncellenmesi için kullanılır. Bu yeni güncellenmiş model(ler) ile referans modeli arasında bulunan fiziksel parametrelerdeki (model parametreleri) farklar bu süre içinde yapının geçirdiği değişimi (bu değişim yapısal hasar kaynaklı olabilir ya da olmayabilir) göstermektedir.

### 3. TEORİK ARKAPLAN

#### 3.1 Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi Tabanlı Hasar Tahmin Yöntemi

Sonlu elemanlar model güncelleme yöntemi doğrusal olmayan en küçük kareler optimizasyonu problemidir. 4 ana öncülde oluşan yöntemin adımları sırasıyla aşağıda anlatılmıştır:

### 3.1.1 Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Hazırlanması

DeneySEL olarak modal parametreleri elde edilmiş köprünün proje bilgileri veya yerinde gözlemlerden edinilen bilgiler doğrultusunda uygun bir sonlu elemanlar modeli oluşturulur. Oluşturulan başlangıç modelin modal parametrelerinin; elastisite modülü, eğilme rijitliği veya enkesit alanı gibi fiziksel parametreleri manuel olarak güncellenerek yapının deney ile elde edilmiş modal parametrelere uyumu olabildiğince yaklaşık olarak sağlanır. Bu aşama güncelleme algoritmasının iyi sonuç vermesi için önemlidir; böylece yapının gerçek hasarsız durumunu yansıtan optimizasyona hazır bir referans modeli oluşturulur. Oluşturulan modelin kütle ve rijitlik matrisleri gibi özelliklerine ulaşımında kolaylık sağlanması ve model güncelleme algoritmasının programa adapte edilebilmesini sağlayacak olmasından ötürü araştırma kapsamında MATLAB® ortamında çalışan FEDEASLab sonlu elemanlar programı kullanılmıştır (Filippou, 2004).

### 3.1.2 Parametrizasyon İşlemi ve Hasar Fonksiyonu Tanımlanması

FEDEASLab ortamında oluşturulan köprü sonlu eleman modelinin fiziksel parametreleri (elastisite modülü ve yay katsayısı) güncellenecektir. Modelde, elemanın güncellenen fiziksel parametrelerinin ( $E_e$ ,  $K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_z$ ) başlangıç durumuna göreli farkını ifade eden boyutsuz güncelleme faktörü  $\{a^e\}$ , e.eleman için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$a^e = - \frac{E^e - E_{\text{referans}}^e}{E_{\text{referans}}^e} \rightarrow E^e = E_{\text{referans}}^e (1 - a^e) \quad (3.1)$$

Bu faktörler, modelin bir elemanına veya birden fazla eleman içeren grubunu etkileyecek şekilde atanabilmektedir. Fiziksel parametreler ile eleman (veya grup) rijitlik matrisi arasındaki ilişkinin doğrusal olması durumunda aşağıdaki ilişkiler geçerli olmaktadır:

$$K^e = K_{\text{ref}}^e (1 - a^e) \quad (3.2)$$

$$K = K^u + \sum_{e=1}^{n_e} K_{\text{referans}}^e (1 - a^e) \quad (3.3)$$

Burada,  $K_0^e$  ve  $K^e$  eleman rijitlik matrislerinin başlangıç ve güncellenmiş durumlarını,  $K$  global rijitlik matrisini ve  $K^u$  güncelleme sırasında rijitlik özellikleri değişmeyen eleman (veya eleman grubunun) özelliklerini,  $n_e$  ise güncelleme işlemi yapılacak eleman (veya eleman grubunu) adedini göstermektedir.

Sonlu eleman güncelleme işleminde optimizasyon probleminin iyi şartlandırılması amacıyla yapılacak olan parameterizasyon işlemi, birbirlerine komşu olan elemanların birbirlerinden bağımsız olarak güncellenmesini engelleyerek gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Örneğin çok sayıda elemandan oluşan köprü yapısı alt sistemlere ayrılacak ve

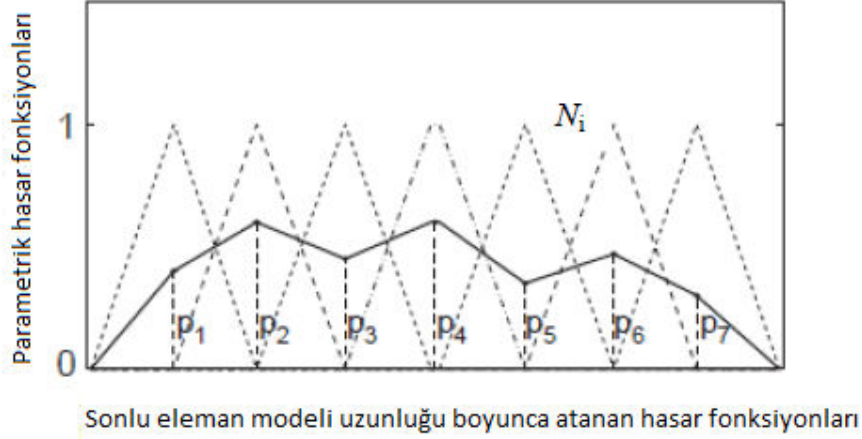
her bir gruplanmış elemana ait bir adet güncelleme parametresi atanacaktır. Şekil 2' de 1 boyutlu üçgensel bir hasar fonksiyonu örneği sunulmuştur. Bu durumda boyutsuz güncelleme faktörlerinin  $\{a^e\}$  dağılımı, tanımlanan hasar fonksiyonlarının ( $N_i$ ) doğrusal kombinasyonları ile oluşturulmuş olacaktır:

$$\begin{Bmatrix} a^1 \\ a^2 \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ a^{n_e} \end{Bmatrix}_{n_e \times 1} = \begin{bmatrix} N_1(\mathbf{x}^1) & N_2(\mathbf{x}^1) & \dots & N_{n_p}(\mathbf{x}^1) \\ N_1(\mathbf{x}^2) & N_2(\mathbf{x}^2) & \dots & N_{n_p}(\mathbf{x}^2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M & M & \dots & M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_1(\mathbf{x}^{n_e}) & N_2(\mathbf{x}^{n_e}) & \dots & N_{n_p}(\mathbf{x}^{n_e}) \end{bmatrix}_{n_e \times n} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix}_{n \times 1} \quad (3.4)$$

Burada: 'n' hasar fonksiyonu sayısını ( $N_i$  adedini) ( $n \ll n_e$ );

' $p_i$ ' 0-1 aralığında değişen hasar fonksiyonu (güncelleme) parametrelerini;

' $\mathbf{x}^e$ ' ise modeldeki e. elemanın merkez koordinatını göstermektedir.



Şekil 2. Boyutsuz  $\{a^e\}$  güncelleme faktörlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki hasar dağılımının elde edilmesinde kullanılacak hasar parametreleri (Teughels, 2003)

Şekil 2' de örnek model üzerinde 7 adet hasar fonksiyonu temsil edilmiştir. Denklem 3.4'te belirtildiği üzere, optimizasyon problemi sonucunda elde edilecek olan hasar fonksiyonunun güncelleme parametreleri  $\mathbf{p}$ , Denklem 3.1'de tanımlanan boyutsuz güncelleme faktörü vektörü  $\{a^e\}$  elemanların yüzdesel hasarları ile ilişkilendirilmektedir.  $\mathbf{N}$  hasar fonksiyonu matrisi elemanlarının kullanıcı tarafından tanımlandıktan sonra sabit değerlerden olmasından ötürü, eleman hasarlarının sadece  $p_i$  parametrelerine bağlı olduğu açıktır. Optimizasyon sonucunda elde edilecek olan sonucun hassasiyeti ise, model üzerine atanacak hasar parametresi adedi (veya yoğunluğu) ile ilgili olmaktadır.

### 3.1.3 Amaç Fonksiyonu ve Duyarlık Matrislerinin Oluşturulması

Sonlu eleman model güncelleme problemi Denklem 3.5'teki gibi analitik ve deneysel modal parametreler arasındaki farklar şeklinde ifade edilen amaç fonksiyonunun çeşitli optimizasyon algoritmalarıyla minimizasyonu sağlanarak çözülmektedir.

$$\min f(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\mathbf{p})\|^2 = \frac{1}{2} \left\| \begin{matrix} \mathbf{r}_f(\mathbf{p}) \\ \mathbf{r}_s(\mathbf{p}) \end{matrix} \right\|^2, \quad \left\{ \begin{matrix} \mathbf{r}_f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m_f} \\ \mathbf{r}_s: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m_s} \end{matrix} \right\} \quad (3.5)$$

Burada,  $\mathbf{r}$  ile temsili yapılan residual (artık) vektörünün boyutu  $m_s + m_f$  olmaktadır.  $m_f$  optimizasyon probleminde dikkate alınacak olan titreşim frekansı adedi boyutunda;  $m_s$  ise  $m_f \times$  bir moda ait mod şekli bileşeni sayısı boyutundadır.  $\mathbf{p}$  vektörü, Bölüm 3.1.2 'de anlatılan hasar parametresi sayısı boyutundadır ( $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^n$ ). Frekans ve mod şekli artıkları Denklem 3.6 ve Denklem 3.7'de tanımlanmıştır:

$$\mathbf{r}_f(\mathbf{p}) = \frac{\lambda_j(\mathbf{p}) - \lambda_j}{\lambda_j}, \quad \text{burada} \quad \lambda_j = (2\pi f_j)^2 \quad (3.6)$$

$$\mathbf{r}_s(\mathbf{p}) = \frac{\phi_j^l(\mathbf{p})}{\phi_j^l(\mathbf{p})} - \frac{\phi_j^r}{\phi_j^r} \quad (3.7)$$

Burada 'j' optimizasyon problemine temel oluşturacak mod adedini;  $\lambda_j(\mathbf{p})$ ,  $\lambda_j$  sırasıyla deneysel ve analitik olarak hesaplanan öz değerleri;  $\phi_j^l(\mathbf{p})$  ve  $\phi_j^r$  ise sırasıyla analitik ve deneysel olarak tanımlanan mod şekli bileşenlerini temsil etmektedir. Denklem 3.7 ile oluşturulan mod şekli artıkları, keyfi olarak seçilen mod şekli referans bileşenleri ( $\phi_j^l(\mathbf{p})$  ve  $\phi_j^r$ ) ile normalize edilir.

Denklem 3.5'te gösterilen amaç fonksiyonunun minimizasyonu en küçük kareler problemidir ve modal veri ile rijitlik parametrelerinin doğrusal olmayan ilişkileri göz önüne alındığında, problem duyarlık tabanlı iteratif optimizasyon yöntemiyle çözülebilecektir. En küçük kareler probleminin çözümü için amaç fonksiyonunun hasar parametrelerine ( $\mathbf{p}$ ) göre birinci ve ikinci mertebeden türevlerini içeren Gradient ve Hessian'larının hesaplanması gerekmektedir.

$$\nabla f(\mathbf{p}) = \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j(\mathbf{p}) \nabla \mathbf{r}_j(\mathbf{p}) = \mathbf{J}_p(\mathbf{p})^T \mathbf{r}(\mathbf{p}) \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 f(\mathbf{p}) = \mathbf{J}_p(\mathbf{p})^T \mathbf{J}_p(\mathbf{p}) + \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j(\mathbf{p}) \nabla^2 \mathbf{r}_j(\mathbf{p}) \approx \mathbf{J}_p(\mathbf{p})^T \mathbf{J}_p(\mathbf{p}) \quad (3.9)$$

Denklem 3.10'da gösterilen  $\mathbf{J}_p(\mathbf{p})$  Jacobian (veya duyarlık) matrisinin elemanları,  $r_j$  artıkların  $\mathbf{p}$  hasar fonksiyonu parametrelerine göre kısmi türevlerini içermektedir:

$$[\mathbf{J}_p]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\mathbf{p})}{\partial p_1} & \frac{\partial r_1(\mathbf{p})}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial r_1(\mathbf{p})}{\partial p_n} \\ \frac{\partial r_2(\mathbf{p})}{\partial p_1} & \frac{\partial r_2(\mathbf{p})}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial r_2(\mathbf{p})}{\partial p_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial r_m(\mathbf{p})}{\partial p_1} & \frac{\partial r_m(\mathbf{p})}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial r_m(\mathbf{p})}{\partial p_n} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sadece rijitlik parametresinin güncelleneceği durumlarda Jacobian matrisinin elemanları, Fox ve Kapoor (1968) tarafından elde edilen duyarlık formülleri ile hesaplanabilmektedir. Buna göre, modal parametrelerin ( $\lambda_j$  ve  $\phi_j$ ) boyutsuz güncelleme faktörü  $\{a^e\}$ 'ye göre hesaplanan modal duyarlıkları Denklem 3.11 ve Denklem 3.12'de verilmiştir:

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial a^e} = \phi_j^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial a^e} \phi_j = -\phi_j^T \mathbf{K}_0^e \phi_j = \phi_j^T \frac{-\mathbf{K}^e}{1-a^e} \phi_j \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial a^e} = \sum_{q=1; q \neq j}^d \frac{\phi_q}{\lambda_j - \lambda_q} \left( \phi_q^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial a^e} \phi_j \right) = \sum_{q=1; q \neq j}^d \frac{\phi_q}{\lambda_j - \lambda_q} \left( -\phi_q^T \mathbf{K}_0^e \phi_j \right) \quad (3.12)$$

Çalışma kapsamında kullanılacak olan FEDEASLab sonlu elemanlar programında eleman ve global rijitlik matrislerine erişimin olması, modal duyarlıkların hesaplanmasında kolaylık sağlayacaktır. Denklem 3.11 ve Denklem 3.12'de verilen modal duyarlıklar, Denklem 3.10'da aranan artıkların ( $r_j$ ) duyarlıkları yerine yazılarak Jacobian matrisinin elemanları elde edilir (Denklem 3.13 ve Denklem 3.14). Jacobian matrisini oluşturan artık fonksiyonların hasar parametrelerine göre olan duyarlıkları ise, zincir kuralı uygulanarak bulunabilmektedir (Denklem 3.15).

$$\frac{\partial r_f(\mathbf{p})}{\partial a^e} = \frac{1}{\lambda_j} \frac{\partial \lambda_j}{\partial a^e} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial a^e} = \frac{1}{\phi_j^r} \frac{\partial \phi_j^l}{\partial a^e} - \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \phi_j^r} \frac{\partial \phi_j^r}{\partial a^e} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial r_j}{\partial p_i} = \sum_{e=1}^{n_e} \frac{\partial r_j}{\partial a^e} \frac{\partial a^e}{\partial p_i} = \sum_{e=1}^{n_e} \frac{\partial r_j}{\partial a^e} N_i(\mathbf{x}^e) \quad (3.15)$$



Görülmektedir ki, hasar fonksiyonlarının kullanılmasıyla birlikte Jacobian (duyarlık) matrisinin boyutları küçültülerek iyi şartlandırılmış optimizasyon probleminin oluşumu sağlanmış olacaktır (Denklem 3.16):

$$[\mathbf{J}_p]_{m \times n} = [\mathbf{J}_a]_{m \times n} [\mathbf{N}]_{n_e \times n} \quad (3.16)$$

### 3.1.4 Optimizasyon Algoritması ile Çözüm

Artık vektörün eleman rijitlik parametreleri ile ilişkisinin doğrusal olmaması, problemin iteratif olarak çözülmesini gerektirmektedir. Çalışmamızda kapsamında amaç fonksiyonu  $f(\mathbf{p})$ , *Trust Region Gauss – Newton* algoritması ile minimize edilmiştir. Yöntemde, amaç fonksiyonu Taylor serisine göre açılarak ikinci mertebeden  $m(\mathbf{z})$  model fonksiyonu oluşturulmuştur:

$$\min m(\mathbf{z}) = f_s(\mathbf{p}) + [\nabla f_s(\mathbf{p})]^T \mathbf{z} + \frac{1}{2} \mathbf{z}^T [\nabla^2 f_s(\mathbf{p})] \mathbf{z}, \quad (\|\mathbf{z}\| \leq \Delta_u) \quad (3.17)$$

Buna göre, Bölüm 3.1.1’de oluşturulan referans model parametreleri her bir ‘s’ iterasyon adımında ‘z’ kadar ötelenerek çözüm aranmaktadır ( $\mathbf{p}_{s+1} = \mathbf{p}_s + \mathbf{z}$ ). MATLAB® programının optimizasyon toolbox”ındaki *fmincon* veya *lsqnonlin* komutları, bu aşamada yapılması gereken işlemleri gerçekleştirmektedir. Optimizasyon sonucunda  $m(\mathbf{z})$  model fonksiyonunun minimizasyonu ile elde edilen hasar fonksiyonları parametreleri vektörü ( $\mathbf{p}$ ), Denklem 3.4’te yerine konularak boyutsuz güncelleme faktörü  $\{a^e\}$  (sonuç) elde edilmektedir.

### 3.1.5 Yönteme Ait Akış Şeması

Sonlu elemanlar yöntemi, inşaat mühendisliği yapılarının dinamik davranışlarının tahmininde, yapıların analiz ve tasarımında yaygın olarak kullanılan bir araçtır; ancak yine de modelleme sırasında yapılan kabullere bağlı olarak, tasarımcı malzeme özellikleri, birleşimler, sınır şartları gibi yapıya ait belirsizlik içeren parametrelere uygun değerler öngörerek analizleri gerçekleştirir.

Bu sebeple, oluşturulan başlangıç sonlu eleman modelinin deneysel olarak elde edilen modal parametrelere göre kalibre edilmesi yapının doğru modellenmesi açısından gerekli görülmektedir. Deneysel sırasında meydana gelmesi muhtemel olan ölçüm hatalarına rağmen, bu ölçümlerden elde edilen modal parametrelerin yapının dinamik davranışını ‘başlangıç sonlu eleman modeline’ göre daha iyi temsil ettiği düşünülür. Proje çalışmasında kullanılan ‘Duyarlık Tabanlı Hasar Tespiti Algoritması’ sonlu elemanlar modeline ait belirsiz

olan parametrelerin (malzeme elastisite modülü, mesnet koşulları vb.), arazi ölçümleri sonucu elde edilen modal parametrelere göre kalibre edilmesini sağlamaktadır.

Algoritmanın, MATLAB® ortamında programlandığı şekildeki işlem sırası aşağıda sunulmuştur.

---

**a)** Sonlu Eleman Modeli Üzerine Hasar ile İlişkilendirilen Hasar Fonksiyonu Parametrelerinin Oluşturulması (Bu işlem bir kez yapılmaktadır).

Not: Yapı üzerine atanan hasar parametresi sayısı, sonlu eleman modeli eleman sayısına eşit veya daha az sayıda olmalıdır.

---

**b)** Başlangıç Sonlu Eleman Modeline ve Deneysel Olarak Tanımlanan Yapıya Ait Modal Parametrelerin Tanımlanması

b1) Yapıyı gerçekçi olarak yansıttığı düşünülen, FEDEASLab ortamında oluşturulan kalibre edilmemiş başlangıç sonlu eleman modeline ait modal parametrelerinin girdisinin yapılması aşaması

b2) Yapı üzerinden alınan deneysel ölçümlerin 'sadece çıktı sistem tanımlama yöntemleriyle' değerlendirilmesi sonucunda elde edilen modal parametrelerin girdisinin yapılması aşaması

---

**c)** Analitik Modelin Eleman Hasarlarının Modal Parametreler Üzerindeki Etkisini Temsil Eden 'Duyarlık (Jacobian) Matrisinin' Oluşturulma Aşaması (mod şekilleri ve frekanslar için ayrı ayrı hesaplanmaktadır).

---

**d)** b1 ve b2 adımlarındaki analitik ve deneysel modal parametrelerin (mod şekillerinin eleman bazındaki bileşenleri ve modal frekanslar) normalize edildikten sonra farklarının normları alınarak oluşturulan amaç fonksiyonunun tanımlanması.

---

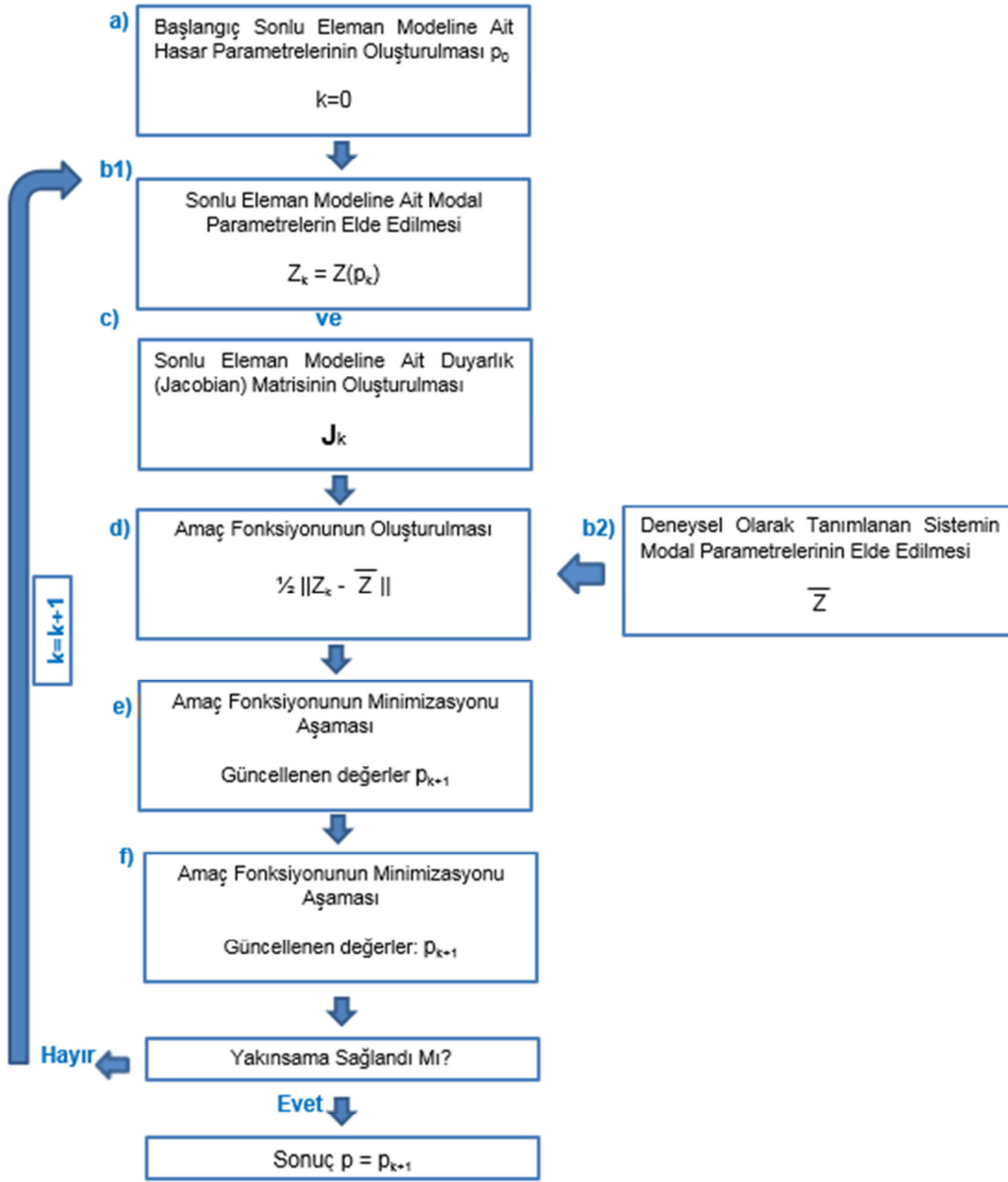
**e-f)** Amaç Fonksiyonunun Minimizasyonu Aşaması (fmincon komutu kullanılmıştır)

Not: Güncelleme işlemi, oluşturulan amaç fonksiyonunun **(d)** minimize edilmesini dögüsel olarak yapmasından dolayı, program **(c)** maddesinde bahsedilen Jacobian matrisini sonlu eleman modelinin iteratif olarak güncellendiği her bir dögü aşamasında yeniden hesaplamaktadır. Program, sonlu eleman modelinin sürekli güncellenmesiyle birlikte değişen amaç fonksiyonunun minimizasyonu sağlanıncaya kadar **(c)** ve **(d)** işlem adımlarını tekrarlı olarak hesaplamaktadır. Optimizasyon aşamasında, güncellenen sonlu eleman modeline ait olarak, Jacobian matrisinin yeniden hesaplanıp kullanılması gerektiği açıktır (bkz: Bölüm 3.1).

---

**g)** Amaç fonksiyonu minimizasyonunun sağlanmasıyla birlikte, sonuç olarak elde edilen 'p' hasar parametreleri vektörü, 'N' hasar fonksiyonu ile çarpılarak eleman hasarları (a\_elem) elde edilmektedir (bkz: Bölüm 3.1)

---



Şekil 3. Programa ait akış şeması

Yöntem, MATLAB® ortamında programlanmış ve tüm kontrolleri yapıldıktan sonra kullanılabilir duruma getirilmiştir. Bu programın güncelleme performansına ilişkin ayrıntılar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur (bkz. Bölüm 10).

### 3.2 Sistem Tanımlama Yöntemleri

Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi tabanlı YSİ yönteminde yapı sağlığı izlenen sistemin yerinde yapılmış dinamik ölçümlerinden elde edilmiş modal parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu bölümde modal parametrelerin tahminine yönelik kullanılacak sistem tanımlama yöntemlerine ilişkin kısa bir çalışma sunulmuştur.

DeneySEL modal analiz, düşük düzeyli titreşimlere maruz bırakılan bir sistemin modal parametrelerinin tahmininde kullanılan bir teknolojidir. Yapının tahmin edilen modal parametreleri doğal titreşim frekansları, mod şekilleri, modal sönüm oranları ve modal katılım faktörleridir. Yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) alanında ve dolayısıyla modal parametrelerin tahmininde birçok zorlukla karşılaşmaktadır. Bunlar arasında, hasar gören sistemin doğrusal olmayan tepkisi, sensörlerin yeri ve sayısının belirlenmesi, yapıların düşük titreşim düzeylerinde hasara hassas özelliklerinin belirlenmesi, bu özelliklerdeki değişimin çevresel faktörlere (sıcaklık ve nem değişimi vb.) ve deney yöntemine bağlı değişimlerden ayıklanması sayılabilir (Doebbling vd.,1998; Sohn vd., 2003). Yapı sağlığının izlenmesi işlemlerinde kullanılan sistem tanımlama yöntemlerini girdi-çıkı ve sadece-çıkı yöntemleri diye ikiye ayırmak mümkündür (Moaveni, 2007). İnşaat mühendisliği yapıları büyük ölçekli yapılar olduğundan, bu yapıları doğru bir şekilde ölçülebilen kuvvetler ile tahrik etmek pratik olmamaktadır. Bu durumda mikro tremor, trafik, rüzgâr, yapının normal kullanım durumundan doğan titreşimler gibi ortamsal titreşim etkilerini kullanmak tek yoldur. Bu nedenle, inşaat mühendisliği yapılarının modal parametrelerinin tahmininde sadece-çıkı yöntemleri de denilen operasyonel modal analiz yöntemlerini kullanmak daha uygun olmaktadır.

Sohn vd. (2003) tarafından hazırlanan, 1996-2001 yılları arasında sistem tanımlama ve YSİ alanında yapılan çalışmalarını kapsayan raporda, kullanılan yöntemler, veri toplama, sinyal işleme ve bunlara dair mühendislik uygulamaları özetlenmektedir. Raporda yapı sağlığının izlenmesi işlemleri, işlevsel değerlendirme (yapı fonksiyonu/durumu, YSİ'nin gerekliliği), veri toplama, veri normalizasyonu ve temizlik işlemleri, özellik seçimi, özellik tahmini (sistem tanımlama), seçilen özellikler için istatistiksel modelleme aşamalarını içermektedir. Köprü türü yapılara geçmişte uygulanmış olması nedeniyle kullanılması düşünülen yöntemler şunlardır: Multiple-reference Natural Excitation Technique ile birleştirilmiş Eigensystem Realization Algorithm (MNExT-ERA) (James vd.,1993; Juang ve Pappa, 1995) ve Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) (Brincker, 2001) ve Data-Driven Stochastic Subspace Identification Method (SSI-Data) (Van Overschee, 1996; Peeters, 2001).

### **3.2.1 NExT-ERA Yöntemi**

James III vd., (1993) tarafından rüzgâr türbinlerinin doğal titreşim frekansları ve sönüm oranlarının tahmininde kullanılan Natural Excitation Technique (NExT) yöntemi, geniş-spektrumlu bir girdi ile tahrik edilmiş sistemin farklı noktalarına yerleştirilen sensörler ile kaydedilen tepkisi ile referans noktasında kaydı yapılan tepki arasında hesaplanan çapraz korelasyon fonksiyonunun hareket denklemini sağladığı gerçeğine dayanmaktadır Farrar (1997), köprü türü bir yapıdan toplanan trafikten kaynaklı ortamsal titreşim verisine sadece-

çıkıtı yöntemi olan NExT yöntemini uygulayarak, köprünün modal parametrelerini tahmin etmiştir. NExT yönteminde, ortamsal titreşim sonucu oluşan iki tepki arasında çapraz korelasyon fonksiyonları tahmin edilerek sistemin doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları elde edilmektedir. Yöntemin avantajı birbirine yakın modlara ait titreşim frekanslarının ve ilgili sönüm oranlarının bulunabilmesine olanak sağlamasıdır. Juang ve Pappa (1985) tarafından geliştirilen Eigensystem Realization Algorithm (ERA) yöntemi ile çok serbestlik dereceli bir sistemin modal parametreleri, sistemin serbest/impuls titreşim verisi kullanılarak tahmin edebilmektedir. ERA özellikle düşük sönüme sahip sistemlerin modal parametrelerinin tahmininde çok iyi sonuçlar vermektedir. İncelenecek olan çelik köprünün düşük sönüme sahip olduğu düşünüldüğünde bu yöntemin sistem tanımlama için uygun bir yöntem olduğu öngörülmektedir. He vd. (2008) ve He vd. (2006) bu yöntemin köprü türü yapıların modal parametrelerinin tahmininde kullanımına dair önemli çalışmalardır. NExT-ERA yöntemi ile tahmin edilen modal parametreler, projede kullanılan diğer bir yöntem olan SSI-DATA yöntemi ile elde edilen değerlere çok sonuçlar vermektedir. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen bölümlerinde SSI-DATA sonuçları kullanılmıştır.

### 3.2.2 EFDD Yöntemi

EFDD yöntemi klasik tepe seçme (peak picking) yönteminin geliştirilmiş hali olarak bilinmektedir. Yöntem klasik frekans tanım alanı yöntemine dayanmaktadır. Klasik yöntemin birbirine yakın olan modların tahmin edilmesindeki güçlükler ve güç spektral yoğunlarının frekans çözünürlüğü ile sınırlı olması nedenlerine bağlı negatif yönleri bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı da klasik yöntem ile yapılan sönüm tahminleri de oldukça belirsiz sonuçlar vermektedir (Brinckner vd., 2001).

EFDD yönteminde ise güç spektral yoğunluk fonksiyonlarında (PSD) bulunan tepelerin seçilmesi yerine sadece çıkıtı verileri ile tahmin edilmiş bu fonksiyonlar kullanılarak spektral matrisler oluşturulmakta ve bu matrislere tekil değer dekompozisyonu ( SVD) uygulanmaktadır. Sistemi tahrik eden fonksiyonun geniş bantlı olması, sistemin düşük sönüm değerlerine (mühendislik yapıları düşük sönümlü sistemlere bir örnektir) sahip olması ve yakın modların da birbirlerine dik olması durumlarında, her bir tekil değer sistemin tek bir moduna karşılık gelen oto-güç spektral yoğunluk fonksiyonu (oto-PSD) olmaktadır. Yukarıda verilen şartların sağlanmaması durumunda ise elde edilen sonuçlar yeterli doğruluktadır. Sistemin mod şekilleri ise tekil vektörlerden elde edilir.

EFDD yönteminde, tek serbestlik dereceli sistemlere karşılık gelen oto-PSD fonksiyonları zaman tanım alanına kesikli Ters-Fourier dönüşümü ile dönüştürülerek doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları tahmin edilmektedir (bunun için logaritmik azalma ve zero-crossing -titreşim sırasında belli bir süre içinde sıfır eksenini ne sayıda kestiği- yöntemleri

kullanılmaktadır). Dikkate edilirse oto-PSD fonksiyonları frekans tanım alanında tahmin edilmektedir ve bunun için Welch-Bartlett yöntemi kullanılabilir (Manolakis vd., 2000).

### 3.2.3 SSI-Data Yöntemi

Veriye Dayalı Stokastik Altalan Tanımlama (Data-Driven Stochastic Subspace Identification, SSI-DATA) yöntemi doğrudan yalnızca çıktı ölçümlerine dayanan state-space şekliyle matematiksel modeli elde etmeye yarar (Van Overschee, 1996; Peeters, 2001).

SSI-DATA yönteminde yapı davranışı lineer dinamik bir sistem olarak ifade edilmektedir.  $u(t)$  white noise olarak dikkate alınan dış kuvveti belirtmektedir.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = u(t) \quad (3.18)$$

$M$  = kütle matrisi

$C$  = sönüm matrisi

$K$  = rijitlik matrisi

$\ddot{X}(t)$  = zamana bağlı ivme vektörü

$\dot{X}(t)$  = zamana bağlı hız vektörü

$X(t)$  = zamana bağlı yer değiştirme vektörü

Yukarıdaki denklem ikinci dereceden diferansiyel denklem durum uzayı formu ile aşağıdaki denklemde görüldüğü üzere birinci dereceden denklem haline getirilmektedir.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + v_k \\ y_k &= Cx_k + w_k \end{aligned} \quad (3.19)$$

$A$  = durum matrisi

$C$  = gözlem matrisi

$x_k$  = ayırık zaman durum vektörü

$y_k$  = çıktı vektörü

Söz konusu yöntem herhangi bir çapraz korelasyon fonksiyonu veya çıktı ölçümü spektrumuna ihtiyaç duymaması nedeniyle oldukça avantajlar sunmaktadır. SSI-DATA yönteminin bir diğer avantajı ise modal parametreleri tanımlama sürecinde QR faktörizasyonu ve tekil değer dekompozisyonu gibi robust nümerik teknikleri kullanıyor olmasıdır.

SSI-DATA yöntemi zaman tanım alanında çalışan bir yöntem olup, diğer bazı yöntemlerin aksine (örn.: EFDD) spektral yoğunluk fonksiyonlarının tahminine ihtiyaç duymamaktadır. Böylece SSI-DATA yönteminde spektral sızıntı gibi problemler oluşmamaktadır. Ayrıca, SSI-Data yöntemi fiziksel modları fiziksel olmayan modlardan ayırt etmeye yarayan stabilizasyon diyagramlarının oluşturulmasını olanak sağlayan parametrik bir yöntemdir.

### 3.3 ARTEMIS® Hasar Tespit Yöntemi (Model Tabanlı Olmayan Bir Yöntem)

Proje teklifi sunulduğunda, aşağıda detayları verilen hasar tespit yönteminin kullanılması planlanmamaktaydı. Ancak, projeye farklı bir boyut katmak ve hâlihazırda mevcut ARTEMIS® yazılımında bulunmasından dolayı bu yöntemde köprünün kalibre edilmiş sayısal modeline uygulanarak performansı araştırılmıştır. İlerleyen bölümlerde ise projenin asıl hedefi olan duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı (model tabanlı) yöntemin sonuçlarına ilişkin ayrıntılar verilecektir (Bölüm 9). Bu kısım proje önerisinden yer almayan ekstra bir çalışma olarak buraya dâhil edilmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan ARTEMIS® operasyonel modal analiz programı içinde yer alan hasar tespit çalışması (Basseville vd., 2000), Kovaryansa Dayalı Stokastik Altalan Tanımlama (Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification, SSI-COV) sistem tanımlama yöntemini (Van Overschee, 1996; Peeters, 2001) kullanmaktadır. Hasar tespiti için elde edilen artık fonksiyonu SSI-COV yöntemi özellikleri üzerine inşa edilmektedir (Doehler, 2014).

$$G = E(x_k +_1 y_k^T) \quad (3.20)$$

G = durum ve çıktı vektörleri arasındaki çapraz kovaryans

$$\text{Siriwardane (2015) } R_i = E(y_k +_1 y_{k-i}^T) = CA^{i-1}G \quad (3.21)$$

$R_i$  = teorik çıktı kovaryansı

$$H_{p+1,q} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & M & R_q \\ R_2 & R_3 & M & R_{q+1} \\ L & L & O & L \\ R_{p+1} & R_{p+2} & K & R_{p+q} \end{bmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Hank}(R_i) \quad (3.22)$$

$H_{p+1,q}$  = (p+1) r x qr boyutundaki teorik blok Hankel matrisi

Yukarıdaki denklemdaki blok Hankel matrisi aşağıdaki denklemden görüldüğü üzere gözlenebilirlik matrisi ve kontrol edilebilirlik matrisi şeklinde düzenlenebilmektedir.

$$H_{p+1,q} = O_{p+1} C_q \quad (3.23)$$

$O_{p+1}$  = gözlenebilirlik matrisi

$C_q$  = kontrol edilebilirlik matrisi

$$O_{p+1} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ M \\ CA^p \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$C_q = [G \quad AG \quad L \quad A^{q-1}G] \quad (3.25)$$

Denklem 3.26'daki Hankel matrisi referans durum olarak dikkate alınıp, tekil değer dekompozisyonu (SVD) uygulandığında Denklem 3.27'de gösterilen durum oluşmaktadır. SVD uygulaması sonrasında elde edilen değer sıfıra yakın olmaktadır. Ölçüm setleri sonucu hesaplamalarda sıfırdan farklılaşmanın meydana gelmesi hasarın varlığını göstermektedir. Ölçülen verinin referans duruma ilişkin olup olmadığının belirlenmesinde Denklem 3.28'de gösterilen artık vektör hesaplaması yapılmaktadır (Basseville vd., 2000). Artık vektörün belirgin bir şekilde sıfırdan farklılaşması ile Denklem 3.28'de gösterilen  $\chi^2$  kontrolü gerçekleştirilmektedir. Referans ölçümlere ilişkin  $\chi^2$  değerlerinden elde edilen  $\chi^2$  eşik değeri bulunmakta ve diğer ölçüm verilerine ilişkin  $\chi^2$  değerlerinin bu eşik değerini aşması hasarın varlığını göstermektedir.

$$H_{p+1,q}^{\text{ref}} = \begin{bmatrix} \hat{U}_1 & \hat{U}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Delta}_1 & 0 \\ 0 & \hat{\Delta}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1^T \\ \hat{V}_0^T \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$S^T \hat{H}_{p+1,q} \approx 0 \quad (3.27)$$

$$\zeta = \sqrt{N} \text{vec}(S^T \hat{H}_{p+1,q}) \quad (3.28)$$

$$\chi_\zeta^2 = \zeta^T \Sigma_\zeta^{-1} \zeta \quad (3.29)$$

Ortamsal titreşim tahriklerindeki farklılıklar, yapısal durumda hasar gibi herhangi bir değişim olmasa bile durum ve çıktı vektörleri arasındaki çapraz kovaryans (G) ve Hankel matrisi ( $\hat{H}_{p+1,q}$ ) içerisinde değişimlere sebep olabilmektedir (Basseville vd., 2004). Bu durumda ortamsal titreşimdeki değişimlerden etkilenen  $\chi^2$  değerlerindeki değişimler yanlış hasar tespitlerine neden olabilmektedir. Bu sebeple referans duruma ilişkin durum Denklem 3.30'de



gösterildiği şekilde düzenlenebilmekte olup değişen tahrike uyumlu artık vektörü Denklem 3.31'da tanımlanmaktadır. Artık vektörün belirgin bir şekilde sıfırdan farklılaşması ile Denklem 3.32'de gösterilen  $\chi^2$  kontrolü gerçekleştirilmektedir. Birden fazla referans ölçümlere ilişkin  $\chi^2$  değerlerinden elde edilen  $\chi^2$  eşik değeri bulunmakta ve referans ölçümler sonrasındaki ölçüm verilerine ilişkin  $\chi^2$  değerlerinin bu eşik değerini aşması hasarın varlığını göstermektedir.

$$S^T \hat{U}_1 \approx 0 \quad (3.30)$$

$$\xi = \sqrt{N} \text{vec}(S^T \hat{U}_1) \quad (3.31)$$

$$\chi_\xi^2 = \xi^T \Sigma_\xi^{-1} \xi \quad (3.32)$$

Bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiş olan hasar tespit çalışmalarına ilişkin ayrıntılar Bölüm 9'da sunulmuştur.

### 3.4 Modal Güvence Kriteri

İki farklı modal vektör arasındaki benzerliği belirlemek için modal güvence kriteri (MAC) değeri belirlenmektedir. MAC fonksiyonu ile modal vektörler arasındaki uyumun ölçümü sağlanmaktadır (Allemang, 1982). Modal güvence kriteri hesaplamasında kullanılan formül Denklem 3.33'de gösterilmektedir. Hesaplama sonucunda 0 ile 1 arasında değerler oluşmaktadır. Denklem sonucunda çıkan değer 1'e yaklaşması dikkate alınan iki mod arasındaki benzerliğin fazla, 0'a yaklaşması ise benzerliğin az olduğunu göstermektedir.

$$MAC_i((\varphi_a), (\varphi_b)) = \frac{((\varphi_a^T)(\varphi_b))^2}{((\varphi_a^T)(\varphi_a))((\varphi_b^T)(\varphi_b))} \quad (3.33)$$

$(\varphi_a) = a$  mod şekli vektörü  $(\varphi_b) = b$  mod şekli vektörü

Yukarı bahsi geçen sistem tanımlama yöntemlerinin önerisi yapılan projenin deneysel aşamasında nasıl kullanılacağına dair ayrıntılar Yöntem kısmında verilmiştir. Hem NExT-ERA hem de EFDD yöntemlerinin programlanması MATLAB® ortamında geliştirilmiş, SSI-Data ve ARTEMIS hasar tespiti yöntemleri ise ARTEMIS® programı kullanılarak yapılmıştır.

## 4. YÖNTEM

Uşak ili sınırları içerisinde olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 demiryolu çelik köprüsü üzerinde proje hedefleri doğrultusunda çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu köprü her bir

açıklığı 30 metre olan birbirinden bağımsız 6 adet kafes kirişten oluşmuş olup yüz yılı aşkın süredir hizmet vermektedir. Köprünün toplam uzunluğu 180 metre, genişliği 3.2 metre ve her bir kafes kirişin yüksekliği 4.5 metredir. Yaklaşık 50 yıl önce meydana gelen yangının neticesinde köprünün ilk iki açıklığı ve 19 metre yüksekliğindeki bir kolonu/mesnedi değiştirilmiştir.

Projede yapılan çalışmaları üç genel başlık altında toplamak mümkündür: (i) üç farklı zamanda yerinde yapılan deneyler ve modal parametre tahmini, (ii) analitik/sayısal model oluşturulması ve (iii) sonlu elemanlar modeli güncellemesi tabanlı hasar tahmin yönteminin uygulanması. Bu başlıklara ait detaylar aşağıda verilmiştir.

#### **4.1 Genel Değerlendirmeler: Saha Çalışmaları ve Modal Parametre Tahmini**

Önerilen projenin önemli ayaklarından birini 199+325 demiryolu çelik köprüsü üzerinde sahada gerçekleştirilecek olan dinamik ölçümler oluşturmuştur. Hedeflenen saha çalışmasında 16 kanallı ve 16-bit hassasiyetli portatif veri toplama cihazı ve bu tip yapıların dinamik tepkisinin izlenmesi için uygun 12 adet force-balanced ivmeölçer kullanılmıştır. Saha çalışmasının temel amacı köprüye ait modal parametrelerin (titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmesidir. 12 adet ivmeölçer referans tek bir sensörün her zaman aynı yerde kalması koşuluyla, diğer 11 adet sensör kaydırılarak tüm köprüye ilişkin yüksek kalitede dinamik veri elde edilmiştir. Mümkün olduğu kadar çok sayıda mod şeklinin yakalanması için gerekli optimum sensör yerleşimine köprünün ön/başlangıç sonlu elemanlar modelinden elde edilen mod şekilleri kullanılarak karar verilmiştir (bkz. Bölüm 8.2).

Saha çalışması üç farklı ortamsal sıcaklık durumuna denk gelecek şekilde üç kez tekrarlanmıştır. Sıcaklık etkisinin yapıların modal parametrelerinde önemli değişiklikler yarattığı bilinmektedir ve bu etkinin 199+325 demiryolu köprüsünün Uşak sınırları içerisinde karasal bir alanda bulunması nedeniyle köprünün modal karakteristiklerinde ne tür değişimler yarattığının belirlenmesi önemlidir. Sıcaklık değişiminin incelenen YSİ yöntemine olan etkisinin, bu yöntemin köprü kontrollerinde standart bir uygulama bulması için mutlaka incelenmesi gerekmektedir. Ölçüm alınacak mevsimsel şartların mümkün olduğunca farklı sıcaklık koşullarına karşılık gelmesi için özen gösterilmiştir. Bu şekilde farklı iklimsel koşullarda köprünün davranışı ile ilgili bilgi sahibi olunmasına çalışılmıştır. Ancak, köprünün bulunduğu konum, coğrafi şartlar ve lojistik olanaklar köprüye istenildiği zaman gidilmesi konusunda bazı zorluklar oluşturmuştur. İleri bölümlerde ayrıntısının verildiği gibi mümkün olan en uygun zamanlarda köprüye gidilebilmiş; bu durumda da ilkbahar ve yaz ölçümleri için oluşan sıcaklık değerleri birbirine yakın olmuştur. Benzer şekilde kış ölçümleri ise çok soğuk

zamanlara denk getirilememiştir. Ancak, çalışma şartlarının zorluğu ve tehlikeli durumlar oluşturması böyle bir tavizin verilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Üç ölçüm için de köprüde bu süre içinde yapısal bir hasarın olmadığı TCDD 3. Bölge Müdürlüğü'nün ilgili mercileri ile yapılan değerlendirmeler sonucunda belirlenmiştir. Dolayısıyla, modal parametre tahminleri içinde gerçekleşebilecek değişikliklerin temel nedeninin sıcaklık değişimi olduğu düşünülebilir (tahmin belirsizleri sınırları içinde).

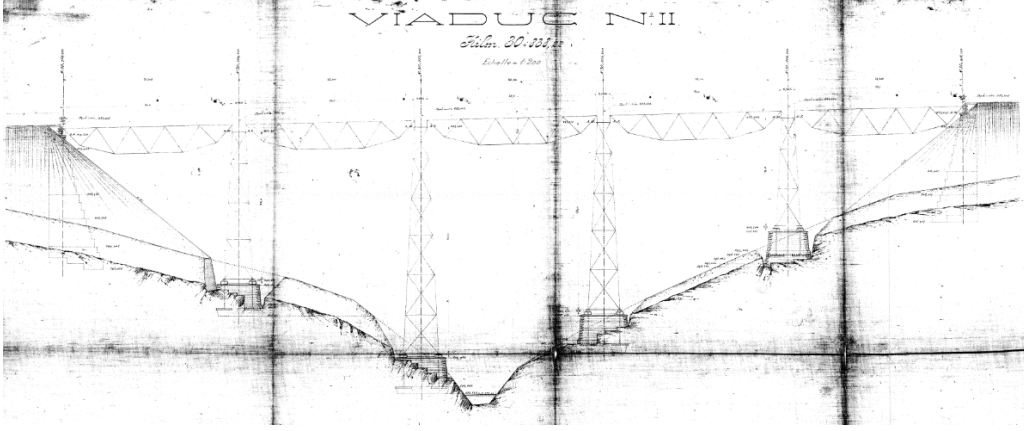
Modal parametre tahmini için programlanmış olan NExT-ERA ve EFFT yöntemlerinin yanında hali hazırda Dokuz Eylül Üniversitesi bünyesinde bulunan ARTEMIS® Operasyonel Modal Analiz programında var olan Data Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA) tekniği kullanılarak köprünün modal parametreleri tahmin edilmiştir (Van Overschee, 1996). Böylece NExT-ERA ve EFFT yöntemleriyle elde edilen sonuçların çapraz kontrolü gerçekleştirilmiştir. Modal parametrelerin doğru tahmini son derece önemlidir; çünkü diğer tüm YSİ adımları bu sonuçlar üzerine oturmaktadır. SSI-DATA yöntemi daha önce başarılı bir şekilde köprü türü yapılara uygulanmış bir yöntem olması nedeniyle bu projede de tercih edilmiştir (He, X., 2008).

#### **4.2 Analitik/Sayısal Model ve Sonlu Elemanlar Modeli Güncelleme Çalışmaları**

Çalışma planında, hasar tespit yönteminin çalışılması için deney ve simülasyon verileri birlikte kullanılmıştır. Deney verisi model kalibrasyonu için kullanılmış, kalibre edilmiş modelden elde edilen ve farklı hasar senaryolarını yansıtan simülasyon verisi ise sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı hasar tespiti için kullanılmıştır.

### **5. 199+325 ÇELİK DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN ÖZELLİKLERİ**

199+325 demiryolu çelik köprüsü Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan Basmane–Dumlupınar güzergâhında Uşak ili sınırları içerisinde Alaşehir-Eşme bandında yüksekliğin yaklaşık 50 metre olduğu bir vadi geçidinde bulunmaktadır. İsminden de anlaşılacağı üzere söz konusu hattın 199. kilometresinde yer almaktadır. Söz konusu köprü 19. yüzyılın son yıllarında inşa edilmiştir. Köprünün ilk projesi 1896 yılında Fransızlar tarafından yapılmış olup 30 metreden oluşan 5 adet kafes kiriş ve farklı yüksekliklere sahip 4 adet çelik kolon ayağından oluşmaktaydı. Köprünün ilk hal projesinin kesiti Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 199+325 köprüsü ilk hal projesi (yıl 1896)

199+325 demiryolu çelik köprüsü Kurtuluş Savaşı döneminde hasar görmüş ve o süre içerisinde vadi içerisine doğru dar yarıçaplı bir normal hat güzergâhı yapılmıştı. Sonraki dönemde tamir ve ıslahı yapılan 199+325 demiryolu çelik köprüsü 30 metreden oluşan 6 adet kafes kiriş ve farklı yüksekliklere sahip 5 adet çelik kolon ayağından oluşacak şekilde inşa gerçekleştirilmiştir. Köprü şist kayalık dar bir vadide bulunmakta olup yağmurlu dönemlerde altından sel suları geçmektedir. 1960'lı yıllarda gerçekleşen yangın sonucu hasar gören köprü'nün 1963 yılında yapılan projeler doğrultusunda Afyon yönü tarafındaki ilk iki açıklığı ve bir kolon ayağı yenilenmiştir. Sonrasında bakım amaçlı birçok kez boya tadilatları gerçekleştirilmiştir. 199+325 demiryolu çelik köprüsünün Alaşehir yönü tarafından günümüz mevcut görünümü Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 199+325 demiryolu çelik köprüsü

199+325 demiryolu çelik köprüsünün yatay kurb yarıçapı 300 metre, düşey kurbunun eğimi ise %2.5'tir. Köprü'nün toplam uzunluğu 180 metre, genişliği 3.2 metre ve her bir kafes kirişin yüksekliği 4.5 metredir. Her bir açıklığın uzunluğu 30 metre olup, iki ana makastan oluşmaktadır ve birbirlerine enleme kirişleri ve diyagonal elemanlar ile bağlanmıştır (Şekil 6(a)). Makaslar basit kiriş mantığı ile çalışmakta olup makasın bir ucunda sabit diğer ucunda hareketli mesnetler bulunmaktadır (Şekil 6(b)). Enleme kirişlerinin üzerinde ray ve ahşap traversleri taşıyan boylama kirişleri (stringers) bulunmaktadır. Köprüde farklı yüksekliklere sahip 5 adet çelik kolon ayağı bulunmaktadır ve bunlar dört noktadan kâgir mesnetler üzerine oturtulmuştur (Şekil 6(c)). Söz konusu bu dört noktanın ikisi bir yönde hareketli, biri iki yönde hareketli ve biri de sabit mesnet olarak tasarlanmış olup uzun rotlar ile düşeyde kâgir temele ankre edilmişlerdir (Şekil 6(d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.199+325 Demiryolu çelik köprüsü eleman detayları: (a) kafes kirişlerin kolon üstündeki mesnetleri, (b) köprünün iki kolon ayağı arasındaki bir açıklığı, (c) kolonların kâgir temeller üzerindeki mesnet detayı ve (d) temel içindeki galeride bulunan rod ankraj detayı

Köprü üzerinde S46 ray ve köprü girişinden 6 metre önce ve çıkışından 6 metre sonra olmak üzere S30 kontraray bulunmaktadır. Rayların her iki yanında 1 metre genişliğinde baklava sac yaya yürüme yolu ve demir korkuluk bulunmaktadır. Köprünün yukarıda belirtilen elemanlara sahip olan platform görünüşü Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. 199+325 köprüsü platformu

199+325 çelik kafes demiryolu köprüsünün, 1960’lı yıllarda köprüde meydana gelen yangın neticesinde yapılan düzenleme ve yenileme çalışmaları için oluşturulan projeleri mevcuttur. Söz konusu bu projelerde köprünün Eşme tarafında yer alan ilk kolon ayağı ve kolon ayağının sol ve sağında bulunan her biri 30 metre uzunluğunda olan makaslar yer almaktadır. Köprü makasları çelik köşebent ve levha/plakalar kullanılarak I, H, +, Z şeklinde

kuvvetlendirilmiş kesitler ile oluşturulmuştur. Birleşim bölgelerinde (düğüm noktası) çelik elemanlar birleşim plakaları ile çok miktarda perçin kullanılarak birleştirilmiştir. Bu proje üzerinden ve gözlemsel değerlendirmelere bağlı elde edilen bu bilgiler köprünün sayısal modelinin oluşturulması aşamalarında kullanılmıştır.

## 6.SAHA ÇALIŞMALARI

### 6.1 Köprü Testi Çalışmaları (Test-1/Kış Ölçümleri)

02 ve 04 Aralık 2015 tarihlerinde köprü üzerinde dinamik ölçüm testlerinin yapılmasına karar verilmiştir. Testlerin iki gün içerisinde yapılmasının planlanması köprünün dik bir vadide konuşlanmış olması sebebiyle gerçekleştirilecek ölçüm çalışmalarının zorluğundan kaynaklanmaktadır. Bu sebeple yapılacak ölçüm çalışmasına ilişkin adaptasyonun sağlanması hedeflenmiş olup, ilk gün testlerinde herhangi bir aksilik oluşması ihtimali göz önünde bulundurulmuştur. Yukarıda bahsedilen tarihlerde yapılacak ölçümler için 20.11.2015 tarihinde Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Mühendislik Fakültesi Dekanlığı tarafından yazılan başvuru dilekçesi ile yukarıda bahsedilen tarihlerde yapılacak olan köprü testleri ile ilgili TCDD bilgilendirilmiş ve DEÜ ile TCDD arasında yapılmış olan protokol gereği gerekli yardım ve desteğin sağlanması talep edilmiştir. Bunun üzerine TCDD ile yapılan görüşmeler sonucunda jeneratör TCDD tarafından tedarik edilmiş olup TCDD 3. Bölge Müdürlüğü'nde çalışan 2 inşaat mühendisi köprü testlerine nezaret etmek üzere görevlendirilmiştir. 02 ve 04 Aralık 2015 tarihlerinde gerçekleştirilen testler ile ilgili görseller sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur. Köprü testlerinde yapılacak çalışmalar ve deney düzenekleri ile ilgili planlamalar hakkında ileriki kısımlarda bahsedilmiştir.



Şekil 8. Test-1 – 02.12.2015 (1. gün)



Şekil 9. Test-1 – 04.12.2015 (2. gün)

### 6.1.1 Köprü Testi Öncesi Çalışmalar (Test-1/Kış Ölçümleri)

Yapılacak köprü testleri öncesinde hangi sensörlerin köprünün hangi noktalarına koyulacağına ilişkin planlamaları belirten test düzenekleri (setup) oluşturulmuştur. Bu test düzenekleri oluşturulurken köprünün ön sonlu eleman modelindeki mod şekilleri esas alınmıştır. Buradaki en önemli kıstas sensörlerin köprünün mümkün olduğunca çok moduna ait hareketi yakalayacak şekilde konumlandırılmasıdır. Bu şekilde köprünün modal parametrelerini tahmin etmek mümkün olacaktır. Köprü testlerinde kullanılacak olan ivmeölçerler (sensörler) tek eksenli ölçüm yapabilmektedirler. Bu nedenle köprünün hem yatay hem de düşey mod şekillerini elde etmek için oluşturulan test düzenekleri ile en uygun sensör yerleşim planının yapılmasına çalışılmıştır.

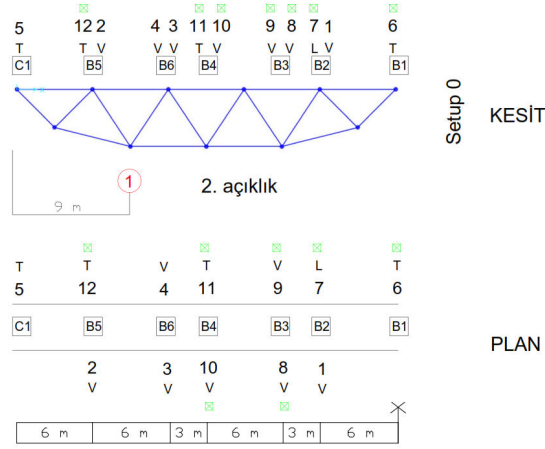
Köprü testlerinin iki gün içinde yapılmasına karar verilmiştir. İlk gün köprünün Afyon tarafında bulunan iki açıklığının testinin yapılabilmesi için 2. açıklıktan veri almayı sağlayacak setup 0 ve 1. ve 2. açıklıktan veri almayı sağlayacak setup1\_1 test düzenekleri belirlenmiştir. Söz konusu düzenekleri gösteren şekiller Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmektedir. Dikkat edilirse bu setuplar köprünün bütününden veri almayı hedeflememektedir; sadece oldukça yoğun bir sensör düzeneği altında sadece 2. açıklıktan ve sadece 1. ve 2. açıklıktan veri almayı hedeflemiştir. Bu ölçümlerden alınan veriler başka çalışmalarda da kullanılacaktır.

Şekillerde siyah kutucuklar ile gösterilen noktalar ölçüm istasyonlarını göstermekte olup bazı istasyonlarda düşey, bazı istasyonlarda enine, bazı istasyonlarda da hem enine hem de düşey ölçüm verisi toplamak üzere düzenek oluşturulmuştur. İstasyonları gösteren siyah kutucukların üstünde V harfiyle düşey T harfiyle de enine yönde ölçüm almak üzere

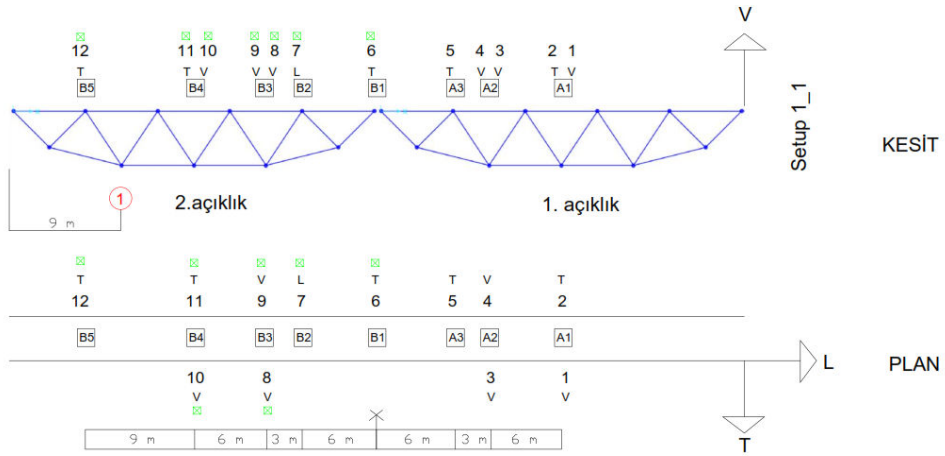


yerleştirilecek sensörler gösterilmiştir. B2 istasyonunda L harfi ile gösterilen ve köprü boyuna yönünde ölçüm almaya bir adet ivmeölçer kullanılmıştır. Mevcutta 12 adet ivmeölçer olduğundan her test düzeneğinde 12 adet sensör kullanılmış olup numaraları istasyon kutucukları üzerinde gösterilmiştir.

Köprü'nün uzunluğunun 180 metre gibi büyük bir değerde olması sebebiyle tek ölçüm ile köprü'nün tamamının dinamik verisini elde etmek mevcutta bulunan ekipman ile mümkün olmamaktadır. Bu sebeple düzenekler arasında veri bağlantısını sağlayacak referans sensörlere ihtiyaç duyulmuştur. Sensör numaraları üstündeki işaretler ise sensörün referans sensör olduğunu göstermektedir. Şekil 10 ve Şekil 11'de görüldüğü üzere Setup 0 ile Setup 1\_1 arasında 5 adet referans sensörü kullanılmıştır.

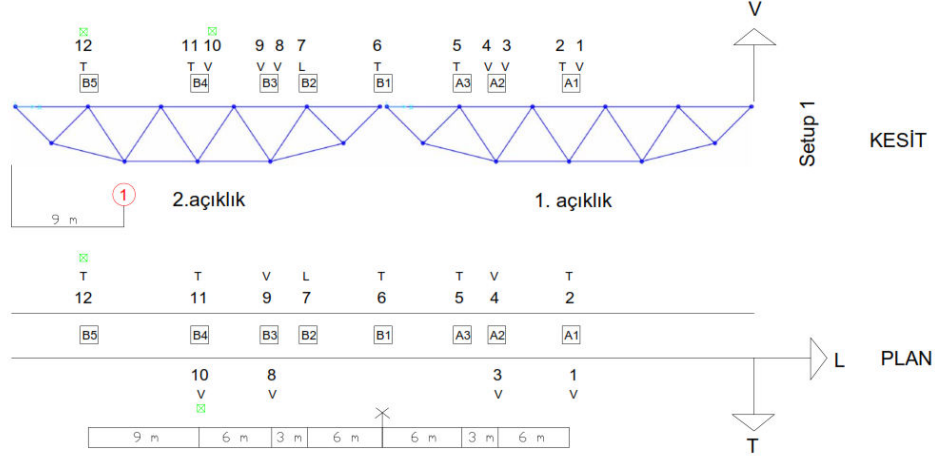


Şekil 10. Test-1 / setup 0

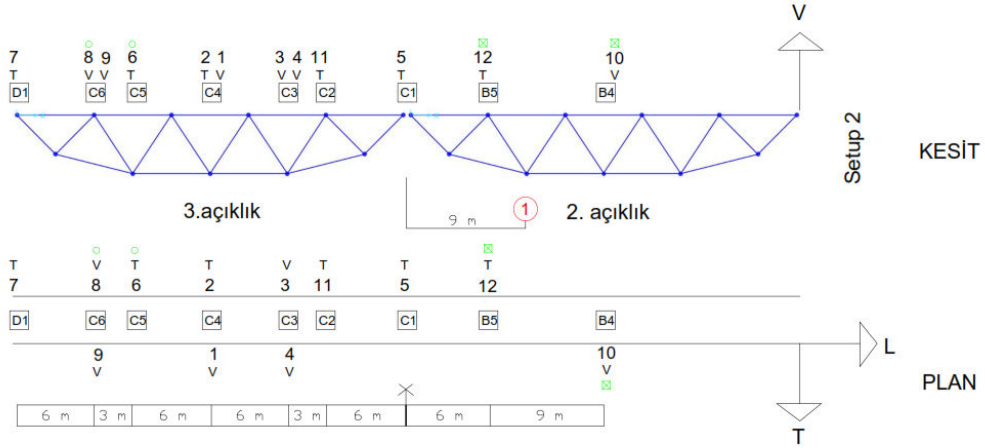


Şekil 11. Test-1 / setup 1\_1

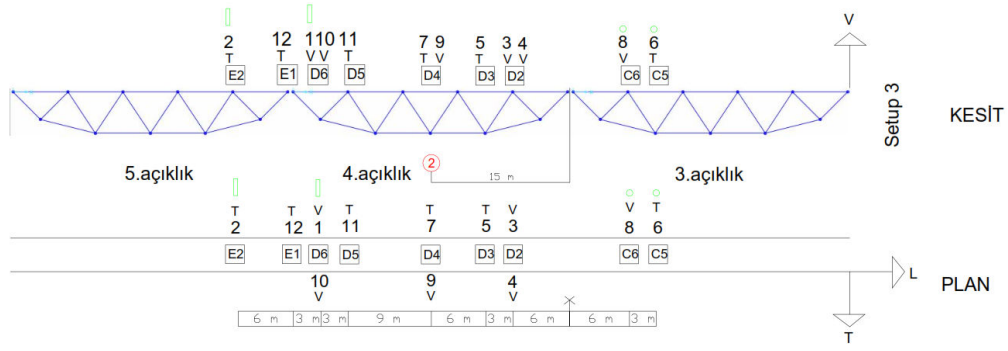
Köprü testinin birinci günü köprünün ilk iki açıklığından veri almayı sağlayan düzenekler ile testlerin gerçekleştirilmesinin ardından, köprü testinin ikinci gününde tüm köprüden veri almayı sağlayacak 4 adet test düzeneği oluşturularak köprüden ortamsal titreşim verisi toplanmıştır. Her bir test düzeneği arasında biri düşey yönde veri toplayan biri de enine yönde veri toplayan 2 adet referans sensör kullanılmasının planlaması yapılmıştır. Bahse konu 4 adet test düzenekleri Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'de gösterilmektedir.



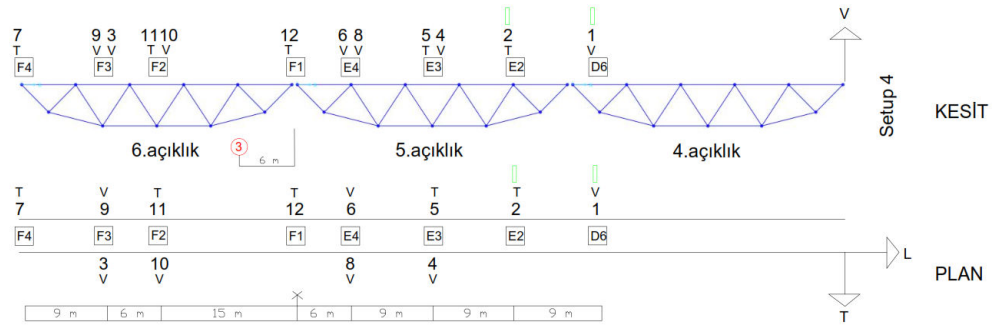
Şekil 12. Test-1 / Setup-1



Şekil 13. Test-1 / Setup-2



Şekil 14. Test-1 / Setup-3



Şekil 15. Test-1 / Setup-4

Köprüye ulaşım karayolu üzerinden zor olduğundan demiryolu üzerinden hem karayolu hem de demiryolu üzerinde gidebilen TCDD'ye ait mobil araç olarak isimlendirilen bir araçla, Alaşehir Tren Garı'ndan yaklaşık 45 dakikalık bir seyahatin ardından ulaşılmıştır. Köprüye Alaşehir Garı'ndan başlayan ulaşım aşamaları Şekil 16'da gösterilmiştir. Proje çalışanları ve TCDD teknik elemanlarından oluşan 10 kişilik bir ekip ile Şekil 16 (a) ve (b)'de gösterilen mobil araç ile köprüye ulaşılmıştır. Bu testler için kayıt edilen ortalama ortamsal sıcaklık değeri 10.86 °C olarak ölçülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 16. Köprüye ulaşım için kullanılan mobil araç ve seyahat aşamaları

### 6.2 Köprü Testi Çalışmaları (Test-2/İlk Bahar ve Test-3/Yaz Testleri)

Bahar dönemi testinin 16 Mayıs 2016 tarihinde, yaz dönemi testinin ise 28 Temmuz 2016 tarihinde yapılmasına karar verilmiştir. Söz konusu bahar dönemi testi için 05.05.2016 tarihinde, yaz dönemi testi için de 14.07.2016 tarihinde Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Mühendislik Fakültesi Dekanlığı tarafından yazılan başvuru dilekçeleri ile yukarıda bahsedilen tarihlerde yapılacak olan köprü testleri ile ilgili TCDD bilgilendirilmiş ve DEÜ ile TCDD arasında yapılmış olan protokol gereği gerekli yardım ve desteğin sağlanması talep edilmiştir. Bunun üzerine TCDD ile yapılan görüşmeler sonucunda jeneratör TCDD tarafından tedarik edilmiş olup TCDD 3. Bölge Müdürlüğü'nde çalışan 1 inşaat mühendisi köprü testlerine nezaret etmek üzere görevlendirilmiştir. 2. köprü testi ve 3. köprü testleri ile ilgili görseller sırasıyla Şekil 17 ve Şekil 18'de sunulmuştur.



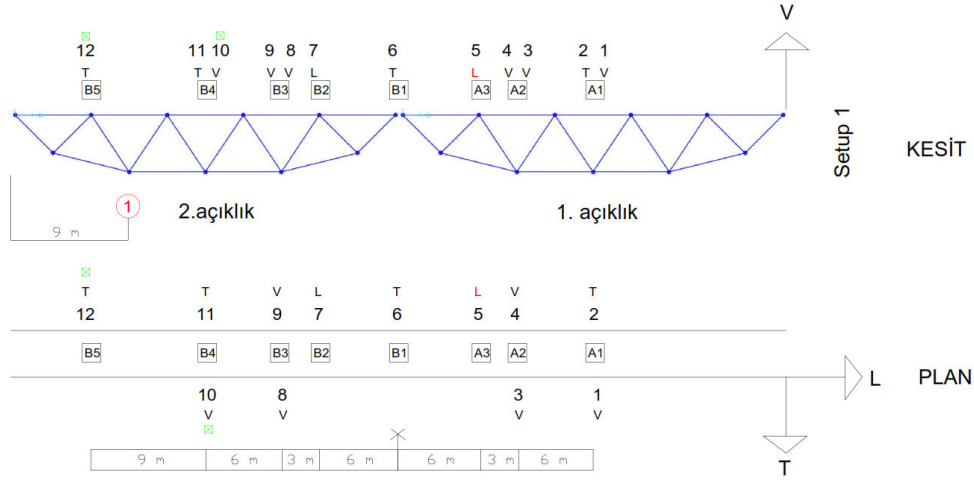
Şekil 17. Test-2 – 16.05.2016



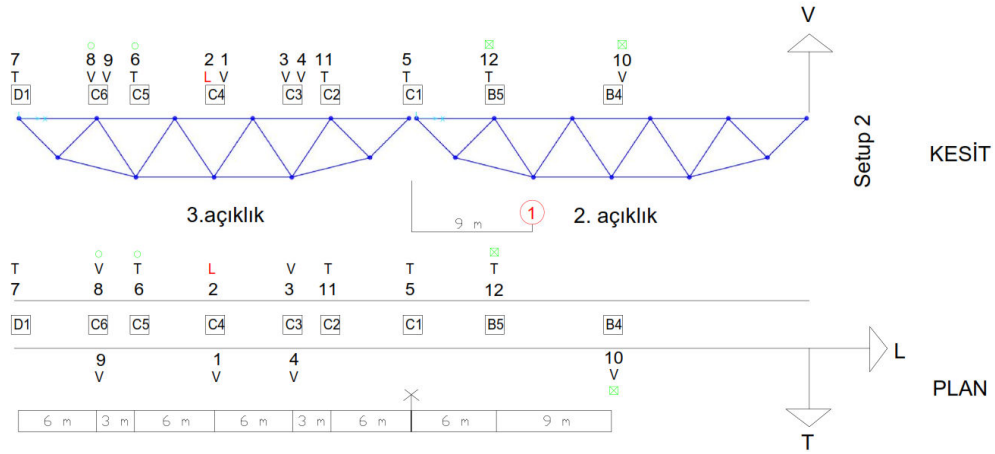
Şekil 18. Test-3 – 28.07.2016

### 6.2.1 Köprü Testi Öncesi Çalışmalar (Test-2 ve Test-3)

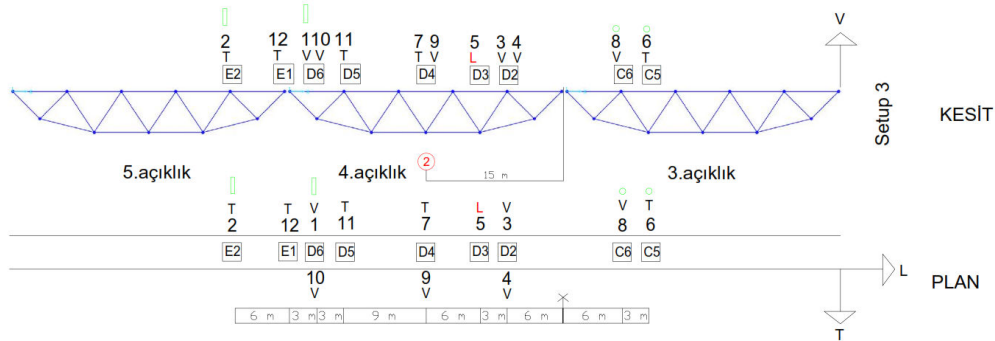
Yapılacak köprü testleri öncesinde hangi sensörlerin köprünün hangi noktalarına koyulacağına ilişkin planlamalar 1. test çalışmalarına benzer bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu test düzenekleri oluşturulurken yine köprünün ön sonlu eleman modelindeki mod şekilleri esas alınmıştır. Ancak, 1. köprü testinden elde edilen tecrübe ve modal parametre tahmin sonuçlarına bağlı olarak bahar ve yaz dönemi ölçümlerini oluşturan 2. ve 3. köprü testlerinin bir gün içinde yapılmasına karar verilmiştir. Tüm köprüden veri almayı sağlayacak 4 adet test düzeneği oluşturulmuştur. Bahse konu 4 adet test düzeneği Şekil 19, 20, 21 ve 22’de gösterilmektedir. Şekillerde siyah kutucuklar ile belirtilen noktalar ölçüm istasyonlarını göstermekte olup bazı istasyonlarda düşey, bazı istasyonlarda enine, bazı istasyonlarda da hem enine hem de düşey ölçüm verisi toplamak üzere düzenek oluşturulmuştur. İstasyonları gösteren siyah kutucukların üstünde, *V* harfiyle düşey, *T* harfiyle enine ve *L* harfiyle de boyuna doğrultuda ölçüm almak üzere yerleştirilecek sensörler gösterilmiştir. Sensör numaraları üstündeki yeşil renkli işaretler ise ilgili sensörün referans sensörü olduğunu göstermektedir. 2. ve 3. köprü testlerinde 1. köprü testinden farklı olarak 1 yerine 5 adet boyuna doğrultuda veri toplayan ivmeölçer yerleşimi yapılmıştır. 2. ve 3. testler için, sırasıyla, kayıt edilen ortalama ortamsal sıcaklık değeri 32.18 °C ve 36.44 °C olarak ölçülmüştür.



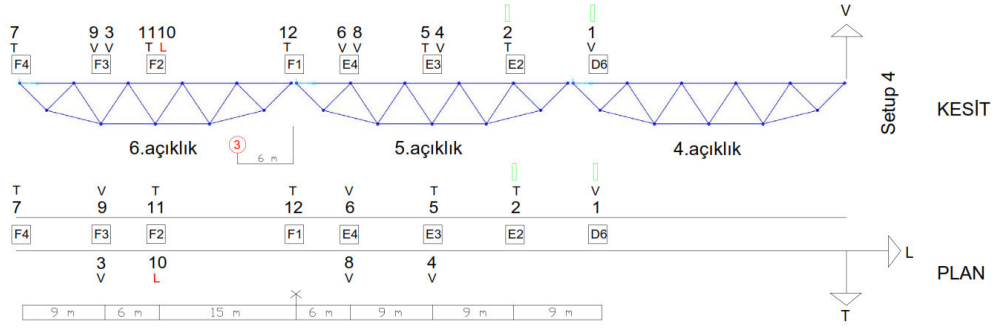
Şekil 19. Test-2 ve Test-3 / Setup-1



Şekil 20. Test-2 ve Test-3 / Setup-2



Şekil 21. Test-2 ve Test-3 / Setup-3



Şekil 22. Test-2 ve Test-3 / Setup-4

### 6.3 Ölçüm Ekipmanları

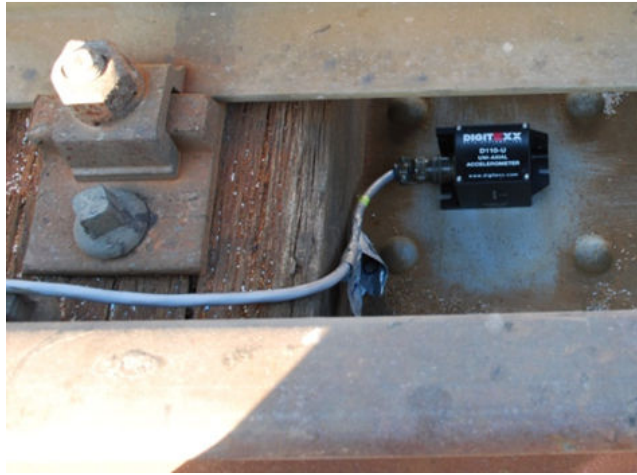
199+325 demiryolu çelik köprüsündeki dinamik ölçümlerin gerçekleştirilmesinde entegre olarak veri toplamayı sağlayan 16 kanallı ve 24-bit hassasiyetli portatif veri toplama cihazı kullanılmıştır. Söz konusu veri toplama cihazı dış ortam ölçümleri için uygun kullanıma sahip olup, cihazın elektrik ihtiyacı dizel bir jeneratör tarafından sağlanmıştır. Köprüde yapılan ortamsal titreşim testlerindeki ivme verileri 12 adet force-balanced ivmeölçer ile toplanmıştır.

İvmeölçerlerin bağlı oldukları veri toplama kablolarının uzunlukları 40 metre ile 60 metre arasında değişmektedir. Bu sebeple önceki bölümlerde gösterilen test düzeneklerinin oluşturulmasında ivmeölçerlerin yerleşiminde söz konusu kablo uzunluğu kısıtlaması da dikkate alınmıştır. Bu şekilde en uygun olacak şekilde ivmeölçer yerleşimi yapılmaya çalışılmıştır. Veri toplama cihazı Şekil 23'de ve dinamik ölçümlerde kullanılan ana girişler üzerine oturtulan ivmeölçer Şekil 24'te gösterilmiştir.

Her testte toplamda 4 setup ile köprüye ait dinamik veri toplanmıştır. Veri toplanması setup başına minimum 25 dakika olup, örnekleme frekansı 250 Hz'dür.



Şekil 23. Veri toplama cihazı



Şekil 24. Ana lateral kiriş üzerine monte edilmiş bir ivmeölçer

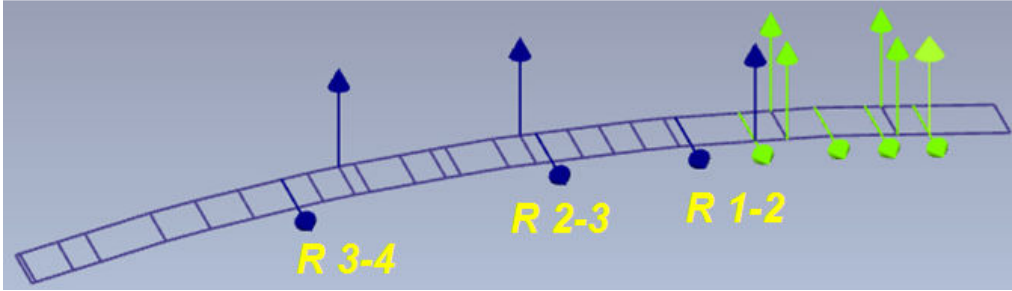
## 7.TEST SONUÇLARI

### 7.1 Sistem Tanımlama Çalışmaları (Modal Parametre Tahminleri)

Köprü üzerinden toplanan ham ivme verisi \*.dxx uzantılı meta dosyasıdır. Bu dosyası \*.asc uzantılı dosyalara dönüştürülerek modal parametre tahmini için kullanılmıştır. Köprü testinden elde edilen veriler operasyonel modal analiz uygulamalarında kullanılan bir yazılım olan ARTEMIS® programı vasıtasıyla işlenmiştir. Söz konusu program içerisinde öncelikle köprünün geometrisi ölçüm noktaları belirlenerek oluşturulmuştur. Oluşturulan geometri üzerindeki düğüm noktalarına testlerden elde edilen veriler yatay ve düşey doğrultuda olmalarına bakılarak atanmıştır. Sonrasında Data-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA) yöntemleri ile köprüye ait modal parametreler tahmin edilmiştir.



Şekil 25'te görüldüğü üzere köprü üzerinden alınan ölçümlerde gerçekleştirilen düzenekler arasında veri bağlantısını sağlayacak şekilde referans ivmeölçerler kullanılmıştır. Her bir düzeneden diğer düzeneğe geçerken bir enine ivmeölçer bir de düşey ivmeölçer referans ivmeölçerler olarak belirlenmiştir. Şekil 25'te gösterilen R 1-2 ivmeölçeri 1. düzeneden 2. düzeneğe, R 2-3 ivmeölçeri 2. düzeneden 3. düzeneğe, R 3-4 ivmeölçerleri ise 3. düzeneden 4. düzeneğe geçişi sağlayan ve bahse konu düzenekler içerisinde aynı konum ve doğrultuda yer alan ivmeölçerlerdir. Yatay baskın modlar için ham veri 5 Hz değerine göre veri seyreltme (decimation) işlemine tabi tutulmuştur. Düşey/burulma baskın modlar için ise ham veride 10 Hz değerine göre veri seyreltmesi yapılmış ve işlenmiş veri 4 ve 9 Hz limitlerine göre band-pass filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Filtreleme yapılmasının amacı farklı yönlerde baskın olan ve belli frekans aralıklarına yoğunlaşmış modların tahmin başarısını arttırmak ve tahmin belirsizliğini azaltmaktır.



Şekil 25. Referans ivmeölçerlerin gösterimi

## 7.2 Test-1 Sonuçları

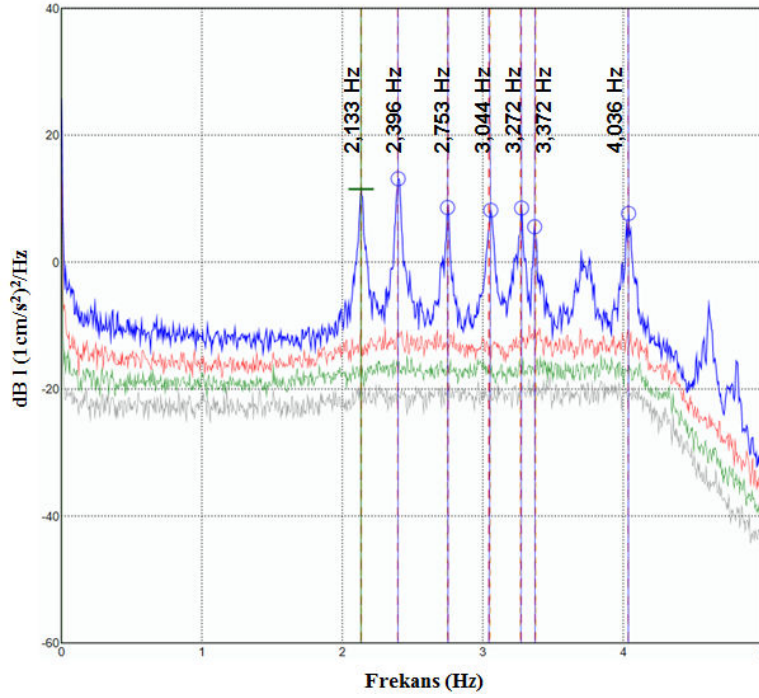
04.12.2015 tarihinde gerçekleştirilen 1. köprü testinde (Test-1) elde edilen ve köprü'nün tamamından toplanan veriler SSI-Data ve EFDD yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Önceki kısımda da bahsedildiği üzere köprü testlerinden elde edilen verilerin işlenmesi ile elde edilen modlar, yatay baskın modlar ve düşey/burulma baskın modlar olarak iki grupta sunulmuştur.

1. köprü testinden (Test-1) elde edilen verilerin frekans tanım alanında EFDD uygulanarak bulunan yatay baskın modlara ilişkin spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği Şekil 26'da, ve zaman tanım alanında SSI-DATA uygulanarak bulunan yatay baskın modlara ilişkin stabilizasyon diyagramı ise Şekil 27'de gösterilmektedir.

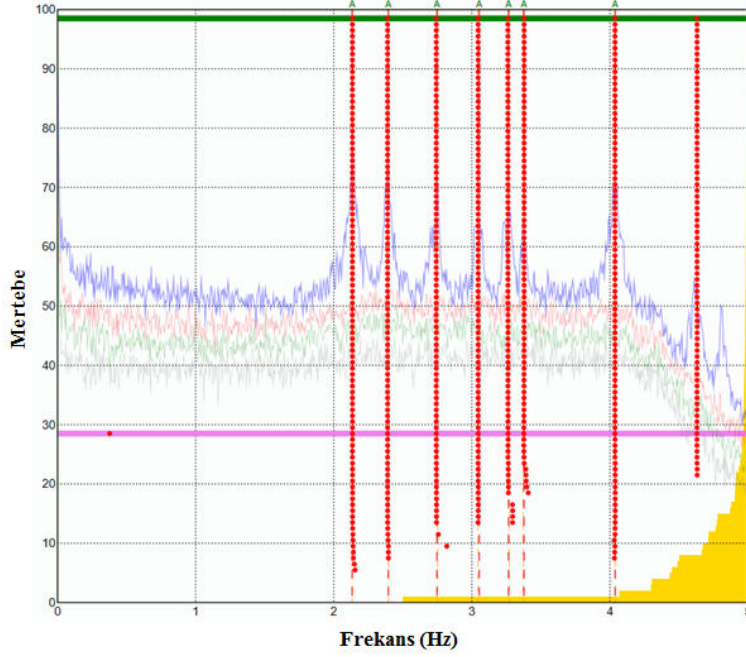
Yine aynı şekilde 1. köprü testinden (Test-1) elde edilen verilerin frekans tanım alanında EFDD uygulanarak bulunan düşey/burulma baskın modlara ilişkin spektral yoğunluk tekil değerleri grafikleri Şekil 28'de, ve zaman tanım alanında SSI-DATA uygulanarak bulunan

düşey/burulma baskın modlara ilişkin stabilizasyon diyagramları ise Şekil 29'da gösterilmektedir.

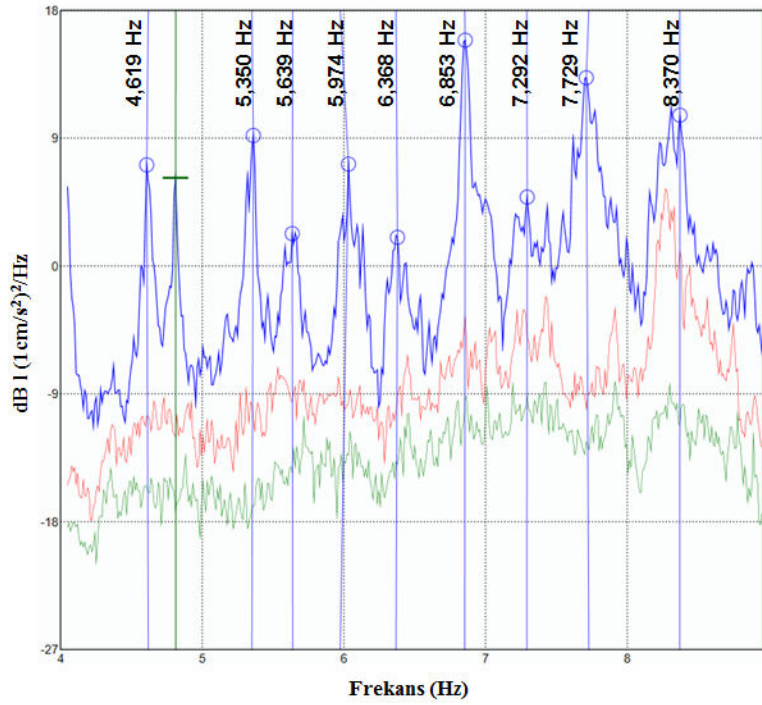
1. köprü testinden (Test-1) elde edilen verilerin EFDD ve SSI-DATA yöntemleri kullanılarak tahmin edilen köprü modlarına ilişkin modal güvence kriteri (MAC) bakımından frekans ve sönüm oranlarının kıyaslamaları Tablo 1'de sunulmuştur. Burada MAC değerleri SSI-Data ve EFDD yöntemleri ile bulunan modlar arasında hesaplanmıştır.



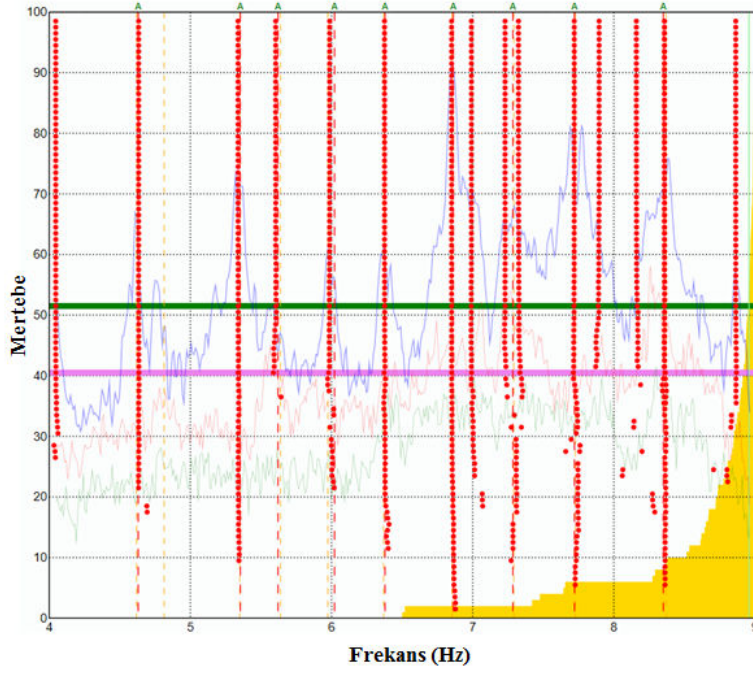
Şekil 26. Test-1 yatay baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği



Şekil 27. Test-1 yatay baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı



Şekil 28. Test-1 düşey/burulma baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği



Şekil 29. Test-1 düşey/burulma baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı

Tablo 1. Test-1 iki farklı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilen modal parametrelerin kıyaslaması

Mod Şekli	TEST-1				
	Ort. Sıcaklık = 10.86°C				
	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)	
	EFDD	MAC	SSI-DATA	EFDD	SSI-DATA
1. Enine	2.133	0.999	2.134	0.475	0.563
2. Enine	2.396	1	2.396	0.378	0.361
3. Enine	2.753	0.998	2.747	0.271	0.488
4. Enine	3.044	0.994	3.054	0.355	0.464
5. Enine	3.272	0.998	3.266	0.426	0.562
6. Enine	3.372	0.991	3.377	0.252	0.471
7. Enine	4.036	0.999	4.038	0.295	0.406
1. Burulma	4.619	0.997	4.631	0.395	0.810
2. Burulma	5.350	0.994	5.354	0.357	0.697
3. Burulma	5.639	0.989	5.621	0.295	1.892
4. Burulma	5.974	0.995	6.021	1.930	0.807
5. Burulma	6.368	0.931	6.379	0.195	0.820
6. Burulma	6.853	0.993	6.863	0.166	0.345
1. Düşey	7.292	0.916	7.285	0.204	1.256
2. Düşey	7.729	0.978	7.722	0.379	0.690
3. Düşey	8.370	0.918	8.351	0.147	0.758

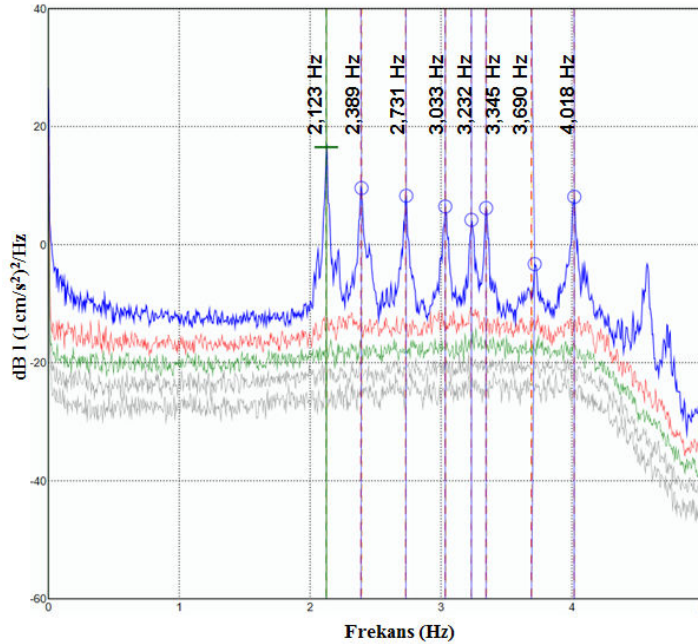
### 7.3 Test-2 Sonuçları

16.05.2016 tarihinde gerçekleştirilen 2. köprü testinde (Test-2) elde edilen ve köprünün tamamından toplanan veriler SSI-Data ve EFDD yöntemleri ile işlenmiştir. Önceki kısımda da bahsedildiği üzere köprü testlerinden elde edilen verilerin işlenmesi ile elde edilen modlar, yatay baskın modlar ve düşey/burulma baskın modlar olarak iki grupta sunulmuştur.

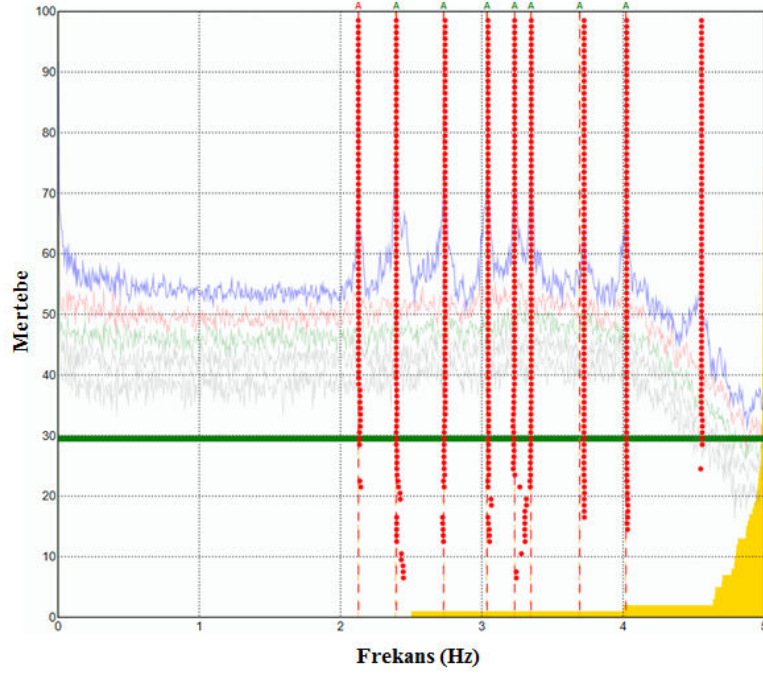
2. köprü testinden (Test-2) elde edilen verilerin frekans tanım alanında EFDD uygulanarak bulunan yatay baskın modlara ilişkin spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği Şekil 30'da, ve zaman tanım alanında SSI-DATA uygulanarak bulunan yatay baskın modlara ilişkin stabilizasyon diyagramı ise Şekil 31'de gösterilmektedir.

Yine aynı şekilde 2. köprü testinden (Test-2) elde edilen verilerin frekans tanım alanında EFDD uygulanarak bulunan düşey/burulma baskın modlara ilişkin spektral yoğunluk tekil değerleri grafikleri Şekil 32'de, ve zaman tanım alanında SSI-DATA uygulanarak bulunan düşey/burulma baskın modlara ilişkin stabilizasyon diyagramları ise Şekil 33'de gösterilmektedir.

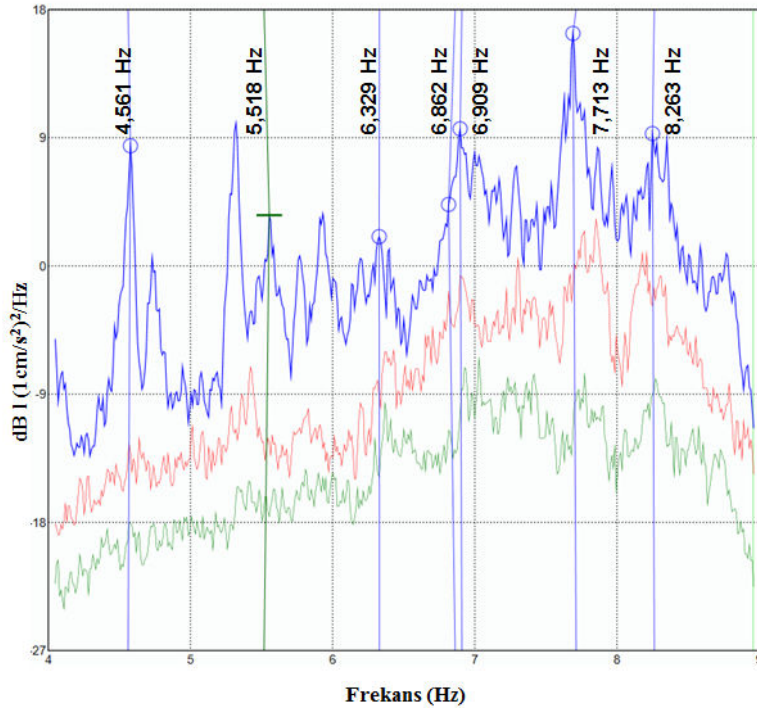
2. köprü testinden (Test-2) elde edilen verilerin EFDD ve SSI-DATA yöntemleri kullanılarak tahmin edilen köprü modlarına ilişkin modal güvence kriteri bakımından frekans ve sönüm oranlarının kıyaslamaları Tablo 2'de sunulmuştur. Burada MAC değerleri SSI-Data ve EFDD yöntemleri ile bulunan modlar arasında hesaplanmıştır.



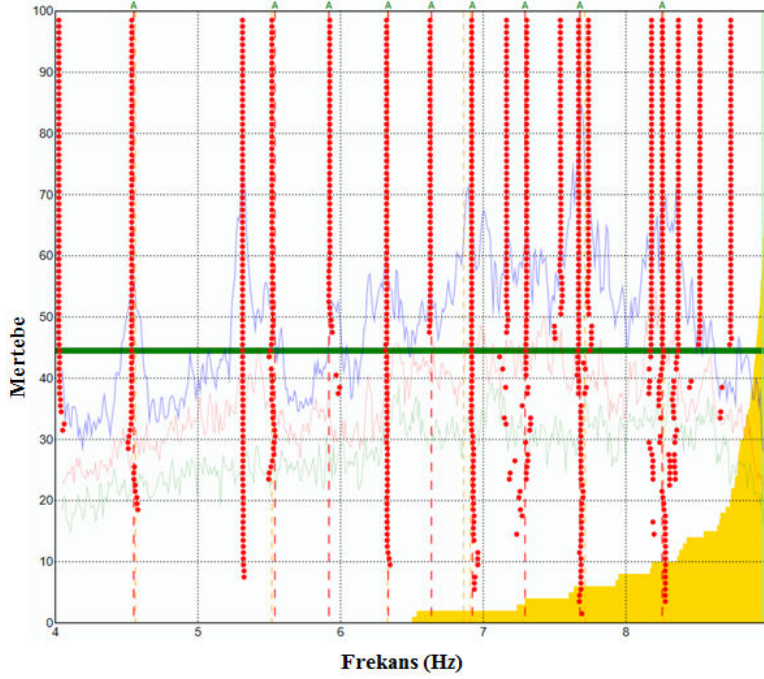
Şekil 30. Test-2 yatay baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği



Şekil 31. Test-2 yatay baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı



Şekil 32. Test-2 düşey/burulma baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği



Şekil 33. Test-2 düşey/burulma baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı

Tablo 2. Test-2 iki farklı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilen modal parametrelerin kıyaslaması

Mod Şekli	TEST- 2				
	Ort. Sıcaklık = 32.18°C				
	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)	
	EFDD	MAC	SSI-DATA	EFDD	SSI-DATA
1. Enine	2.123	0.998	2.127	0.25	0.933
2. Enine	2.389	0.998	2.395	0.419	0.924
3. Enine	2.731	0.997	2.730	0.335	0.566
4. Enine	3.033	0.984	3.038	0.386	0.418
5. Enine	3.232	0.983	3.233	0.277	0.999
6. Enine	3.345	0.992	3.349	0.253	0.525
Boyuna	3.690	0.880	3.694	0.335	1.353
7. Enine	4.018	0.999	4.021	0.203	0.490
1. Burulma	4.561	0.999	4.550	0.423	0.659
2. Burulma	-	-	5.318	-	0.412
3. Burulma	5.518	0.987	5.540	0.355	1.017
4. Burulma	-	-	5.918	-	3.176
5. Burulma	6.329	0.622	6.334	0.251	0.871
6. Burulma	6.862	-	-	0.155	-
1. Düşey	6.909	0.919	6.924	0.417	1.224
2. Düşey	7.713	0.839	7.677	0.146	0.399
3. Düşey	8.263	0.884	8.254	0.132	0.538

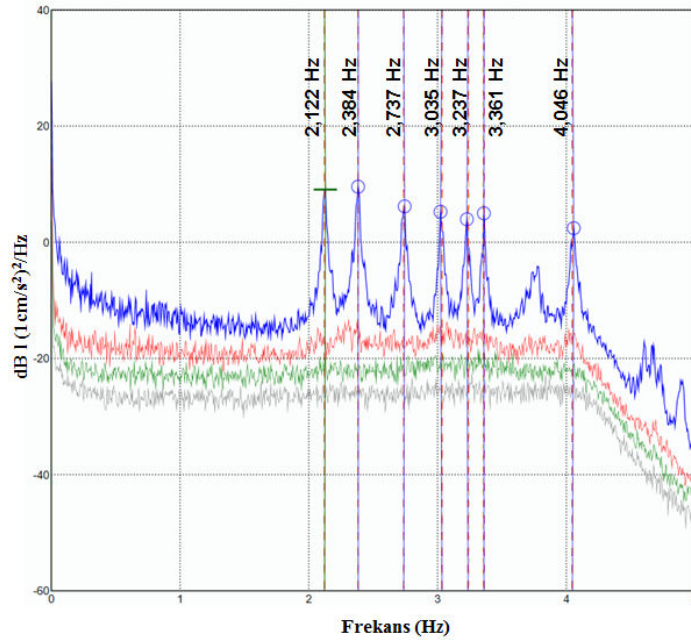
#### 7.4 Test-3 Sonuçları

28.07.2016 tarihinde gerçekleştirilen 3. köprü testinden (Test-3) elde edilen ve köprünün tamamından toplanan veriler SSI-Data ve EFDD yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Önceki kısımda da bahsedildiği üzere köprü testlerinden elde edilen verilerin işlenmesi ile elde edilen modlar, yatay baskın modlar ve düşey/burulma baskın modlar olarak iki grupta sunulmuştur.

3. köprü testinden (Test-3) elde edilen verilerin frekans tanım alanında EFDD uygulanarak bulunan yatay baskın modlara ilişkin spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği Şekil 34'te, ve zaman tanım alanında SSI-DATA uygulanarak bulunan yatay baskın modlara ilişkin stabilizasyon diyagramı ise Şekil 35'te gösterilmektedir.

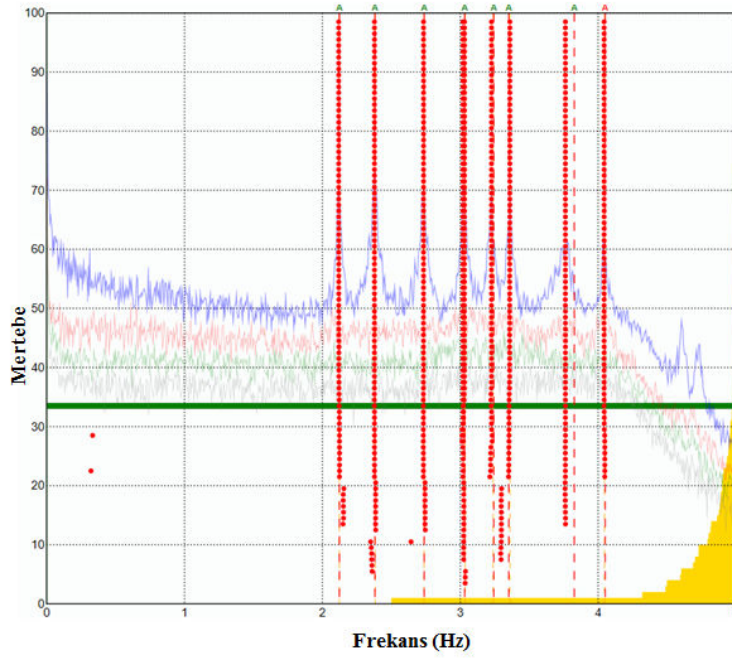
Yine aynı şekilde 3. köprü testinden (Test-3) elde edilen verilerin frekans tanım alanında EFDD uygulanarak bulunan düşey/burulma baskın modlara ilişkin spektral yoğunluk tekil değerleri grafikleri Şekil 36'da, ve zaman tanım alanında SSI-DATA uygulanarak bulunan düşey/burulma baskın modlara ilişkin stabilizasyon diyagramları ise Şekil 37'de gösterilmektedir.

3. köprü testinden (Test-3) elde edilen verilerin EFDD ve SSI-DATA yöntemleri kullanılarak tahmin edilen köprü modlarına ilişkin modal güvence kriteri bakımından frekans ve sönüm oranlarının kıyaslamaları Tablo 3'de sunulmuştur. Burada MAC değerleri SSI-Data ve EFDD yöntemleri ile bulunan modlar arasında hesaplanmıştır.

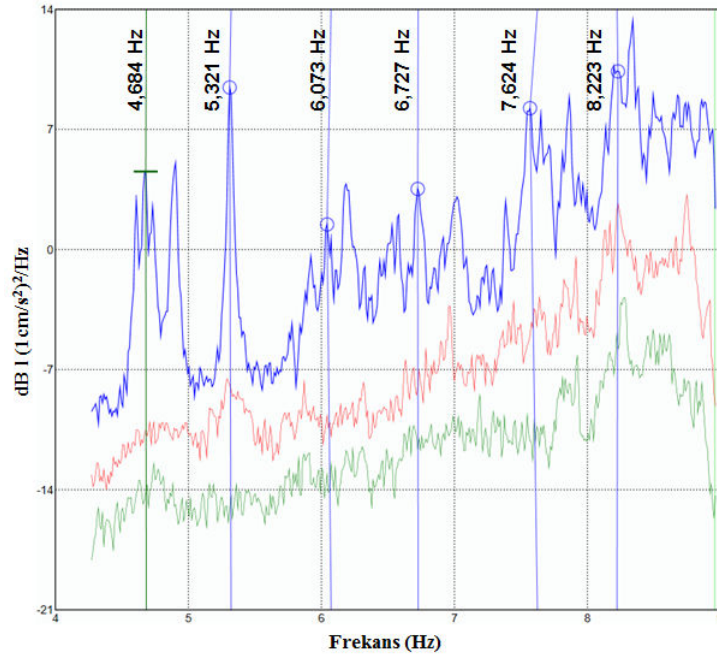


Şekil 34. Test-3 yatay baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği

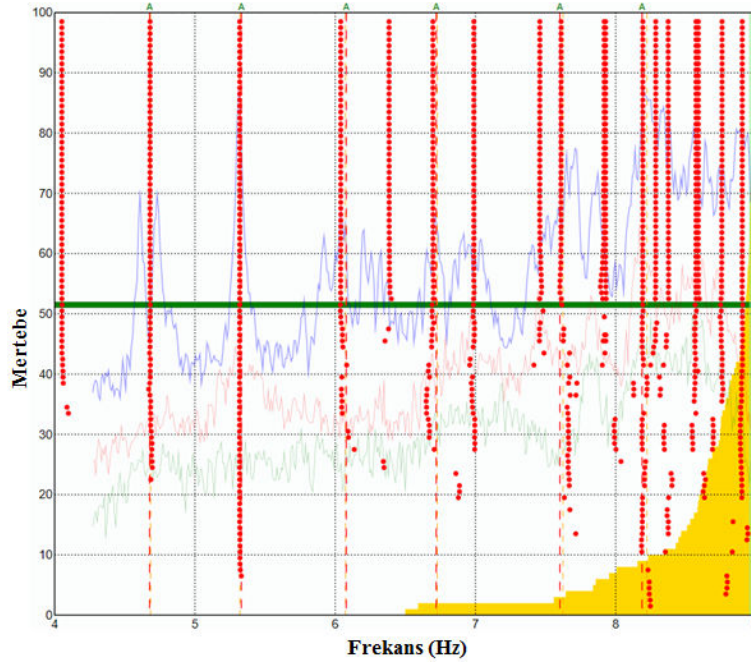




Şekil 35. Test-3 yatay baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı



Şekil 36. Test-3 düşey/burulma baskın modlar spektral yoğunluk tekil değerleri grafiği



Şekil 37. Test-3 düşey/burulma baskın modlar SSI stabilizasyon diyagramı

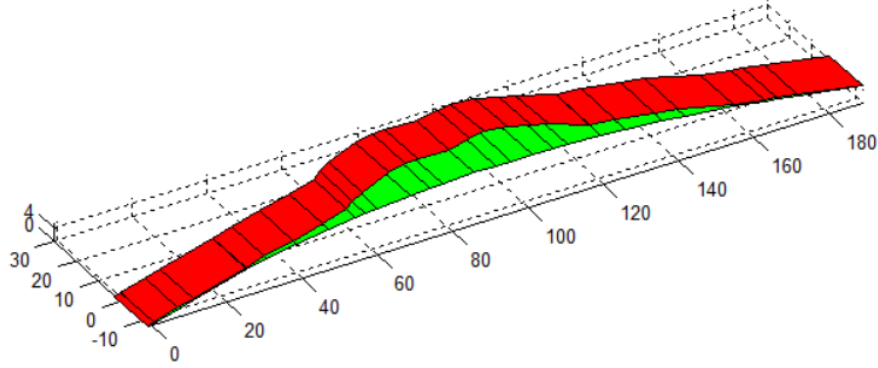
Tablo 3. Test-3 iki farklı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilen modal parametrelerin kıyaslaması

Mod Şekli	TEST- 3				
	Ort. Sıcaklık = 36.44°C				
	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)	
	EFDD	MAC	SSI-DATA	EFDD	SSI-DATA
1. Enine	2.122	1	2.124	0.420	0.431
2. Enine	2.384	0.999	2.381	0.341	0.416
3. Enine	2.737	0.990	2.739	0.295	0.423
4. Enine	3.035	0.991	3.033	0.213	0.429
5. Enine	3.237	0.993	3.244	0.237	0.656
6. Enine	3.361	0.995	3.352	0.179	0.364
Boyuna	-	-	3.828	-	1.321
7. Enine	4.046	0.997	4.051	0.181	0.365
1. Burulma	4.684	0.996	4.677	0.916	0.957
2. Burulma	5.321	0.998	5.331	0.303	0.457
3. Burulma	-	-	-	-	-
4. Burulma	6.073	0.920	6.079	0.294	1.622
5. Burulma	-	-	-	-	-
6. Burulma	-	-	-	-	-
1. Düşey	6.727	0.920	6.721	0.346	0.914
2. Düşey	7.624	0.979	7.602	0.306	0.985
3. Düşey	8.223	0.808	8.188	0.164	0.490

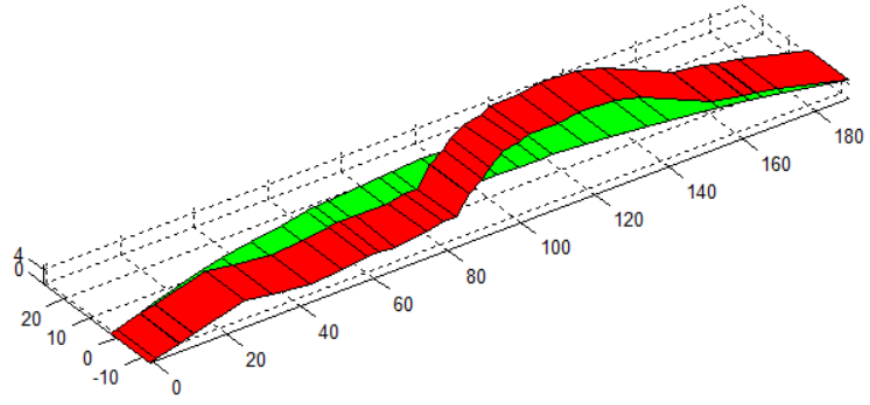
### 7.5 Sistem Tanımlama Yöntemleri ile Elde Edilen Deneysel Köprü Modları

Üç farklı ortamsal sıcaklık durumunu yansıtan ortamsal titreşim verisi toplanarak operasyonel modal analiz/sistem tanımlama uygulaması yapılmıştır. Köprü üzerinden toplanan veri frekans tanım alanında EFDD ve zaman tanım alanında SSI-DATA yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Köprüye ait yedisi enine baskın, altısı burulma baskın ve üçü de düşey baskın olmak üzere toplamda 16 adet köprü modu tahmin edilmiştir. Ayrıca ikinci ve üçüncü köprü testlerinde (Test-2 ve Test-3) boyuna yönde ivmeölçer sayısının artırılması ile köprüye ait boyuna yönde 3.7-3.8 Hz mertebesinde gelişen modlar da bulunmuştur.

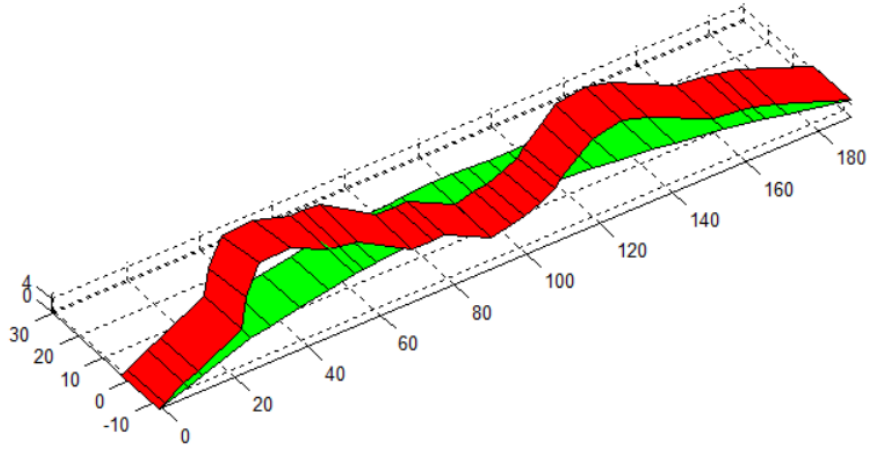
Köprü'nün enine modlarına ait frekans değerleri 3.5 Hz'e kadar gerçekleşirken 3.5 Hz ile 7 Hz arasında köprüde burulma ağırlıklı modlar oluşmaktadır. 7 ile 8.5 Hz aralığında ise köprü düşey modları bulunmaktadır. Köprüye ait EFDD tekniği ile tanımlanan mod şekilleri Şekil 38'den başlayarak Şekil 53'e kadar sunulmuştur. 2. ve 3. testlerde elde edilen boyuna yöndeki köprü modunun tüm köprü dikkate alındığında az sayıda ivmeölçer tarafından tespit edilmesi nedeniyle görsellerine yer verilmemiştir. Kullanılan sensör sayısının sınırlı olması nedeniyle elde edilen bazı modların görselleri düzgün elde edilememiştir; ancak yine de stabilizasyon diyagramı yorumlarına bağlı olarak bu modların fiziksel modlar olduğu kanısına varılmış ve burada paylaşılmıştır.



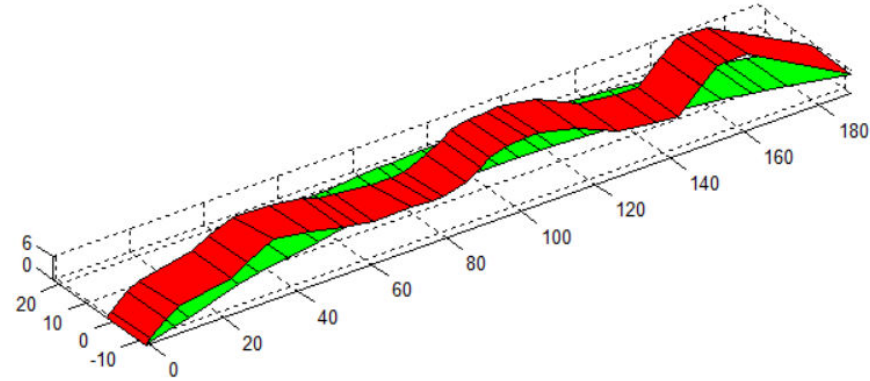
Şekil 38. Köprü 1. enine modu



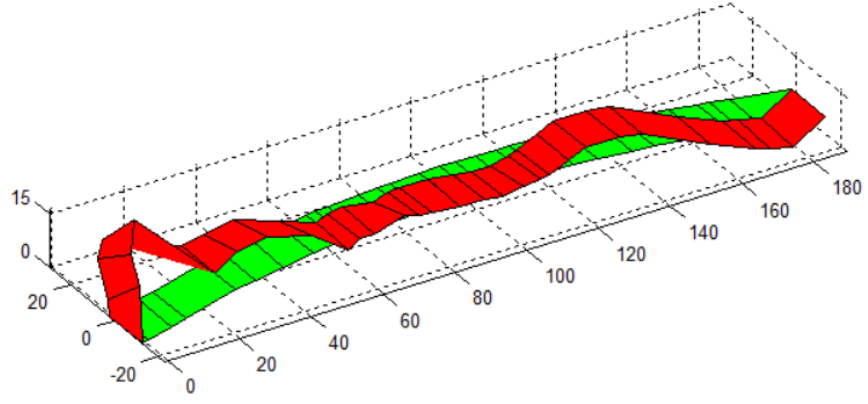
Şekil 39. Köprü 2. enine modu



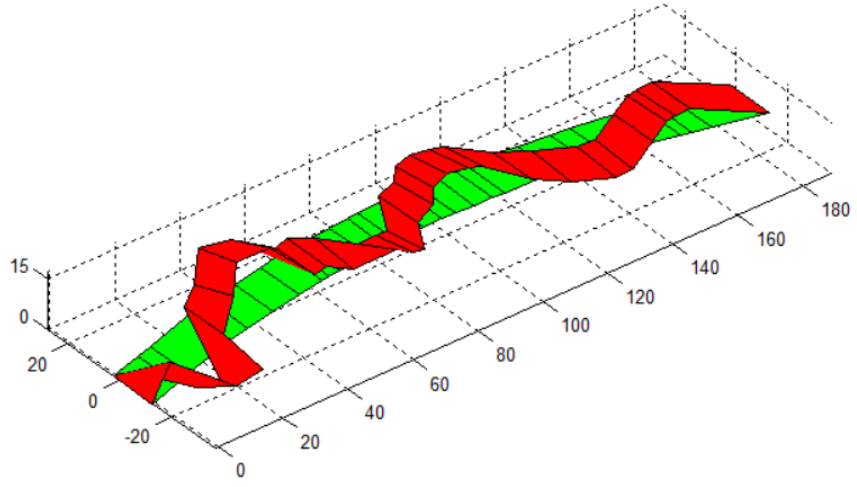
Şekil 40. Köprü 3. enine modu



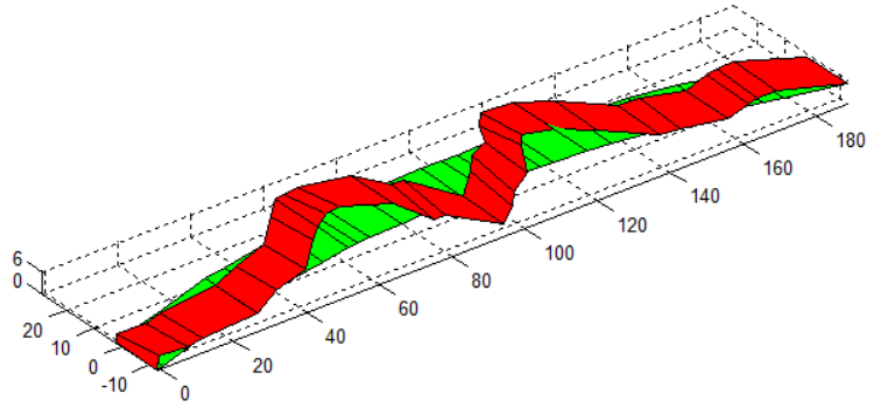
Şekil 41. Köprü 4. enine modu



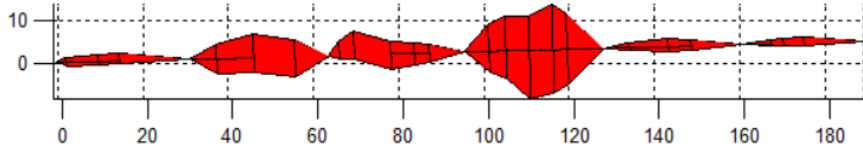
Şekil 42. Köprü 5. enine modu



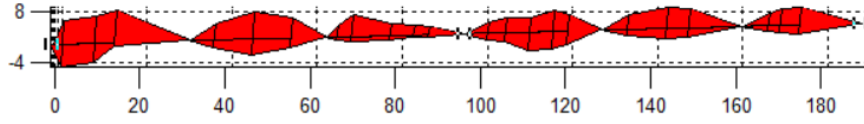
Şekil 43. Köprü 6. enine modu



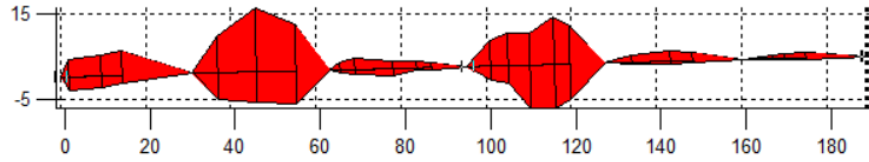
Şekil 44. Köprü 7. enine modu



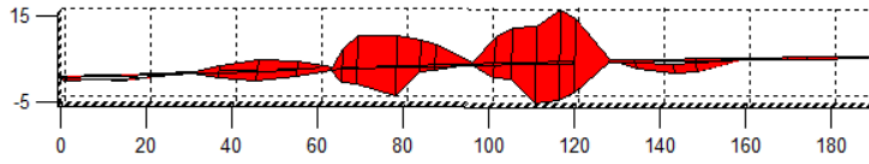
Şekil 45. Köprü 1. burulma modu



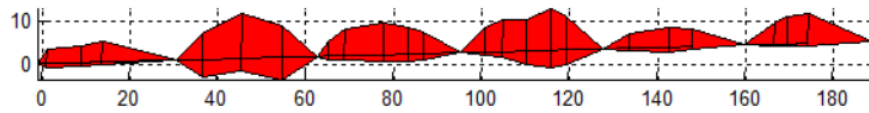
Şekil 46. Köprü 2. burulma modu



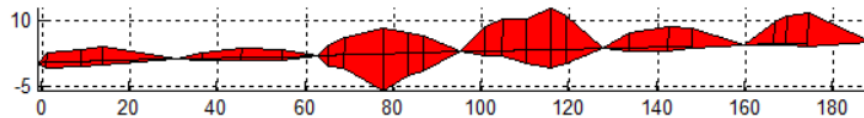
Şekil 47. Köprü 3. burulma modu



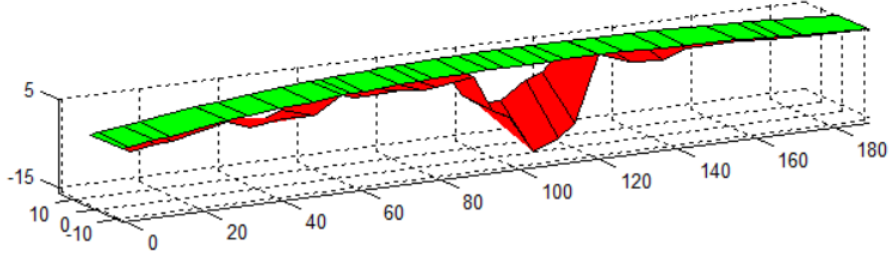
Şekil 48. Köprü 4. burulma modu



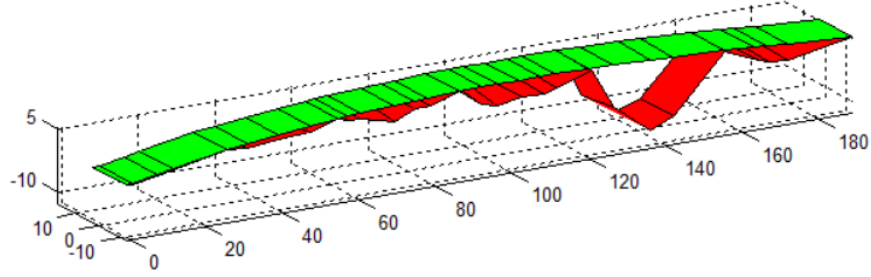
Şekil 49. Köprü 5. burulma modu



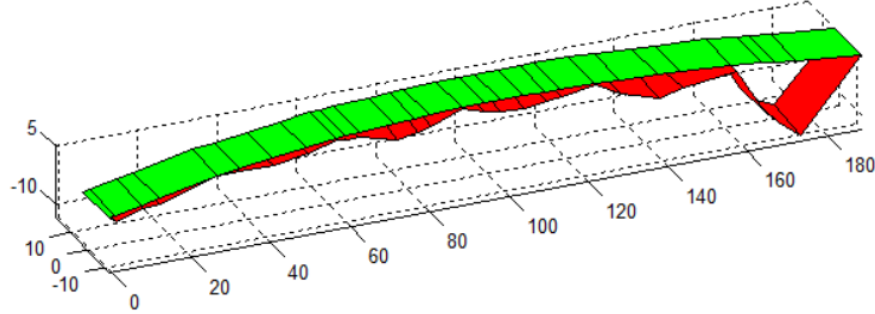
Şekil 50. Köprü 6. burulma modu



Şekil 51. Köprü 1. düşey modu



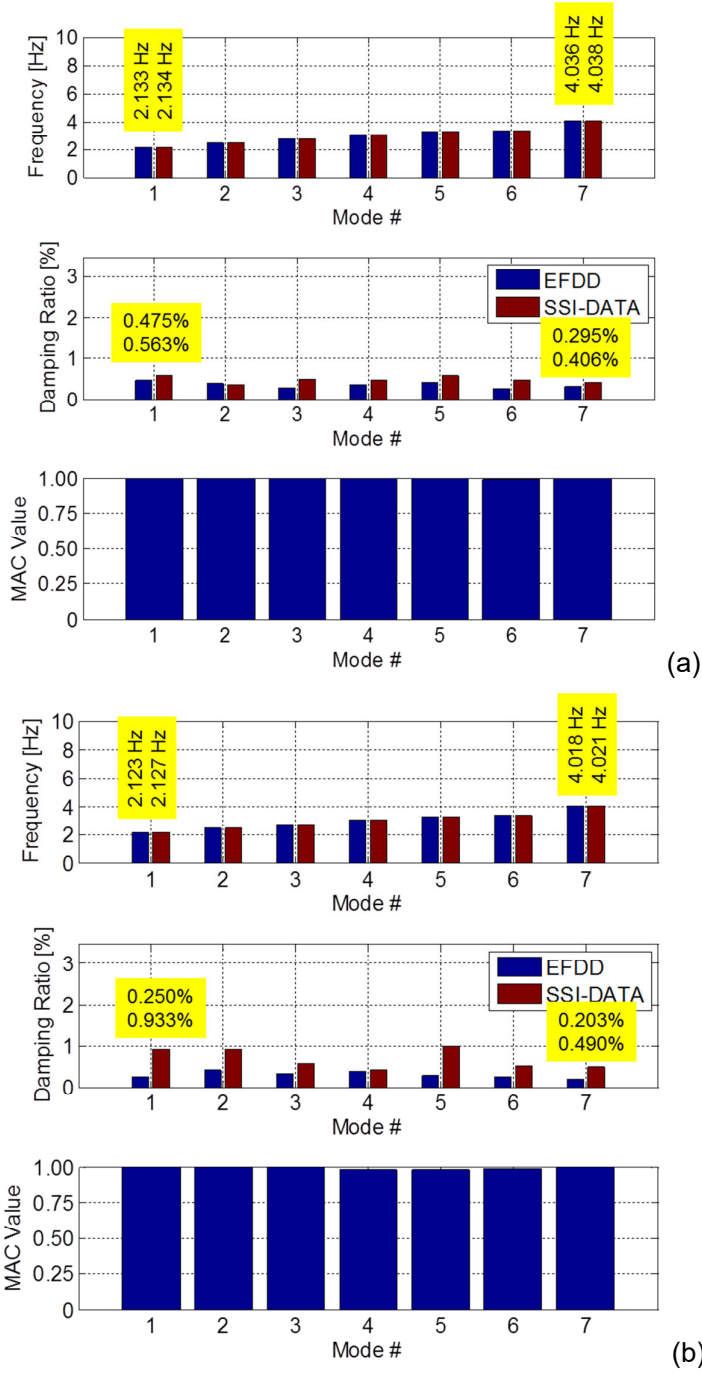
Şekil 52. Köprü 2. düşey modu



Şekil 53. Köprü 3. düşey modu

Bu modlar birden fazla yöntemle ayrı ayrı elde edilmiş ve sayısal model sonuçları ile de uygunluk göstermeleri nedeniyle fiziksel modlar olarak rapora dahil edilmiştir. İleri bölümlerde ayrıntısının verileceği gibi tahmin edilen bu modların bazıları (tahmin belirsizliğinin en düşük olduğu ve efektif modal kütle oranlarının büyük olduğu) güncelleme aşamasına dâhil edilmiştir.

Şekil 54 (a) ve (b), sırasıyla, 1. ve 2. Testler (Test-1 ve Test-2) için enine modların yöntemden yöneme tahmin sonuçlarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 54. Enine modlara ait modal parametre tahminlerinin yöntemden yöneme değişimi (a) Test-1 ve (b) Test-2 sonuçları

Karşılaştırma sonuçlarında da anlaşılacağı üzere hem Test-1 hem de Test-2 için EFDD ve SSI-Data yöntemleri frekans ve mod şekillerinin tahmini açısından çok yakın sonuçlar vermekte iken sönüm oranlarının tahmini açısından farklılık göstermektedir. Benzer bir durum burulma ve düşey modlar için ve farklı sıcaklık durumlarına karşılık gelen testler için



de gözlemlenmiştir. Bu durumda modal parametre tahminleri yöntemden yöntemle sönüm oranları hariç önemli bir değişiklik göstermektedir.

### 7.6 Sıcaklık Değişiminin Modal Parametre Tahmin Sonuçlarına Etkisi

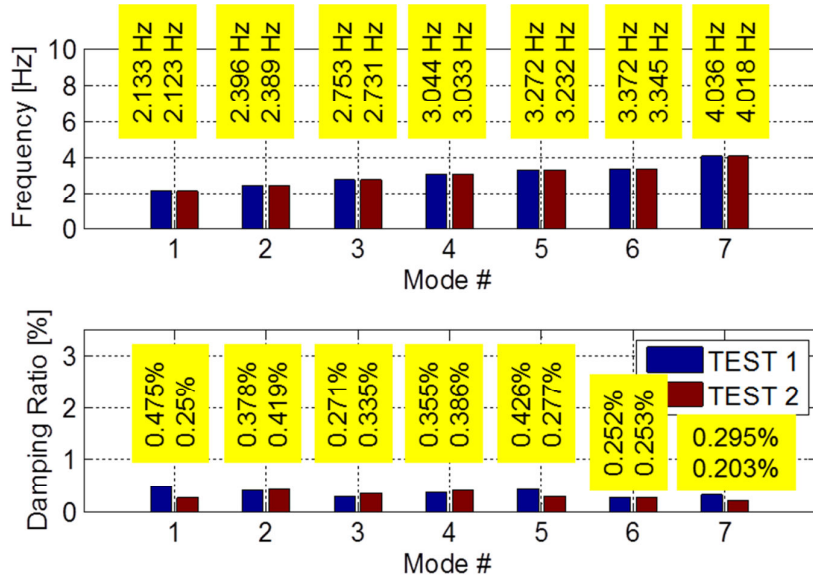
199+325 demiryolu çelik köprüsünde üç farklı ortamsal sıcaklığa sahip zaman diliminde (kış, bahar ve yaz testleri) ortamsal titreşim verisi toplanarak sadece-çıkıtı sistem tanımlama yöntemleri ile modal parametre tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te üç farklı zamanda gerçekleştirilen testlere ilişkin ortalama ortamsal sıcaklık değerleri ve söz konusu testlerde tahmin edilen köprünün modlarına ait doğal titreşim frekans değerleri sunulmuştur. Testlere ait ortalama sıcaklık değerlerine bakıldığında, bahar ve yaz testlerinin (Test-2 ve Test-3) birbirine yakın ortalama sıcaklık değerlerine sahip olduğu, kış testinin (Test-1) ise söz konusu 2. ve 3. testlerdeki sıcaklık değerlerinden 20-25°C daha düşük ortalama sıcaklık değerinde yapıldığı görülmektedir. Dolayısıyla anlamlı bir karşılaştırma Kış ile Bahar veya Yaz testleri arasında yapılabilecektir.

Tablo 4. Farklı sıcaklıkta yapılan testlere ilişkin modal parametrelerin kıyaslaması

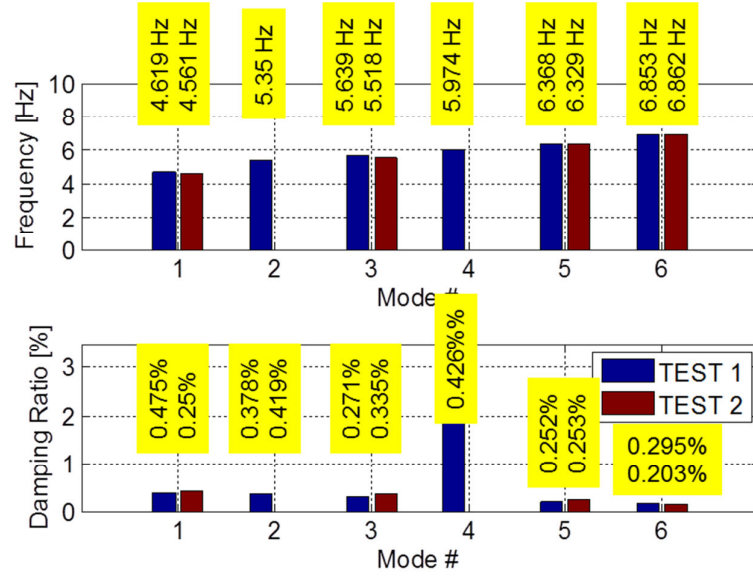
Modlar	TEST-1		TEST-2		TEST-3	
	Ort. Sıcaklık = 10.86°C		Ort. Sıcaklık = 32.18°C		Ort. Sıcaklık = 36.44°C	
	Frekans (Hz)		Frekans (Hz)		Frekans (Hz)	
	EFDD	SSI-DATA	EFDD	SSI-DATA	EFDD	SSI-DATA
1. Enine	2.133	2.134	2.123	2.127	2.122	2.124
2. Enine	2.396	2.396	2.389	2.395	2.384	2.381
3. Enine	2.753	2.747	2.731	2.730	2.737	2.739
4. Enine	3.044	3.054	3.033	3.038	3.035	3.033
5. Enine	3.272	3.266	3.232	3.233	3.237	3.244
6. Enine	3.372	3.377	3.345	3.349	3.361	3.352
7. Enine	4.036	4.038	4.018	4.021	4.046	4.051
1. Burulma	4.619	4.631	4.561	4.550	4.684	4.677
2. Burulma	5.350	5.354	-	5.318	5.321	5.331
3. Burulma	5.639	5.621	5.518	5.540	-	-
4. Burulma	5.974	6.021	-	5.918	6.073	6.079
5. Burulma	6.368	6.379	6.329	6.334	-	-
6. Burulma	6.853	6.863	6.862	-	-	-
1. Düşey	7.292	7.285	6.909	6.924	6.727	6.721
2. Düşey	7.729	7.722	7.713	7.677	7.624	7.602
3. Düşey	8.370	8.351	8.263	8.254	8.223	8.188

Tablo 4'teki farklı ortamsal sıcaklık değerlerinde yapılan ortamsal titreşim testlerine bakıldığında sıcaklığın artmasına bağlı olarak köprü modlarına ilişkin frekans değerlerindeki azalmanın sınırlı miktarda olduğu gözlemlenmektedir. Söz konusu frekans değerlerindeki sınırlı değişimin veri gürültüsü, verilerin sonlu sayısı (25 dakikalık veriler toplanmıştır) gibi nedenlerle gelişen tahmin belirsizliği sınırları içinde kaldığı düşünülmektedir; dolayısıyla anlamlı değişiklikler olarak yorumlanmamıştır. Bu nedenlerle 199+325 demiryolu çelik köprüsünün modal parametrelerinin sıcaklık etkisi altında çok sınırlı olarak veya değişmediği söylenebilir. Bu yorum bu köprü özelinde yapılan bir yorumdur; dolayısıyla aslında sıcaklık etkisine bağlı modal parametrelerde önemli değişikliklerin izlenmemesi aslında sonlu elemanlar tabanlı hasar tespit çalışmaları için bu köprüyü ideal bir araç haline getirmektedir. Ancak, tabi ki diğer çevresel faktörlerin etkileri de incelenmelidir. Sıcaklık etkisinin minimal düzeyde kalmasının nedeni olarak her bir açıklığın basit mesnetli olarak oluşturulmuş olduğu düşünülmektedir. Açıklıklar birbirinden bağımsız olarak serbestçe genleşme ve büzülme yapabilmekte ve dolayısıyla modal parametreleri değişmemektedir.

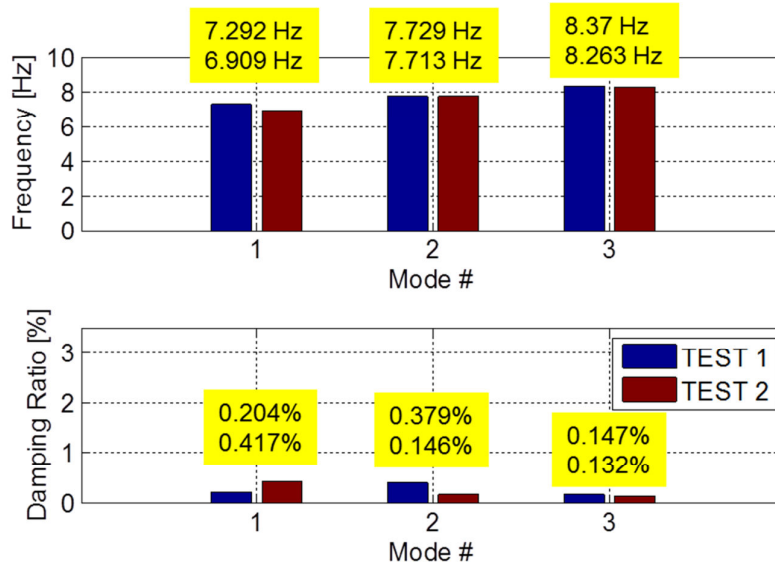
Şekil 55'de EFDD yöntemi ile tahmin edilmiş Test-1 (ortalama sıcaklık 10.86°C) ve Test-2 (ortalama sıcaklık 32.18°C) sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 55. Test-1 ve Test-2 için (a) enine, (b) burulma ve (c) düşey modlara ilişkin tahmin değerleri (sıcaklık etkisine yakından bakış)

Şekil 55'de sunulan sonuçlara göre enine ve burulma modları sıcaklık değişimine duyarsız, düşey modlar da ise miktar duyarlılık izlenmiştir; ancak bu değişimin tahmin belirsizliği sınırları içinde kaldığı düşünülmektedir.

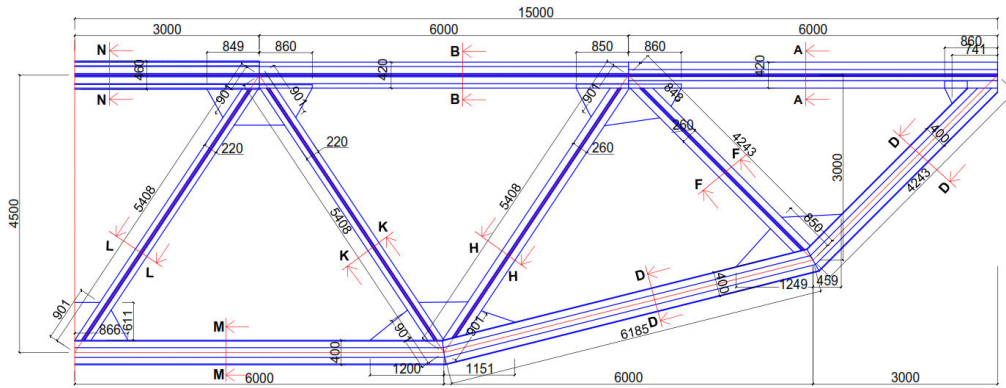
Burada bir noktanın altının çizilmesi gerekliliği doğmaktadır: Test-1 ve 2.-3. Testlere ait sonuçlar arasında dahi çok az miktarda bir değişim izlenmiştir. Dolayısıyla ilkbahar testleri

daha ılık bir ortalama sıcaklık seviyesinde yapılmış olsa dahi tahmin değerlerinde gerçekleşmesi beklenen değişikliğin yukarıdaki tabloda belirtilen değişikliklerden çok daha az olacağı çıkarımında rahatlıkla bulunulabilir.

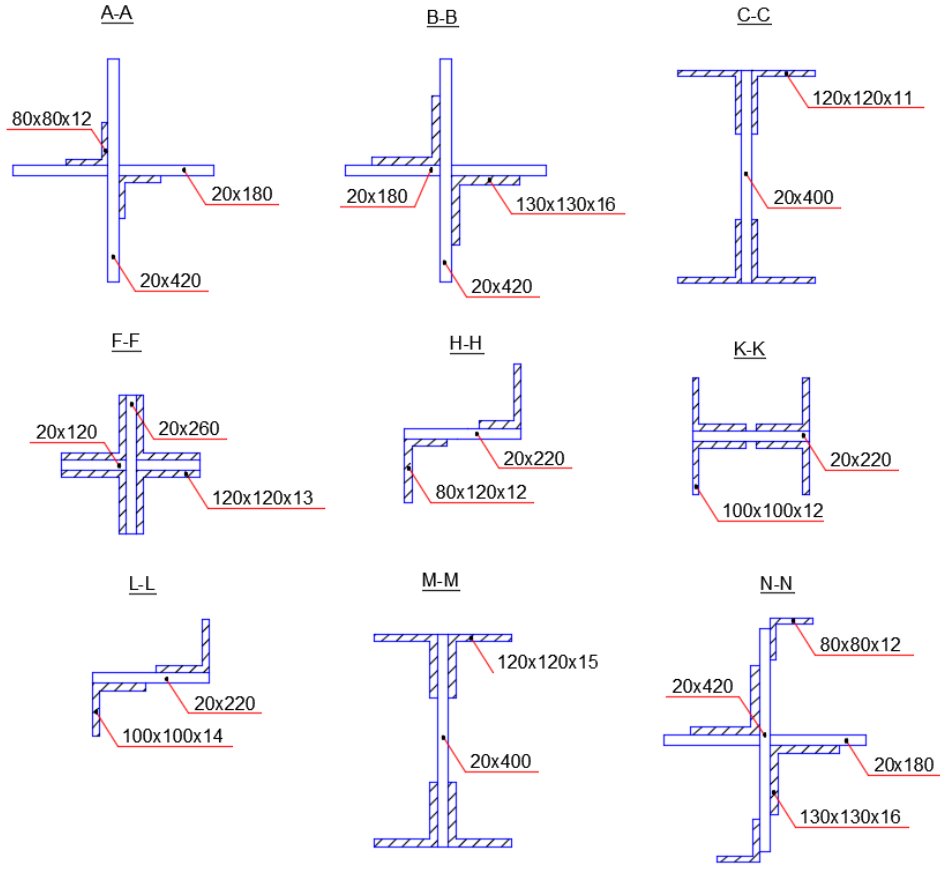
## 8. SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

### 8.1 Giriş

Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik kafes demiryolu köprüsünün, 1960'lı yıllarda köprüde meydana gelen yangın neticesinde yapılan düzenleme ve yenileme çalışmaları için oluşturulan projeleri mevcuttur. Söz konusu bu projelerde köprünün Eşme tarafında yer alan ilk kolon ayağı ve kolon ayağının sol ve sağında bulunan her biri 30 metre uzunluğunda olan makaslar yer almaktadır. 1963 yılında üretilen köprü projelerinden köprü taşıyıcı makası simetrik kısmını gösteren çizim Şekil 56'da ve makasta bulunan çelik eleman en kesitleri Şekil 57'de verilmektedir. Makas çizimlerinden de görüldüğü üzere çelik köşebent ve levha/plakalar kullanılarak I, H, +, Z şeklinde kuvvetlendirilmiş kesitler ile oluşturulmuştur. Birleşim bölgelerinde (düğüm noktası) çelik elemanların birleşim plakaları ile çok miktarda perçin kullanılarak birleşimleri yapıldığından söz konusu düğüm noktalarının rijit davranış sergilediği kabulü yapılmaktadır ve sayısal model çalışmalarında bu bölgelerde herhangi bir doğrultuda mafsal tanımlaması yapılmamıştır. Köprü makasında yer alan örnek bir birleşim bölgesi Şekil 58'de sunulmaktadır. Ayrıca birleşim bölgesinde yer alan çok sayıda elemanın birleşmesinden kaynaklanan kesit değişiklikleri oluşturulan sayısal modellerde dikkate alınmıştır.



Şekil 56. 199+325 köprüsü taşıyıcı makas görünümü



Şekil 57. 199+325 köprüsü taşıyıcı makas eleman enkesitleri

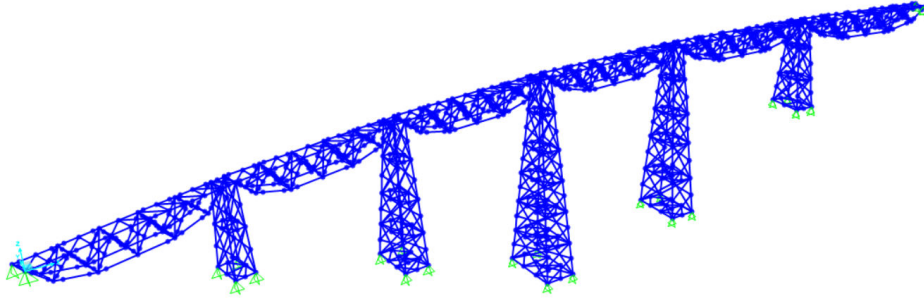


Şekil 58. 199+325 köprüsü birleşim bölgesi örneği

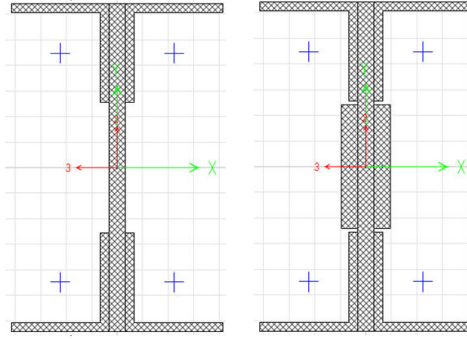
## 8.2 SAP2000 Modeli: Köprü Başlangıç Detaylı Modeli

199+325 demiryolu çelik köprüsünün mevcut projelerinden ve köprüye yapılan keşif gezilerinde yapılan gözlemlerden elde edilen veriler derlenerek köprünün SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak Şekil 59'da gösterilen 3 boyutlu ilk/başlangıç analitik sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde köprünün taşıyıcı sistemini tanımlamada altı serbestlik derecesine sahip üç boyutlu çerçeve elemanlar kullanılmıştır. Söz konusu taşıyıcı elemanlar iki adet yan yana makastan oluşan, enleme kirişi ve diyagonal kirişler ile birbirine bağlanan köprü kafesinin elemanları ve kolon ayaklarındaki elemanlardır. Ayrıca her altı metrede bir bulunan makasları birbirine bağlayan enleme kirişlerinin üzerine oturan ve üzerindeki ahşap travers, ray gibi yapısal olmayan elemanları taşıyan boylama kirişleri (stringers) üç boyutlu çerçeve eleman olarak modellenmiştir. Her bir açıklığı iki adet makastan oluşan köprünün bağlantıları perçinlerle olduğundan birleşim yerleri rijit bağlantı olarak modele dâhil edilmiştir. Birleşim yerleri modellenirken de çerçeve elemanların birleşimlerinde bulunan bağlantı plakalarının boyutları dikkate alınarak çerçeve elemanlarda kesit değişiklikleri oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar programının kesit tasarımı (section designer) kısmında oluşturulan güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş çerçeve eleman kesitleri Şekil 60'da gösterilmiştir. Böylece birleşimlerdeki kesit artışları köprü modelinde dikkate alınmıştır. Bu ve diğer modeller, gerçek köprüye hasar verilemediği için bu modellere sayısal olarak farklı hasarlar verilerek hasar tespit yöntemlerinin uygulanması için gerekli olan verilerin elde edilmesi için kullanılacaktır.

199+325 demiryolu çelik köprüsü hem yatayda hem düşeyde kurba sahip olup, yatay karp yarıçapı 300 metre, düşey kurbunun eğimi %2.5'tir. Söz konusu geometrik parametreler sonlu eleman modelinde dikkate alınmıştır. Köprüde taşıyıcı sistemin haricinde ahşap traversler, raylar, krapolar, perçinler, korkuluklar ve baklava saclar gibi yapısal olmayan elemanlar bulunmaktadır. Söz konusu bu elemanlardan oluşan yükler buldukları yerler dikkate alınarak tekil ve yayılı yükler olmak üzere taşıyıcı sistem üzerine etki ettirilerek etkileri modal analiz ve simülasyon çalışmaları için dikkate alınmıştır.



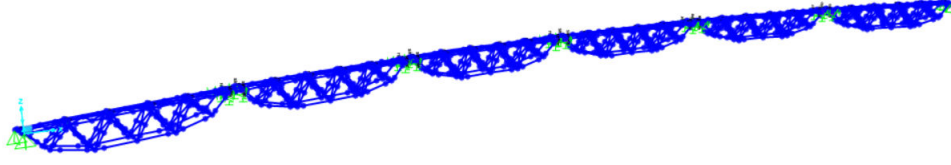
Şekil 59. 199+325 köprüsü başlangıç analitik modeli



Şekil 60. Birleşim bölgelerinde yapılan kesit model çalışma örneği: a) güçlendirilmemiş çerçeve eleman kesiti, b) çelik plakalar ile güçlendirilmiş çerçeve eleman kesiti

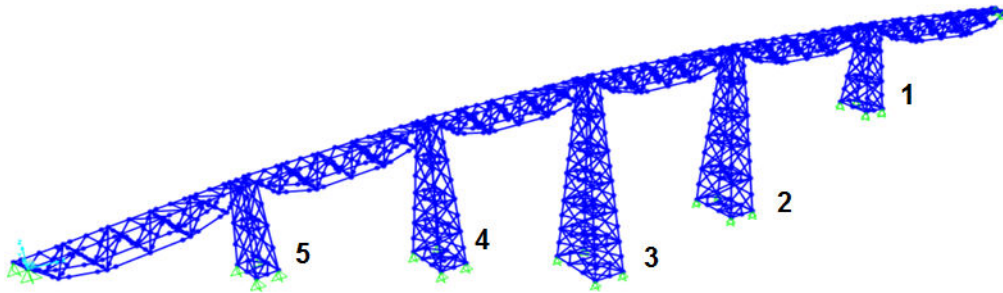
Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler ışığında sonlu eleman güncellemesi tekniği ile köprünün analitik modelinin netleştirilmesi çalışmaları yapılacağından dolayı köprü sayısal modellerinde bazı basitleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Karmaşık ve çok eleman içeren modeller güncelleme aşamasında güncellenecek problemi çok büyütmekte ve dolayısıyla işlem adımlarının süresini muntazam bir miktarda arttırmakta ve çok yavaşlatmaktadır; her bir güncelleme adımı saatler almaktadır.

Güncellenecek parametrelerin azaltılması amacıyla köprü ayaklarının analitik modelde sadece yaylar ile temsil edilmesine karar verilmiştir. Bu şekilde sadece kolon ayakları arasındaki 6 adet makas sistemi ve yaylar güncellenmiş olacaktır. Farklı yükseklik ve boyutlardaki kolon ayaklarını modellemek yerine üç doğrultuda (x,y,z) 1 boyutlu yay (spring) elemanlar kullanarak kolon ayaklarından köprü sistemine etkiyen rijitliği tanımlanmıştır. (Şekil 61).



Şekil 61. 199+325 köprüsü yay elemanlı analitik modeli

Köprü ayaklarının rijitliklerinin belirlenmesinde farklı boyut ve yüksekliklerde olan kolon ayakları SAP 2000 programında ayrı ayrı modellenip üç doğrultuda 1 tonluk yük uygulaması yapılarak oluşan deplasmanlar hesaplanmıştır. 5 adet köprü ayağının x, y ve z doğrultularında 1 tonluk kuvvet altında yapmış oldukları deplasmanlar rijitlik = yük/deplasman bağıntısı ile dikkate alınarak ayakların Kx, Ky ve Kz olan rijitlikleri bulunmuştur. Bu şekilde elde edilen sonlu eleman modelinde kullanılan köprü ayaklarının yerine geçen yay (spring) rijitlikleri Tablo 5'te verilmiştir. Köprü ayağı numaraları Şekil 62'de gösterilmiş olup; yay rijitliklerinin bulunmasında kullanılan modelleme stratejisine ilişkin 5 adet köprü ayağının x yönünde 1 tonluk kuvvet altında deplase olmuş halleri Şekil 63'te sunulmuştur. Bahse konu bu kolon ayak rijitlikleri aynı zamanda köprü sisteminde yapılan güncelleme parametrelerinden birini oluşturacaktır; böylece köprü ayaklarını temsil eden üç farklı yöndeki yay sabitlerinde meydana gelen değişiklikler köprü ayaklarında oluşmuş gibi düşünülecektir. Bu basitleştirme zorunlu bir basitleştirmedir. Sonlu elemanlar modeli güncellemesi esaslı hasar tespit yönteminin genel olarak programlanması ve kurgusunun yapıldığı bu çalışma için yapılması uygun görülmüştür. İlerleyen çalışmalarda bu tür basitleştirmelere gerek bırakmayacak daha verimli optimizasyon yöntemleri üzerinde çalışmaların sürdürülmesi planlanmaktadır.



Şekil 62. Köprü ayağı numaraları

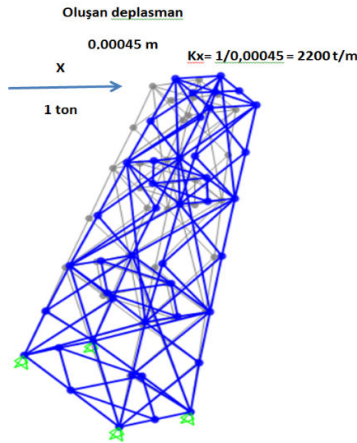


Tablo 5.Köprü ayağı rijitlikleri (başlangıç rijitlikleri)

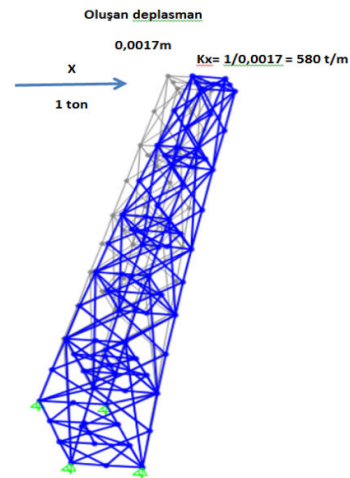
	Köprü Ayağı Rijitlikleri		
	Kx (t/m)	Ky (t/m)	Kz (t/m)
Köprü ayağı 1	2200	5350	106000
Köprü ayağı 2	580	1700	55000
Köprü ayağı 3	500	1600	50000
Köprü ayağı 4	1050	2850	77000
Köprü ayağı 5	2850	5600	143000

Köprü açıklıklarının oturduğu mesnetler basit ve hareketli olma durumlarını yansıtabilecek şekilde link elemanlar vasıtasıyla modellenmiştir. Mesnetlerin köprüdeki mevcut hali Şekil 64'te, sayısal olarak modellenmesi için kullanılan model yaklaşımı ise Şekil 65'te gösterilmektedir. İlk analitik modelde sabit mesnet öteleme hareketine göre tutulu, hareketli mesnet ise link eleman başlangıç rijitliği 10000 t/m olacak şekilde modellenmiştir. Köprü ayaklarının 1 tonluk yükler altında yaptığı deplasmana göre elde edilen Kx, Ky ve Kz rijitlik değerleri dörde bölünerek Şekil 65'te gösterildiği şekilde iki adet basit ve iki adet hareketli mesnedin altındaki yaylara atanmıştır. Yaylı köprü modeli ile ayaklı köprü modeli arasında kayda değer bir fark olmaması sebebiyle elde edilmiş olan Kx, Ky ve Kz yay rijitliklerinin yaylı köprü modelinin kolonlu köprü modelini temsil ettiği kabulü yapılmıştır.

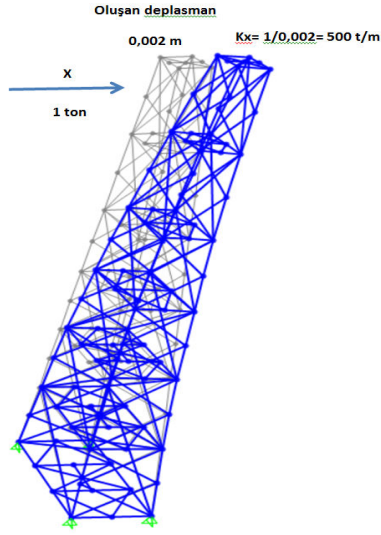
İlk/başlangıç sonlu eleman modelinden elde edilen köprü modlarına ilişkin frekans değerleri Tablo 6'da sunulmuştur. Köprünün geometrik özelliklerinden dolayı köprünün ilk mod şekilleri enine yönde oluşmuştur. Bu kısımda elde edilen değerler güncellenmemiş modele ait değerler olup, analitik model ilerleyen kısımda köprü testinden elde edilmiş dinamik parametrelere göre sonlu eleman modeli güncellenmesine tabi tutulmuştur.



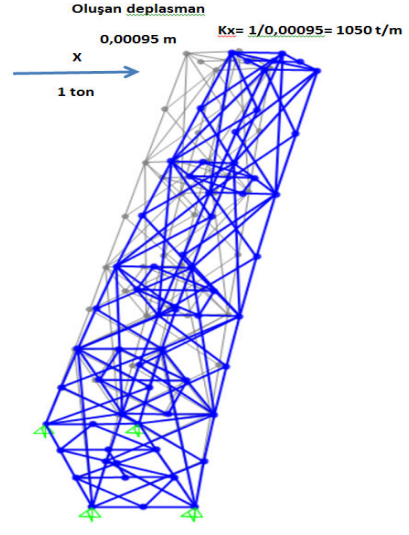
(a) Köprü Ayağı-1



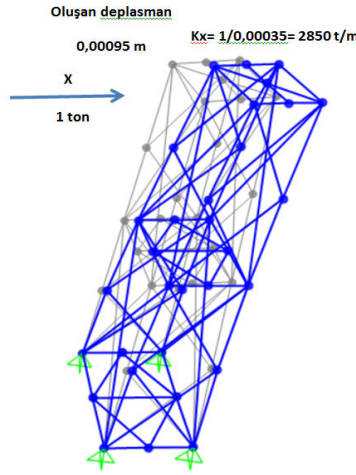
( b) Köprü Ayağı-2



(c) Köprü Ayağı-3



d) Köprü Ayağı-4

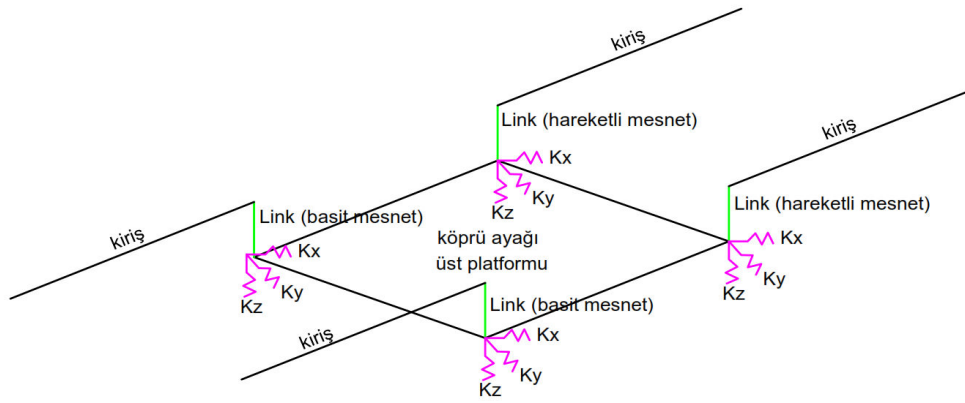


(e) Kolon Ayağı-5

Şekil 63. Köprü kolon ayaklarının X-yönünde 10 kN (1 ton) yük altında şekil değiştirmiş durumları: (a) Köprü Ayağı-1, (b) Köprü Ayağı-2, (c) Köprü Ayağı-3, (d) Köprü Ayağı-4, (e) Köprü Ayağı-5



Şekil 64. Köprü ayağı mesnetleri



Şekil 65. Köprü ayaklarının yaylar ile modellenmesi için kullanılan model detayı

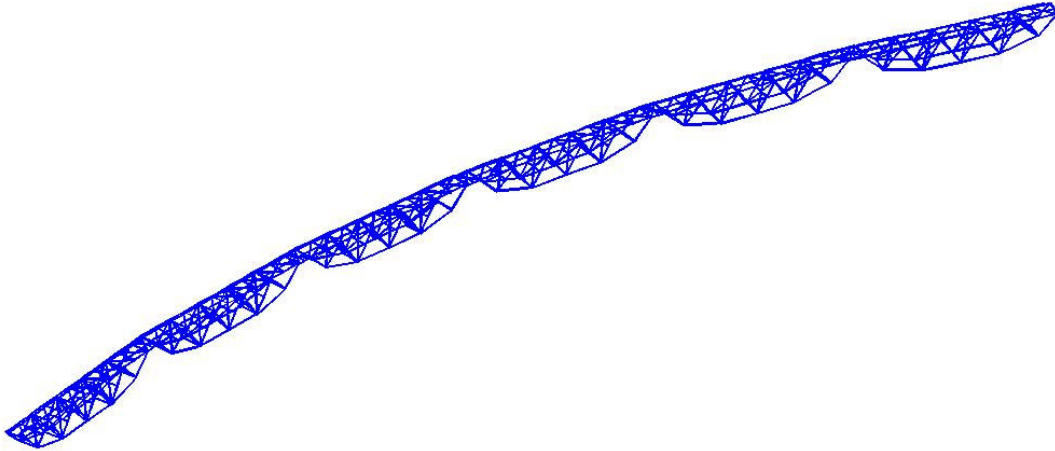
Tablo 6. Kolonların yaylarla modellendiği başlangıç sayısal modele ait doğal titreşim frekansları

Mod Şekli	Frekans (Hz)
1. Enine	2.000
2. Enine	2.295
3. Enine	2.680
4. Enine	3.011
5. Enine	3.546
1. Burulma	4.795
2. Burulma	5.588
3. Burulma	6.089
1. Düşey	7.194
2. Düşey	8.087

### 8.3 FEDEASLab Modeli: Köprü Başlangıç Modeli

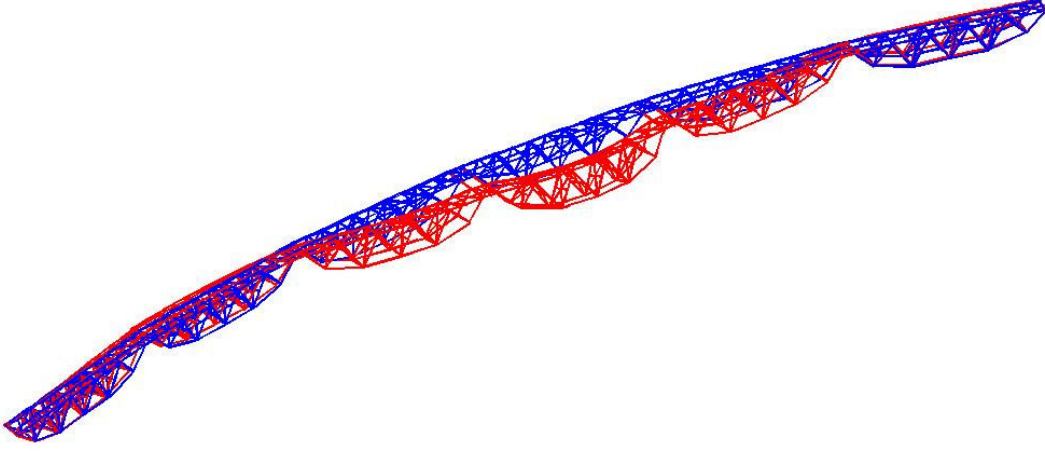
FEDEASLab MATLAB® (MathWorks, Inc., 2005) ortamında çalışan, hem statik hem de dinamik doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapabilen açık kodlu ve ara yüzü olmayan bir sonlu elemanlar yazılımıdır (Filippou F.C., 2004). Açık kodlu olması yapılacak optimizasyon tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesi çalışması için avantajlı bir platform oluşturmaktadır. Köprü'nün sonlu elemanlar modeli, 3-boyutlu kiriş-kolon elemanları, 6 açıklıklı kafes sistemin üzerine oturan ve kolon ayaklarını temsil eden tek boyutlu yay elemanları ve mesnet koşullarını yansıtan rijit bağlantı elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. FEDEASLab programında veri girişini kolaylaştıracak bir grafiksel ara yüzün olmamasından dolayı 199+325 çelik demiryolu köprüsünün 3-boyutlu 6 açıklıklı sonlu elemanlar modelini oluşturabilmek için her bir elemanın düğüm noktalarının koordinat, iki düğüm noktasına bir eleman tanımlanabilmesi için gerekli olan bağlantı matrisi (connectivity matrix), atalet momenti, burulma sabiti, yay sabiti, her bir düğüm noktası için kütle ve elastisite modülü ve Poisson değerleri ile en kesit özelliklerine ait gerekli bilgilerin tek tek girilmesi gerekmektedir. Bu işlemleri daha hızlı ve hatasız gerçekleştirmek için köprü'nün SAP2000 (Computers and Structures, 2010) programında oluşturulan ön sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır (Şekil 59). SAP2000 modeli netleştirildikten sonra ilgili sayısal model parametreleri FEDEASLab'e aktarılmıştır. Söz konusu taşıyıcı elemanlar 2 adet yan yana makastan oluşan enleme kirişi ve diyagonal kirişler ile birbirine bağlanan köprü kafesinin elemanları ve köprü'nün kolon ayaklarındaki elemanlardır.

FEDEASLab programında oluşturulan 199+325 çelik demiryolu köprüsünün 3-boyutlu 6 açıklıklı sonlu elemanlar modeli Şekil 66'da gösterilmiştir.

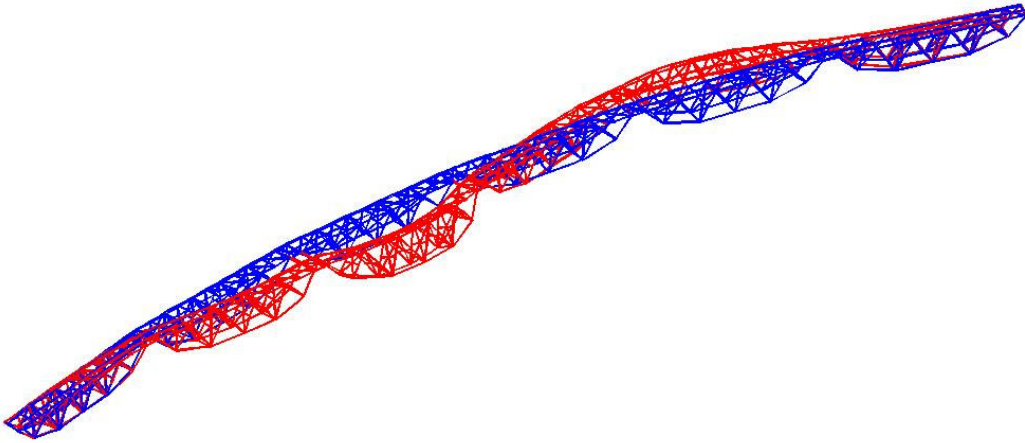


Şekil 66.199+325 Köprüsünün 3-boyutlu 6 açıklıklı FEDEASLab modeli

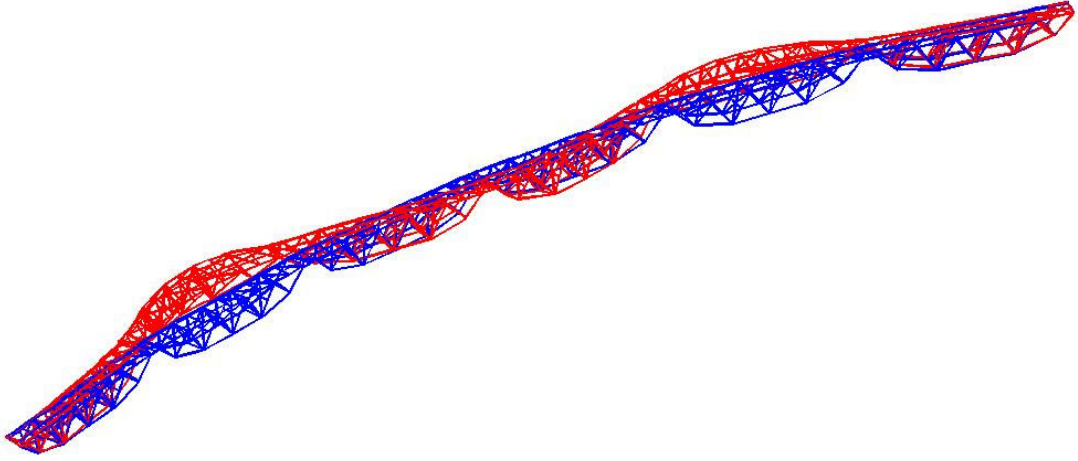
Bu sonlu elamanlar modelinin modal analizleri sonucunda bulunan ilk 4 mod şekli ve frekans değerlerine ait 3-boyutlu modal analiz sonuçları Şekil 67, 68, 69 ve 70'de gösterilmiştir.



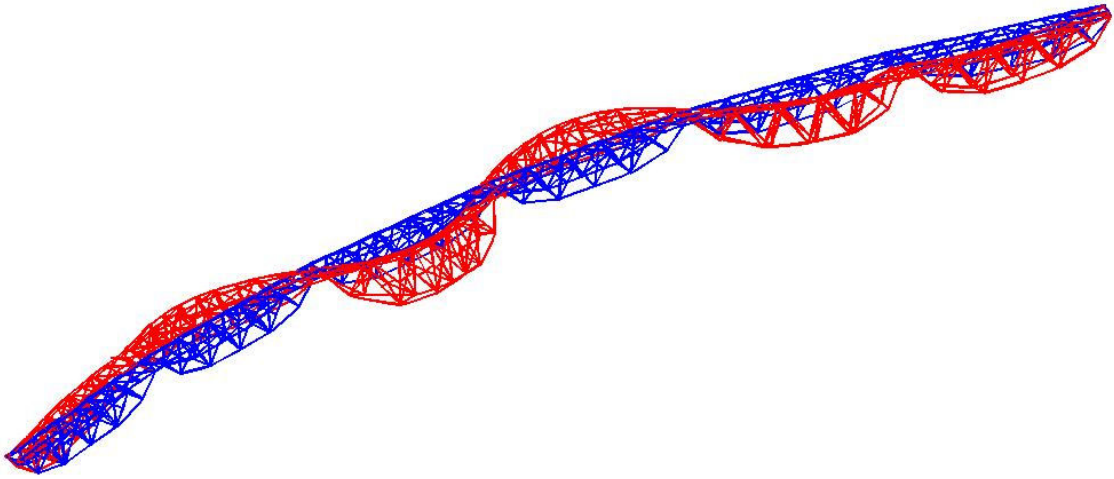
Şekil 67. FEDEASLab modeline ait 1. yatay mod şekli ve frekans değeri (2.298 Hz)



Şekil 68. FEDEASLab modeline ait 2. yatay mod şekli ve frekans değeri (2.541 Hz)



Şekil 69. FEDEASLab modeline ait 3. yatay mod şekli ve frekans değeri (3.181 Hz)



Şekil 70. FEDEASLab modeline ait 4. yatay mod şekli ve frekans değeri (3.614 Hz)

FEDEASLAB modelini kontrol etmek için bu modelden bulunan ilk 5 frekans değeri ile SAP2000 programından elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması ve FEDEASLab programının verdiği mod şekilleri ve SAP2000 programının verdiği mod şekilleri arasında MAC (Modal Assurance Criterion) değerleri hesaplanmış ve Tablo 7 ve 8'de sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 7. İlk 5 moda ait FEDEASLab-SAP2000 frekans değerleri karşılaştırması

	FEDEASLab Frekans (Hz)	SAP2000 Frekans (Hz)
1.Mod	2.298	2.000
2.Mod	2.541	2.295
3.Mod	3.181	2.680
4.Mod	3.614	3.011
5.Mod	4.213	3.546

Tablo 7’de verilen karşılaştırmadaki temel amaç daha detaylı olarak modellenen SAP2000 modeli ile daha az tanınan FEDEASLab modelinin eşlemesini anlamak ve optimizasyon/güncelleme aşamasında kullanılacak olan FEDEASLab programına ve modellerine aşinalık geliştirmektir. Bazı frekanslarda farklılıklar olmasına rağmen bu iki modelin verdiği frekans değerleri birbirine oldukça yakındır. Ancak, model sonuçlarının birbirine bir miktar daha yakınlaştırılması gerekmektedir. Tablo 7’de FEDEASLab programı ile SAP2000 programı arasında yapılan karşılaştırmada frekans değerleri arasında görülen farklılıkların temel nedeni elimizdeki mevcut FEDEASLab programının eşdeğer dikdörtgen en kesit kullanmasıdır. Bir başka deyişle, modal analiz kısmında çarpım atalet momentinin dikdörtgen en kesitli geometrilerde sıfır olmasında kaynaklanmaktadır. SAP2000 modelimizde ise köprünün gerçek en kesit geometrileri kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan bir başka karşılaştırma çalışmasında, her iki modelde de eşdeğer dikdörtgen kesitler kullanılmış ve bu durumda iki modelin verdiği doğal titreşim frekans değerleri muntazam olarak örtüşmüştür.

Bu iki programın hesapladığı frekanslar arasındaki farklılığın bir diğer nedeni ise; SAP2000 programı kayma deformasyonlarını da dikkate almaktadır. FEDEASLab modeli ise bu etkileri dikkate almamaktadır. Ancak tekrar hatırlatmak gerekirse, bu karşılaştırmadaki temel amaç FEDEASLab modelinin kontrolünün sağlanmasıdır. Yoksa SAP2000 modeli ile birebir örtüşme zaten sağlanmaya çalışılmamaktadır. Bir kere uygun detaylara sahip başlangıç FEDEASLab modeline karar verildiğinde artık çalışmanın ilerleyen aşamalarında kalibrasyon ve optimizasyon için bu model kullanılacaktır. Tablo 8, SAP2000 ve FEDEASLab modelleri ile elde edilen mod vektörlerinin kıyaslamasını göstermektedir. Mod vektörlerinin uyumu açısından da iki model birbirine yakın sonuçlar vermektedir (bkz. diyagonal değerler).

Tablo 8. İlk 5 moda ait FEDEASLab-SAP2000 MAC (Modal Assurance Criterion) değerleri

	SAP2000 1.Mod	SAP2000 2.Mod	SAP2000 3.Mod	SAP2000 4.Mod	SAP2000 5.Mod
FEDEASLab 1. Mod	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FEDEASLab 2. Mod	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00
FEDEASLab 3. Mod	0.00	0.01	0.97	0.00	0.00
FEDEASLab 4. Mod	0.00	0.00	0.00	0.95	0.01
FEDEASLab 5. Mod	0.00	0.00	0.00	0.04	0.90

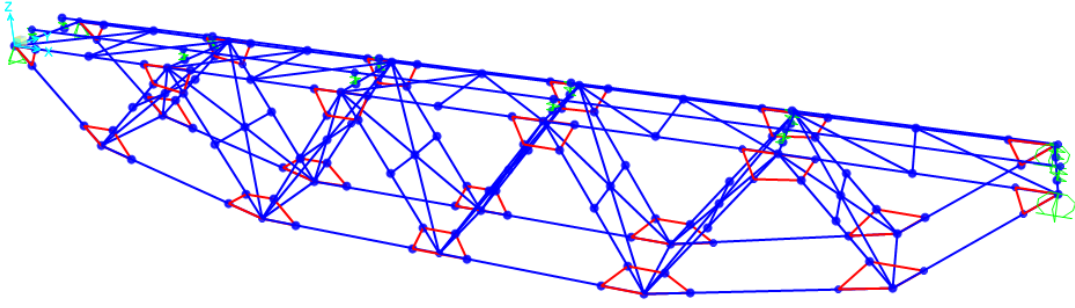
MAC değerleri mod şekillerinin birbirleriyle olan benzerliğini saptayabilmek için kullanılan bir ölçüdür. MAC değerinin 1 ve 1'e yakın değer çıkması mod şekillerinin benzer olduğunu göstermektedir. FEDEASLab programı ve SAP2000 programı arasında hesaplanan MAC değerlerine bakıldığında ilk 5 mod şeklinin benzer olduğu görülmektedir (Tablo 8). Bu farklılıklara rağmen hesaplanan MAC değerleri kabul edilebilir değerlerdir ve bu MAC değerleri oluşturduğumuz FEDEASLab modelinin uygun doğrulukta bir sayısal model olduğu sonucunu destekler niteliktedir.

#### 8.4 CSI Bridge Modeli: Köprü Başlangıç Modeli

Bu bölümde ayrıntıları verilen model CSI Bridge programında oluşturulmuştur. CSI Bridge programının kullanılmasının amacı 199+325 çelik demiryolu köprüsünü daha geçekçi olarak modellemek, bu modeli saha çalışmalarından elde edilen modal parametre tahmini sonuçları ile kalibre ederek yapının lineer davranışını mümkün olduğunca gerçeğe yakın modellemek ve devamında da bu model üzerinde hasar senaryoları çalışarak hasar tespiti yapmaktır. CSI modeli ile gerçekleştirilen hasar senaryoları ARTEMIS® hasar tespit modülü kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca bu model üzerinde deneme-yanılma tabanlı model kalibrasyonu da yapılmıştır. Böylece köprünün mevcut durumunu temsil eden oldukça detaylı bir model elde edilmiştir.

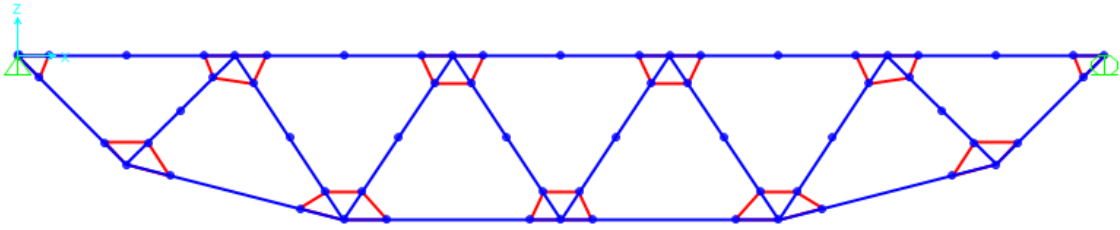
İlk modelleme çalışmaları aşamasında 199+325 çelik demiryolu köprüsünün 3-boyutlu tek açıklığı köprü üzerindeki yaya yolu olmadan CSI Bridge programında oluşturulmuştur. Bu modeli CSI Bridge programında oluşturmak için SAP2000 ve FEDEASLab programlarına benzer olarak çerçeve elemanlar ve yay elemanları kullanılmıştır. Köprünün birleşim noktalarının gerçek durumunu daha iyi yansıtacağı düşüncesi ile CSI Bridge modelinde SAP2000 ve FEDEASLab modellerinden farklı olarak, birleşim noktalarında kabuk (shell) elemanların kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 71'de 199+325 çelik demiryolu köprüsünün 3-boyut tek açıklık CSI Bridge programında oluşturulmuş sayısal modeli gösterilmektedir.



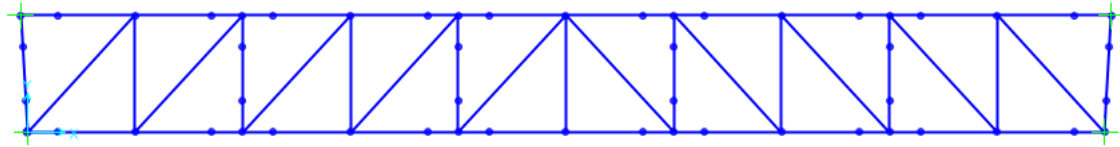


Şekil 71. 199+325 çelik demiryolu köprüsü 3-boyut tek açıklık yaya yolu bulunmayan sayısal modeli

Şekil 72 ve 73' de CSI Bridge modelinin yanda ve üstten görünümü verilmiştir.

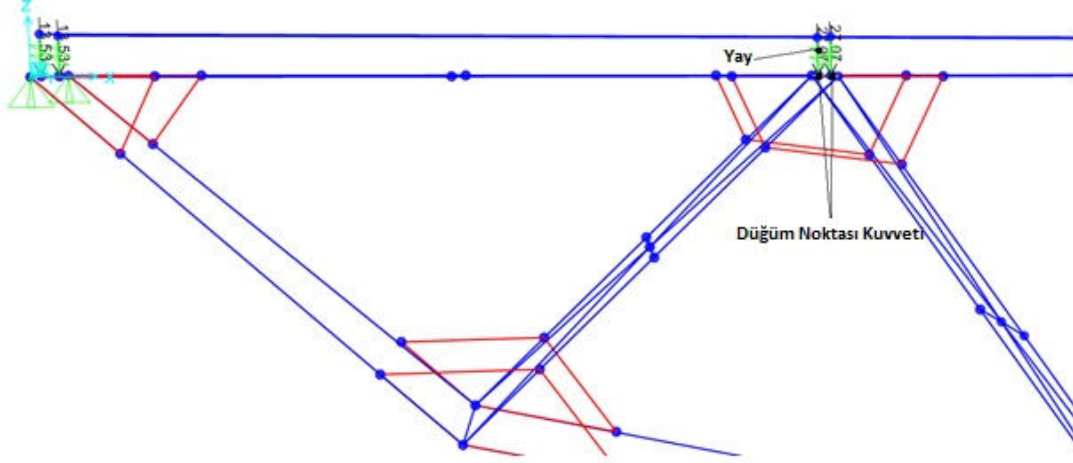


Şekil 72. 199+325 CSI Bridge modelinin yandan görünümü



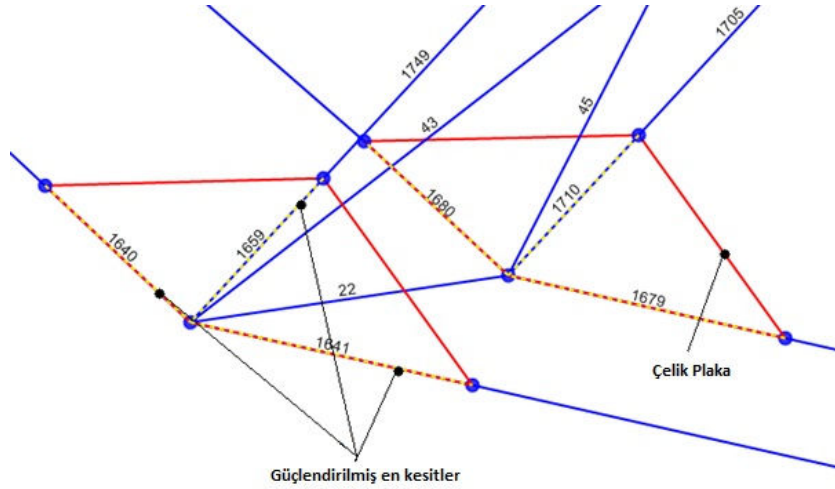
Şekil 73. 199+325 CSI Bridge modelinin üstten görünümü

199+325 çelik demiryolu köprüsünün kütlesini oluşturan demiryolu, ahşap traversler, çelik plakalar gibi elemanlar CSI Bridge programında oluşturduğumuz modelimizin üst kısmında bulunan 12 adet düğüm noktasına düğüm noktası yükleri olarak aktarılmıştır. Bu yükler modelin üst kısmında bulunan boyuna kiriş ile düğüm noktaları arasına yerleştirilmiştir. Boyuna kiriş elemanları ve düğüm noktalarını birbirine bağlamak için tüm yönlerde tutulu yay elemanlar kullanılmıştır. Şekil 74' te bu bağlantı detayı daha ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 74. 199+325 çelik demiryolu köprüsü CSI Bridge modeli yay elemanlar ve düğüm noktası yükleri

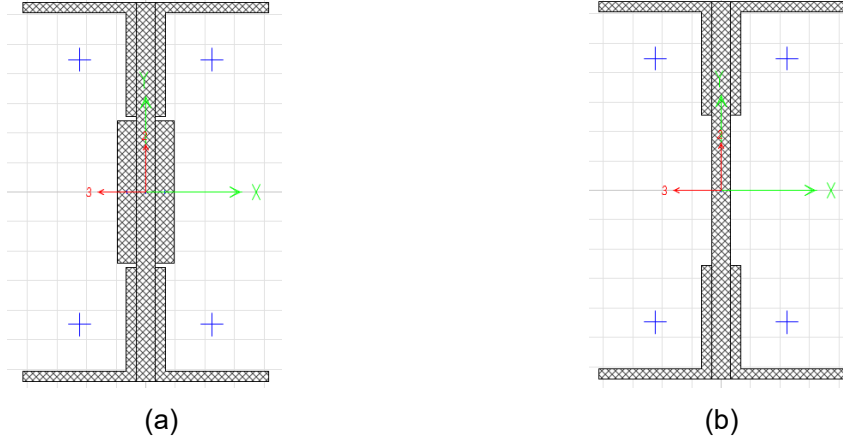
Birleşim noktaları gerçek köprüdeki durumu yansıtabilecek şekilde ince kabuk (shell-thin component) elemanlar kullanılarak güçlendirilmiştir. Kabuk elemanlar boyunca düğüm noktalarındaki çerçeve eleman en kesitleri CSI Bridge “kesit tasarımcısı” (section designer) programı kullanılarak birleşimlerde kullanılan plakalar da dikkate alınarak güçlendirilmiştir. SAP2000 ve FEDEASLab modellerinden farklı olarak Şekil 75’te kabuk (shell-thin component) elemanlar ile güçlendirilmiş düğüm noktası detayı gösterilmektedir.



Şekil 75. Kabuk (shell-thin component) elemanlar ile güçlendirilmiş düğüm noktası

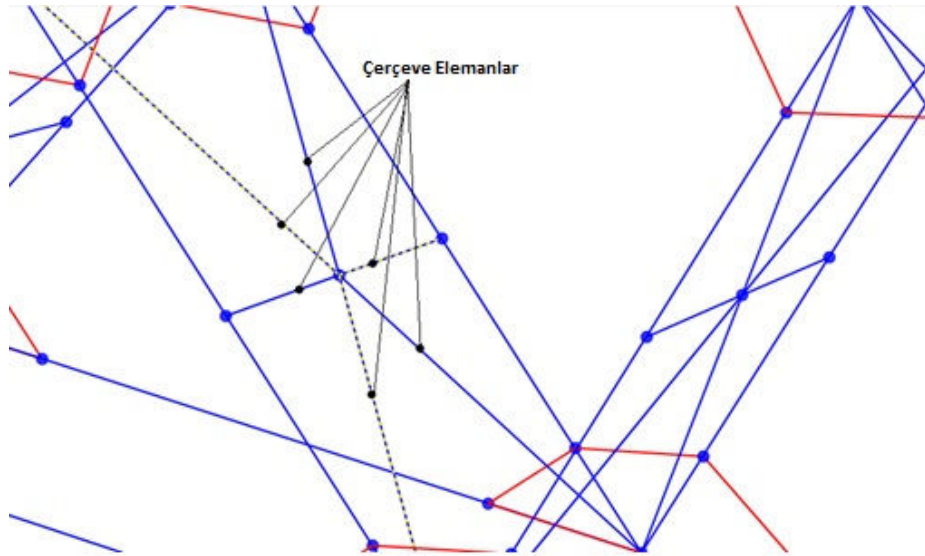
Şekil 76’da CSI Bridge “kesit tasarımcısı” (section designer) programı kullanılarak güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş çerçeve en kesit detayları gösterilmektedir. Bu kesitler

built-up (plakaların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuş) en kesitlerdir ve “kesit tasarımcısı” kullanılarak modellenmiştir.



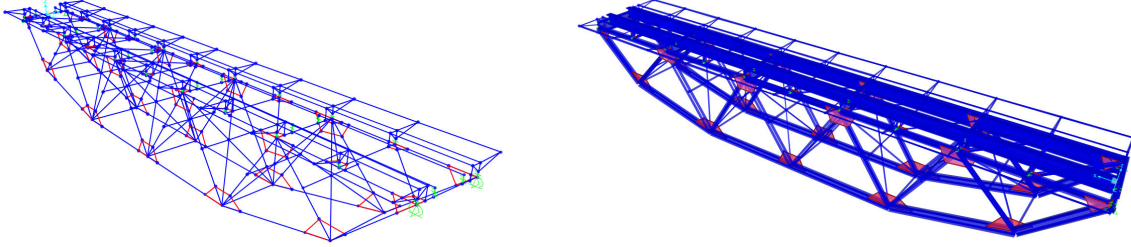
Şekil 76. (a) Çelik plakalar ile güçlendirilmiş çerçeve elemanı en kesiti (birleşim noktalarında kullanıldı), (b) güçlendirilmemiş çerçeve elemanı (birleşim elemanlarının dışında kalan kısımlar) en kesiti

199+325 çelik demiryolu köprüsünde stabilite çaprazları olarak adlandırılan elemanlar CSI Bridge programında Şekil 77’de de gösterildiği gibi ayrı çerçeve elemanları olarak modellenmiştir.

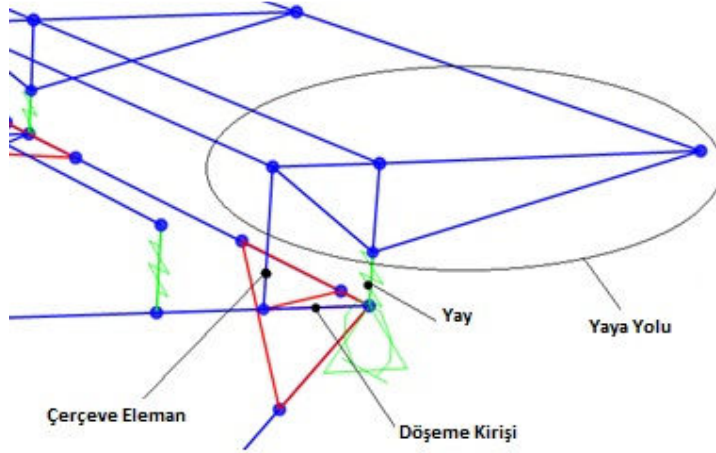


Şekil 77. 199+325 çelik demiryolu köprüsü CSI Bridge modeli stabilite çaprazı detayı

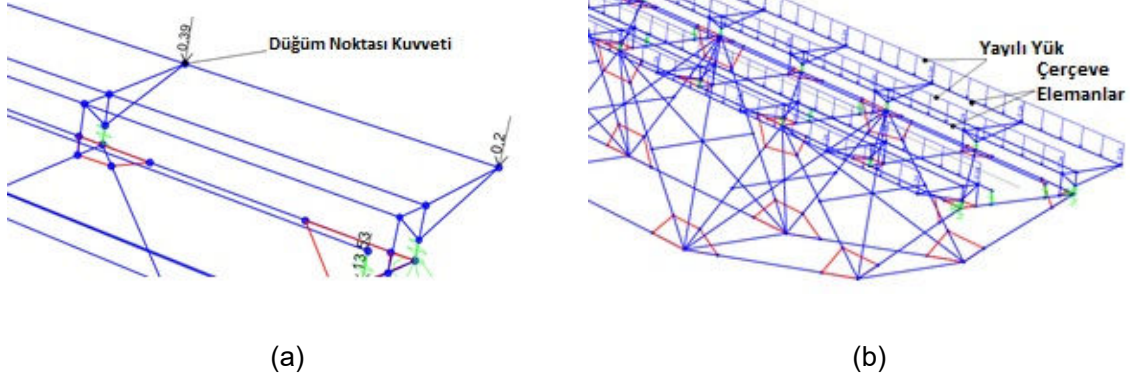
CSI Bridge programı ile modelleme çalışmalarının ikinci aşamasında 199+325 çelik demiryolu köprüsü 3-boyutlu tek açıklıklı analitik modeline gerçekte köprünün üzerinde bulunan yaya yolu Şekil 78’de gösterildiği gibi eklenmiştir. Yaya yolu elemanı Şekil 79’da gösterildiği gibi köprü döşeme kirişine her üç doğrultudaki serbestliği tutulu olarak yay elemanları ve çerçeve elemanları ile bağlanmıştır. Köprü üzerindeki korkuluk elemanları ise Şekil 80(a)’da görüldüğü gibi düğüm noktalarına kuvvet olarak etki ettirilmiştir. Yaya yolu üzerindeki çelik plakalar ise Şekil 80(b)’de gösterildiği gibi çerçeve elemanlara yayılı yük olarak etkilmiştir. CSI Bridge programı ile modellenen köprü modelinde yaya yolu ekleme işlemi SAP2000 ve FEDEASLab ile modellenen köprü modellerinden farklıdır ve kütle ve sınır şartlarının daha gerçekçi olarak modellenmesi mümkün olabilmektedir.



Şekil 78. 199+325 çelik demiryolu köprüsü 3 boyut tek açıklık yaya yolu eklenmiş analitik modeli

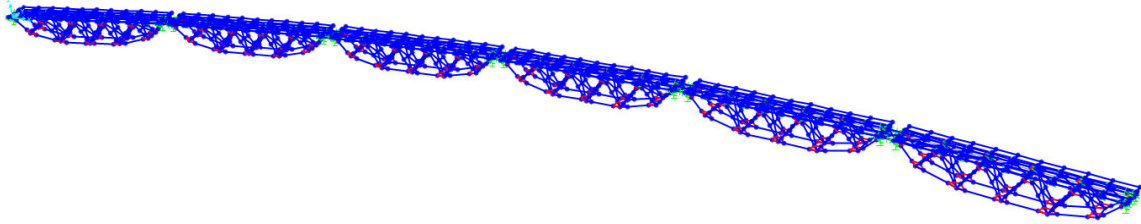


Şekil 79. Yaya yolu ile köprü arasındaki bağlantı detayı



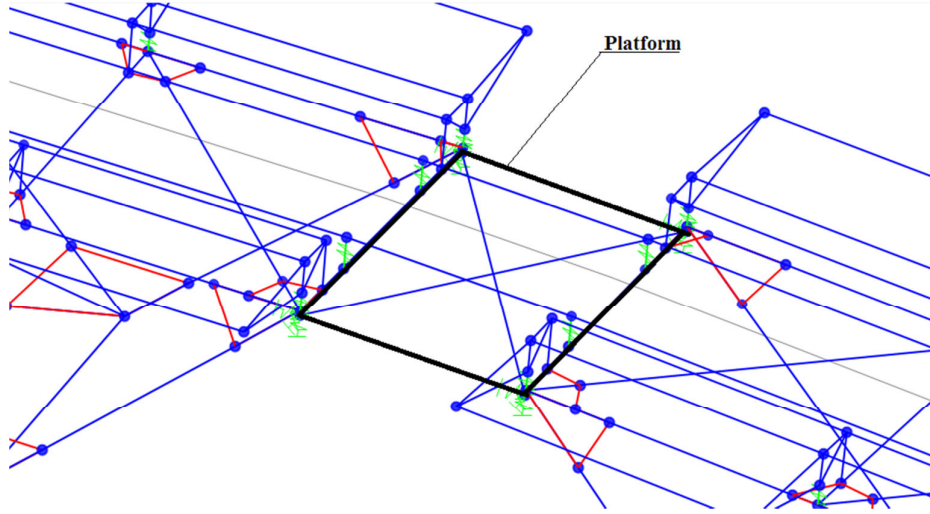
Şekil 80. (a) Korkuluk yüklerinin düğüm noktalarına tekil kuvvet olarak etki ettirilmesi, (b)çelik plakaların yaya yolu elemanlarına yayılı yük olarak etki ettirilmesi

Tek açıklıklı köprü modeli tamamlandıktan sonra bu model yatay ve düşey kurbaları da içerecek şekilde kopyalanarak köprünün 6 açıklıklı sayısal modeli geliştirilmiştir. 199+325 çelik demir yolu köprüsü yatay bir kurba sahip olduğu için CSI Bridge programında bu yatay kurbun oluşturabilmesi için yine bu proje kapsamında AutoCAD programında çizilmiş olan teknik çizimlerden yararlanılmıştır. Şekil 81’de 199+325 çelik demiryolu köprüsü 3-boyutlu 6 açıklıklı sayısal modeli gösterilmektedir. Bu sayısal modelde, yukarıda anlatılan tüm modelleme detayları aynen kullanılmıştır.



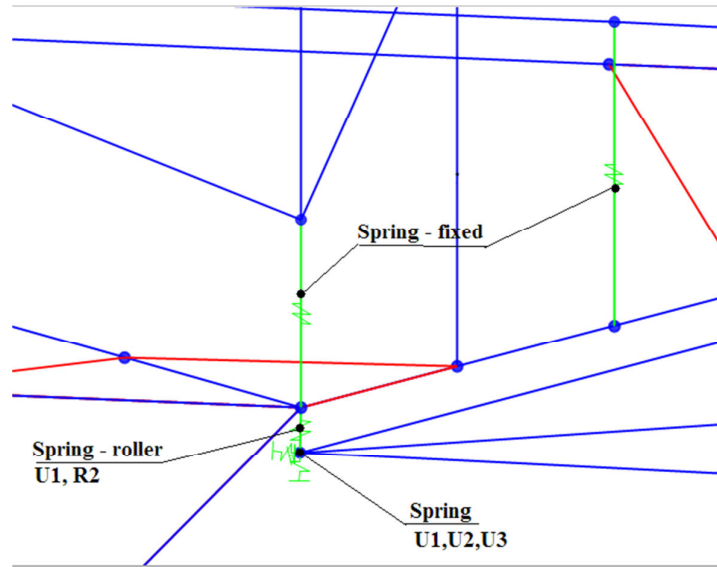
Şekil 81.Yatay kurba sahip 199+325 Köprüsünün CSI Bridge programı ile oluşturulmuş 3-boyutlu 6 açıklıklı sayısal modeli

SAP2000 analitik modelimizde olduğu gibi CSI Bridge modelinde de köprü ayakları (kolonları) SAP2000 modeline benzer olarak yay ve rijit link elemanlar kullanarak model oluşturulmuştur. Şekil 82’de gösterildiği gibi köprü ile platform arasına atanan yaylar hareketli ve sabit mesnet davranışını yansıtacak özelliktedir ve platformun alt kısmına atanan yay elemanlar kolon rijitliklerini temsil etmektedir. Platformun alt kısmına kolon davranışını yansıtmaları için atanan bu yay elemanlar her bir doğrultuda farklı rijitlik değerlerine sahiptir (yayların spesifik değerleri için köprünün SAP2000 modeline bakınız).



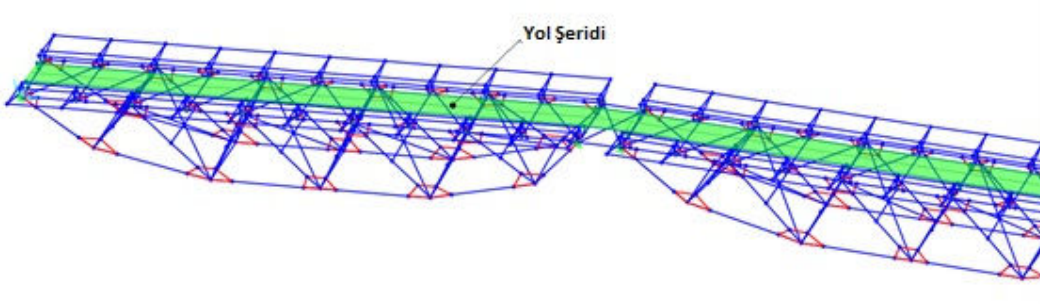
Şekil 82. Köprü açıklıklarının oturduğu platform ve köprü ayaklarını temsil eden farklı yönlerdeki yay elemanlar

Şekil 83'te modelimizde kullandığımız farklı özellikteki yay elemanlar gösterilmiştir.



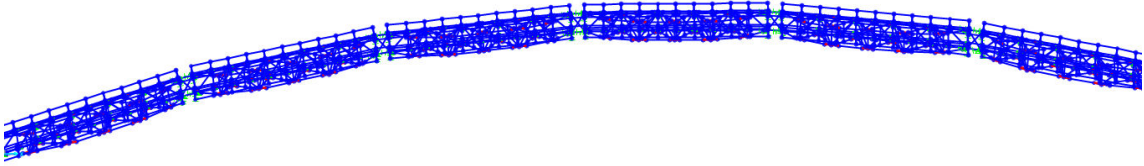
Şekil 83. Farklı özelliklere sahip yay elemanlar

Şekil 84'de CSI Bridge modelinde köprü üzerindeki tren yüklerinin de dikkate alınabileceği ve çerçeve elemanlar ile oluşturduğumuz tren yolunu temsil eden yol şeridi gösterilmektedir. SAP2000 ve FEDEASLab analitik modellerimizde tren yolunu temsil eden yol şeridi bulunmamaktadır.

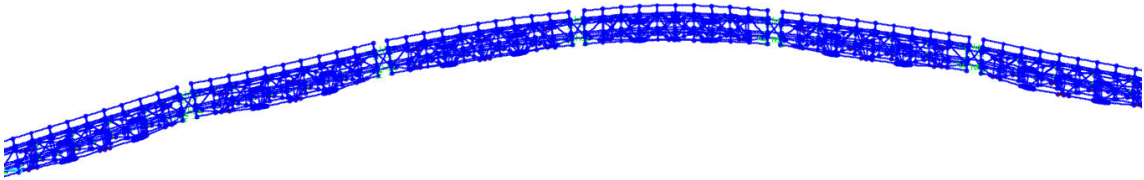


Şekil 84. Yol şeridi (tren yolu)

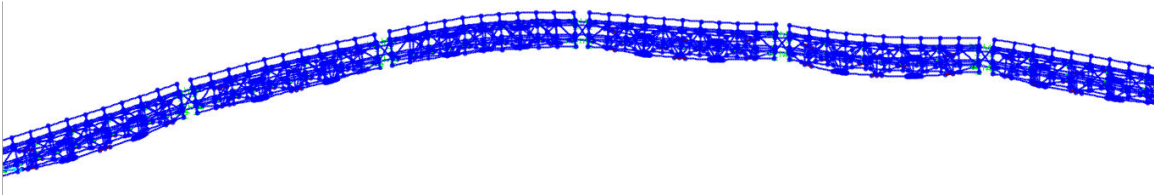
199+325 çelik demiryolu köprüsünün CSI Bridge modeli kullanılarak hesaplanmış ilk 5 doğal titreşim frekans değeri ile SAP2000 ve FEDEASLab programlarında hesaplanan ilk 5 frekans değeri Tablo 9'da karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu modeller arasında görülen farklar, modellerin farklı gelişmişlik seviyeleri içermesinden kaynaklıdır. Ancak yine de bu farklılıklara rağmen oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. CSI Bridge, SAP2000 ve FEDEASLab programlarının verdiği mod şekilleri incelendiğinde mod şekillerinin de yine birbirine yakın olduğu görülmektedir. 199+325 çelik demir yolu köprüsünün CSI Bridge programından elde edilen ilk 4 mod şekli ve şekil değiştirmemiş görünümü Şekil 85, 86, 87, 88 ve 89'da gösterilmektedir.



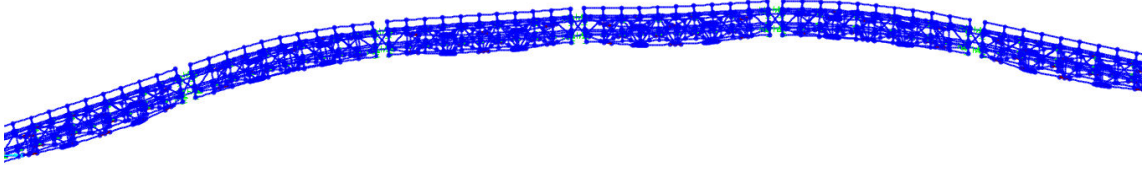
Şekil 85. Köprü'nün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli - şekil değiştirmemiş durum



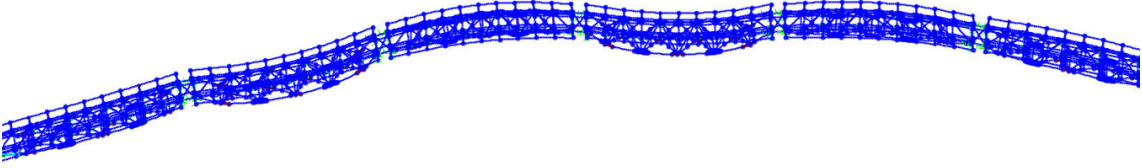
Şekil 86. Köprü'nün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 1. yatay mod şekli (2.089 Hz)



Şekil 87. Köprü'nün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 2. yatay mod şekli (2.320 Hz)



Şekil 88. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 3. yatay mod şekli (2.780 Hz)



Şekil 89. Köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı CSI Bridge modeli: 4. yatay mod şekli (3.079 Hz)

Tablo 9. İlk 5 moda ait CSI Bridge-SAP2000-FEDEASLab modellerinden elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırması

	CSI Bridge <sup>(*)</sup> Frekans (Hz)	SAP2000 Frekans (Hz)	FEDEASLab <sup>(*)</sup> Frekans (Hz)
<b>1.Mod</b>	2.089	2.000	2.298
<b>2.Mod</b>	2.320	2.295	2.541
<b>3.Mod</b>	2.780	2.680	3.181
<b>4.Mod</b>	3.079	3.011	3.614
<b>5.Mod</b>	3.429	3.546	4.213

<sup>(\*)</sup>Çalışmanın ilerleyen aşamalarında CSI Bridge ve FEDEASLab modelleri üzerinde iyileştirme ve güncelleme çalışmaları sürdürülmüştür. Genel olarak CSI Bridge ve SAP2000 modelleri FEDEASLab modeline göre bir miktar daha düşük frekans değerleri vermektedir. Bu durum bu modellerde köprü kütlesinin daha doğru hesaplanmış olmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 10'da FEDEASLab, SAP2000 ve CSI Bridge modellerinde kullanılan modelleme detayları ile ilgili bir karşılaştırma verilmiştir.



Tablo 10. FEDEASLab-SAP2000-CSI Bridge programlarının benzer ve farklı özelliklerinin karşılaştırılması

	<b>FEDEASLab</b>	<b>SAP2000</b>	<b>CSI Bridge</b>
<b>Erişilebilirlik</b>	Açık kod kaynak	Kapalı kod kaynak	Kapalı kod kaynak
<b>Modeli Oluşturan Elemanlar</b>	Çerçeve (frame) elemanlar, yay elemanlar, rijit bağlantı elemanları (rijit link)	Çerçeve (frame) elemanlar, yay elemanlar, rijit bağlantı elemanları (rijit link+ roller ve simple mesnet özelliği taşıyan rijit link elemanlar)	Çerçeve (frame) elemanlar, yay, kabuk (shell) elemanlar (roller ve simple mesnet özelliği taşıyan yay elemanlar)
<b>Enkesitler</b>	Dönüştürülmüş eşdeğer dikdörtgen enkesitler.	Gerçek en kesitler.	Gerçek en kesitler.
<b>Analiz</b>	Kayma tesirleri ve çarpım atalet momenti değerleri dikkate alınmıyor.	Kayma tesirleri ve çarpım atalet momenti değerleri dikkate alınıyor.	Kayma tesirleri ve çarpım atalet momenti değerleri dikkate alınıyor.
<b>Model</b>	3 boyut 6 açıklık çerçeve, yay, rijit bağlantı elemanlarından oluşan model	3 boyut 6 açıklık çerçeve, yay, rijit bağlantı elemanlarından oluşan model	3 boyut 6 açıklık çerçeve, yay, elemanlarından oluşan model + yaya yolu ve yol şeridi
<b>Birleşim Noktaları</b>	Klasik sonlu elemanlar düğüm noktaları	Klasik sonlu elemanlar düğüm noktaları	Kabuk (shell) elemanlar ile güçlendirilmiş düğüm noktaları

Takip eden bölümlerde SAP2000 modeli kullanılmamıştır. Sadece FEDEASLab ve CSI Bridge modelleri üzerinde iyileştirme, kalibrasyon, optimizasyon ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

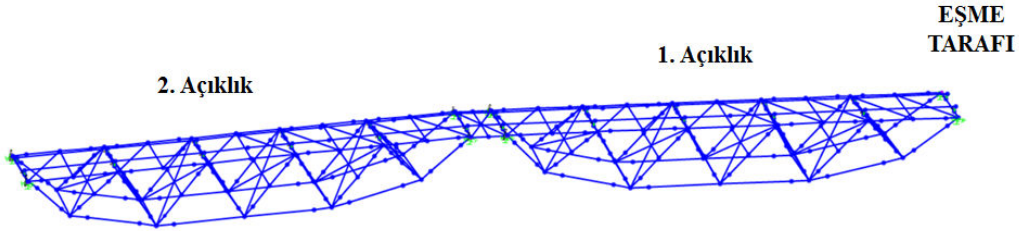
## 9. CSI BRIDGE MODELİ ve ARTEMIS HASAR TAHMİN MODÜLÜ KULLANILARAK YAPILAN HASAR TESPİT ÇALIŞMALARI

### 9.1 Giriş

199+325 çelik demiryolu köprüsü hizmet vermekte olan bir köprü olduğundan köprü üzerinde gerçek hasar oluşturup, hasar sonrası sistem tanımlama çalışması yapmak mümkün olmamaktadır. Bu sebeple hasar tespiti çalışmasında köprünün CSI Bridge programı ile oluşturulmuş analitik modeli ile ARTEMIS® hasar tespit modülü kullanılmıştır. Bölüm 10'da ise projenin ana hedeflerinden biri olan sonlu elemanlar modeli güncellemesi tabanlı hasar tespit yöntemi sonuçlarına ilişkin sonuçlar verilmiştir. ARTEMIS® hasar tespit modülü model tabanlı olmayıp sadece yapıda hasar "VAR MI" "YOK MU" sorusuna cevap vermektedir. Oysaki 10. Bölümde ayrıntısı verilmiş olan yöntem bu sorunun yanı sıra hasarın "YERİ" ve "MİKTARI" sorularına da cevap vermektedir.

Söz konusu model köprü testlerinden elde edilen dinamik parametreler doğrultusunda kalibre edilmiş sonlu eleman modelidir. Sonlu eleman modeli üzerinde farklı şekillerde sanal hasarlar oluşturularak köprünün dinamik parametrelerindeki değişim izlenmiştir. Sanal hasar senaryolarının belirlenmesinde köprülerde oluşması beklenen hasar durumları dikkate alınmıştır. Bunlar köprü ayaklarında oluşan hasara bağlı ayakların köprü sistemine sağladığı yanal rijitliğin azalması, köprünün yapısal elemanlarında uzun süre zarfında oluşması beklenen kesit kaybı ve mesnetlerde olabilecek ani oturmaların olması gibi sanal hasar durumlarıdır.

6 adet 30 metre uzunluğunda açıklığa sahip köprünün basit giriş mantığı ile açıklıklar arasında basit ve hareketli mesnetlere sahip olmasından dolayı modelde oluşturulan yerel mertebedeki bir sanal hasarın köprünün tümünde etkili olmayacağı yapılan ön deneme-yanılma tabanlı duyarlık analizleri sonucunda tespit edilmiştir. Bu sebeple 199+325 demiryolu çelik köprüsünün yukarıda bahsedilen yapısal özellikleri gereği hasar tespiti çalışmasına ilişkin kullanılan sonlu eleman modelinde bu bölümde yalnızca köprünün iki açıklığının dikkate alınmasına karar verilmiştir. Bu şekilde kalibre edilmiş olan köprü sonlu eleman modelinin ilk 2 açıklığı hasar tespiti çalışmalarında referans model (REF) olarak belirlenmiştir. Bahse konu köprünün iki açıklığının hasarsız durumunu gösteren referans modeli Şekil 90'da sunulmuştur.



Şekil 90. Referans model

Tablo 11'de kalibrasyon öncesi ve sonrası elde edilen modal parametre karşılaştırmasına verilmiştir. Kalibrasyon aşamasında Test-1 deneylerinin ilk gününde elde edilen verilerden elde edilen modal parametre sonuçları dikkate alınmıştır.

Tablo 11. CSI Bridge modelinin deneme-yanılma yöntemi ile kalibre edilmiş durumuna ait frekansları ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Modlar	Frekans [Hz]		MAC
	Deneysel	Analitik	
1. Yatay	2.133	2.165	0.97
2. Yatay	2.396	2.467	0.94
3. Yatay	2.753	2.788	0.84
4. Yatay	3.044	3.013	-
5. Yatay	3.272	3.289	-
6. Yatay	3.372	3.377	-
Boyuna	3.690	3.818	-
7. Yatay	4.036	-	-
1. Burulma	4.619	4.626	-
2. Burulma	5.35	5.468	-
3. Burulma	5.639	-	-
4. Burulma	5.974	5.980	-
5. Burulma	6.368	6.303	-
6. Burulma	6.853	6.840	-
1. Düşey	7.292	7.430	0.88
2. Düşey	7.729	7.706	0.76
3. Düşey	8.370	8.183	0.92

Bu tabloda bazı modlara ilişkin MAC değerleri yüksek değerlerde bulunamamıştır. Bu nedenle de yüksek MAC değerlerine ait modlar dikkate alınarak deneme-yanılma yöntemi ile kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon parametresi olarak kolonları temsil eden yayların rijitlikleri değiştirilmiştir. Tablo 12, kalibrasyondan önce ve sonra kullanılan yay rijitliklerine ilişkin detaylar sunulmuştur.

Tablo 12. Deneme-yanılma yöntemi ile yapılan güncelleme çalışması sonucunda elde edilen yay rijitlikleri ile başlangıç yay rijitliklerinin karşılaştırılması

	Başlangıç Yay Rijitlikleri [kN/m]			Güncellenmiş Yay Rijitlikleri [kN/m]		
	$K_x$	$K_y$	$K_z$	$K_x$	$K_y$	$K_z$
<b>Kolon 1</b>	22	53.5	1060	22	53.5 (0%)	1320 (+25%)
<b>Kolon 2</b>	5.8	17	550	5.8	24 (+%41)	680 (+23%)
<b>Kolon 3</b>	5	16	500	5	22 (+%38)	620 (+24%)
<b>Kolon 4</b>	10.5	28.5	770	10.5	40 (+%40)	960 (+%25)
<b>Kolon 5</b>	28.5	56	1430	28.5	70 (+25%)	1800 (+%27)

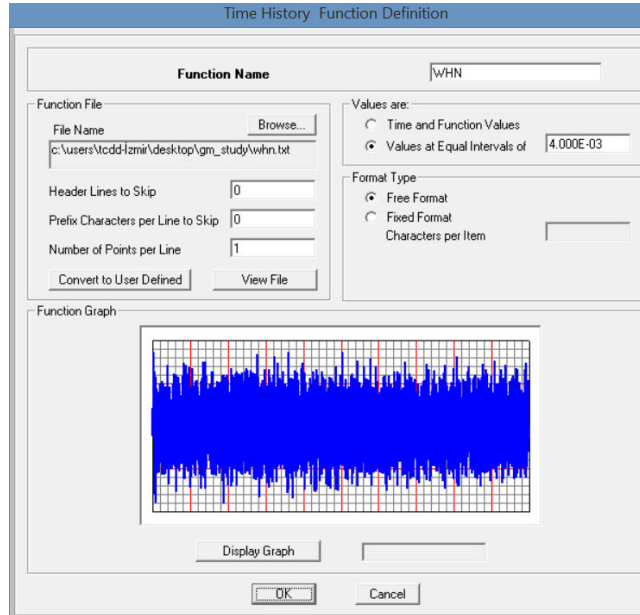
Yüzde olarak verilen değerler başlangıç değerlerde yapılan değişikliklerin yüzde cinsinden karşılığını göstermektedir. CSI Bridge modeli kullanılarak optimizasyon tabanlı bir kalibrasyon şu aşamada mümkün değildir. Bu nedenle deneme-yanılma yöntemi kullanılmıştır. Temel problem, optimizasyon algoritmasının çalıştığı MATLAB® ortamı ile CSI Bridge programını birlikte çalıştıracak bir ara yüzün mevcut olmayışıdır. Bu nedenle 10. Bölümde duyarlık tabanlı bir optimizasyon/güncelleme için FEDEASLab modeli kullanılacaktır. Bu bölümde ise gerçekçi/detaylı ve kalibrasyonu deneme-yanılma yöntemi ile yapılmış bir sonlu elemanlar modeli kullanılarak ARTEMIS® hasar tespit modülünün performansı incelenmeye çalışılmıştır.

## 9.2 Zaman Tanım Alanı Analizleri

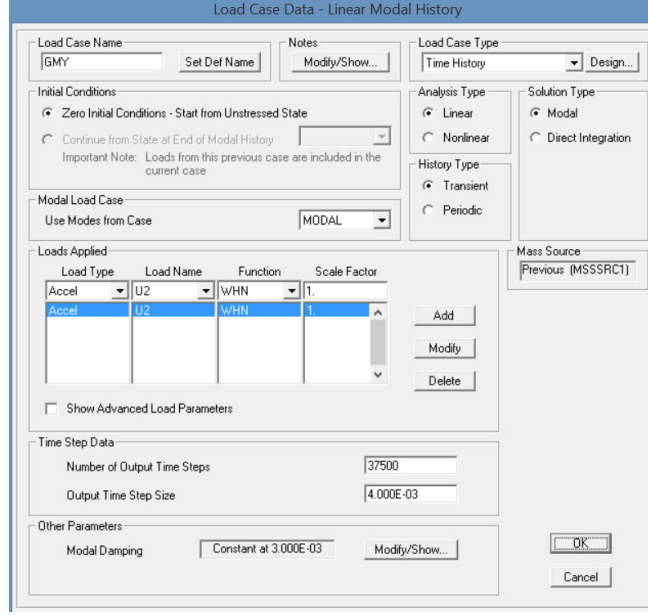
Köprü testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda bir önceki bölümde detaylandırıldığı üzere kalibre edilmiş CSI Bridge referans (**hasarsız**) sonlu eleman modeli Y ve Z doğrultularında bant-sınırlı beyaz gürültü tahrik sinyali ile tahrik edilerek zaman tanım alanı analizleri yapılmıştır (Şekil 91). Söz konusu beyaz gürültü sinyalinin RMS (karelerin ortalamasının karekökü) genliği 0.05 g olarak seçilmiştir. Analizde 150 saniyelik ivme kaydı kullanılmış olup ölçümleme frekansı saha testlerinde olduğu gibi 250 Hz olarak belirlenmiştir. Toplamda 37,500 zaman adımı için zaman tanım alanında analiz yapılmıştır (Şekil 92).

Köprü testlerinde Şekil 90'de gösterilen iki açıklık üzerinde Y ve Z doğrultularında 11 adet ivmeölçer bulunmaktadır. Şekil 93'de görüldüğü üzere bu sensörlerden 6 tanesi düşey

yönde, 5 tanesi de enine yönde yerleştirilmiştir. Referans (hasarsız) analitik modelde de yukarıda anlatıldığı şekilde tahrik edilerek zaman tanım alanında yapılan analiz sonrası oluşan ivme tepkileri Şekil 93'te yerleri ve yönleri belirtilmiş ivmeölçerler lokasyonlarından veri toplanmış ve kanal verisi olarak kaydedilmiştir. Dikkat edilirse, simülasyon verisinin alındığı yerler ile gerçek köprü üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerim yerleri aynıdır/çakışmaktadır. Böylece benzer bir çalışma gerçek köprü üzerinde yapılabilir olsa aynı sayıda ve lokasyonda veri toplanabileceğinin altı çizilmeye çalışılmıştır; dolayısıyla burada verilen sonuçların gerçek bir uygulamada da bu açılardan kullanılabilceği düşünülmektedir. Tabi ki gerçek bir uygulamada daha farklı faktörler de probleme dahil olacaktır (örn., veri gürültüsü gibi). Veri gürültüsünün etkisi simülasyona dayalı bu çalışmada mevcut değildir; gerçek uygulamalarda bu faktör önemli olacaktır.

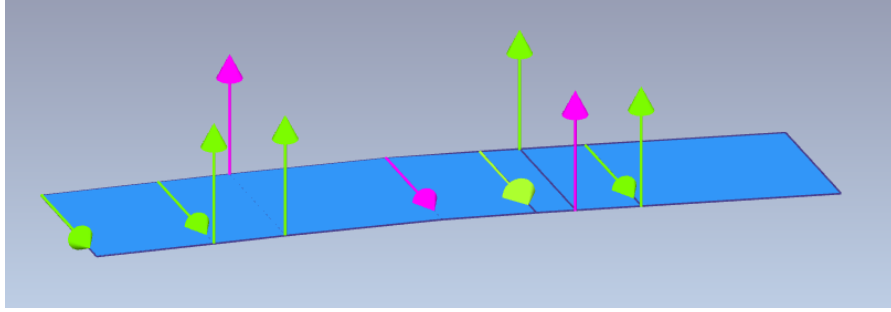


Şekil 91. White noise sinyali



Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U2	W/WHN	1.
Accel	U2	W/WHN	1.

Şekil 92. Zaman tanım alanı analizi



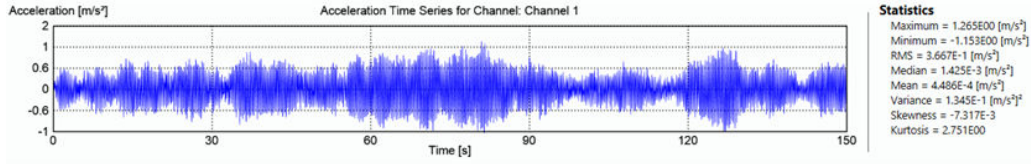
Şekil 93. Sensör yerleşim planı (sayısal modelden toplanan veriler de bu noktalara karşılık gelmektedir)

### 9.3 Verilerin İşlenmesi

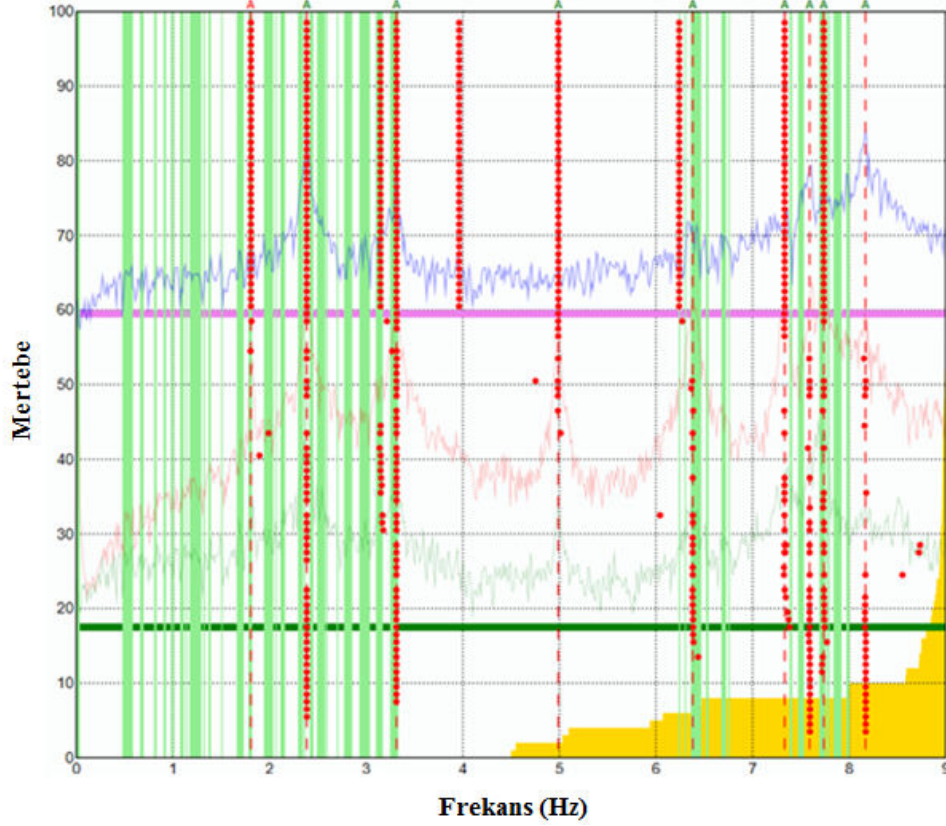
Şekil 93'te gösterilen sensör yerleşimine göre sayısal modelden elde edilen ivme tepkisi ARTEMIS® programında işlenmek üzere kullanılmıştır. Sayısal modelden elde edilen 1 numaralı kanala ait çıktı ivme verisi (tepki) örnek olması itibariyle Şekil 94'te gösterilmektedir. Söz konusu 150 saniyelik 11 adet ivme kaydı ARTEMIS® programında işlenerek sistem tanımlaması yapılmıştır.

Referans (hasarsız durum) sayısal modelden elde edilen çıktı ivme verisine göre SSI-DATA sistem tanımlamasına ilişkin SSI stabilizasyon diyagramı Şekil 95'te gösterilmiştir. Analitik modelin white noise sinyali ile tahrik edilmesi sonucu köprünün iki açıklığına ilişkin CSI Bridge programı ile gerçekleştirilen modal analiz sonucu bulunan frekans değerleri ile CSI

Bridge programından elde edilen çıktı ivme verisi kullanılarak ARTEMIS® programında yapılan sistem tanımlama işlemleri ile bulunan frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 13'te yapılmıştır. Söz konusu tabloda görüldüğü üzere tahrik edilen köprünün sonlu eleman modeli üzerinden toplanan ivme verileri ile köprüye ait dinamik parametrelerin elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 94. 1 nolu kanala ilişkin çıktı/tepki ivme verisi



Şekil 95. Referans model için stabilizasyon diyagramı

Tablo 13. Frekans kıyaslaması

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
	SAP2000	ARTEMIS®
1	1.811	1.806
2	2.389	2.385
3	3.313	3.314
4	4.991	4.989
5	6.397	6.381
6	7.339	7.333
7	7.589	7.591
8	7.741	7.737
9	8.178	8.168

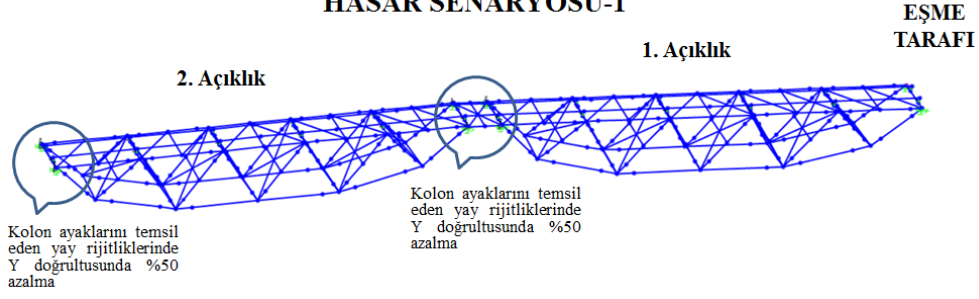
Sayısal model kullanıldığı için modal analiz ile bulunabilecek bu sonuçların sistem tanımlama yöntemleri ile bulunmasının temel nedenleri şöyledir: (i) simülasyon sonucu elde edilen tepkinin sayısal modelin dinamik imzasını ihtiva edip etmediğinin anlaşılması böylece simülasyon değerlerini kontrolü; (ii) dinamik verinin gerçek bir yapıdan alınması durumunda yapılması gereken işlemlerin aynısının takip edilmesi böylece gerçek bir yapı üzerinde gerçekleştirilecek yapı sağlığının izlenmesi adımlarının aynısının takip edilmesi olarak açıklanabilir.

#### 9.4 Hasar Senaryoları

Referans (hasarsız) modelin oluşturulmasının ardından analitik model üzerinde sanal hasar senaryolarının oluşturulmuştur. Önceki kısımda bahsedildiği üzere köprüde meydana gelmesi muhtemel 3 farklı hasar senaryosu köprünün analitik modeli üzerinde uygulanmıştır. Köprünün kolon ayaklarında oluşan hasara bağlı köprü sisteminin yanal rijitliğinde meydana gelen %50 oranında azalmayı gösteren “1 nolu” hasar senaryosu (DMG1) Şekil 96’da, köprünün yapısal elemanlarında zamana bağlı olarak %25 oranında kesit azalmasını gösteren “2 nolu” hasar senaryosu (DMG2) Şekil 97’de ve köprünün mesnetinde meydana gelen zemin oturmasına bağlı olarak oluşan düşey rijitlikteki azalmayı gösteren “3 nolu” hasar senaryosu (DMG3) Şekil 98’de gösterilmektedir. “2 nolu” hasar senaryosu gerçek durumda karşılaşılabilecek bir durum değildir; ancak yapılan duyarlılık analizlerinde modal parametrelerde anlamlı bir değişim ancak bu seviyelerde gerçekleşen kesit azalmaları durumunda yakalanabilmiştir. Bu nedenle de yaygın hasar senaryosunu temsil eden bu durumun çalışılması hasar tespit yönteminin yaygın hasar durumunda gösterdiği performansın anlaşılması için seçilmiştir. Benzer şekilde “1 nolu” hasar senaryosu yine yaygın hasarı, “3 nolu” hasar senaryosu da lokal hasar durumunu temsil etmektedir.

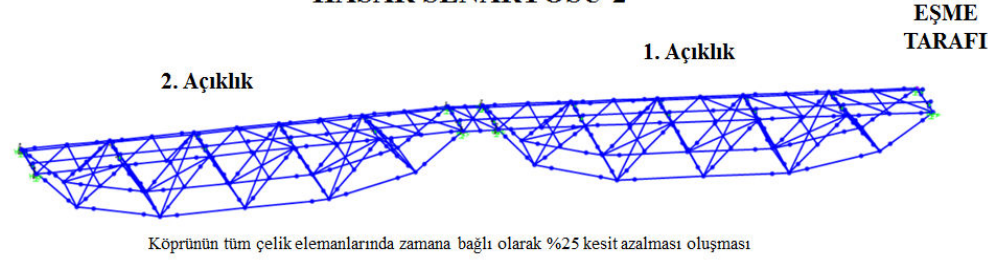


### HASAR SENARYOSU-1



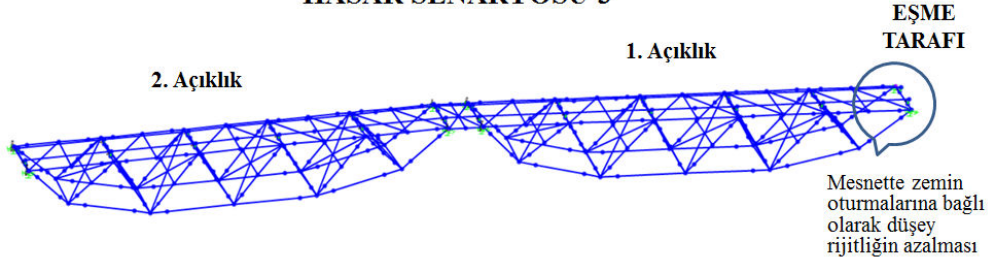
Şekil 96. Hasar senaryosu-1

### HASAR SENARYOSU-2



Şekil 97. Hasar senaryosu-2

### HASAR SENARYOSU-3



Şekil 98. Hasar senaryosu-3

Oluşturulan üç farklı hasar senaryosu ile güncellenmiş sonlu eleman modelindeki değişimler izlenmiştir. Referans model (REF) ile DMG1, DMG2 ve DMG3 olarak isimlendirilen üç farklı hasar senaryosunun modal parametre kıyaslamaları sırasıyla Tablo 14, Tablo 15 ve Tablo 16'da gösterilmektedir. Frekans ve sönüm oranları karşılaştırmalarında SSI-DATA sonuçları kullanılmıştır.

DMG1 ve DMG2 hasar senaryoları köprünün bütün davranışına ilişkin olması sebebiyle sistem tanımlaması sonucu elde edilen mod şekilleri referans durum ve hasar durumların

kıyaslanması anlamında benzer şekilde gelişmiştir; ancak frekans değerleri elbette ki değişmiştir. Ancak, DMG3 hasar senaryosundaki mesnet hasarı lokal bir hasar olup hasarsız duruma kıyasla araya farklı modların girmesine ve/veya modların sıralamasının değişmesine de neden olmuştur. Bu açıdan lokal hasar durumunu temsil eden DMG3 senaryosu köprünün dinamik karakterinde önemli seviyede değişiklikler oluşturmuştur.

DMG1 hasar senaryosunda köprü ayaklarının sağlamış olduğu yanal rijitliklerde azalma olduğundan beklenildiği üzere köprü enine modlarına ait frekans değerlerinde belirgin azalma meydana gelmiştir; diğer bazı modlarda küçük de olsa artış gözlenmiştir. DMG2 hasar senaryosunda ise köprünün yapısal elemanlarında kesit azalmasına bağlı olarak köprünün özellikle düşey modlarına ait frekans değerlerinde azalma gözlemlenmiştir; diğer bazı frekanslarda küçük de olsa artış gözlenmiştir. Lokal bir hasar senaryosu olarak dikkate alınan DMG3 hasar senaryosunda köprü modları farklı bir eğilimde gelişmiş olup modların sırasında değişiklikler oluşmuştur (örn. bkz. Tablo 16: REF. 1. Düşey mod @7.591 Hz, DMG3 Düşey @3.707 Hz olarak değişmiştir).

Tablo 14. Referans model DMG1 modeli kıyaslaması

Mod Şekli	Hasar Tespiti			
	Frekans (Hz)		Sönüm (%)	
	REF	DMG1	REF	DMG1
Boyuna	1.807	1.805	0.307	0.321
1. Enine	2.385	1.897	0.187	0.469
2. Enine	3.314	2.984	0.278	0.296
3. Enine	4.989	4.377	0.305	0.234
1. Burulma	6.382	6.135	0.359	0.312
2. Burulma	7.333	7.298	0.385	0.260
1. Düşey	7.591	7.575	0.258	0.384
Düşey/Enine	7.737	7.664	0.261	0.434
2. Düşey	8.170	8.164	0.459	0.442

Tablo 15. Referans model DMG2 modeli kıyaslaması

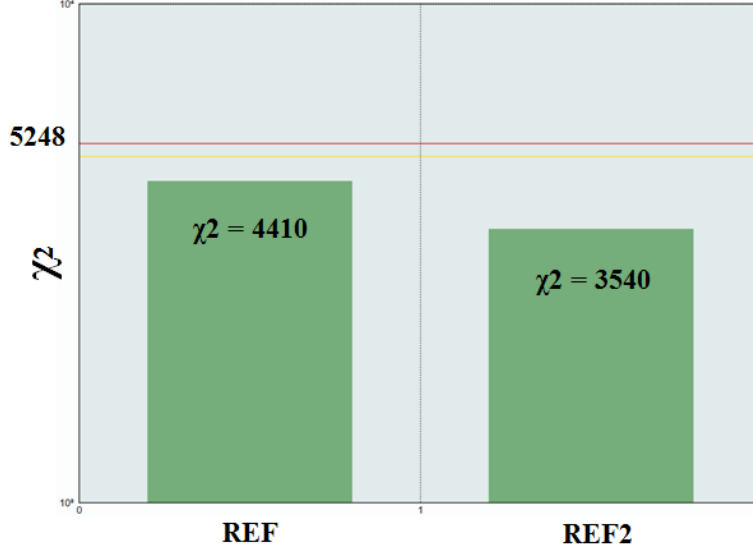
Mod Şekli	Hasar Tespiti			
	Frekans (Hz)		Sönüm (%)	
	REF	DMG2	REF	DMG2
Boyuna	1.807	1.940	0.307	0.281
1. Enine	2.385	2.438	0.187	0.371
2. Enine	3.314	3.221	0.278	0.294
3. Enine	4.989	5.062	0.305	0.341
1. Burulma	6.382	6.419	0.359	0.399
2. Burulma	7.333	7.156	0.385	0.385
1. Düşey	7.591	7.339	0.258	0.468
Düşey/Enine	7.737	7.407	0.261	0.445
2. Düşey	8.170	7.898	0.459	0.507

Tablo 16. Referans model DMG3 modeli kıyaslaması

Mod Şekli	Hasar Tespiti			
	Frekans (Hz)		Sönüm (%)	
	REF	DMG3	REF	DMG3
Boyuna	1.807	1.807	0.307	0.593
1. Enine	2.385	2.385	0.187	0.171
2. Enine	3.314	2.991	0.278	0.154
Düşey/DMG3		3.707		0.455
Enine/Burulma/DMG3		4.299		0.506
3. Enine	4.989	5.116	0.305	0.280
1. Burulma	6.382	6.473	0.359	0.487
2. Burulma	7.333		0.385	
1. Düşey	7.591	7.576	0.258	0.392
Düşey/Enine	7.737	7.729	0.261	0.253
2. Düşey	8.170		0.459	

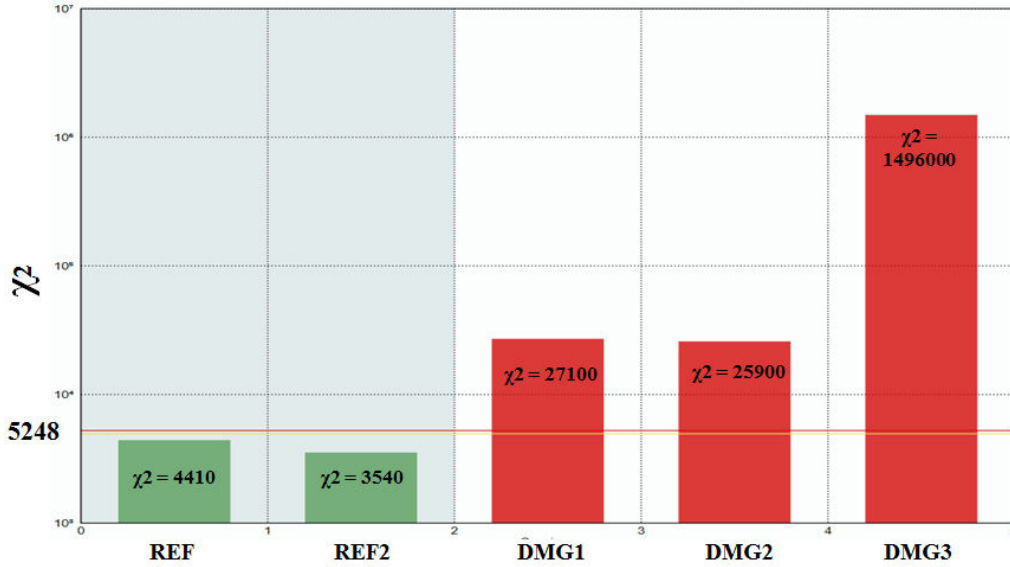
Hasar tespiti çalışmasında ARTEMIS® programında bulunan “Damage Detection” modülü kullanılmıştır. Modülde referans (hasarsız) duruma ilişkin eşik değer belirlenmesi yapılmıştır. Referans ölçümlerin oluşturulmasında daha önceki kısımda anlatıldığı üzere hasarsız modele Y ve Z doğrultularında beyaz gürültü (white noise) rastgele ivme değerleri ile tahrik uygulanmıştır. Referans eşik değerinin belirlenebilmesi için ikinci referans (REF2) modele ilk uygulanan white noise sinyalinin %75’i mertebesinde tahrik uygulanmıştır. Bu şekilde hasarın olup olmadığını gösteren  $\chi^2$  eşik değeri elde edilmiştir. Söz konusu referans (hasarsız) modellere ilişkin eşik değerini gösteren grafik Şekil 99’da gösterilmektedir. REF ve REF2 ölçümlerine ilişkin referans  $\chi^2$  eşik değeri Şekil 99’da kırmızı hat ile gösterilen 5248 değeri olarak bulunmuştur. 5248 değerinin üzerinde oluşan değerler hasarın varlığını gösterecektir.

Gerçek uygulamalarda referans ölçümleri ne kadar çok olursa  $\chi^2$  eşik değerinin hesabı o kadar kesinlik kazanmakta ve olası hasarların tespiti daha kesinlik içinde yapılabilmektedir.



Şekil 99. Referans eşik değeri

Şekil 100'de 3 farklı hasar senaryosunun da bulunduğu grafik sunulmuştur. Grafikten görüldüğü üzere 3 farklı hasar senaryosunda bulunan hasar varlıkları  $\chi^2$  eşik değer yöntemi ile ARTEMIS® programı tarafından tespit edilmiştir. Logaritmik olarak gösterilen grafiğin ordinat değerlerine bakıldığında lokal bir hasar olarak değerlendirilen DMG3  $\chi^2$  değerinin, global hasarlar olarak değerlendirilen DMG1 ve DMG2 hasar senaryolarına göre çok daha büyük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 100. Hasar senaryoları grafiği

ARTEMIS® hasar modülünün üç farklı hasar senaryosu için de hasarı tespit ettiği; ancak lokal hasar senaryolarına daha duyarlı olduğu söylenebilir. Burada önemli olan bir nokta da şudur: bu hasar tespit yöntemi hasarın varlığı hakkında bilgi verirken hasarın yeri ve miktarı ile ilgili bir bilgi vermemektedir. Bu projenin temel hedefi olan hasarın varlığı/yeri/miktarı hakkında bilgi veren hasar tahmin yöntemini geliştirmek bu açıdan önemlidir. Takip eden bölümde bu yöneme ilişkin uygulamalar ve sonuçlar sunulmuştur (yöntemin için bkz. Bölüm 3.1 ve Bölüm 10).

## **10. DUYARLILIK TABANLI SONLU ELEMANLAR MODELİ GÜNCELLENMESİ ve HASAR TESPİT ÇALIŞMALARI**

Bu bölümde, MATLAB® ortamında programlanmış duyarlık tabanlı sonlu eleman model güncelleme tekniğinin önce sayısal model örnekleri kullanılarak performansı incelenecek daha sonra da deneysel sonuçlar kullanılarak güncellenmiş ve referans modeli elde edilmiş 199+325 köprüsü üzerinde farklı hasar senaryoları kullanılarak hasar tahmin çalışmaları yapılacaktır (bkz. Bölüm 10.2).

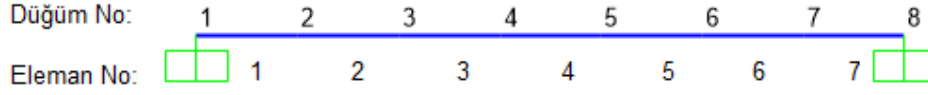
### **10.1 Sayısal Modeller Üzerinde Model Güncelleme ve Hasar Tahmin Çalışmaları**

Bu bölümün amacı programlanan sonlu elemanlar güncellenmesi tabanlı hasar tahmin yönteminin, başka komplikasyonlar olmadan, doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığı değerlendirilmelerini yapmaktır.

Çalışılan sayısal örnekler mümkün olduğunca farklı modeller seçilerek yapılmış; böylece yöntemin farklı sistemlere uygulanabilirliği konusunda tereddütler giderilmeye çalışılmıştır. İlk örnekte 7 elemandan oluşan iki ucu ankastre giriş örneği sunulmuş olup, ikinci örnekte ise tek katlı-tek açıklıklı çerçeve örneğinin hasar tespiti yapılmıştır.

#### **10.1.1 Sayısal Uygulama - 1**

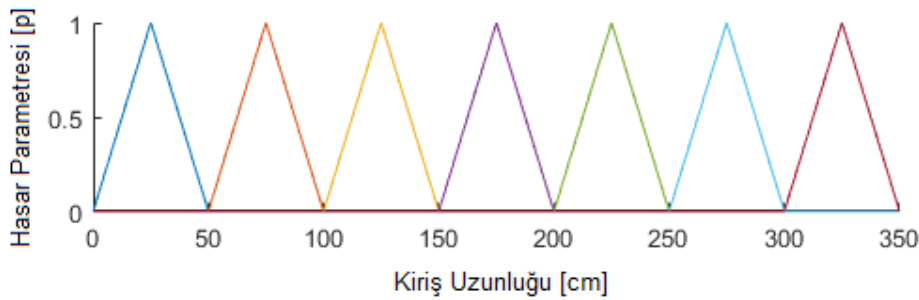
Şekil 101'de özellikleri gösterilen 350 cm uzunluğundaki, iki ucu ankastre, tek açıklıklı, 7 elemandan oluşan giriş modelinin orta bölgesinde bulunan 4. elemanına elastisite modülünü %80 oranında azaltarak hasar verilmiştir. Eleman uzunlukları eşit olarak tanımlanmış olup 50 cm'dir. Elemanların her bir düğüm noktasında 3 adet dönme, 3 adet ötelenme (toplamda 6) serbestlik derecesi mevcuttur. Buna göre bir eleman toplamda 12 serbestlik derecesine sahiptir.



Eleman no:	Düğüm Noktası ve [x,y,z Koordinatları]	Numaraları	Enkesit Boyutları [cm x cm]	Hasarsız Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Hasarlı Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]
1	1 [50,0,0]	2 [100,0,0]	25 x 15	407.89	407.89
2	2 [100,0,0]	3 [150,0,0]	25 x 15	407.89	407.89
3	3 [150,0,0]	4 [200,0,0]	25 x 15	407.89	407.89
4	4 [200,0,0]	5 [250,0,0]	25 x 15	407.89	81.58
5	5 [250,0,0]	6 [300,0,0]	25 x 15	407.89	407.89
6	6 [300,0,0]	7 [350,0,0]	25 x 15	407.89	407.89
7	7 [350,0,0]	8 [400,0,0]	25 x 15	407.89	407.89

Şekil 101. İki ucu ankastre sayısal kiriş modeline ilişkin parametreler

Modelin analitik olması sonucunda modal parametre sonuçlarında gürültü etkisinin bulunmaması ve güncellenecek parametre sayısının az olması nedeniyle hasar tespit sonucunun kesin olarak bulunabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle de her bir elemana bir tane karşılık gelecek şekilde güncelleme parametresi atanmıştır (Şekil 102). Daha çok sayıda eleman içeren daha karmaşık problemlerde hasar parametresi sayısı eleman sayısı kadar olmak zorunda değildir; bu durumda hasar parametresi birbirleriyle girişim gösterecek şekilde de seçilebilir.



Şekil 102. Kiriş eleman uzunluğu boyunca tanımlanan hasar parametreleri

Örnekte sunulan model güncelleme çalışması ilk 6 modal parametre değerini kullanılarak yapılmıştır. Algoritma buna göre hasarsız ve hasarlı olarak tanımlanan modeller arasındaki ilk 6 modal parametre değeri artışı minimize edecek şekilde çalıştırılmıştır.

Sonuçlar Tablo 17’de sunulmuştur; görüleceği üzere (a) ve (b) sütunlarında hasarlı ve hasarsız modele ilişkin titreşim frekans farkları sonlu elemanlar modeli güncellemesi hasar tabanlı hasar tespit algoritması kullanılarak başarıyla minimize edilmiş (sütun c) ve hasarsız referans ve hasarlı modellerin doğal titreşim frekansları tam olarak birbirleriyle uyumlu hale getirilmiştir.

Model güncelleme işlemi sonucunda elde edilen mod şekilleri ile hasarlı modelin mod şekilleri arasında bulunan MAC değerlerinin tüm modlar için 1 değerine (sütun g) ulaşmıştır. Algoritmada tüm elemanların güncellenmesine izin verilmiş de olsa, diğer elemanlar hasarlanmadan sadece 4. elemanın %80 hasarlanması gerektiği başarıyla bulunmuştur. Her bir eleman için bir hasar parametresi kullanıldığı için 4. elemana verilen %80’lik hasar seviyesi tam olarak bulunabilmiştir. Eğer hasar parametreleri birbirleriyle girişim yapsaydı, bir başka deyişle, her bir elemana bir hasar parametresi düşmeyecek şekilde bir düzenleme yapsaydı, 4. Elemanda hasar bulunacak ancak tam %80 değeri yakalanamayacaktı. Bu durumda hasar, 4. eleman ve bu elemana komşu elemanlarda tespit edilecekti.

Tablo 17. Sayısal Uygulama-1 örneğine ait hasarlı, hasarsız ve güncellenmiş modelin titreşim frekansları ve MAC değerleri

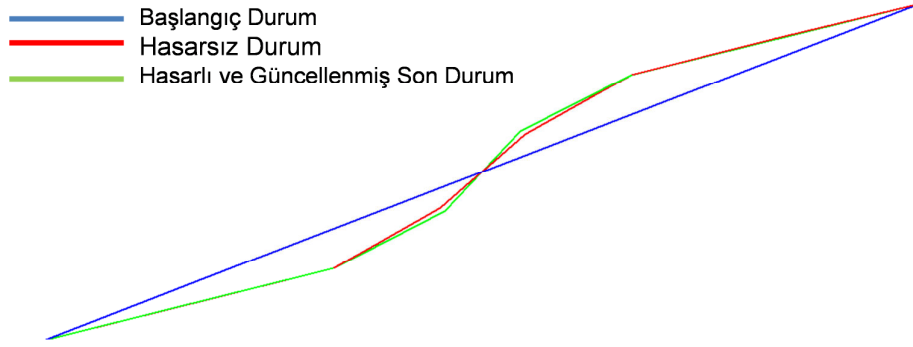
Mod	Hasarsız (Referans) Modelin Frekanslar( $f_{u, ndamaged}$ )	Hasarlı Modelin Frekanslar ( $f_{damaged}$ )	Güncellenmiş Modele Ait Frekanslar	Güncelleme Öncesi Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Güncelleme Sonrası Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Hasarsız (referans) & Hasarlı Modeller Arasında Hesaplanan MAC Oranı	Güncellenmiş & Hasarlı Model Arasında Hesaplanan MAC Oranı
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	$[(a-b)/b]$	$[(a-c)/c]$		
1	82.69	67.13	67.13	0.23	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
2	199.42	161.90	161.90	0.23	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
3	227.51	213.56	213.56	0.07	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
4	442.26	378.52	378.52	0.17	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
5	548.68	515.04	515.04	0.07	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
6	566.63	566.63	566.49	0.00	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
7	710.98	571.79	571.96	0.24	<b>0.00</b>	0.88	<b>1.00</b>
8	986.87	794.60	794.78	0.24	<b>0.00</b>	0.00	<b>1.00</b>
9	1066.59	912.86	912.85	0.17	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
10	1104.85	946.70	946.56	0.17	<b>0.00</b>	0.00	<b>1.00</b>

Tablo 17 (e) ve (g) sütunlarına bakılırsa, referans modelin güncellemesi sonrasında hasarlı modelin hem frekans hem de mod şekilleri birebir yakalandığı görülebilir. Şekil 103’te güncelleme işlemi sonrası referans modele göre mod şekillerindeki değişim görülmektedir. Güncelleme sonrası mod şekilleri güncellenmiş modelin mod şekilleri ile birebir örtüştüğü için Şekil 103’te gösterilmemiştir.

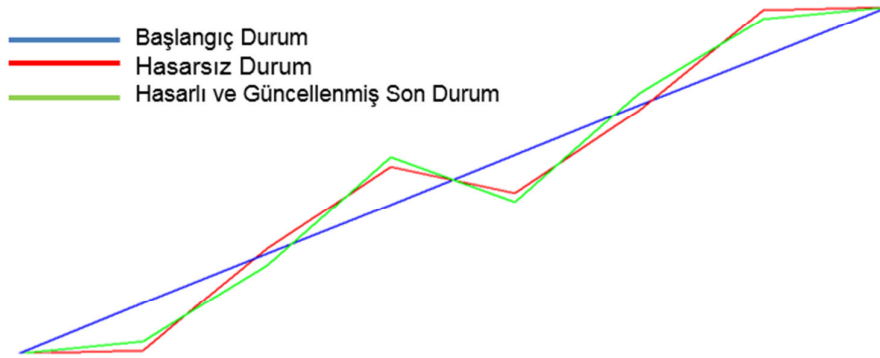
Sayısal Uygulama - 1 için elde edilen güncelleme sonuçları Tablo 18' de sunulmuştur.

Tablo 18. Sayısal Uygulama-1 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin Elastisite Modülü değerleri

Eleman no:	Hasarsız Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Hasarlı Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Güncellenmiş Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]
1	407.89	407.89	407.89
2	407.89	407.89	407.89
3	407.89	407.89	407.89
4	407.89	81.58	81.58
5	407.89	407.89	407.89
6	407.89	407.89	407.89
7	407.89	407.89	407.89



(a)



(b)

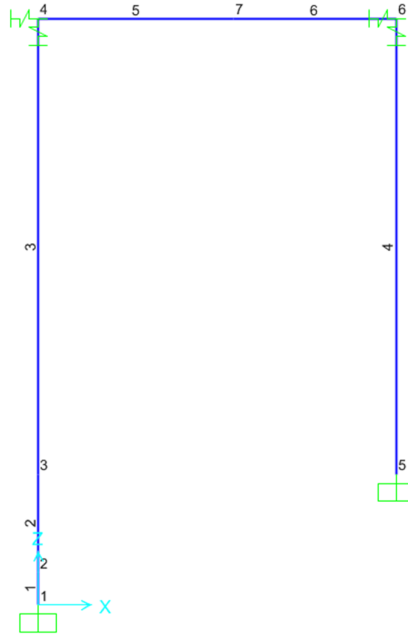
Şekil 103. Analitik Uygulama – 1 için a) mod 5 ve b) mod 7' ye ait başlangıç durum, hasarsız durum, hasarlı durum ve güncellenmiş son duruma ait görseller



### 10.1.2 Sayısal Uygulama - 2

Şekil 104'te özellikleri gösterilen 12 adet elemandan (6 adet çubuk, 6 adet yay) oluşan tek kat-tek açıklıklı çerçeve modelde hasarı temsilen sadece yay elemanların rijitlik değerleri azaltılmış olup çerçeve elemanlara herhangi bir hasar tanımlanmamıştır. Bu örnekte algoritmanın yay katsayısı güncellemesinde başarısının incelenmesi amaçlanmıştır. Elemanlar 3-boyutlu olarak modellenmiş, dolayısıyla her bir düğüm noktasında 3 adet dönme, 3 adet öteleme (toplamda 6) serbestlik derecesi mevcuttur. Buna göre bir eleman 12 serbestlik derecesine sahiptir. Sayısal uygulama-1 örneğinde olduğu gibi her bir eleman denk gelecek şekilde bir adet güncelleme parametresi atanmıştır; böylece hasarın tam miktarının bulunması hedeflenmiştir.

Bu örnekte, algoritma birbirinden bağımsız olarak iki durum için çalıştırılmış olup birinci durumda, hasarsız ve hasarlı olarak tanımlanan modeller arasındaki ilk 5 modal parametrenin artığını minimize edecek şekilde tüm elemanların güncellenmesine izin verilmiştir. Sonuçlar Tablo 19'da özetlenmiştir. İkinci durumda ise algoritma çerçeve elemanlara ait hasar parametrelerinin (p) güncellenmesi engellenecek şekilde kısıt (constraint) atanarak sadece yay katsayılarının güncellenebileceği şekilde çalıştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 20'de özetlenmiştir. İkinci durumda sadece yaylara karşılık gelen hasar parametrelerinin güncellenmesine izin verilerek optimizasyon probleminin boyutunun azalması sağlanmış ve bu durum bulunan yay hasarı sonuçlarının iyileşmesinde önemli bir etken olmuştur.



Eleman no:	Düğüm Noktası Numaraları ve [x,y,z Koordinatları]	En kesit Boyutları [cm x cm]	Hasarsız Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Hasarlı Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]
1	1 [0,0,0] 2 [0,0,50]	63 x 63	2141.40	2141.40
2	2 [0,0,50] 3 [0,0,200]	63 x 63	2141.40	2141.40
3	3 [0,0,200] 4 [0,0,900]	63 x 63	2141.40	2141.40
4	5 [550,0,200] 6 [550,0,900]	63 x 63	2141.40	2141.40
5	4 [0,0,900] 7 [300,0,900]	63 x 63	2141.40	2141.40
6	7 [300,0,900] 6 [550,0,900]	63 x 63	2141.40	2141.40
7	4 [0,0,900] 8 [1,0,900]	63 x 63	<b>57</b>	<b>10</b>
8	4 [0,0,900] 9 [0,1,900]	63 x 63	<b>112</b>	<b>40</b>
9	4 [0,0,900] 10 [0,0,901]	63 x 63	<b>2860</b>	<b>350</b>
10	6 [550,0,900] 11 [551,0,900]	63 x 63	<b>21</b>	<b>4</b>
11	6 [550,0,900] 12 [550,1,900]	63 x 63	<b>57</b>	<b>13</b>
12	6 [550,0,900] 13 [550,0,901]	63 x 63	<b>1540</b>	<b>60</b>

Şekil 104. Tek kat – tek açıklıklı analitik yaylı çerçeve modeline ilişkin parametreler

Tablo 19. Sayısal Uygulama-2 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin doğal titreşim frekans ve MAC değerleri (**Durum 1**: hasar parametrelerine kısıt atanmadı)

Mod	Hasarsız (Referans) Modelin Frekanslar (f <sub>undamaged</sub> )	Hasarlı Modelin Frekanslar (f <sub>damaged</sub> )	Güncellenmiş Modele Ait Frekanslar	Güncelleme Öncesi Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Güncelleme Sonrası Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Hasarsız (referans) & Hasarlı Modeller Arasında Hesaplanan MAC Oranı	Güncellenmiş & Hasarlı Model Arasında Hesaplanan MAC Oranı
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[(a-b)/b]	[(a-c)/c]		
1	10.85	7.50	7.50	0.45	<b>0.00</b>	0.00	<b>1.00</b>
2	11.10	8.77	8.77	0.27	<b>0.00</b>	0.00	<b>1.00</b>
3	15.68	12.08	12.08	0.30	<b>0.00</b>	0.97	<b>1.00</b>
4	58.19	58.04	58.04	0.00	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
5	59.47	59.41	59.35	0.00	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
6	60.53	60.42	60.37	0.00	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
7	68.23	67.86	68.06	0.01	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
8	138.76	124.66	137.91	0.11	<b>0.11</b>	1.00	<b>1.00</b>
9	155.30	147.13	151.78	0.06	<b>0.03</b>	1.00	<b>1.00</b>
10	224.91	224.79	224.79	0.00	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>

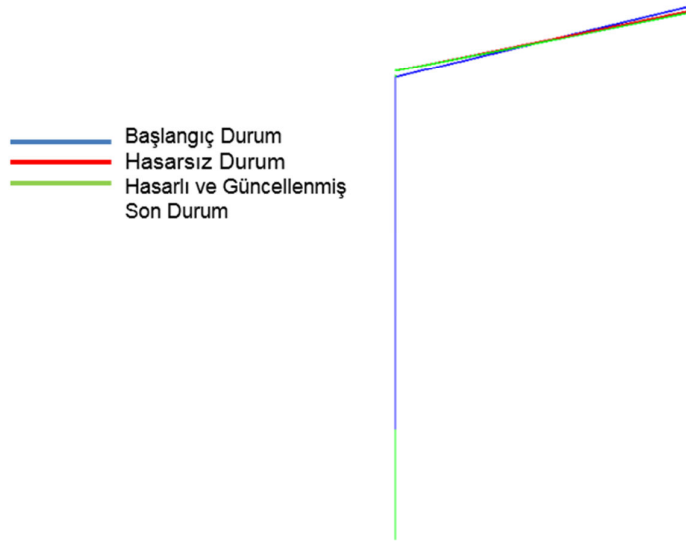
Tablo 20. Sayısal Uygulama-2 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin doğal titreşim frekans ve MAC değerleri (**Durum 2:** çerçeve elemanlarında hasar gelişmeyecek şekilde hasar parametreleri sınırlandı)

Mod	Hasarsız (Referans) Modelin Frekanslar ( $f_{undamaged}$ )	Hasarlı Modelin Frekanslar ( $f_{damaged}$ )	Güncellenmiş Modele Ait Frekanslar	Güncelleme Öncesi Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Güncelleme Sonrası Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Hasarsız (referans) & Hasarlı Modeller Arasında Hesaplanan MAC Oranı	Güncellenmiş & Hasarlı Model Arasında Hesaplanan MAC Oranı
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	$[(a-b)/b]$	$[(a-c)/c]$		
1	10.85	7.50	7.52	0.45	<b>0.00</b>	0.00	<b>1.00</b>
2	11.10	8.77	8.78	0.27	<b>0.00</b>	0.00	<b>1.00</b>
3	15.68	12.08	12.04	0.30	<b>0.00</b>	0.97	<b>1.00</b>
4	58.19	58.04	58.04	0.00	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
5	59.47	59.41	59.41	0.00	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
6	60.53	60.42	60.42	0.00	<b>0.00</b>	0.99	<b>1.00</b>
7	68.23	67.86	67.83	0.01	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
8	138.76	124.66	123.62	0.11	<b>-0.01</b>	1.00	<b>1.00</b>
9	155.30	147.13	147.32	0.06	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>
10	224.91	224.79	224.79	0.00	<b>0.00</b>	1.00	<b>1.00</b>

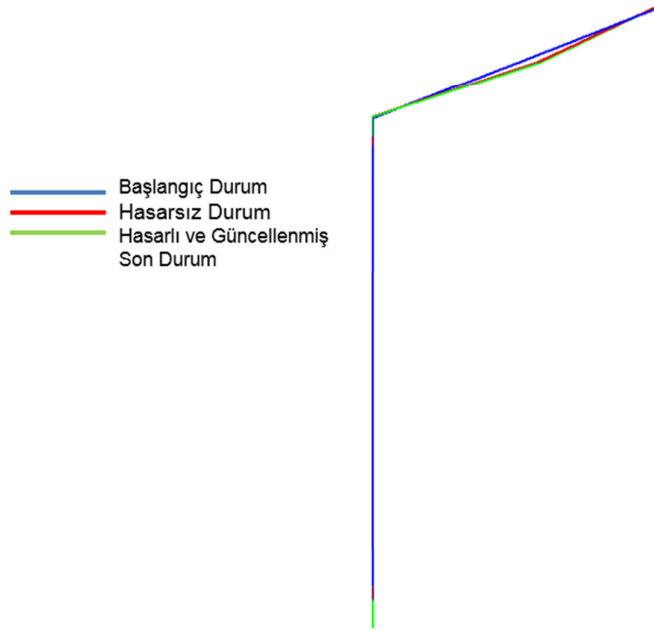
Dikkat edilirse her iki durumda da (Durum-1 ve Durum-2), referans modelin modal parametre değerleri hasarlı durumun modal parametre değerleriyle eşleştirilebilmiştir; ancak gerçek hasarlı duruma karşılık gelen ilgili elemanlardaki elastisite modülü azalmalarının yakalanıp yakalanmadığı daha önemli bir sorudur. Bu sorunun cevabı Tablo 21’de verilmeye çalışılmıştır.

Tablo 21. Sayısal Uygulama-2 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin Elastisite Modülü değerleri (Durum 1 ve 2 için)

Eleman no:	Hasarsız Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Hasarlı Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Güncellenmiş Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ] ( <b>Durum 1</b> )	Güncellenmiş Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ] ( <b>Durum 2</b> )
1	2141.40	2141.40	2141.39	2141.38
2	2141.40	2141.40	2141.27	2141.38
3	2141.40	2141.40	2141.40	2141.39
4	2141.40	2141.40	2053.01	2141.38
5	2141.40	2141.40	2141.39	2141.38
6	2141.40	2141.40	2141.40	2141.38
7	57	<b>10</b>	<b>9.07</b>	<b>11.82</b>
8	112	<b>40</b>	<b>42.15</b>	<b>35.97</b>
9	2860	<b>350</b>	<b>2716.03</b>	<b>173.50</b>
10	21	<b>4</b>	<b>6.95</b>	<b>2.51</b>
11	57	<b>13</b>	<b>12.63</b>	<b>16.56</b>
12	1540	<b>60</b>	<b>1390.49</b>	<b>95.97</b>



(a)



(b)

Şekil 105. Analitik Uygulama – 2 için a) mod 3 ve b) mod 5' e ait başlangıç durum, hasarsız durum, hasarlı durum ve güncellenmiş son duruma ait görseller

Tablo 21'in Durum-1'e karşılık gelen sütununa dikkat edilirse hasar tahmin algoritması tüm elamanların elastisite modülünü güncellemeye çalışmaktadır. Bu durumda hasarsız kiriş-kolon elemanlarının elastisite modülü değerleri de az miktarda da olsa değişmektedir. Oysaki hasarlı model için sadece yay rijitliklerinde azaltmalar yapılmıştır. Dahası da yay

elemanlarındaki rijitlik değışimleri hasarlı duruma karşılık gelen değerlerden oldukça uzaklaşabilmektedir (örn.: 12. elemanın rijitliği).

Tablo 21'in Durum-2'ye karşılık gelen sütununa baktığımızda ise hasar tahmin sonuçlarının tam olarak bulunamasa bile Durum-1'e göre daha iyi olduğu izlenmektedir. Buradan çıkan önemli bir sonuç şu şekilde özetlenebilir: sonlu elemanlar güncellemesi hasar tahmin yönteminde gerçek hasar değerlerine ulaşmak için hasarın beklenmediği elemanlarda güncellemeye izin verilmemeli, mümkünse bu elemanlar güncelleme işlemi dışında tutulmalıdır. Bu durumun gerçek uygulamalara yansıması şöyle olabilir: hasar tespiti yapılacak yapı incelenip, güncelleme dışında tutulabilecek elemanlar tespit edilmelidir.

### 10.1.3 Sayısal Uygulama - 3

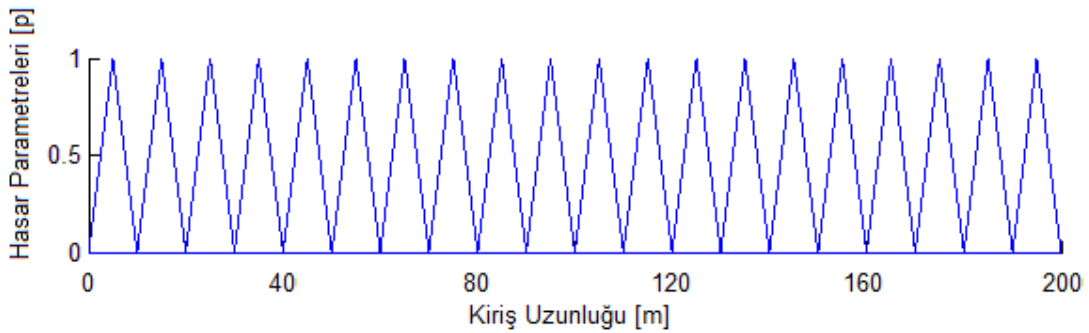
Şekil 106'da özellikleri gösterilen 200 m uzunluğunda 5 açıklıklı, her bir açıklığında 4, toplamda 20 elemandan oluşan kiriş modelinin 15 elemanında şekilde gösterilen miktarlarda (son sütunda % cinsinden belirtilmiştir) hasarlar tanımlanmıştır. Dikkat edilirse hasar miktarları ve yerleri gelişigüzel ve yaygın bir hasar senaryosunu temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Eleman uzunlukları eşit olarak tanımlanmış olup 10 m'dir. Elemanların düğüm noktalarında 3 adet dönme, 3 adet ötelenme (toplamda 6) serbestlik derecesi mevcuttur. Buna göre bir eleman 12 serbestlik derecesine sahiptir (3-boyutlu kiriş-kolon elemanları kullanılmıştır). Kirişin dış bölgesindeki mesnetler ankastre; iç bölgelerindeki mesnetler ise hareketli mesnet türündedir. Diğer sayısal model örneklerinde olduğu gibi her bir eleman üzerine bir adet gelecek şekilde güncelleme parametresi atanmıştır (Şekil 107). Güncelleme işlemi, kiriş modelinin tüm modları dikkate alınarak (53 mod) gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yüksek performanslı ve proje kapsamında alınan bir Workstation ile gerçekleştirilmiştir.



Eleman no:	Düğüm Noktası Numaraları ve [x,y,z Koordinatları]	En Kesit Boyutları [cm x cm]	Hasarsız Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Hasarlı Modelin Elastisite Modülü Değerleri [tonf/cm <sup>2</sup> ] ve Tanımlanan <b>Yüzde Hasar</b>
1	1 [0,0,0] 2 [1000,0,0]	63 x 63	2141.40	1070.70 [%50]
2	2 [1000,0,0] 3 [2000,0,0]	63 x 63	2141.40	2141.40 [%0]
3	3 [2000,0,0] 4 [3000,0,0]	63 x 63	2141.40	2141.40 [%0]
4	4 [3000,0,0] 5 [4000,0,0]	63 x 63	2141.40	1498.98 [%30]
5	5 [4000,0,0] 6 [5000,0,0]	63 x 63	2141.40	2141.40 [%0]
6	6 [5000,0,0] 7 [6000,0,0]	63 x 63	2141.40	856.56 [%60]
7	7 [6000,0,0] 8 [7000,0,0]	63 x 63	2141.40	1284.84 [%40]
8	8 [7000,0,0] 9 [8000,0,0]	63 x 63	2141.40	1713.12 [%20]
9	9 [8000,0,0] 10 [9000,0,0]	63 x 63	2141.40	2141.40 [%0]
10	10 [9000,0,0] 11 [10000,0,0]	63 x 63	2141.40	1498.98 [%30]
11	11 [10000,0,0] 12 [11000,0,0]	63 x 63	2141.40	1713.12 [%20]
12	12 [11000,0,0] 13 [12000,0,0]	63 x 63	2141.40	1284.84 [%40]
13	13 [12000,0,0] 14 [13000,0,0]	63 x 63	2141.40	1284.84 [%40]
14	14 [13000,0,0] 15 [14000,0,0]	63 x 63	2141.40	1498.98 [%30]
15	15 [14000,0,0] 16 [15000,0,0]	63 x 63	2141.40	2141.40 [%0]
16	16 [15000,0,0] 17 [16000,0,0]	63 x 63	2141.40	1713.12 [%20]
17	17 [16000,0,0] 18 [17000,0,0]	63 x 63	2141.40	1498.98 [%30]
18	18 [17000,0,0] 19 [18000,0,0]	63 x 63	2141.40	856.56 [%60]
19	19 [18000,0,0] 20 [19000,0,0]	63 x 63	2141.40	1070.70 [%50]
20	20 [19000,0,0] 21 [20000,0,0]	63 x 63	2141.40	1498.98 [%30]

Şekil 106. 5 açıklıklı kiriş modeline ilişkin parametreler



Şekil 107. Kiriş eleman uzunluğu boyunca tanımlanan hasar parametreleri

Güncelleme parametreleri her bir elemana bir tane gelecek şekilde seçilmiş (Şekil 107) böylece elemanlarda gerçekleşen hasarın birebir bulunabilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 22. Sayısal Uygulama-3 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin modal parametre değerleri

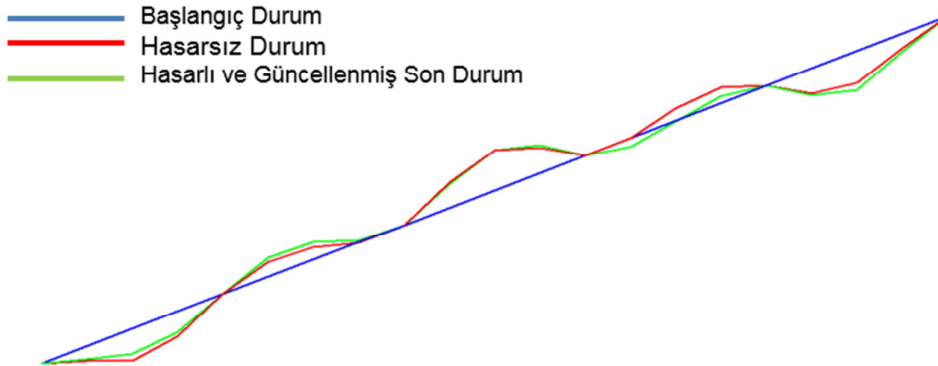
Mod	Hasarsız (Referans) Modelin Frekanslar ( $f_{\text{undamaged}}$ )	Hasarlı Modelin Frekanslar ( $f_{\text{damaged}}$ )	Güncellenmiş Modele Ait Frekanslar	Güncelleme Öncesi Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Güncelleme Sonrası Hasarlı & Hasarsız Modeller Arasındaki Frekans Oranı	Hasarsız (referans) & Hasarlı Modeller Arasında Hesaplanan MAC Oranı	Güncellenmiş & Hasarlı Model Arasında Hesaplanan MAC Oranı
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	$[(a-b)/b]$	$[(a-c)/c]$		
1	0.084	0.068	0.068	0.238	0.000	1.00	1.00
2	0.231	0.185	0.185	0.245	-0.001	0.99	1.00
3	0.452	0.377	0.377	0.199	0.000	0.99	1.00
4	0.748	0.619	0.618	0.209	-0.001	0.99	1.00
5	1.024	0.842	0.843	0.216	0.000	0.98	1.00
6	1.117	0.909	0.909	0.229	0.000	1.00	1.00
7	1.280	1.042	1.041	0.229	-0.001	0.97	1.00
8	1.559	1.286	1.286	0.213	0.000	0.99	1.00
9	1.611	1.331	1.330	0.211	0.000	0.94	1.00
10	1.933	1.607	1.606	0.203	0.000	0.83	1.00

Tablo 22’de verilen sütun (d) ve (e) değerlerine bakılırsa, güncellemeden önce referans model ile hasarlı model arasındaki frekans farkları (maks. %25 mertebesinde), tüm modlarda %0 mertebesine indirilmiştir. Aynı şekilde güncelleme sonrası güncellenmiş model ile hasarlı model arasında hesaplanan mod şekilleri de birbiriyle birebir örtüşmektedir.

Tablo 23’te ise daha önemli bir sonuç paylaşılmıştır: güncellenmiş modelin hasarlı elemanları birebir yine tespit edilebilmiştir. Bu durumda şu sonuca rahatlıklar varılabilir: sonlu elemanlar modeli güncellemesi tabanlı hasar tahmin yöntemi sadece hasarın varlığını değil, hasarın hangi elemanda ve ne mertebede geliştiğini de tahmin edebilmektedir.

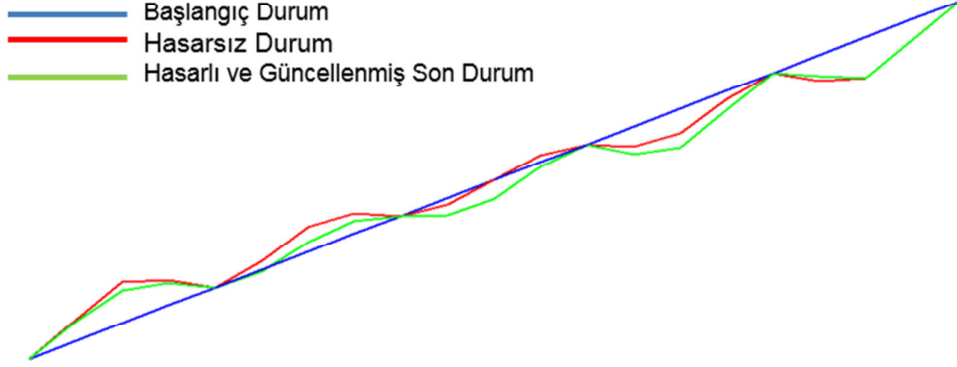
Tablo 23. Analitik Uygulama-3 örneğine ait hasarsız, hasarlı ve güncellenmiş modelin Elastisite Modülü değerleri ve yüzde hasarları

Eleman no:	Hasarsız Modelin Elastisite Modülü [tonf/cm <sup>2</sup> ]	Hasarlı Modelin Elastisite Modülü [tonf/cm <sup>2</sup> ] ve Tanımlanan Yüzde Hasar		Güncellenmiş Modelin Elastisite Modülü [tonf/cm <sup>2</sup> ] ve Tahmin Edilen Yüzde Hasar	
1	2141.40	1070.70	[%50]	1075.78	[%50]
2	2141.40	2141.40	[%0]	2141.38	[%0]
3	2141.40	2141.40	[%0]	2141.39	[%0]
4	2141.40	1498.98	[%30]	1494.45	[%30]
5	2141.40	2141.40	[%0]	2141.40	[%0]
6	2141.40	856.56	[%60]	864.02	[%60]
7	2141.40	1284.84	[%40]	1277.39	[%40]
8	2141.40	1713.12	[%20]	1674.59	[%22]
9	2141.40	2141.40	[%0]	2141.40	[%0]
10	2141.40	1498.98	[%30]	1524.58	[%29]
11	2141.40	1713.12	[%20]	1703.90	[%20]
12	2141.40	1284.84	[%40]	1287.89	[%40]
13	2141.40	1284.84	[%40]	1307.03	[%39]
14	2141.40	1498.98	[%30]	1474.64	[%31]
15	2141.40	2141.40	[%0]	2141.39	[%0]
16	2141.40	1713.12	[%20]	1718.00	[%20]
17	2141.40	1498.98	[%30]	1508.56	[%30]
18	2141.40	856.56	[%60]	865.15	[%60]
19	2141.40	1070.70	[%50]	1071.60	[%50]
20	2141.40	1498.98	[%30]	1472.81	[%31]



(a)





(b)

Şekil 108. Sayısal Uygulama-3 için a) 9. ve b) od 10. modlara ait başlangıç durum, hasarsız durum, hasarlı durum ve güncellenmiş son duruma ait görseller (hasarlı ve güncellenmiş durum birebir örtüşmektedir, bu nedenle grafikte tek bir çizgi ile gösterilmişlerdir)

#### 10.1.4 Sayısal Model Çalışmalarına İlişkin Ara Sonuçlar

Bölüm 3.1’de adımları anlatılan duyarlık tabanlı sonlu eleman modeli güncelleme algoritmasının MATLAB® ortamında, FEDEASLab programıyla uyumlu çalışacak şekilde başarıyla programlandığı sayısal uygulamalar üzerinde gösterilmiştir.

Sayısal olarak tanımlanan hasarların algoritma tarafından başarıyla bulunduğu yukarıdaki örneklerde görülmektedir. Bu üç sayısal model kullanılarak yapılan çalışmanın temel amaçları şöyledir: (i) güncelleme işlemi optimizasyon algoritmasının doğru çalışıp çalışmadığını test edebilmek, (ii) parametrik çalışmalar yaparak örneğin güncelleme parametresi seçiminin etkisini anlamak, ve (iii) tüm elemanların güncellenmesine izin vermek ile bunun kısıtlanması durumlarının güncelleme sonuçlarına etkisini incelemek. Sayısal çalışmaların doğru sonuçlar verdiği görülmüş ve 199+325 çelik demiryolu köprüsünün analitik ve deneysel modelleri arasında güncelleme çalışmalarına başlanmıştır.

#### 10.2 199+325 Çelik Demiryolu Köprüsünün Duyarlık Tabanlı Sonlu Elemanlar Model Güncelleme Çalışmaları ve Hasar Senaryoları

Sonlu elemanlar güncellenmesi tabanlı hasar tahmin yöntemi her adımda ikinci dereceden bir artık fonksiyonunu, model parametreleri güncelleyerek küçültmektedir. Artık fonksiyonunu en küçük yapan model parametreleri de optimize edilmiş model parametreler olarak

kullanılmaktadır. Optimizasyon problemi için doğrusal olmayan bir problem olup, içinde güncellenen sistemin sonlu elemanlar modelini barındırmaktadır. Bu model ne kadar karmaşık olursa optimizasyon problemi de o kadar zor olmaktadır. Hatta bazı durumlarda artık fonksiyonu minimize bile edilememektedir. Sayısal modelin büyük bir model olmasından kaynaklı zorluklar hasar parametresi yaklaşımı (bknz. Bölüm 3.1.2) ile azaltılmaya çalışılsa da yine de modelin incelenen gerçek sistemi temsil edecek en basit model olmasında çok önemli seviyede fayda vardır.

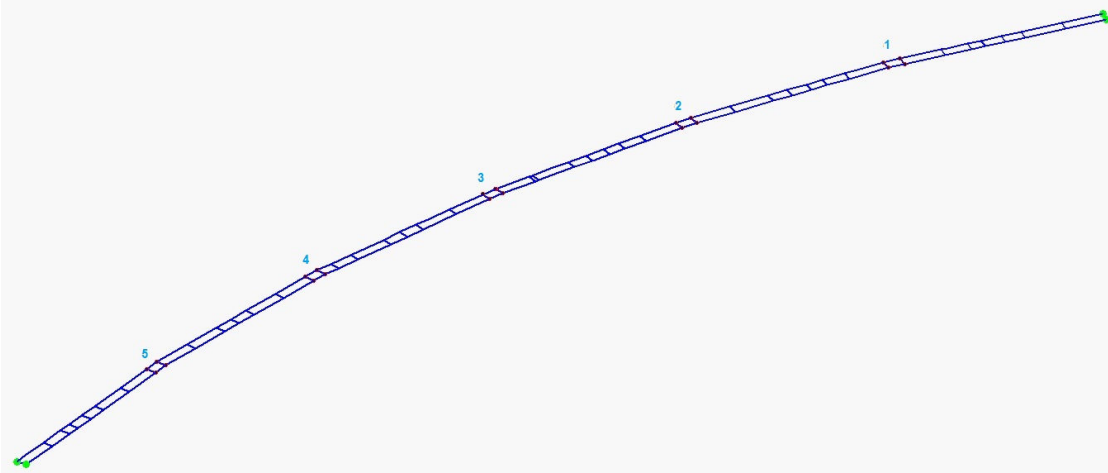
Yerinde yapılan ölçüm çalışmalarına dikkat edilecek olursa sensörlerin köprünün üst başlık kirişlerine yerleştirildiği görülebilir. Bunun temel nedeni köprünün diğer bölgelerine (örn.: alt başlık vs.) sensör yerleştirilmesinde yaşanan zorluklar ve köprünün tehlikeli bir bölgede olmasıdır (derin bir vadiyi geçen, yer yer 60 metre yüksekliklere ulaşan irtifalarda çalışmaların yapılıyor olması, iskele isteminin olmaması vs.). Dolayısıyla, köprü ölçümleri tüm köprüden alınmış olsa da üst başlık kirişlerinin titreşim karakterini içermektedir (tüm köprünün titreşimi üst başlık kirişleri üzerine kurulan sensörlerle kayda alınmıştır, bir başka deyişle titreşim kayıtları köprünün bütünüdürün dinamiği yansıtmakta ancak sadece üst başlık hareketini içerecek niteliktedir.

Köprü üstüne yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleri (köprünün ön ve arka taraflarında, yanal yüzeylerde, yer alan üst başlık kirişleri) dikkate alındığında aslında köprünün sadece yatay düzlemde bulunan döşemesinin modellenmesinin uygun bir yaklaşım olacağı düşünülmüştür (Şekil 109). Bu eşdeğer kiriş yöntemi ile modelin boyutları oldukça küçülmüş dolayısıyla FEDEASLab modeli basitleştirilebilmiş. Bu modelde köprü ağırlığı tam olarak dikkate alınmış ve kare en kesite sahip çubuk elemanlar modellemede kullanılmıştır. Eşdeğer model için başlangıç en kesit boyutları seçilirken deneysel olarak elde edilmiş modal parametrelerle uyumlu sonuçların oluşmasına dikkat edilmiştir. Sayısal modelin uyum göstermesi istenen deneysel modlar 1., 2., 4., 6., 12. olarak belirlenmiştir. Böylece gerçek köprünün tüm kütlelerini ve tüm rijitliğini yansıtacak en kesit boyutları elde edilmeye çalışılmıştır. Köprü basitleştirildiği için aslında köprünün gerçek rijitliğinin gözden kaçırıldığı düşünülebilir; ancak köprünün bütünü üzerinde yapılan testler ve dolayısıyla bütünü için elde edilen modal parametreler ile sayısal modelin modal parametreleri eşleştirilmeye çalışıldığı için en kesit boyutları aslında köprünün bütünüdürün rijitliğini yansıtacak şekilde güncellenecektir. Bu modelde yine kolon ayakları yay elemanlar ile temsil edilmiştir. Bu şekilde elde edilen eşdeğer başlangıç modeli referans modelin elde edilmesi için bu proje kapsamında programlanmış sonlu elemanlar modeli güncelleme tekniği ile güncellenmiştir. Dikkat edilirse başlangıç modeli sadece bir ön/kaba model elde edilmesi için kullanılmıştır. Daha detaylı kalibrasyon optimizasyon

probleminin çözümü içinde gerçekleştirilmiştir. Başlangıç eşdeğer köprü modeli MATLAB® ortamında programlanmış duyarlık tabanlı sonlu eleman model güncelleme tekniği ile deneysel sonuçlar kullanılarak (modal parametre tahminleri) güncellenip referans model elde edilmiştir. Kullanılan modal parametreler Tablo 24'te verilmiştir. Neden bu modların seçildiğine ilişkin değerlendirmeler takip eden paragraflarda sunulmuştur.

Eşdeğer köprü modelinde mesnet şartları 60 adet yay eleman ile temsil edilmiş olup; köprü açıklığı boyunca 147 çerçeve elemanı kullanılmıştır. Çerçeve elemanların düğüm noktalarında 3 adet dönme, 3 adet ötelenme (toplamda 6) serbestlik derecesi mevcuttur. Buna göre bir eleman 12 serbestlik derecesine sahiptir. Bu modelde köprünün düşey ve yatay kurb özellikleri korunmuştur (genel geometrik özellikleri modele yansıtılmıştır). Duyarlık tabanlı model güncelleme işlemi, deneysel modal parametrelerin boyutlarına bağlı kalınarak yapılması gerektiğinden sadece ötelenme serbestlik dereceleri (testlerde kullanılan ivmeölçerler sadece ötelenme hareketini ölçmektedir) göz önünde bulundurulmuştur.

Modele ait her bir elemana bir adet olacak şekilde güncelleme parametresi ataması yapılmıştır (girişim yapılmamış, böylece her bir eleman bağımsız olarak güncellenmiştir). Model güncelleme işlemi oluşturulan nümerik modelin modları ile deneysel olarak elde edilen modların benzerlikleri göz önünde bulundurularak seçilen 5 adet modal parametreye göre yapılmıştır. Bu modlar nümerik modelin 7, 8, 11, 12 ve 23 numaralı modları ve deneysel modların 1, 2, 4, 6 ve 12 numaralı modlarıdır (Tablo 24). Güncelleme işlemine dâhil edilen modal parametreler ve kalibrasyonuna ilişkin sayısal sonuçlar Tablo 25'te görülmektedir. 5 adet sayısal mod ve deneysel mod şekli eşleştirilmiş ve bu 5 mod kullanılarak güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen modların sıralaması tabii ki nümerik modların sıralaması ile aynı olmamaktadır. Dolayısıyla hangi deneysel modun hangi sayısal moda karşılık geldiğini bulmak için MAC değerlerinden yararlanılmıştır. Bu durumda model güncelleme işlemi sistem tanımlama sonucu elde edilen 1, 2, 4, 6 ve 12. numaralı modlara göre yapılmıştır.



Şekil 109. 199+325 Çelik demiryolu köprüsünün kolon ayak numaralarının da gösterildiği güncelleme işlemi için kullanılacak olan FEDEASLab'de modellenmiş eşdeğer kiriş modeli

Proje kapsamında geliştirilen duyarlık tabanlı optimizasyon yöntemi, yukarıda ayrıntısı verilen 199+325 çelik demiryolu köprüsünün eşdeğer kiriş modeline uygulanmış ve sonuçlar Tablo 25 'te sunulmuştur. Bu sonuçlar referans modele ait sonuçlardır. Hasar senaryoları referans model kullanılarak yapılacaktır. Bu kısma ilişkin çalışma 10.2.1, 10.2.2 ve 10.2.3 bölümlerinde sunulmuştur.

Tablo 24. FEDEASLab eşdeğer kiriş modeli ile deneysel sonuçlardan eşleştirilen modların MAC değerleri

	Deneysel 1. Mod	Deneysel 2. Mod	Deneysel 4. Mod	Deneysel 6. Mod	Deneysel 12. Mod
FEDEASLab 7. Mod	0.87	0.32	0.08	0.51	0.11
FEDEASLab 8. Mod	0.03	0.50	0.00	0.16	0.00
FEDEASLab 11. Mod	0.01	0.12	0.80	0.31	0.01
FEDEASLab 12. Mod	0.40	0.51	0.53	0.76	0.06
FEDEASLab 23. Mod	0.00	0.00	0.00	0.01	0.73

Tablo 25. 199+325 Çelik demiryolu köprüsünün model güncellemesine ilişkin sonuçlar

Nümerik ve Deneysel Mod Numaraları	[a]	[b]	[c]	[d]	[e]	[f]	[g]
7-1	3.438	<b>2.133</b>	<b>2.456</b>	61.2	15.2	<b>0.872</b>	<b>0.860</b>
8-2	3.514	<b>2.396</b>	<b>2.553</b>	46.7	6.5	<b>0.503</b>	<b>0.661</b>
11-4	4.026	<b>3.044</b>	<b>2.977</b>	32.3	2.2	<b>0.796</b>	<b>0.797</b>
12-6	4.243	<b>3.372</b>	<b>3.286</b>	25.8	2.6	<b>0.755</b>	<b>0.719</b>
23-12	9.130	<b>6.368</b>	<b>6.505</b>	43.4	2.2	<b>0.735</b>	<b>0.759</b>

a) **Güncelleme Öncesi** Sayısal Modele İlişkin Frekanslar [Hz]  
b) **Deneysel Frekanslar** [Hz] (sistem tanımlama ile elde edilen sonuçlar)  
c) **Güncelleme Sonrası** Bulunan Frekans Değerleri [Hz]  
d) **Güncelleme Öncesi** Sayısal Model ile Deneysel **Frekanslar Arasındaki Fark** [%]  
e) **Güncelleme Sonrası** Sayısal Model ile Deneysel **Frekanslar Arasındaki Fark** [%]  
f) **Güncelleme Öncesi** Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki **MAC Değerleri**  
g) **Güncelleme Sonrası** Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki **MAC Değerleri**

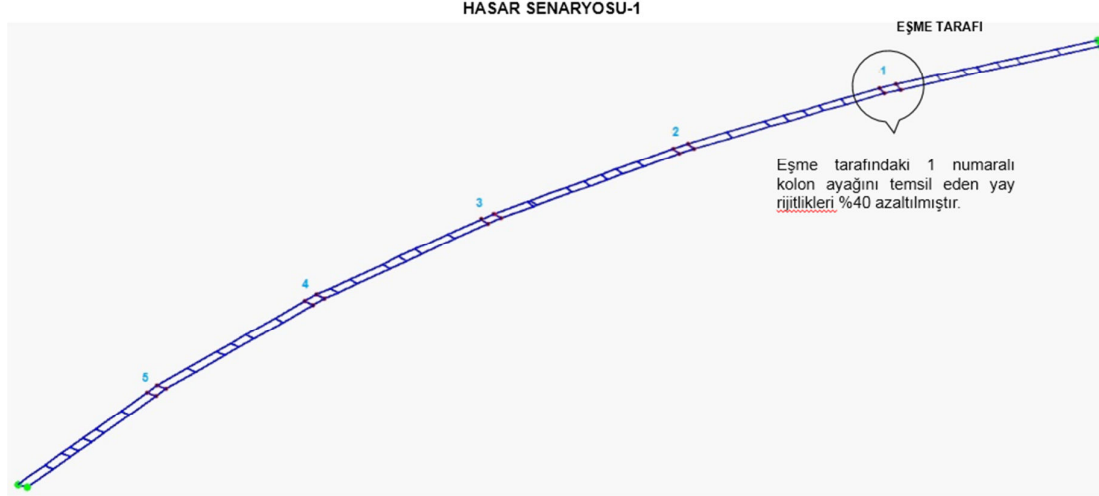
Tablo 25'te görüldüğü gibi güncelleme öncesi sayısal modelin frekansları deneysel değerlere yaklaştırılmıştır. Güncellenmiş bu model (referans), gerçek köprünün referans durumunu temsil eden model olarak kabul edilmiştir. Güncelleme sonrası MAC değerlerinde izlenen değişim frekanslar kadar iyi değildir; ancak yine de bazı modlarda belli bir miktarda iyileşme yakalanmıştır. En azından güncelleme sonrası mod şekillerinden MAC değerleri itibariyle önemli bir azalma gerçekleşmemiştir. Bundan sonra elde edilen referans modeli kullanılarak hasar senaryosu çalışmalarına geçilmiştir. Takip eden bölümlerde farklı hasar durumlarını temsil eden modellere ilişkin ayrıntılar sunulmuştur.

Dikkat edilirse hasar senaryoları sayısal olarak oluşturulmuştur; bunun nedeni gerçek köprüye hasar verilemiyor olmasıdır; ancak hasar verilen sayısal modelin gerçek köprü üzerinden alınan veriler kullanılarak güncellenmiş olduğu ve bu açıdan gerçek durumu temsil ettiği söylenebilir. Proje önerisi kapsamında da yapılacak olan hasar senaryosu çalışmalarının sayısal modeller kullanılarak yapılacağı önerisi yapılmıştır. Bu durum dikkate alındığında proje hedeflerinde bir sapma söz konusu değildir.

### 10.2.1 Hasar Senaryosu - 1

Köprünün Eşme tarafında bulunan 1 numaralı kolon ayağında yangına bağlı olarak %40'lık bir rijitlik azalması meydana geldiği kabul edilmiş ve hasar senaryosu bu şekilde oluşturulmuştur. Bu %40'lık rijitlik azalması 1 numaralı kolon ayağını temsil eden 12 adet yay elemanının yay rijitlik değerleri %40 azaltılarak köprünün eşdeğer köprü modeline uygulanmış (Şekil 110) ve bir önceki bölümde elde edilen referans modeli kullanılarak bu

model hasar durumu yansıtacak şekilde güncellenmiştir. Hasar-1 senaryosu lokal bir hasar senaryosu olarak düşünülmüştür.



Şekil 110. FEDEASLab eşdeğer köprü modeli için hasar senaryosu - 1

Hasar senaryosu - 1 için elde edilen güncelleme sonuçları Tablo 26' da sunulmuştur.

Tablo 26. Hasar senaryosu - 1 için model güncelleme sonuçları

Nümerik ve Deneysel Mod Numaraları	[a]	[b]	[c]	[d]	[e]	[f]	[g]
7-1	2.456	<b>2.455</b>	<b>2.456</b>	0.0	0.0	<b>0.993</b>	<b>1.000</b>
8-2	2.553	<b>2.511</b>	<b>2.511</b>	1.7	0.0	<b>0.873</b>	<b>1.000</b>
11-4	2.977	<b>2.886</b>	<b>2.886</b>	3.2	0.0	<b>0.974</b>	<b>1.000</b>
12-6	3.286	<b>3.286</b>	<b>3.286</b>	0.0	0.0	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
23-12	6.505	<b>6.505</b>	<b>6.505</b>	0.0	0.0	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>

a) **Referans** Sayısal Modele İlişkin Frekanslar [Hz]  
b) **Hasar Verilen Modelin** Frekansları [Hz]  
c) **Güncelleme Sonrası** Bulunan Frekans Değerleri [Hz]  
d) **Güncelleme Öncesi** Sayısal Model ile Deneysel **Frekanslar Arasındaki Fark** [%]  
e) **Güncelleme Sonrası** Sayısal Model ile Deneysel **Frekanslar Arasındaki Fark** [%]  
f) **Güncelleme Öncesi** Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki **MAC Değerleri**  
g) **Güncelleme Sonrası** Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki **MAC Değerleri**

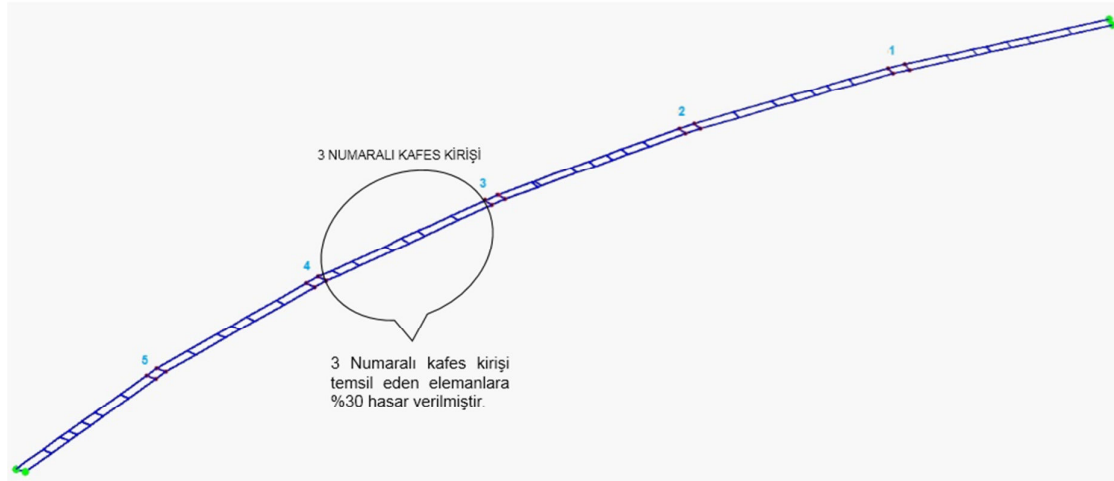
Duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği ile referans modelin modal parametreleri, hasarlı modelin modal parametreleri ile bire bir eşleşecek şekilde güncellenmiştir. Daha önemli olan ise güncelleme sonucunda hasarın varlığı, yeri ve miktarı tam olarak belirlenebilmiştir. Bu durum frekansların ve mod şekillerinin birebir eşleşmesinde de anlaşılabilir.

Güncellenen eşdeğer köprü modeli basitleştirilmiş dahi olsa yine de büyük bir modeldir. Toplamda üç boyutlu 147 adet çerçeve elemanı ve tek boyutlu 60 adet yay elemanı ihtiva etmektedir. Bu elemanlardaki güncelleme öncesi ve sonrası rijitlik değişimlerini göstermek için hazırlanacak bir tablo raporun boyutlarını çok büyütmektedir. Bu nedenle güncellenen eşdeğer köprü modeline ilişkin bu tablolar <http://kisi.deu.edu.tr/ozgur.ozcelik> web sitesinde Hasar Senaryosu – 1 dosyası altında paylaşılmıştır. Tablolar içinde güncellenmiş değerler italik-kalın fontlarla gösterilmiştir.

### 10.2.2 Hasar Senaryosu - 2

Köprünün 3. ve 4. kolon ayağı arasında bulunan 3. kafes kiriş açıklığı temsil eden eşdeğer köprü modelindeki elemanların elastisite modülleri %30 azaltılarak hasar senaryosu oluşturulmuştur (Şekil 111) ve referans model kullanılarak model güncellenmiştir. Hasar-2 senaryosu tek bir açıklıkta gelişen yaygın hasar senaryosu olarak düşünülebilir.

HASAR SENARYOSU-2



Şekil 111. FEDEASLab eşdeğer kiriş modeli için Hasar senaryosu - 2

Hasar senaryosu - 2 için elde edilen güncelleme sonuçları Tablo 27' de sunulmuştur.

Tablo 27. Hasar senaryosu -2 için model güncelleme sonuçları

Nümerik ve Deneysel Mod Numaraları	[a]	[b]	[c]	[d]	[e]	[f]	[g]
7-1	2.456	<b>2.325</b>	<b>2.325</b>	5.6	0.0	<b>0.126</b>	<b>1.000</b>
8-2	2.553	<b>2.455</b>	<b>2.455</b>	4.0	0.0	<b>0.095</b>	<b>1.000</b>
11-4	2.977	<b>2.977</b>	<b>2.977</b>	0.0	0.0	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
12-6	3.286	<b>3.286</b>	<b>3.286</b>	0.0	0.0	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
23-12	6.505	<b>6.290</b>	<b>6.290</b>	3.4	0.0	<b>0.000</b>	<b>1.000</b>

a) **Referans** Sayısal Modele İlişkin Frekanslar [Hz]  
b) **Hasar Verilen Modelin** Frekansları [Hz]  
c) **Güncelleme Sonrası** Bulunan Frekans Değerleri [Hz]  
d) **Güncelleme Öncesi** Sayısal Model ile Deneysel **Frekanslar Arasındaki Fark** [%]  
e) **Güncelleme Sonrası** Sayısal Model ile Deneysel **Frekanslar Arasındaki Fark** [%]  
f) **Güncelleme Öncesi** Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki **MAC Değerleri**  
g) **Güncelleme Sonrası** Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki **MAC Değerleri**

Duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği ile referans modelin modal parametreleri, hasarlı modelin modal parametreleri ile bire bir eşleşecek şekilde güncellenmiştir. Daha önemli olan ise güncelleme sonucunda hasarın varlığı, yeri ve miktarı tam olarak belirlenebilmiştir. Bu durum frekansların ve mod şekillerinin birebir eşleşmesinde de anlaşılabilir.

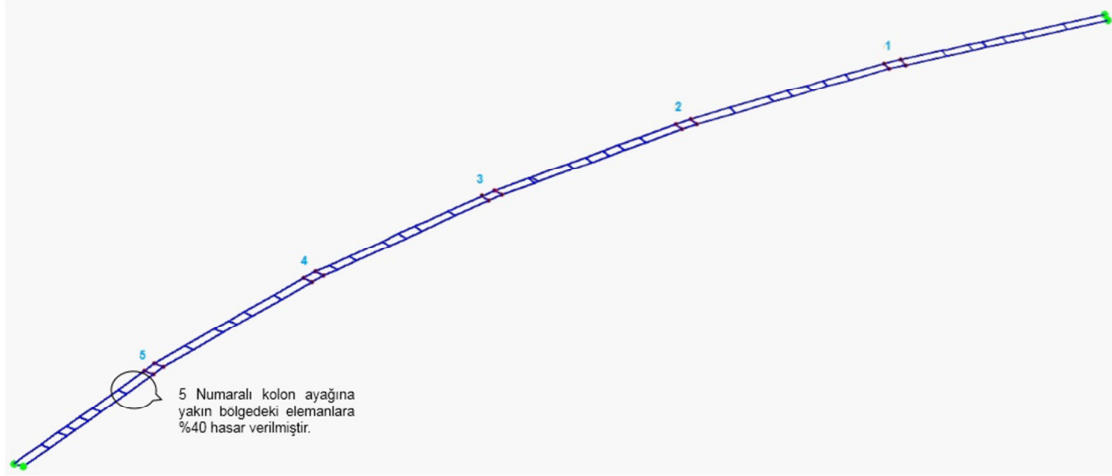
Güncellenen eşdeğer köprü modeline ilişkin bu tablolar <http://kisi.deu.edu.tr/ozgur.ozcelik> web sitesinde Hasar Senaryosu – 2 dosyalı altında paylaşılmıştır. Tablolar içinde güncellenmiş değerler kalın-italik fontlarla gösterilmiştir.

### 10.2.3 Hasar Senaryosu - 3

Köprü'nün 5. kolon ayağının komşuluğunda bulunan elemanlara lokal hasar uygulanmıştır (Şekil 112). Eşdeğer köprü modelinde bu bölgede bulunan 6 adet elemanın elastisite modülü %40 mertebesinde azaltılarak hasar senaryosu tanımlanmıştır. Referans model kullanılarak güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Hasar senaryosu-3 bir açıklığın bazı elemanlarını hedef aldığı için lokal bir hasar senaryosu olarak düşünülebilir.



HASAR SENARYOSU-3



Şekil 112. FEDEASLab eşdeğer giriş modeli için Hasar senaryosu - 3

Hasar senaryosu - 3 için elde edilen güncelleme sonuçları Tablo 28'de sunulmuştur.

Tablo 28. Hasar senaryosu - 3 için model güncelleme sonuçları

Nümerik ve Deneysel Mod Numaraları	[a]	[b]	[c]	[d]	[e]	[f]	[g]
7-1	2.456	<b>2.454</b>	<b>2.454</b>	0.0	0.0	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
8-2	2.553	<b>2.552</b>	<b>2.552</b>	0.0	0.0	<b>0.996</b>	<b>1.000</b>
11-4	2.977	<b>2.977</b>	<b>2.977</b>	0.0	0.0	<b>0.999</b>	<b>1.000</b>
12-6	3.286	<b>3.069</b>	<b>3.069</b>	7.0	0.0	<b>0.997</b>	<b>1.000</b>
23-12	6.505	<b>6.505</b>	<b>6.505</b>	0.0	0.0	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
a) <b>Referans</b> Sayısal Modele İlişkin Frekanslar [Hz] b) <b>Hasar Verilen Modelin</b> Frekansları [Hz] c) <b>Güncelleme Sonrası</b> Bulunan Frekans Değerleri [Hz] d) <b>Güncelleme Öncesi</b> Sayısal Model ile Deneysel <b>Frekanslar Arasındaki Fark</b> [%] e) <b>Güncelleme Sonrası</b> Sayısal Model ile Deneysel <b>Frekanslar Arasındaki Fark</b> [%] f) <b>Güncelleme Öncesi</b> Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki <b>MAC Değerleri</b> g) <b>Güncelleme Sonrası</b> Sayısal ile Deneysel Modlar Arasındaki <b>MAC Değerleri</b>							

Duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği ile referans modelin modal parametreleri, hasarlı modelin modal parametreleri ile bire bir eşleşecek şekilde güncellenmiştir. Daha önemli olan ise güncelleme sonucunda hasarın varlığı, yeri ve miktarı tam olarak belirlenebilmiştir. Bu durum frekansların ve mod şekillerinin birebir eşleşmesinde de anlaşılabilir.

Güncellenen eşdeğer köprü modeline ilişkin bu tablolar <http://kisi.deu.edu.tr/ozgur.ozcelik> web sitesinde Hasar Senaryosu – 3 dosyalı altında paylaşılmıştır. Tablolar içinde güncellenmiş değerler kalın-italik fontlarla gösterilmiştir.

## 11. DANIŞMAN/RAPORTÖR GÖRÜŞLERİ DOĞRULTUSUNDA HAZIRLANAN EK DEĞERLENDİRME

### 11.1 Danışman/Raportör Görüşü – 1

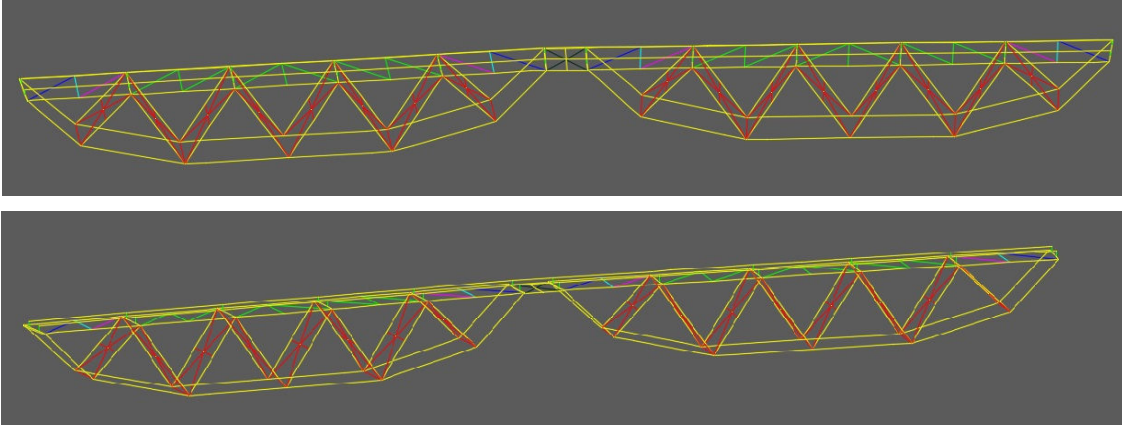
“Diğer taraftan 10. Bölümde ortaya konan 3 adet sayısal uygulama örnekleri (köprü modelinden oldukça basit yapılar) ve daha sonrasında Bölüm 10.2’de FEDEASLab’de modellenmiş **eşdeğer giriş modeli** üzerinde ortaya konan hasar modellerinde yerel hasarın yerinin başarılı bir şekilde tespit edildiği belirtilmiştir. Bu uygulamalar her ne kadar başarılı bir şekilde sonuçlanmış ise de gerçek köprü modellerinde önerilen yöntemin yerel hasarın mertebesini ve yerini aynı başarı düzeyinde ortaya çıkarabileceği net değildir. Dolayısıyla yukardaki paragrafta da belirtildiği üzere, en azından 2 acıklı referans köprü üstyapısı modeline uygulanmak üzere bir adet yerel hasar senaryosu oluşturularak önerilen yöntemin güvenilirliği ortaya konmalıdır.”

#### 11.1.1 Danışman/Raportör Görüşü – 1 için Hazırlanan Ek Değerlendirme

Bu konudaki danışman/raportörün yaptığı kritik yerinde ve haklı bir kritik olarak değerlendirilmiştir. Ancak, yine de eşdeğer köprü modelinin kullanılması gerektiği konusunda sonuç raporda yaptığımız değerlendirmeler de haklı değerlendirmelerdir. Literatürde eşdeğer modeller kullanılarak model güncellenmesi yapılan birçok yayın mevcuttur. Bu yayınlardan önemli bir tanesi için bkz. “Mottershead, J. E., Link, M., & Friswell, M. I. (2011). The sensitivity method in finite element model updating: a tutorial. Mechanical systems and signal processing, 25(7), 2275-2296. (pg. 2292, son paragraf)”. Künyesi paylaşılan bu yayında da eşdeğer modelin kullanılmasının gerekliliği olarak sonlu elemanlar modelinin çok detaylı olduğu dolayısıyla da optimizasyon aşamasında **Jacobian matrisinin ill-conditioned** olduğu detayı yatmaktadır. Bizim örneğimiz olan köprü modelinde de eşdeğer köprü modeli kullanılarak hasar tespitinin yapılmasının temel nedeni budur. Ancak yine de danışmanın daha küçük bir köprü modeli kullanılarak yerel hasarın tespit edilip edilememesine ilişkin bir çalışmanın yapılması gerekliliği haklı bir değerlendirmedir. Bu nedenle aşağıdaki analiz gerçekleştirilmiştir:

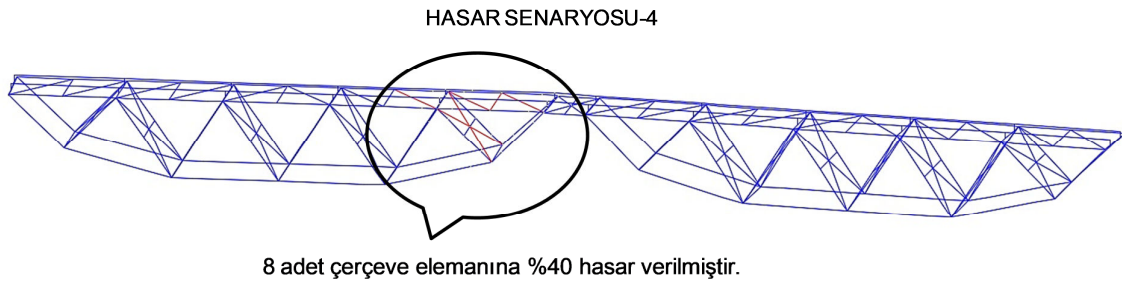
Toplamda 483 adet çerçeve ve 24 adet yay elemandan oluşan iki açıklıklı referans FEDEASLab köprü modeli oluşturulmuştur. Modal parametreler üzerinde etkili olan köprü elemanlarının belirlenebilmesi açısından model üzerinde sensitivite (duyarlılık) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, Şekil 113’ te yer alan kırmızı, mavi, cyan, magenta, açık yeşil ve koyu yeşil renkli elemanlarda oluşabilecek hasarın (-y düzleminde bulunan ve köprü

kafesinin iki yanal makasını birbirine bağlayan elemanlar), modal parametre sonuçları üzerinde etkili olduğu, sarı renkli elemanlarda oluşabilecek hasarın ise sonuçlar üzerinde bir etkisinin olmadığı bulgulanmıştır. Şekil 113' teki farklı renkler farklı enkesite sahip elemanları temsil etmektedir.



Şekil 113. Köprü modal parametreleri üzerinde etkisi olan elemanların gösterimi

Duyarlılık çalışmaları dikkate alınarak, modelin Eşme tarafından 1. kolon ayağının komşuluğunda bulunan 8 adet çerçeve elemanın elastisite modülü %40 mertebesinde azaltılmış ve yerel hasar senaryosu oluşturulmuştur (Şekil 114). Daha az sayıda elemanın hasarlanması, köprünün modal parametreleri üzerinde anlamlı bir değişim oluşturmamaktadır, bu nedenle bahsi geçen sayıda elemana hasar verilmek zorunda kalmıştır. Hasar Senaryosu-4 bir açıklığın bazı elemanlarını hedef aldığı için yerel bir hasar senaryosu olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 114. İki açıklıklı referans FEDEASLab köprü modeli için hasar senaryosu

Köprü modelinin çok sayıda elemandan oluşması ve referans model ile hasarlı modele ait modal parametreler arasındaki **farkın az olması** güncelleme sırasında yakınsama problemi doğurmakla birlikte yakınsama kriterleri ile oynanarak yakınsak bir sonuca ulaşılmıştır. Hasar senaryosu - 4 için elde edilen güncelleme sonuçları Tablo 29'de sunulmuştur.

Tablo 29. Hasar senaryosu - 4 için model güncelleme sonuçları

Nümerik Mod Numaraları	[a]	[b]	[c]	[d]	[e]	[f]	[g]
1	2.850	<b>2.850</b>	<b>2.850</b>	0.00	0.00	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
2	3.582	<b>2.517</b>	<b>2.517</b>	42.31	0.00	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
3	4.684	<b>4.674</b>	<b>4.674</b>	0.21	0.00	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
4	7.122	<b>7.091</b>	<b>7.091</b>	0.44	0.00	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
5	8.658	<b>8.598</b>	<b>8.598</b>	0.70	0.00	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
6	10.433	<b>10.270</b>	<b>10.270</b>	1.59	0.00	<b>0.950</b>	<b>1.000</b>
7	10.799	<b>10.787</b>	<b>10.787</b>	0.11	0.00	<b>0.000</b>	<b>1.000</b>

a) **Referans** Sayısal Modele İlişkin Frekanslar [Hz]  
b) **Hasar Verilen Modelin** Frekansları [Hz]  
c) **Güncelleme Sonrası** Bulunan Frekans Değerleri [Hz]  
d) **Güncelleme Öncesi** Sayısal Model ile Hasarlı Modelin **Frekansları Arasındaki Fark** [%]  
e) **Güncelleme Sonrası** Sayısal Model ile Hasarlı Modelin **Frekansları Arasındaki Fark** [%]  
f) **Güncelleme Öncesi** Sayısal ile Hasarlı Modelin Modları Arasındaki **MAC Değerleri**  
g) **Güncelleme Sonrası** Sayısal ile Hasarlı Modelin Modları Arasındaki **MAC Değerleri**

Duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği ile referans modelin modal parametreleri, hasarlı modelin modal parametreleri ile bire bir eşleşecek şekilde güncellenebilmiştir. Daha önemli olan ise güncelleme sonucunda hasarın varlığı, yeri ve miktarı tam olarak belirlenebilmiştir. Bu durum frekansların ve mod şekillerinin birebir eşleşmesinde de anlaşılabilir.

Güncellenen eşdeğer köprü modeline ilişkin bu tablolar <http://kisi.deu.edu.tr/ozgur.ozcelik> web sitesinde **Hasar Senaryosu – 4** dosyası altında paylaşılmıştır. Tablolar içinde güncellenmiş değerler kalın fontlarla gösterilmiştir. Hasar verilen 8 elemanda %40'lık elastisite modülündeki azalma başarı ile tespit edilebilmiştir. Ancak burada tekrar vurgulanmakta fayda vardır: örneğin tek bir elemanda (son derece yerel bir hasar durumu) gerçekleşen hasar modal parametrelerde (doğal titreşim frekansları ve mod şekilleri) neredeyse hiçbir değişiklik yapmamakta dolayısıyla modal parametreler arasındaki farkın (artık fonksiyonu) minimizasyonuna dayanan bu yöntem ile tespit edilememektedir. **Bu nedenle, yerel hasarın tespiti için modal parametrelerde elle tutulur bir değişikliğin gerçekleşmesi gerekmektedir.** Bu köprü özelliğinde mümkün olan en küçük hasar durumu 8 elemanın hasar görmesi ile elde edilebilmiştir.

## 11.2 Danışman/Raportör Görüşü – 2

“Sonuç raporunun 9.4 başlıklı Hasar Senaryoları maddesinde 2 açıklıklı referans model üzerinde 3 farklı hasar senaryosu denenmiştir. Bunların 1. ve 3. sunde köprü ayaklarını temsil eden eşdeğer yay elemanlarının rijitlikleri azaltılarak yapıya hasar verildiği öngörülmüştür. 2. hasar senaryosunda ise tüm çelik elemanların kesitleri aynı oranda

azaltılmıştır. Bu hasar senaryoları daha ziyade yaygın hasar durumunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan 2. hasar senaryosu gerçekte karşılaşılabilecek bir hasar durumunu temsil etmekten oldukça uzaktır. Çalışmaya konu olan çelik köprülerde özellikle yerel hasarın yerinin tespit edilmesi köprü güvenliği için çok önemlidir. Dolayısıyla, en azından 9. Bölümde oluşturulan 2 açıklıklı referans modelde birkaç çelik elemanın rijitliği azaltılarak yerel bir hasar senaryosu oluşturulup ortaya konulan yöntemin uygulanabilirliğinin ve güvenilirliğinin araştırılması gerekmektedir.”

### 11.2.1 Danışman/Raportör Görüşü – 2 için Hazırlanan Ek Değerlendirme

Bu konudaki danışman/raportörün yaptığı kritik yerinde ve haklı bir kritik olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle aşağıda verilen ek analizler rapora dâhil edilmiştir. Ancak, yine de burada vurgulanmasında fayda olduğu düşünülmektedir: İlk sonuç raporda sunulan DMG3 senaryosunun mesnet hasarını temsil eden (sadece Eşme tarafındaki mesnetlerde gelişen hasır) yerel bir hasar durumudur ve bunun doğru tespiti geliştirilen yöntem ile yapılabilmektedir.

Aşağıdaki analiz **ARTEMIS DamageID Modülü** ile yapılmış ve danışman/raportörün talebi doğrultusundan sadece eleman hasarını dikkate alan bir senaryodur. Bir önceki bölümde verilen analizler ise (11.1) proje kapsamında geliştirilen ve projenin temel hedefi olan yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

11.1.1 Bölümünde detayları verilen hasar senaryosu (Hasar Senaryosu-4) CSI-Bridge modeli üzerinde de uygulanmıştır. Dikkate edilirse ARTEMIS DamageID modülü ve optimizasyon tabanlı hasar tespit yöntemi (Bölüm 11.1) için **aynı hasar senaryosu** kullanılmaktadır. Bunun bir başka nedeni de her iki yöntemin sonuçlarının kıyaslayabilmektir. ARTEMIS DamageID modülünün kullanılması aşamasında kullanılan prosedürel adımlar **Sonuç Raporunun 9.4 Bölümünde** verilen adımlar ile tamamen aynıdır.

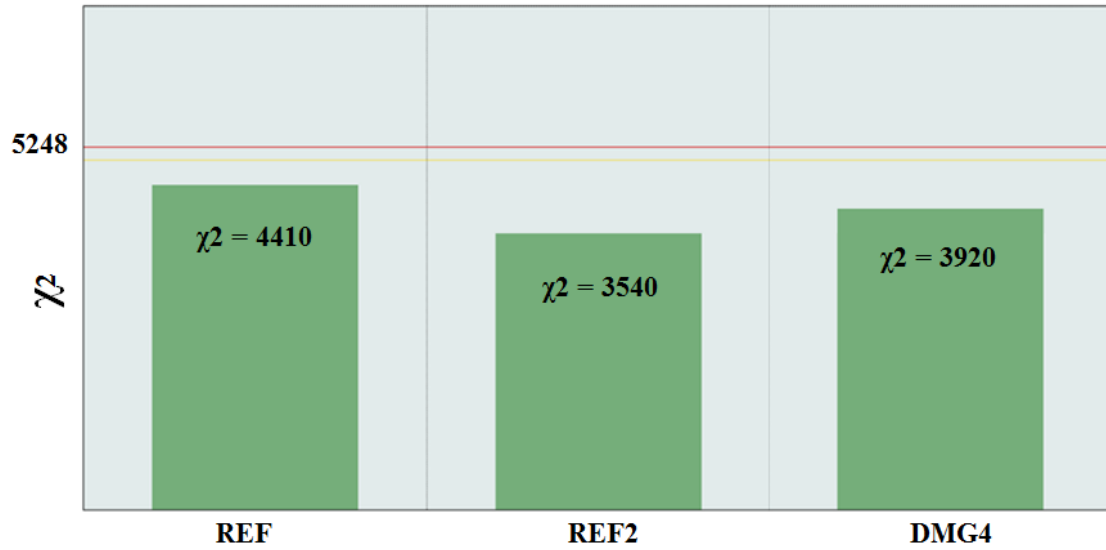
Sayısal modelden elde edilen çıktı ivme verisi kullanılarak ARTEMIS® programında sistem tanımlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Köprünün 8 adet elemanında elastisite modülünde %40 mertebesinde azaltma uygulamak şeklinde oluşturulan Hasar Senaryosu-4'e ilişkin elde edilen frekans değerlerinin referans modeldeki frekans değerleri ile ilgili kıyaslama sonuçları Tablo 30'da sunulmuştur. Bu spesifik 8 adet elemanın seçilmesinin nedeni duyarlılık analizinin modal analiz sonuçlarına bu elemanların etki ettiğini belirlenmiş olmasındandır.

Köprünün çok fazla elemandan meydana gelmiş olması sebebiyle açıklığın sınırlı sayıdaki elemanında (yerel hasar senaryosu) hedef alınan hasar köprünün modal parametrelerinde çok sınırlı bir değişim oluşturmaktadır.

Tablo 30. Frekans kıyaslaması

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
	REF	DMG-4
1	1.807	1.806
2	2.385	2.380
3	3.314	3.314
4	4.989	4.981
5	6.382	6.363
6	7.333	7.333
7	7.591	7.589
8	7.737	7.737
9	8.170	8.168

Tablo 30'da gösterilen çok küçük değişimler Şekil 115'te görüldüğü üzere ARTEMIS® hasar tespit modulünden elde edilen Hasar Senaryosu-4'e ilişkin  $\chi^2$  değerinin, hasarı gösteren eşik değerinin altında kalmasına yol açmış ve ***bu yerel hasarın tespit edilememesine neden olmuştur.***



Şekil 115. DMG-4 hasar senaryosu grafiği

### 11.3. Danışman/Raportör Görüşü – 3

Proje sonuç raporunda; köprünün bulunduğu konum, coğrafi şartlar ve lojistik olanaklar köprüye istenildiği zaman gidilmesi konusunda bazı zorluklar olduğu belirtilerek mümkün olan en uygun zamanlarda köprüye gidilebilmiş; bu durumda da ilkbahar ve yaz ölçümleri için oluşan sıcaklık değerleri birbirine yakın olmuştur. Benzer şekilde kış ölçümleri ise çok soğuk zamanlara denk getirilememiştir. Proje ekibi çalışma şartlarının zorluğu ve tehlikeli durumlar oluşturmasını gerekçe göstererek böyle bir tavizin verilmesinin zorunlu olduğunu

vurgulamışlardır. Sonuç olarak da kış ayında alınan ölçümlerde hava sıcaklığı 10.86 derece, ilkbahar ve yaz aylarında alınan ölçüler sırayla 32.18 ve 36.44 derece olduğu belirtilmiştir. Proje ekibinin de kabul ettiği üzere ilkbahar ve yaz aylarında alınan ölçümlerde hava sıcaklığı çok benzer olduğundan ölçümler üzerinde herhangi bir etkiye neden olmadığından bu ölçümlerden sadece ilkbahar ölçümleri kullanılarak kış ölçümleriyle karşılaştırılarak sadece yaklaşık 22 derecelik bir sıcaklık farkının neden olduğu etkiler hakkında bir yargıya varılmıştır. Bu durum ise çalışmanın 1. Ayağının özgün değerini oldukça sınırlamıştır (2. Sonuç maddesi).

### **11.3.1 Danışman/Raportör Görüşü – 3 için Hazırlanan Ek Değerlendirme**

Köprünü bulunduğu coğrafik konum gerçekten zordur. Köprüye kara ulaşımı son derece zordur. Bu nedenle köprünün bulunduğu yere raylar üzerinden özel araçlarla gidilmiştir. Ayrıca, köprü hali hazırda çalışan bir köprü olduğu için köprü trafiği kablolu (ölçüm sırasında kablolar raylar üzerine yayılmaktadır) bir veri toplama sistemi ile köprü üzerinde ölçüm alınmasını hem zaman olara kısıtlamakta hem de güvenlik açısından ciddi ölçüde zorlaştırmaktadır. Ancak tüm bu zorluklara ve proje başvuru metninde köprüye 3 kez gidileceği söylenmesine rağmen köprüye 4 farklı zamanda 5 kez gidilmiştir (ilki keşif amaçlı diğer üçü ise farklı mevsimsel koşullarda ölçüm almak için. Not: ilk ölçüm için köprüye iki farklı gün gidilmiştir). Bir başka deyişle planlanan ve taahhüt edilen sayının üzerinde köprü ziyaret edilmiştir, köprü incelenmiş ve ölçümler alınmıştır.

Köprünün bulunduğu bölgede telefonlar çalışmamakta, iletişim kanalları kısıtlı olmaktadır, plansız gelişen bir tren seferinin tehlike yaratabileceği korkusu tüm testler boyunca yaşanmıştır. Gerekli izinlerin alınması, TCDD'nin teknik bir grubu görevlendirmesi gibi üçüncü şahısların dâhil olduğu süreçler köprüye daha sık gidilmesini zorlaştırmıştır.

Kış aylarında günler kısalmakta, ayrıca köprüye ulaşım en erken saat gündüz saati 9:45-10:00 saatlerini bulmaktadır (İzmir'den yola çıkılmakta ve Alaşehir'e varıldıktan sonra özel araçlarla köprü mahaline ulaşılmaktadır). Bize eşlik edecek TCDD çalışanları tam olarak mesai saati bitiminde Alaşehir'de bulunmak istemektedir. Bu durumda köprüden saat 16:00 gibi ayrılmak durumunda kalınmaktadır. Bu faktörler kış ölçümlerini tekrarlamayı zorlaştırmıştır. Ayrıca, ilk sonuç raporda da belirtildiği üzere ilkbahar ölçümlerde gerçekleşen ortalama sıcaklığın kış ve yaz ölçümlerinin daha ortasında bir sıcaklık değerinde yapılmış olması sonuçları etkilemeyecektir. Çünkü **en büyük sıcaklık farkının geliştiği kış ve yaz ölçümleri arasında bile modal parametrelerde kayda değer bir değişim/fark izlenmemiştir**. Dolayısıyla, doğal olarak sıcaklık açısından daha küçük farkların olacağı ilkbahar ve yaz ölçümlerinde de aynı durum oluşacaktır. Ayrıca, **köprünün açıklıkları basit mesnetli kirişler** gibidir, dolayısıyla sıcaklık etkisi ile açıklıklar serbestçe hareket

edebilmektedir. Bu durum **modal parametrelerin sıcaklık değişimine karşı duyarsız** kılmaktadır.

Titreşim tabanlı yapı sağlığının izlenmesi alanında çok sık baş vurulan yayınların sahibi araştırmacılar tarafından yapılan bir çalışmada (Reynders, E., Teughels, A., & De Roeck, G. (2010). Finite element model updating and structural damage identification using OMAX data. Mechanical Systems and Signal Processing, 24(5), 1306-1323, sayfa: 1311), bir köprüden uzun dönemli sürekli ölçümler alınmış ve modal parametrelerin ortamsal sıcaklık durumuna bağlı değişimi incelenmiştir. Bu çalışmadan çıkan en önemli sonuçlardan birisi de köprünün modal parameterlerinin sıcaklık etkisi ile değişmediğidir. Bu durumun aksini belirten çalışmalar da literatürde mevcuttur; ancak bizim çalışmamızda da bahsi geçen yayına paralel bir sonuç çıkmıştır.

Daha ideal bir durum aslında köprünün **sürekli olarak hem ortam sıcaklığı hem de titreşim** verileri açısından izlenmesidir. Ancak, proje kurgulanırken bu şekilde kurgulanmamış, kesikli zamanlarda (süreksiz) ölçüm alınacağı belirtilmiştir ve proje bütçesi ve süresi de bu durum için oluşturulmuştur. Kesikli ölçüm alınması beraberinde mevsimsel sıcaklık ölçümleri açısından doğal olarak belirsizlikler içermektedir. Proje kabul edilirken bu durumların da dikkate alınmış olduğu düşünülmektedir. Tekrar altının çizilmesi burada gerekli olabilir: köprüye taahhüt edilen miktardan daha fazla ziyarette bulunulmuştur; ancak kontrol edilemeyen nedenlerle sıcaklıklar bu şekilde gelişmiştir.

#### **11.4. Danışman/Raportör Görüşü – 4**

“İP-6'da seçilen demiryolu köprüsü üzerinden dinamik verinin toplanması kapsamında saha çalışmasının üç farklı ortamsal sıcaklık durumuna denk gelecek şekilde üç kez tekrarlanacağı proje önerisinde belirtilmiştir. Sıcaklık etkisinin yapıların modal parametrelerinde önemli değişiklikler arattığı ve bu etkinin 199+325 demiryolu köprüsünün Uşak sınırları içerisinde karasal bir alanda bulunması nedeniyle köprünün modal karakteristiklerinde önemli farklılıklar oluşturacağı proje önerisinde öngörülmüştür. Sıcaklık değişiminin incelenen YSİ yöntemine olan etkisinin, bu yöntemin köprü kontrollerinde standart bir uygulama bulması için mutlaka incelenmesi gerektiği proje önerisinde belirtilmiştir. Ayrıca, ölçüm alınacak mevsimsel şartların mümkün olduğunca farklı sıcaklık koşulları sağlamasına özen gösterileceği vurgulanmıştır. Bunun için gerek **bölgenin yerlilerinden elde edilecek gözlemsel bilgiden** gerekse de söz konusu alana en yakın meteorolojik istasyonlardan toplanmış olan sıcaklık değişimleri verilerinden yararlanılacağı proje önerisinde belirtilmesine rağmen proje çalışmasında herhangi bir gözlemsel ya da meteoroloji istasyonu veriğine dayalı bir bilgiden faydalanılmamıştır.”



#### 11.4.1 Danışman/Raportör Görüşü – 4 için Hazırlanan Ek Değerlendirme

Proje metni yazıldığında köprünün koşulları hakkında bir bilgimiz yoktu. Proje çıktıktan sonra köprü keşfe gidildiğinde köprü üzerinde çalışmanın zor olduğu fark edildi. Oraya gidildiğinde karşımıza çıkan durumlar ile proje önerisinde belirtilen ideal durum arasında bir optimizasyon/dengeleme yapılması gerektiği ortaya çıktı. Bir başka deyişle mevcut olanaklar ile verili sınır koşulları arasında bir dengeleme/realizasyon yapılması gerekliliği doğdu. Örneğin, meteorolojik değerlendirme sonucunda Şubat ayında gidilmesi gerektiği ortaya çıksaydı bile bu durumda da çok ciddi can güvenliği riskleri oluşacaktı. Dolayısıyla köprüye gidilecek tarihler belirlenirken, sınır durumlar ve ideal durum arasında bir denge gözetilmeye çalışıldı.

Köprüye en yakın meteorolojik istasyon Güney Köy'de mevcuttur. Bu köy köprüye 5-6 km mesafededir ve istasyonun kurulduğu alan düzlük bir bölgedir. Köprünün topoğrafik konumu ise son derece dağlıktır ve doğal olarak da bir vadi üzerine kurulmuştur. Mesafe ve topoğrafik durumun farklı olması nedeniyle meteorolojik verinin kullanılması tercih edilmemiş, bunun yerine **köprünün bakımından sorumlu teknik ekibin görüşlerine dayanan** (bu kişilerden bir tanesi bölgeye çok yakın bir yerde doğmuş–büyümüş bir kişidir) gözlemsel veriye göre hareket edilmesi tercihinde bulunulmuştur. Bu görüşler doğrultusunda köprü testlerinin **Aralık (kış), Mayıs (bahar) ve Temmuz (yaz)** aylarında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Aralık ayı kış ayı olarak dikkate alınmıştır. Ancak, kontrol edilemeyen durumlara bağlı olarak (yıllara bağlı mevsimsel belirsizlikler) seçilen bu tarihlerde ortalama hava sıcaklıkları raporda belirtildiği gibi gelişmiştir. Ortalama hava sıcaklıklarının ne olacağı kontrolümüz dışında gelişen durumlardır; ancak elimizden gelenin en iyi yapılmış ve samimiyetle süreç ve sonuçlar raporda aktarılmıştır.

#### 11.5. Danışman/Raportör Görüşü – 5

“Proje çıktılarını doğrudan kullanması muhtemel kurum olan TCDD'e şu ana kadar herhangi bir sunum ya da bilgilendirme yapıp yapılmadığı hakkında sonuç raporunda bir bilgiye rastlanmamıştır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda böyle bir sunumun planlandığı anlaşılmaktadır. Proje kapsamında elde edilen bulguların TCDD ilgilileri ile paylaşılmasında büyük önem vardır. Ayrıca, proje kapsamında elde edilen bulguların bir kısmının 4SMAR Konferansında sunulduğu anlaşılmaktadır. Çalışma konusu ile konferans konusu uyumludur.”

#### 11.5.1 Danışman/Raportör Görüşü – 5 için Hazırlanan Ek Değerlendirme

Danışman/raportürün de fark ettiği gibi TCDD 3. Bölge Müdürlüğüne sunum yapılması planlanmaktaydı ve bu da sonuç raporda belirtilmişti (bknz. Sonuç Rapor, 12. Bölüm); ancak yapılacak olan sunumun mümkün olduğunca kapsayıcı ve çok sayıda kişiye ulaşması için planlama ve hazırlıklar sürmekteydi. Ancak danışmanın bu konudaki kritiği son derece haklı

bir kritik olarak değerlendirilmiş ve bu sunumun yapılması için talep yazısı TCDD 3. Bölge Müdürlüğüne 06.02.2018 tarihi itibari ile gönderilmiştir (talep yazısı için bkz. EK-2). Talep yazısında sunumun **en geç 15 Mart 2018 tarihine kadar yapılması gerektiği** de ifade edilmiştir. TCDD'den gelecek cevaba göre bu sunum derhal gerçekleştirilecektir.

#### **11.6. Danışman/Raportör Görüşü – 6**

“Proje önerisinde, proje yürütücüsü olan Prof.Dr. Serap Kahraman'ın projenin tüm İP'lerinde görev alacağı belirtilmiştir. Fakat Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi'ne sunulan ve hakem değerlendirmesinde olan makalenin yazarları arasında proje yürütücüsünün isminin olmaması anlaşılır bir durum değildir. Bu durumun proje ekibi tarafından netliğe kavuşturulması gerekmektedir.”

##### **11.6.1 Danışman/Raportör Görüşü – 6 için Hazırlanan Ek Değerlendirme**

EK-2'de yüksek lisans öğrencisi Özgür Girgin hakkında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 22.01.2016 tarihli Yönetim Kurulu kararı sunulmuştur. Bu kararda öğrencinin **tez danışmanının tek başına** Doç. Dr. Özgür Özçelik olduğu ve **yüksek lisans tez konusunun** İngilizce başlığının " Operational Modal Analysis and **Finite Element Model Updating** of an In-service Steel Railroad Bridge” olduğu bunun Türkçe tercümesinin ise “Mevcut Bir Çelik Demiryolu Köprüsünün Operasyonel Modal Analizi ve **Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi**” olduğu karara bağlanmıştır. Öğrencinin tez başlığına ilişkin bilgiler raportör görüşüne sunulmuş olan ilk sonuç raporda da belirtilmiştir (bkz. ilk sonuç rapor Bölüm 14, (ii). madde). D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 23.5.2017 tarihli Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Uygulama Yönetmeliğine göre bir öğrencinin ikinci bir tez danışmanının olabilmesi için ikinci öğretim üyesinin farklı bir anabilim dalından olması zorunluluğu vardır. Proje yürütücüsü ve araştırmacı aynı anabilim dalında (İnşaat ABD) oldukları için ikisi birlikte eş-danışmanlık yapamamaktadırlar.

Öğrencinin tez başlığı **sonlu elemanlar modeli güncellenmesi** ile ilgilidir ve bu güncellemeyi **deneme-yanılma (trial-error)** şeklinde çok daha basit düzeyde gerçekleştirmektedir. Oysaki projenin temel konusunu “duyarlılık tabanlı optimizasyon probleminin çözümü çerçevesinde bir objektif fonksiyonunun minimize edilmesiyle sonlu elemanlar modelinin güncellenmesi” oluşturmaktadır (bkz. Başvuru Formu 3. Bölüm, Alt Başlık: Duyarlılık Tabanlı Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi). Deneme-yanılma yaklaşımı optimizasyon temelli model güncellenmesi yaklaşımından tamamen farklıdır. Bahsi geçen yayında proje verilerinden yararlanılmış; ancak bu veriler deneme-yanılma yöntemi kullanılarak sayısal modelin güncellenmesi işlemi için kullanılmıştır. Yayının ve öğrencinin tezinin asıl hedefi deneme-yanılma yöntemi ile model kalibrasyonudur.

Deneme-yanılma yönteminin kullanıldığı (proje teklifinin hedefleri arasında değildir), lisansüstü tez danışmanının proje araştırmacılarından Doç. Dr. Özgür Özçelik'in olduğu bir yüksek lisans tezinden yayın üretilmesi proje yönetici Prof. Dr. Serap Kahraman tarafından son derece makul bir durum olarak değerlendirilmiştir. Yazılmış olan bu yayından **proje yürütücüsünün kesinlikle haberi vardır** (bknz. Proje Sonuç Raporu 13. Bölüm (iii). madde) ve zaten **kendisine yayının “Teşekkürler” kısmında teşekkür de edilmiştir**. Öğrenci bu projeden burs da almıştır ve burs alan bu öğrencinin araştırmacının öğrencisi olduğu öğrencinin bursiyer olarak TÜBİTAK tarafından kabul edilmiş olduğu tarihten beri bellidir. **Proje başvuru metninde de belirtildiği üzere (bknz. Başvuru Formu Bölüm 6.1 Proje Yönetimi) çalıştırılması planlanan yüksek lisans öğrencisi Doç. Dr. Özgür Özçelik'in yüksek lisans öğrencisi olan EK'de diğer bilgileri verilen bu öğrencidir.**

Proje araştırmacılarında olan üçüncü yazar spesifik olarak FEDEASLab ile modelin geliştirilmesi aşamasında katkı koymuştur (köprü ayaklarının yaylar ile temsil edilmesi için gerekli model konsepti bu araştırmacı tarafından geliştirilmiştir) ve bu nedenle de makalede ismi bulunmaktadır. **Tüm proje çalışanlarının isminin** olduğu ve sadece modal parametre tahmini ve bunun sıcaklık değişiminden etkilenip etkilenmemesi durumunun incelendiği **daha kapsamlı bir çalışma hali hazırda hakem değerlendirmesindedir** (bknz. 13. Bölüm (ii). madde). Bu son makalede deneme-yanılma tabanlı bir model güncelleme/kalibrasyon çalışması bulunmamaktadır. Çünkü bu konu yüksek lisans öğrencisinin sadece danışman hocası ile yürütmekte olduğu bir çalışmadır ve tezinin temel hedeflerinden biri budur.

## 12. SONUÇLAR

Proje kapsamında yapılan çalışmalar ve ilgili temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

(i) 199+325 demiryolu çelik köprüsü üzerinde farklı mevsimsel koşullarda üç defa ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Bunlar 04.12.2015 tarihinde yapılan kış dönemi, 16.05.2016 tarihinde yapılan bahar dönemi ve 28.07.2016 tarihlerinde yapılan yaz dönemi testleridir. Köprü üzerinden toplanan veri EFDD ve SSI-DATA sistem tanımlama yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Köprüye ait yedisi enine, altısı burulma, üçü düşey ve biri boyuna olmak üzere toplamda 17 adet köprü modu tahmin edilmiştir. Köprünün enine (lateral) yöndeki modları DC-3.5 Hz frekans aralığında oluşurken 3.5 Hz ile 7 Hz arasında burulma ağırlıklı modlar oluşmuştur. Köprüye ait tek boyuna yöndeki mod 3.8 Hz mertebesinde oluşmuştur. Köprü düşey modları ise 7 ile 8.5 Hz frekans aralığında bulunmaktadır. Her üç ölçümde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

(ii) Köprü ortamsal titreşim testlerine ait ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde, bahar (32.18 °C) ve yaz (36.44 °C) testlerinin birbirine yakın ortalama sıcaklık değerlerine sahip olduğu, kış (10.86 °C) testinin ise diğer testlerden 20-25°C daha düşük ortalama sıcaklık değerinde yapıldığı anlaşılabilir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak köprü modlarına ilişkin frekans değerlerindeki azalmanın köprünün 1. düşey modu hariç tutularak sınırlı miktarda olduğu gözlemlenmektedir. Söz konusu frekans değerlerindeki sınırlı değişimin ölçülemeyen gürültü, toplanan verilerin sonlu sayısı (bu durum tahmin değerlerinde bias yaratmaktadır), doğrusal olmayan etkiler gibi modal parametre tahmin belirsizlikleri sınır değerleri içinde kaldığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, sıcaklık etkisi 199+325 demiryolu çelik köprüsünün modal parametreleri üzerinde belirgin bir değişiklik ortaya çıkarmadığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle de sıcaklık değişiminin, bu köprü özelinde, sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı hasar tahmin yöntemine etkisi olmayacaktır. Köprünün ön başlangıç modeli güncellenirken kış ölçümleri kullanılmıştır. Bir başka deyişle köprünün referans modeli kış ölçümlerinden elde edilen modal parametreler kullanılarak elde edilmiştir.

(iii) Köprünün SAP2000, CSI-Bridge ve FEDEASLab sayısal modelleri oluşturulmuştur. İlk iki sayısal model üçüncü modele göre çok daha gelişkin özelliktedir. CSI-Bridge modeli ise modelleme detayları açısından en gelişmiş modeldir. CSI-Bridge modeli tahmin edilmiş modal parametreler kullanılarak deneme-yanılma yöntemi ile güncellenmiştir. Böylece köprünün mevcut durumunu yansıtan detaylı bir sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Bu model kullanılarak gerçekleştirilen hasar senaryolarına ARTEMIS® hasar tahmin yöntemi uygulanmış ve hasarın oluşup oluşmadığı tahmin edilmiştir. Model tabanlı olmayan bu yöntemin hasarı tespit ettiği ancak lokal hasarlara daha duyarlı olduğu bulgulanmıştır. Yöntem sadece hasarın olup olmadığını tahmin etmekte ancak hasarın yeri ve miktarı hakkında bilgi vermemektedir.

(iv) Sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı hasar tahmin yöntemi MATLAB® tabanlı sonlu elemanlar programı olan FEDEASLab ve MATLAB® birleştirilerek programlanmıştır. FEDEASLab programına köprü modellemesi için gerekli olan yay elemanları eklenmiş ve optimizasyon yöntemi olarak MATLAB®' te mevcut olan Gauss-Newton algoritması trust-region yöntemiyle beraber kullanılmıştır. Bu yöntem önce tamamen sayısal üç farklı modele uygulanmış ve yöntemin doğru programlanıp programlanmadığı anlaşılmıştır. Bu sayısal modeller üzerinde parametrik çalışmalar yapılarak yaygın ve lokal hasarların tespitinin yapılıp yapılamadığı anlaşılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalarda ortaya çıkan temel sonuçlar şöyledir: (1) Hasar miktarının tam tespiti için hasar parametrelerinin her bir eleman için tanımlanması gerekmektedir, (2) hasar parametrelerinin çakışması durumunda, spesifik bir

elemandaki hasarın komşu elemanlara da yayıldığı izlenmiştir ve (3) tüm elemanları güncellemek yerine sadece hasar görmüş olması muhtemel elemanların güncellenmesine izin vermenin oluşmuş olan hasarın tahminini iyileştirdiği görülmüştür.

(v) Yüz yılı aşkın süredir hizmet vermekte olan Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik kafes demiryolu köprüsüne proje kapsamında programlanan hasar tahmin yöntemi uygulanmıştır. Bunun için FEDEASLab ortamında köprünün eşdeğer bir modeli oluşturulmuştur. Eşdeğer model gerçek köprünün modal parametreleri kullanılarak güncellenmiş ve köprünün referans modeli elde edilmiştir. Referans model kullanılarak üç farklı hasar senaryosu çalışılmıştır. Bu hasar senaryoları iki adet lokal ve bir adet de yaygın hasar durumunu temsil edecek nitelikte seçilmiştir. Yöntem her hasar durumu için başarılı bir şekilde çalışmıştır. Bir başka deyişle farklı hasar durumları için hasarın varlığı, yeri ve miktarı tam olarak bulunabilmiştir.

(EK SONUÇ - vi) Yerel hasarın tespiti (sınırlı sayıda elemanın hasar gördüğü senaryo) açısından optimizasyon tabanlı hasar tespit yöntemi, ARTEMIS DamageID modülüne göre çok daha başarılı sonuçlar vermiştir. Buradan çıkan bir başka sonuç ise yerel hasar durumunun tespit edilebilmesi için hasarın yapının global dinamik özelliklerini değiştirecek seviyede gerçekleşmiş olması gerekliliğidir.

Projede yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda hâlen düzenli olarak yapılmakta olan köprü kontrollerinin sayısallaşabilir/modellenebilir yöntemlerle iyileştirilmesi için önemli bir adım atılmıştır. Uygulanan yöntem ile düzenli olarak yapılmakta olan ve kontrolü yapan kişinin sübjektif değerlendirmesine bağlı olan köprü kontrollerinin daha objektif sayısal yöntemlerle yapılması doğrultusunda bir yöntem geliştirilmiştir. Referans modelleri elde edilen köprülerin, hasar veren olayları takiben tekrar modal parametreleri elde edilebilir ve bu değerler hasarsız durumu/köprünün belli bir anındaki durumunu yansıtan referans modelin güncellenmesi için kullanılabilir. Güncelleme sonucu modelde ortaya çıkan değişiklikler köprüde meydana gelmiş olması muhtemel hasarın yerini ve miktarını gösterebilir. Bu bilgi ile yerinde yapılan gözlemsel değerlendirmeler birleştirilerek köprünün sağlığı hakkında daha gerçekçi ve nesnel bir bilgiye ulaşılabilir.

Sonlu elemanlar modeli güncellemesi tabanlı hasar tahmin yöntemi yeni bir yöntem değildir ve literatürde çokça çalışılmış ve çalışılmaktadır. Bu proje kapsamında yöntem sıfırdan mevcut araçlar kullanılarak programlanmış ve dolayısıyla yöntemin tüm unsurlarına hâkim olunmuştur. Bu durum ileride yapılacak inşaat mühendisliği yapılarının yapı sağlığının

izlenmesinde kullanılacak ticari bir programın geliştirilmesinin de önünü açmaktadır. Bu durum hali hazırda mevcut dış kaynaklı bu tür programların yerelleştirilmesi için önemli bir fırsat sunmaktadır.

Proje iş paketlerinin gerçekleştirme durumunun takip edilmesini kolaylaştırmak anlamında Tablo 31 düzenlenmiştir. Bu tabloda proje önerisinde belirtilen iş paketlerinin proje çalışmaları kapsamında hangi bölümlerde detaylandırıldığı belirtilmiştir.

Tablo 31. Proje önerisinde sunulmuş proje iş paketlerini ve gerçekleştirme durumlarını gösterir tablo

İP No	Başarı Ölçütü (% , sayı , ifade , vb.)	Rapor Metninde Anlatıldığı Kısım	Projenin Başarısındaki Önemi (%)	Başarıma Durumu
1	Sistem tanımlama yöntemlerinin programlanmış olması	Sistem tanımlama yöntemleri programlanmış sunulmuştur	5	Bölüm 3.2
2	Programların satın alınmış olması	ARTEMIS® "Damage Detection" modülü satın alınmış ve çalışmada kullanılmıştır	5	Bölüm 9
3	Ön FEDEASLAB modelinin gerçekleştirilmiş olması	Ön FEDEASLab modeli oluşturulmuştur	10	Bölüm 8.3
4	Sonlu Elemanlar Modeli Güncellemesi tabanlı YSI tekniğinin programlanmış olması	Duyarlık tabanlı sonlu elemanlar model güncelleme algoritması MATLAB® ortamında programlanmıştır	15	Bölüm 3.1
5	Ön ADINA (CSI Bridge) modelinin gerçekleştirilmiş olması	On CSI Bridge modeli oluşturulmuştur. Proje kapsamında ADINA yerine CSI Bridge programı alınmış ve kullanılmıştır. <u>Bu değişiklikle ilgili TÜBİTAK'tan onay alınmıştır (bkz. talep yazışması Sayı: 73873223/161.1.1/E.59866)</u>	10	Bölüm 8.4
6	Köprü üzerinden üç farklı zamanda ölçümün alınmış ve modal parametrelerin belirlenmiş olması	Köprü üzerinde üç farklı zamanda ölçüm alınmış ve modal parametreleri belirlenmiştir.	15	Bölüm 6 ve Bölüm 7
7	FEDEASLab modelinin YSI tekniği çerçevesinde güncellenerek referans modellerin elde edilmiş ve ADINA (CSI Bridge) modelinin FEDEASLab modeli kullanılarak kalibre edilmiş olması	FEDEASLab modeli duyarlık tabanlı sonlu elemanlar model güncelleme işlemiyle güncellenmiştir..	15	Bölüm 10.2
8	Farklı hasar senaryolarının modellenmiş olması ve referans FEDEASLab modellenin YSI tekniği çerçevesinde güncellenmelerinin yapılmış olması	3 Farklı hasar senaryosu kullanılarak referans (güncellenmiş) FEDEASLab modeli duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncelleme tekniği ile güncellenmiş, hasarın varlığı, yeri ve miktarı belirlenmiştir.	15	Bölüm 10.2
9	Sonuç raporunun yazılmış olması	Sonuç raporu yazılıp sunulmuştur.	10	Hazırlanmış olan rapor.

Tablo 32'de proje önerisinde karşılaşılabilecek muhtemel risk tablosu paylaşılmıştır.

Tablo 32. Proje önerisinde hazırlanmış olan risk tablosu

İP No	En Önemli Risk(ler)	B Planı
6	Sıcaklık etkisinin çalışılması için köprü üzerinden ölçümler üç farklı zamanda alınacaktır. İki ölçüm arasında geçen süre içinde köprüde yapısal bir hasarın gerçekleşmemiş olduğu kabulü yapılacaktır. Aksi durumda yapısal bir hasarın modal parametrelere olan etkisinin sıcaklık etkisinden kaynaklı olacağı kamaşmasına düşülebilir.	Yapısal bir hasarın olup olmadığı konusunda TCDD'nin yıl içerisinde yapmakta olduğu gözlemsel kontrollerden bilgi sahibi olunacaktır. Eğer ölçüm aralıkları içine denk düşen kayda geçmiş yapısal bir hasar oluşursa, yapısal bir hasarın gerçekleşmediği bir aralık içerisinde yerinde ölçümler tekrarlanacak ve ortamsal sıcaklık etkisi hasarlı durum referans alınarak incelenecektir. Eğer köprü üzerinde kayda geçen bir hasar oluşursa, köprü için şanssız ama proje hedefleri için son derece değerli bir durum oluşacaktır. Bu durumda YSI tabanlı hasar tespiti için simülasyon verilerinin yanında gerçek veriler de kullanılıp yöntemin gerçek hasar altındaki etkinliği araştırılabilecektir. Kayda geçmeyen bir hasar olup olmadığı ise üç farklı dönemde yerinde gerçekleştirilecek olan ölçümler sırasında köprü son derece dikkatlice incelenip, iki ölçüm arasında köprünün hasar görüp görmediğine karar verilecek.
7	Güncellenmiş FEDEASLab modeli kullanılarak ADINA (CSI-Bridge) modelinin kalibrasyonu: modeller arasındaki çeşitli farklılıklar nedeniyle güncellenmiş FEDEASLab fiziksel parametreleri ile ADINA (CSI-Bridge) parametreleri arasında bir eşdeğerliğin oluşturulmaması	Bu durumda, hasar senaryoları FEDEASLab modeli kullanılarak gerçekleştirilecek ve FEDEASLab simülasyon verisi kullanılarak YSI tabanlı hasar tespiti çalışmaları yapılacaktır. FEDEASLab programı ADINA (CSI-Bridge) kadar gerçekçi modelleme kapasitesine sahip olmasa da kesit azalması, malzemenin mekanik özelliklerinde oluşan değişimlere bağlı hasarı rahatlıkla modelleyecek kapasiteye sahiptir.

6. iş paketine ilişkin risk proje süresince gelişmemiştir, dolayısıyla bu risk ilişkin B planı da uygulanmamıştır. Ancak, 7. iş paketine ilişkin öneride belirtilen riske benzer bir risk gelişmiştir. Burada FEDEASLab ve ADINA modelleri (ADINA yerine CSI Bridge modeli geliştirilmiştir) arasında bir geçişkenliğin olacağı, güncellenecek olan FEDEASLab modelinin parametrelerinin CSI-Bridge modeline aktarılacağı ve nihayetinde CSI-Bridge modelinin güncelleneceği belirtilmiştir. Bunun yapılamaması durumunda ise güncellenmenin sadece FEDEASLab modeli kullanılarak yapılacağı belirtilmiştir. Proje kapsamında da aslında bu riske ilişkin B planı kullanılmıştır. CSI-Bridge modeli ve FEDEASLab'de oluşturulmuş eşdeğer giriş modeli arasında model detayları açısından ciddi farklar vardır, dolayısıyla da bu iki model arasında parametre geçişkenliğinin olması mümkün olmamıştır.

Proje önerisinde ön görülememiş bir başka durum ise güncelleme için kullanılan FEDEASLab modelinin basitleştirilerek eşdeğer köprü modeli haline getirilmesidir. Bu durum da yine bir zorunluluk olarak proje çalışmaları ilerledikçe netleşmiştir. Duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar güncellenmesi tekniği için kullanılan optimizasyon algoritması çok fazla hesaplama kaynağı gerektirmekte (computin power/resource), bu nedenle de eldeki imkanlarla bu gerçekleştirilememiş ve eşdeğer köprü modeli güncellenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda daha kapsamlı bir modelin güncellenmesi için paralel hesap yapabilen süper bilgisayarlar kullanılabilir.

### 13. GELECEKTE YAPILMASI PLANLANAN ÇALIŞMALAR

Yöntemin sayısal hasar senaryolarını başarılı olarak tespit ettiği çalışma kapsamında görülmüştür; ancak gerçek bir yapıda gelişecek hasarın tespiti için kullanılıp kullanılmayacağı konusu halen cevaplanması gereken bir sorudur. Bunun araştırılması için

kısa vadede yeni bir proje teklifi verilmesi konusunda çalışmalara başlanmıştır. Yine kısa vadede TCDD 3. Bölge Müdürlüğüne bir sunum yapılacak ve çalışmadan çıkan sonuçlar özetlenecektir; böylece geliştirilen bu yöntemin rutin kontrollere alternatif bir çerçeve sunduğu konusunda görünürlük kazandırılacak ve yaygın etkisinin ilgili kuruluşlar nezdinde artması sağlanmaya çalışılacaktır.

Orta vadede ise proje kapsamında geliştirilen sonlu elemanlar modeli güncellemesi tabanlı hasar tespit yönteminin ticarileştirilmesi amacıyla DEÜ DEPARK bünyesinde bir şirket kurulması hedeflenmektedir. Geliştirilen program diğer sonlu elemanlar modelleri ile birlikte çalışabilir hale getirilerek kullanımı etkinleştirilecek, yaygınlaştırılacak ve kolaylaştırılacaktır (program şu an sadece FEDEASLab ile çalışabilmektedir). Yöntemin sadece inşaat mühendisliği yapılarına değil örneğin rüzgâr türbini kulelerinde meydana gelebilecek hasarın tespiti için uygulanabilirliği de değerlendirilmek istenmektedir.

#### **14. SAĞLANAN ALTYAPI OLANAKLARININ BİLİM ALANLARINDAKİ KATKILARI**

Bu proje kapsamında elde edilen altyapı kullanılarak aşağıdaki yayınlar gerçekleştirilmiştir:

(i) Ozcelik, O., Yormaz, D., Girgin, O., Yucel, U., Durmazgezer, E., Amaddeo, C. ve Kahraman, S. 2017. "Output-Only System Identification on 199+325 Steel Railway Bridge", The fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Structures (SMAR), 13-15 September, Zurich.

(ii) Ozcelik, O., Yormaz, D., Amaddeo, C., Kahraman, S., Girgin, O. 2017. "System Identification of a Six-span Steel Railway Bridge using Ambient Vibration Data at Different Temperature Conditions", Journal of Performance of Constructed Facilities, *hakem değerlendirmesinde*.

(iii) Ozcelik, O., Girgin, O. ve Amaddeo, C. 2017. "199+325 Çelik Demiryolu Köprüsünün Sistem Tanımlama Sonuçları ve Sonlu Elemanlar Modelinin Kalibrasyonu", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, *hakem değerlendirmesinde*.

#### **15. SAĞLANAN ALTYAPI OLANAKLARININ EĞİTİM ALANLARINDAKİ KATKILARI**

Proje kapsamında ödül almış bir lisans bitirme tezi ve bir doktora tezi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bir yüksek lisans tezi de yazım aşamasındadır.



(i) Yormaz, D. 2017. “Bir Demiryolu Çelik Köprüsünün Mevcut Durumunun Hasarsız Yöntemlerle Belirlenmesi ve Yapı Sağlığının İzlenmesi”, DEÜ, İzmir. (Doktora tezi)

(ii) Girgin, O. 2017. “Operational Modal Analysis and Finite Element Model Updating of an In-service Steel Railroad Bridge”, DEÜ, İzmir, (Yüksek Lisans tezi).

(iii) Demirkıran, M. E., Eryılmaz, G. 2016. “199+325 Çelik Demiryolu Köprüsünün Farklı Sıcaklık Koşulları Altında Dinamik Ölçüm ve Parametrelerinin Belirlenmesi”, DEÜ, İzmir (Lisans bitirme tezi, dönem birincisi seçilen tez çalışması).

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 214M029 projesi kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca TCDD Genel Müdürlüğü ve TCDD 3. Bölge Müdürlüğü çalışmanın gerçekleşmesinde desteklerini esirgememiştir. TÜBİTAK, TCDD Genel Müdürlüğü ve TCDD 3. Bölge Müdürlüğüne verdikleri destek için sonsuz teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca deneysel çalışmalarda gösterdikleri özverili çalışmalardan dolayı Umut Yücel, Erkan Durmazgezer, Muhammed Emin Demirkıran, Üstün Can Meriç, Onur Başkaya, Dilan Çankal, Oğuzcan Şahin'e, Çek Cumhuriyeti'nden ERASMUS Staj Değişim Hareketliliği kapsamında İzmir Ekonomi Üniversitesine gelen Libor Bartáček'e ve proje süresince desteklerinden ötürü Prof. Dr. Türkey Baran'a ve Doç. Dr. İ. Serkan Mısıra teşekkürü bir borç biliriz.

### KAYNAKLAR

Akar, V. 2009. “Köprüler bilgisi ders notları”, TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Akın, T. 2012. “Structural monitoring and analysis of steel truss railroad bridges”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Alampalli, S. 2000. “Effects of testing, analysis, damage, and environment on modal parameters”, Mechanical Systems and Signal Processing, 14(1), 63-74.

Allemang, R. J. and Brown, D. L. 1982. “A correlation coefficient for modal vector analysis”, Presented at the 1st International Modal Analysis Conference (IMAC I), Bethel, CT, USA.

Altunışık, A. C., Bayraktar, A., Sevim, B. ve Ateş, Ş. 2011a. “Ambient vibration based seismic evaluation of isolated gülburnu highway bridge”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(11), 1496-1510.

Altunışık, A. C., Bayraktar, A. ve Sevim, B. 2011b. "Output-only system identification of posttensioned segmental concrete highway bridges", *Journal of Bridge Engineering*, 16(2), 259-266.

Altunışık, A. C., Bayraktar, A. ve Özdemir, H. 2012. "Seismic safety assessment of eynel highway steel bridge using ambient vibration measurements", *Smart Structures and Systems*, 10(2), 131-154.

ARTEMIS® Extractor Pro Software, 2010. Structural vibration solutions, Aalborg, Denmark.

Basseville, M., Abdelghani, M. and Benveniste, A. 2000. "Subspace-based fault detection algorithms for vibration monitoring", *Automatica*, 36(1), 101-109.

Basseville, M., Mevel, L. and Goursat, M. 2004. "Statistical model-based damage detection and localization: subspace-based residuals and damage-to-noise sensitivity ratios", *Journal of Sound and Vibration*, 275(3), 769-794.

Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker T., Domaniç, A. ve Taş, Y. 2009. "Vibration characteristics of Kömürhan highway bridge constructed with balanced cantilever method", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(2), 90-99.

Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B. ve Özşahin, T. Ş. 2014. "Environmental effects on the dynamic characteristics of the gülburnu highway bridge", *Civil Engineering and Environmental Systems*, 31(4), 347-366.

Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P. 2001. "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition", *Smart Materials and Structures*, 10, 441-445.

Clinton, J. F., Bradford, S. C., Heaton, T. H., Favela, J. 2006. "The observed wander of the natural frequencies in a structure", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), 237-257.

CSI SAP2000 V. "8, 2002. "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA (2010).

Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., Shevitz, D. W. 1996. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems for changes in their vibration characteristics", Los Alamos National Laboratory, Technical Report LA-13070-MS.

Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. 1996. "A summary review on vibration-based damage identification methods", Los Alamos National Laboratory, Engineering Analysis Group.

Doebbling, S.W., Farrar, C.R. ve Prime, M.B. 1998. "A summary review of vibration-based damage identification methods", *The Shock and Vibration Digest*, 30(2), 91-105.

Doehler, M. ve Hille, F. 2014. "Subspace-based damage detection on steel frame structure under changing excitation", *Structural Health Monitoring*, 5, 167-174.

Doehler, M., Hille, F., Mevel, L. ve Rücker, W. (2014). Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 bridge. *Engineering Structures*, 69, 183-193.

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. and James, G.H. 1997. "System identification from ambient vibration measurements on a bridge", *Journal of Sound and Vibration*, 205(1), 1-18.

Filippou, F. C., Constantinides, M. 2004. "FEDEASLab Getting Started Guide and Simulation Examples", Technical Report, NEESgrid.

Fox, R. and Kapoor, M. 1968. "Rate of Change of Eigenvalues and Eigenvectors", *AIAA Journal*, 6(12), 2426-2429.

Friswell, M. I., Mottershead, J. E. 1995. *FE model updating in structural dynamics*. Boston: Klumer Academic Publisher.

He, X., Moaveni, B., Conte, J. P., Elgamal and A., Masri, S. F. 2008, "Modal identification study of vincent thomas bridge using simulated wind-induced ambient vibration data", *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(5), 373-388.

Holland, J. 1975. "Adaptation in Natural and Artificial Systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence", University of Michigan Press, 183p.

Huth, O., Feltrin, G., Maeck, J., Kilic, N., Motavalli, M. 2005. "Damage identification using modal data: experiences on prestressed concrete bridge", *Journal of Structural Engineering*, 131(12), 1898-1910.

James, G. H. III, Carne, T. G, Lauffer, J. P. 1993. "The Natural Excitation Technique for Modal Parameters Extraction from Operating Wind Turbines", SAND92-1666, UC-261, Sandia National Laboratories, Sandia, N.M.

Juang, J. N., Pappa, R. S. 1985. "An eigensystem realization algorithm for modal parameters identification and model reduction", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 8, 620-627.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. 1983. "Optimization by simulated annealing", *Science*, 220(4598), 671-680.

Magalhas, F., Cunha, A., Caetano, E. 2012. "Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 212-228.

Manolakis, G. M., Ingle, V. K. and Kogon, S. M. 2000. *Statistical and adaptive signal processing*. New York: McGraw Hill.

MathWorks, Inc. MATLAB®, 2005. *The language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7 (Vol. 9)*. MathWorks.

Moaveni, B. 2007. "System identification of civil structures", *Doktora Tezi*, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, California.



Moaveni, B., Conte, J. P., Hemez, F. M. 2009. "Uncertainty and sensitivity analysis of damage identification results obtained using finite element model updating", *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(5), 320-334.

Mottershead, J. E., Friswell, M. I. 2011. "The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(7), 2275-2296.

Nocedal, J. and Wright, S.J. 1999. "*Numerical Optimization*. Springer", New York, USA, 664 p.

Peeters, B. ve De Roeck, G. 2001. "Stochastic system identification for operational modal analysis: A review", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123(4), 659-667.

Reynders, A., De Roeck, D., Bakir, P. G., Sauvage, C. 2007. "Damage identification on the Tilff Bridge by vibration monitoring using optical fiber strain sensors", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 133(2), 185-193.

Rytter, A. 1993. "Vibration based inspection of civil engineering structures", Ph.D. dissertation, Department of Building and Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.

SAP2000, 1998. *Integrated finite element analysis and design of structures*, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.

Siriwardane, S. C. 2015. "Vibration measurement-based simple technique for damage detection of truss bridges": A case study. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 4, 50-58.

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., Czarnecki J.J. 2003. "A review on structural health monitoring literature: 1996-2001", Los Alamos National Laboratory, Technical Report annex to SAMCO summer academy, Cambridge



Spyrakos, C.C., Raftoyiannis, I.G. ve Ermopoulos, J.C. 2004. "Condition assessment and retrofit of a historic steel-truss railway bridge, *Journal of Constructional Steel Research*, 60(8), 1213–1225.

Teughles, A. ve De Roeck, G. 2004. "Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating", *Journal of Sound and Vibration*, 278(3), 589-610.

Teughels, A., De Roeck, G., Suykens, A.K. 2003. "Global Optimization by Coupled Local Minimizers and its application to FE model Updating", *Computers and Structures*, 81(24-25), 2337-2351.

Van Overschee, P. ve De Moor, B. 1996. *Subspace Identification for Linear Systems*. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.



# RAPÖRTER YORUMLARINA İLİŞKİN HAZIRLANAN EK BELGELER

-EKLER-



EK-1



T.C.  
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı

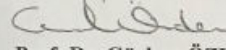


Sayı : 18518802/183  
Konu :

06.02.2018

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DEKANLIĞINA

Bölümümüz öğretim üyesi Prof. Dr. Serap Kahraman'ın yürütücüsü olduğu 214M029 numaralı "Demiryolu Köprülerinin Umumi ve Periyodik Kontrollerinin İyileştirilmesi için Çelik Bir Demiryolu Köprüsünün Yapı Sağlığının Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi Tekniği ile İzlenmesi" başlıklı TÜBİTAK proje çıktılarını sunmak üzere en geç 15 Mart 2018 tarihine kadar 3. Bölge Müdürlüğü'nde toplantı talebi ile ilgili dilekçesi ekte sunulmuştur.  
Gereği için bilgilerinize sunulur.

  
Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN  
BÖLÜM BAŞKANI

Ek: Dilekçe

Tınaztepe Kampüsü 35397 Buca-İZMİR  
Tel: (232) 3017005- (232) 3017007  
Fax: (232) 4531192- (232) 3017253



## EK-2

Sayı (Our Ref) : 37070631.050.02 -

Konu : Yönetim Kurulu Kararı

22.01.2016

Sn. ÖZGÜR GİRGİN

ŞEMS-İ TEBRİZ MAH.ŞEMS-İ TEBRİZ SOK. ŞEMS AP. NO:2/6 KARATAY

Enstitümüz Yönetim Kurulu'nun 15.01.2016 gün ve (2) sayılı toplantısında aşağıdaki (122) nolu karar alınmıştır.

Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

İnşaat Mühendisliği (Yapı Yüksek Lisans) öğrencisi ÖZGÜR GİRGİN ile ilgili Yüksek lisans tez konusu bildirim formu (Form 21-1) hakkında yapılan görüşmeler sonunda;

(i) İnşaat Mühendisliği (Yapı Yüksek Lisans) [2015901017](#) no'lu öğrencisi ÖZGÜR GİRGİN 'in Yüksek Lisans tez konusu ile danışmanının DEÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin 21/1 maddesi gereğince aşağıda belirtildiği şekilde olduğundan bilgi edinilmesine,

ADI-SOYADI : ÖZGÜR GİRGİN

DANIŞMANI : Doç.Dr. Özgür ÖZÇELİK

YÜKSEK LISANS TEZ KONUSU : Operational Modal Analysis and Finite Element Model Updating of an In-service Steel Railroad Bridge

YÜKSEK LISANS TEZ KONUSU

TERCÜMESİ : Mevcut Bir Çelik Demiryolu Köprüsünün Operasyonel Modal Analizi ve Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi

(ii) İnşaat Mühendisliği (Yapı Yüksek Lisans) [2015901017](#) no'lu öğrencisi ÖZGÜR GİRGİN'in CIE 5096 c M.Sc.SEMINAR (0+2) (Non-credit), CIE 5098 c M.Sc.RESEARCH (2+0) (Non-credit), CIE 5099 M.Sc.THESIS (Non-credit) dersini vermek ve danışmanlık görevini yürütmek üzere Doç.Dr. Özgür ÖZÇELİK'in 2847 sayılı kanunun 40/a maddesi uyarınca 2015/2016 Öğr.Yılı Bahar Yarıyılı başından itibaren (Tatil ayları dahil olmak üzere) Enstitümüzde görevlendirilmesine, konunun bilgi ve gereği için Rektörlük Makamına arzına,

(iii) Bu kararın bilgi ve gereği için Enstitümüz web sayfası kanalı ile öğrenciye, danışmanına ve ilgili Anabilim dalı Başkanlığına duyurulmasına ve konunun danışmanlık işlemleri için Özlük İşleri Şefliği'ne gönderilmesine karar verildi.

Prof.Dr. Ayşe OKUR (Müdür/Toplantı Başkanı)

Doç.Dr. Ümit Halis ERDOĞAN (Müdür Yardımcısı)

Serap BİÇİCİ (Raportör)

Doç.Dr. Hikmet SİVRİ GÖKMEN (Üye/Raporlu)

Prof.Dr. Levent ÇAVAŞ (Üye/Görevli)

Prof.Dr. Yeşim ZORAL (Üye)

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. SERAP KAHRAMAN
Proje No:	214M029
Proje Başlığı:	Demiryolu Köprülerinin Umumi Ve Periyodik Kontrollerinin İyileştirilmesi İçin Çelik Bir Demiryolu Köprüsünün Yapı Sağlığının Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi Tekniği İle İzlenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ÖZGÜR ÖZÇELİK, CARMEN AMADDEO
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	DOKUZ EYLÜL Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/04/2015 - 15/10/2017
Onaylanan Bütçe:	226200.0
Harcanan Bütçe:	159635.41
Öz:	<p>Ülkemizde demiryolu köprüleri gibi önemli yapılarda dâhi zorunlu periyodik muayeneler gözleme dayalı olarak sürdürülmektedir. Sübjektif (kontrolü yapan teknik elemanın kişisel gayretine ve deneyimine bağlı) karar esaslı biçimde sürdürülen köprü muayenelerinin, gizli (gözle görülemeyen) hasarları teşhis etmekte yetersiz kalacağı, ya da ancak hasar ileri boyutlara ulaşmış olduğunda görsel teşhis yapılabileceği açıktır.</p> <p>Sayısallaşabilir/modellenebilir niteliğiyle yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) yöntemleri, gözleme dayalı değerlendirme sürecinin geliştirecek, değerlendirme sürecini objektif ölçütlere bağlayacak ve olası gizli hasarların zamanında fark edilerek gerekli önlemlerin alınmasını sağlayacaktır. Uzun süredir hizmet vermekte olan demiryolu köprüleri muayenelerinde YSİ yöntemlerinin sürece dâhil edilmesi kritik ve önemli bir boşluğu dolduracaktır.</p> <p>Projenin temel amacı, önerilen sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı YSİ yönteminin Uşak ili sınırları içerisindeki Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan; yüz yılı aşkın süredir hizmet altındaki Basmane?Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik kafes demiryolu köprüsüne uygulanmasıdır. Böylece, hâlen düzenli olarak yapılmakta olan köprü kontrollerinin sayısallaşabilir yöntemlerle iyileştirilmesi; olası gizli hasarların belirlenmesi, yapının hasar görülebilirliği konusundaki mevcut belirsizliğin azaltılması hedeflenmiştir.</p> <p>Proje kapsamında duyarlık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesine dayanan bir hasar tahmin yöntemi çalışılmıştır. Bu yöntemde, yapının sonlu elemanlar modelinin fiziksel parametreleri ? dolayısıyla modal parametreleri, yapının farklı zamanlara denk gelen ve yerinde ölçümler ile tahmin edilen modal parametreleriyle eşleşmesi sağlanacak şekilde güncellenmektedir. Güncelleme işlemi modal parametrelerin bir fonksiyonu (artık fonksiyonu) olan objektif fonksiyonunun optimizasyon problemi çerçevesinde minimize edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Güncellenmiş olan bu modal parametreler hasarın varlığını, yerini ve miktarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Modal parametrelerin güncellenmesine dayanan bu yöntemde deneyler sırasındaki ortamsal sıcaklığın modal parametrelerin tahminine ve bunun hasar tahmin sonuçlarına olan etkisi de araştırılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Yapı Sağlığının İzlenmesi, Sonlu Elemanlar Modeli Güncellenmesi, Sıcaklık Etkisi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Output-Only System Identification of 199+325 Steel Railway Bridge (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),