

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERDE TİTREŞİM VERİLERİ
YARDIMIYLA OPTİMİZASYON TABANLI HASAR TESPİTİ

DOKTORA TEZİ

Sebahat ŞİMŞEK

AĞUSTOS 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERDE TİTREŞİM VERİLERİ
YARDIMIYLA OPTİMİZASYON TABANLI HASAR TESPİTİ**

SEBAHAT ŞİMŞEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 / 07 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 08 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Volkan KAHYA

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Tezin her aşamasında destek ve teşvikleri ile beni motive eden, öğrencisi olmaktan her zaman onur ve gurur duyacağım değerli hocam Prof. Dr. Volkan KAHYA'ya sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora tez izleme komitesi ve aynı zamanda jüri üyesi kıymetli hocalarım Prof. Dr. Ahmet BİRİNCİ ve Doç. Dr. Mustafa ASLAN'a eleştiri ve önerilerinden dolayı teşekkür ederim. Tez savunma sınavı jüri üyeliğini kabul eden değerli hocalarım Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK ve Prof. Dr. Murat YAYLACI'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından “Tabakalı Kompozit Yapılarda Modal Karakteristikler Yardımıyla Hasar Tespiti İçin Optimizasyon Tabanlı Bir Yöntem Geliştirilmesi (FBA-2021-9165)” isimli proje desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü KTÜ BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Akademik hayatım boyunca değerli görüşlerini ve bilgilerini benimle paylaşan, yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli Hocalarım Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU'na, Prof. Dr. Vedat TOĞAN'a, Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK'a, Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya ve Doç. Dr. Gökhan ADIYAMAN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında bana destek olan ve bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Ali Fuat GENÇ'e, Dr. Öğr. Üyesi Zeynep AKBULUT'a, Arş. Gör. Dr. Osman Tuğrul BAKİ'ye, Arş. Gör. Ümit BAHADIR'a, Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN'a, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT'a, Fatemeh MOSTOFİ ve Sara MOSTOFİ'ye ayrıca teşekkür etmek isterim.

Bugünlere gelmemde ellerinden gelen tüm imkanları sağlayan, özellikle hayatımın bu önemli aşamasında desteklerini eksik etmeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli aileme minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Bu çalışma boyunca desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen sevgili eşim Hüseyin ŞİMŞEK'e ve güler yüzüyle bana her zaman moral veren kızım Azra'ya sonsuz sevgilerimi sunarım. Bu çalışmanın, Ülkemizin bilimsel alanda ilerlemesine ve yeni yapılacak olan çalışmalara katkıda bulunmasını temenni ederim.

Sebahat ŞİMŞEK

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Tabakalı Kompozit Kirişlerde Titreşim Verileri Yardımıyla Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Volkan KAHYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/08/2024

Sebahat ŞİMŞEK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tabakalı Kompozitlerde Hasar Tespitine Yönelik Çalışmalar.....	5
1.2.1. Modal Karakteristiklerin Değişimine Dayalı Yöntemler	6
1.2.2. Model Güncellemeye Dayalı Yöntemler	10
1.2.3. Optimizasyon Tabanlı Yöntemler	11
1.2.4. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network, ANN) Tabelalı Yöntemler	18
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı	20
1.4. Anizotropik Elastisite Teorisinin Temel Denklemleri	21
1.4.1. Şekil Değiştirme ve Gerilme	22
1.4.2. Bünye Denklemleri	23
1.4.3. Elastik Simetri.....	24
1.4.4. Koordinat Dönüşümleri.....	26
1.5. Hasar Tespitinde Titreşim Tabanlı Yöntemler	31
1.5.1. Frekans Değişimine Dayalı Hasar İndeksi	31
1.5.2. Mod Şekillerinin Değişimine Dayalı Hasar İndeksi	32
1.5.3. Mod Şekli Eğrilik Değişimine Dayalı Hasar İndeksi.....	33
1.5.4. Esneklik Değişimine Dayalı Hasar İndeksi.....	34
1.6. Model İndirgeme	35
1.6.1. Guyan Yöntemi	35

1.6.2.	İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi (Improved Reduced System, IRS)	39
1.6.3.	Yinelemeli İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi (Iterated Improved Reduced System, IIRS).....	41
1.6.4.	Eşdeğer Sisteme İndirgeme ve Genişletme Tekniği (System Equivalent Reduction and Expansion Process, SEREP).....	41
1.7.	Optimizasyon Algoritmaları.....	44
1.7.1.	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA)	44
1.7.2.	Armoni Arama Algoritması (Harmony Search Algorithm, HSA)	45
1.7.3.	Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO)	48
1.7.4.	Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (Teaching- Learning -Based Optimization, TLBO).....	49
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	52
2.1.	Giriş.....	52
2.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	52
2.2.1.	Kinematik Bağlıntılar ve Bünye Denklemleri.....	52
2.2.2.	Hareket Denklemleri	55
2.2.3.	Eleman Rijitlik ve Kütle Matrisleri.....	57
2.2.4.	Sonlu Eleman Modelinde Hasar Tanımı	60
2.2.5.	Ölçüm Gürültüsü	60
2.3.	Deneysel Ölçümler	61
2.3.1.	Malzeme Deneyleri	61
2.3.2.	Titreşim Deneyleri	62
2.4.	ANSYS Sonlu Eleman Modeli.....	70
2.5.	Önerilen Hasar Tespit Yöntemi.....	71
3.	BULGULAR VE İRDELEME	76
3.1.	Giriş.....	76
3.2.	Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması ve Etkinliğinin Değerlendirilmesi	76
3.2.1.	Hasarsız Kompozit Kiriş	76
3.2.2.	Hasarlı Kompozit Kiriş	89
3.3.	Modal Eğrilik ve Esneklik Değişimine Dayalı Hasar Tespit Sonuçları.....	94
3.4.	Optimizasyona Dayalı Hasar Tespit Sonuçları	99
3.4.1.	HSA ile Hasar Tespiti Sonuçları	99

3.4.2.	TLBO ile Hasar Tespiti Sonuçları.....	113
3.4.3.	Genel Anizotropik Kompozit Kirişte Hasar Tespitinde Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması	126
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	133
5.	KAYNAKLAR	138
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

TABAKALI KOMPOZİT KİRİŞLERDE TİTREŞİM VERİLERİ YARDIMIYLA
OPTİMİZASYON TABANLI HASAR TESPİTİ

Sebahat ŞİMŞEK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Volkan KAHYA
2024, 149 Sayfa

Tabakalı kompozit kirişlerin yapısal taşıyıcı elemanlar olarak mühendislik uygulamalarının giderek artması, bu tür malzemelerin karmaşık hasar mekanizmalarını anlamayı ve zamanında hasar tespiti için güvenilir ve uygulanması kolay yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemlerinin güçlü hesaplama algoritmalarıyla birlikte bu tür malzemelerde kullanılması uygulama kolaylığı sebebiyle son derece iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Konuya yönelik araştırmaların yakın zamanda hız kazandığı; endüstriyel ve bilimsel alanda ilgi çektiği görülmektedir. Bununla beraber, titreşim verilerine dayalı hasar tespitinde optimizasyon yöntemlerinin kompozitlerdeki uygulamalarının sayısı hala sınırlıdır.

Tez kapsamında, optimizasyona dayalı sonlu eleman model güncelleme ile tabakalı kompozit kirişlerde hasar tespit probleminin çözümü için bir yöntem önerilmektedir. Sayısal modelleme için Poisson etkisinin yanı sıra uzama-eğilme, eğilme-burulma ve uzama-burulma etkileşimlerini hesaba katabilen 13 serbestlik dereceli kiriş sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Hasar, modelde rijitlik kaybı olarak tanımlanmıştır. Çözümde titreşim karakteristiklerine dayalı üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Çeşitli hasar senaryoları için farklı sınır koşulları ve tabaka dizilimlerine sahip kompozit kirişlerde yöntemin sayısal ve deneysel doğrulaması yapılmış ve etkinliği irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kompozit kiriş, Sonlu elemanlar metodu, Serbest titreşim, Hasar tespiti, Optimizasyon, Modal analiz

Ph.D. Thesis

SUMMARY

OPTIMISATION-BASED DAMAGE ASSESSMENT OF LAMINATED COMPOSITE
BEAMS USING VIBRATION DATA

Sebahat ŞİMŞEK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Volkan KAHYA
2024, 149 Pages

The increasing application of laminated composite beams as structural load-bearing elements necessitates the understanding of the complex damage mechanisms of such materials and the development of reliable and easy-to-apply methods for timely damage detection. The use of damage detection methods based on vibration data together with robust computational algorithms in such materials appears to be a very good option due to its ease of application. Recent research in this field has accelerated and garnered significant industrial and scientific interest worldwide. However, the practical application of optimization methods in vibration-based damage detection for composites remains limited.

This thesis proposes an effective method for solving the damage detection problem in laminated composite beams through optimization-based finite element model updating. A finite element model with thirteen degrees of freedom was developed for numerical modelling, capable of accounting for the Poisson effect as well as extension-bending, bending-torsion, and extension-torsion couplings. Damage was defined as a reduction in stiffness in the model. Three different objective functions based on vibration characteristics were used in the solution. The numerical and experimental validation of the method was conducted on composite beams with various damage scenarios, different boundary conditions, and layer configurations, and its effectiveness was evaluated.

Key Words: Laminated composite beam, Finite element method, Free vibration, Damage detection, Optimization, Modal analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Kompozit malzemelerde görülen çeşitli hasar tipleri	3
Şekil 2.	Kompozitlerde hasar tespitinde kullanılan bazı yöntemler	4
Şekil 3.	Sistem (x, y, z) ve eleman (X_1, X_2, X_3) koordinatları	27
Şekil 4.	Genetik Algoritma akış diyagramı	45
Şekil 5.	Tabakalı kompozit kirişin geometrisi ve koordinat takımının yerleşimi.....	53
Şekil 6.	Kompozit kirişte kinematik büyüklükler.....	53
Şekil 7.	13 serbestlik dereceli kiriş elemanı	58
Şekil 8.	Eğilme ve çekme test düzenekleri	63
Şekil 9.	Test kirişi plan ve kesit görünüşleri ile hasar senaryoları	64
Şekil 10.	Test kirişi ve ivmeölçer konumları.....	65
Şekil 11.	Hasarsız duruma ait EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	66
Şekil 12.	Hasar-1 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	67
Şekil 13.	Hasar-2 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	67
Şekil 14.	Hasar-3 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	68
Şekil 15.	Hasar-4 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	68
Şekil 16.	Hasar-5 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	69
Şekil 17.	Hasar-6 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli	69
Şekil 18.	SOLID186 katı elemanın geometrisi.....	70
Şekil 19.	Tabakalı kompozit kirişin temsili üç boyutlu sonlu eleman modelleri	71
Şekil 20.	Önerilen hasar tespit yönteminin akış şeması	72
Şekil 21.	[0/90] tabaka dizilimli kompozit kirişlerin ilk beş mod şekli ($L/h = 10$ ve $E_1/E_2 = 40$)	86
Şekil 22.	[45/-45] tabaka dizilimli kompozit kirişlerin ilk beş mod şekli ($L/h = 10$ ve $E_1/E_2 = 40$)	87
Şekil 23.	[0/45] tabaka dizilimli kompozit kirişlerin ilk beş mod şekli ($L/h = 10$ ve $E_1/E_2 = 40$)	88
Şekil 24.	Konsol kirişe ait deneysel, FSDT3, Ansys ilk üç mod şekilleri.....	93
Şekil 25.	Sayısal ve deneysel mod şekilleri arasındaki MAC grafikleri	95
Şekil 26.	Önerilen sonlu eleman sonuçlarına göre mod eğriliği değişiklikleri.....	96
Şekil 27.	Deneysel ölçümlere göre mod eğriliği değişiklikleri	97

Şekil 28. Önerilen sonlu eleman sonuçlarına göre esneklik değişiklikleri	98
Şekil 29. Deneysel ölçümlere göre esneklik değişiklikleri.....	98
Şekil 30. Parametrik çalışmada göz önüne alınan kirişlerin sonlu eleman modeli.....	100
Şekil 31. Ağırlık katsayılarının hasar tespit sonuçları üzerindeki etkisi	103
Şekil 32. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)	104
Şekil 33. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)	104
Şekil 34. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)	105
Şekil 35. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-4)	105
Şekil 36. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-5)	106
Şekil 37. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-6)	106
Şekil 38. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)	107
Şekil 39. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)	107
Şekil 40. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)	108
Şekil 41. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-4)	108
Şekil 42. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-5)	109
Şekil 43. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-6)	109
Şekil 44. TLBO ile hasar tespitinde incelenen örneklerle ait sonlu eleman modelleri.....	114
Şekil 45. Örnek 1 için TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması:	116
Şekil 46. Örnek 2 için TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması.....	117
Şekil 47. Örnek 3 için TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması.....	119
Şekil 48. Örnek 3'ün tekli hasar senaryosu için hasar tespit sonuçları.....	119
Şekil 49. Örnek 3'ün çoklu hasar senaryosu için hasar tespit sonuçları.....	120
Şekil 50. İki ucu ankastre $[30/50]_2$ kirişte TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması	121
Şekil 51. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları.....	122
Şekil 52. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları.....	123
Şekil 53. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)	127
Şekil 54. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)	127
Şekil 55. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)	128
Şekil 56. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)	128
Şekil 57. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)	129
Şekil 58. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)	129
Şekil 59. İki ucu ankastre $[30/50]_2$ kirişte dört farklı algoritma ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması (Hasar-3).....	130

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Test kirişi için malzeme deney sonuçları	63
Tablo 2. Deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar	65
Tablo 3. Hasar-3 için yakınsama analiz sonuçları	56
Tablo 4. İki ucu ankastre $[30/50]_2$ kompozit kirişin sonlu eleman yakınsama analizi	77
Tablo 5. Farklı sınır şartlarına sahip tabakalı kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_1 = \omega\sqrt{\rho L^4 / E_2 h^2}$)	78
Tablo 6. Farklı sınır şartlarına sahip tabakalı kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_2 = \sqrt{12}\Omega_1$)	78
Tablo 7. Farklı sınır koşullarına sahip $[\theta / -\theta]_s$ kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega\sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$)	79
Tablo 8. Farklı sınır koşullarına sahip $[\pm 45]_2$ kompozit kirişlerin ilk üç boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega\sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$)	79
Tablo 9. Farklı ortotropi oranları (E_1/E_2) için çeşitli sınır şartlarına sahip çapraz dizilimli kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega\sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$, $L/h = 10$)	81
Tablo 10. Farklı ortotropi oranları (E_1/E_2) için çeşitli sınır şartlarına sahip açılı dizilimli kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega\sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$, $L/h = 10$)	82
Tablo 11. Farklı ortotropi oranları (E_1/E_2) için çeşitli sınır şartlarına sahip simetrik olmayan dizilimli kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega\sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$, $L/h = 10$)	84
Tablo 12. Enine kenar çatlaklı izotropik konsol kiriş için yakınsama analizi sonuçları.....	90
Tablo 13. Delaminasyonlu kompozit kirişin ilk on doğal frekansı (Hz)	91
Tablo 14. Delaminasyonlu $[90/0]$ kompozit kirişin boyutsuz doğal frekansları	91
Tablo 15. Test kirişine ait hasar senaryoları	92
Tablo 16. Test kirişi için sayısal ve deneysel olarak elde edilen ilk üç frekansın karşılaştırılması.....	92
Tablo 17. Hasarsız iki ucu ankastre $[30/50]_2$ kiriş için yakınsama analizi sonuçları	100
Tablo 18. $[0/90/0]$ iki ucu ankastre kompozit kiriş için hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması.....	100
Tablo 19. $[0/90/0]$ konsol kompozit kiriş için hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması	101

Tablo 20. Parametrik çalışmada dikkate alınan hasar senaryoları	101
Tablo 21. Parametrik çalışma için tabaka malzeme özellikleri	101
Tablo 22. Konsol kirişte $F_1(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile hasar tespiti sonuçları	110
Tablo 23. Konsol kirişte $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile hasar tespiti sonuçları	110
Tablo 24. İki ucu ankastre kompozit kirişte $F_1(\mathbf{x})$ için hata indeksi	111
Tablo 25. İki ucu ankastre kompozit kirişte $F_2(\mathbf{x})$ için hata indeksi	112
Tablo 26. Konsol kompozit kirişte $F_1(\mathbf{x})$ için hata indeksi	112
Tablo 27. Konsol kompozit kiriş $F_2(\mathbf{x})$ için hata indeksi	112
Tablo 28. Örnek 1 için karşılaştırmalı hasar tespit sonuçları.....	115
Tablo 29. Örnek 2 için hasar tespitinin karşılaştırmalı sonuçları	117
Tablo 30. TLBO ile hasar tespitine yönelik parametrik çalışmada ele alınan hasar senaryoları	120
Tablo 31. İki ucu ankastre kompozit kirişte Hasar-3 için hasar tespit sonuçları	120
Tablo 32. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları ve bağıl hatalar	124
Tablo 33. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları ve bağıl hatalar	124
Tablo 34. İki ucu ankastre kiriş için hata indeksleri	125
Tablo 35. Konsol kiriş için hata indeksleri	125
Tablo 36. Optimizasyonda dikkate alınan başlangıç parametreleri	126
Tablo 37. İki ucu ankastre kompozit kirişte Hasar-3 için dört algoritma ile elde edilen hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması.....	131
Tablo 38. İki ucu ankastre kompozit kiriş için hata indekslerinin karşılaştırması.....	132
Tablo 39. Konsol kompozit kiriş için hata indekslerinin karşılaştırması.....	132

SEMBOLLER DİZİNİ

α	: Rijitlik kaybı katsayısı
ϵ	: Şekil değiştirme tansörü
θ	: Kiriş orta düzlemine ait normalin y eksenini etrafında dönmesi
λ, μ	: Láme sabitleri
ν_{ij}	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme tansörü
σ_{ii}	: Normal gerilme bileşeni
τ_{ij}	: Kayma gerilmesi bileşeni Φ^d
Φ^d	: Hasarlı duruma ait mod şekil vektörü
Φ^u	: Hasarsız duruma ait mod şekil vektörü
ψ	: Kiriş orta düzlemine ait normalin x eksenini etrafında dönmesi
ω	: Kirişin doğal frekansı
$(\cdot)_{,x}$	: x değişkenine göre türev
b	: Kiriş genişliği
C_{ij}	: Elastik sabitler
$\mathbf{C}$	: Malzeme katsayılar matrisi
$\bar{\mathbf{C}}$	: Dönüştürülmüş malzeme sabitleri
$\mathbf{C}_m$	: Eleman koordinatlarındaki elastik sabitler matrisi
E_i	: Elastisite modülü
$\mathbf{f}$	: Kuvvet vektörü
f^d	: Hasarlı duruma ait frekans değerleri
f^u	: Hasarsız duruma ait frekans değerleri
$F(\mathbf{x})$	: Amaç fonksiyonu
$\mathbf{F}$	: Esneklik matrisi
G_{ij}	: Kayma modülü

h	: Kiriş yüksekliği
$\mathbf{I}$	: Birim matris
K	: Kesmede düzeltme katsayısı
$\mathbf{K}$	: Sistem rijitlik matrisi
$\mathbf{K}^e$	: Eleman rijitlik matrisi
L	: Kiriş boyu
$\mathbf{M}$	: Sistem kütle matrisi
$\mathbf{M}^e$	: Eleman kütle matrisi
ne	: Sonlu eleman modelindeki eleman sayısı
nm	: Titreşim modu sayısı
np	: Serbestlik derecesi (koordinat) sayısı
$\mathbf{q}$	: Genelleştirilmiş koordinatları
t	: Zaman
$\mathbf{T}$	: Dönüşüm matrisi
T	: Kinetik enerji
u	: Düğüm noktasının yatay yer değiştirmesi
U	: Şekil değiştirme enerjisi
$\mathbf{U}$	: Sistem bilinmeyen yer değiştirme vektörü
$\mathbf{u}^e$	: Düğüm noktaları yer değiştirme vektörü
w	: Düğüm noktasının düşey yer değiştirmesi
W_i	: Ağırlık terimleri
x, y, z	: Sistem koordinat eksenleri
$X_{1,2,3}$	: Malzeme koordinat eksenleri
$\mathbf{X}$	: Yer değiştirme (bilinmeyenler) vektörü

Not: Bu listede verilmeyen bazı semboller metin içerisinde ilgili oldukları yerlerde tanımlanmışlardır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bilim ve teknolojiadaki ilerlemeler araştırmacıları yeni ve yenilikçi araştırma konularına yönlendirmiştir. Bu bağlamda kompozit malzemeler son yıllarda inşaat, makine, havacılık, denizcilik ve otomotiv endüstrilerinde giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır (Shariati vd., 2020; Wang vd., 2020; Wu & Habibi, 2021; Dai vd., 2021; Al-Furjan vd., 2021a, b; Guo vd., 2021). Kompozit malzemelerin kullanımı, mühendislere daha hafif, yüksek mukavemetli, korozyona dayanıklı, enerji tasarruflu ve sürdürülebilir yapılar inşa etme imkânı vermiştir. Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip olmalarıdır (Kessler vd., 2002; Montalvão vd., 2011; Montalvão vd., 2014; Huang vd., 2015). Bu sayede hem işçilikten tasarruf sağlanmakta hem de yapım süresi kısaltılabilmektedir. Ek olarak, taşıyıcı eleman kesit boyutları azaltılarak daha narin kesitler elde edilerek yapı ağırlığı azaltılmaktadır. Örneğin, kompozit güçlendirme sistemleri, betonarme yapıların taşıma kapasitesini artırırken yapıya çok büyük miktarda ek ağırlık gelmemektedir. Betonarme yapıların dayanıklılığını artırmak ve/veya güçlendirme çalışmaları için kullanılan kompozit levhalar/kumaşlar, bir yandan yapıların deprem ve diğer doğal afetlere karşı direncini artırırken, diğer taraftan korozyona karşı dayanıklılık sağlamaktadır. Bu ise yapıların ömrünü uzatarak bakım maliyetlerini azaltmaktadır.

Kompozit malzemelerin tasarım gereksinimlerine göre uyarlanabilme özelliği, mühendislik yapılarında büyük bir özgürlük sağlamaktadır. Bu malzemeler, bir yönde daha rijit, diğer yönde daha esnek hale getirilebilir, farklı şekil ve boyutlarda üretilebilir, karmaşık geometriler için özelleştirilebilir. Bu da estetik ve yapısal gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarımlar yapılmasına olanak tanır (Ghobadi, 2017). Ayrıca yalıtım özellikleri sayesinde ısı transferini azaltarak enerji verimliliğini artırır ve böylece enerji tasarrufuna katkı sağlar.

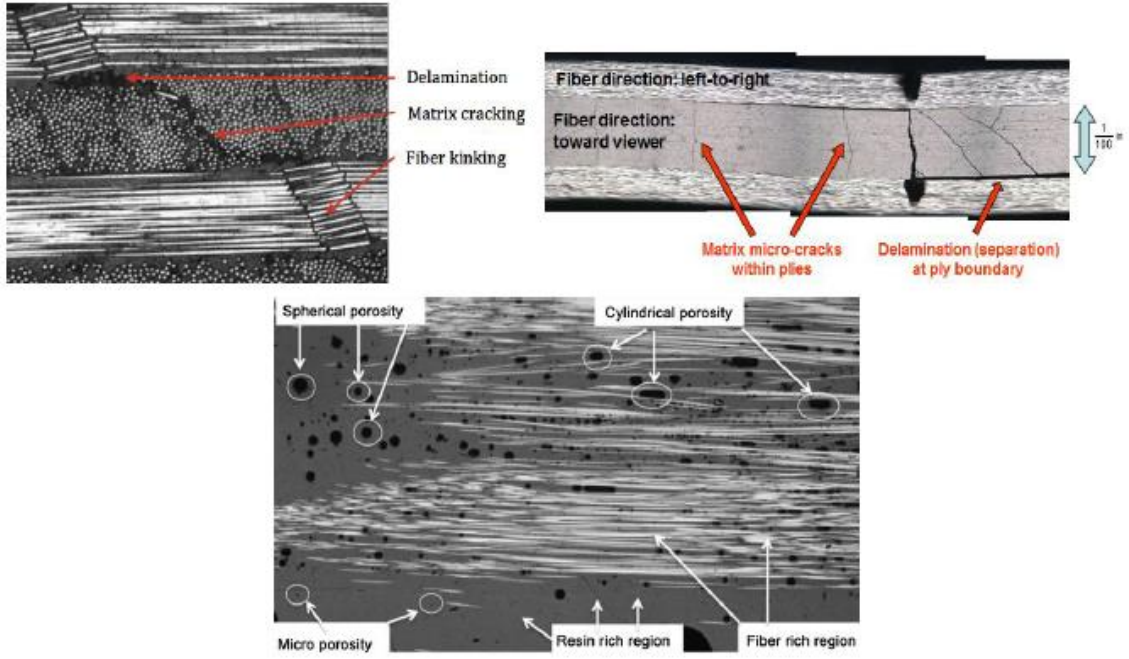
Kompozit malzemelerde ya imalat sırasında ya da kullanımdayken maruz kalınan tekrarlı yükler, termal etkiler, darbe yükleri gibi dış etkiler sebebiyle çeşitli hasarlar meydana gelebilir. Bu tür malzemelerde hasar mekanizmaları son derece karmaşık olup henüz metallerinki kadar iyi anlaşılabilmiş değildir. Örneğin, çelik bir yapı elemanında

hasar, genellikle çıplak gözle kolayca görülebilirken; kompozit bir levhada yüzeyde herhangi bir kusur görülememesine rağmen iç bölgelerde ciddi boyutta hasarlar (delaminasyon, lif kırılması, lif-matris ayrılması, matris çatlağı vb.) gelişmiş olabilir (Şekil 1). Bu durum, yapının bütünlüğünü tehlikeye atarak kullanım ömrünü azaltabilir ve güvenlik sorunlarını arttırabilir (Abrate, 1994; Ghobadi vd., 2017). Bu nedenle, kompozit malzemelerde hasarın başlangıç aşamasında tespit edilebilmesi için Yapı Sağlığı İzlemesi (YSİ) ihtiyacı büyük önem taşımaktadır.

Kompozit malzemelerde erken hasar tespiti için görsel denetimler, akustik ve ultrasonik yöntemler, kızılötesi termografi, termal kameralar, gömülü ivmeölçer uygulamaları vb. gibi yöntemler geliştirilmiştir (Şekil 2). Bununla beraber, tüm yükleme koşulları, malzeme yapısı ve hasar modları için etkili olabilecek tek bir yöntemin bulunması mümkün değildir (Amafabia vd., 2017). Her yöntemin kendine has avantaj ve dezavantajları olup, yöntemin doğruluğu, kullanılan ekipmana ve onu kullanacak personelin tecrübesine bağlıdır. Burada amaç, standartlardan ödün vermeden mevcut yöntemlerle hasar tespiti için kullanılacak ekipmanın güvenilirliğini ve doğruluğunu en düşük maliyetle arttırmaktır.

Kompozitlerde hasar tespiti için kullanılan yöntemlerden biri görsel denetimlerdir. Görsel denetimler, malzeme yüzeyindeki görsel ipuçlarına dayanarak hasar tespiti yapmaya yöneliktir. Bu yöntem, görsel temas gerektirdiği için kullanıcının tecrübesi ve yeteneği sonuçların doğruluğunu etkiler. Bu nedenle, görsel denetimler genellikle kompozit yapıların durumunu değerlendirmek için diğer yöntemlerle birlikte kullanılır (Maia vd., 2011).

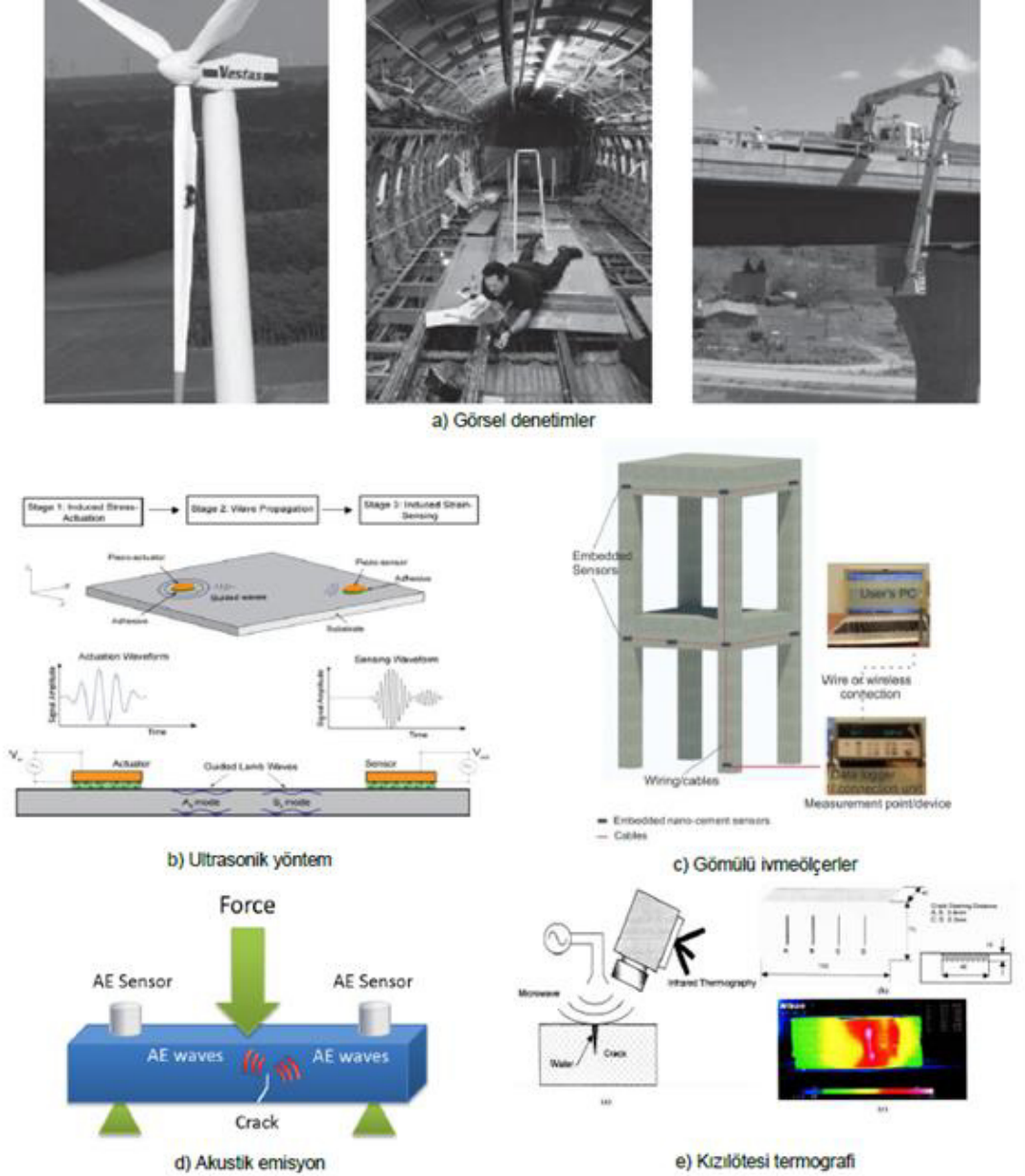
Akustik ve ultrasonik yöntemler, hasar meydana geldikten sonra kompozit malzemeler üzerinde kusurları (delaminasyon, gözeneklilik, çatlak vb.) tespit etmek için yaygın olarak kullanılan tekniklerdir (Potel vd., 1998). Akustik yöntemlerde malzeme içindeki ses dalgalarının özellikleri analiz edilerek olası kusurlar belirlenmeye çalışılır. Ultrasonik yöntemler ise yüksek frekanslı ses dalgalarının malzeme içinde yayılması ve yansımaları prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemler, hasarlı bölgelerdeki akustik özelliklerin değişikliklerini değerlendirerek hasarı belirlemeye yardımcı olurlar.



Şekil 1. Kompozit malzemelerde görülen çeşitli hasar tipleri

Kızılötesi termografi, kompozit yapılarda kusurların tespiti ve izlenmesi için son derece uygun bir yöntemdir. Kızılötesi termografiyle yapı elemanının iç bünyesinin görseli elde edilir ve bu sayede hasar/kusur doğru bir şekilde bulunabilir. Bununla birlikte, kızılötesi termografinin hassas ve pahalı ekipman gerektirdiği ve yapının yüzeyine yakın olmayan hasarları tespit etmede sınırlamaları olabileceği unutulmamalıdır. Termal kameralar ise yapı elemanı içerisindeki sıcaklık değişimlerini gösteren görüntüler sağlar. Bu görüntüler değerlendirilerek kompozit malzemelerde delaminasyon, çatlak ve darbe hasarı gibi iç kusurların varlığı tespit edilebilir. Burada da kullanılan ekipmanın pahalı olması ve kullanıcı becerisine bağlı olunması yöntemin önemli dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. (Amafabia vd., 2017; Meola & Carlomagno, 2010).

Gömülü ivmeölçer uygulamaları, kompozitlerde hasar tespiti için kullanılan bir diğer yöntemdir. YSİ alanındaki sürekli teknolojik ilerleme nedeniyle, hasar başlangıcı ve ilerlemesinin etkili bir şekilde izlenmesi için üretim sırasında yapı elemanına sensörler yerleştirilebilir. Gömülü sensör kullanımı uygun maliyetli olmakla beraber, gömülü sensör ağının yapıya ek yük getireceği ve ayrıca malzeme içine yerleştirilmesinden dolayı dayanımda azalmaya sebep olacağı akıldan çıkarılmamalıdır (Alexopoulos vd., 2010).



Şekil 2. Kompozitlerde hasar tespitinde kullanılan bazı yöntemler

Kompozit yapılarda hasar tespitinde X-ray ışını görüntüleme yöntemleri de kullanılmaktadır (Cantwell & Morton, 1985). Bu yöntem, röntgen ışınları yardımıyla malzemenin iç yapısının iki boyutlu görüntülenmesini ve böylece hasar ve anomalilerin tespitini sağlar (Maia vd., 2011).

Yukarıda kısaca özetlenen hasar tespit yöntemlerinin maliyetli olması ve sonuçların doğruluğunun büyük ölçüde kullanıcının tecrübesine bağlı olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemleri, ekipmanlarının taşınması, izlenen yapıya kurulumu ve kullanımı kolay olması ve ayrıca daha ekonomik

olmaları sebebiyle tercih edilmektedir (Doebbling vd., 1996,1998; Avcı vd., 2021). Bu yöntemlerde, yapının doğal frekans, mod şekli ve sönüm gibi titreşim karakteristiklerindeki değişimler değerlendirilerek hasar tespiti yapılmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, etkin ve uygulanması kolay olmasıdır. Özel donanımlara ihtiyaç duyulmadan, yapının titreşim özellikleri incelenerek hasar tespit edilebilir. Hasarlı bir yapının titreşim özellikleri değişeceği için bu değişikliklerin zamanında tespit edilmesi, yapı tamamen göçmeden önce gerekli önlemlerin alınabilmesine olanak tanır. Hasar tespiti için yapısal titreşimlerin kullanılması, diğer yöntemlere göre nispeten daha ekonomiktir ve yapının hizmet dışı kalmasını gerektirmediği için zamandan tasarruf sağlar. Gerçek zamanlı izleme ve analiz yapılabilmesi, onarımların hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine imkân verir. Ayrıca yapısal titreşimler ölçeklenebilir. Küçük ölçekli laboratuvar deneylerinden büyük ölçekli endüstriyel uygulamalara kadar çeşitli yapıların titreşim verileri toplanabilir ve analiz edilebilir (Alqayyim, 2017). Bu avantajlar bir araya geldiğinde kompozit yapılarda sağlık izlemesi ve hasar tespiti için yapısal titreşimlerin kullanılmasının yukarıda belirtilen diğer yöntemlere göre daha güçlü bir seçenek olarak karşımıza çıktığı görülmektedir.

1.2. Tabakalı Kompozitlerde Hasar Tespitine Yönelik Çalışmalar

Mühendislik yapılarında hasar tespiti ile ilgili çalışmalar, ciddi sonuçlar doğurabilecek sosyal, ekonomik ve çevresel problemlerin önlenmesi için büyük önem taşımaktadır. Günümüzde Yapı Sağlığı İzlemesi (YSİ), başta askeri ve sivil havacılık olmak üzere inşaat, makine, otomotiv vb. sektörlerde yapısal hasarların tespiti ve tanımlanmasında başvurulabilecek en güvenilir yol olarak karşımıza çıkmaktadır. Giderek daha karmaşık formlarda inşa edilen yapı sistemlerinde meydana gelebilecek hasarların izlenmesi ihtiyacı, çeşitli hasar tespit yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bir hasar tespit yönteminin başarıya ulaşması, hasarın değerlendirilmesi için kullanılacak kriterlerin güvenilirliği ve doğruluğuna bağlıdır. Rytter (1993), hasar değerlendirmesi için dört seviyeli bir sınıflandırma önermektedir:

1. Yapıda hasarın var olup olmadığının belirlenmesi (Seviye 1),
2. Hasar var ise yapıdaki yerinin belirlenmesi/lokalizasyon (Seviye 2),
3. Hasar şiddetinin/derecesinin belirlenmesi (Seviye 3)
4. Yapının kalan hizmet ömrünün tahmin edilmesi (Seviye 4).

Uygulama kolaylığı ve ekonomik olması sebebiyle titreşim verilerine dayalı hasar tespiti son yıllarda ön plana çıkmış ve bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Sinou, 2009; Das vd., 2016). Bu yöntemler, hasar etkisiyle yapının rijitliğindeki, dolayısıyla modal karakteristiklerindeki (doğal frekans, mod şekli ve türevleri, sönüm oranı) değişimlerin izlenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu değişimler değerlendirilerek yapıda hasarın varlığı, (var ise) yeri ve şiddeti kolayca belirlenebilmektedir.

Geleneksel yapılarda titreşim verilerine dayalı yöntemlerle hasar tespiti üzerine çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Das vd., 2016). Bununla beraber, tabakalı kompozit yapılarda hasar tespiti ile ilgili literatürün nispeten daha zayıf olduğu ve hala üzerinde çalışılması gereken bir konu olduğu görülmektedir (Sanders vd., 1992). Titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemleri dört ana kategori altında toplanabilir (Doebling vd., 1998):

1. Modal karakteristiklerin (doğal frekans, mod şekli, sönüm ve bunlara dayalı büyüklükler) değişimine dayalı yöntemler
2. Model güncellemeye dayalı yöntemler
3. Optimizasyona dayalı yöntemler
4. Yapay Sinir Ağları, derin öğrenme, makine öğrenmesi vb. gibi ileri hesaplama tekniklerine dayalı yöntemler

1.2.1. Modal Karakteristiklerin Değişimine Dayalı Yöntemler

Burada, yapının temel modal karakteristikleri olan doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı ve bunlardan türetilen diğer büyüklükler doğrudan kullanılmaktadır. Doğal frekans değişimlerinin hasar etkilerine karşı hassasiyetinin düşük olması sebebiyle, bu parametreye dayalı hasar tespitinde, kullanılan verinin ya çok hassas ölçümlerle elde edilmiş olması ya da hasarın çok ciddi boyutta olması gerekmektedir. Bundan dolayı, doğal frekans değişimleriyle yapısal hasarın varlığı (Seviye 1) hakkında bilgi edinilebilirken, yeri ve şiddeti ile ilgili bir bilgiye ulaşmak her zaman mümkün olmayabilmektedir. Bir istisna olarak, daha yüksek modların da dikkate alınmasıyla hasarın yeri hakkında bilgi sahibi olunabilirse de hem yapıyı yüksek modlarda titreştirmenin pratik zorluğu hem de büyük değişimlerin gözlemlendiği frekans sayısının yetersiz olması bu yolla hasar tespitini zorlaştıran en önemli faktörlerdir (Doebling vd., 1998).

Mod şekilleri, her frekans için yapının modal yer değiştirmelerinin konumla değişimini gösteren bir parametredir. Yerel rijitlik değişimlerine karşı hassas olmaları

sebebiyle hasar konumlarının belirlenmesinde (Seviye 2) kullanılabilirler (Sinou, 2009). Yapının iki farklı durumu için elde edilen mod şekil vektörleri arasındaki uyumu/korelasyonu göstermek amacıyla Modal Güvence Kriteri (MGK) vb. kullanılmaktadır (Allemang, 2003). Bu modal parametrenin hasar değerlendirme tekniği olarak kullanılmasında en önemli dezavantaj, ayrıntılı mod şekli bilgisine ihtiyaç duyulmasıdır. Bu ise yapı üzerinde çok sayıda noktadan ölçüm alınmasını gerektirdiği ve dolayısıyla ölçüm süresinin uzamasına sebep olduğu için pratik olarak tercih edilen bir yol değildir.

Mod şekillerine alternatif olarak modal eğrilik değişimleri de hasar konumları hakkında bilgi sağlayan önemli titreşim parametreleri olup, yerel rijitlik değişimlerine karşı mod şekillerinden çok daha hassastırlar. Kiriş, plak ve kabuk yapılarda eğrilik ile şekil değiştirme arasında doğrudan bir ilişkinin bulunması ve şekil değiştirmenin doğrudan ölçülebildiği gibi yer değiştirme veya ivmelerden de hesaplanabilmesi, eğrilik değişimlerinin kolayca elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, mod şekli eğrilğine bağlı olarak ifade edilebilen modal şekil değiştirme enerjisi, hasarın yerini tayin etmenin yanı sıra hasarın şiddetini bulmaya da (Seviye 3) imkân vermektedir. Bunlar, mod şekli eğrilğini hasar tespitinde kullanmanın avantajları olmakla birlikte; ölçüm alınan noktaların ve hesaba katılacak titreşim modlarının sayısı, ölçüm verisinin kalitesi, belirsiz parametreler, gürültü ve çevresel koşullar vb. sonuçların doğruluğunu etkileyen önemli faktörlerdir (Sinou, 2009; Moughy & Casas, 2017).

Modal esneklik, yapısal hasar tespiti için kullanılan bir başka modal parametredir. Rijitliğin tersi olan esneklik matrisinin sağladığı en önemli avantaj, ilk birkaç titreşim modu göz önüne alınarak kolayca elde edilebilmesidir. Böylece yüksek titreşim modlarına ait bilgiye ihtiyaç kalmaksızın hasar tespiti yapılabilir. Modal esnekliğin modal karakteristiklere dayalı diğer yöntemlere göre ikinci bir avantajı, kütle ile normalleştirilmiş mod şekillerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu şekilde, hasarın yapı boyunca aynı şekilde değerlendirilmesi sağlanarak hasar konumları doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Yöntemin bir dezavantajı, farklı şiddetlere sahip çoklu hasar durumlarında hasar olmayan noktalarda da esneklik değişimleri elde edilebilmesi veya şiddeti daha büyük olan hasarın küçük olanı gölgelemesi ve böylece tespitini zorlaştırmasıdır. Ek olarak, ölçüm alınan nokta sayısı ve deney verisi kalitesi yöntemin etkinliği üzerinde önemli rol oynamaktadır (Sinou, 2009; Moughy & Casas, 2017).

Kim (2003), hasarlı yapının Frekans Davranış Fonksiyonlarını (FDF) kullanarak tabakalı kompozit ve sandviç kirişler için bir hasar tespit yöntemi geliştirmiştir. Bu yeni yapısal hasar tanımlama tekniği, hasarlı bir yapının FDF'lerini kullanmak için yapısal dinamik sistem yeniden yapılandırma yöntemini kullanmaktadır. Yeniden yapılandırılmış FDF'lerden elde edilen doğal frekans ve sönüm oranlarının değişimleri değerlendirilerek tabakalı kompozit kirişlerde hasar seviyesi ve sandviç kirişlerde delaminasyon uzunluğu kolayca elde edilmiştir.

Ooijselaar vd. (2010), eğilme ve burulma modları altında titreşim yapan T kesitli kompozit kirişlerde delaminasyon tespiti için modal şekil değiştirme enerjisine dayalı bir hasar indeksi kullanmışlardır. Deneysel Modal Analiz ile modal parametreleri (modal sönüm faktörleri, doğal frekanslar ve mod şekilleri) elde etmişler ve eğilme modlarına ait doğal frekanslardaki değişikliklerin numunedeki hasarı tespit için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Yazarlar, hasar indeksinin hassasiyetinin delaminasyon ile ölçüm noktaları arasındaki mesafeye bağlı olduğunu, ölçüm noktası sayısı azaldıkça hasar indeksinin ölçüm noktalarından belli bir mesafede bulunan hasarı tespit hassasiyetinin etkilendiğini göstermişlerdir. Frekans davranış fonksiyonunun nispeten küçük hasarları tespit için kullanılabileceğini; ancak, genelde hasarın türü, boyutu, yeri ve yönü hakkında bilgi vermede tek başına yeterli olmayacağını belirtmişlerdir.

Manoach vd. (2012), dinamik yükleme ve sıcaklık değişimlerine maruz kirişlerin davranışlarına ait Poincaré haritalarını kullanarak kirişte hasar tespitinin mümkün olup olmayacağını araştırmışlardır. Yazarlar, elde ettikleri sonuçlardan hasarın kirişin zaman tanım alanındaki davranışını etkileyebileceğini ve sıcaklık değişimlerinin kirişin dinamik karakteristiklerinde doğrusal olmayan değişikliğe yol açacağını göstermişlerdir. Bu yöntemin avantajı, yapının hasarsız durumuna ilişkin ön bilgiye ihtiyaç duyulmamasıdır.

Herman vd. (2013), modal analiz kullanarak T-takviyeli kompozit panellerdeki kusurların tespitine yönelik sayısal ve deneysel bir araştırma sunmuşlardır. Deneysel testler, hasarlı panellerin titreşim uyarımının, taramalı lazer vibrometrisi kullanılarak ölçülen titreşim davranışını değiştirdiğini ortaya çıkarmıştır. Testler, düşük dereceli titreşim modlarının mod şekli eğriliğinde meydana gelen değişimlerin, panel içinde bulunan hasarın tespitinde en güvenilir gösterge olduğunu, yüksek dereceli modların ise hasarın varlığına karşı daha az duyarlı olduğunu göstermiştir.

Pérez vd. (2014), tabakalı kompozitlerde darbe hasarının tespitinde titreşim tabanlı yöntemlerin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Hasarsız ve hasarlı durumlardan elde

edilen sonuçları karşılaştırarak modal tabanlı dört hasar indeksini (frekans, mod şekli, eğrilik ve artık yük taşıma kapasitesi) değerlendirmiş ve karşılaştırmışlardır. Ayrıca, bu indekslerin hasarın varlığını, yerini ve test numunesindeki ilerlemesini tespit etkinliğini araştırmışlardır. Doğal frekanslardaki rölatif değişimlerin mod şekillerine göre daha az olduğunu bulmuşlardır. Bununla birlikte, hasar indekslerinin hassasiyetinin ölçülen koordinat ve ölçüm frekans aralığındaki mod sayısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Wang vd. (2015), anizotropik tabakalı kompozit plaklarda hasarın titreşim özellikleri üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Hasar, yerel rijitlik kaybı olarak modellenmiştir. Analitik çözümler pertürbasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini sonlu eleman analizi ile de göstermişlerdir. Modal eğrilik ve şekil değiştirme enerjisinin aksine doğal frekanslar ve modal yer değiştirmelerin hasara daha az duyarlı olduğu görülmüştür. Sayısal sonuçlar, lif doğrultusundaki hasarın diğer doğrultulardakilere kıyasla titreşim verileri üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Altunışık vd. (2017a), çelik konsol kirişte çoklu hasarların tespitinde mod şekilleri, modal eğrilik ve modal esneklik yöntemlerinin performanslarını değerlendirmişler ve hasar yerlerinin doğru belirlenmesinde deneysel ölçümle elde edilen modal veri sayısının ve kalitesinin çok etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Kahya vd. (2021a), titreşim verilerini kullanarak tabakalı kompozit kirişlerde hasar yerlerini belirlemek için mod şekli eğriliği ve modal esneklik yöntemlerini kullanmışlardır. Deneysel modal veriler, sınırlı sayıda ivmeölçerden alındığından modal eğrilik ve modal esneklik yöntemlerinin ivmeölçer konumlarına yakın çatlakları belirlemede daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Çözüm doğruluğunu artırmak için kirişin titreşim davranışını doğru bir şekilde karakterize etmek üzere sensörlerin optimum konumlarının belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Modal eğrilik ve esneklik değişimlerinin hasar tespitinde doğru ve etkili indeksleri olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda ele alınan hasar tespit yöntemleri kendi aralarında karşılaştırıldığında değişken bir performans sergiledikleri (örneğin, bir yapıda iyi sonuç veren bir yöntemin başka bir yapıda doğruluğunun azalması gibi) görülmektedir. Genel olarak, normal geometrili yapılarda doğal frekanslar ile hasarın var olup olmadığının basitçe değerlendirilebildiği; mod şekilleri ve bunlardan türetilen parametreler ile de yeterli ivmeölçer sayısı ve düşük gürültü seviyeleri için hasar yerlerinin daha doğru belirlenebildiği görülmektedir.

1.2.2. Model Güncellemeye Dayalı Yöntemler

Model güncellemeye dayalı hasar tespit yöntemleri, ölçümle elde edilen dinamik davranışa mümkün olduğunca yaklaşabilmek için sayısal modele (sonlu eleman modeli) ait kütle, rijitlik ve sönüm matrislerinin güncellenmesi esasına dayanmaktadır. Bu işlem için yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında duyarlılık analizi gelmektedir. Burada, kütle, elastisite modülü, sınır şartları, atalet momenti vb. gibi bazı belirsiz parametreler içerisinde davranışı en çok etkileyen parametre belirlenmekte, ardından bu parametre seçilen limitler içerisinde değiştirilmek suretiyle sayısal modele ait matrisler güncellenmektedir. Güncellenen matrislerin orijinal matrislerle karşılaştırılması ile hasarın yeri ve şiddeti elde edilmektedir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı, çevresel koşullardan ve gürültüden önemli ölçüde etkilenmesi ve ayrıca belirsiz parametrelerin seçimindeki zorluktur (Doebbling vd., 1998; Sinou, 2009; Moughty & Casas, 2017).

Altunışık vd. (2017b, c), çelik konsol kirişte çoklu hasar tespiti için duyarlılığa bağlı otomatik model güncelleme yöntemini kullanmışlardır. Sonuçlar, belirsiz parametreler ve bunlar için belirlenecek alt ve üst sınırların doğru seçiminin sonuçlar üzerinde çok etkili olduğunu göstermiştir.

Alkayem vd. (2018), sonlu eleman model güncellemesi ile yapısal hasar tespitinde Evrimsel Algoritmaları (EA) kullanmışlardır. Sonlu eleman model güncellenmesinde doğrudan, duyarlılığa dayalı, olasılıksal, istatistiksel ve yinelemeli yöntemleri tartışmışlar; hatalı sonuçlara yol açabilecek unsurları; a) kullanılan verilerdeki ölçüm hatalarına ve gürültüye karşı duyarlılık, b) özellikle büyük ölçekli karmaşık yapılar için hesaplama zorluğu ve kaynak gereksinimleri, c) güvenilir ilk ölçüm verisine duyulan ihtiyaç ve d) sonlu eleman modelini ölçülen verilere aşırı veya yetersiz uydurma potansiyeli olarak sıralamışlardır.

Kahya vd. (2021b), kompozit konsol kirişte çatlak tanımlanması ve lokalizasyonu için deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen modal özelliklere dayalı otomatik modal güncelleme yöntemi önermişlerdir. Yazarlar, deneysel ölçüm ve sonlu eleman sonuçlarının korelasyonunu değerlendirmek için Modal Güvence Kriterini (MGK) kullanmışlardır. Otomatik model güncellenmenin tabakalı kompozit kirişlerde hasar tespitinde doğru sonuçlar üretebilen etkili bir yöntem olduğunu; ancak, yöntemin etkinliğini artırmak amacıyla çalışmanın farklı sınır koşulları, tabaka yerleşimi ve hasar tipleri açısından da değerlendirilmesinin uygun olacağını ifade etmişlerdir.

Baybordi & Esfandiari (2022), zaman alanı yanıt verilerini kullanarak duyarlılığa dayalı sonlu eleman model güncelleme yaklaşımını önermişlerdir. Yöntemin doğruluğu çeşitli hasar senaryoları için sayısal olarak incelenmiştir. Önerilen yöntemin ölçüm hatalarından fazla etkilenmediğini, kapsamlı hasar durumlarında bile yapısal parametreleri doğru tahmin edebildiğini göstermişlerdir.

Ganjdoust vd. (2023), ters sonlu elemanlar yöntemi ve zikzak teorisini kullanarak kompozitlerde yeni bir hasar tespit stratejisi geliştirmişlerdir. Önerilen metodolojinin mühendislik uygulamalarında karmaşık geometrili yapılardaki hasarların tanımlanmasında umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Model güncellemeye dayalı yöntemler, doğrudan modal karakteristiklerin değişimine dayalı yöntemlere göre hasar tespitinde daha tutarlı davranış göstermekle birlikte, model güncelleme için izlenecek yol önem kazanmaktadır. Duyarlılığa dayalı model güncellenmenin yukarıda ifade edilen dezavantajları göz önüne alındığında optimizasyona dayalı model güncellemeyle kompozitlerde hasar tespiti ve YSI'nin daha avantajlı olabileceği değerlendirilmektedir.

1.2.3. Optimizasyon Tabanlı Yöntemler

Son yıllarda titreşim verilerine dayalı hasar tespitinde optimizasyon algoritmalarının kullanılması üzerinde özellikle durulmaktadır. Matematik bilimi ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler paralelinde çok sayıda optimizasyon tekniği geliştirilmiş ve bunlar pek çok mühendislik problemine başarıyla uygulanmıştır. Optimizasyon tabanlı hasar tespitinde, yapının sonlu eleman modelinden hesaplanan modal veriler ile gerçek yapıdan (muhtemelen hasarlı) ölçülenler dikkate alınarak bu iki model arasındaki fark en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Bu sayede, sayısal modelin gerçek yapıyı (deneysel model) en iyi şekilde temsili sağlanmakta ve böylece yapıdaki hasarın yeri ve şiddeti oldukça iyi bir hassasiyetle elde edilebilmektedir. Yöntemin diğer bir avantajı, sonlu eleman modelinin yapının o anki gerçek durumunu temsil edecek şekilde güncellenmesini sağlamasıdır. Böylece bir sonraki değerlendirmede yapının bu son durumu referans olarak kullanılabilir. Bu sayede, sayısal modelin gerçek yapıyı (deneysel model) en iyi şekilde temsili sağlanmakta ve böylece yapıdaki hasarın yeri ve şiddeti oldukça iyi bir hassasiyetle elde edilebilmektedir. Yöntemin diğer bir avantajı, sonlu eleman modelinin yapının o anki gerçek durumunu temsil edecek şekilde güncellenmesini sağlamasıdır. Böylece bir sonraki değerlendirmede yapının bu son durumu referans olarak kullanılabilir.

1970'lerin başından bu yana Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA) ile başlayarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution, DE) vb. gibi doğadan esinlenen

birçok optimizasyon tekniği geliştirilmiştir. Literatürde, titreşim verileri kullanılarak bu tür optimizasyon teknikleri ile hasar tespiti, çelik ve betonarme yapı sistemlerine başarıyla uygulanmıştır (Hao & Xia, 2002; Cha & Buyukozturk, 2015; Ding vd., 2016; Cancelli vd., 2017; Wei vd., 2018). Bununla beraber, kompozit malzemelerde konuya ilgi nispeten yeni olup son yıllarda bir yoğunluk görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, kompozitlerde son derece karmaşık hasar mekanizmalarının varlığı, optimizasyona dayalı hasar tespit yöntemlerini klasik yöntemlere göre daha avantajlı duruma getirmektedir.

Genetik Algoritma (GA), tabakalı kompozitlerde hasar tespitinde kullanılan en eski optimizasyon yöntemlerinden biridir. GA optimizasyonu, bir popülasyonun birkaç kuşak boyunca çaprazlama ve mutasyonlara tabi tutulduğu yinelemeli bir süreçtir. Doğal olarak bu durum çok sayıda fonksiyon değerlendirmesi gerektiren, hesaplama açısından külfetli ve zaman alıcı problemlerde yöntemin kullanılmasını pratik olmaktan çıkarmaktadır. Özellikle birden fazla hasar durumunda bilinmeyen sayısının artması, yöntem açısından büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır (Behtani vd., 2017). Bu eksikliği gidermek üzere yöntem, Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network, ANN) (Zhang vd., 2013; Gomes vd., 2019b), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Vosoughi & Gerist, 2014), Guguk Kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search, CS) (Tran-Ngoc vd., 2021) ve Tavlama Benzetimi Algoritması (Simulated Annealing, SA) (He & Hwang, 2007) gibi yöntemlerle hibrit olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalardan farklı olarak Gomes vd. (2018b), iki aşamalı bir yöntem ile önce muhtemel hasarlı elemanları belirlemiş, ardından GA optimizasyonu ile göz önüne aldıkları model üzerinde hasar tespiti yapmışlardır.

Krawczuk & Ostachowicz (2002), kompozit kirişlerde delaminasyon tespiti için doğal frekanslardaki değişimi dikkate alarak GA tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Delaminasyonun konumu ve boyutu, hesaplanan ve ölçülen doğal frekanslar arasındaki farkı içeren bir hata fonksiyonunun en aza indirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları, yöntemin delaminasyon parametrelerinin (konum ve boyut) hızlı ve doğru tahmin edilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

Yukarıda özetlenen çalışmalarda, sonlu eleman simülasyonlarından elde edilen titreşim parametreleri ile hasar yerleri ve şiddetleri son derece iyi bir doğrulukla belirlenebilirken; deneysel ölçüm verileri kullanıldığında sonuçların doğruluğunun azaldığı görülmektedir. GA, büyük veri setleri ve karmaşık problemler için yüksek işlem hacmi ve zaman gerektirebilir. Aynı zamanda algoritmanın performansı, çaprazlama ve mutasyon oranları gibi parametrelere büyük ölçüde bağlıdır. Sayılan bu dezavantajlarına rağmen en

eski sezgisel optimizasyon algoritması olarak günümüze kadar geçirdiği farklı iyileştirmelerle ve hibrit kullanımlarıyla GA, hala yapılarda hasar tespiti uygulamalarında güncelliğini korumaktadır.

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), tabakalı kompozitlerde hasar tespitinde tercih edilen diğer bir optimizasyon algoritmasıdır. İlk olarak Kennedy & Eberhart (1995) tarafından önerilen PSO algoritması, bilinmeyen bir hedefe ulaşmaya çalışan böceklerin ve kuşların “sürü davranışı” olarak ifade edilen toplu hareketlerinden esinlenmiştir. Diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla PSO daha az sayıda fonksiyon değerlendirmesi gerektirdiğinden daha basit ve etkili bir yöntem olmakla birlikte; temel dezavantajı, en iyi sonuca (global optimum) ulaşmadan erken yakınsayabilmesidir. Bu eksikliği gidermek amacıyla yöntem üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmış ve tabakalı kompozitlerde hasar tespiti için tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir (Vosoughi & Gerist 2014; Rao vd., 2015; Masoumi vd., 2018). Ayrıca, zaman içerisinde verimliliğini artırmak için orijinal PSO algoritması üzerinde çeşitli değişiklikler önerilmiştir.

Vosoughi & Gerist (2014), GA, duyarlılık modal analiz ve PSO tekniklerini kullanarak tabakalı kompozit kirişlerin hasar tespiti için yeni bir hibrit yöntem sunmuşlardır. Önerilen yöntemde, üretilen popülasyonu artıran ve arama alanını küçülten duyarlılık modal analizi ve PSO teknikleri dahil edilerek geleneksel GA iyileştirilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliği ve verimliliği farklı örneklerle gösterilmiş ve düşük hasar derecesine sahip hasarlı elemanı tespit etmede bile iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Jebieshia vd. (2015), Birleştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu yardımıyla doğal frekans verilerindeki değişimlere dayalı olarak kompozit bir yapıda hasar tespiti için sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Önerilen yöntem, tekli ve çoklu hasar içeren kompozit kiriş ve plaklarda sayısal simülasyonlar yapılarak test edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen yöntem dikkate alınan hasar durumları için ilk altı doğal frekansı kullanarak hasarı doğru bir şekilde tespit edebilmektedir. Yazarlar diğer bir çalışmalarında aynı yöntemi, anizotropik hasar tanımı yapılmış kompozit kiriş ve plaklarda uygulamışlardır (Jebieshia vd., 2019). Çalışmada, anizotropik hasar tanımının kompozit yapıların dinamiği üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir.

Hadi vd. (2016), kompozit bir plakta delaminasyon hasarlarının yerlerinin ve büyüklüklerinin tespiti problemini ele almışlardır. Önce, farklı sınır koşulları ve tabakalar arası hasar varlığının sonuçlar üzerindeki etkisine yönelik parametrik çalışma yapmışlar; ardından, kompozit plak üzerinde hasarın yerini araştırmışlardır. Sonuçlar, PSO

algoritmasının kompozit plaklarda hasar değerlendirmesinde hızlı ve etkili olduğunu göstermektedir.

Khatir vd. (2017), PSO ve GA kullanarak tek yönlü grafit-epoksi kompozit kirişlerde çoklu hasar tespiti için bir yöntem önermişlerdir. PSO'nun farklı hasar senaryoları için GA'dan daha iyi performans gösterdiği ve daha iyi yakınsama hızına sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

1997 yılında Storn & Price tarafından ortaya konulan Diferansiyel Evrim Algoritması (DE), GA temelli popülasyon tabanlı sezgisel bir optimizasyon tekniğidir (Mayer vd., 2005; Storn & Price, 1997). Bu algoritmanın esası, popülasyondan seçilen iki birey arasındaki ağırlık farkının üçüncü bir bireye eklenmesine dayanmaktadır. Yöntemin etkinliği birçok araştırmacı tarafından hem referans problemleri hem de gerçek problemleri üzerinde gösterilmiştir (Das vd., 2009).

Vo-Duy vd. (2016) ve Dinh-Cong vd. (2017a, b), tabakalı kompozit kiriş ve plaklarda hasar tespiti için iki aşamalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, önce muhtemel hasarlı elemanlar şekil değiştirme enerjisi veya modal esneklikteki değişimler esas alınarak tespit edilmekte, ardından DE algoritması ile bu elemanlardaki rijitlik kaybı (hasar şiddeti) belirlenmektedir. Bu çalışmalarda benimsenen iki aşamalı hasar tespit yönteminin sağladığı en önemli avantaj, hesaplama hacmini önemli ölçüde azaltmasıdır.

Bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodinin elde edilmesi prensibine dayalı olan Armoni Arama Algoritması (Harmony Search Algorithm, HSA), çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde başarıyla kullanılmıştır (Geem vd., 2001; Manjarres vd., 2013). Karar değişkenleri için özel bir başlangıç çözümü gerektirmemesi, birden fazla çözümle optimizasyon işlemine devam ettiği için birçok yönde genel optimum çözümü arayarak yerel optimum çözümlerden kurtulması ve optimizasyon işleminde hem sürekli hem de ayrık değişkenler kullanabilmesi yöntemin avantajlı yönleri olarak ortaya çıkmaktadır. HSA, hesaplama mantığı bakımından GA ile benzerlikler göstermekle birlikte, bu iki yöntem arasındaki en belirgin fark yeniden üretim aşamasındaki varsayımlardan kaynaklanmaktadır. GA, yeni bir karar değişkeninin oluşturulmasında toplum içerisindeki iki adet bireyi (ebeveyn) kullanırken; HSA ile oluşturulan yeni birey, toplum içerisindeki tüm bireylerin özelliklerini taşıyabilmektedir. Ayrıca HSA'da bir iterasyonun tamamlanması GA'ya göre daha hızlıdır (Yang, 2009; Özyön vd., 2011).

HSA'nın önemli bir dezavantajı, bütün arama uzayı üzerinde işlem yaptığı için yakınsama hızının düşük olmasıdır. Bununla beraber, yöntemin diğer optimizasyon algoritmalarıyla hibrit kullanıma yatkınlığı bu eksikliğin giderilmesinde avantaj sağlamaktadır (Yang, 2009; Tuo vd., 2017). Yapılarda hasar tespiti uygulamalarında HSA kullanımına ilişkin az çalışma bulunmaktadır. Özellikle kompozit yapılarda hasar tespiti için yapılan çalışmalar çok sınırlıdır.

Miguel vd. (2012), sonlu eleman model güncellemeyle hasar tespiti için HSA kullanan bir yöntem geliştirmişler; yöntemi, farklı hasar senaryoları ve gürültü seviyeleri için bir dizi sayısal örnekle test etmişlerdir. Ardından farklı hasar senaryolarına sahip üç konsol kiriş üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Göz önüne alınan tüm durumlarda hasar konumları ve şiddetleri iyi bir doğrulukla elde edilmiş ve önerilen yöntemin çevresel gürültü altında dahi umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Kaveh vd. (2013), yapılarda hasar tespitinin verimliliğini artırmak için PSO, Işın Optimizasyonu (Ray Optimization, RO) ve HSA'yı birleştirmişlerdir. Algoritmada amaç fonksiyonu olarak hem modal parametrelere hem de Modifiye Toplam Modal Güvence Kriterine bağlı hibrit bir fonksiyon kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin farklı hasar senaryoları altında çerçeve ve kafes sistemlerde hasarın yerini ve şiddetini başarıyla elde ettiğini göstermektedir.

Artar vd. (2018), HSA kullanarak çelik düzlem kafes yapılarda hasar tespit çalışması yapmışlardır. Çalışma, düzlem kafes yapılarda hasar tespitinde HSA'nın doğruluğunu ve uygulanabilirliğini göstermektedir.

Kahya vd. (2022), keyfi tabaka dizilimine sahip kompozit kirişlerde hasar tespiti için sınırlı titreşim verileri ve HSA kullanan sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Önerilen yöntemin doğruluğu, tek ve birden fazla hasar içeren kompozit kirişler üzerinde gürültünün hesaba katılması ve katılmaması durumlarında gösterilmiştir. Birden fazla küçük hasar olması durumunda doğruluk biraz azalsa da önerilen yöntem genel olarak başarılı sonuçlar vermiştir.

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (Teaching-Learning-Based Optimization, TLBO) algoritması, bir öğretmenin sınıftaki öğrenciler üzerindeki etkisini taklit eden sezgisel bir algoritmadır (Rao vd., 2011). Çoğu optimizasyon yöntemi, performansı etkileyen ve başlangıçta belirlenmesi gereken algoritma parametrelerine ihtiyaç duyarken TLBO, başlangıçta belirlenecek herhangi bir algoritma parametresi gerektirmediği için

uygulama kolaylığı sağlamaktadır. TLBO, birçok yapı sisteminde hasar tespitinde kullanılmasına rağmen kompozit yapılarda uygulamaları nispeten daha azdır.

Fallahian vd. (2018), çeşitli hasar senaryoları altında kiriş, çerçeve ve kafes sistemlerde TLBO algoritmasını kullanarak hasar konumlarını ve şiddetlerini sayısal modeller üzerinden elde etmişlerdir.

Shahrouzi & Sabzi (2018), kafes yapılarında hasar tespitinde TLBO ve Yapay Bağışıklık Sistemi (Artificial Immune System, AIS) algoritmalarını birleştiren hibrit bir yöntem önermişlerdir. YBS algoritmasının aşılama ve reseptör düzenleme operatörleri ile kullanıldığında TLBO algoritmasının üstün hasar tespit yeteneği gösterdiği görülmüştür. Önerilen hibrit algoritmanın belirli hasar tespit problemlerinde en iyi performansı elde etmek üzere parametre ayarlamasına izin verdiği gösterilmiştir. Bu parametre ayarının daha iyi sonuçlar elde etme fırsatı sunduğunu ve bunun da önerilen yöntemi parametresiz TLBO algoritmasından daha esnek kıldığını ifade etmişlerdir.

Khatir vd. (2019), kirişlerde hasar tespiti için iki aşamalı bir yöntem geliştirmişlerdir. İlk aşamada, doğal frekanslarda ve modal şekil değiştirme enerjisindeki değişimler değerlendirilerek hasar konumları belirlenmiş; ikinci aşamada ise sayısal ve deneysel modellere ait modal şekil değiştirme enerjileri arasındaki fark TLBO ile minimize edilerek hasar şiddetleri bulunmuştur. Karşılaştırma amaçlı olarak kullanılan PSO ve Yarasa Optimizasyonu (Bat Optimization, BA) algoritmalarına göre TLBO tekniğinin birkaç iterasyonla hızlı ve doğru bir şekilde sonuca ulaştığı gösterilmiştir.

Barman vd. (2021), yapılarda titreşim tabanlı hasar tespiti için Bayes veri füzyonu ve TLBO optimizasyon algoritmasını birleştiren iki aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yöntem, kafes, çerçeve ve plak yapıları dahil olmak üzere çeşitli yapılar üzerinde doğrulanmıştır. Bayes veri füzyonu yaklaşımı, yapıdaki şüpheli (muhtemel) hasarlı elemanların sayısını önemli ölçüde azaltmış, bu da hasar yeri ve şiddetinin daha hızlı ve doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Yöntemin ikinci aşamasında, TLBO algoritması ile yalnızca şüpheli elemanlar optimizasyon değişkenleri olarak dikkate alınmıştır. Önerilen yaklaşımın hesaplama açısından verimli ve gürültünün hesaba katılması durumunda da etkili olduğu görülmüştür.

Kundu vd. (2021), özellikle titreşim verilerindeki değişimlere dayanarak çerçeve tipi yapılarda hasar tespiti için TLBO algoritmasını kullanmışlardır. Alüminyum konsol kirişten elde edilen deneysel veriler kullanılarak yapılan değerlendirmede, TLBO'nun tutarlılık ve doğruluk açısından Lagrange Çarpanı Yöntemi, GA ve Yapay Arı Kolonisi

Algoritması (Artificial Bee Colony, ABC) gibi diğer hesaplama tekniklerinden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Das & Dhang (2022), sınırlı sayıdaki sensörle donatılmış kafes ve çerçeve yapılar için etkili olabilecek çok aşamalı bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, üç farklı model indirgeme yöntemini inceleyerek Yinelemeli İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi yaklaşımını seçmişlerdir. Otokontrol özelliğine sahip çok aşamalı bir stratejinin kullanıldığı hibrit TLBO-PSO yönteminin hasar tanımlanmasında yeterince etkin olduğunu göstermişler; aynı zamanda doğruluk ve hesaplama maliyeti açısından diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Nedushan & Fathnejat (2022), modal esneklik ve şekil değiştirme enerjisine dayalı yeni bir hasar indeksi kullanan iki aşamalı bir hasar tespit yöntemi önermişlerdir. Modal esneklik ve şekil değiştirme enerjisini birleştirdikleri hasar indeksi ile elde ettikleri sonuçların yalnızca şekil değiştirme enerjisini kullandandan elde edilenlere kıyasla daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Yazarlar, değişiklik yaptıkları TLBO algoritmasının işlemde kullanımının öğrenme ve öğretme kalitesini artırdığı, bunun ise daha hızlı yakınsama ve daha doğru hasar yeri tahminine yol açtığını ifade etmişlerdir. Ayrıca önerilen yöntemin, ölçüm gürültüsü etkilerinden daha az etkilendiğini göstermişlerdir.

Kahya vd. (2022), keyfi tabaka dizilimine sahip kompozit kirişlerde, titreşim verileri ve TLBO algoritması kullanan bir hasar tespit yöntemi önermişlerdir. Yöntemde, frekanslardaki hata ve mod şekilleri arasındaki korelasyon hatasını minimize eden bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen yöntemin tabakalı kompozit kirişlerde tekli ve çoklu hasar senaryoları için güzel sonuçlar verdiği ve TLBO'nun diğer algoritmalara kıyasla daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Literatürde tabakalı kompozitlerde hasar tespitine yönelik son zamanlarda geliştirilen farklı optimizasyon algoritmaları da kullanılmıştır. Bunlara birkaç örnek vermek gerekirse; Khatir vd. (2018), çift taraflı kenar çatlak (çentik) bulunan tabakalı kompozit kirişte hasarının tespitinde CS algoritmasını; Gomes vd. (2019a), kompozit plakta delik hasarının tespiti için Ayçiçeği Optimizasyon Algoritmasını (Sunflower Optimization, SFO) kullanmışlardır. Yazarlar, yöntemlerini GA ile karşılaştırmış ve bu yöntemlerin hasarın yerini ve büyüklüğünü bulmada en az GA kadar etkili hatta ondan daha hızlı olduklarını göstermişlerdir. Az sayıdaki bu tür çalışmalarda, sonuçlar sayısal simülasyonlar ile elde edilmiş olup deneysel doğrulama bulunmaması bir eksiklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Zheng vd. (2022) Deneyime Dayalı Öğrenme Algoritması (Experience-Based Learning,

EBL) kullanarak tabakalı kompozitlerde delaminasyon tespiti için iki aşamalı bir yöntem önermişler, yöntemin etkinliğini deneysel veriler kullanarak göstermişlerdir. Yöntem, doğruluk ve hesaplama maliyetinin azaltılması açısından üstün performans göstermekle beraber, daha karmaşık yapılar üzerinde daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

1.2.4. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network, ANN) Tabanlı Yöntemler

Yapay Sinir Ağlarının temel amacı, insan beyninin çalışma şeklini taklit ederek karmaşık veri ilişkilerini modellemek ve çeşitli problemleri çözmektir. Bu ağlar, öğrenme yetenekleri sayesinde verilerden örüntüler ve ilişkiler çıkarabilir, böylece sınıflandırma, regresyon, görüntü işleme, dil işleme gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Özellikle büyük veri setleriyle çalışarak, insanlar için zor veya imkânsız olan görevleri otomatikleştirebilirler. Yapay Sinir Ağları ile çok boyutlu fonksiyonel problemlere çözüm bulunabilmekte, girdi ve çıktı arasında karmaşık, doğrusal olmayan ilişkiler kurulabilmektedir.

Yapay Sinir Ağları, yapılarda hasar tespiti için sensörler aracılığıyla toplanan titreşim, deformasyon ve sıcaklık gibi verileri kullanır (Gu vd., 2017; Raut vd., 2021; Tran-Ngoc vd., 2022). İlk olarak, bu veriler filtreleme, normalizasyon ve özellik çıkarımı gibi işlemlerle ön işlenir. Daha sonra, yapay sinir ağı modeli bu verilerle eğitilir ve model, hasar belirtilerini tanımayı öğrenir. Eğitim sürecinde model, hasarın belirli özelliklerini ve örüntülerini öğrenerek yeni verilerden benzer özellikleri çıkarır ve hasar olup olmadığını tahmin eder. Ayrıca, model yapının hangi bölgelerinde hasar olduğunu belirleyebilir. Son olarak, modelin çıktıları değerlendirilerek gerekirse model yeniden eğitilerek doğruluğu artırılır. Bu süreçler, yapay sinir ağlarının veri analiz yetenekleri ve örüntü tanıma kapasiteleri sayesinde, yapılarda hasar tespiti ve izleme süreçlerini otomatikleştirir ve hassasiyetini artırır.

ANN, tabakalı kompozitlerde delaminasyon hasarının tespitinde doğal frekanslardaki değişimleri kullanarak hasarın yerini ve büyüklüğünü tespitte kullanılmıştır (Zhang vd., 2013, 2018; Khan vd., 2019). Ancak, bu yöntemde eğitim süreci için çok sayıda veriye ihtiyaç duyulması çözüm süresini uzatmakta; ek olarak, çözümün başarısı büyük ölçüde eğitim için kullanılan veri setinin doğruluğuna ve çeşitliliğine bağlı kalmaktadır (Montalvão vd., 2006; Amafabia vd., 2017). Araştırmacılar, ANN ile delaminasyon

hasarının tespitinde ölçüm hataları ve çevresel gürültünün sonuçları olumsuz yönde etkilediğini ifade etmişlerdir (Zhang vd., 2013, 2018).

Tran-Ngoc vd. (2021), tabakalı kompozit yapılarda hasar tespitinde Evrimsel Algoritmaların (Evolutionary Algorithms, EAs) global arama gücünü kullanan verimli bir YSA önermişlerdir. Temel fikir, eğitim sürecinde ANN ile paralel çalışmak için EA'ları kullanmak ve böylece ağın yerel minimumlara takılmadan en iyi çözümü hızlı bir şekilde belirlemesini sağlamaktır. Yazarlar, global arama kapasitesinin verimliliğini artırmak için GA ve CS'nin avantajlarını birleştiren hibrit bir yöntem geliştirmişlerdir. Burada, GA en iyi kalitede ilk popülasyonları oluşturmak için kullanılırken, global arama kapasitesine sahip CS algoritması en iyi çözümü aramak için kullanılmıştır. Önerilen yöntem hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmasına rağmen doğruluk açısından geleneksel ANN'den daha iyi bir performans göstermediği görülmüştür.

Maurya vd. (2022), titreşim verisi ve ANN teknikleri kullanılarak karbon fiber takviyeli kompozitlerde delaminasyonun etkili bir şekilde tespit edilebileceğini öne sürmüşlerdir. Çalışmada, geliştirilen ANN modeli ile yapıların doğal frekanslarını analiz ederek karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde delaminasyon uzunluğunu ve yerini oldukça iyi tahmin edebilmişlerdir. Analitik sonuçlar ve tahminler arasındaki maksimum hatanın %5'ten az olduğunu belirtmişlerdir.

Zara vd. (2023), farklı optimizasyon algoritmaları ile hibrit olarak kullanılan ANN ile kompozitlerde hasar tespitini çalışmışlardır. Geliştirilen hibrit tekniğin kompozitlerde çatlak uzunluğunu tahmin etmede çok düşük bir yüzde hata ile optimum performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Yukarıda verilen literatür taraması sonuçlarına göre, tabakalı kompozitlerde optimizasyon tabanlı hasar tespitine yönelik araştırmaların hala güncelliğini ve popülerliğini koruduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden biri daha hızlı ve daha az işlem hacmi gerektiren bir yöntem arayışıdır. Ayrıca, optimizasyon alanında sürekli olarak yeni algoritmaların ortaya çıkışı da buna destek olan unsurlardan biridir. Yapay Zekâ (Artificial Intelligence, AI) teknolojisinde süregelen yenilikler ve optimizasyon tekniklerinin YZ uygulamalarında yardımcı araçlar olarak kullanılabilme yeteneği, optimizasyon tekniklerini sürekli gündemde tutmakta ve araştırmacıların ilgisinin devamını sağlamaktadır.

Yapı Sağlığı İzlemesinde amaç, yapının belirli noktalarından alınan ölçüm verilerinin sürekli değerlendirilmesi olduğundan, deneysel verileri kullanarak doğru ve etkili

değerlendirme yapabilen yöntemlere hala ihtiyaç olduğu görülmektedir. Burada, kullanılacak hasar indeksinin etkinliği çok önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, HSA ve TLBO algoritmalarının diğer yöntemlere göre bazı üstünlüklerine rağmen kompozitlerde hasar tespiti uygulamaları için az kullanılmış olması, bu klasik optimizasyon tekniklerinin hasar tespitindeki performanslarının kompozitler özelinde ne olacağı konusunda merak uyandırmaktadır.

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

Tabakalı kompozit kirişlerin yapısal taşıyıcı elemanlar olarak mühendislik pratiğindeki uygulamalarının giderek artması bu tür malzemelerin karmaşık hasar mekanizmalarını anlamayı ve bunların zamanında tespiti için güvenilir ve uygulanması kolay hasar tespit yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, uygulaması kolay ve ucuz olan titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemlerinin güçlü hesaplama algoritmalarıyla birlikte bu tür malzemelerde kullanılması son derece iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Konuya yönelik araştırmaların yakın zamanda hız kazandığı ve tüm dünyada endüstriyel ve bilimsel alanda ilgi çektiği görülmektedir. Bununla beraber, titreşim verilerine dayalı hasar tespitinde optimizasyon yöntemlerinin kullanımının kompozitlerdeki pratik uygulamalarının sayısı hala sınırlıdır. Bu sebeple, sunulan tez çalışmasının amacı, optimizasyona dayalı sonlu eleman model güncelleme ile tabakalı kompozit kirişlerde hasar tespiti problemlerinin çözümü için etkili bir yöntem önermektir.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, tabakalı kompozit kirişlerde hasar etkilerini göz önüne alan bir sonlu eleman modeli (sayısal model) geliştirilmiştir. Sayısal model, dört klasik optimizasyon algoritmasıyla (GA, HSA, PSO ve TLBO) birlikte kullanılarak, bir optimizasyon problemi olarak tanımlanan hasar tespit problemi çözülmüştür. Çözümde titreşim karakteristiklerine dayalı farklı amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Çeşitli hasar senaryoları için farklı sınır koşulları ve tabaka dizilimlerine sahip kompozit kirişlerde yöntemin doğrulaması yapılmış ve etkinliği irdelenmiştir.

Yukarıda kapsamı çizilen tez dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, konuyla ilgili literatürde mevcut çalışmalara yer verilmekte ve konunun önemi vurgulanmıştır. Bu bölümde ayrıca, anizotropik elastisitenin temel denklemleri ile titreşim

tabanlı hasar tespit yöntemleri, önerilen hasar tespit metodolojisinde kullanılan optimizasyon algoritmaları ve sonlu eleman model indirgeme yöntemlerine ait genel bilgiler özetlenmiştir. İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar sunulmuştur. Sayısal modelleme için geliştirilen hasarsız ve hasarlı tabakalı kompozit kiriş sonlu elemanına ait formülasyon verilmiştir. Geliştirilen sonlu elemanın doğrulaması için yapılan deneysel model ve ölçümlerden, ANSYS 16.0 programı ile oluşturulan hasarsız ve hasarlı üç boyutlu modellerden bahsedilmiştir. Önerilen hasar tespit metodolojisinin matematik modeli ve kullanılacak amaç fonksiyonlarına ait formülasyonlar sunulmuştur. Üçüncü bölümde, önerilen sonlu eleman modelinin ve hasar tespit yönteminin doğrulaması ve etkinliğinin değerlendirilmesi için karşılaştırılmalı sonuçlar verilmiş, çeşitli konfigürasyonlar için (tabaka dizilimi, sınır şartı) parametrik çalışmalar yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise gerçekleştirilen çalışmalardan çıkarılan temel sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı ümit edilen bazı öneriler sunulmuştur. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Anizotropik Elastisite Teorisinin Temel Denklemleri

Anizotropi, bir malzemenin doğrultuya göre değişen elastik özelliklerini diğer bir ifadeyle farklı doğrultularda farklı davranış sergileyeceğini ifade eden bir terimdir. Anizotropik malzemelerin bu özelliği dayanıklılık, güvenlik ve performans üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bilindiği üzere izotropik malzemeler her doğrultuda aynı elastik özelliklere sahip olup iki elastik sabit ile (Elastisite modülü, Poisson oranı) tanımlanmaktadırlar. Anizotropik malzemelerde durum tamamen farklı olup doğrultudan doğrultuya elastik özelliklerin değişimi nedeniyle çok daha fazla sayıda elastik sabit ile tanımlanmaktadırlar. Anizotropik malzemeye en tipik örnek ahşaptır. Ahşap, lifleri doğrultusunda daha yüksek eğilme mukavemetine sahipken, bunlara dik doğrultuda son derece zayıf eğilme mukavemeti gösterir.

Anizotrop davranış gösteren hatta davranışı tamamen anizotropiyle açıklanabilen bir diğer malzeme türü lif takviyeli polimer kompozit malzemelerdir. Tez konusuyla doğrudan ilişkili olması sebebiyle bu bölümde anizotropik elastisite teorisinin temel denklemleri kısaca ele alınmıştır.

1.4.1. Şekil Değiştirme ve Gerilme

Anizotropik bir cisim için şekil değiştirme tansörü

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{12} & \varepsilon_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{13} & \gamma_{23} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

şeklindedir. Yer değiştirme bileşenleri $u_1 = u_1(X_1, X_2, X_3)$, $u_2 = u_2(X_1, X_2, X_3)$ ve $u_3 = u_3(X_1, X_2, X_3)$ olmak üzere, (1) ifadesindeki şekil değiştirme tansörünün elemanları yer değiştirmeler cinsinden

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial X_1}, & \varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial X_2}, & \varepsilon_{33} &= \frac{\partial u_3}{\partial X_3}, \\ \gamma_{12} &= 2\varepsilon_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial X_2} + \frac{\partial u_2}{\partial X_1}, \\ \gamma_{13} &= 2\varepsilon_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_1}, \\ \gamma_{23} &= 2\varepsilon_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial X_3} + \frac{\partial u_3}{\partial X_2} \end{aligned} \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, ε_{ii} ve γ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) sırasıyla uzama ve kayma şekil değiştirme bileşenleridir.

Sürekli ortamlarda herhangi bir noktadaki gerilme hali bu noktadan geçen ve birbirine dik üç düzlemdeki gerilme bileşenleri ile ifade edilmektedir. Buna göre (X_1, X_2, X_3) ortogonal (dik) koordinat sisteminde böyle üç düzlem düşünülürse gerilme tansörü

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, σ_{ii} ve τ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) sırasıyla normal ve kayma gerilmesi bileşenleridir.

1.4.2. Bünye Denklemleri

Bir nokta civarında gerilme tansörü bileşenlerini şekil değiştirme tansörü bileşenlerine bağlayan bağıntılara bünye denklemleri denir. Bu bağıntıları elde edebilmek için cismin elastik özelliklerini yansıtan bir model seçmek gerekir. Bir cismin üzerindeki dış kuvvetler kaldırıldığında cisim eski haline geliyorsa buna ideal elastik cisim denir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineer değiştiği malzemeye ise lineer elastik malzeme denir ve bunun için aşağıdaki bağıntı verilir:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

Bu bağıntı Hooke kanunu olarak da bilinir. (4) ifadesi açık olarak

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

şeklinde olup $C_{ij} = C_{ji}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) malzeme elastik sabitlerini göstermektedir. Ayrıca,

$\sigma_1 = \sigma_{11}$, $\sigma_2 = \sigma_{22}$, $\sigma_3 = \sigma_{33}$, $\sigma_4 = \tau_{23}$, $\sigma_5 = \tau_{13}$, $\sigma_6 = \tau_{12}$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{11}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{22}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_{33}$, $\varepsilon_4 = \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23}$, $\varepsilon_5 = \gamma_{13} = 2\varepsilon_{13}$, $\varepsilon_6 = \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}$ şeklinde tanımlıdır. (5) eşitliğinden görüleceği üzere genel anizotropik bir malzemede bağımsız elastik sabit sayısı 21 olmaktadır.

1.4.3. Elastik Simetri

Bir noktadaki elastik sabitler (C_{ij}) herhangi bir düzlem vasıtasıyla koordinat sisteminde simetrisi olacak şekilde değişmeden kalıyorsa, bu düzleme sözde o noktada bir elastik simetri düzlemi (veya malzeme düzlemi) denilir. Elastik simetri, bağımsız elastik sabitlerin sayısını azaltan bir özelliktir.

Cismin her bir noktasındaki elastik katsayılar belirli bir düzleme (örneğin $X_3 = 0$) göre simetrik herhangi iki doğrultuda aynı ise malzeme monoklinik olarak adlandırılır. Bu durumda bağımsız elastik sabitlerin sayısı 13'e düşmektedir. Monoklinik malzemede katsayılar matrisi $\mathbf{C}$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (6)$$

şeklinde olmaktadır.

Eğer cisimde birbirine dik üç simetri eksenine varsa, bu durumda ortotropik malzeme söz konudur. Böyle bir malzeme için bağımsız elastik katsayıların sayısı dokuz düşer. Buna göre, malzeme katsayılar matrisi $\mathbf{C}$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (7)$$

şeklinde yazılır. Burada elastik sabitler C_{ij} , elastisite modülü E_i , kayma modülü G_{ij} ve Poisson oranı ν_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) cinsinden

$$\begin{aligned}
C_{11} &= E_1 \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{\Delta}, \quad C_{22} = E_2 \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{\Delta}, \quad C_{33} = E_3 \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{\Delta}, \\
C_{12} &= E_1 \frac{\nu_{21} + \nu_{23}\nu_{31}}{\Delta} = E_2 \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{\Delta}, \\
C_{13} &= E_1 \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{\Delta} = E_3 \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{\Delta}, \\
C_{23} &= E_2 \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{\Delta} = E_3 \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{\Delta}, \\
C_{44} &= G_{23}, \quad C_{55} = G_{13}, \quad C_{66} = G_{12}
\end{aligned} \tag{8}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{13}\nu_{21}\nu_{32}$ şeklinde tanımlıdır. (8) ifadelerinde, E_i ($i=1,2,3$) sırasıyla 1, 2 ve 3 doğrultularındaki elastisite modüllerini, ν_{ij} ve G_{ij} ($i,j=1,2,3$) ise sırasıyla 2-3, 1-3, ve 1-2 düzlemlerindeki Poisson oranları ve kayma modüllerini göstermektedir. Ayrıca, ortotropik malzemede aşağıdaki bağıntı her zaman geçerlidir:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (i,j=1,2,3) \tag{9}$$

Bir yönde aynı özelliklere sahip olan (izotropik) ama diğer yönlerde farklı özellikler gösteren bir malzemeye enine izotrop malzeme denir. Bu malzemeler, belirli bir eksen etrafında döndürüldüğünde aynı özellikleri gösterir, ancak bu eksene dik doğrultularda farklı özellikler gösterirler. Örneğin, dönme eksen X_3 için malzeme katsayılar matrisi $\mathbf{C}$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{10}$$

şeklinde olmaktadır. Burada, $C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$ şeklindedir. Enine izotropik malzeme, ortotropik malzemenin özel bir durumu olup beş bağımsız sabitle tanımlanmaktadır.

Malzeme her doğrultuda simetriye sahip olduğunda izotropi söz konusudur. İzotrop malzeme için sıfır olmayan elastik sabitler C_{ij}

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu, \quad C_{12} = C_{13} = C_{23} = \lambda, \quad C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu \quad (11)$$

şeklindedir. Burada λ ve μ Láme sabitleri olup aşağıdaki gibi tanımlıdır:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (12)$$

1.4.4. Koordinat Dönüşümleri

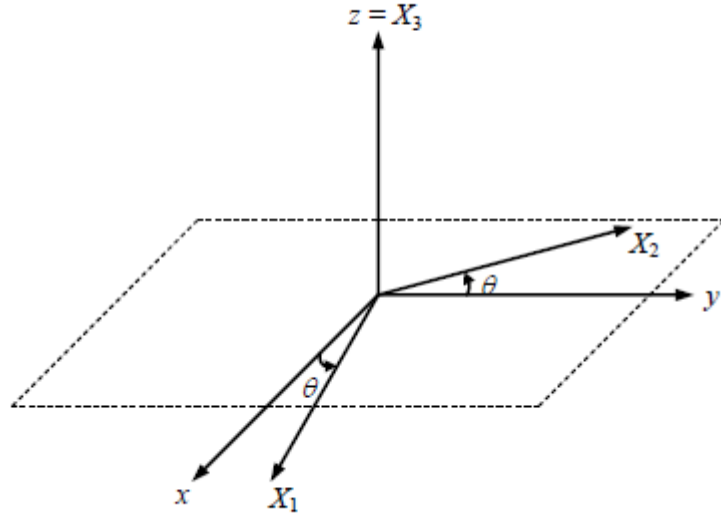
Önceki bölümde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları eleman koordinatlarında (malzeme asal doğrultuları) verilmiştir. Uygulamada sistem koordinatları ile eleman koordinatları her zaman çakışmayabilir. Bu durumda eleman koordinatları için verilen ifadelerin sistem koordinatlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Şekil 3'te malzeme koordinat eksenleri (X_1, X_2, X_3) sistem koordinat eksenlerine (x, y, z) göre $z = X_3$ olacak şekilde saatin tersi yönde θ kadar döndürüldüğünde iki koordinat sistemi arasında

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \mathbf{A} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (13)$$

bağıntısının mevcut olduğu görülür. Bu ifadeden

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = \mathbf{A}^T \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

elde edilir. Burada, $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T$ olarak tanımlıdır.



Şekil 3. Sistem (x, y, z) ve eleman (X_1, X_2, X_3) koordinatları

(13) ve (14) denklemleri ile verilen koordinat dönüşüm ilişkileri göz önüne alındığında iki koordinat sistemindeki gerilme bileşenleri arasında

$$\boldsymbol{\sigma}_m = \mathbf{A} \boldsymbol{\sigma}_p \mathbf{A}^T \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_p = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\sigma}_m \mathbf{A} \quad (16)$$

ilişkisinin olduğu görülür. Burada $\boldsymbol{\sigma}_m$ ve $\boldsymbol{\sigma}_p$ sırasıyla eleman ve sistem koordinatlarındaki gerilme tansörleri olup

$$\boldsymbol{\sigma}_m = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\sigma}_p = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (17)$$

şeklinde tanımlıdırlar. (15) ve (16) denklemleri açık yazılırsa

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n & m & 0 \\ mn & -mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

veya kısaca

$$\boldsymbol{\sigma}_m = \mathbf{R}\boldsymbol{\sigma}_p, \quad \boldsymbol{\sigma}_p = \mathbf{T}\boldsymbol{\sigma}_m \quad (20)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada, $m = \cos \theta$ ve $n = \sin \theta$ olarak tanımlıdır.

Şekil değiştirme bileşenleri

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}_p\mathbf{A}^T \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_p = \mathbf{A}^T\boldsymbol{\varepsilon}_m\mathbf{A} \quad (22)$$

şeklindedir. Burada $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ ve $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ eleman ve sistem koordinatlarındaki şekil değiştirme tansörleri olup

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_m &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{12} & \varepsilon_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{13} & \gamma_{23} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 2\varepsilon_{12} & 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} & 2\varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}, \\ \boldsymbol{\varepsilon}_p &= \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 2\varepsilon_{xy} & 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} & 2\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

şeklinde tanımlıdır. (21) ve (22) denklemlerinden

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -2mn & 2mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & -mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n & m & 0 \\ 2mn & -2mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (25)$$

eşitlikleri elde edilir. (24) ve (25) denklemleri ise

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{T}^T \boldsymbol{\varepsilon}_p, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_p = \mathbf{R}^T \boldsymbol{\varepsilon}_m \quad (26)$$

şeklinde yazılabilir. (4), (20) ve (26) denklemleri kullanılarak

$$\boldsymbol{\sigma}_p = \mathbf{T} \boldsymbol{\sigma}_m = \mathbf{T} \mathbf{C}_m \boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{T} \mathbf{C}_m \mathbf{T}^T \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (27)$$

eşitliği elde edilir. Burada, $\mathbf{C}_m$ eleman koordinatlarındaki elastik sabitler matrisini, $\mathbf{T}$ ise (20)'de tanımlanan dönüşüm matrisini göstermektedir.

Sistem koordinatlarında Hooke kanunu

$$\boldsymbol{\sigma}_p = \mathbf{C}_p \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (28)$$

şeklinde yazılır. (27) ve (28) ifadelerindeki $\mathbf{C}_m = \mathbf{C}$ ve $\mathbf{C}_p = \bar{\mathbf{C}}$ olmak üzere aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{TCT}^T \quad (29)$$

Bu ifade, eleman koordinatlarının $X_3 = z$ ekseninde θ kadar dönmesi durumunda kullanılacak yeni elastik sabitleri verir. Matris çarpımları yapılırsa

$$\begin{aligned}
\bar{C}_{11} &= C_{11}m^4 - 4C_{16}m^3n + 2(C_{12} + 2C_{66})m^2n^2 - 4C_{26}mn^3 + C_{22}n^4, \\
\bar{C}_{12} &= C_{12}m^4 - 2(C_{16} - C_{26})m^3n + (C_{11} + C_{22} - 4C_{66})m^2n^2 \\
&\quad + 2(C_{26} - C_{16})mn^3 + C_{12}n^4, \\
\bar{C}_{13} &= C_{13}m^2 - 2C_{36}mn + C_{23}n^2, \\
\bar{C}_{14} &= C_{14}m^3 + (C_{15} - 2C_{46})m^2n + (C_{24} - 2C_{56})mn^2 + C_{25}n^3, \\
\bar{C}_{15} &= C_{15}m^3 - (C_{14} + 2C_{56})m^2n + (C_{25} + 2C_{46})mn^2 - C_{24}n^3, \\
\bar{C}_{16} &= C_{16}m^4 + (C_{11} - C_{12} - 2C_{66})m^3n + 3(C_{26} - C_{16})m^2n^2 \\
&\quad + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})mn^3 - C_{26}n^4, \\
\bar{C}_{22} &= C_{22}m^4 + 4C_{26}m^3n + 2(C_{12} + 2C_{66})m^2n^2 + 4C_{16}mn^3 + C_{11}n^4, \\
\bar{C}_{23} &= C_{23}m^2 + 2C_{36}mn + C_{13}n^2, \\
\bar{C}_{24} &= C_{24}m^3 + (C_{25} + 2C_{46})m^2n + (C_{14} + 2C_{56})mn^2 + C_{15}n^3, \\
\bar{C}_{25} &= C_{25}m^3 + (-C_{24} + 2C_{56})m^2n + (C_{15} - 2C_{46})mn^2 - C_{14}n^3, \\
\bar{C}_{26} &= C_{26}m^4 + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})m^3n + 3(C_{16} - C_{26})m^2n^2 \\
&\quad + (C_{11} - C_{22} - 2C_{66})mn^3 - C_{16}n^4, \\
\bar{C}_{33} &= C_{33}, \quad \bar{C}_{34} = C_{34}m + C_{35}n, \quad \bar{C}_{35} = C_{35}m - C_{34}n, \\
\bar{C}_{36} &= (C_{13} - C_{23})mn + C_{36}(m^2 - n^2), \\
\bar{C}_{44} &= C_{44}m^2 + C_{55}n^2 + 2C_{45}mn, \\
\bar{C}_{45} &= C_{45}(m^2 - n^2) + (C_{55} - C_{44})mn, \\
\bar{C}_{46} &= C_{46}m^3 + (C_{56} + C_{14} - C_{24})m^2n + (C_{15} - C_{25} - C_{46})mn^2 - C_{56}n^3, \\
\bar{C}_{55} &= C_{55}m^2 + C_{44}n^2 - 2C_{45}mn, \\
\bar{C}_{56} &= C_{56}m^3 + (C_{15} - C_{25} - C_{46})m^2n + (C_{24} - C_{14} - C_{56})mn^2 + C_{46}n^3, \\
\bar{C}_{66} &= 2(C_{16} - C_{26})m^3n + (C_{11} + C_{22} - 2C_{12} - 2C_{66})m^2n^2 \\
&\quad + 2(C_{26} - C_{16})mn^3 + C_{66}(m^4 + n^4)
\end{aligned} \quad (30)$$

şeklinde dönüştürülmüş malzeme sabitleri matrisi elemanları elde edilir.

Ortotropik ve enine izotropik malzemeler için eleman koordinatlarının sistem koordinatları ile çakışmaması halinde bünye denkleminin

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & \bar{C}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{36} & 0 & 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

şeklinde monoklinik malzemeninkine benzer olacağını belirtmekte fayda vardır.

1.5. Hasar Tespitinde Titreşim Tabanlı Yöntemler

Titreşim tabanlı hasar tespit yöntemleri, ilk olarak havacılık ve makine mühendisliğinde geliştirilmiş ve uygulanmıştır. İnşaat mühendisliğinde ise 1980'lerin başından beri titreşim tabanlı hasar tespiti üzerinde çalışılmaktadır (Farrar vd., 2001). Titreşim tabanlı hasar tespitinde temel fikir, yapısal hasarın frekans, mod şekli ve sönüm gibi modal parametrelerde değişmeye sebep olacağıdır. Bu değişim incelenerek yapıda hasar gelişimi olup olmadığı, var ise nerede ve ne şiddette olduğu hakkında bilgi sahibi olunmaya çalışılmaktadır. Değişimin incelenmesi için titreşim parametrelerine bağlı birtakım bağıntılar göz önüne alınmaktadır. Bu bağıntılar hasar indeksi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde titreşim tabanlı hasar tespitinde en çok kullanılan hasar indeksleriyle ilgili kısa bilgi verilmiştir.

1.5.1. Frekans Değişimine Dayalı Hasar İndeksi

Frekans değişimine dayalı hasar tespitinde, farklı iki ölçümden elde edilen frekans değerleri karşılaştırılmaktadır. En basit ifadeyle frekans değişim oranı Δ

$$\Delta = \left| \frac{f^d - f^u}{f^d} \right| \quad (32)$$

şeklinde tanımlıdır. Burada f^d hasarlı duruma ait frekans değerlerini, f^u hasarsız duruma ait frekans değerlerini göstermektedir. Literatürde frekans değişimlerini gösteren farklı bağıntılar kullanılmıştır (Hao & Xia, 2002; Gomes vd., 2018a). Bu tez çalışması kapsamındaki incelemelerde, frekans değişimleri

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{f_i^d - f_i^u}{f_i^d} \right)^2} \quad (33)$$

kök ortalama kare hatası şeklinde dikkate alınmıştır. Burada nm dikkate alınan titreşim modu sayısıdır.

Frekans değişim oranları değerlendirilerek yapılarda hasarın varlığı (Seviye 1) kolayca belirlenebilmektedir. Ancak, yerel rijitlik değişimlerine karşı duyarsız olmaları, çevre koşullarından kolayca etkilenebilmeleri ve ölçümlerde elde edilecek sağlıklı frekans sayısının genellikle sınırlı olması nedeniyle sadece doğal frekanslara dayalı hasar indeksi kullanımı son yıllarda popülerliğini kaybetmiştir (Hou & Xia, 2021).

1.5.2. Mod Şekillerinin Değişimine Dayalı Hasar İndeksi

Mod şekilleri, her bir frekans için yapının modal yer değiştirmelerinin konumla değişimini gösteren titreşim parametreleridir. Mod şekilleri, frekanslara kıyasla çevresel koşullardan daha az etkilenebilmeleri, yerel rijitlik değişimlerine karşı hassas olmaları ve aynı zamanda hasar lokalizasyonu için kullanılabilecek koordinat bilgilerini içermeleri sebebiyle frekans değişimlerine göre daha avantajlı hale gelmektedir (Farrar & James, 1997).

İki duruma ait mod şekil vektörleri arasındaki korelasyonun değerlendirilmesinde Allemang & Brown (1982) tarafından geliştirilen Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) kullanılmaktadır. MAC aşağıdaki gibi tanımlıdır (Allemang, 2003; Heylen vd. 2007):

$$\text{MAC}(\Phi^d, \Phi^u) = \frac{|(\Phi^d)^T \Phi^u|}{((\Phi^d)^T \Phi^d)((\Phi^u)^T \Phi^u)} \quad (34)$$

Burada Φ^d ve Φ^u iki farklı duruma ait mod şekil vektörlerini göstermektedir. İfade görülen T üst indisi vektörün transpozisinin alınacağı anlamına gelmektedir. MAC matrisinin değerleri 0 ila 1 arasında değişmektedir. İki veri seti arasında korelasyon güçlüyse bu matrisin köşegen elemanlarının 1'e yaklaşması, diğerlerinin ise 0'a yaklaşması gerekir.

MAC, farklı durumlara ait mod şekil vektörleri arasındaki bütünsel benzerliği göstermektedir. Yapı üzerinde belli noktalarda farklı yöntemlerle elde edilen modal yer değiştirmeler arasındaki korelasyonu değerlendirmek için Koordinat Modal Güvence Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion, COMAC) kullanılmakta olup aşağıdaki gibi tanımlıdır (Allemang, 2003):

$$\text{COMAC}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{np} |(\phi_{ij}^d)^T (\phi_{ij}^u)|^2}{\left(\sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^d)^2 \right) \left(\sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^u)^2 \right)} \quad (i = 1, 2, \dots, nm) \quad (35)$$

Burada ϕ_{ij}^d , d durumuna ait j . mod şekil vektörünün i . serbestlik derecesine ait modal yer değiştirmeyi, ϕ_{ij}^u ise u durumuna ait j . mod şekil vektörünün i . serbestlik derecesine ait modal yer değiştirmeyi göstermektedir. nm dikkate alınan mod şekli sayısını, np ise mod şekil vektöründeki serbestlik derecesi sayısını ifade etmektedir. COMAC matrisinin değerleri 0 ila 1 arasında bir değere sahiptir. Bu değer sıfıra ne kadar yakınsa ilgili serbestlik derecesinde korelasyonu bozan bir durum (hasar) var olduğu anlamına gelir. Değerin 1'e yakın olması ise ilgili serbestlik derecesine ait uyumluluğa işaret etmektedir.

1.5.3. Mod Şekli Eğrilik Değişimine Dayalı Hasar İndeksi

Mod şekillerine alternatif olarak mod şekli eğriliği de hasar konumları hakkında bilgi sağlayan önemli bir titreşim parametresidir (Abdel Wahab & De Roek, 1999). Yerel rijitlik değişimlerine karşı mod şekillerinden çok daha hassastırlar. Mod şekli eğriliği, mod şeklinin ikinci türevi olarak tanımlanmakta ve merkezi fark yaklaşımı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Pandey vd., 1991):

$$\phi_{ji}'' = \frac{\phi_{(j+1)i} - 2\phi_{ji} + \phi_{(j-1)i}}{h^2} \quad (36)$$

Burada, ϕ_{ji}'' i . modun j . düğüm noktasına ait mod şekli eğriliğini, ϕ_{ji} i . modun j . düğüm noktasındaki modal yer değiştirmeyi, h ise koordinatlar arasındaki ortalama mesafeyi ifade etmektedir. Mutlak fark eğrilik vektörü ise hasarsız ve hasarlı durumlar için elde edilen mod şekli eğrilik vektörleri arasındaki mutlak fark alınarak hesaplanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta = |\phi_{ji}''^d - \phi_{ji}''^u| \quad (37)$$

Burada $\phi_{ji}''^d$ hasarlı mod şekli eğrilik vektörünü, $\phi_{ji}''^u$ hasarsız mod şekli eğrilik vektörünü, Δ ise mutlak fark eğrilik vektörünü göstermektedir. Mutlak fark eğrilik vektörünün grafiğinde ani yüksek değerlerin belirmesi ilgili koordinatta hasar olabileceği anlamına gelmektedir.

1.5.4. Esneklik Değişimine Dayalı Hasar İndeksi

Modal esneklik (*flexibility*), yapısal hasar tespiti için kullanılan bir başka modal parametredir. Esneklik, $\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1}$ şeklinde rijitliğin tersi olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği üzere, hasar doğrudan yapının rijitliği üzerinde azaltma yönlü etkilidir. Rijitliğe göre daha hassas olması ve ilk birkaç titreşim modu göz önüne alınarak kolayca elde edilebilmesi sebebiyle tercih edilen modal esneklik

$$\mathbf{F} = \mathbf{\Phi} \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{\Phi}^T = \sum_{i=1}^{np} \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (38)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Pandey & Biswas, 1994). Burada $\mathbf{\Phi} = [\phi_1 \ \phi_1 \ \dots \ \phi_{nm}]$ mod şekli matrisi, $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(\omega_i^2)$ modal rijitlik matrisi, ω_i i . doğal frekans olup np koordinat sayısıdır. Esneklik matrisinin her bir kolonu, inceleme konusu elemanın her bir serbestlik

derecesine uygulanan birim yükten dolayı ortaya çıkan düğüm noktası yer değiştirmelerini göstermektedir.

Eğer biri sağlam yapı için ve diğeri hasarlı yapı için olmak üzere iki ölçüm seti alınır ve modal parametreler bu ölçümlerden tahmin edilirse, o zaman esneklik matrisi bu iki durum için de elde edilebilir. Esneklik matrisinin her sütunu, serbestlik derecelerinden birine gelen birim kuvvet nedeniyle ortaya çıkan düğüm noktası yer değiştirmeleri kümesini temsil etmektedir. Modal esneklikteki değişim aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F}^d - \mathbf{F}^u \quad (39)$$

Burada $\mathbf{F}^d$ ve $\mathbf{F}^u$ sırasıyla hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen esneklik matrislerini göstermektedir. Her serbestlik derecesi j için $\bar{\delta}_j$, $\Delta \mathbf{F}$ matrisinin ilgili sütunundaki elemanlarından mutlak değerce en büyüğü olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\bar{\delta}_j = \max |\Delta F_{ij}| \quad (i=1, \dots, np) \quad (40)$$

Bir yapıda hasarı tespit etmek ve yerini belirlemek için her ölçüm yerinde esneklik değişiminin bir ölçüsü olarak yukarıda hesaplanan $\bar{\delta}_j$ değeri kullanılmaktadır.

1.6. Model İndirgeme

Bilgisayar hızı ve bellek kapasitesi her 18 ayda bir ikiye katlanmaya devam etse de (Moore yasası), bilgisayar depolama ve hız talebinin her zaman mevcut yetenekleri aşacağı olgusu, son yarım yüzyıl boyunca sonlu elemanlar analizinde tutarlı bir şekilde gösterilmiştir. Örneğin modern süper bilgisayarlar, 1.000.000 bilinmeyenli 1.000.000'dan fazla denklem içeren problemleri çözebilmesine rağmen yine de bazı mühendislerin ihtiyaçlarını karşılamaya yeterli değildir. Dahası, en yeni süper bilgisayarlar çoğu araştırmacı ve mühendisin kullanımına genellikle açık değildir.

Yapıların ve mekanik sistemlerin her geçen gün daha karmaşık hale gelmesi, mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) ve nano-elektromekanik sistemler (NEMS) gibi örnekler, tasarım, kontrol ve optimizasyon için sofistike simülasyon tekniklerini

gerektirmektedir. Bu sistemler genellikle birden fazla bağılı enerji alanı ve ortam (mekanik, elektrik, manyetik vb.) ile bazı doğrusal olmama durumlarını (kuvvet, geometri, malzeme vd.) içermektedir. Bu sistemlerin karmaşık doğası nedeniyle, sonlu elemanlar yönteminden elde edilen ayrık modellerin boyutu genellikle çok büyüktür. Modern süper bilgisayarlar bu boyuttaki mühendislik problemlerini çözebilse bile, tam modelin doğrudan kullanılması durumunda simülasyonlar son derece hesaplama yoğunluğu fazla ve zaman alıcı olacaktır.

Bu donanım sınırlamaları (bilgisayar depolama ve hız), hesaplama maliyeti ve zamanı bize tek bir gerçeği gösterir: Hesaplama tekniği, bilgisayar tekniği kadar önemlidir. Etkili hesaplama teknikleri, gereken bilgisayar depolama alanını ve zamanı önemli ölçüde azaltabilir. Sonlu eleman analizinde hesaplama işinin yaklaşık olarak problem boyutunun küpü ile orantılı olduğu bilinmektedir. Problemin boyutu azaltılırsa hesaplama işi de büyük ölçüde azaltılabilir. Bu nedenle, düşük mertebeli yani daha az serbestlik derecesine sahip doğru dinamik modelleri oluşturmak için etkili model indirgeme yöntemlerinin geliştirilmesi, son zamanlarda simülasyon ve modelleme araştırmalarının ana hedeflerinden biri haline gelmiştir.

Son birkaç on yıl içinde sonlu elemanlar yönteminde hem teoride hem de uygulamada büyük ilerlemeler kaydedilmiş; ADINA, ANSYS, IDEAS ve NASTRAN gibi birçok ticari yazılım modelleme ve analiz için mühendislerin ve araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Ancak, belirsiz parametreler (sınır şartlarının ve eleman bağlantılarının tanımlanması vb.) ve teorideki olası idealleştirmelerden dolayı sonlu eleman modellemesinin doğruluğu ve güvenilirliği büyük önem kazanmaktadır. Genellikle modal testlerden elde edilen deneysel sonuçlar, tasarım ve analiz aşamasında sonlu eleman modelini doğrulamak için kullanılır. Pratikte, yapı sistemlerinin karmaşıklığı ve test tekniklerindeki sınırlamalar nedeniyle modal testlerden elde edilen ölçüm verileri her zaman eksik olup; bu eksikliklerden en önemlisi ölçülen serbestlik dereceleri sayısının yetersiz olmasıdır. Genellikle ölçülen serbestlik derecesi sayısı, sonlu eleman modelindeki toplam serbestlik derecesi sayısından çok daha azdır. Bu iki model arasındaki uyumsuzluk, ya sonlu eleman modelini test modelinin boyutuna indirerek ya da test modelini sonlu eleman modelinin boyutuna genişleterek çözülebilir. Her iki durumda da bir model indirgeme tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Model indirgeme için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan Dinamik Yoğunlaştırma, model indirgeme için etkili bir yöntem olarak 1965 yılında önerilmiştir (Qu, 2004). Bu teknikte, sistemdeki toplam serbestlik dereceleri önce aktif

(tutulan) serbestlik dereceleri ve pasif (silinen) serbestlik dereceleri olmak üzere iki gruba ayrılır. Daha sonra, dinamik yoğunlaştırma matrisi veya dönüşüm matrisi ile bu iki serbestlik derecesi kümesi birbirine bağlanır. Bu dönüşüm matrisi, tam modelin sistem matrislerini sadece aktif serbestlik derecelerinin temsil edildiği boyuta indirgeyebilir. Tersine, bu matris ile bir modal testten elde edilen ölçüm verileri, tam sonlu eleman modelinin boyutuna genişletilebilir (Friswell, 1995). Diğer model indirgeme teknikleriyle karşılaştırıldığında, dinamik yoğunlaştırma ile elde edilen indirgenmiş modelde koordinatın fiziksel bir anlamı vardır. Bu özellik bazı uygulamalarda çok önemlidir.

Tez çalışması kapsamında bir sistemin dinamik karakteristikleri esas alındığından burada model indirgeme ile, verilen bir sonlu eleman modelini, bu sistemin dinamik karakteristiklerini koruyacak şekilde daha az serbestlik derecesine sahip yeni bir sistemle değiştirmek kastedilmektedir. Bunun için kullanılacak dinamik yoğunlaştırma tekniğinin titreşimle ilgili özellikleri kullanan tipte (modal tip dinamik yoğunlaştırma tekniği) olması gerekmektedir. Aşağıda, modal özellikler kullanılarak indirgeme yapılmasında kullanılan bazı teknikler hakkında kısa bilgi verilmiştir.

1.6.1. Guyan Yöntemi

Guyan veya statik indirgeme yöntemine ait formülasyonun türetilmesinde

$$\mathbf{KX} = \mathbf{f} \quad (41)$$

statik denge denklemi kullanılır. Burada $\mathbf{K}$ sistem rijitlik matrisini, $\mathbf{X}$ yer değiştirme (bilinmeyenler) vektörünü ve $\mathbf{f}$ kuvvet vektörünü göstermektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi sistem serbestlik dereceleri aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılarak (41) statik denge denklemi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_m \\ \mathbf{f}_s \end{Bmatrix} \quad (42)$$

Burada, m indisi aktif serbestlik derecelerini, s indisi pasif serbestlik derecelerini belirtmek için kullanılmıştır. (42) ifadesi açık olarak

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{mm}\mathbf{X}_m + \mathbf{K}_{ms}\mathbf{X}_s &= \mathbf{f}_m \\ \mathbf{K}_{sm}\mathbf{X}_m + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{X}_s &= \mathbf{f}_s \end{aligned} \quad (43)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ikinci ifadeden $\mathbf{X}_s$ çekilerek ilk ifadede yerine yazılır ve $\mathbf{F}_s = \mathbf{0}$ kabul edilirse, $\mathbf{X}$ yer değiştirme vektörü sadece aktif serbestlik derecelerine ait yer değiştirme bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sm} \end{Bmatrix} \mathbf{X}_m = \mathbf{T}_G \mathbf{X}_m \quad (44)$$

Bu ifadede

$$\mathbf{T}_G = \begin{Bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{ss}^{-1}\mathbf{K}_{sm} \end{Bmatrix} \quad (45)$$

Guyan koordinat dönüşüm matrisidir (Guyan, 1965). Burada $\mathbf{I}$ birim matrisi göstermektedir.

Sistemde enerjinin korunumu prensibi geçerli olduğundan 1 ve 2 durumları arasında genel enerji dengesi formülü

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{X}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{X}_1 = \frac{1}{2} \mathbf{X}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{X}_2 \quad (46)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadede $\mathbf{X}_1 = \mathbf{T}_{12} \mathbf{X}_2$ koordinat dönüşümü uygulanırsa

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} (\mathbf{T}_{12} \mathbf{X}_2)^T \mathbf{K}_1 (\mathbf{T}_{12} \mathbf{X}_2) = \frac{1}{2} \mathbf{X}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{X}_2 \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{X}_2^T (\mathbf{T}_{12}^T \mathbf{K}_1 \mathbf{T}_{12}) \mathbf{X}_2 = \frac{1}{2} \mathbf{X}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{X}_2 \end{aligned} \quad (47)$$

elde edilir. (47) ifadesinde iki taraftaki terimlerin eşitliğinden

$$\mathbf{K}_G = \mathbf{T}_G^T \mathbf{K} \mathbf{T}_G \quad (48)$$

şeklinde indirgenmiş modele ait rijitlik matrisi elde edilir. Aynı dönüşüm kullanılarak indirgenmiş kütle matrisi

$$\mathbf{M}_G = \mathbf{T}_G^T \mathbf{M} \mathbf{T}_G \quad (49)$$

formunda yazılır. (52) ve (53) ifadeleri açık olarak aşağıdaki gibi yazılabilirler (Guyan, 1965; Qu, 2004; Kim & Lee, 2014).

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_G &= \mathbf{K}_{mm} - \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \\ \mathbf{M}_G &= \mathbf{M}_{mm} + \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} - \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{M}_{sm} - \mathbf{M}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \end{aligned} \quad (50)$$

1.6.2. İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi (Improved Reduced System, IRS)

O'Callahan (1989), Guyan yöntemini esas alarak İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi (Improved Reduced System, IRS) olarak bilinen bir model indirgeme tekniğini geliştirmiştir. Sönümsüz bir sistem için dinamik denge denklemi

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{f} \quad (51)$$

şeklindedir. Bu ifade, aktif ve pasif serbestlik derecelerine göre tekrar düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_m \\ \ddot{\mathbf{X}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_m \\ \mathbf{f}_s \end{Bmatrix} \quad (52)$$

elde edilir. İfadenin sağ tarafındaki yük terimleri dikkate alınmaz ise, frekansı ω olan sinüzoidal bir hareket için

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} - \omega^2 \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \mathbf{X}_s = - \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{sm} - \omega^2 \mathbf{M}_{sm} \end{bmatrix} \mathbf{X}_m \quad (53)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifade yeniden düzenlenir ve binom teoremi kullanılırsa

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_s &= -[\mathbf{K}_{ss} - \omega^2 \mathbf{M}_{ss}]^{-1} [\mathbf{K}_{sm} - \omega^2 \mathbf{M}_{sm}] \mathbf{X}_m \\
&= -\mathbf{K}_{ss}^{-1} [\mathbf{I} - \omega^2 \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1}]^{-1} [\mathbf{K}_{sm} - \omega^2 \mathbf{M}_{sm}] \mathbf{X}_m \\
&= -\mathbf{K}_{ss}^{-1} [\mathbf{I} + \omega^2 \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} + o(\omega^4)] [\mathbf{K}_{sm} - \omega^2 \mathbf{M}_{sm}] \mathbf{X}_m \\
&= -\mathbf{K}_{ss}^{-1} [\mathbf{K}_{sm} + \omega^2 (\mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} - \mathbf{M}_{sm}) + o(\omega^4)] \mathbf{X}_m,
\end{aligned} \tag{54}$$

elde edilir. Burada $o(\omega^4)$ ile ω^4 mertebesinde hata gösterilmektedir. Statik indirgeme temel alınarak indirgenmiş model aşağıdaki ifadeleri sağlamaktadır:

$$\omega^2 \mathbf{M}_G \mathbf{X}_m = \mathbf{K}_G \mathbf{X}_m \quad \text{veya} \quad \omega^2 \mathbf{X}_m = \mathbf{M}_G^{-1} \mathbf{K}_G \mathbf{X}_G \tag{55}$$

(54) ifadesinde ω^4 ve daha yüksek mertebedeki hata terimleri ihmal edildiğinde

$$\mathbf{X}_s = [-\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} + \mathbf{K}_{ss}^{-1} (\mathbf{M}_{sm} - \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm}) \mathbf{M}_G^{-1} \mathbf{K}_G] \mathbf{X}_m \tag{56}$$

şeklinde koordinat dönüşüm bağıntısına ulaşılır. Buna göre IRS için koordinat dönüşüm matrisi $\mathbf{T}_{IRS}$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{T}_{IRS} = \mathbf{T}_G + \mathbf{S} \mathbf{M}_G^{-1} \mathbf{K}_G \tag{57}$$

Burada

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{ss}^{-1} \end{bmatrix} \tag{58}$$

olarak tanımlıdır. Buna göre, indirgenmiş kütle ve rijitlik matrisleri aşağıdaki gibi yazılırlar:

$$\mathbf{M}_{IRS} = \mathbf{T}_{IRS}^T \mathbf{M} \mathbf{T}_{IRS}, \quad \mathbf{K}_{IRS} = \mathbf{T}_{IRS}^T \mathbf{K} \mathbf{T}_{IRS} \tag{59}$$

1.6.3. Yinelemeli İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi (Iterated Improved Reduced System, IIRS)

(61) ifadesi, statik indirgeme ile elde edilen kütle ve rijitlik matrislerini kullandığından IRS yönteminin hassasiyetini arttırmak amacıyla Friswell vd. (1995) tarafından Yinelemeli İyileştirilmiş İndirgenmiş Sistem (Iterated Improved Reduced System, IIRS) adı verilen bir süreç önerilmiştir. Buna göre, ilk iterasyonda (57) ifadesi kullanılır. Sonraki iterasyonlarda ise

$$\mathbf{T}_{IRS,i+1} = \mathbf{T}_G + \mathbf{SMT}_{IRS,i} \mathbf{M}_{IRS,i}^{-1} \mathbf{K}_{IRS,i} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (60)$$

ifadesi ile koordinat dönüşüm matrisleri yenilenerek işleme devam edilir.

1.6.4. Eşdeğer Sisteme İndirgeme ve Genişletme Tekniği (System Equivalent Reduction and Expansion Process, SEREP)

Eşdeğer Sisteme İndirgeme ve Genişletme Tekniği (System Equivalent Reduction and Expansion Process, SEREP), O'Callahan vd. (1989) tarafından analitik ve deneysel modal vektörler arasında çapraz-ortogonalite kontrolü, lineer ve lineer olmayan zorlanmış tepki çalışmaları ve analitik model iyileştirmesinde kullanılmak üzere önerilmiştir. n serbestlik dereceli bir sistemde (59) denkleminin çözümü

$$\mathbf{X} = \Phi \mathbf{q} \quad (61)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada Φ mod şekilleri matrisini, $\mathbf{q}$ genelleştirilmiş koordinatları göstermektedir. p sayıda mod için koordinat dönüşüm denklemi

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_{mp} \\ \Phi_{sp} \end{Bmatrix} \mathbf{q}_p \quad (62)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadeden

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_m &= \Phi_{mp} \mathbf{q}_p \\ \mathbf{X}_s &= \Phi_{sp} \mathbf{q}_p \end{aligned} \quad (63)$$

şeklinde iki koordinat dönüşüm denkleminin eşdeğeridir. (63) ifadesinin ilk denklemindeki Φ_{mp} matrisi genellikle kare matris değildir. m ve p değerlerine göre iki çözüm elde edilir:

$m \geq p$ durumu. Bu durumda denklem sayısı (m) bilinmeyen sayısına (p) eşit veya ondan fazladır. Çözüm için (63) ifadesinin ilk denkleminde her iki taraf Φ_{mp}^T ile çarpılsın:

$$\Phi_{mp}^T \mathbf{X}_m = \Phi_{mp}^T \Phi_{mp} \mathbf{q}_p \quad (64)$$

Bu ifadede $\mathbf{q}_p$ vektörünün önündeki matris çarpımından bir kare matris edilecektir. (64) ifadesinden çözüm

$$\mathbf{q}_p = (\Phi_{mp}^T \Phi_{mp})^{-1} \Phi_{mp}^T \mathbf{X}_m = \Phi_{mp}^+ \mathbf{X}_m \quad (65)$$

olarak elde edilir. Burada Φ_{mp}^+ genelleştirilmiş ters matrisi göstermekte olup

$$\Phi_{mp}^+ = (\Phi_{mp}^T \Phi_{mp})^{-1} \Phi_{mp}^T \quad (m \geq p) \quad (66)$$

şeklinde tanımlıdır (Penrose, 1954). $m = p$ için $\Phi_{mm}^+ = \Phi_{mm}^{-1}$ olacaktır.

$m < p$ durumu. Denklem sayısının bilinmeyen sayısından az olması durumu için çözüm bulmak, m değişken kümesinin p sistem değişkenlerine projeksiyonunu gerektirir. Buna göre

$$\tilde{\mathbf{q}}_p = \Phi_{mp}^T \mathbf{q}_m \quad (67)$$

yazılsın. Burada $\mathbf{q}_m$ yaklaşık çözüm vektörünü ifade etmektedir. (67) ifadesi (63) ifadesinin ilk denkleminde yazılırsa

$$\mathbf{X}_m = \mathbf{\Phi}_{mp} \mathbf{\Phi}_{mp}^T \mathbf{q}_m \quad (68)$$

elde edilir. Buradan

$$\mathbf{q}_m = (\mathbf{\Phi}_{mp} \mathbf{\Phi}_{mp}^T)^{-1} \mathbf{X}_m \quad (69)$$

eşitliğine ulaşılır. Bu eşitlik (67) ifadesinde yazılırsa

$$\tilde{\mathbf{q}}_p = \mathbf{\Phi}_{mp}^T (\mathbf{\Phi}_{mp} \mathbf{\Phi}_{mp}^T)^{-1} \mathbf{X}_m = \mathbf{\Phi}_{mp}^+ \mathbf{X}_m \quad (70)$$

elde edilir. Burada genelleştirilmiş ters matris $\mathbf{\Phi}_{mp}^+$

$$\mathbf{\Phi}_{mp}^+ = \mathbf{\Phi}_{mp}^T (\mathbf{\Phi}_{mp} \mathbf{\Phi}_{mp}^T)^{-1} \quad (m < p) \quad (71)$$

şeklinde tanımlıdır.

(65) ve (69) çözümleri (61) ifadesiyle birlikte ele alındığında koordinat dönüşümü için

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_m \\ \mathbf{X}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{\Phi}_{mp} \\ \mathbf{\Phi}_{sp} \end{Bmatrix} \mathbf{\Phi}_{mp}^+ \mathbf{X}_m = \mathbf{T}_{SEREP} \mathbf{X}_m \quad (72)$$

eşitliği elde edilir. Burada

$$\mathbf{T}_{SEREP} = \begin{Bmatrix} \mathbf{\Phi}_{mp} \mathbf{\Phi}_{mp}^+ \\ \mathbf{\Phi}_{sp} \mathbf{\Phi}_{mp}^+ \end{Bmatrix} \quad (73)$$

koordinat dönüşüm matrisini göstermektedir. İndirgenmiş kütle ve rijitlik matrisleri ise aşağıdaki formda olacaktır:

$$\mathbf{M}_{SEREP} = \mathbf{T}_{SEREP}^T \mathbf{M} \mathbf{T}_{SEREP}, \quad \mathbf{K}_{SEREP} = \mathbf{T}_{SEREP}^T \mathbf{K} \mathbf{T}_{SEREP} \quad (74)$$

1.7. Optimizasyon Algoritmaları

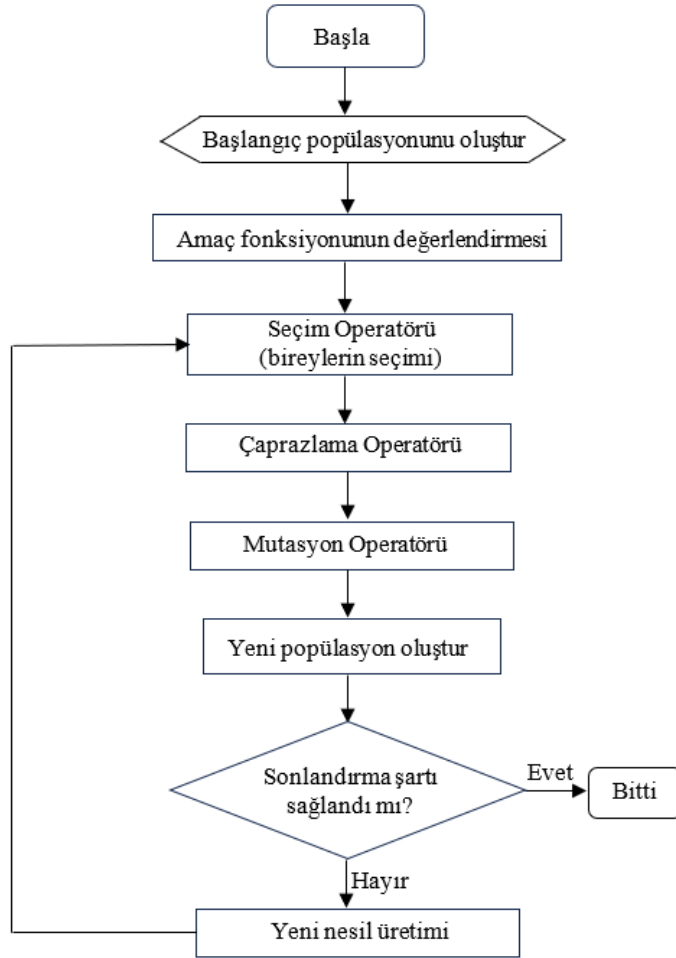
1.7.1. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA)

Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA), John Holland tarafından 1975 yılında geliştirilmiş ve bilgisayar uygulamalarında yaygın olarak kullanılan en popüler meta-sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biridir. Daha sonraki yıllarda, özellikle Goldberg (1989) gibi araştırmacılar GA üzerinde önemli çalışmalar yapmışlardır. Bu algoritma, doğal evrim sürecini taklit ederek en uygun olanın hayatta kalma prensibine dayanmaktadır. Literatürde genellikle Evrimsel Hesaplama tekniği olarak da adlandırılan GA, doğal evrimin matematiksel bir simülasyonudur.

GA ile optimizasyonda, amaç fonksiyonu geleneksel optimizasyon yöntemleri ile aynıdır. Ancak, probleme çözüm olabilecek bireylerden oluşan bir topluluk üzerinde birtakım operatörler gerçekleştirilerek yerel optimumdan kaçınıp global optimum çözüme ulaşma stratejileri uygulanır. İlk adım, rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturmaktır. Bu popülasyon, her biri problemi temsil eden gerçek sayılarla kodlanmış bireylerden oluşur. Her bireyin ne kadar iyi veya kötü olduğunu belirlemek için amaç fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon ile bireylerin probleme ne kadar iyi çözüm oluşturduğu ölçülür ve bir değer üretilir. Bir bireyin uyumluluğu, bireyin amaç fonksiyonu ve sınırlayıcılar arasındaki dengesiyle ifade edilmektedir.

Seçim operatörü (selection), bireylerin uyumluluklarına göre seçim yapar ve en uygun bireylerin gelecek nesle daha fazla olasılıkla aktarılmasını sağlar. Bu, doğal seleksiyon ilkesine benzemektedir. Daha sonra ise uyumluluğu düşük bireyler popülasyondan çıkarılır. Bu süreçte bireyler arasında eşleşme havuzları oluşturulur ve genetik operatörler olan çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) kullanılarak yeni bireyler üretilir.

Çaprazlama, eşleşme havuzundaki her birey çiftinin çaprazlama noktası denilen kısımlardan parçalanıp, bu parçaların eşler arasında karşılıklı değiştirilmesi olayıdır. Bu, yeni bireylerin oluşturulması için çeşitlilik sağlar. Genler çaprazlanır ve yeni bireyler oluşturulur. Yeni oluşturulan bireyler, belirli bir olasılıkla mutasyona uğratılır. Mutasyon operatörü de devreye girdikten sonra eski bireylerden yeni bir nesil oluşturulmuş olur. Bunun amacı, popülasyondaki çeşitliliği artırarak potansiyel olarak daha iyi çözümlere ulaşılmasını sağlamaktır. GA akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Genetik Algoritma akış diyagramı

1.7.2. Armoni Arama Algoritması (Harmony Search Algorithm, HSA)

Armoni Arama Algoritması (Harmony Search Algorithm, HSA), doğal optimizasyon süreçlerinden esinlenen, meta-sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. 2001 yılında Geem vd. (2001) tarafından geliştirilen bu algoritma, müzikal armoni oluşturma sürecini temel alır. Müzisyenlerin armoni yaratırken en iyi uyumu sağlamak için çeşitli notaları nasıl denediklerine benzer şekilde, HSA da optimizasyon problemlerinde en iyi çözüme ulaşmak için farklı çözüm kombinasyonlarını dener. Bu yöntem, mühendislik, ekonomi ve yapay zekâ gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmış olup, özellikle karmaşık ve büyük çaplı optimizasyon problemlerinde etkili sonuçlar vermesiyle dikkat çekmektedir. HSA'nın adaptif doğası ve kolay uygulanabilirliği, onu çeşitli araştırma ve endüstri projelerinde popüler bir araç haline getirmiştir (Değertekin, 2011).

Bir müzisyen doğaçlama yaparken üç olası seçeneği vardır: (1) hafızasında bulunan bir ünlü müzik parçasını (uyum içinde olan bir dizi perde) çalmak; (2) bilinen bir parçaya benzer bir şey çalmak (dolayısıyla perdeyi biraz ayarlamak); veya (3) yeni veya rastgele notalar bestelemek. Bu prensipten ilham alınarak geliştirilen HSA'da da yeni bir armoni oluşturma süreci şu üç kurala göre gerçekleşmektedir: (i) armoni hafızasının kullanımı, (ii) perde ayarlaması ve (iii) rastgele üretim (randomizasyon) (Geem vd., 2001; Yang, 2009).

HSA ile bir optimizasyon probleminin çözümünde aşağıdaki adımlar uygulanmaktadır (Tuo vd., 2013):

1. Optimizasyon probleminin ve algoritma parametrelerinin tanımlanması.

Optimizasyon problemi, matematik olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & F(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} = (x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_N) \\ & x_i \in [x_i^L, x_i^U] \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (75)$$

Burada $F(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonunu, $\mathbf{x}$ tasarım değişkeni kümesini, x_i^L ve x_i^U tasarım değişkenlerinin alabileceği alt ve üst sınır değerleri ve N tasarım değişkeni sayısını göstermektedir. HSA optimizasyon parametreleri; HMS: armoni belleği boyutu veya popülasyondaki çözüm vektörlerinin sayısı, HMCR: armoni belleğini dikkate alma oranı, PAR: perde (tını) ayarlama oranı, BW: bant genişliği ve MaxIt: maksimum iterasyon sayısı olup HMCR ve PAR, çözüm vektörünü iyileştirmek için kullanılan parametrelerdir.

2. Armoni belleğinin oluşturulması.

Armoni belleği (HM), HMS adet armoni vektörünü içeren bir matristir. Her bir armoni vektörü çözüm uzayında doğrusal dağılım gösterecek şekilde aşağıdaki kurala göre rastgele üretilir:

$$x_i^j = x_i^L + (x_i^U - x_i^L) \times \text{rand}(), \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, \text{HMS} \quad (76)$$

Burada $\text{rand}()$ 0 ila 1 arasında değişen rastgele bir sayıdır. HM matrisinin satırları her bir satırdaki çözüm vektörüne karşılık gelen amaç fonksiyonu değerine göre sıralanır. Bu şekilde oluşturulan HM matrisi aşağıdaki formda olur:

$$HM = \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^{HMS-1} \\ x^{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (77)$$

3. Yeni bir armoni oluşturulması.

Yeni armoni vektörü, Algoritma 1 ile verilen kod bloğuna göre oluşturulur. Burada yapılan işlem, standart evrimsel algoritmalarındaki (EA) mutasyon ve çaprazlama operatörüne eşdeğerdir.

4. Armoni belleğinin güncellenmesi.

HM matrisindeki en kötü vektör $\mathbf{x}^{worst}$ ile yeni üretilen armoni vektörü $\mathbf{x}^{new}$ amaç fonksiyonu değeri açısından karşılaştırılır. Eğer, $F(\mathbf{x}^{new}) < F(\mathbf{x}^{worst})$ ise $\mathbf{x}^{worst}$ HM'den atılarak yerine $\mathbf{x}^{new}$ koyulur. Ardından HM, amaç fonksiyonu değerlerine göre yeniden sıralanır.

5. Sonlandırma kriteri kontrolü.

Eğer verilen sonlandırma kriteri sağlanıyorsa işleme son verilir; aksi takdirde 3. ve 4. Adımlar tekrarlanır.

Algoritma 1. Armoni Arama Algoritması ile yeni armoni vektörünün oluşturulması

```

For  $i = 1$  to  $N$  do
  If  $\text{rand}() \leq \text{HMCR}$ 
    Kural 1. HM içerisinde rastgele bir eleman seç
     $x_i^{new} = x_i^j, \quad j = 1, 2, \dots, \text{HMS} \quad (j \text{ rastgele bir tam sayı})$ 
    If  $\text{rand}() \leq \text{PAR}$ 
      Kural 2. Perde (tını) ayarlaması
       $x_i^{new} = x_i^{new} \pm \text{rand}() \times \text{BW}$ 
       $x_i^{new} = \min(\max(x_i^{new}, x_i^L), x_i^U)$ 
    End If
  Else
    Kural 3. Rastgele bir eleman oluştur
     $x_i^{new} = x_i^j = x_i^L + (x_i^U - x_i^L) \times \text{rand}()$ 
  End If
End For

```

HSA, çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde etkili bir şekilde kullanılmıştır. Karar değişkenleri için özel bir başlangıç çözümü gerektirmemesi, birden fazla çözümle optimizasyon işlemine devam ederek birçok yönde genel optimum çözümü arayabilmesi ve böylece yerel optimum çözümlerden kurtulabilmesi ve hem sürekli hem de ayırık değişkenler kullanabilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarıdır (Lee & Geem, 2005; Mahdavi vd., 2007; Xin-She Yang, 2009; Özyön vd., 2011, Manjarres vd., 2013).

1.7.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), doğada gözlemlenen bir grup davranışını taklit eden ve optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir meta-sezgisel algoritmadır. PSO, ilk olarak Kennedy & Eberhart (1995) tarafından önerilmiştir. Algoritma, bir grup potansiyel çözüm adayının (parçacıkların) problem uzayında hareket ederek en iyi çözümü bulmaya çalıştığı kolektif bir optimizasyon yaklaşımı sunar. Her parçacık, mevcut konumunu ve bu konumda elde edilen en iyi sonucu hatırlayarak hareket eder. Her iterasyonda, parçacıklar kendi hızlarını ve hareket yönlerini problemdeki diğer parçacıkların performansına dayanarak günceller. PSO, genellikle basit yapısı ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle karmaşık optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

PSO, bir grup rastgele çözümle yani parçacık sürüsü ile başlatılır ve güncellemelerle optimum çözüm bulunmaya çalışılır. Her iterasyonda, parçacık konumları, en iyi iki değere göre güncellenir. Bunlardan ilki “*pbest*” olarak adlandırılan ve o ana kadar parçacığın elde ettiği en iyi çözümü sağlayan koordinatlardır ve bunlar hafızada saklanmalıdır. İkinci en iyi değer ise “*gbest*” olarak adlandırılan ve popülasyonda o ana kadar tüm parçacıklar tarafından elde edilen en iyi çözümü sağlayan koordinatlar olup global en iyi değeri gösterir.

PSO sürecinde üretilen popülasyon parçacık matrisi aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n1} & \dots & \dots & x_{nD} \end{bmatrix}_{n \times D} \quad (78)$$

Burada i . parçacığın konumu $\mathbf{x}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{iD}]$ ile, önceki en iyi değeri veren i . parçacığın konumu ise $pbest_i = [p_{i1} \ p_{i2} \ \cdots \ p_{iD}]$ ile ifade edilir. $gbest$ ise her iterasyonda tüm parçacıklar için tektir ve $gbest = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_D]$ şeklinde gösterilir. i . parçacığın hızı, yani her boyuttaki konumunun değişim miktarı ise $v_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \cdots \ v_{iD}]$ ile gösterilir. En iyi iki değer bulunmasından sonra parçacık hızları ve konumları aşağıdaki şekilde güncellenir:

$$v_i^{k+1} = W \cdot v_i^k + \underbrace{c_1 \cdot rand_1^k \cdot (pbest_i^k - x_i^k)}_{\text{Bilişsel}} + \underbrace{c_2 \cdot rand_2^k \cdot (gbest^k - x_i^k)}_{\text{Sosyal}} \quad (79)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (80)$$

Bu ifadelerde, W ağırlık terimi, $rand_1$ ve $rand_2$ 0 ile 1 arasında düzgün dağılan rastgele sayılar, k iterasyon sayısı, c_1 ve c_2 ise sırasıyla bilişsel (cognitive) ve sosyal (social) ölçekleme parametreleridir. c_1 , parçacığın kendi tecrübelerine göre hareket etmesini, c_2 ise sürüdeki diğer parçacıkların tecrübelerine göre hareket etmesini sağlar. Bu parametreler için düşük değerler seçilmesi parçacıkların hedef bölgeye doğru ilerlerken buradan daha uzak yerlerde dolaşmalarına imkân verirken, hedefe ulaşma süresini uzatabilir. Diğer yandan, yüksek değerler seçilmesi ise hedefe ulaşmayı hızlandırırken, beklenmedik hareketlerin oluşmasına ve hedef bölgenin es geçilmesine sebebiyet verebilir. Bu algoritma üzerinde araştırmacıların yaptığı denemelerde $c_1 = c_2 = 2$ olarak alınmasının iyi sonuçları verdiği belirtilmiştir.

1.7.4. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (Teaching-Learning-Based Optimization, TLBO)

Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization, TLBO) algoritması, doğal öğretim ve öğrenme süreçlerinden esinlenerek geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Rao vd. (2011) tarafından önerilen TLBO, eğitim sürecinde öğretmenlerin ve öğrencilerin etkileşimlerini model alır. Algoritmanın temel prensibi, bir sınıf ortamında öğrencilerin bilgi seviyelerini artırmak için öğretmenlerin rehberliğinde ve öğrenci-öğrenci etkileşimleriyle öğrenim sürecinin nasıl geliştiğini taklit

etmektedir. TLBO, öğretim ve öğrenim aşamaları olmak üzere iki ana aşamadan oluşur. İlk aşamada, öğretmen öğrencilere bilgi aktarır ve genel performanslarını iyileştirir. İkinci aşamada ise öğrenciler, birbirleriyle bilgi paylaşarak ve iş birliği yaparak bilgi seviyelerini daha da artırır. TLBO algoritması, mühendislik, makine öğrenimi ve yapay zekâ gibi çeşitli alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, özellikle karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerinde etkinliği ile öne çıkmaktadır.

Öğretme aşamasında, tüm popülasyondaki en iyi çözüm öğretmen olarak kabul edilir ve öğretmen, sınıfın ortalama sonucunu artırmak için bilgilerini öğrencilere aktarır. i . öğrenciyi temsil eden çözüm vektörü $\mathbf{x}_i = (x_i^1 \ x_i^2 \ \dots \ x_i^D)$ ($i = 1, 2, \dots, NP$) olmak üzere, sınıftaki en iyi öğrenci, öğretmen $\mathbf{x}_{teacher}$ olarak atanır. Burada NP popülasyon büyüklüğünü ve D değişken (ders konuları) sayısını temsil etmektedir. Öğretme aşamasında bilginin aktarımı süreci aşağıdaki matematik işlemlerle gerçekleştirilir.

$$\mathbf{x}_i^{new} = \mathbf{x}_i^{old} + \mathbf{rand} \cdot (\mathbf{x}_{teacher} - T_F \cdot \mathbf{x}_{mean}) \quad (81)$$

Bu ifadede,

$$\mathbf{x}_{mean} = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} \mathbf{x}_i \quad (82)$$

tüm öğrencilerin ortalama bilgi seviyesini ve **rand** 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir vektörü göstermektedir. T_F öğretim faktörü olup

$$T_F = \text{round}(1 + \text{rand}(1, D)) \quad (83)$$

şeklinde değeri 1 veya 2 olan bir katsayıdır. Eğer $\mathbf{x}_i^{new}$, $\mathbf{x}_i^{old}$ çözümünden daha iyiye se bu muhafaza edilir, diğeri atılır.

Öğrenci aşamasında, bir öğrenci performansını daha da geliştirmek için rastgele olarak diğ öğrencilerle etkileşime girer. Öğrenci $\mathbf{x}_i$ ile rastgele seçilen başka bir öğrenci $\mathbf{x}_j$ ($j \neq i$) arasındaki öğrenme süreci aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$\mathbf{x}_i^{new} = \begin{cases} \mathbf{x}_i^{old} + \mathbf{rand} \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j), & F(\mathbf{x}_i) \leq F(\mathbf{x}_j) \\ \mathbf{x}_i^{old} + \mathbf{rand} \cdot (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i), & F(\mathbf{x}_i) > F(\mathbf{x}_j) \end{cases} \quad (84)$$

Burada, $F(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonunu göstermektedir. Eğer $\mathbf{x}_i^{new}$, $\mathbf{x}_i^{old}$ çözümünden daha iyiye bu muhafaza edilerek, diğer vektör atılır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Tez çalışması kapsamında, tabakalı kompozit kirişlerde titreşim verileri kullanılarak hasar tespiti için bir yöntem önerilmesi amacıyla yönelik olarak sırasıyla;

1. Sayısal modelleme için tabakalı kompozit kiriş sonlu elemanının geliştirilmesi,
2. Dört klasik optimizasyon algoritmasıyla (Genetik Algoritma, Armoni Arama Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ve Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması) hasar tespit probleminin bir optimizasyon problemi olarak modellenmesi,
3. Önerilen yöntemin doğrulanması ve parametrik çalışma

adımları yürütülmüştür. Bu bölümde yukarıda bahsedilen ilk iki adıma ait formülasyon sunulmuştur.

2.2. Sonlu Eleman Modeli

2.2.1. Kinematik Bağıntılar ve Bünye Denklemleri

N tabakalı kompozit kirişin geometrisi ve koordinat eksenlerinin yerleşimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Kirişte tabaka kalınlıkları eşit olup, kesiti dikdörtgendir. Birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi esas alınarak yer değiştirme alanı

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0(x, t) + z\theta(x, t), \\ v(x, z, t) &= z\psi(x, t), \\ w(x, z, t) &= w_0(x, t) \end{aligned} \tag{85}$$

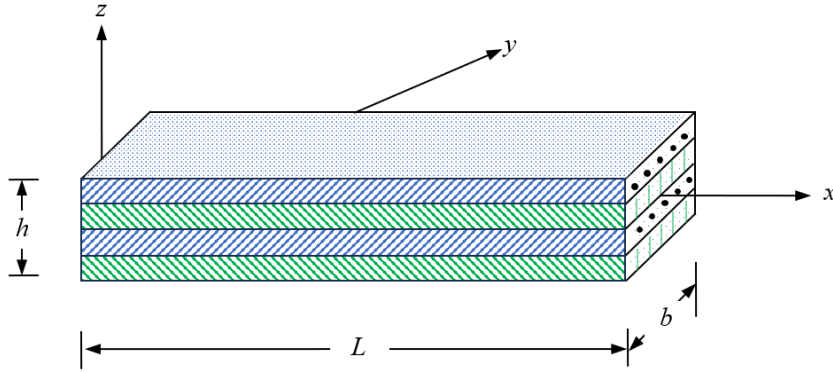
şeklinde kabul edilsin. Burada, u , v ve w kirişin herhangi bir noktasında sırasıyla x , y ve z doğrultusundaki yer değiştirme bileşenlerini, u_0 ve w_0 sırasıyla $z = 0$ 'da ölçülen yatay ve düşey yer değiştirmeleri, θ ve ψ kiriş orta düzlemine ait normalin y ve x eksenleri etrafında dönmesini ve t zamanı göstermektedir. (85) ifadesinde görülen yer değiştirme bileşenleri

Şekil 6’da gösterilmiştir. Yer değiştirme alanı bu şekilde kabul edilerek kirişte kesme kuvveti ve dönel ataletin eğilmeye etkisi ile malzeme anizotropisi sebebiyle eğilme, uzama ve burulma deformasyonları arasında ortaya çıkan etkileşimler hesaba katılabilmektedir.

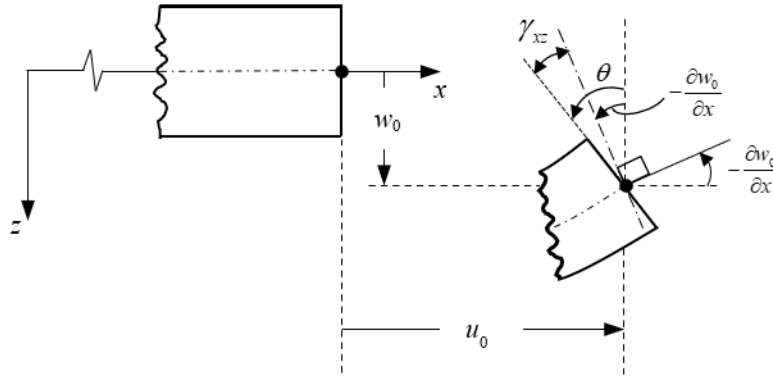
(85) ifadeleriyle verilen yer değiştirme alanına göre şekil değiştirme-yer değiştirme bağıntıları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= u_{,x} = \varepsilon_x^0 + z\kappa_x, \\ \gamma_{xz} &= u_{,z} + w_{,x} = w_{0,x} + \theta, \\ \gamma_{xy} &= u_{,y} + v_{,x} = z\kappa_{xy}\end{aligned}\quad (86)$$

Burada, $\varepsilon_x^0 = u_{0,x}$, $\kappa_x = \theta_{,x}$ ve $\kappa_{xy} = \psi_{,x}$ şeklinde tanımlı olup sırasıyla normal şekil değiştirme ve eğrilikleri göstermektedirler. $(\)_{,x}$ ile x değişkenine göre türevi ifade edilmektedir.



Şekil 5. Tabakalı kompozit kirişin geometrisi ve koordinat takımının yerleşimi



Şekil 6. Kompozit kirişte kinematik büyüklükler (Reddy, 1997)

Kompozit kirişte k . tabaka için bünye denklemleri (gerilme – şekil değiştirme bağıntıları) (Reddy, 1997):

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (87)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_{yz} \\ Q_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{44} & A_{45} \\ A_{45} & A_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

şeklindedir. Burada N ve M ile gösterilen terimler sırasıyla kiriş düzlemindeki kuvvet bileşenleri ile eğilme ve burulma momentlerini, Q ile gösterilen terimler kesme kuvveti bileşenlerini, ε ve γ sırasıyla normal ve kayma şekil değiştirme bileşenlerini, κ eğrilik bileşenlerini göstermektedir. Malzeme rijitlik matrisinin elemanları olan A , B ve D ise şu şekilde verilmektedir:

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \sum_{k=1}^N \int_{z^k}^{z^{k+1}} \bar{Q}_{ij}^k(1, z, z^2) dz \quad (i = j = 1, 2, 6), \quad (88)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N K \int_{z^k}^{z^{k+1}} \bar{Q}_{ij}^k dz \quad (i = j = 4, 5)$$

Burada K kesmede düzeltme katsayısı olup dikdörtgen kesitler için $K = 5/6$ 'dır. $\bar{Q}_{ij}^k$, k . tabaka için malzeme rijitlik sabitleri olup aşağıda tanımlanmışlardır:

$$\bar{Q}_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad \bar{Q}_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad \bar{Q}_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (89)$$

$$\bar{Q}_{44} = G_{23}, \quad \bar{Q}_{55} = G_{13}, \quad \bar{Q}_{66} = G_{12}$$

Kirişin sadece orta düzlemine dik kuvvetler etkisinde olduğu kabul edildiğinden, yan yüzlerde N_y , N_{xy} , Q_{yz} kuvvetleri ile M_y momenti sıfır olacaktır. Bununla beraber,

Poisson etkisi sebebiyle bu kuvvetlere karşılık şekil değiştirme bileşenleri $(\varepsilon_y^0, \gamma_{yz}, \kappa_y)$ ise sıfır olmaz. Bu durum hesaba katılırsa (87) ifadeleri aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenir:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ M_x \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{B}_{11} & \bar{B}_{16} \\ \bar{B}_{11} & \bar{D}_{11} & \bar{D}_{16} \\ \bar{B}_{16} & \bar{D}_{16} & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (90)$$

$$Q_{xz} = \bar{A}_{55} \gamma_{xz} \quad (91)$$

Burada rijitlik matrisi

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{B}_{11} & \bar{B}_{16} \\ \bar{B}_{11} & \bar{D}_{11} & \bar{D}_{16} \\ \bar{B}_{16} & \bar{D}_{16} & \bar{D}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & B_{16} \\ B_{11} & D_{11} & D_{16} \\ B_{16} & D_{16} & D_{66} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{12} & A_{16} & B_{12} \\ B_{12} & B_{16} & D_{12} \\ B_{26} & B_{66} & D_{26} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{22} & A_{26} & B_{22} \\ A_{26} & A_{66} & B_{26} \\ B_{22} & B_{26} & D_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} & A_{16} & B_{12} \\ B_{12} & B_{16} & D_{12} \\ B_{26} & B_{66} & D_{26} \end{bmatrix}^T \quad (92)$$

$$\bar{A}_{55} = A_{55} - \frac{A_{45}^2}{A_{44}} \quad (93)$$

olarak tanımlıdır. Poisson etkisi hesaplara katılmayacaksa (90) ve (91) ifadelerinde $\bar{A}$, $\bar{B}$ ve $\bar{D}$ yerine A , B ve D yazılmalıdır.

2.2.2. Hareket Denklemleri

Kirişin serbest titreşimleri için yönetici diferansiyel denklemler Lagrange eşitliği ile elde edilmiştir. Buna göre hareket denklemleri

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (94)$$

şeklindedir. Burada $L = T - U$ Lagrangian olup T kinetik enerji, U şekil değiştirme enerjisidir. İfadedeki q terimi, yer değiştirme alanının bilinmeyenleri u_0 , w_0 , θ ve ψ değişkenlerini temsil etmektedir.

Kirişin şekil değiştirme enerjisi U aşağıdaki gibi yazılır:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \left[N_x \epsilon_x^0 + M_x \kappa_x + M_{xy} \kappa_{xy} + Q_{xz} \gamma_{xz} \right] b dx \quad (95)$$

(86), (90) ve (91) ifadelerinin (95) ifadesinde yerine koyulmasıyla

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \left[\bar{A}_{11} u_{0,x}^2 + 2\bar{B}_{11} u_{0,x} \theta_{,x} + 2\bar{B}_{16} u_{0,x} \psi_{,x} + \bar{D}_{11} \theta_{,x}^2 + 2\bar{D}_{16} \theta_{,x} \psi_{,x} + \bar{D}_{66} \psi_{,x}^2 + \bar{A}_{55} (w_{0,x} + \theta)^2 \right] b dx \quad (96)$$

ifadesi elde edilir.

Kirişin kinetik enerjisi T aşağıdaki gibi yazılır:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \int_{-h/2}^{h/2} \rho (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) b dz dx \quad (97)$$

Burada ρ yoğunluk olup ve $\dot{u}$, $\dot{v}$ ve $\dot{w}$ hız terimleridir. (85) ifadesi, (97) ifadesinde yerine koyulur ve integrasyon işlemi gerçekleştirilirse

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \left[I_0 (\dot{u}_0^2 + \dot{w}_0^2) + 2I_1 \dot{u}_0 \dot{\theta} + I_2 (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2) \right] b dx \quad (98)$$

elde edilir. Burada

$$(I_0, I_1, I_2) = \sum_{k=1}^N \int_{z^k}^{z^{k+1}} \rho(1, z, z^2) dz \quad (99)$$

şeklinde atalet terimlerini göstermektedir.

2.2.3. Eleman Rijitlik ve Kütle Matrisleri

Tez çalışmasında tabakalı kompozit kiriş için önerilen sonlu eleman modeli Şekil 7’de görüleceği üzere beş düğüm noktalı ve 13 serbestlik derecelidir. Elemanda iç düğüm noktalarda görülen serbestlik dereceleri, tabakalı kompozit kirişte lif açılarının değişiminden kaynaklanan farklı etkileri daha iyi temsil edebilmek amacıyla eklenmiştir.

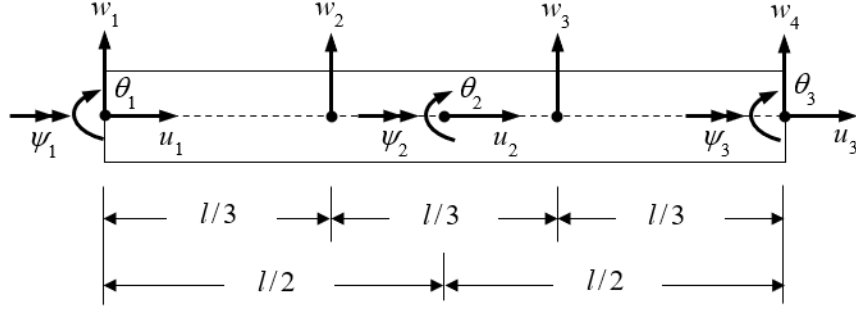
Yer değiştirme bileşenleri (alan değişkenleri) aşağıdaki gibi kabul edilsin:

$$\begin{aligned} u_0 &= \sum_{i=1}^3 \Phi_i(x) u_i(t), \\ w_0 &= \sum_{i=1}^4 \Psi_i(x) w_i(t), \\ \theta &= \sum_{i=1}^3 \Phi_i(x) \theta_i(t), \\ \psi &= \sum_{i=1}^3 \Phi_i(x) \psi_i(t) \end{aligned} \quad (100)$$

Burada $\Phi(x)$ ve $\Psi(x)$ sırasıyla ikinci ve üçüncü dereceden Lagrange polinomları olup

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= (1-\xi)(1-2\xi), \\ \Phi_2 &= 4\xi(1-\xi), \\ \Phi_3 &= -\xi(1-2\xi), \\ \Psi_1 &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1-3\xi)(2-3\xi), \\ \Psi_2 &= \frac{9}{2}\xi(1-\xi)(2-3\xi), \\ \Psi_3 &= -\frac{9}{2}\xi(1-\xi)(1-3\xi), \\ \Psi_4 &= \frac{1}{2}\xi(1-3\xi)(2-3\xi) \end{aligned} \quad (101)$$

şeklinde tanımlıdır. Burada $\xi = \frac{x}{l}$ boyutsuz eleman koordinatıdır.



Şekil 7. 13 serbestlik dereceli kiriş elemanı

(100) ile verilen çözümler (96) ve (98) ifadelerinde yazılır ve sonuç (94) ifadesinde yerine konulursa, bazı düzenlemelerden sonra

$$\mathbf{M}^e \ddot{\mathbf{u}}^e + \mathbf{K}^e \mathbf{u}^e = \mathbf{0} \quad (102)$$

şeklinde matris formda hareket denklemi elde edilir. Burada, $\mathbf{M}^e$ ve $\mathbf{K}^e$ sırasıyla eleman kütle ve rijitlik matrislerini göstermekte olup aşağıda açık bir şekilde verilmektedir. $\mathbf{u}^e$ ise düğüm noktaları yer değiştirme vektörünü göstermektedir.

$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{m}_{13} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{m}_{22} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{m}_{13}^T & \mathbf{0} & \mathbf{m}_{33} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{m}_{44} \end{bmatrix}_{13 \times 13}, \quad (103)$$

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{k}_{13} & \mathbf{k}_{14} \\ \mathbf{0} & \mathbf{k}_{22} & \mathbf{k}_{23} & \mathbf{0} \\ \mathbf{k}_{13}^T & \mathbf{k}_{23}^T & \mathbf{k}_{33} & \mathbf{k}_{34} \\ \mathbf{k}_{14}^T & \mathbf{0} & \mathbf{k}_{34}^T & \mathbf{k}_{44} \end{bmatrix}_{13 \times 13}$$

$$\mathbf{m}_{11} = I_0 \Lambda_1, \quad \mathbf{m}_{13} = I_1 \Lambda_1, \quad \mathbf{m}_{33} = \mathbf{m}_{44} = I_2 \Lambda_1,$$

$$\mathbf{m}_{22} = \frac{I_0 l}{840} \begin{bmatrix} 128 & 99 & -36 & 19 \\ & 648 & -81 & -36 \\ & & 648 & 99 \\ \text{Sim.} & & & 128 \end{bmatrix} \quad (104)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{k}_{11} &= \bar{A}_{11}\Lambda_2, \quad \mathbf{k}_{13} = \bar{B}_{11}\Lambda_2, \quad \mathbf{k}_{14} = \bar{B}_{16}\Lambda_2, \\
\mathbf{k}_{22} &= \frac{\bar{A}_{55}}{20l} \begin{bmatrix} 148 & -189 & 54 & -13 \\ & 432 & -297 & 54 \\ & & 432 & -189 \\ \text{Sim.} & & & 148 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_{23} = \frac{\bar{A}_{55}}{60} \begin{bmatrix} -83 & -44 & 7 \\ 99 & -108 & 9 \\ -9 & 108 & -9 \\ -7 & 44 & 83 \end{bmatrix}, \\
\mathbf{k}_{33} &= \bar{D}_{11}\Lambda_2 + \frac{\bar{A}_{55}l}{15}\Lambda_1, \quad \mathbf{k}_{34} = \bar{D}_{16}\Lambda_2, \quad \mathbf{k}_{44} = \bar{D}_{66}\Lambda_2,
\end{aligned} \tag{105}$$

Bu ifadelerde

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 4 & 2 & -1 \\ & 16 & 2 \\ \text{Sim.} & & 4 \end{bmatrix}, \quad \Lambda_2 = \frac{1}{3l} \begin{bmatrix} 14 & -16 & 2 \\ & 32 & -16 \\ \text{Sim.} & & 14 \end{bmatrix} \tag{106}$$

olarak tanımlıdır.

Kiriş serbest titreşimleri için global matris formda hareket denklemi

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{0} \tag{107}$$

şeklinde yazılır. Burada $\mathbf{M}$ ve $\mathbf{K}$ $(9ne+4) \times (9ne+4)$ boyutunda sistem kütle ve rijitlik matrislerini, $\mathbf{U}$ ise sistem bilinmeyen yer değiştirme vektörünü göstermektedir.

(107) denkleminin çözümü

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 e^{i\omega t} \tag{108}$$

şeklinde kabul edilsin. Burada ω doğal frekansları, $\mathbf{U}_0$ ise bunlara karşılık gelen mod şekil vektörlerini göstermektedir. $i = \sqrt{-1}$ olarak tanımlıdır. Buna göre

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U}_0 = \mathbf{0} \tag{109}$$

şeklinde bir standart öz değer problemi elde edilir. (109) denklem sisteminin sıfırdan farklı çözümlerinin olması ancak $\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0$ ile mümkündür. Buradan girişin doğal

frekansları ve bunların da (109) ifadesinde yerine geri yazılmasıyla her bir doğal frekansa karşılık gelen mod şekil vektörü elde edilir.

2.2.4. Sonlu Eleman Modelinde Hasar Tanımı

Literatürde, tabakalı kompozitlerde hasarın modellenmesi için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar arasında sıklıkla tercih edileni hasarlı bölgede eleman rijitliklerinin azaltılmasıdır. Bunun için genellikle iki yol kullanılmaktadır. Birinci yol, doğrudan eleman rijitlik matrisi terimlerinin bir rijitlik kaybı katsayısı ile çarpılmasıdır. Buna göre hasarlı eleman için rijitlik matrisi

$$\bar{\mathbf{K}}^e = (1 - \alpha_e) \mathbf{K}^e \quad (110)$$

şeklinde ifade edilir (Casciati, 2008; Ručevskis vd., 2009; Kahya vd., 2019). İkinci yol ise anizotrop malzemede hasarlı bölgedeki elemanlarda E_1 ve E_2 elastisite modüllerinin

$$\bar{E}_i^k = (1 - \alpha_e^k) E_i^k \quad (i=1,2) \quad (111)$$

şeklinde azaltılmasıdır (Vo-Duy vd., 2016; Masoumi vd., 2018). Bu ikinci yaklaşımda k tabaka numarasını göstermekte olup, bu şekilde k . tabakadaki hasarı tanımlamak mümkün olmaktadır. (110) ve (111) ifadelerinde görülen üst çizgili terimler hasarlı elemana ait değerleri temsil etmektedir. Bu ifadelerdeki α_e terimi, e . elemanın rijitlik kaybını (hasar şiddeti) göstermekte olup $\alpha_e = 0$ ile hasarsız durum, $\alpha_e = 1$ ile de tam göçme durumu ifade edilmektedir. Bu çalışmada hasarın modellenmesi, birinci yol olan doğrudan eleman rijitlik matrislerinin rijitlik kaybı katsayısı ile çarpılmasıyla yapılmıştır. Böyle yapıldığında, hasarlı kirişte sistem matrisleri $\mathbf{M} = \Sigma \mathbf{M}_e^U$ ve $\mathbf{K} = \Sigma (1 - \alpha_e) \mathbf{K}_e^U$ formuna dönüşmektedir.

2.2.5. Ölçüm Gürültüsü

Ölçüm gürültüsü, laboratuvar ortamında bir ölçüm süreci sırasında farklı kaynaklardan alınan sinyallere karışan ve sonuçları önemli ölçüde etkileyen istenmeyen

bileşenlerdir. Bu gürültü, ölçüm cihazlarının hassasiyetine, çevresel koşullara ve kullanılan tekniklere bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Ölçümlerdeki olası gürültünün önerilen hasar tespit yönteminin hassasiyeti üzerindeki etkisini incelemek için doğal frekanslar ve mod şekilleri rastgele bir hata eklenerek aşağıdaki gibi ifade edilir (Dinh-Cong vd., 2017a):

$$\begin{aligned}\omega_i^n &= (1 + \eta[2 \times \text{rand}() - 1])\omega_i, \\ \phi_{ij}^n &= (1 + \eta[2 \times \text{rand}() - 1])\phi_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, nm)\end{aligned}\tag{112}$$

Burada ω_i^n ve ϕ_{ij}^n sırasıyla ölçüm gürültüsü eklenmiş i . doğal frekans ve mod şekil vektörünün j . bileşenini ifade etmektedir. η ise gürültü seviyesini göstermektedir. Doğal frekansların ölçüm gürültüsünden daha az etkilendiği ve mod şekilleriyle karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek doğrulukla ölçülebildiği yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, doğal frekanslar ve mod şekilleri için sırasıyla $\pm 0,15\%$ ve $\pm 3\%$ 'lük standart ölçüm gürültüsü değeri dikkate alınmıştır (Dinh-Cong vd. 2017a).

2.3. Deneysel Ölçümler

Deneysel doğrulama için ölçümler cam/epoksi kompozit konsol kiriş üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kirişin uzunluğu $L = 1000$ mm (mesnetlenmeden sonra net uzunluğu $L^* = 900$ mm olmuştur), genişliği $b = 80$ mm ve yüksekliği $h = 8$ mm'dir. Test kirişi, eşit kalınlıktaki tabakalardan oluşmaktadır.

2.3.1. Malzeme Deneyleri

Malzeme özellikleri laboratuvar testleri ile elde edilmiştir. Malzeme yoğunluğu, ASTM D792 standardına göre elde edilmiştir. İşlemde, kiriş merkezinden kesilen dört adet $20 \times 20 \times 8$ mm'lik numune kullanılmış ve kirişin homojen yoğunluğa sahip olduğu varsayılmıştır.

Elyaf ve matris ağırlık oranları, $25 \times 25 \times 8$ mm boyutlarındaki numuneler kullanılarak reçine yakma yöntemi ile belirlenmiştir. Numuneler, bir fırında 565°C 'de iki saat boyunca sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Numunelerdeki polyester reçine tamamen yandıktan sonra

bir desikatörde tutulmuştur. Ardından numuneyi oluşturan polyester reçine ve cam elyaf ağırlık oranlarını elde etmek amacıyla tartılmıştır. Elyaf ağırlık oranı ve kirişin lif istifleme düzeni $[90 / \pm 45 / 0 / 90 / \pm 45 / 0 / 90 / \pm 45]$ olarak belirlenmiştir.

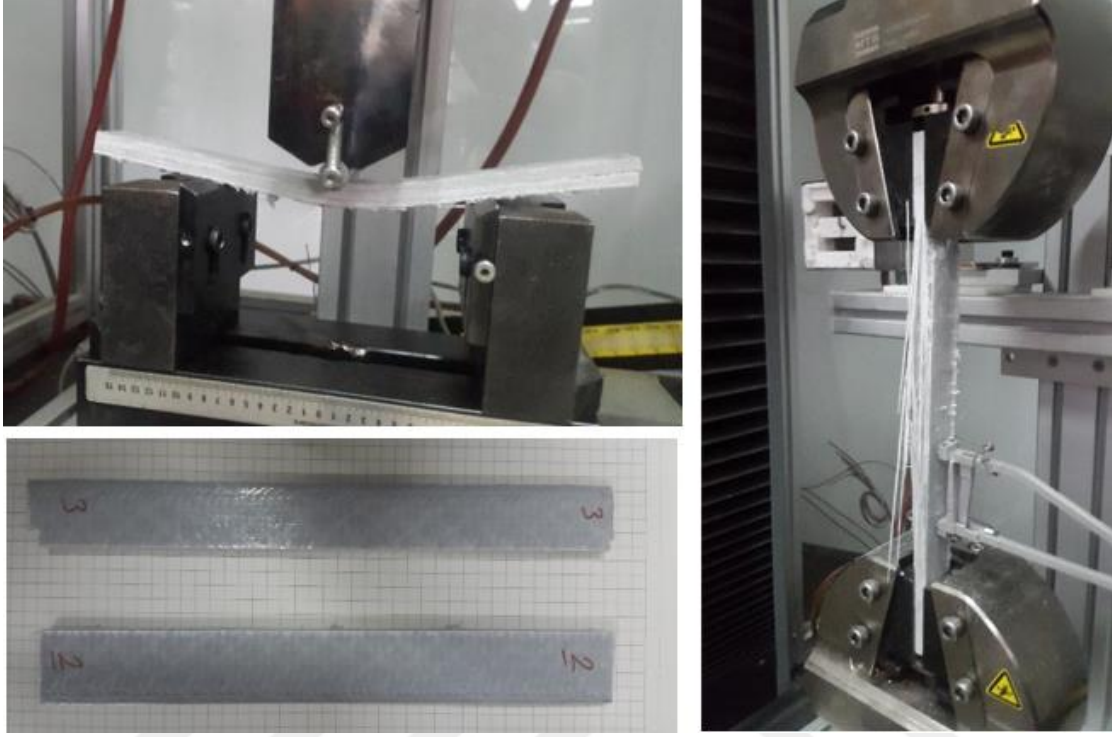
Elastik modüller için gerekli çekme testleri, $250 \times 25 \times 8$ mm boyutlarındaki beş dikdörtgen numune üzerinde ASTM D3039 standardına göre ortam koşullarında çapraz (hareketli) başlık hızı 2 mm/dk ve yük hücresi 10 kN olan MTS Criterion Model 45 universal test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Poisson oranı, numunelerin her iki yüzeyine eksenel ve enine yönde yapıştırılmış şekil değiştirme ölçerler yardımıyla elde edilmiştir. Eğilme davranışına ait modüller için ASTM D790'a göre 2,8 mm/dk çapraz başlık hızında MTS Criterion Model 45 universal test makinesi kullanılarak üç noktalı eğilme testleri uygulanmıştır. Eğilme testleri, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem oranına sahip ortam koşullarında $250 \times 13 \times 8$ mm boyutlarında beş farklı numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çekme ve eğilme test düzenekleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Testler sonucunda elde edilen tabaka istifleme düzeni, elyaf ağırlık oranı, malzeme yoğunluğu ve elastik modüller Tablo 1'de sunulmuştur.

2.3.2. Titreşim Deneyleri

Hasarsız ve hasarlı durumlara ait modal özellikleri elde etmek amacıyla kompozit kiriş çevresel titreşim testlerine tabi tutulmuştur. Göz önüne alınan hasar senaryoları ile kirişin plan ve kesit görünümüleri Şekil 9'da, test kirişinin ve ivmeölçer konumlarının görünümünü ise Şekil 10'da verilmektedir. Deneysel ölçümler sırasında 17 kanallı B&K3560 veri toplama ünitesi ve tek eksenli sinyal kablolarına sahip B&K4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Düşey yöndeki titreşimleri ölçmek üzere kiriş üzerine toplam 10 adet hassas ivmeölçer yerleştirilmiş ve ele alınan tüm durumlar için 10 dakika süreyle ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde frekans aralığı 0-200Hz olarak kabul edilmiştir. İvmeölçerlerden gelen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanarak PULSE (2006) yazılımına aktarılmıştır.

Dinamik karakteristikler OMA (2006) yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Kompozit kirişin modal parametreleri frekans alanında Zenginleştirilmiş Frekans Tanım Alanı Ayırıştırma (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) ve zaman alanında Stokastik Alt Uzay Tanımlama (Stochastic Subspace Identification, SSI) yöntemleriyle belirlenmiştir. Şekil 11-17'de sırasıyla hasarsız ve hasarlı kirişler için EFDD spektral

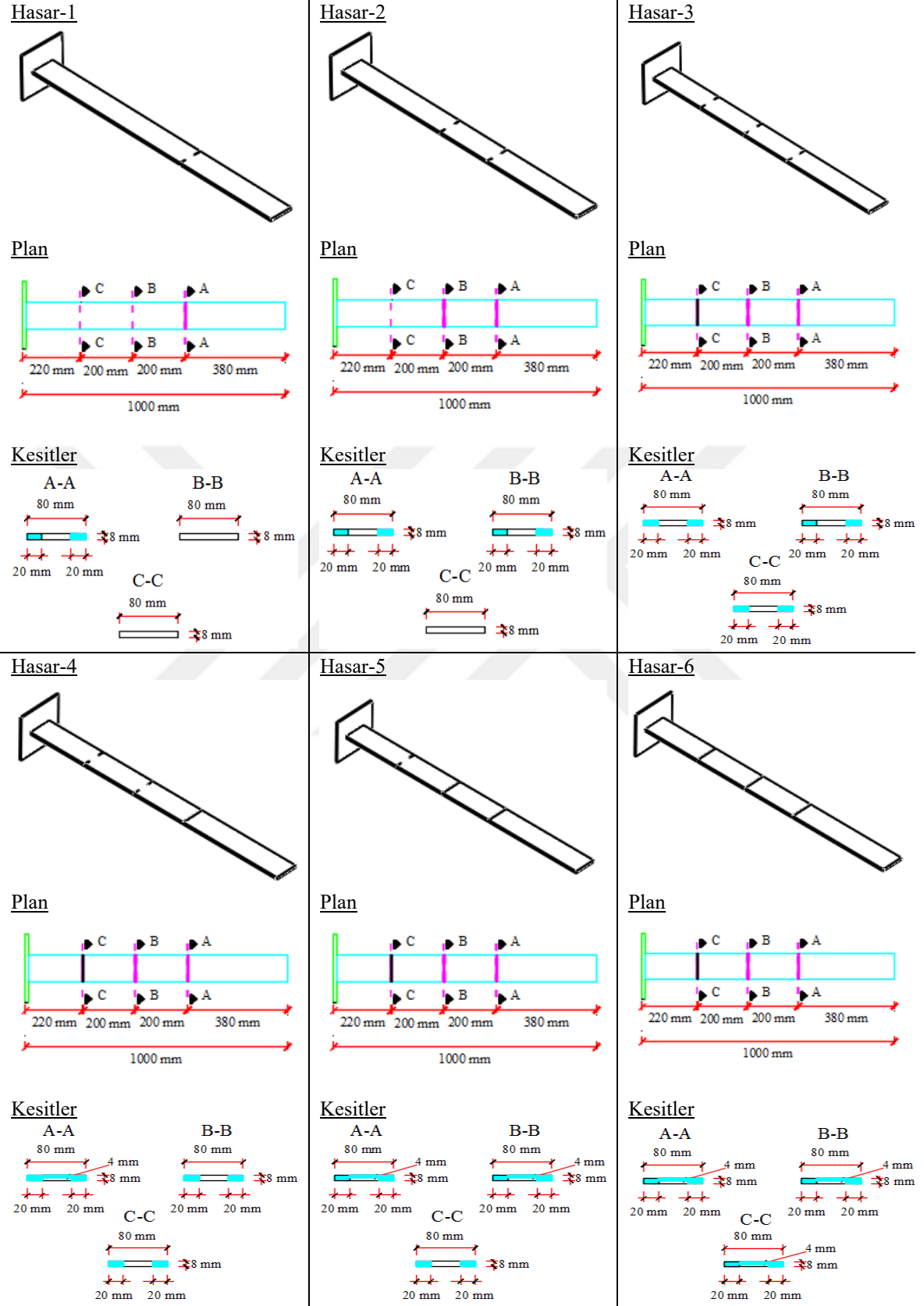
yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve SSI tahmini durum-uzay modellerinin stabilizasyon diyagramları verilmiştir.



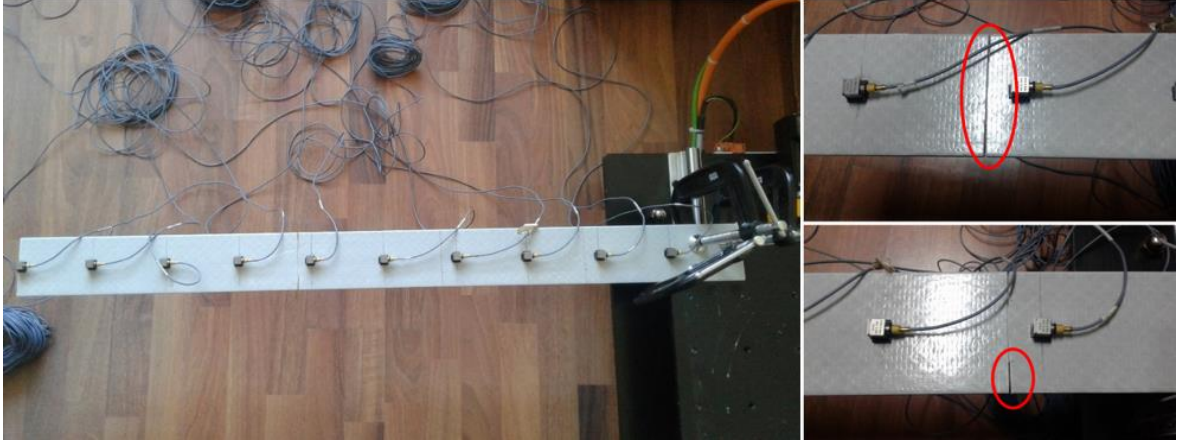
Şekil 8. Eğilme ve çekme test düzenekleri

Tablo 1. Test kirişi için malzeme deney sonuçları

Tabaka İstifleme düzeni (Yukarıdan aşağıya)	
Elyaf ağırlık oranı (%)	65 ± 1
Özgül ağırlık (kg/m^3)	1920 ± 30
Elastisite modülü, E_L (GPa)	$30,6 \pm 3$
Elastisite modülü, E_T (GPa)	8,5
Kayma modülü, G (GPa)	3,2
Poisson oranı	0,34
Eğilme gerilmesi (MPa)	379 ± 79
Eğilme modülü (GPa)	$17,7 \pm 2,2$
Eğilme şekil değiştirmesi (%)	$2,45 \pm 0,27$



Şekil 9. Test kirişi plan ve kesit görünüşleri ile hasar senaryoları



Şekil 10. Test kirişi ve ivmeölçer konumları

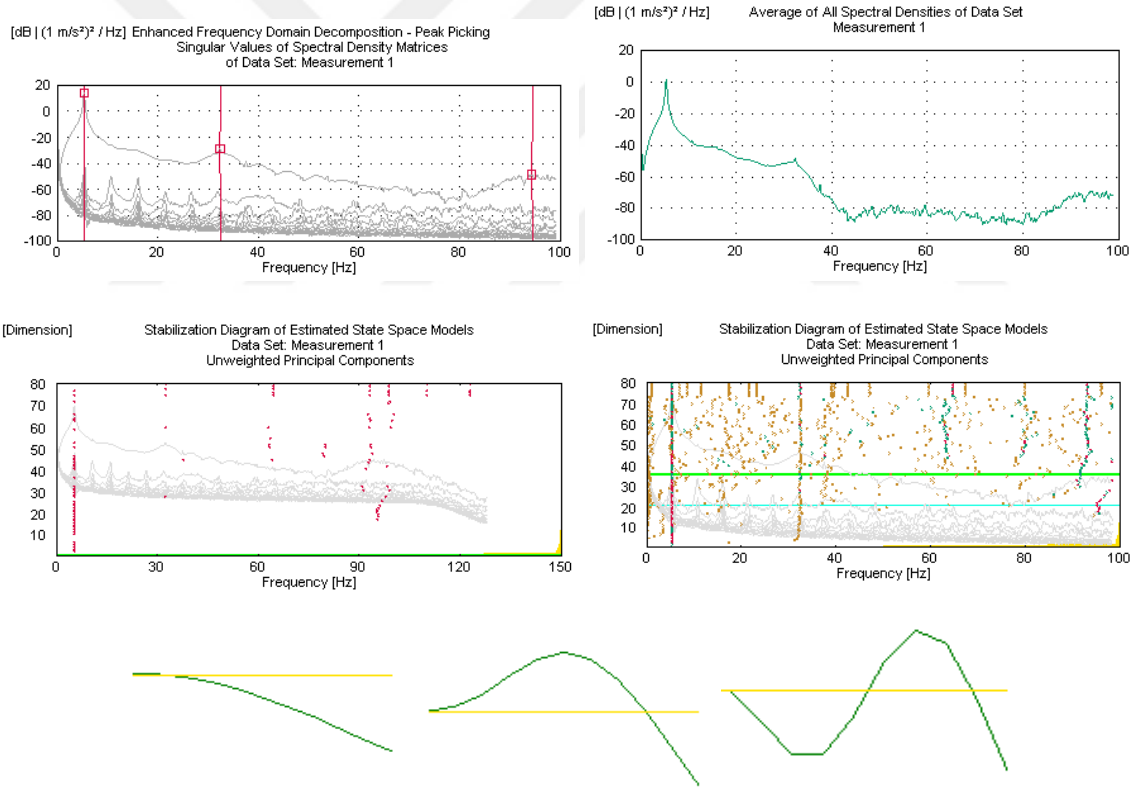
Tablo 2, her bir hasar durumu için titreşim ölçümlerinden elde edilen ilk üç frekansı göstermektedir. Görüleceği üzere her iki yönteme göre elde edilen frekanslar birbirlerine oldukça yakındır.

Tablo 2. Deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar

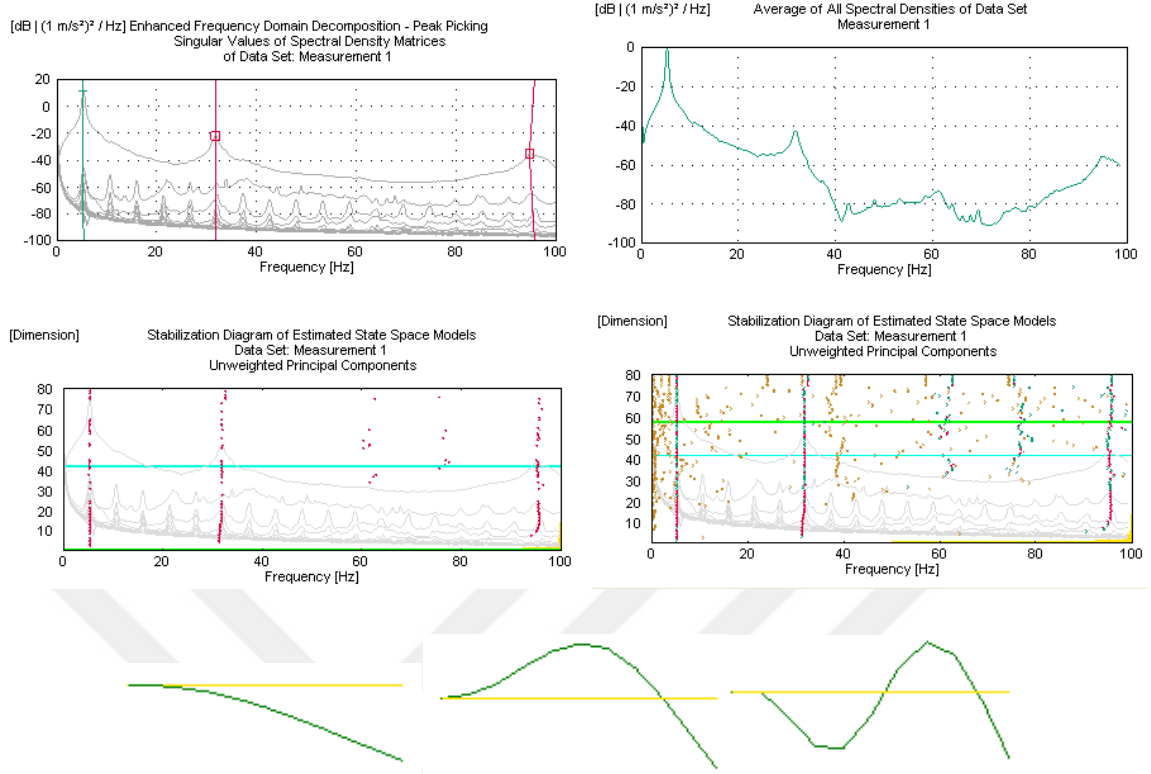
Kiriş	Frekans (Hz)	
	EFDD	SSI
Hasarsız		
1	5,37	5,34
2	32,52	3,31
3	94,64	95,34
Hasar-1		
1	5,34	5,34
2	31,80	31,96
3	95,79	95,42
Hasar-2		
1	5,27	5,28
2	31,48	31,55
3	91,49	92,85
Hasar-3		
1	5,06	5,12
2	31,41	31,43
3	92,07	91,43

Tablo 2. Devamı

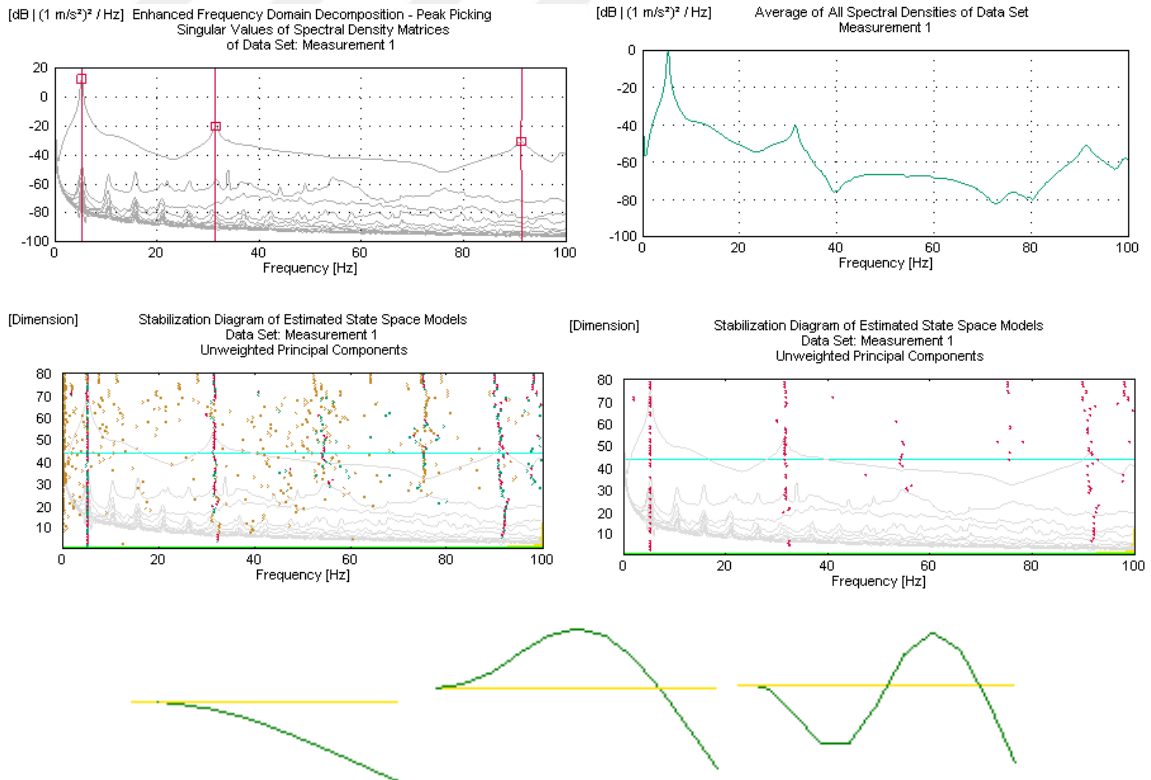
Kiriş	Frekans (Hz)	
	EFDD	SSI
Hasar-4		
1	4,94	4,96
2	27,66	27,86
3	90,45	89,98
Hasar-5		
1	4,66	4,68
2	26,77	26,90
3	80,10	82,36
Hasar-6		
1	3,52	3,61
2	25,42	25,24
3	80,21	80,42



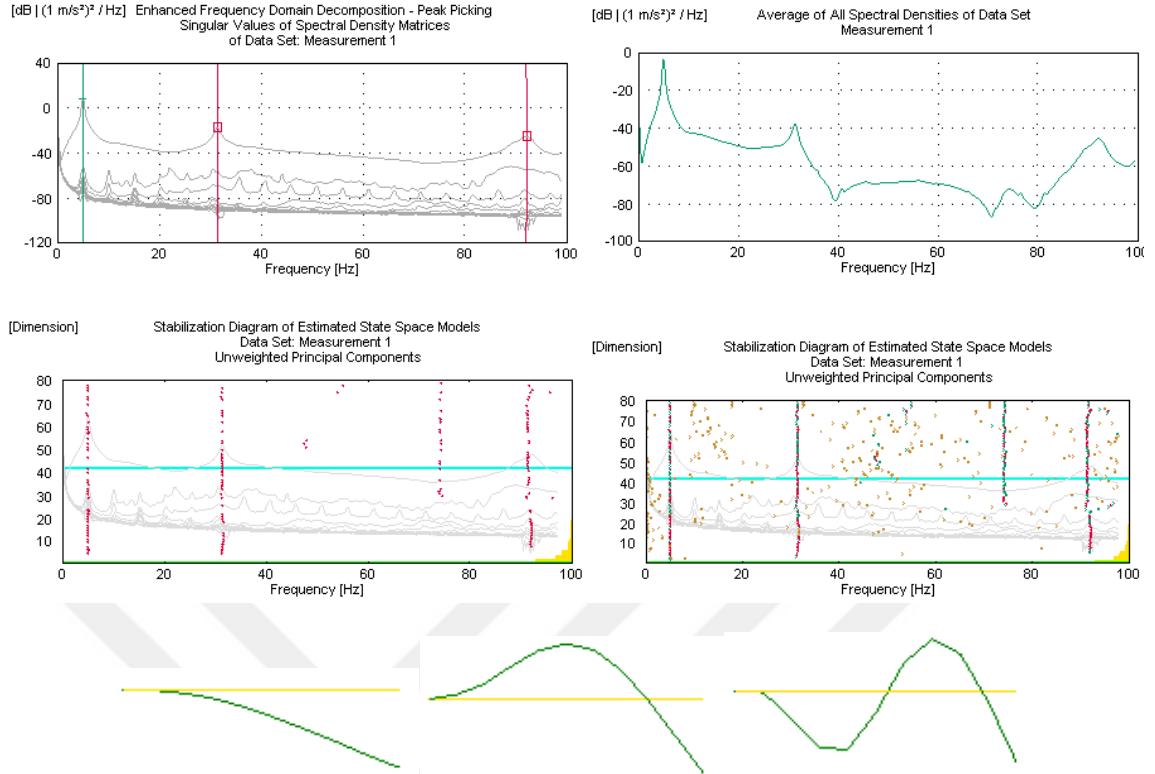
Şekil 11. Hasarsız duruma ait EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli



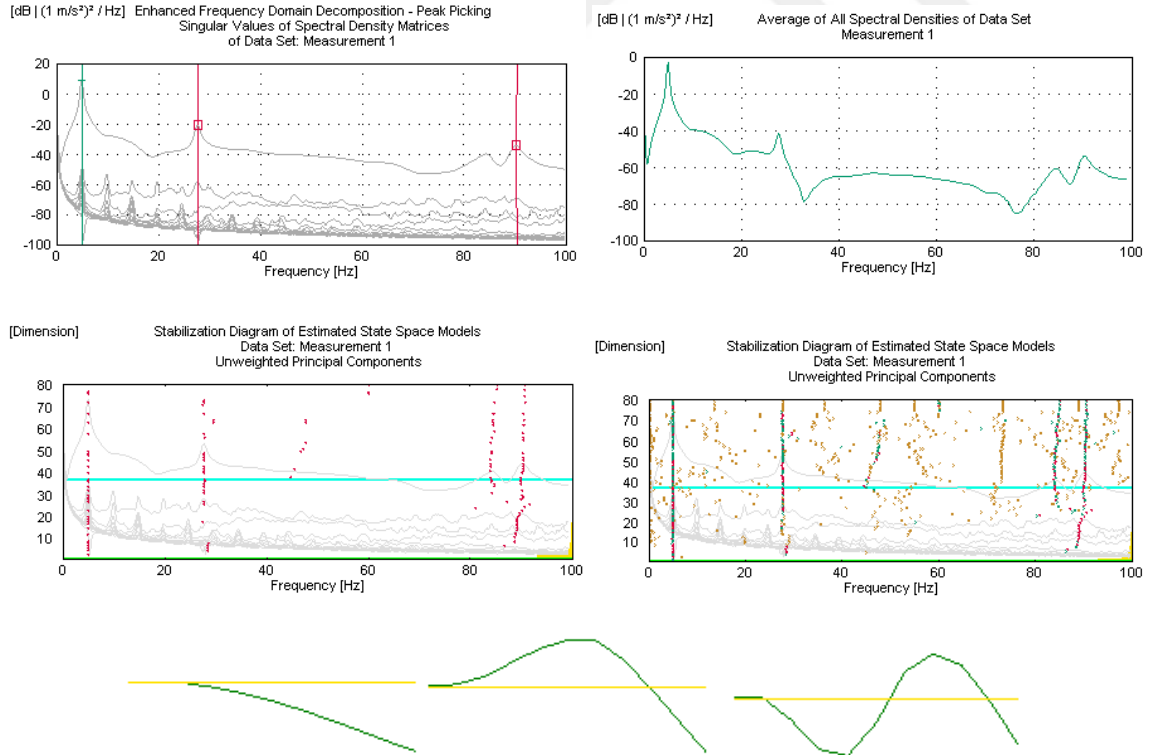
Şekil 12. Hasar-1 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli



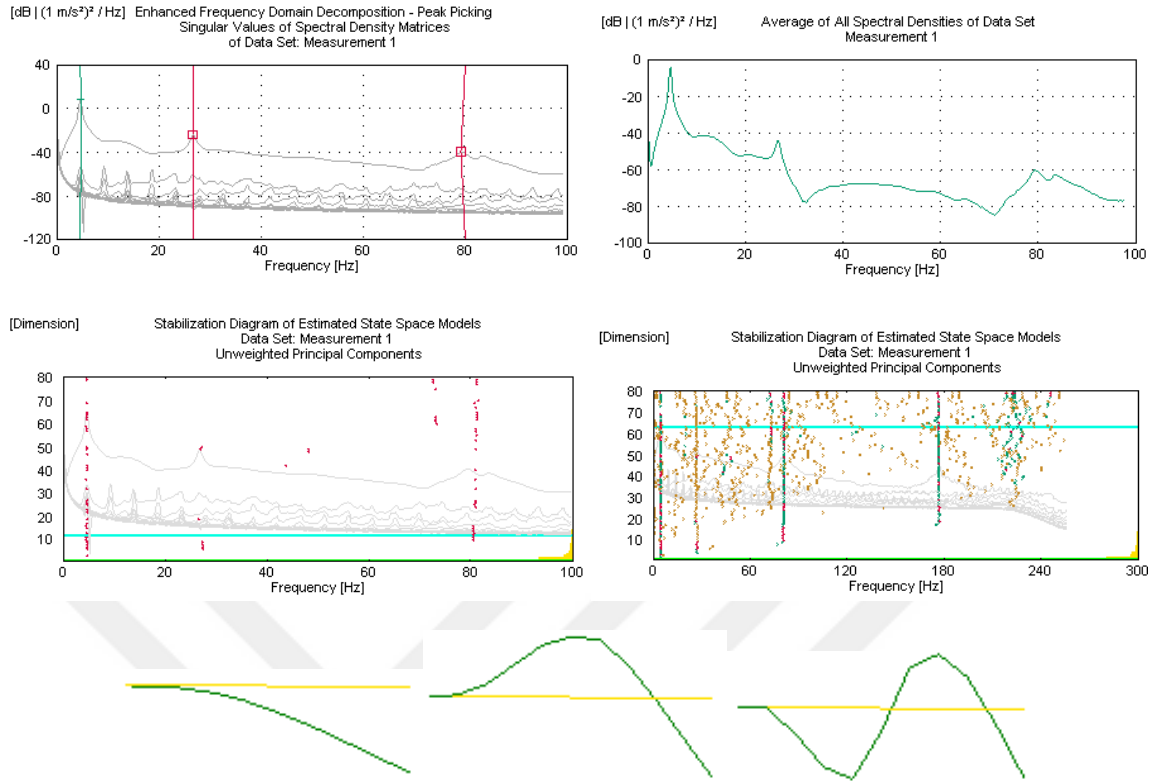
Şekil 13. Hasar-2 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli



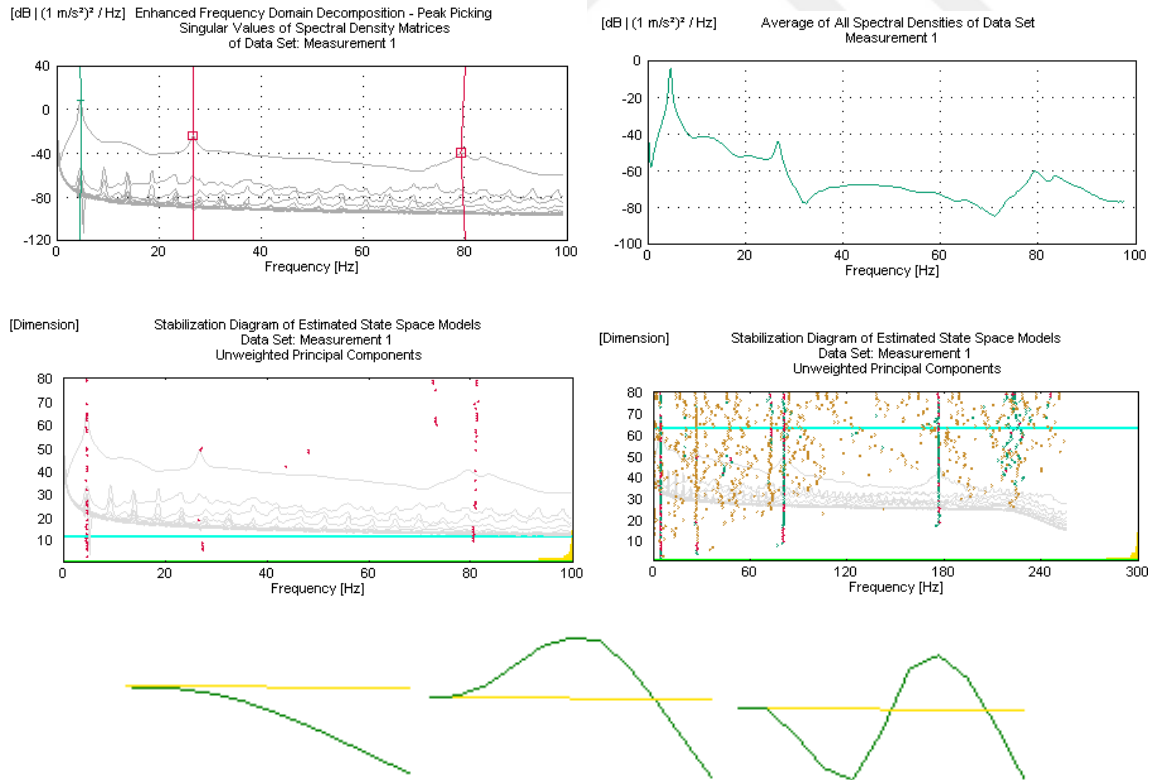
Şekil 14. Hasar-3 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli



Şekil 15. Hasar-4 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli



Şekil 16. Hasar-5 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli

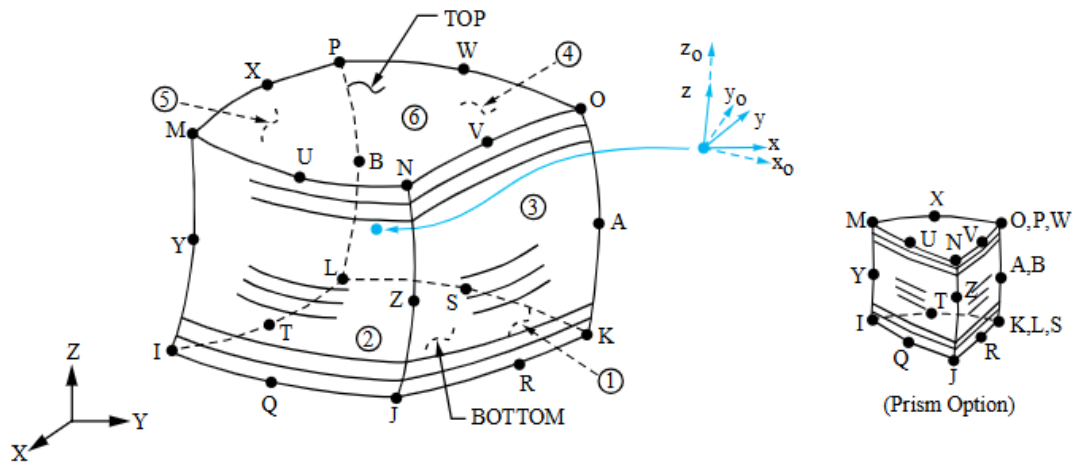


Şekil 17. Hasar-6 için EFDD ve SSI sonuçları ve ilk üç deneysel mod şekli

2.4. ANSYS Sonlu Eleman Modeli

Önerilen sonlu elemanın doğruluğunu test etmek amacıyla test kirişinin göz önüne alınan tüm durumlar için üç boyutlu (3B) modelleri ANSYS 16.0 programı ile oluşturulmuştur. 3B modellemede homojen/tabakalı yapısal katı eleman SOLID186 kullanılmıştır. Bu eleman, her bir düğüm noktasında x , y ve z doğrultularında öteleme olmak üzere 3 serbestlik derecesi bulunan toplamda 20 düğüm noktasına sahiptir (Şekil 18). Elemanın en önemli avantajı kalın kabuklar ile katı ortamlar için tabakalı kesit ve anizotropik malzeme özelliklerinin tanımlanmasına imkân vermesidir. Çatlak modellemesi için hasarlı kesitte dikkate alınan çatlakın uzunluğu boyunca iki farklı yüzey tanımlanmış; bu yüzeylerdeki düğüm noktaları birbirlerine bağlanmayarak titreşim sırasında bu iki yüzeyin birbirinden bağımsız hareket etmelerine izin verilmiştir.

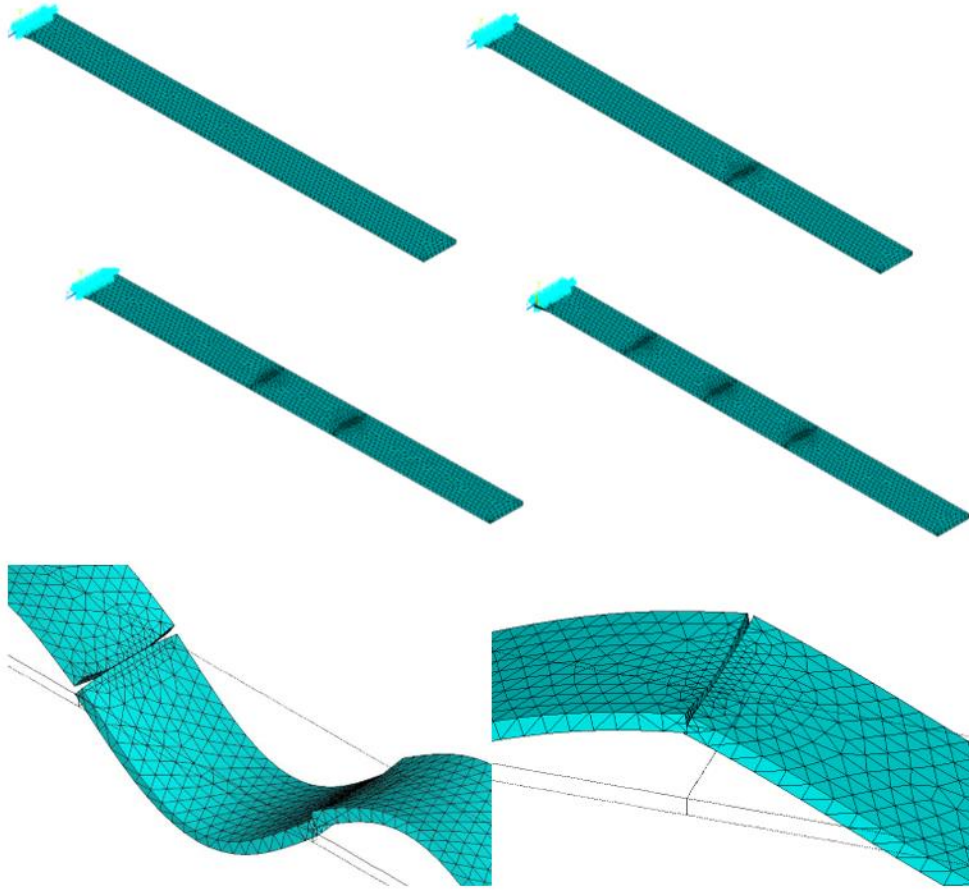
Dikkate alınan tüm hasar durumları için frekanslar, modal analiz seçeneği kullanılarak belirlenmiştir. Tutarlı sonuçlar elde edebilmek için doğru ağ yapısına ulaşabilmek amacıyla yakınsama analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için kiriş, uzunluk, genişlik ve yükseklik doğrultularında sırasıyla 10, 20, 40, 80 ve 100 parçaya bölünmüştür. Çatlaklı bölgede ise daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla çatlak yüzeyleri 250 parçaya bölünmüştür. Bir örnek olması açısından Hasar-3 için yakınsama analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre, istenilen doğruluk için her bir doğrultuda 100 eleman kullanımının yeterli olduğu görülmüştür. Hasarsız ve hasarlı kirişlerin temsili 3B modelleri Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 18. SOLID186 katı elemanın geometrisi (ANSYS, 2016)

Tablo 3. Hasar-3 için yakınsama analiz sonuçları

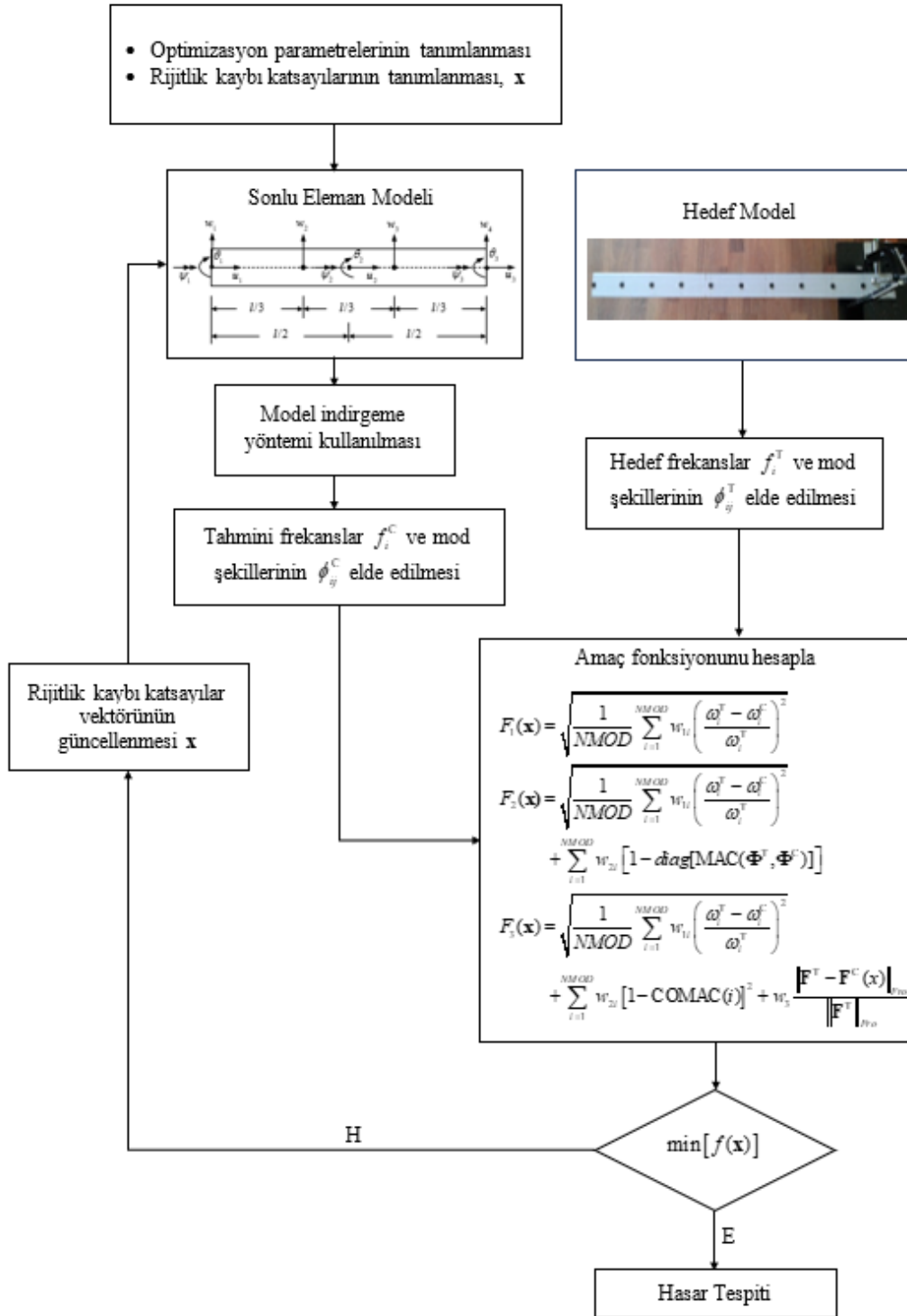
Eleman sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)		
	f_1	f_2	f_3
10	5,0046	31,2908	88,2953
20	4,9823	31,0835	87,4322
40	4,9690	30,9630	86,9352
80	4,9631	30,9121	86,7870
100	4,9568	30,8801	86,6945



Şekil 19. Tabakalı kompozit kirişin temsili üç boyutlu sonlu eleman modelleri

2.5. Önerilen Hasar Tespit Yöntemi

Sonlu eleman model güncellemesi, titreşim verilerine dayalı yapısal hasar tespitinde yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan biridir. Hasar tespit problemi, gerçek yapıdan ve sonlu eleman modelinden elde edilen dinamik karakteristikleri esas alan bir amaç fonksiyonunun ekstremum değerlerini arayan bir optimizasyon problemi şeklinde tanımlanabilir (Gomes vd., 2018b).



Şekil 20. Önerilen hasar tespit yönteminin akış şeması

Tez çalışması kapsamında önerilen yöntemde, hasar tespiti için optimizasyon probleminin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
&\text{Find } \mathbf{x} = \{\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_{ne}\} \\
&\text{Max/Min } F(\mathbf{x}) \\
&\text{s.t. } 0 \leq \alpha_e \leq 1 \quad (e = 1, 2, \dots, ne)
\end{aligned} \tag{112}$$

Burada $F(\mathbf{x})$ ekstremumu aranan amaç fonksiyonunu, $\mathbf{x}$ rijitlik kaybı vektörünü ve ne sonlu eleman modelindeki eleman sayısını göstermektedir. Belirli bir hasar koşulu göz önüne alındığında, eğer bir rijitlik kaybı vektörü amaç fonksiyonunu minimum yapıyorsa, yani amaç fonksiyonu teorik olarak sifıra eşitse, bu set gerçek yapısal hasar durumunu temsil etmektedir. Tez çalışma kapsamında önerilen hasar tespit metodolojisinin akış şeması Şekil 20’de verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında aşağıda verilen üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Birinci amaç fonksiyonu doğal frekans değişimlerini esas almakta olup

$$F_1(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} W_{li} \left(\frac{\omega_i^T - \omega_i^C}{\omega_i^T} \right)^2} \tag{113}$$

şeklinde tanımlıdır. Burada ω_i^T ve ω_i^C sırasıyla incelenen yapının ölçümle ve sayısal modelden elde edilen i . frekansını göstermektedir. nm ise dikkate alınan modların sayısıdır (Jebieshia vd., 2020; Kahya vd., 2022).

İkinci amaç fonksiyonu, (113) ifadesine mod şekil değişimlerinin eklenmesiyle elde edilmiştir. Mod şekil değişimleri için iki veri seti arasındaki korelasyonu ölçmekte kullanılan Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) kullanılmıştır. MAC aşağıdaki gibi tanımlıdır (Allemang, 2003):

$$\text{MAC}(\Phi^T, \Phi^C) = \frac{|(\Phi^T)^T \Phi^C|^2}{((\Phi^T)^T \Phi^T)((\Phi^C)^T \Phi^C)} \tag{114}$$

Burada Φ^T ve Φ^C sırasıyla incelenen yapının ölçümle ve sayısal modelden elde edilen mod şekil matrislerini göstermektedir. T üst indisi matrisin transpozisinin alındığını ifade etmektedir. MAC matrisinin her bir elemanı 0 ila 1 arasında değişen değerler alır. İki veri seti arasındaki korelasyon güçlü ise matrisin köşegen terimleri bire, köşegen dışı terimleri

ise sıfıra yakın değerler almalıdır. Bu tanımlamalara göre ikinci amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$F_2(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} W_{1i} \left(\frac{\omega_i^T - \omega_i^C}{\omega_i^T} \right)^2} + \sum_{i=1}^{nm} W_{2i} [1 - \text{diag}[\text{MAC}(\Phi^T, \Phi^C)]] \quad (115)$$

Burada, W_1 ve W_2 ağırlık katsayılarıdır. Doğal frekanslar genelde mod şekillerinden daha doğru ölçüldüğünden, W_1 değerinin W_2 'den büyük olması tercih edilir. Literatürde genellikle $W_1 = W_2 = 1$ olarak seçilmiş, bu ağırlık katsayıları için bulunan sonuçların daha tutarlı olduğu gösterilmiştir (Hao ve Xia 2002; Şimşek vd., 2022).

Çalışmada kullanılan üçüncü amaç fonksiyonu literatüre bir yenilik olarak önerilmiş olup matematiksel olarak

$$F_3(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} W_{1i} \left(\frac{\omega_i^T - \omega_i^C}{\omega_i^T} \right)^2} + \sum_{i=1}^{nm} W_{2i} [1 - \text{COMAC}(i)]^2 + W_{3i} \frac{\|\mathbf{F}^T - \mathbf{F}^C(x)\|_{Fro}}{\|\mathbf{F}^T\|_{Fro}} \quad (116)$$

şeklinde kabul edilmiştir. Burada, $\text{COMAC}(i)$ Koordinat Modal Güvence Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion) ve $\mathbf{F}$ esneklik matrisidir. $\|\cdot\|_{Fro}$ ile bir matrisin Frobenius normu ifade edilmektedir. Modal Güvence Kriterinin farklı bir versiyonu olan Koordinat Modal Güvence Kriteri, iki veri setinin koordinat değerleri arasındaki korelasyonu gösterir (Allemang, 2003). Bu sayede, setler arasında uyumu bozan koordinat değeri bulunabilir – ki bu hasar lokalizasyonunda avantaj sağlar. Tanım olarak

$$\text{COMAC}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{np} |(\phi_{ij}^T)^T \phi_{ij}^C|^2}{\sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^T)^2 \sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^C)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, nm) \quad (117)$$

şeklinde verilmektedir. Burada np ölçüm alınan koordinat sayısıdır. COMAC vektörünün elemanları 0 ile 1 arasında değerler alır. Sıfır uyumsuzluğu, bir ise tam uyumu göstermektedir.

Rijitlik matrisinin tersi olan esneklik (fleksibilite) matrisi hasara karşı çok hassas olması sebebiyle tercih edilmektedir. Matematiksel olarak

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^{nm} \frac{1}{\omega_i^2} \mathbf{\Phi}_i \mathbf{\Phi}_i^T \quad (118)$$

şeklinde tanımlıdır (Pandey & Biswas, 1994). Esneklik matrisinin en önemli avantajı ilk birkaç mod için kolayca elde edilebilmesidir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Giriş

Bu bölümde, önerilen sonlu eleman modelinin ve hasar tespit yönteminin doğrulanması ve etkinliğinin değerlendirilmesi için karşılaştırmalı sonuçlar verilmiş; ek olarak, çeşitli konfigürasyonlar için (tabaka dizilimi, sınır şartı) parametrik çalışmalar yapılmıştır. Aksi belirtilmediği sürece çalışmada sınır şartları, Ankastre-Ankastre (A-A, Ankastre kiriş), Basit-Basit (B-B, Basit kiriş), Ankastre-Serbest (A-S, Konsol kiriş), Ankastre-Basit (A-B) ve Serbest-Serbest (S-S) olarak dikkate alınmıştır.

3.2. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması ve Etkinliğinin Değerlendirilmesi

3.2.1. Hasarsız Kompozit Kiriş

Bu bölümde, çeşitli sınır koşulları ve tabaka dizilimlerine sahip kompozit kirişlerin hasarsız durumda doğal frekansları ve mod şekilleri için sonuçlar sunulmuştur. Önerilen sonlu elemanın doğruluğunu ve uygulanabilirliğini göstermek için literatür ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, parametrik çalışma yapılarak referans veri olarak kullanılabilecek bazı yeni sonuçlar sunulmuştur. Sayısal analizlerde kesmede düzeltme faktörü $K = 5/6$ olarak alınmış ve kirişte tüm tabakaların eşit kalınlığa sahip olduğu varsayılmıştır.

Sonlu eleman analizlerinde yeter doğrulukta sonuçlar elde edebilmek amacıyla ağ yakınsama analizleri yapılmıştır. Bu amaçla, $[30/50]_2$ tabaka dizilimine sahip iki ucu ankastre kompozit kiriş ele alınmıştır. Kiriş boyutları $L = 381$ mm, $b = h = 25,4$ mm, malzeme özellikleri $E_1 = 144,8$ GPa, $E_2 = 9,65$ GPa, $G_{12} = G_{13} = 4,14$ GPa, $G_{23} = 3,45$ GPa, $\nu = 0,3$, $\rho = 1389,23$ kg/m³ olarak dikkate alınmıştır. Yakınsama analizi sonuçları Tablo 4’te sunulmuştur. Görüldüğü üzere, eleman sayısı arttıkça doğal frekanslar hızla azalmakta ve sabit bir değere doğru yakınsamaktadır. Buna göre, analizlerde 20 eleman kullanılmasının yeterli olacağı görülmektedir. Ayrıca, çalışma sonuçlarının Jun vd. (2008)

tarafından verilen analitik sonuçlarla mükemmel bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Önerilen sonlu elemanın doğruluğunu göstermek amacıyla literatürden üç örnek üzerinde karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. İlk örnek, Goyal & Kapania (2007)'den alınmıştır. Çalışmada kirişin geometrik özellikleri $L/h = 10, 20, 100$, $h/b = 0,5$, $b = 0,1$ ft; malzeme özellikleri ise $E_1 / E_2 = 25$, $G_{12} = G_{13} = 0,5E_2$, $G_{23} = 0,2E_2$, $E_2 = 1,9584 \times 10^8$ psf, $\nu_{12} = 0,3$ ve $\rho = 0,250387$ slugs/ft³ olarak dikkate alınmıştır. Farklı sınır koşulları ve tabaka dizilimleri için boyutsuz doğal frekanslar Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo incelendiğinde önerilen sonlu eleman ile elde edilen sonuçların Goyal & Kapania (2007)'nin çalışmasında verilenlerle Poisson etkisinin dikkate alınması durumunda çok iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Tablodan, Poisson etkisinin açılı tabaka dizilimine sahip kirişlerde sonuçları önemli ölçüde etkilediği açıkça görülmektedir.

İkinci örnek yine Goyal & Kapania (2007)'den alınmıştır. Bu örnek için geometrik özellikler $L/h = 60$, $h/b = 0,3175$ ve $b = 10$ mm, malzeme özellikleri ise $E_1 / E_2 = 13,7088$, $G_{12} = 0,5471E_2$, $G_{13} = 0,45679 E_2$, $G_{23} = 0,269641E_2$, $E_2 = 9,42512$ GPa, $\nu_{12} = 0,3$, $\rho = 1550,0666$ kg/m³ olarak dikkate alınmıştır Poisson etkisinin dikkate alınması ve alınmaması durumları için açılı tabaka dizilimine sahip tabakalı kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları Tablo 6'da verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere, önerilen sonlu eleman modeliyle elde edilen sonuçlar, dikkate alınan tüm sınır şartları için Goyal & Kapania (2007)'nin sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde.

Tablo 4. İki ucu ankastre $[30/50]_2$ kompozit kirişin sonlu eleman yakınsama analizi

Eleman sayısı	Doğal frekanslar (Hz)				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
2	647,416	2059,921	3927,237	5104,989	5385,672
4	638,749	1660,087	3052,057	3913,302	5061,198
8	638,036	1648,654	3005,153	3911,176	4605,382
12	637,997	1647,981	3001,087	3911,058	4591,068
16	637,991	1647,866	3000,383	3911,038	4588,517
20	637,989	1647,835	3000,188	3911,032	4587,807
24	637,988	1647,824	3000,118	3911,030	4587,550
30	637,988	1647,817	3000,079	3911,029	4587,408
Jun vd. (2008)	637,9	1647,8	3000,0	3911,0	4587,3

Tablo 5. Farklı sınır şartlarına sahip tabakalı kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları
 $(\Omega_1 = \omega \sqrt{\rho L^4 / E_2 h^2})$

Kiriş	$L/h = 10$			$L/h = 20$			$L/h = 100$		
	Ref. ^a	Bu çalışma		Ref. ^a	Bu çalışma		Ref. ^a	Bu çalışma	
		(-)	(+)		(-)	(+)		(-)	(+)
A-S									
0	4,560	4,564	4,560	4,931	4,936	4,931	5,070	5,075	5,070
90	1,002	1,002	1,002	1,012	1,012	1,012	1,015	1,016	1,015
[0/90] _s	4,178	4,179	4,178	4,597	4,598	4,597	4,758	4,759	4,758
[45/-45] _s	1,332	1,962	1,324	1,337	2,004	1,337	1,341	2,018	1,341
A-A									
0	17,215	17,218	17,212	25,336	25,346	25,327	31,916	31,938	31,899
90	5,764	5,767	5,761	6,264	6,267	6,260	6,453	6,458	6,450
[0/90] _s	14,839	14,838	14,837	22,679	22,677	22,672	29,873	29,867	29,857
[45/-45] _s	7,623	10,2406	7,616	8,280	12,014	8,280	8,531	12,811	8,526
B-B									
0	11,636	11,645	11,635	13,431	13,444	13,430	14,211	14,227	14,210
90	2,771	2,774	2,771	2,829	2,832	2,829	2,849	2,852	2,848
[0/90] _s	10,488	10,489	10,488	12,435	12,438	12,434	13,335	13,338	13,333
[45/-45] _s	3,752	6,522	3,752	3,834	6,934	3,834	3,861	7,084	3,861

(-) Poisson etkisi dahil değil, (+) Poisson etkisi dahil

^a Goyal & Kapania (2007)

Tablo 6. Farklı sınır şartlarına sahip tabakalı kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları
 $(\Omega_2 = \sqrt{12}\Omega_1)$

Tabaka dizilimi	A-S				A-A				B-B	
	Ref. ^a	Bu çalışma		FEM ^a	Bu çalışma		FEM ^a	Bu çalışma		
		(-)	(+)		(-)	(+)		(-)	(+)	
[0/30/0]	12,858	12,921	12,858	80,354	80,682	80,310	36,051	36,227	36,042	
[0/45/0]	12,792	12,858	12,792	79,902	80,244	79,860	35,840	36,031	35,835	
[0/60/0]	12,769	12,821	12,769	79,703	79,972	79,662	35,760	35,909	35,757	
[0/90/0]	12,778	12,808	12,777	79,692	79,853	79,651	35,780	35,865	35,777	
[0/90] ₂	8,853	8,861	8,853	55,753	55,776	55,724	26,352	24,839	24,816	
[0/±30/0]	12,403	12,709	12,403	77,580	79,387	77,542	34,745	35,595	34,741	
[0/±45/0]	12,270	12,457	12,270	76,703	77,852	76,663	34,373	34,917	34,366	

(-) Poisson etkisi dahil değil, (+) Poisson etkisi dahil

^a Goyal & Kapania (2007)

Üçüncü örnekte, farklı sınır şartlarına ve açılı tabaka dizilimine sahip kompozit kirişler ele alınmıştır. Bu kirişlerin geometrik ve malzeme özellikleri yakınsama çalışmasında dikkate alınanlarla aynıdır. Doğal frekanslar, Tablo 7 ve 8’de boyutsuz olarak verilmiştir. Tablo 7’de, $[\theta / -\theta]_s$ kompozit kirişlerin eğilme titreşimleri için önerilen sonlu eleman ile elde edilen boyutsuz doğal frekanslar, Jafari-Talookolaei vd. (2012)’nin analitik

çözümünden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi sonuçlar mükemmel bir uyum içindedir. Tablo 8’de farklı sınır koşullarına sahip $[\pm 45]_2$ kirişlerin boyutsuz doğal frekansları verilmiştir. Çalışma sonuçları, Jafari-Talookolaei vd. (2012), Wang vd. (2015), Chen vd. (2004) ve Chandrashekhara & Bangera (1992) ile karşılaştırılarak mevcut yöntemin geçerliliği test edilmiştir. Tablodan görüleceği üzere, önerilen eleman kullanılarak elde edilen sonuçlar, diğer sayısal yöntemlere kıyasla analitik çözüme (Jafari-Talookolaei vd., 2012) oldukça yakın sonuçlar vermektedir.

Tablo 7. Farklı sınır koşullarına sahip $[\theta / -\theta]_s$ kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega \sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$)

Kiriş	Yöntem	θ						
		0	15	30	45	60	75	90
A-A	Bu çalışma	4,841	3,958	2,852	1,929	1,628	1,605	1,615
	Analitik ^a	4,841	3,959	2,853	1,929	1,628	1,605	1,615
A-B	Bu çalışma	3,723	3,009	2,082	1,359	1,137	1,121	1,128
	Analitik ^a	3,723	3,011	2,084	1,359	1,137	1,121	1,128
A-S	Bu çalışma	0,979	0,729	0,485	0,314	0,263	0,259	0,261
	Analitik ^a	0,979	0,729	0,485	0,314	0,263	0,259	0,261
B-B	Bu çalışma	2,649	2,307	1,505	0,902	0,736	0,725	0,730
	Analitik ^a	2,649	2,310	1,508	0,902	0,736	0,725	0,730

^a Jafari-Talookolaei vd. (2012)

Tablo 8. Farklı sınır koşullarına sahip $[\pm 45]_2$ kompozit kirişlerin ilk üç boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega \sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$)

Kiriş	Metot	f_1	f_2	f_3
A-A	Bu çalışma	1,977	5,185	9,587
	Analitik ^a	1,977	5,184	9,585
	IGA ^b	1,976	5,184	9,584
	DQM ^c	1,844	4,987	9,539
	HSDT ^d	1,980	5,216	9,691
B-B	Bu çalışma	0,901	3,502	7,537
	Analitik ^a	0,901	3,501	7,535
	IGA	0,901	3,500	7,535
	HSDT	0,827	3,233	7,014
A-S	Bu çalışma	0,323	1,967	5,285
	Analitik ^a	0,323	1,967	5,283

^a Lagrange çarpanları ile bir seri çözüm (Jafari-Talookolaei vd., 2012)

^b İzogeometrik sonlu eleman (IGA) yöntemi (Wang vd., 2015)

^c Durum-uzay tabanlı diferansiyel kuadratür yöntemi (Chen vd., 2004)

^d Yüksek mertebeden kayma deformasyonu teorisi (Chandrashekhara & Bangera 1992)

Gelecekteki çalışmalar için referans olarak kullanılmak üzere, çeşitli konfigürasyonlara sahip tabakalı kompozit kirişler için bazı yeni sonuçlar Tablo 9-11’de sunulmuştur. Sayısal analizlerde $L/h = 10$, $b = h = 1$ birim olarak alınmıştır. Sonuçlar Poisson etkisi dikkate alınarak verilmiştir. Tüm frekanslar $\Omega_3 = \omega(L/h)\sqrt{\rho/E_1}$ şeklinde boyutsuz olarak verilmiştir. Aksi belirtilmedikçe kirişin malzeme özellikleri $E_1/E_2 = 10$, 20, 40, $G_{12}/E_2 = G_{13}/E_2 = 0.5$, $G_{23}/E_2 = 0.2$, $\nu = 0.3$ ve $\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaba katılmıştır.

Tablo 9-11, $E_1/E_2 = 10$, 20 ve 40 gibi çeşitli ortotropi oranları için farklı tabaka dizilimi ve sınır koşullarına sahip tabakalı kompozit kirişlerin sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü gibi hem çapraz hem de açılı tabaka diziliimli kirişler için ortotropi oranı arttığında boyutsuz doğal frekanslar azalmaktadır. En büyük değerler iki ucu serbest kiriş için elde edilmektedir. Tablo 10 ve 11’e göre açılı tabaka diziliimli kirişlerde boyutsuz frekanslar lif açısının artmasıyla azalmaktadır.

Şekil 21-23, İki ucu ankastre, Basit kiriş ve iki ucu serbest sınır şartlarına ve $E_1/E_2 = 40$ ortotropi oranına sahip çapraz, antisimetrik ve asimetrik açılı tabaka dizilimine sahip kompozit kirişlerde ilk beş mod şeklini göstermektedir. Bu şekillerde titreşimin bileşenleri (uzama, eğilme, burulma) arasında anizotropiden kaynaklanan etkileşim görülmektedir.

Şekil 21’de, $[0/90]$ kirişlerde titreşim modlarının eğilme veya burulma karakterinde çıktığı, diğer bileşenlerin (uzama ve dönme) etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmektedir. Çapraz tabaka diziliimli kompozit kirişlerde eğilme ve burulma arasında etkileşim görülmemektedir.

Şekil 22’de, $[45/-45]$ kirişlerde genel olarak eğilme modlarının gözlemlendiği ve eğilme-burulma etkileşiminin olmadığı görülmektedir. İstisna olarak, örneğin Basit kirişinin 3. modunda sadece uzama bileşeni, iki ucu serbest ve iki ucu ankastre kirişlerinin 4. modunda ise uzama ve burulma bileşenlerinin birlikte ortaya çıktığı ve bu iki bileşen arasında büyük bir etkileşim olduğu görülmüştür.

Şekil 23, $[0/45]$ kirişlerde ilk beş mod şeklini göstermektedir. Burada malzeme anizotropisinden kaynaklanan etkileşimler neredeyse tüm modlarda açıkça görülmektedir. Örneğin, iki ucu serbest kirişin 1, 3 ve 4. modları eğilme-burulma bileşenlerini içermektedir. Benzer durum diğer iki sınır şartı için de geçerlidir. İstisna olarak, iki ucu serbest kirişin 5. modu eğilme-burulma-uzama bileşenlerinin tümünü içermektedir.

Tablo 9. Farklı ortotropi oranları (E_1/E_2) için çeşitli sınır şartlarına sahip çapraz dizilimli kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları

$$(\Omega_3 = \omega \sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}, L/h = 10)$$

Tabaka dizilimi	Mod	$E_1/E_2=10$			$E_1/E_2=20$			$E_1/E_2=40$		
		S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B
[0/90]	1	3,1513	2,8588	1,4258	2,6551	2,3087	1,2050	2,3097	1,8773	1,0532
	2	7,0248	6,7679	5,0825	4,9673	4,9672	4,1531	3,5124	3,5124	3,4432
	3	7,7034	7,0248	7,0248	6,2672	5,2777	4,9673	5,1553	4,1100	3,5124
	4	13,1008	11,5098	9,5761	9,9347	8,7945	7,7719	7,0249	6,7067	6,2278
	5	14,0497	14,0497	11,2529	10,3416	9,9346	9,8739	8,1703	7,0248	7,0249
[0/90/0]	1	5,5086	4,2676	2,5124	4,9672	3,4257	2,3004	3,5124	2,6178	2,0009
	2	7,0248	7,0248	7,0248	4,9789	4,9672	4,9672	4,2547	3,5124	3,5124
	3	11,8530	9,1669	7,9853	9,6189	7,0397	6,5576	7,0248	5,2563	5,1012
	4	14,0497	14,0497	13,1808	9,9346	9,9346	9,9346	7,4024	7,0248	7,0248
	5	18,4587	14,8303	14,0497	14,2652	11,1671	10,9433	10,5375	8,2073	8,1386
[0/90] ₂	1	4,0823	3,4478	1,8506	3,7095	2,8545	1,6942	3,2974	2,2684	1,5244
	2	7,0248	7,0248	6,3106	4,9672	4,9672	4,9672	3,5124	3,5124	3,5124
	3	9,4589	7,7700	7,0248	7,9265	6,1053	5,3393	6,3666	4,6586	4,3388
	4	14,0497	12,8514	11,3007	9,9346	9,8602	9,4070	7,0248	7,0248	7,0248
	5	15,4342	14,0497	12,0456	12,2819	9,9346	9,9346	9,4320	7,3888	7,2368
[0/90] _s	1	5,2541	4,0368	2,3982	4,7225	3,2246	2,1841	3,5124	2,4569	1,8912
	2	7,0248	7,0248	7,0248	4,9672	4,9672	4,9672	4,0169	3,5124	3,5124
	3	11,2221	8,6373	7,5666	9,0593	6,6126	6,1807	6,9497	4,9294	4,7919
	4	14,0497	13,9501	11,6847	9,9346	9,9346	9,9346	7,0248	7,0248	7,0248
	5	17,4050	14,0497	13,3565	13,4017	10,4782	10,2794	9,9865	7,6902	7,6291

Tablo 10. Farklı ortotropi oranları (E_1/E_2) için çeşitli sınır şartlarına sahip açılı dizilimli kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları

$$(\Omega_3 = \omega \sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}, L/h = 10)$$

Tabaka dizilimi	Mod	$E_1/E_2=10$			$E_1/E_2=20$			$E_1/E_2=40$		
		S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B
$[\theta / -\theta]_2$										
30	1	3,7253	3,3092	1,6817	3,0561	2,6098	1,3832	2,4081	1,9867	1,0926
	2	9,0202	7,7588	5,9974	7,1584	5,9361	4,7769	5,4759	4,4164	3,6663
	3	13,0994	13,0994	9,9093	11,7953	9,8646	8,2946	8,8273	7,2557	6,6264
	4	15,2823	13,1164	11,6825	12,3513	12,3513	9,0295	11,5680	10,2584	6,7645
	5	20,6728	18,9228	13,5814	16,4769	14,0623	12,9268	12,1405	11,5680	9,9685
45	1	2,5212	2,3668	1,1345	1,8473	1,7249	0,8315	1,3356	1,2428	0,6013
	2	6,3869	5,8434	4,2263	4,6596	4,2352	3,0847	3,3594	3,0405	2,2246
	3	11,3103	10,2354	6,4763	8,2141	7,3871	4,7454	5,9046	5,2892	3,4279
	4	12,5565	12,5565	8,6292	9,3848	9,3848	6,2680	6,8212	6,8212	4,5062
	5	15,5570	15,1513	13,7758	12,1270	10,9001	9,9617	8,6939	7,7889	7,1412
60	1	2,0593	1,9548	0,9262	1,4571	1,3830	0,6553	1,0308	0,9784	0,4636
	2	5,2634	4,8840	3,4798	3,7240	3,4551	2,4620	2,6344	2,4440	1,7417
	3	9,4112	8,6360	5,2317	6,6581	6,1091	3,7005	4,7098	4,3211	2,6172
	4	10,4324	10,4324	7,1778	7,3933	7,3933	5,0781	5,2321	5,2321	3,5921
	5	13,5095	12,8782	11,5705	9,9609	9,1094	8,1851	7,0458	6,4430	5,7897

Tablo 10'un devamı

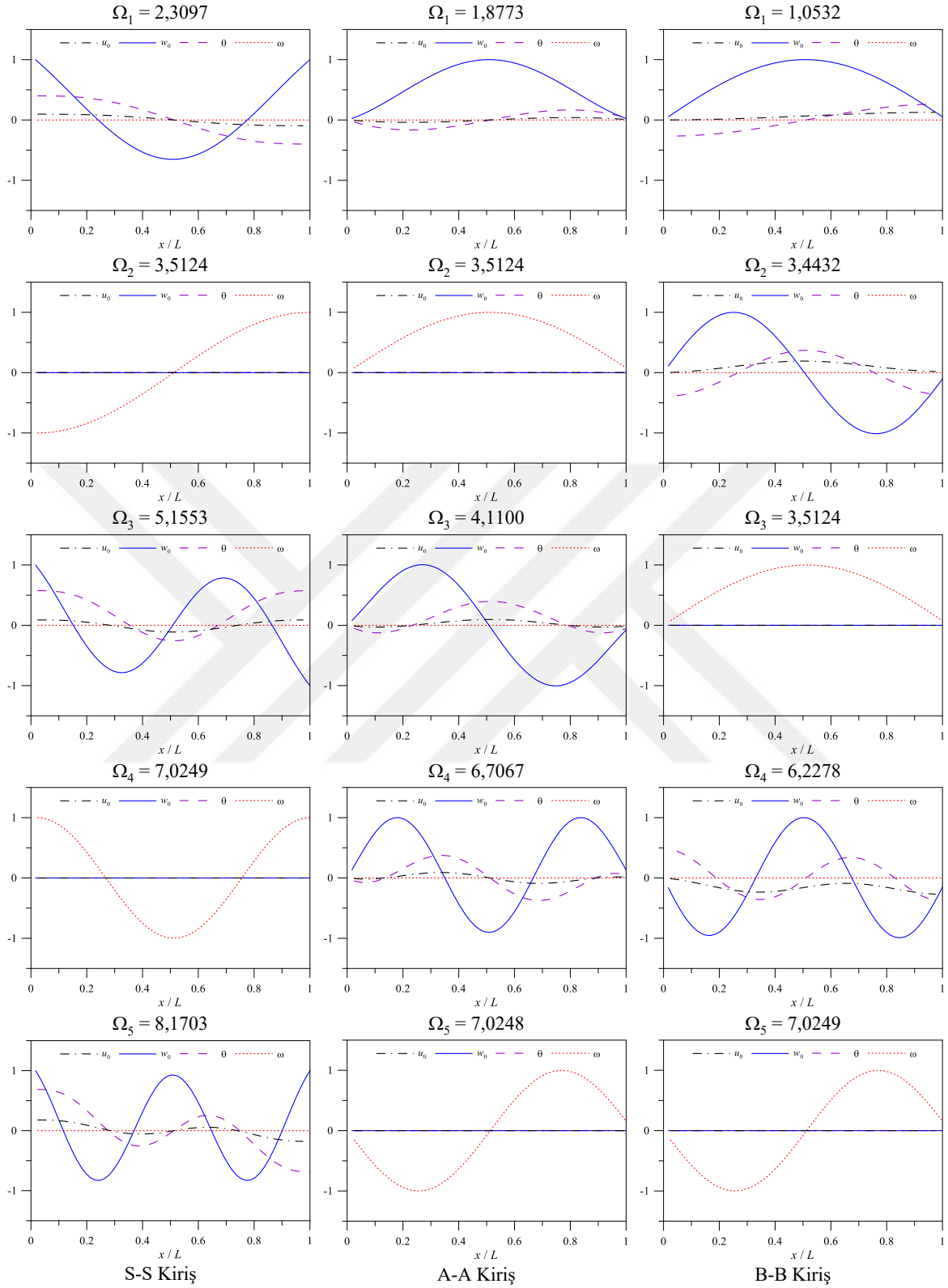
Tabaka dizilimi	Mod	$E_1/E_2=10$			$E_1/E_2=20$			$E_1/E_2=40$		
		S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B
$[\theta / -\theta]_s$										
30	1	3,3756	3,0834	1,6927	2,7598	2,4356	1,3876	2,2200	1,8856	1,0935
	2	8,2827	7,3303	5,4603	6,5997	5,6366	4,3723	5,1576	4,2560	3,4364
	3	12,7622	12,5013	10,0553	10,8015	9,4573	8,3856	8,3996	7,0452	6,5065
	4	14,5338	12,9390	10,9676	12,0766	11,7095	8,5393	10,7922	10,0050	6,6703
	5	20,1106	18,1635	12,3728	15,6287	13,5923	10,9907	11,7395	10,7284	9,4333
45	1	2,4421	2,3052	1,1368	1,7989	1,6874	0,8322	1,3121	1,2246	0,6014
	2	6,2039	5,7143	4,1001	4,5506	4,1587	3,0102	3,3073	3,0041	2,1892
	3	10,9950	10,0404	6,4921	8,0412	7,2745	4,7531	5,8249	5,2365	3,4311
	4	12,9841	12,9841	8,4342	9,5061	9,5061	6,1545	6,8622	6,8622	4,4527
	5	13,2656	13,2187	12,7314	11,9114	10,7559	9,7438	8,5954	7,7228	7,0549
60	1	2,0509	1,9480	0,9264	1,4528	1,3796	0,6554	1,0290	0,9769	0,4636
	2	5,2436	4,8695	3,4662	3,7141	3,4478	2,4553	2,6301	2,4408	1,7388
	3	9,3768	8,6137	5,2332	6,6420	6,0979	3,7011	4,7030	4,3163	2,6175
	4	10,4664	10,4664	7,1562	7,4022	7,4022	5,0674	5,2349	5,2349	3,5876
	5	11,5043	11,4998	11,3466	9,9399	9,0949	8,1647	7,0369	6,4368	5,7820

Tablo 11. Farklı ortotropi oranları (E_1/E_2) için çeşitli sınır şartlarına sahip simetrik olmayan dizilimli kompozit kirişlerin boyutsuz doğal frekansları ($\Omega_3 = \omega \sqrt{\rho L^4 / E_1 h^2}$, $L/h = 10$)

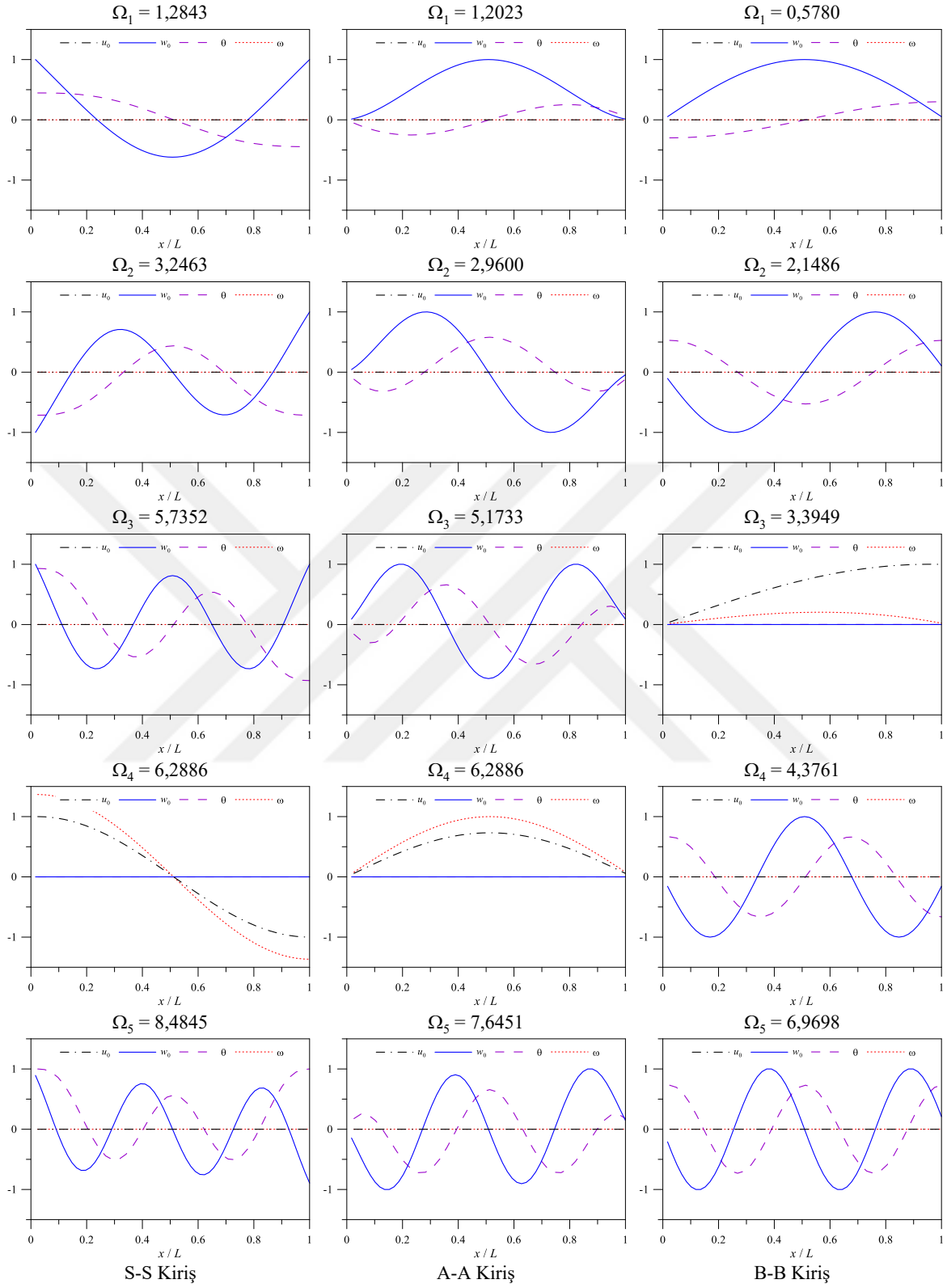
Tabaka dizilimi	Mod	$E_1/E_2=10$			$E_1/E_2=20$			$E_1/E_2=40$		
		S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B
[0/θ]										
30	1	3,7884	3,4203	1,8578	3,0803	2,6935	1,5497	2,5562	2,1228	1,2961
	2	9,0361	7,8864	5,8893	7,1505	6,0149	4,6317	5,7027	4,5874	3,7123
	3	9,0840	8,9985	8,9643	7,1601	7,0978	7,0435	5,7067	5,6539	5,5696
	4	15,3445	13,2944	11,3589	11,8260	9,9750	8,9260	9,1575	7,4914	6,9546
	5	17,7096	17,6819	12,5303	13,7819	13,7906	11,0756	10,8193	10,5570	9,6712
45	1	3,3755	3,0726	1,5703	2,7997	2,4558	1,3078	2,3986	1,9812	1,1203
	2	8,2389	7,2573	5,4104	6,6225	5,6145	4,3599	5,1581	4,3507	3,5804
	3	8,8447	8,8304	8,7937	6,7681	6,7550	6,7329	5,4027	5,1477	5,1350
	4	14,0380	12,3351	10,2446	10,9832	9,3686	8,2449	8,6388	7,1224	6,5699
	5	17,5443	17,5700	11,7685	13,3933	13,3970	10,3045	10,1981	10,0463	9,0011
60	1	3,2071	2,9200	1,4558	2,6913	2,3540	1,2247	2,3355	1,9146	1,0667
	2	7,8581	6,9297	5,1793	5,8948	5,3988	4,2206	4,2990	4,2020	3,4970
	3	8,0350	8,0335	8,0312	6,3789	5,8945	5,8944	5,2475	4,3045	4,3008
	4	13,3980	11,8056	9,7589	10,5644	9,0166	7,9253	8,3548	6,8814	6,3608
	5	16,0572	16,0573	11,4032	11,7803	11,7791	9,9943	8,5914	8,5902	8,5863

Tablo 11'nin devamı

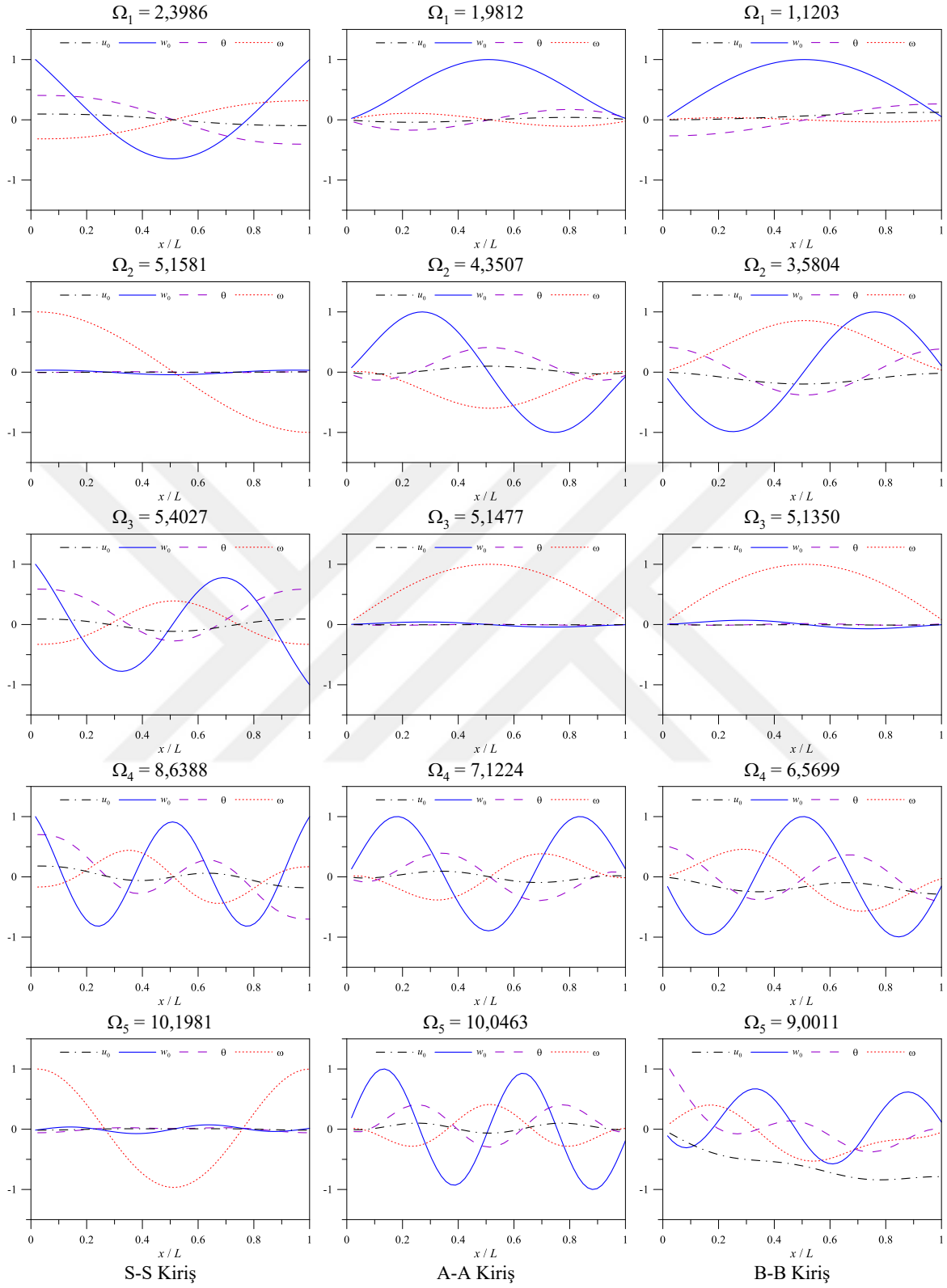
Tabaka dizilimi	Mod	$E_1/E_2=10$			$E_1/E_2=20$			$E_1/E_2=40$		
		S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B	S-S	A-A	B-B
$[\theta/-\theta]$										
30	1	3,1936	2,9300	1,4390	2,5567	2,2868	1,1537	2,0523	1,7786	0,9280
	2	7,9414	7,0704	5,2652	6,2261	5,3931	4,1371	4,8674	4,0891	3,2436
	3	9,5108	9,5108	8,6637	7,9852	7,9852	7,1855	7,0409	6,8347	5,9821
	4	13,7969	12,1784	10,5345	10,6033	9,1499	8,1036	8,1010	7,0409	6,1983
	5	19,0217	17,8039	11,6387	15,1942	13,2335	9,9392	11,4008	9,7827	8,4868
45	1	2,3844	2,2558	1,0726	1,7527	1,6494	0,7886	1,2843	1,2023	0,5780
	2	6,0782	5,6156	4,0195	4,4488	4,0827	2,9433	3,2463	2,9600	2,1486
	3	10,0238	9,9003	6,3632	7,8948	7,1655	4,6768	5,7352	5,1733	3,3949
	4	10,8360	10,0238	8,2653	8,0375	8,0375	6,0228	6,2886	6,2886	4,3761
	5	14,6862	14,6862	11,2906	11,6768	10,6233	9,6350	8,4845	7,6451	6,9698
60	1	2,0444	1,9424	0,9194	1,4486	1,3760	0,6515	1,0267	0,9750	0,4617
	2	5,2293	4,8580	3,4569	3,7044	3,4403	2,4489	2,6250	2,4369	1,7354
	3	9,3576	8,5971	5,2214	6,6274	6,0868	3,6952	4,6950	4,3104	2,6149
	4	9.7018	9.7018	7.1367	7.2457	7.2457	5.0546	5.1925	5.1925	3.5808
	5	11.0895	11.0895	10.2595	8.9759	8.9759	8.1526	7.0266	6.4293	5.7740



Şekil 21. [0/90] kompozit kirişlerin ilk beş mod şekli ($L/h = 10$ ve $E_1/E_2 = 40$)



Şekil 22. [45/-45] kompozit kirişlerin ilk beş mod şekli ($L/h = 10$ ve $E_1/E_2 = 40$)



Şekil 23. [0/45] kompozit kirişlerin ilk beş mod şekli ($L/h = 10$ ve $E_1/E_2 = 40$)

3.2.2. Hasarlı Kompozit Kiriş

Bu bölümde, hasarlı kompozit kirişler için serbest titreşim analiz sonuçları sunulmuştur. Yakınsama analizi için $L = 800$ mm ve $b = h = 20$ mm olan izotropik bir konsol kiriş dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri $E = 210$ GPa, $\nu = 0,3$ ve $\rho = 7800$ kg/m³ şeklindedir (Song vd., 2003). Bu çalışma için iki hasar senaryosu dikkate alınmıştır. Birinci senaryoda $a_1 = 2$ mm derinliğindeki enine çatlak sol uçtan $x_1 = 120$ mm uzaklıkta bulunmaktadır. İkinci senaryoda ise kirişte iki çatlak bulunmakta olup, ilki sol uçtan $x_1 = 120$ mm uzaklıkta $a_1 = 2$ mm derinliğinde, ikincisi ise $x_2 = 400$ mm uzaklıkta $a_2 = 3$ mm derinliğindedir. Rijitlik kaybı katsayılarının hesaplanmasında hasarın denk geldiği elemanlarda atalet momentleri hasarsız durumunkine oranlanmıştır. Sayısal sonuçlar Tablo 12’de verilmiştir. Tabloya göre $N = 80$ eleman kullanmanın istenilen doğrulukta sonuçlar için yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Ek olarak, önerilen eleman ile elde edilen sonuçlar Song vd. (2003)’nin analitik çözümüne oldukça yakındır.

Hasarlı kompozit kirişte önerilen elemanın doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermek için mevcut literatürle karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur. Göz önüne alınan birinci örnekte $L = 550$ mm, $b = 35$ mm ve $h = 2,4$ mm boyutlarında iki ucu serbest (SS) kompozit kiriş dikkate alınmıştır (Ručevskis vd., 2009). Kirişin malzeme özellikleri $E_x = 54,5$ GPa, $E_y = E_z = 31,04$ GPa, $G_{xy} = G_{xz} = 7,09$ GPa, $G_{yz} = 6,5$ GPa, $\nu = 0,3$ ve $\rho = 1364,9$ kg/m³ şeklindedir. Kirişte hasar sol uçtan $x_1 = 320$ mm’de başlayıp $x_2 = 370$ mm’de sona eren 50 mm uzunluğunda bir hasar (delaminasyon) bulunmaktadır. Burada hasarlı bölgenin tanımlanmasında bu bölge boyunca tüm elemanlarda aynı rijitlik kaybının olduğu kabul edilmiştir. Tablo 13’te, kirişin sonlu eleman analizinden elde edilen ilk on doğal frekansı (Hz) Ručevskis vd. (2009)’nin sayısal ve deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Tablodan açıkça görülebileceği gibi sonuçlar oldukça uyumludur.

İkinci örnekte, delaminasyon hasarı bulunan $[90/0]$ kompozit kiriş dikkate alınmıştır (Kargarnovin vd., 2013). Kompozit kirişin malzeme özellikleri $E_{11} = 144,8$ GPa, $E_{22} = E_{33} = 9,65$ GPa, $G_{12} = G_{13} = 4,14$ GPa, $G_{23} = 3,45$ GPa, $\nu = 0,3$ ve $\rho = 1389,23$ kg/m³ olarak verilmiştir. $b = h = 1$ birim ve her tabakanın kalınlığı eşit kabul edilmiştir. Narinlik oranı $L/h = 15$ olarak seçilmiştir. Tüm frekanslar $\Omega = \omega L^2 \sqrt{\rho / E_{11}} / h$ şeklinde boyutsuz olarak verilmiştir. Kirişin ortasında bulunan delaminasyon hasarının uzunluğu $l = 0,2L$ ve delaminasyonun bulunduğu bölgeye gelen tüm elemanlarda rijitlik kaybının $a = 0,1$ olduğu

kabul edilmiştir. Tablo 14’te, iki ucu ankastre, bir ucu ankastre bir ucu basit mesnetli, basit ve konsol kompozit kirişin boyutsuz doğal frekansları sunulmuştur. Tabloda ayrıca Kargarnovin vd. (2013) tarafından verilen analitik çözüm sonuçları da bulunmaktadır. Önerilen sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen modal analizler sonucunda elde edilen frekanslar ait olduğu titreşim moduna göre f (eğilme veya enine), t (burulma) ve e (uzama veya boyuna) sembolleriyle gösterilmiştir Referans çalışmada her ne kadar eğilme, burulma ve uzama ile ilgili terimler göz önüne alınmış olduğu belirtilse de karşılaştırmada kullanılan örnek için sadece eğilme ve uzama modlarına ilişkin sonuçlara yer verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde, iki ucu ankastre ve konsol kirişlerde sonuçların çok iyi uyum içinde oldukları görülmektedir. Herhangi bir uçta basit mesnet olması durumunda ise sonuçlar bir miktar farklılık göstermektedir. Bunun sebebi, her iki çalışmada basit mesnet modeli ile ilgili olarak yapılan kabuldür. Uzama modları, her iki çalışmada da genel olarak aynı sırada çıkmakla birlikte, bu çalışmanın sonuçları ile analitik çözüm arasındaki farkın büyük olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin delaminasyon modellemesindeki farklılık olduğu düşünülmektedir. Analitik çalışmada, kiriş delaminasyonun olduğu yer dikkate alınarak dört parça olarak düşünülmüş ve süreklilik şartları ile bu parçalar birbirlerine bağlanmıştır. Tezde kullanılan yaklaşımda ise hasarlı kiriş, delaminasyonlu bölge boyunca tüm elemanlara rijitlik kaybı verilerek modellenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, iki ucu ankastre (A-A), bir ucu ankastre bir ucu basit mesnetli (A-B) ve iki ucu basit mesnetli (B-B) kirişlerde burulma titreşimlerine ait frekansların sınır şartıyla değişmediği görülmektedir. Bunun sebebi, bahsedilen üç sınır koşulu için de burulma yönünde her iki ucun ankastre kabul edilmiş olmasıdır.

Tablo 12. Enine kenar çatlaklı izotropik konsol kiriş için yakınsama analizi sonuçları

Eleman Sayısı	Senaryo-1			Senaryo-2		
	f_1 (Hz)	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
10	25,0306	162,3962	454,1986	24,7996	153,0134	448,6084
20	25,6356	163,3388	454,4484	25,4868	158,3184	453,4282
40	25,8913	163,3925	455,3886	25,8074	160,8238	455,1749
60	25,9722	163,3457	455,6958	25,9140	161,6234	455,5962
80	26,0312	163,4595	455,6332	25,9867	162,1643	455,5706
100	26,0603	163,4775	455,6673	26,0242	162,4398	455,6222
Song vd. (2003)	26,1015	163,5959	456,3634	26,0694	162,7112	456,3611

Tablo 13. Delaminasyonlu kompozit kirişin ilk on doğal frekansı (Hz)

Mod	Bu çalışma		Ručevskis vd. (2009)		Deneyssel
	$\alpha = 0,628$	$\alpha = 0,636$	$\alpha = 0,628$	$\alpha = 0,636$	
1	48,735	48,823	48,94	49,02	50,25
2	137,213	137,351	137,04	137,19	137,50
3	275,803	275,881	276,75	276,81	268,50
4	441,491	441,069	442,88	443,36	447,25
5	674,723	674,945	675,20	675,56	650,75
6	934,395	935,052	940,86	941,44	898,75
7	1239,574	1240,441	1243,68	1244,56	1192,50
8	1594,624	1595,886	1606,07	1607,24	1574,00
9	1991,698	1992,867	2004,11	2005,36	1903,50
10	2422,225	2424,098	2448,67	2450,24	2448,50

Tablo 14. Delaminasyonlu [90/0] kompozit kirişin boyutsuz doğal frekansları

A-A		A-B		B-B		A-S	
Bu çalışma	Analitik ^a	Bu çalışma	Analitik ^a	Bu çalışma	Analitik ^a	Bu çalışma	Analitik ^a
2,7818 (f_1)	2,7247	1,9875 (f_1)	1,8803	1,3014 (f_1)	1,1926	0,4767 (f_1)	0,4659
7,0310 (f_2)	6,8694	6,0105 (f_2)	5,8610	4,9636 (f_2)	4,8650	2,7849 (f_2)	2,5801
7,9624 (t_1)	-	7,9624 (t_1)	-	7,9624 (t_1)	-	3,9403 (t_1)	-
12,3977 (f_3)	12,1864	11,3590 (f_3)	10,4575	10,1005 (f_3)	9,0452	7,3014 (f_3)	7,1053
15,6375 (t_2)	-	15,6375 (t_2)	-	15,0468 (e_1)	13,138 *	11,8226 (t_2)	-
18,5802 (f_4)	17,8079	16,9314 (e_1)	13,255 *	15,6375 (t_2)	-	12,9419 (f_4)	11,2716
23,7713 (t_3)	-	17,6543 (f_4)	17,0118	17,4680 (f_4)	16,2337	16,9721 (e_1)	14,197 *
25,2061 (f_5)	24,7011	-	-	-	-	-	-

^a Kargarnovın vd. (2013) (* uzama modunu göstermektedir.)

f : eğilme modu, t : burulma modu, e : uzama modu

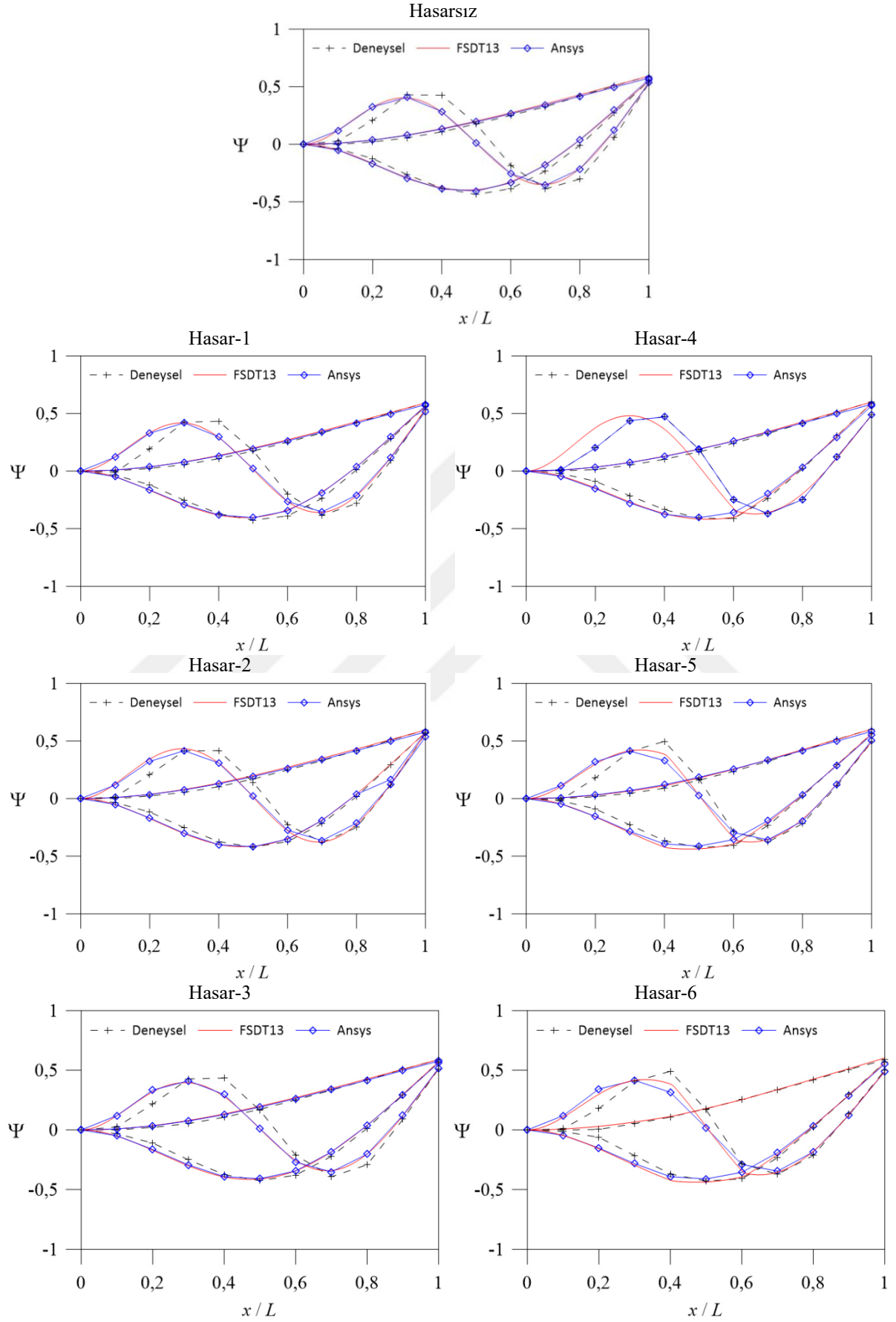
Önerilen sonlu eleman modelinin deneysel doğrulaması için farklı hasar senaryoları altında kompozit konsol kiriş üzerinde ölçümler yapılmıştır. Dikkate alınan hasar senaryoları Tablo 15’te verilmiştir. Tablo 16’da test kirişi için FSDT13, ANSYS ve deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçların karşılaştırması verilmiştir. Görüldüğü üzere, sonuçlar iyi bir uyum içindedir. Yöntemler arasındaki hata oranları genel olarak %5’i geçmemektedir. İstisna olarak, Hasar-6 durumunda birinci doğal frekans için yöntemler arasındaki farklar %5’i aşmaktadır. Özellikle deneysel sonuçlarda %10 üzerinde farklar ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi olarak, deneysel ölçümde yanlış pik seçimi, mesnetleme koşullarının tam sağlanamaması, ortam gürültüsü vb. olabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 15. Test kirişine ait hasar senaryoları

Hasar Senaryosu	Konum	α
Hasar-1	0,62L	0,5
Hasar-2	0,62L / 0,42L	0,5 / 0,5
Hasar-3	0,62L / 0,42L / 0,22L	0,5 / 0,5 / 0,5
Hasar-4	0,62L / 0,42L / 0,22L	0,9375 / 0,5 / 0,5
Hasar-5	0,62L / 0,42L / 0,22L	0,9375 / 0,9375 / 0,5
Hasar-6	0,62L / 0,42L / 0,22L	0,9375 / 0,9375 / 0,9375

Tablo 16. Test kirişi için sayısal ve deneysel olarak elde edilen ilk üç frekansın karşılaştırılması

Mod	Bu çalışma	ANSYS	Fark (%)	Deneysel			
				EFDD	Fark (%)	SSI	Fark (%)
Hasarsız							
1	5,3727	5,170	3,77	5,37	0,05	5,34	0,61
2	33,6389	32,371	3,77	32,52	3,33	32,31	3,95
3	94,0452	90,537	3,73	94,64	0,63	95,34	1,37
Hasar-1							
1	5,3661	5,156	3,92	5,34	0,48	5,34	0,48
2	33,2609	31,547	5,15	31,80	4,39	31,96	3,91
3	93,3550	88,700	4,98	95,79	2,61	95,42	2,21
Hasar-2							
1	5,3388	5,098	4,51	5,27	1,28	5,28	1,10
2	32,9774	30,893	6,32	31,48	4,54	31,55	4,33
3	92,8753	87,771	5,49	91,49	1,49	92,85	0,027
Hasar-3							
1	5,2723	4,957	5,98	5,06	4,03	5,12	2,88
2	32,9736	30,880	6,35	31,41	4,74	31,43	4,68
3	92,4852	86,696	6,26	92,07	0,45	91,43	1,14
Hasar-4							
1	5,1846	4,932	4,87	4,94	4,72	4,96	4,33
2	28,8970	29,481	2,02	27,66	4,28	27,86	3,58
3	86,0441	83,611	2,82	90,45	5,12	89,98	4,57
Hasar-5							
1	4,8652	4,823	0,86	4,66	4,22	4,68	3,80
2	27,1716	28,475	4,79	26,77	1,48	26,90	0,99
3	79,4908	81,872	2,99	80,10	0,76	82,36	3,61
Hasar-6							
1	4,2760	4,597	7,51	3,52	17,68	3,61	15,58
2	26,8828	28,472	5,91	25,42	5,44	25,24	6,11
3	77,7050	80,566	3,68	80,21	3,22	80,42	3,49



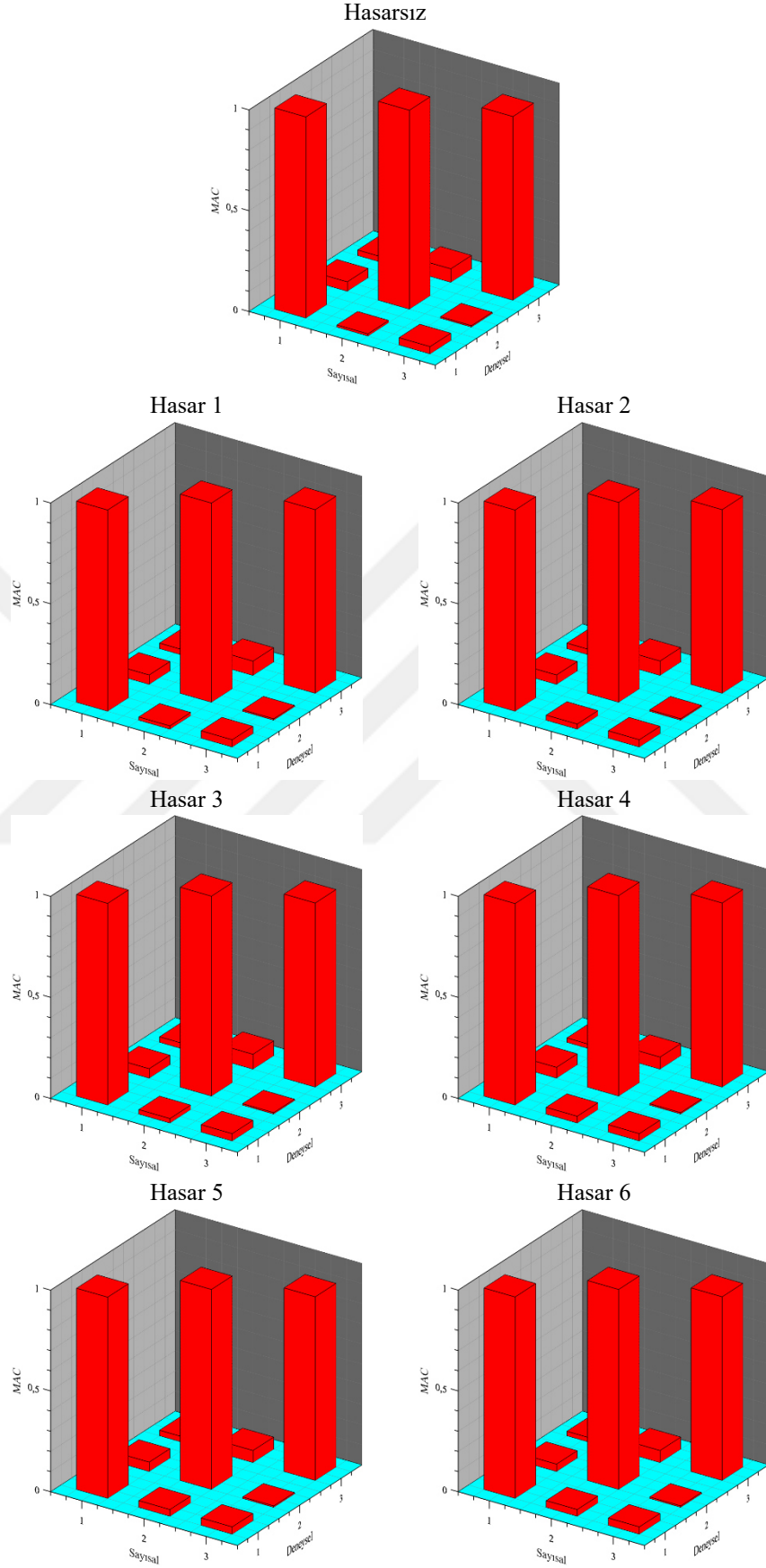
Şekil 24. Test kirişinin ilk üç mod şekli

Şekil 24'te, test kirişinin önerilen sonlu eleman, deneysel ve ANSYS mod şeklinin karşılaştırması verilmiştir. Görüleceği üzere üç yöntemle elde edilen mod şekli eğrileri iyi bir uyum göstermektedir. Hasarlı kesitlerde mod şekli eğrilerinin eğiminde süreksizliklerin meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, çatlakların kalınlık yönünde genişlediği Hasar-4, Hasar-5 ve Hasar-6 durumları için elde edilen eğrilerde daha net görülmektedir.

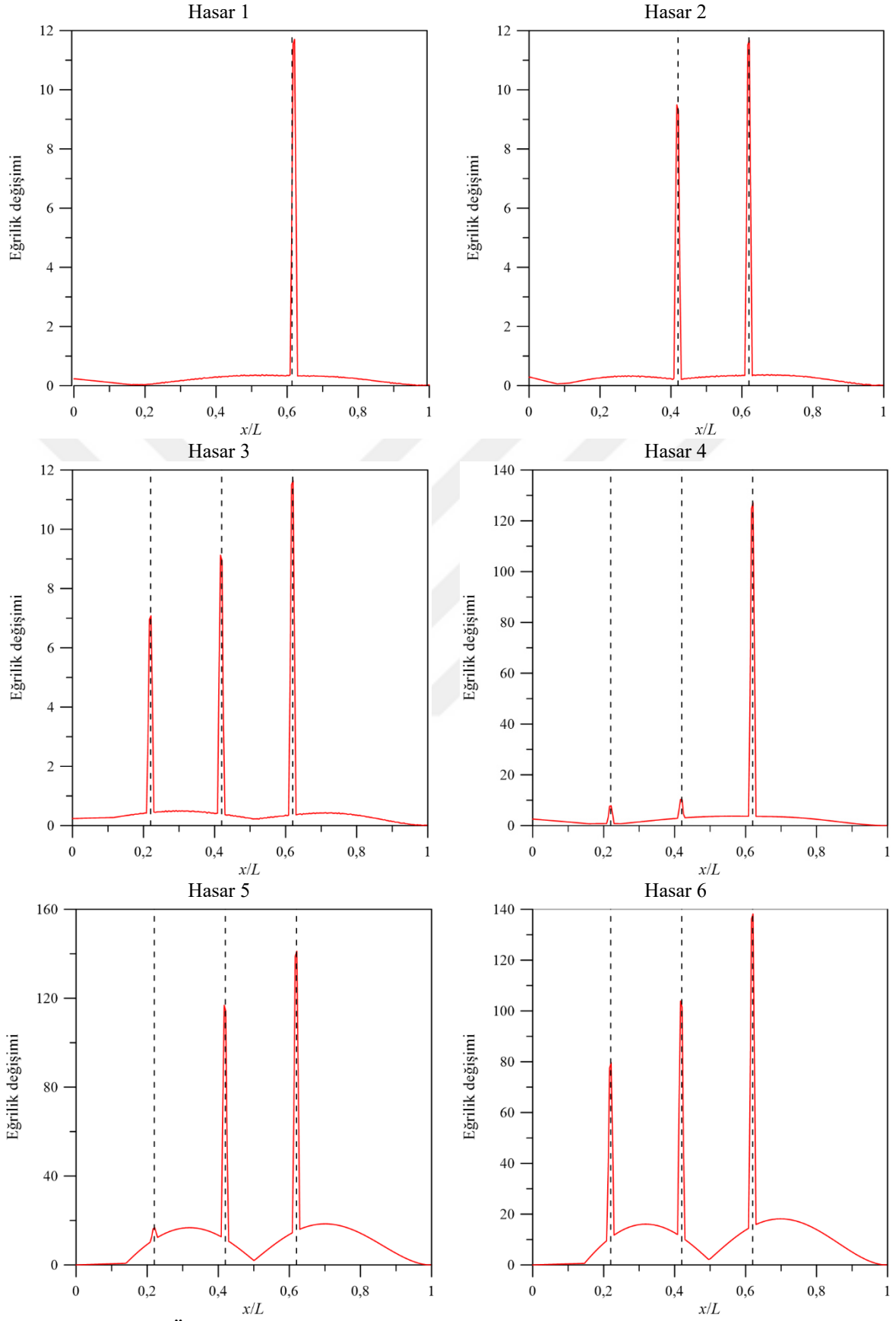
3.3. Modal Eğrilik ve Esneklik Değişime Dayalı Hasar Tespit Sonuçları

Bu bölümde, test kirişine ait sayısal (FSDT13) ve deneysel titreşim verileri kullanılarak modal parametrelere (Eğrilik, Esneklik) dayalı hasar metriklerinin doğrudan kullanımıyla hasar tespitine ait sonuçlar irdelenmiştir. Hasar tespitine geçmeden önce, sayısal ve deneysel mod şekil vektörlerinin uyumuna bakılmıştır. Bunun için elde edilen MAC grafikleri Şekil 25'te sunulmuştur. Grafiklere göre iki farklı yöntemle elde edilen mod şekilleri, dikkate alınan tüm durumlarda çok iyi bir korelasyon göstermektedir.

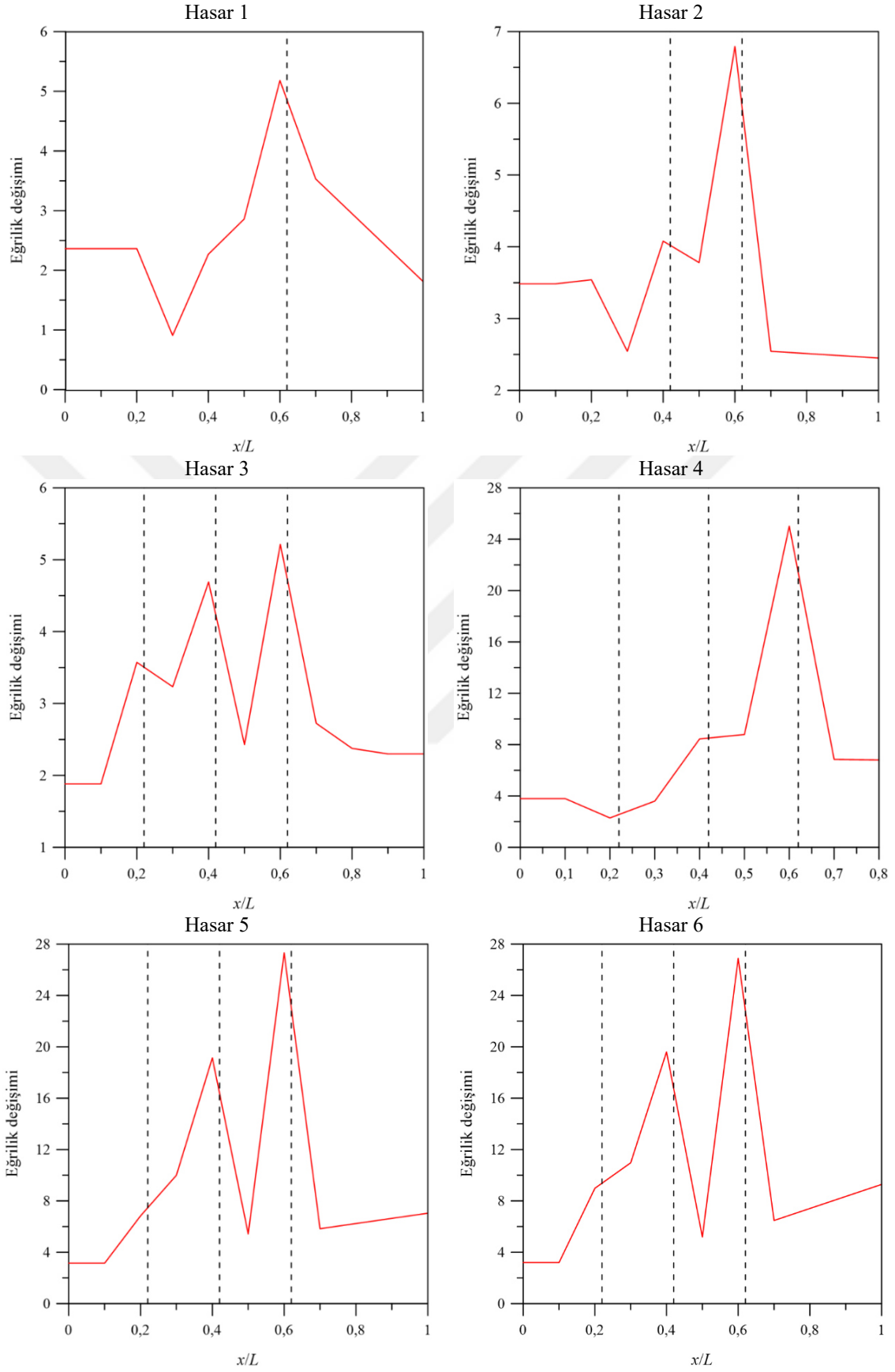
Sayısal ve deneysel mod şekli eğriliği değişimleri sırasıyla Şekil 26 ve Şekil 27'de verilmiştir. Kirişte hasarlı kesitte eğrilik grafiklerinde ani bir artış olması beklenir. Şekil 26'daki sayısal verilerle elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere tüm hasar senaryoları için çatlak konumları tam olarak belirlenebilmiştir. Bunda en önemli etken, sayısal olarak modal yer değiştirme ve dolayısıyla eğrilik elde edilen koordinat sayısının fazla olmasıdır. Deneysel verilere göre sonuçları gösteren Şekil 27'de ise hasar konumlarının belirlenebildiği; ancak, bu işlemin öncekine göre nispeten daha zor olduğu görülmektedir. Bunda, deneysel ölçümlerle mod verisi alınan koordinat sayısının daha az olmasının etkisi vardır. Bu iki grafikteki sonuçlara dayanarak, eğrilik değişimi ile doğrudan hasar tespitinde kiriş üzerinde bulunan ivmeölçer sayısı (dolayısıyla ölçüm alınan koordinat sayısının) ve ivmeölçerlerin hasarlı bölgeye uzaklıklarının çok önemli olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca şekillerden modal eğrilik yöntemiyle hasar tespitinde, hasar şiddetinin önemli olduğu sonucuna varılmaktadır. Şöyle ki, farklı hasar şiddetine sahip çoklu hasar durumlarında şiddeti daha büyük hasar kendini grafiklerde daha açık gösterirken, sağlam hasarlara ait bilgi kaybolabilmekte ve yer tespiti zorlaşmaktadır (Bkz. Şekil 27'de son üç hasar durumu).



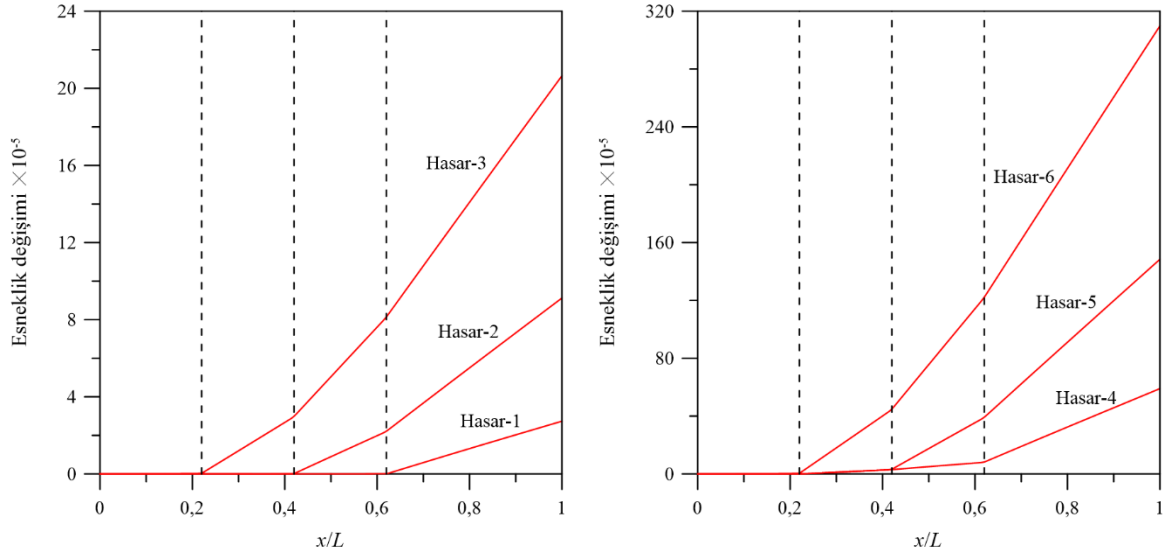
Şekil 25. Sayısal ve deneysel mod şekilleri arasındaki MAC grafikleri



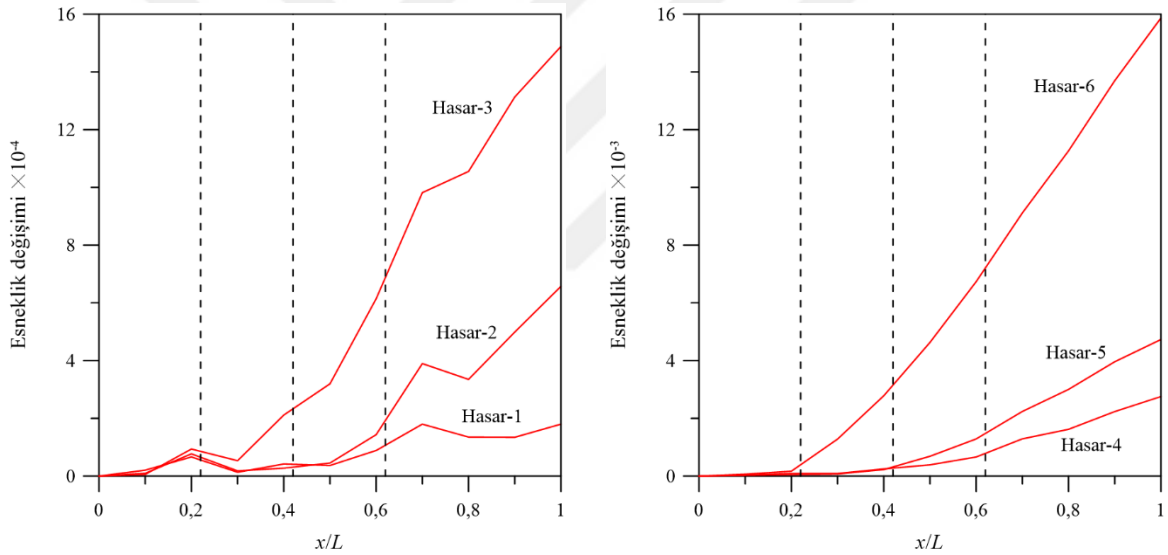
Şekil 26. Önerilen sonlu eleman sonuçlarına göre mod eğriliği değişiklikleri



Şekil 27. DeneySEL ölçümlere göre mod eğriliği değişiklikleri



Şekil 28. Önerilen sonlu eleman sonuçlarına göre esneklik değişiklikleri



Şekil 29. DeneySEL ölçümlere göre esneklik değişiklikleri

Sayısal ve deneySEL esneklik değişimleri sırasıyla Şekil 28 ve Şekil 29’da verilmiştir. Kirişte hasarlı kesitte esneklik eğiminde ani bir değişim olması beklenir. Şekillerden açıkça görülebileceği üzere, ilk üç senaryo için sayısal verilere dayalı olarak hesaplanan esneklik değişimleriyle hasar konumları tam olarak belirlenebilmektedir. Hasar şiddetlerinin arttırıldığı ikinci grup senaryo için konumlar yine bulunabilmekle birlikte, şiddeti büyük olan hasar daha belirgin iken sığ hasara ait bilgiyi ayırt etmek zorlaşmaktadır. Burada da esneklik değişimiyle hasar tespitinde doğruluk, veri alınan koordinat sayısına ve ivmeölçerin konumuna bağlıdır.

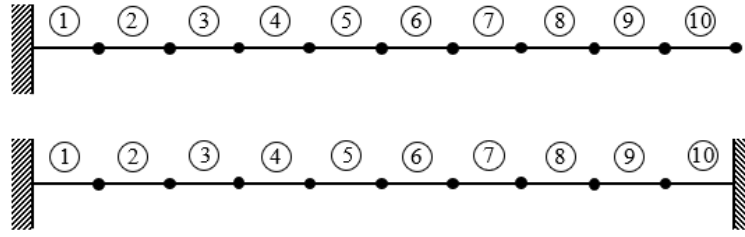
3.4. Optimizasyona Dayalı Hasar Tespit Sonuçları

Bu bölümde, hasar tespiti için önerilen yöntemin sonuçları verilmiştir. Optimizasyon için dört klasik algoritma (GA, HSA, PSO, TLBO) kullanılarak elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmış; ardından parametrik çalışma yapılmıştır. Optimizasyon işleminde sonuçların tutarlılığını sağlamak amacıyla tüm sonuçlar beş bağımsız koşum yapılarak elde edilmiştir.

3.4.1. HSA ile Hasar Tespiti Sonuçları

Armoni Arama Algoritması kullanılarak elde edilen hasar tespit sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Hasar tespitine geçmeden önce sonlu eleman yakınsama analizi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 17’de verilmiştir. Buna göre, söz konusu kiriş için $N = 10$ eleman kullanmak yeterli doğrulukta sonuç vermektedir. Parametrik çalışmaya esas olan kirişlerin sonlu eleman modeli Şekil 30’da verilmiştir.

Öncelikle, literatürden iki örnek üzerinde önerilen yöntemin doğrulaması yapılmıştır. İlk örnek olarak iki ucu ankastre sınır şartına sahip $[0/90/0]$ dikdörtgen kesitli kompozit kiriş göz önüne alınmıştır (Dinh-Cong vd., 2018). Yazarlar bu çalışmada, esneklik değişimine dayalı bir amaç fonksiyonunu Jaya algoritmasıyla birlikte kullanmışlardır. Kiriş, 16 elemana bölünmüştür. Kirişin geometrik özellikleri $L = 200$ mm, $b = 20$ mm ve $h = 20$ mm olarak verilmiştir. Tabaka malzeme özellikleri ise $E_1 / E_2 = 40$, $G_{12} = G_{13} = 0.6E_2$, $G_{23} = 0.5E_2$, $\nu_{12} = 0.25$ ve $\rho = 1000$ kg/m³ olarak hesaba katılmıştır. Kirişi oluşturan tabakaların yükseklikleri eşittir. Tablo 18’de, gürültünün dikkate alınması ve alınmaması durumları için üç senaryo altında kirişte hasar tespit sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen yöntemle yapılan analizlerde, kiriş üzerinde keyfi olarak seçilen altı koordinattan alınan eğilme titreşim modları göz önüne alınmış; optimizasyonda (115) eşitliği ile verilen $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar referans çalışma ile karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin her durum için çok iyi uyum gösterdiği ve sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Burada, referans çalışmaya ait sonuçların kiriş üzerindeki en uygun ivmeölçer konumlarına göre elde edildiğini; fakat, tez çalışmasında tamamen keyfi seçilen konumlar kullanıldığını belirtmekte fayda vardır. Bu durum, önerilen yöntemin rastgele seçilmiş noktalardan alınan verileri kullanarak dahi oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 30. Parametrik çalışmada göz önüne alınan kirişlerin sonlu eleman modeli

Tablo 17. Hasarsız iki ucu ankastre $[30/50]_2$ kiriş için yakınsama analizi sonuçları

Eleman sayısı	Doğal frekanslar (Hz)				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
2	647,416	2059,921	3927,237	5104,989	5385,672
4	638,749	1660,087	3052,057	3913,302	5061,198
8	638,036	1648,654	3005,153	3911,176	4605,382
10	637,782	1647,704	2999,205	3910,917	4589,195
12	637,771	1646,858	2998,117	3910,885	4585,305
16	637,765	1646,744	2997,414	3910,086	4582,764

Tablo 18. $[0/90/0]$ iki ucu ankastre kompozit kiriş için hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması

Senaryo	Gerçek hasar		Hasar tespit sonuçları					
	Eleman	Hasar şiddeti	Gürültü yok	Gürültü var				
			HSA	Jaya ¹ (6 SD)	HSA	Jaya ¹ (6 SD)	Jaya ¹ (7 SD)	Jaya ¹ (8 SD)
1	1	0,30	0,2985	0,2951	0,2940	0,2322	0,2564	0,2790
2	5	0,20	0,1928	0,1992	0,2253	0,1629	0,1582	0,1951
	16	0,30	0,2967	0,2736	0,2899	0,2004	0,2483	0,2449
3	1	0,20	0,1945	0,2012	0,2096	0,1296	0,1391	0,1876
	2	0,30	0,3232	0,3063	0,2706	0,3328	0,3216	0,3157
	9	0,30	0,2629	0,2993	0,2682	0,2793	0,2816	0,3033

¹ Dinh-Cong vd. (2018)

SD: Serbestlik Derecesi

İkinci örnekte, kare kesitli $[0/90/0]$ konsol kiriş dikkate alınmıştır (Vo-Duy vd., 2016). Kirişin malzeme özellikleri bir önceki örnektekiyle aynıdır. Geometrik özellikler ise $L = 100$ mm ve $b = h = 10$ mm'dir. Kiriş, 16 eşit elemana bölünmüştür. Kirişte hasar, 4. ve 10. elemanların rijitliğinde sırasıyla %30 ($\alpha = 0,30$) ve %5 ($\alpha = 0,05$) azalma şeklinde tanımlanmıştır. Referans çalışmada hasar tespiti için iki aşamalı bir yaklaşım kullanılmıştır: Birinci adımda, olası hasarlı elemanların konumu modal şekil değiştirme enerjisi ile belirlenmiştir. İkinci adımda ise Diferansiyel Evrim (DE) algoritması ile ilk ilk

adımdan gelen elemanlarda hasarın şiddeti elde edilmiştir. Bu ikinci adımda mod şekillerinin değişimine dayalı bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Tablo 19, tez çalışmasında önerilen yöntemle elde edilen hasar tespit sonuçları, referans çalışmadan elde edilenlere karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İkinci örnek için de $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Tablodan sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Parametrik çalışma için Tablo 20’de verilen hasar senaryoları altında $[30/50]_2$ tabaka dizilimine sahip kompozit kiriş ele alınmıştır. Kiriş, $L = 381$ mm uzunluğunda ve $b = h = 24,5$ mm boyutlarında kare kesite sahip olup, tüm tabakalar eşit yüksekliktedir. Tabaka malzeme özellikleri Tablo 21’de verilmiştir. Çözümlerde, iki ucu ankastre (A-A) ve konsol (A-S) sınır şartları dikkate alınmıştır.

Tablo 19. $[0/90/0]$ konsol kompozit kiriş için hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması

Yöntem	α_4	α_{10}	AF ($F_2(\mathbf{x})$)
<i>Gürültü yok</i>			
Bu çalışma	0,2912	0,4970	$1,1479 \times 10^{-4}$
DE ¹	0,3000	0,5000	$1,9886 \times 10^{-7}$
IDE ¹	0,3000	0,5000	$5,1209 \times 10^{-7}$
<i>Gürültü var</i>			
Bu çalışma	0,3001	0,4876	$2,7743 \times 10^{-3}$
DE ¹	0,3007	0,4976	0,1111
IDE ¹	0,3007	0,4976	0,1111

¹ Vo-Duy vd. (2016)

DE = Diferansiyel Evrim Algoritması, IDE = İyileştirilmiş Diferansiyel Evrim Algoritması

Tablo 20. Parametrik çalışmada dikkate alınan hasar senaryoları

Hasar senaryosu		Hasarlı eleman		Rijitlik kaybı katsayısı, α		
1	3			0,50		
2	3	4		0,30	0,20	
3	3	4	8	0,30	0,10	0,10
4	1			0,50		
5	1	2		0,30	0,20	
6	1	2	7	0,30	0,10	0,10

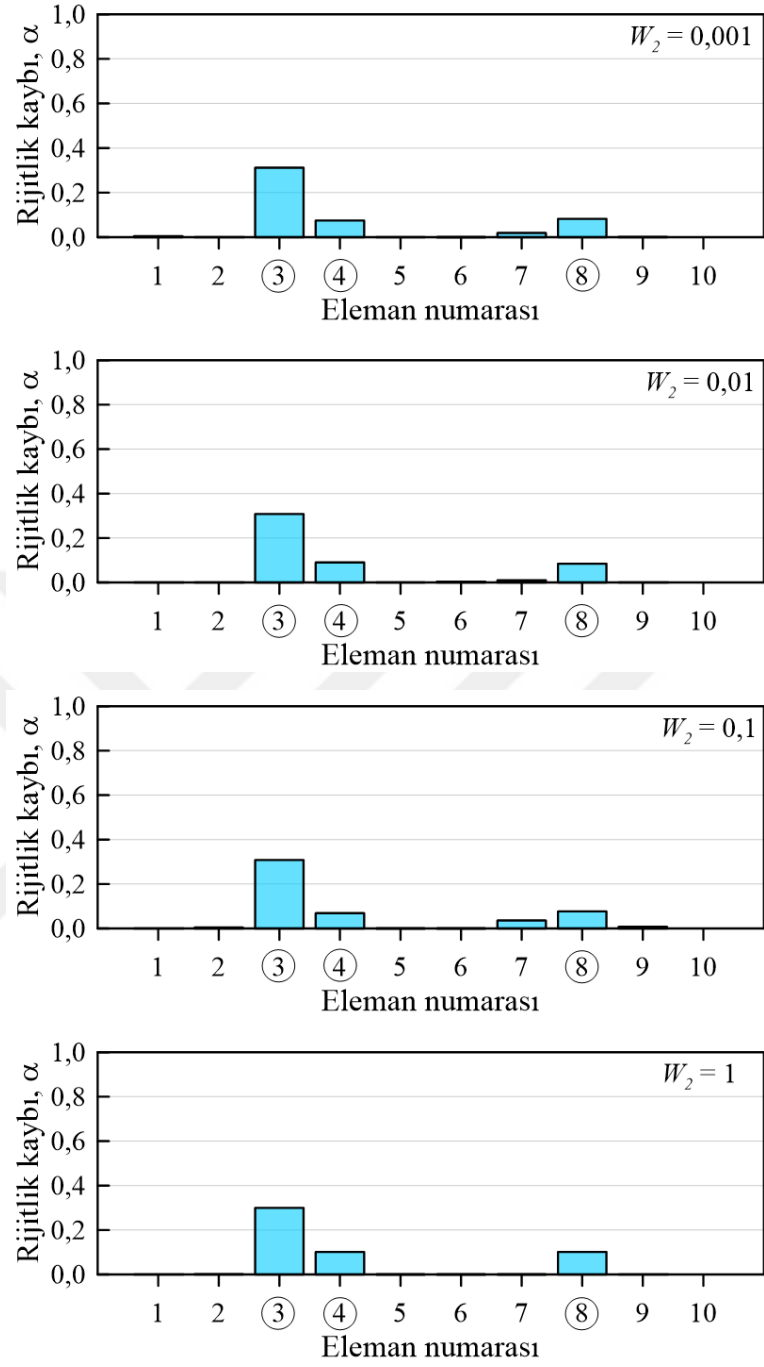
Tablo 21. Parametrik çalışma için tabaka malzeme özellikleri

E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (Gpa)	$G_{12} = G_{13}$ (Gpa)	G_{23} (Gpa)	ν	ρ (kg/m ³)
144,8	9,65	4,14	3,45	0,30	1389,23

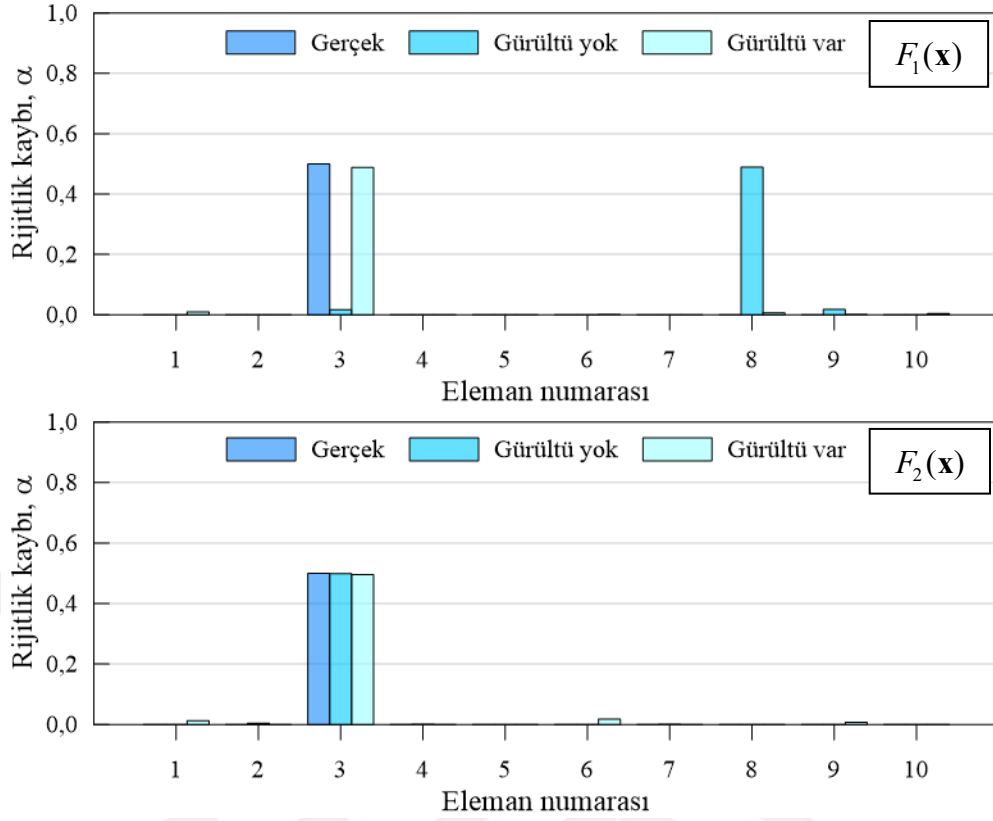
HSA için optimizasyon parametreleri, $HM = 10$, $HMCR = 0,85$ ve $PAR = 0,25$ olarak seçilmiştir. Bant genişliği $bw(i) = (x_i^U - x_i^L) / 20$ ($i = 1, 2, \dots, D$) olarak dikkate alınmıştır (Tuo vd., 2015). Burada karar değişkenleri için alt ve üst limitler $x_i^L = 0$ ve $x_i^U = 1$ olarak alınmıştır. D karar değişkenlerinin sayısı, modeldeki sonlu eleman sayısı kadar alınmış; durdurma kriteri olarak $tol = 1 \times 10^{-5}$ ve maksimum iterasyon sayısı $MaxIt = 10.000$ olarak seçilmiştir. (113) ve (115) eşitlikleri ile verilen $F_1(\mathbf{x})$ ve $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonları kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

$F_1(\mathbf{x})$ ve $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonlarındaki ağırlık katsayılarının hasar tespit sonuçları üzerindeki göreceli etkisini kontrol etmek üzere $W_{1i} = 1 = \text{sabit}$, $W_{2i} = 1, 0,1, 0,01$ ve $0,001$ olarak dikkate alınmış ve Hasar-3 için iki ucu ankastre kirişte ayrı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 31, ağırlık katsayılarının belirlenen sonuçlar üzerindeki etkisini göstermektedir. Görüldüğü gibi $W_{1i} = 1$ ve $W_{2i} = 1$ durumu diğerlerine kıyasla en iyi sonucu vermektedir. Ağırlık katsayıları $W_{2i} < 1$ değerleri için gürültü etkisi göz ardı edilmesine rağmen gerçekte hasarlı olan elemanların dışındaki başka elemanlarda küçük de olsa hasar tespit edildiği görülmüştür. Bu sonuçlara dayanarak, bundan sonraki tüm analizlerde $W_{1i} = 1$ ve $W_{2i} = 1$ olarak dikkate alınmıştır.

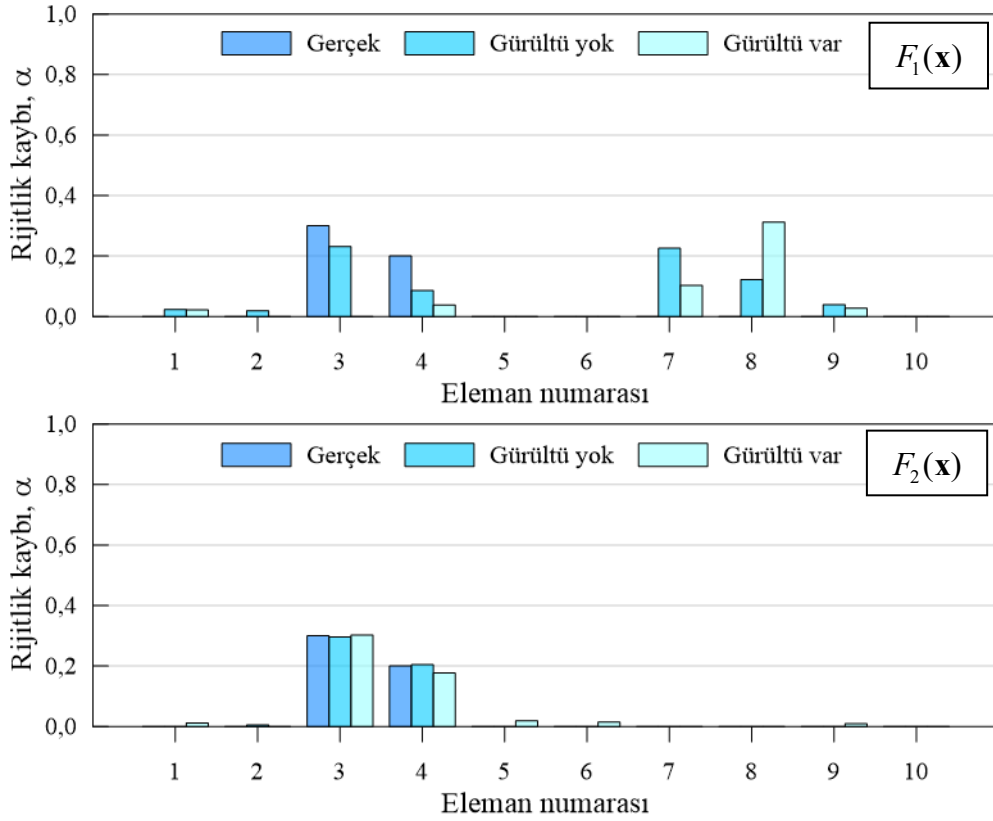
Şekil 32-37'de iki ucu ankastre kompozit kiriş için sonuçlar sunulmuştur. Görüldüğü üzere, dikkate alınan her senaryoda hasarlı elemanlar, $F_2(\mathbf{x})$ ile gösterilen hem frekans hem de mod şekil değişimine dayalı amaç fonksiyonu kullanılarak diğerine göre daha iyi bir doğrulukla tahmin edilmiştir. Burada, bazı hasarlı olmayan elemanlarda da hasar tespit edilmekle beraber (yanlış pozitif, false positive), bu değerler çok küçük olduğu için göz ardı edilebilir. Sadece frekans değişimine dayalı $F_1(\mathbf{x})$ fonksiyonu ile elde edilen sonuçlara dikkat edilirse, yanlış pozitif elemanların sayısı artmıştır. Sınır koşullarındaki simetri nedeniyle, gerçek hasarlı eleman yerine bunun simetrisinde bulunan elemanda hasar tespit edilmiştir (Bkz. Hasar-1 ve Hasar-4). Ek olarak, gürültünün sonuçlar üzerindeki etkisinin $F_1(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu kullanıldığında diğerinin kullanımına göre daha belirgin olduğu görülmüştür.



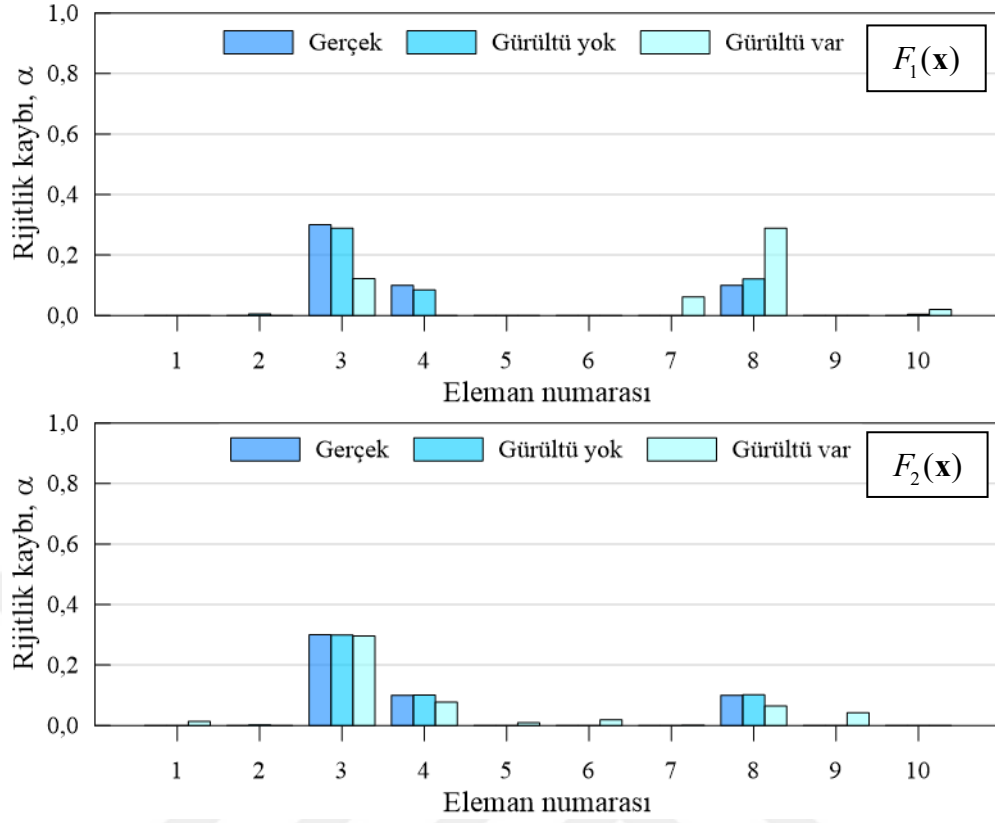
Şekil 31. Ağırlık katsayılarının hasar tespit sonuçları üzerindeki etkisi
(Daire içindeki sayılar hasar konumlarını göstermektedir)



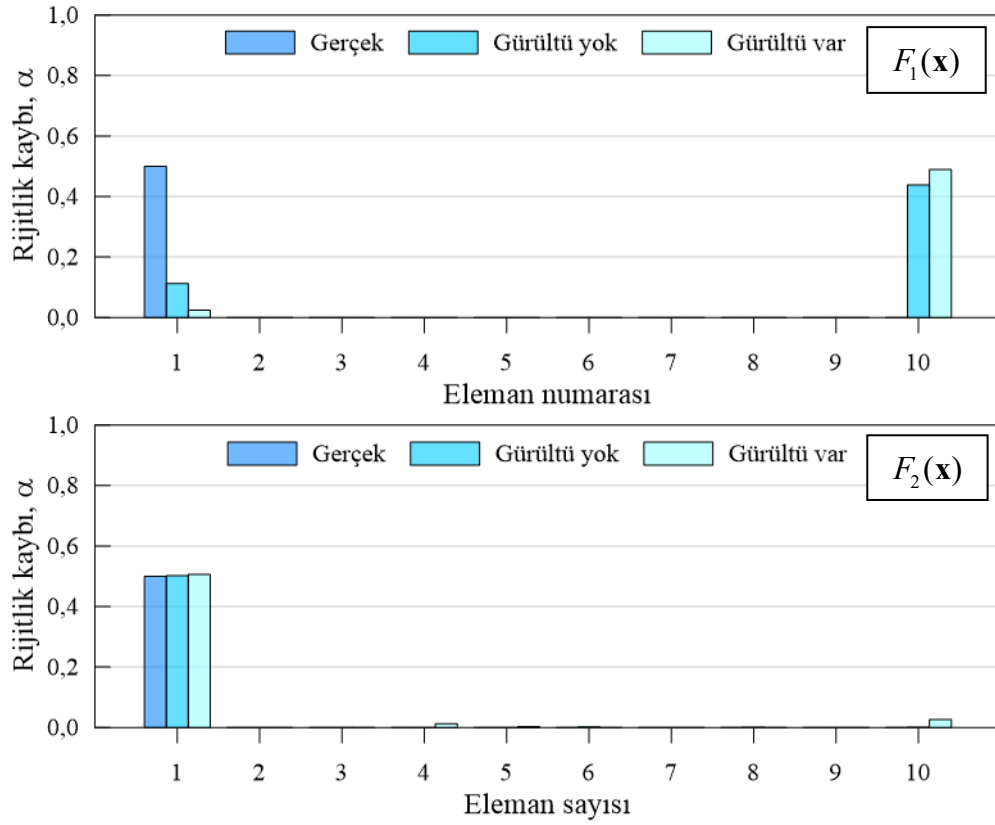
Şekil 32. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)



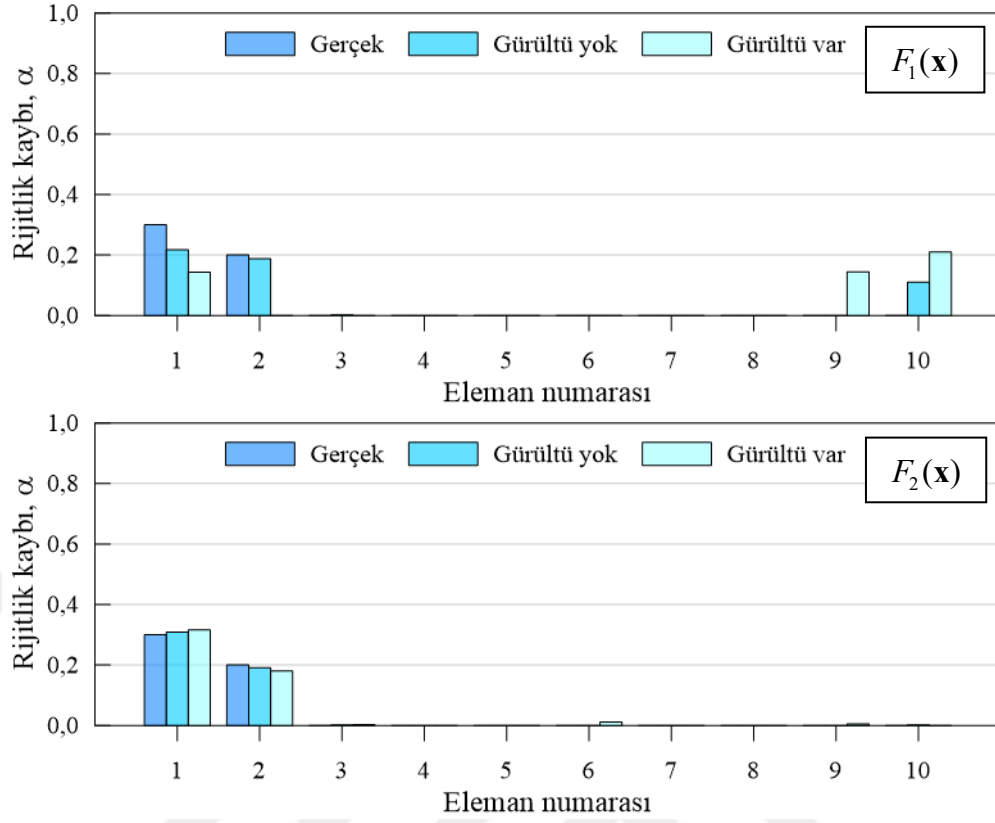
Şekil 33. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)



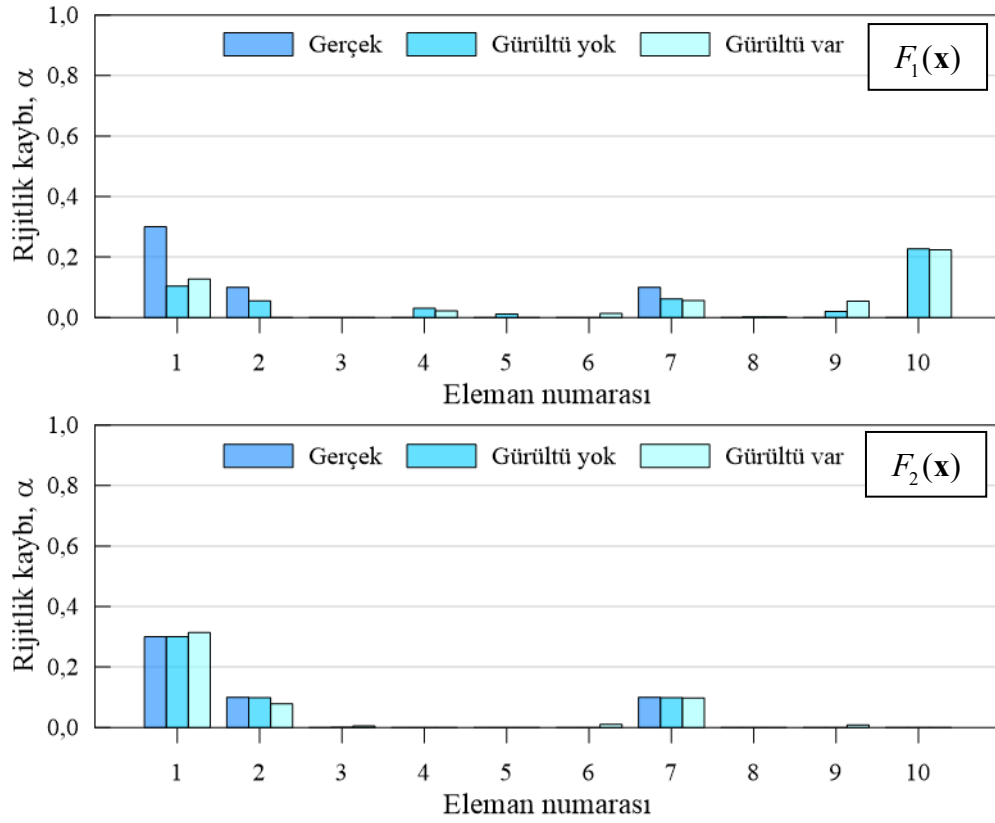
Şekil 34. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)



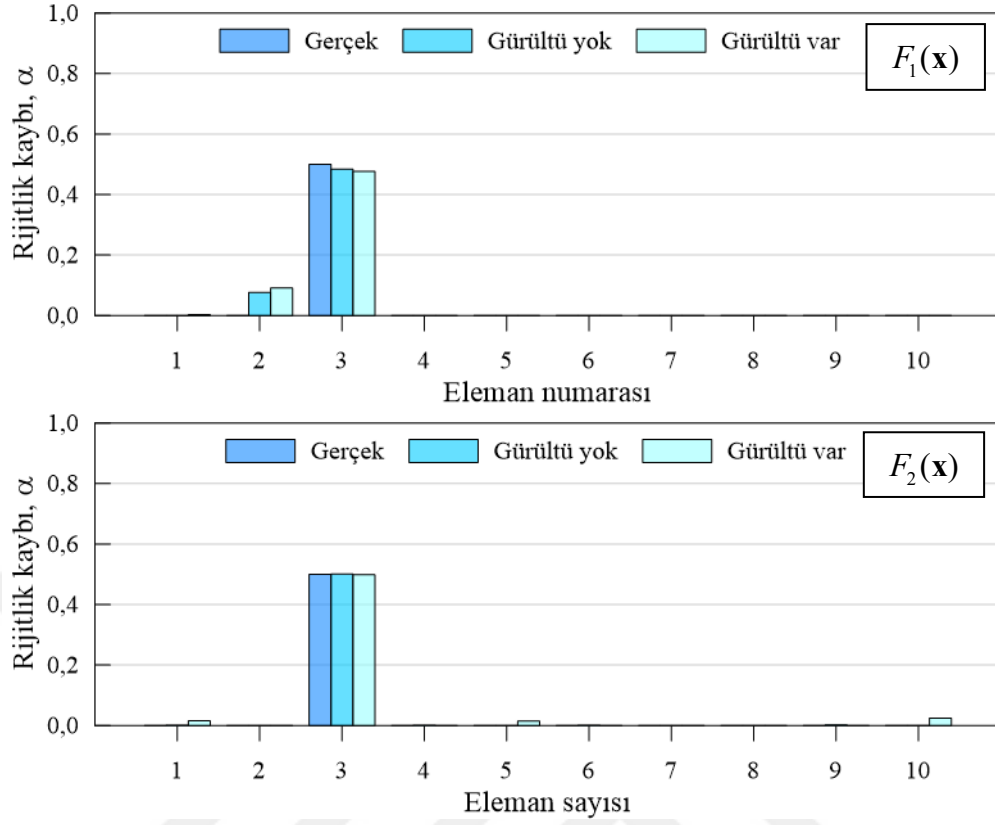
Şekil 35. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-4)



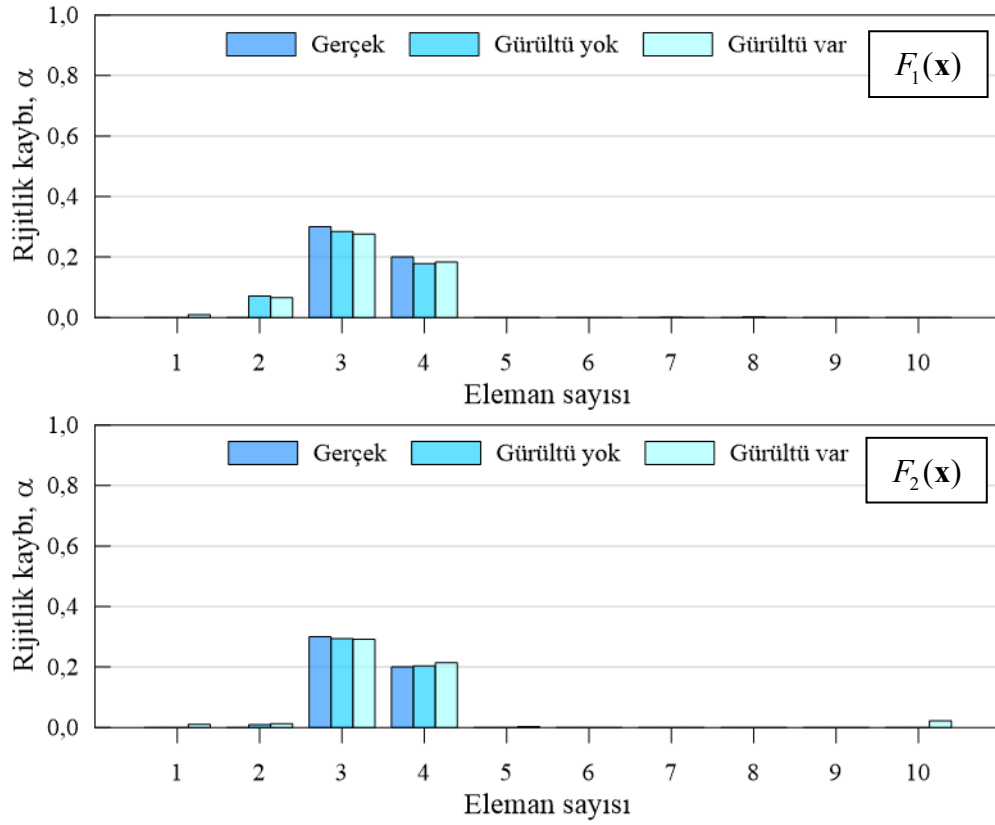
Şekil 36. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-5)



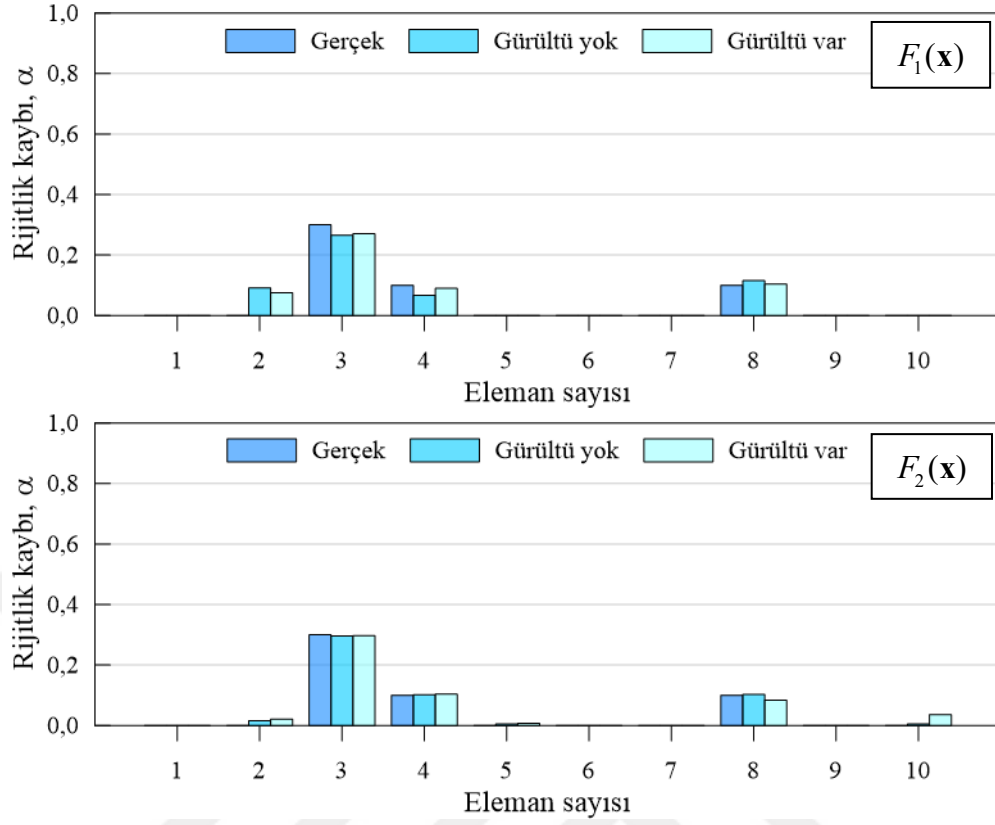
Şekil 37. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-6)



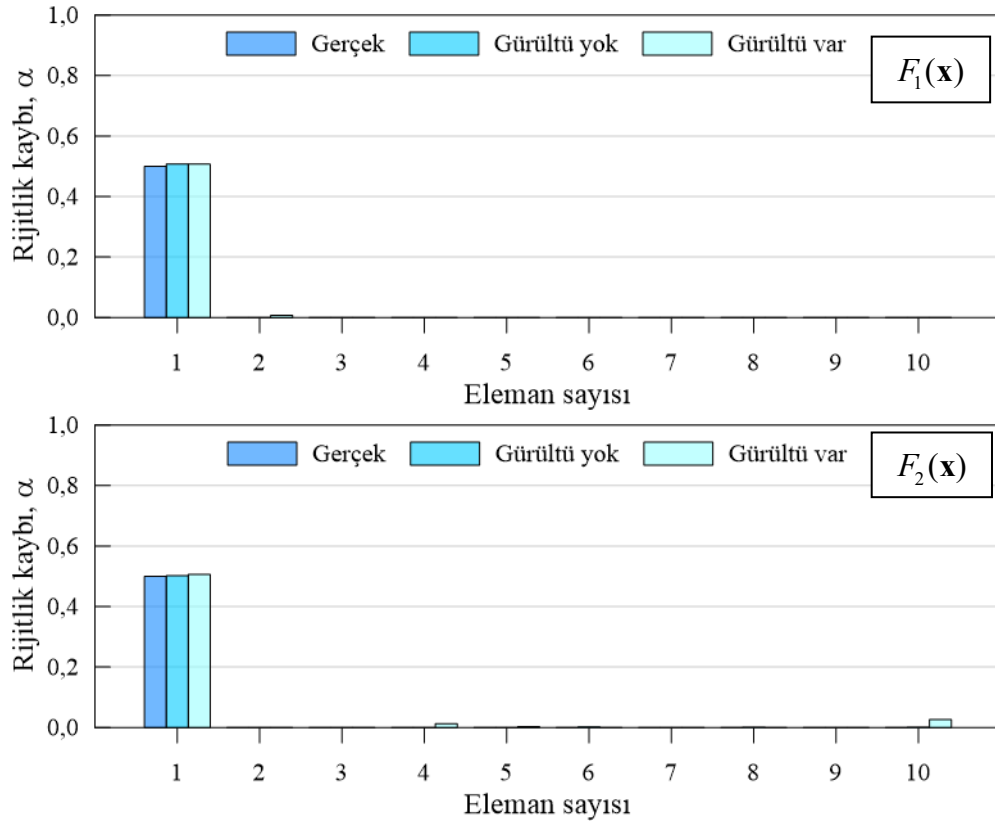
Şekil 38. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)



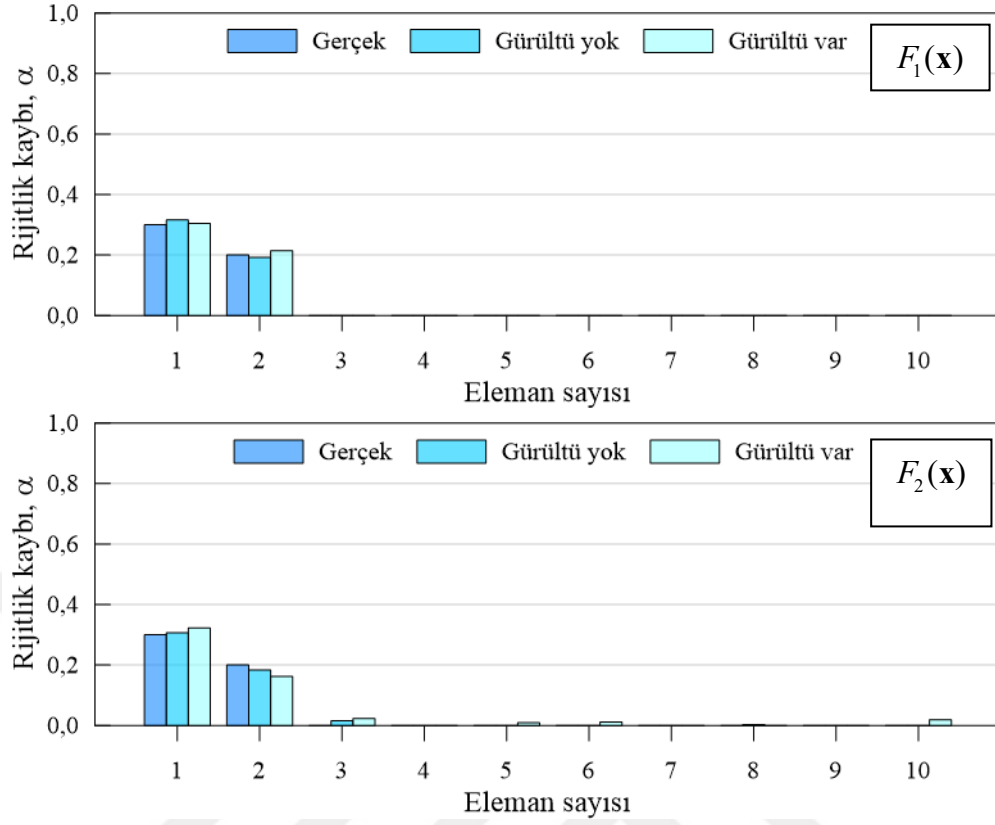
Şekil 39. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)



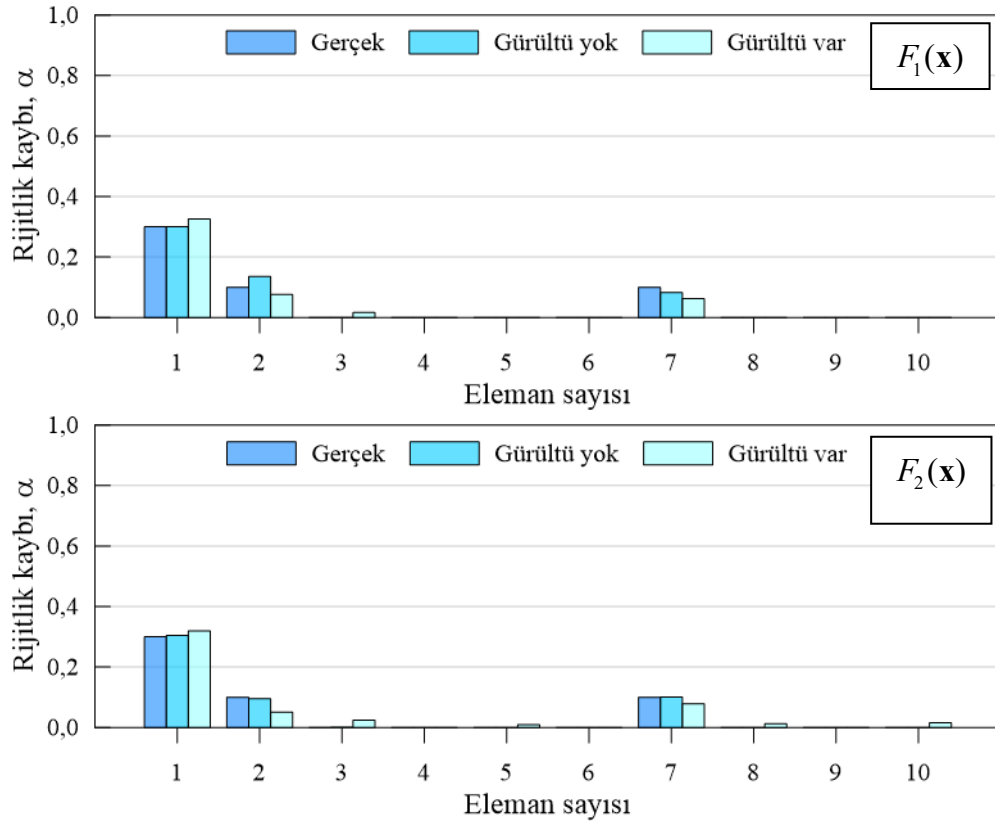
Şekil 40. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)



Şekil 41. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-4)



Şekil 42. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-5)



Şekil 43. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-6)

Tablo 22. Konsol kirişte $F_1(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile hasar tespiti sonuçları

Hasar senaryosu	Gerçek hasar		Hasar tespit sonuçları					
	Eleman	Hasar şiddeti	Gürültü yok			Gürültü var		
			Tahmin	Hata %	$F_1(\mathbf{x})$	Tahmin	Hata %	$F_1(\mathbf{x})$
1	3	0,50	0,4840	3,20	$1,16 \times 10^{-3}$	0,4768	4,64	$1,77 \times 10^{-3}$
2	3	0,30	0,2844	5,20	$9,65 \times 10^{-4}$	0,2758	8,07	$1,64 \times 10^{-3}$
	4	0,20	0,1783	10,85		0,1831	8,45	
3	3	0,30	0,2656	11,47	$1,14 \times 10^{-3}$	0,2703	9,90	$1,71 \times 10^{-3}$
	4	0,10	0,0669	33,10		0,0901	9,90	
	8	0,10	0,1153	15,30		0,1042	4,20	
4	1	0,50	0,5075	1,50	$1,42 \times 10^{-3}$	0,5067	1,34	$2,14 \times 10^{-3}$
5	1	0,30	0,3158	5,27	$1,52 \times 10^{-3}$	0,3050	1,67	$2,14 \times 10^{-3}$
	2	0,20	0,1919	4,05		0,2145	7,25	
6	1	0,30	0,3003	0,10	$1,01 \times 10^{-3}$	0,3256	8,53	$1,33 \times 10^{-3}$
	2	0,10	0,1358	35,80		0,0761	23,90	
	7	0,10	0,0823	17,70		0,0621	37,90	

Tablo 23. Konsol kirişte $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile hasar tespiti sonuçları

Hasar senaryosu	Gerçek hasar		Hasar tespit sonuçları					
	Eleman	Hasar şiddeti	Gürültü yok			Gürültü var		
			Tahmin	Hata %	$F_2(\mathbf{x})$	Tahmin	Hata %	$F_2(\mathbf{x})$
1	3	0,50	0,5011	0,22	$3,25 \times 10^{-5}$	0,4984	0,32	$2,22 \times 10^{-3}$
2	3	0,30	0,2943	1,90	$3,26 \times 10^{-5}$	0,2916	2,80	$2,25 \times 10^{-3}$
	4	0,20	0,2040	2,00		0,2140	7,00	
3	3	0,30	0,2958	1,40	$3,35 \times 10^{-5}$	0,2976	0,80	$2,34 \times 10^{-3}$
	4	0,10	0,1022	2,20		0,1038	3,80	
	8	0,10	0,1030	3,00		0,0842	15,80	
4	1	0,50	0,5019	0,38	$4,03 \times 10^{-5}$	0,5063	1,26	$2,17 \times 10^{-3}$
5	1	0,30	0,3067	2,23	$6,29 \times 10^{-5}$	0,3224	7,47	$2,11 \times 10^{-3}$
	2	0,20	0,1839	8,05		0,1625	18,75	
6	1	0,30	0,3046	1,53	$3,88 \times 10^{-5}$	0,3194	6,47	$2,05 \times 10^{-3}$
	2	0,10	0,0953	4,70		0,0513	48,70	
	7	0,10	0,1008	0,80		0,0787	21,30	

Şekil 38-43, dikkate alınan hasar senaryoları altında kompozit konsol kiriş için hasar tespit sonuçlarını vermektedir. Görüldüğü gibi, her iki amaç fonksiyonu için gürültü etkisi dikkate alındığında bile oldukça doğru sonuçlar elde edilmiştir. $F_2(\mathbf{x})$ ile elde edilen sonuçların $F_1(\mathbf{x})$ ile elde edilenlere göre daha tutarlı olduğu görülmüştür. Hasar-1, Hasar-2 ve Hasar-3 için $F_1(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile elde edilen sonuçlarda yanlış pozitif elemanlar görülmüştür. Konsol kirişte, her iki amaç fonksiyonu için de gürültü etkisinin önemsiz olduğu görülmektedir.

Kullanılan her iki amaç fonksiyonunun performansını toplu halde değerlendirebilmek için $[30/50]_2$ konsol kirişte hasar tespit sonuçları Tablo 22 ve 23'te sunulmuştur. Bu tablolara göre frekans ve mod şekil değişimlerini birlikte hesaba katan amaç fonksiyonu ile elde edilen sonuçlar, sadece frekans değişimlerini dikkate alanınkilere göre, gürültü olsun olmasın, daha iyidir. $F_1(\mathbf{x})$ fonksiyonu tekli hasar senaryolarının tespitinde genel olarak başarılıdır. Bununla beraber, çoklu senaryolar söz konusu olduğunda hata oranlarının hızla arttığı görülmektedir. Daha önce sunulan grafik sonuçlarında da $F_1(\mathbf{x})$ fonksiyonuyla yanlış pozitif hasarlı elemanlar bulunduğu belirtilmişti. Dolayısıyla Tablo 22'deki sayısal değerler de bu grafik sonuçlarını desteklemektedir. $F_2(\mathbf{x})$ fonksiyonu ise göz önüne alına tüm hasar senaryoları için başarılı sonuçlar vermiştir. Hata oranları genel olarak (Hasar-5 durumundaki istisna hariç) %5 altındadır. Gürültünün hesaba katılması durumunda da $F_2(\mathbf{x})$ 'nin $F_1(\mathbf{x})$ 'e göre çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Gürültünün varlığı, her iki amaç fonksiyonu için de yöntemin doğruluğunu etkilemekte, özellikle sığ hasarları tespitte yöntemin etkinliğini azaltmaktadır.

Tablo 24. İki ucu ankastre kompozit kirişte $F_1(\mathbf{x})$ için hata indeksi

Hasar senaryosu	Gürültü yok		Gürültü var	
	I_1	I_2	I_1	I_2
1	96,6620	0,5074	2,4200	0,0225
2	79,6366	0,4296	181,0700	0,4654
3	40,0200	0,0092	348,3333	0,0815
4	77,4800	0,4387	95,1160	0,4895
5	33,4500	0,1125	152,1667	0,3544
6	148,6233	0,2924	201,1000	0,3151

Tablo 25. İki ucu ankastre kompozit kirişte $F_2(\mathbf{x})$ için hata indeksi

Hasar senaryosu	Gürültü yok		Gürültü var	
	I_1	I_2	I_1	I_2
1	0,2000	0,0062	0,9400	0,0392
2	3,5167	0,0055	12,4833	0,0549
3	3,0000	0,0016	58,3000	0,0438
4	0,2200	0,0022	1,2600	0,0271
5	7,4833	0,0039	14,9333	0,0200
6	2,1000	0,0005	28,0000	0,0241

Tablo 26. Konsol kompozit kirişte $F_1(\mathbf{x})$ için hata indeksi

Hasar senaryosu	Gürültü yok		Gürültü var	
	I_1	I_2	I_1	I_2
1	3,2000	0,0768	4,6400	0,0939
2	16,0500	0,0746	16,5167	0,0755
3	59,8467	0,0913	24,0400	0,0758
4	1,5000	0,0000	1,3400	0,0075
5	9,3167	0,0000	8,9167	0,0000
6	53,5800	0,0000	70,2633	0,0164

Tablo 27. Konsol kompozit kiriş $F_2(\mathbf{x})$ için hata indeksi

Hasar senaryosu	Gürültü yok		Gürültü var	
	I_1	I_2	I_1	I_2
1	0,2200	0,0048	0,3200	0,0550
2	3,9000	0,0090	9,8000	0,0493
3	6,6000	0,0268	20,3700	0,0651
4	0,3800	0,0046	1,2600	0,0432
5	10,2833	0,0189	26,2167	0,0640
6	6,9933	0,0011	76,4066	0,0624

Performans değerlendirmesi için bir diğer yol olarak, Hoseini Vaez & Fallah (2017) tarafından önerilen aşağıdaki hata indeksleri kullanılmıştır.

$$I_1 = \sum_{i=1}^{nd} \left| \frac{\alpha_i^{\text{gerçek}} - \alpha_i^{\text{tahmin}}}{\alpha_i^{\text{gerçek}}} \right| \times 100 \quad (109)$$

$$I_2 = \sum_{i=1}^{nel-nd} \alpha_i^{\text{yanlış tahmin}} \quad (110)$$

Burada $\alpha_i^{\text{gerçek}}$ ve α_i^{tahmin} sırasıyla i . hasarlı elemanın gerçek hasar şiddeti ve optimizasyonla bulunan hasar şiddetini, $\alpha_i^{\text{yanlış tahmin}}$ gerçekte hasarsız i . elemanda optimizasyonla bulunan hasar şiddetini ve nd hasar senaryolarında dikkate alınan hasarlı eleman sayısını göstermektedir. I_1 indeksi, varsayılan senaryolarda hasar şiddeti sıfır olmayan elemanların bulunan değerlerindeki toplam yüzde hatayı göstermektedir. I_2 indeksi ise varsayılan senaryolarda gerçekte hasarlı olmayan, ancak optimizasyon işlemiyle bir değer atanmış olan (yanlış pozitif) elemanların hasar şiddetlerinin toplamıdır. Bu indeks değerleri sıfıra ne kadar yakınsa kullanılan yöntemin o kadar verimli olduğu anlaşılmaktadır.

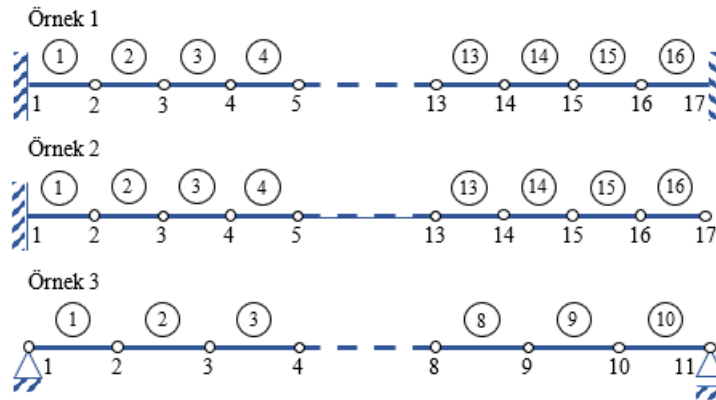
Her iki amaç fonksiyonu için hesaplanan hata indeksleri sırasıyla iki ucu ankastre giriş için Tablo 24 ve 25'te, konsol giriş için Tablo 26 ve 27'de sunulmuştur. Buna göre, $F_2(\mathbf{x})$ için bulunan I_1 ve I_2 değerlerinin tüm koşullar altında genel olarak $F_1(\mathbf{x})$ 'e göre daha küçük ve sıfıra daha yakın olduğu, dolayısıyla $F_2(\mathbf{x})$ 'nin hasar tespitinde $F_1(\mathbf{x})$ 'den daha iyi bir performans gösterdiği anlaşılmaktadır. $F_1(\mathbf{x})$ kullanıldığında, simetrik sınır koşulları nedeniyle hasarlı elemanın gerçekte olduğu yerde değil de simetriği olan elemanda ortaya çıkması gürültünün dikkate alınması durumunda yöntemin performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu tablolar da yöntemlerin tutarlılığında gürültünün etkisinin önemli olduğunu, mod şekil değişimlerinin dikkate alınması durumunda bu etkinin azalarak performansa olumlu yönde katkı sağladığını göstermektedir.

3.4.2. TLBO ile Hasar Tespiti Sonuçları

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (TLBO) algoritması kullanılarak hasar tespiti sonuçları bu bölümde sunulmuştur. TLBO ile hasar tespiti için sadece $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu göz önüne alınmıştır. TLBO başlangıç parametresi olan popülasyon büyüklüğü incelenen probleme göre değişiklik gösterirken, tüm analizlerde sonlandırma kriteri $\text{tol} = 10^{-6}$ ve maksimum iterasyon sayısı $\text{MaxIt} = 100$ olarak alınmıştır.

Öncelikle literatürden alınan üç örnek üzerinde bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu örnekler için sonlu eleman modelleri Şekil 44'te görülmektedir. İlk örnek, Bölüm 3.3.1'de özellikleri verilen iki ucu ankastre [0/90/0] kompozit kiriştir. Üç hasar senaryosu altında kirişte hasar tespit sonuçları Dinh-Cong vd. (2018) ile karşılaştırmalı olarak Tablo 28'de

verilmiştir. Optimizasyonda popülasyon büyüklüğü Hasar-1 ve Hasar-2 için $NP = 20$, Hasar-3 için ise $NP = 30$ olarak alınmış, beş bağımsız koşumun en iyi değeri tabloda gösterilmiştir. Tablo 28’de, gürültü olmaması durumunda TLBO ile elde edilen sonuçların referans çalışmadakilere göre daha iyi olduğu, hata oranlarının sıfıra çok yakın olduğu görülmektedir. Gürültünün dikkate alınması durumunda da TLBO sonuçlarının referans çalışmadan daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Bu çalışmada sonuçlar kiriş üzerinde keyfi seçilen altı serbestlik derecesine göre elde edilmişken, referans çalışmada sekiz serbestlik derecesi için dahi bu çalışmanın sonuçlarında görülen doğruluk elde edilememiştir. Önerilen yöntemle hasar tespitindeki hatalar gürültü varken bile %4’ten küçüktür. Bu durum, özellikle gürültü dikkate alındığında, önerilen yöntemin hesaplama doğruluğu açısından referans çalışmaya olan üstünlüğünün tartışılmaz olduğunu göstermektedir.

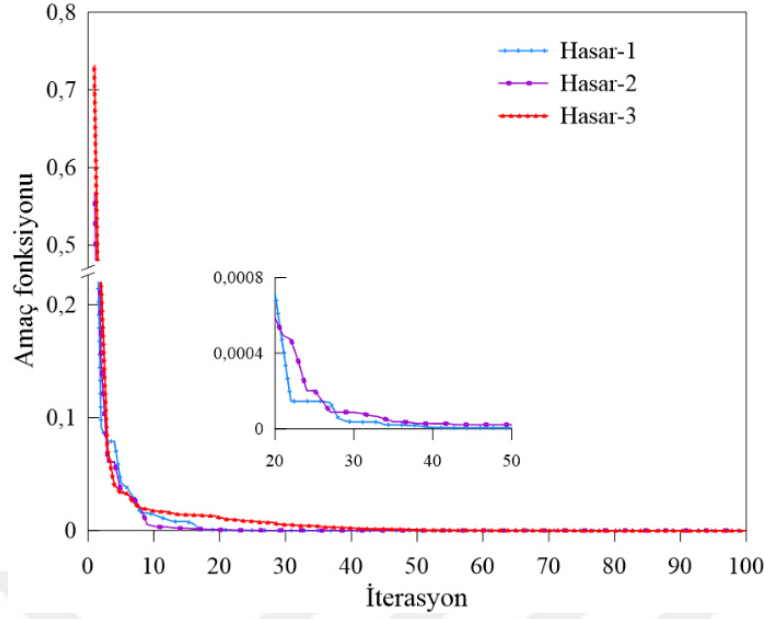


Şekil 44. TLBO ile hasar tespitinde incelenen örneklere ait sonlu eleman modelleri

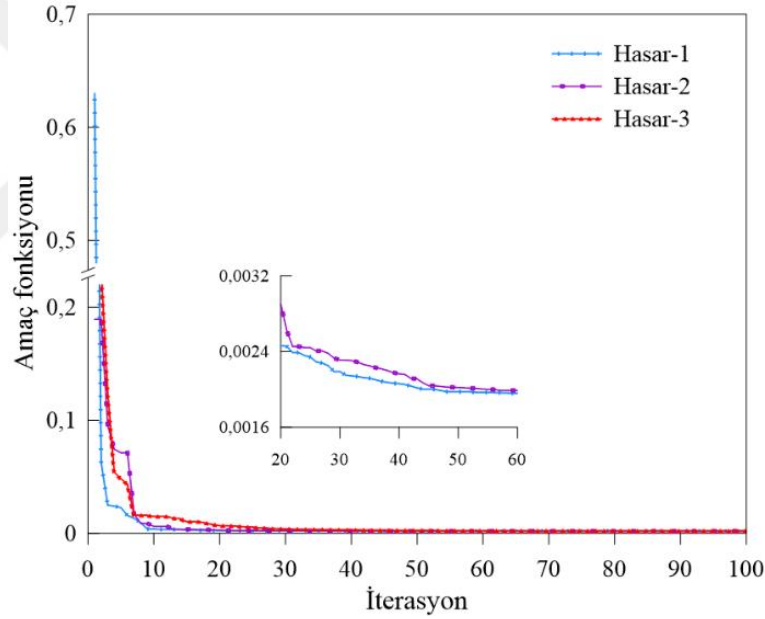
Tablo 28. Örnek 1 için karşılaştırmalı hasar tespit sonuçları

Senaryo	Gerçek hasar		Hasar tespit sonuçları											
	Eleman	Hasar şiddeti	Gürültü yok				Gürültü var							
			TLBO	Hata %	Jaya ¹	Hata %	TLBO	Hata %	Jaya ¹					
									6 SD	Hata %	7 SD	Hata %	8 SD	Hata %
1	1	0,30	0,2999	0,03	0,2951	1,63	0,2901	3,30	0,2322	22,60	0,2564	14,53	0,2790	7,00
2	5	0,20	0,1998	0,10	0,1992	0,40	0,2019	0,95	0,1629	18,55	0,1582	20,90	0,1951	2,45
	16	0,30	0,2997	0,10	0,2736	8,80	0,2963	1,23	0,2004	33,20	0,2483	17,23	0,2449	18,37
3	1	0,20	0,1999	0,05	0,2012	0,60	0,1939	3,05	0,1296	35,20	0,1391	30,45	0,1876	6,20
	2	0,30	0,2997	0,10	0,3063	2,10	0,2969	1,03	0,3328	10,93	0,3216	7,20	0,3157	5,23
	9	0,30	0,2994	0,20	0,2993	0,23	0,2903	3,23	0,2793	6,90	0,2816	6,13	0,3033	1,10

¹ Dinh-Cong vd. (2018)
SD: Serbestlik Derecesi



(a) Gürültü yok



(b) Gürültü var

Şekil 45. Örnek 1 için TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonunun yakınsaması

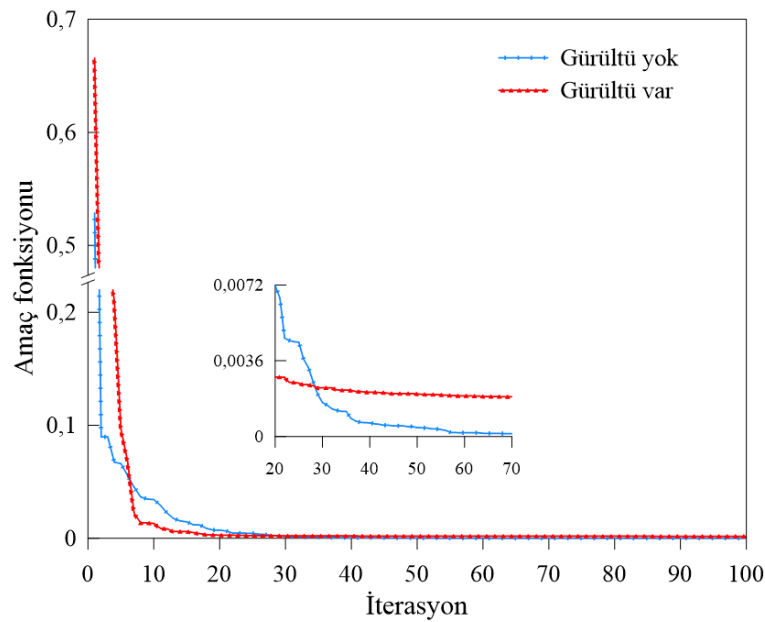
TLBO ile hasar tespitinde kullanılan amaç fonksiyonunun yakınsama eğrileri Örnek 1 için Şekil 45'te verilmiştir. Görüldüğü üzere tez çalışmasında önerilen yöntem, gürültüsüz durumda yaklaşık 50 iterasyondan ve gürültülü durumda ise 60 iterasyondan sonra optimum çözüme hızla yakınsamaktadır. Referans çalışmada (Dinh-Cong vd., 2018) kullanılan Jaya algoritması da 60 iterasyondan sonra optimum çözümlere ulaşmıştır. Buradan TLBO ve Jaya algoritmalarının hesaplama performanslarının yaklaşık aynı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Daha önce belirtildiği üzere, referans çalışmaya ait

sonuçlar kiriş üzerindeki en uygun ivmeölçer konumlarına göre elde edilmişken, tez çalışmasında tamamen keyfi seçilen konumlar kullanılmış ve yaklaşık aynı performans elde edilmiştir.

Karşılaştırma için dikkate alınan ikinci örnek, Bölüm 3.3.1’de özellikleri verilen [0/90/0] kompozit konsol kiriştir. Kirişte hasar tespit sonuçları Vo-Duy vd. (2016b) ile karşılaştırmalı olarak Tablo 29’da verilmiştir. Kiriş özellikleri Bölüm 3.3.1’de verilmiş, popülasyon büyüklüğü $NP = 20$ olarak seçilmiştir. Tablodan görüleceği üzere TLBO ile elde edilen sonuçlar, DE ve IDE yöntemleriyle iyi bir uyum içindedir. Burada, gürültünün hesaba katılması durumunda TLBO’nun yakınsamasının referans çalışmadaki DE ve IDE yöntemlerinden daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 29. Örnek 2 için hasar tespitinin karşılaştırmalı sonuçları

Yöntem	Hasarlı eleman ve şiddeti		$F_2(\mathbf{x})$
	α_4	α_{10}	
<i>Gürültü yok</i>			
TLBO	0,2996	0,4998	1.757×10^{-5}
DE ¹	0,3000	0,5000	1.372×10^{-7}
IDE ¹	0,3000	0,5000	2.365×10^{-7}
<i>Gürültü var</i>			
TLBO	0,2885	0,4938	1.798×10^{-3}
DE	0,3008	0,4976	1.111×10^{-1}
IDE	0,3008	0,4975	1.111×10^{-1}



Şekil 46. Örnek 2 için TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması

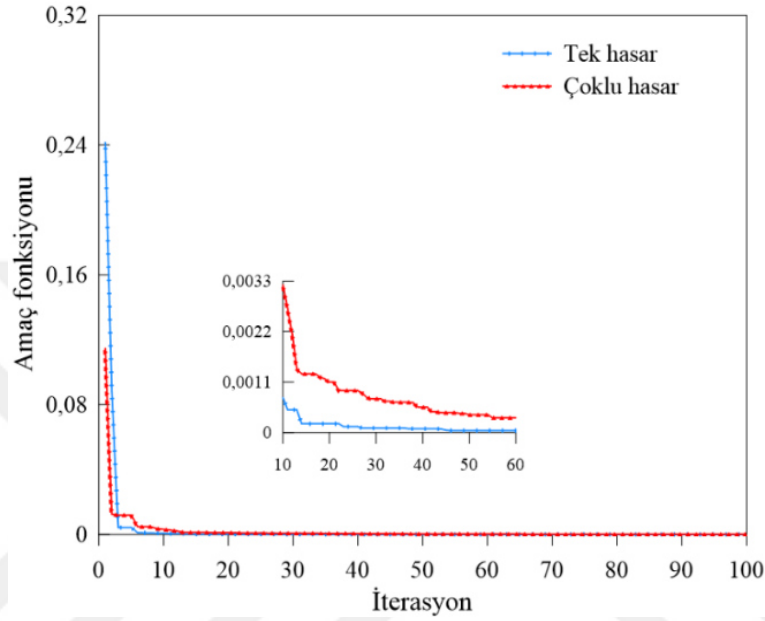
Şekil 46, TLBO algoritmasının hem gürültüsüz hem de gürültülü durumlar için yakınsama eğrilerini göstermektedir. Vo-Duy vd. (2016b) çalışmasında, IDE'nin gürültüsüz durum için 60, gürültülü durum için ise 148 iterasyon civarında; DE'nin gürültüsüz durum için 160, gürültülü durum için 380 iterasyon civarında aramayı durdurduğu bildirilmiştir. Şekil 46'da açıkça görüleceği üzere, TLBO algoritması her iki durum için de yaklaşık 60 iterasyonda optimum çözüme yakınsamakta ve referans çalışmada kullanılan DE yöntemlerine kıyasla daha iyi bir hesaplama performansı sergilemektedir. Ayrıca, TLBO'da çok daha az optimizasyon parametresi kullanılması, yöntemin DE yöntemlerine göre bir başka avantajıdır.

Üçüncü örnek olarak tek yönlü tabaka dizilimine sahip basit mesnetli kompozit kiriş ele alınmıştır (Khatir vd., 2017). Referans çalışmada, küçük bir istisna dışında tez çalışmasındakine benzer bir amaç fonksiyonunun optimum değerleri PSO ve GA ile aranmıştır. Kirişin malzeme özellikleri, $E_1 = 141,96$ GPa, $G_{12} = 6$ GPa ve $\rho = 1600$ kg/m³ şeklindedir. Kirişin uzunluğu ve genişliği sırasıyla 0,5 m ve 0,03 m olup; kiriş, kalınlığı 0,005 m olan eş yükseklikli 10 adet tek yönlü tabakadan ([0]₁₀ kompozit kiriş) oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinde, referans çalışmada olduğu gibi 10 eleman dikkate alınmış ve iki hasar senaryosu varsayılmıştır. Birinci senaryoda sadece 5. elemanda %60 rijitlik azalması düşünülmüş; ikincisinde ise 2., 5. ve 8. elemanlarda sırasıyla %10, %30 ve %50 rijitlik azalması dikkate alınmıştır. TLBO ile optimizasyonda bu örnek için popülasyon büyüklüğü tekli hasar durumu için $NP = 25$ ve çoklu hasar durumu için ise $NP = 30$ olarak alınmıştır.

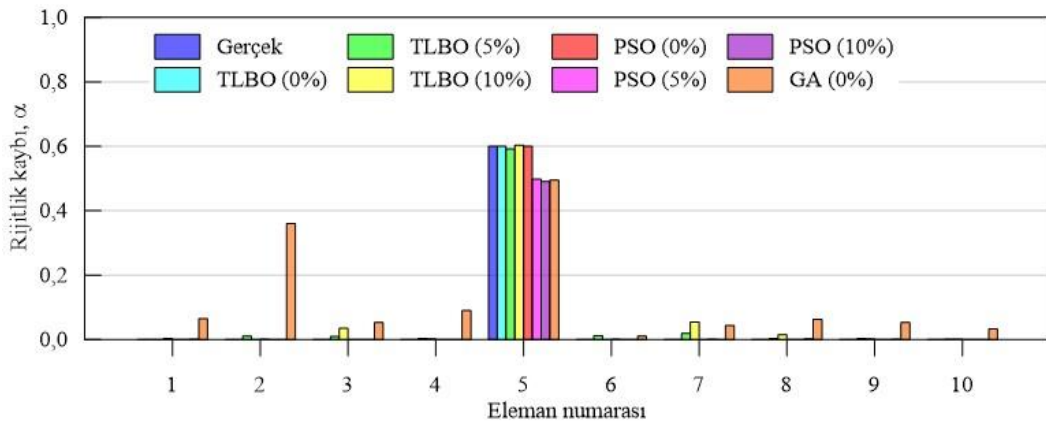
Şekil 47, gürültüsüz durumda tekli ve çoklu hasar senaryoları için TLBO algoritmasının yakınsamasını göstermektedir. Görüldüğü üzere, TLBO algoritması tekli hasar durumunda 45 iterasyon civarında, çoklu hasar durumunda ise 60 iterasyon civarında aramayı durdurmaktadır. Her iki hasar senaryosu için Khatir vd. (2017)'de verilen yakınsama grafikleriyle karşılaştırıldığında önerilen yöntem, GA algoritmasından daha hızlı olup, PSO algoritmasıyla benzer yakınsama davranışı göstermektedir.

Şekil 48 ve Şekil 49, göz önüne alınan hasar senaryoları için TLBO, PSO ve GA ile elde edilen hasar tespit sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü gibi, üç yöntem arasında en kötü sonuçlar GA'ya aittir. Gürültü dikkate alınmadığında TLBO ve PSO birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Şekiller ayrıca TLBO ve PSO'yu %5 ve %10 gürültü seviyeleri için karşılaştırmaktadır. Buna göre gürültü varken TLBO ile PSO'ya göre daha doğru sonuçlar elde edilmekte, TLBO gürültüden daha az etkilenmektedir. PSO'nun hasar

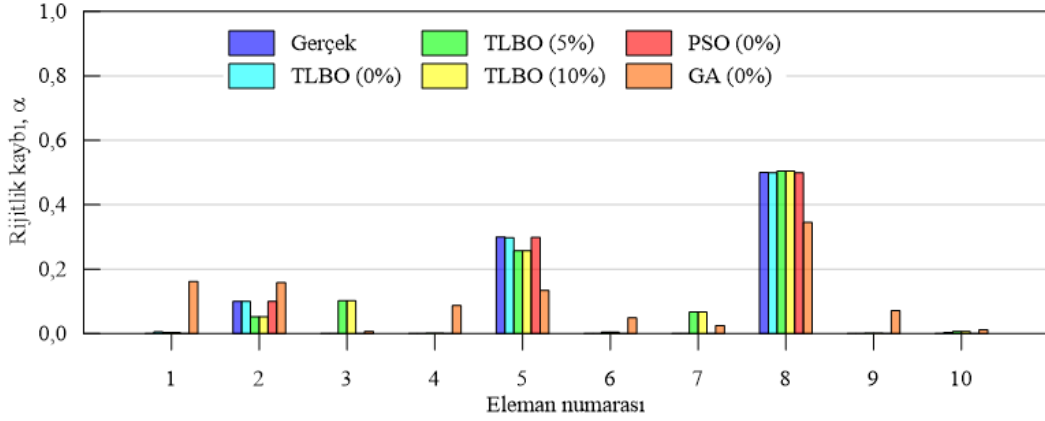
şiddetini belirleme doğruluğu gürültü varken önemli ölçüde azalmaktadır. Şekillerde görülen bir diğer husus, TLBO'nun bazı hasarsız elemanları hasarlı olarak (yanlış pozitif) tespit etmesidir. Ancak, kullanılan modal veri çok büyük gürültü seviyelerine maruz bırakılmış olmasına rağmen, bu elemanlardaki hasar şiddetleri çok küçük ve ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 47. Örnek 3 için TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonunun yakınsaması



Şekil 48. Örnek 3'ün tekli hasar senaryosu için hasar tespit sonuçları



Şekil 49. Örnek 3'ün çoklu hasar senaryosu için hasar tespit sonuçları

Tablo 30. TLBO ile hasar tespitine yönelik parametrik çalışmada ele alınan hasar senaryoları

Hasar senaryosu	Hasarlı elemanlar			Rijitlik kaybı, α		
1	3	-	-	0,50		
2	3	4		0,30	0,20	
3	3	4	8	0,30	0,10	0,10

Tablo 31. İki ucu ankastre kompozit kirişte Hasar-3 için hasar tespit sonuçları

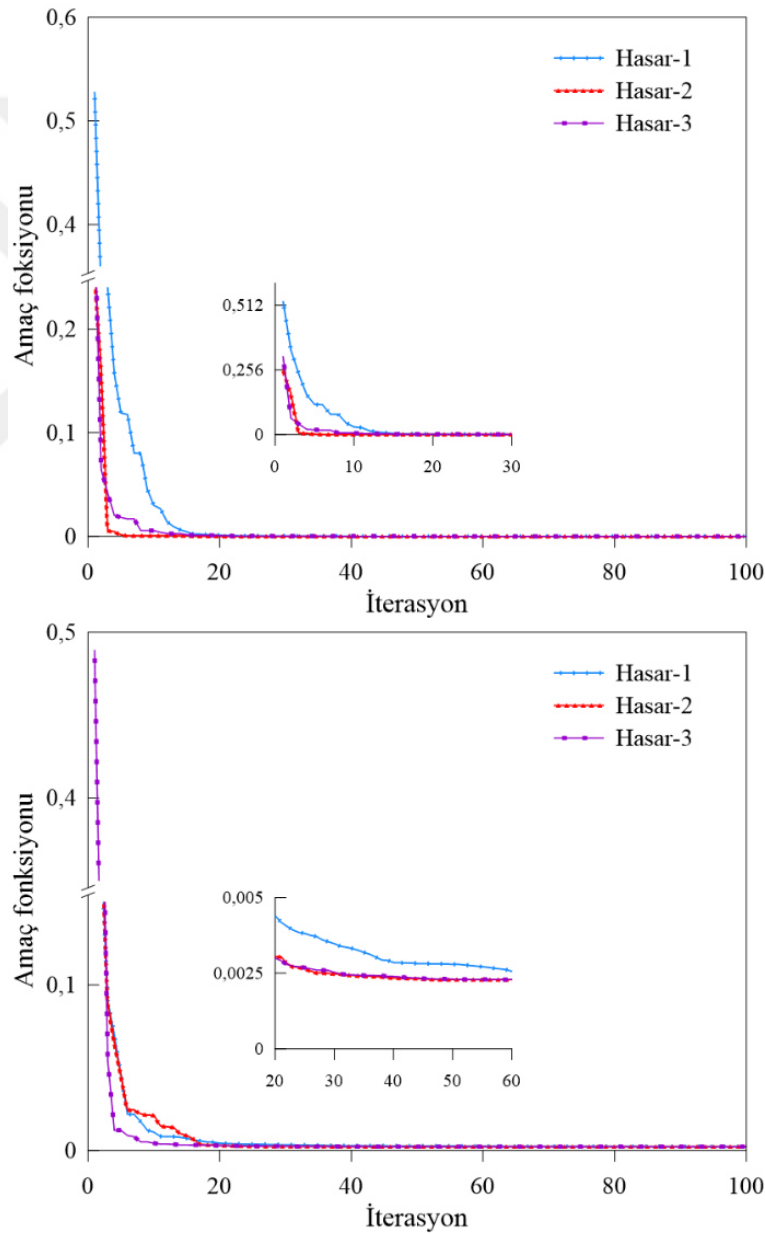
Koşum	Gürültü yok			$F_2(\mathbf{x})$	Gürültü var			$F_2(\mathbf{x})$
	Hasar şiddeti				Hasar şiddeti			
	α_3	α_4	α_8		α_3	α_4	α_8	
Koşum 1	0,2995	0,0995	0,1011	$2,672 \times 10^{-5}$	0,2968	0,0769	0,0936	$2,275 \times 10^{-3}$
Koşum 2	0,3005	0,0992	0,0993	$1,693 \times 10^{-5}$	0,2972	0,0778	0,0906	$2,281 \times 10^{-3}$
Koşum 3	0,3000	0,1002	0,0998	$6,234 \times 10^{-6}$	0,2972	0,0773	0,0935	$2,285 \times 10^{-3}$
Koşum 4	0,3006	0,0988	0,0989	$1,105 \times 10^{-5}$	0,2972	0,0773	0,0935	$2,285 \times 10^{-3}$
Koşum 5	0,3000	0,1000	0,0998	$5,851 \times 10^{-6}$	0,2979	0,0755	0,0915	$2,281 \times 10^{-3}$
En iyi	0,3000	0,1000	0,0998	-	0,2979	0,0755	0,0915	-
Ortalama	0,3001	0,0995	0,0998	-	0,2973	0,0770	0,0925	-
Std. Sap.	0,0004	0,0005	0,0007	-	0,0004	0,0008	0,0013	-

Std. Sap.: Standart sapma

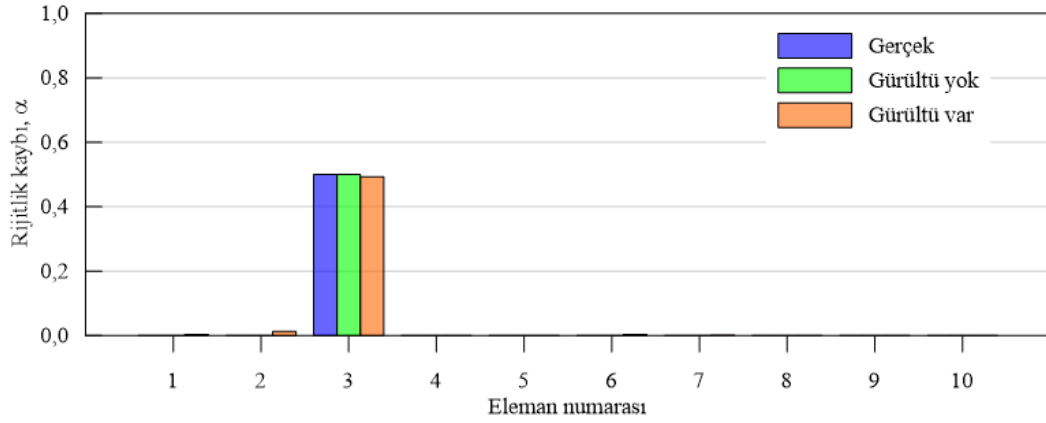
TLBO ile hasar tespiti için yapılan parametrik çalışma sonuçları, izleyen paragraflarda sunulmuş ve irdelenmiştir. Bunun için Bölüm 3.3.1'de Şekil 30 ve Tablo 26 ile özellikleri verilen kiriş dikkate alınmıştır. Kiriş, Tablo 30'da gösterilen üç hasar senaryosu altında incelenmiştir. TLBO algoritması için optimizasyon parametreleri şu şekilde seçilmiştir: Hasar-1 için popülasyon boyutu $NP = 10$, Hasar-2 için $NP = 20$ ve Hasar-3 için $NP = 30$. Gürültünün sonuçlara etkisi ayrıca irdelenmiştir. Her senaryo

bağımsız olarak beş kez çalıştırılmış ve elde edilen en iyi sonuçlar tablo ve grafiklerde verilmiştir.

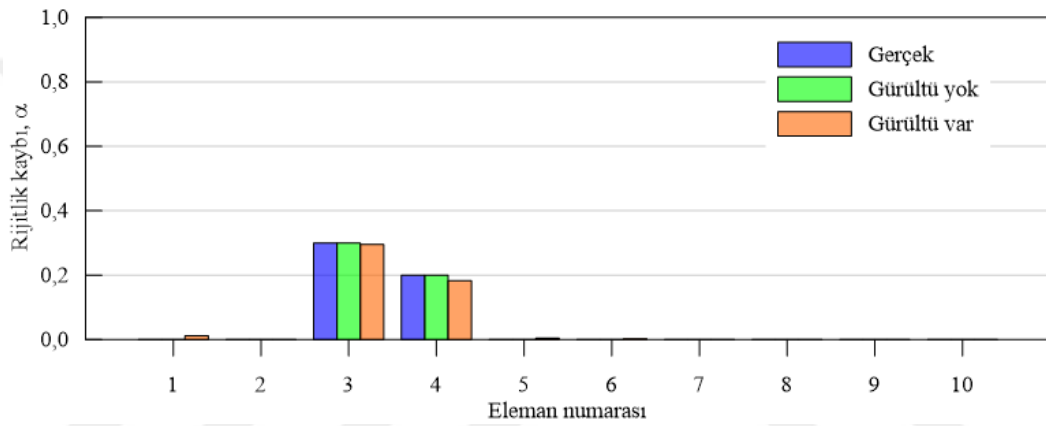
Tablo 31’de, iki ucu ankastre kirişte Hasar-3 durumu için her bir bağımsız çalıştırmanın sonuçları sunulmuştur. Tabloda ayrıca beş koşum için en iyi değer, ortalama değer ve standart sapma verilmiştir. Tablo incelendiğinde, tüm koşumlarda gerçek sonuçlara iyi bir yakınsama sağlandığı, standart sapmanın sıfıra çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, TLBO için dikkate alınan optimizasyon parametreleri ile göz önüne alınan problem özelinde isabetli sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.



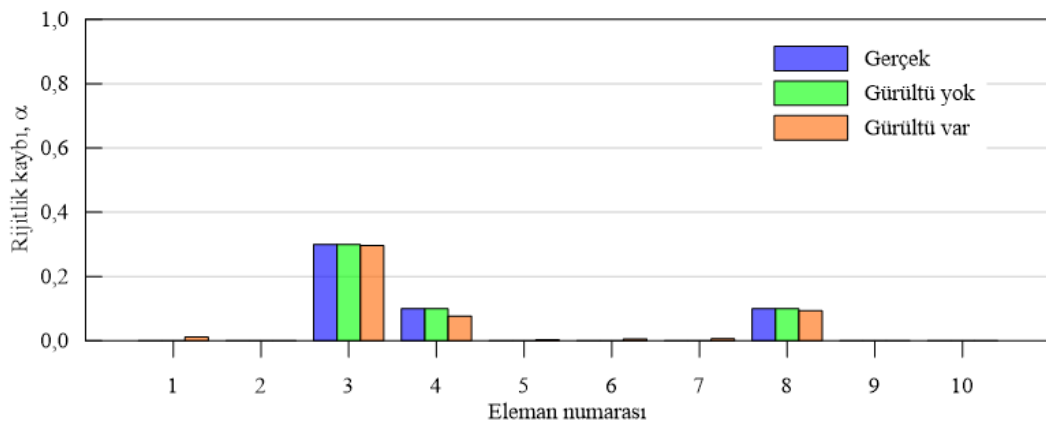
Şekil 50. İki ucu ankastre $[30/50]_2$ kirişte TLBO ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması



(a) Hasar-1

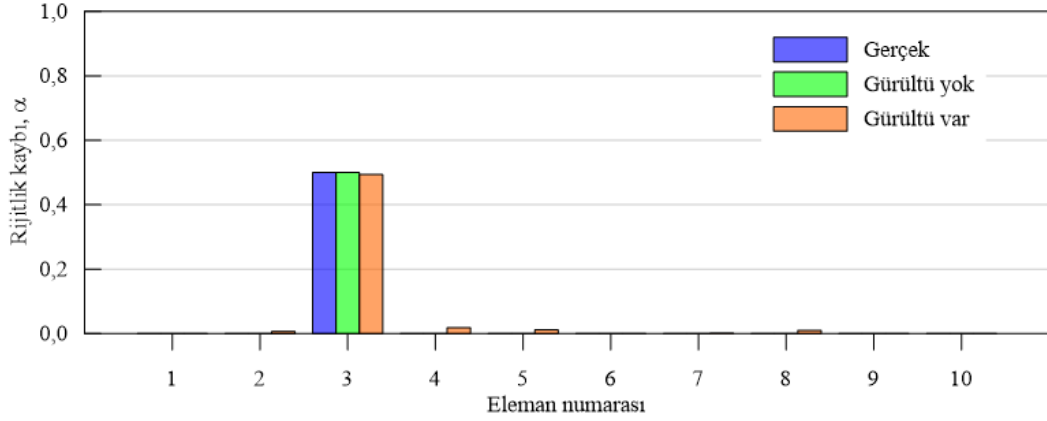


(b) Hasar-2

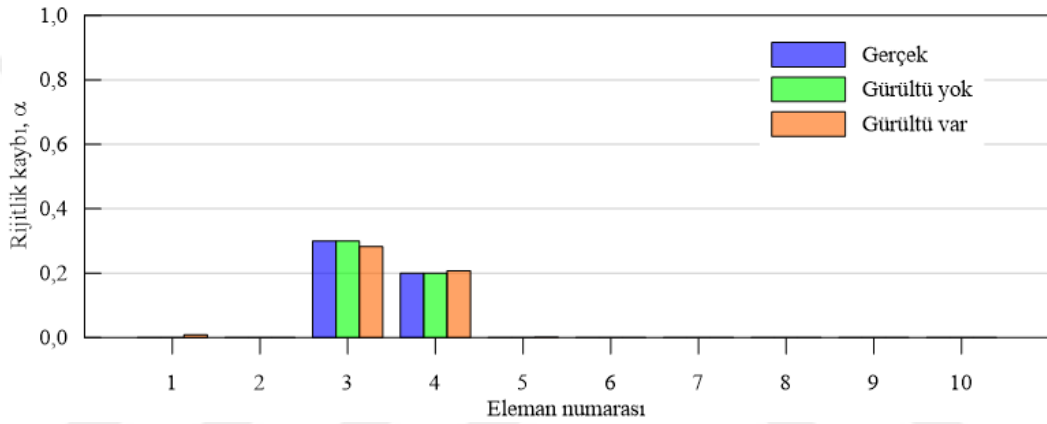


(c) Hasar-3

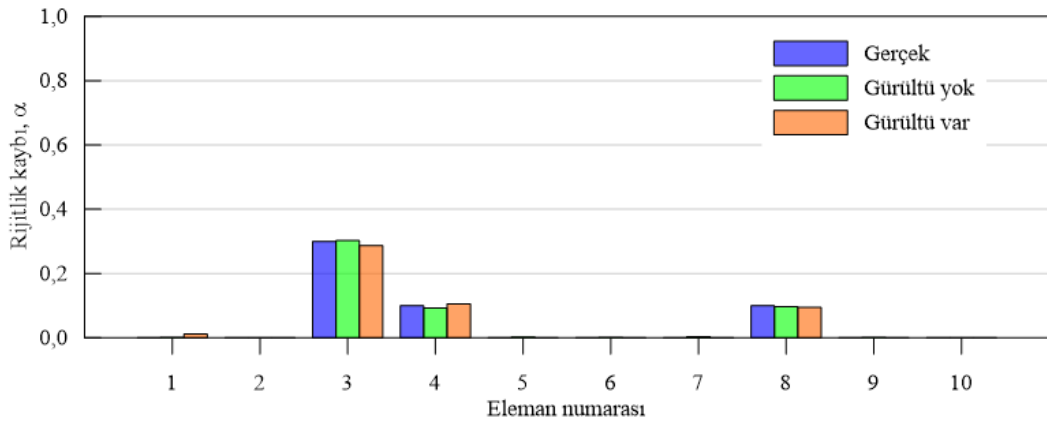
Şekil 51. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları



(a) Hasar-1



(b) Hasar-2



(c) Hasar-3

Şekil 52. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları

İki ucu ankastre kirişte göz önüne alınan tüm hasar senaryoları için TLBO yakınsama eğrileri Şekil 50’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, algoritma hızlı bir şekilde yakınsamakta ve gürültüsüz durum için 20 iterasyon ve gürültülü durum için 60 iterasyondan sonra

istenen doğruluğa ulaşılmaktadır. Ayrıca, gürültüsüz durumun yakınsama hızı gürültülü durumdan daha iyidir.

Sırasıyla iki ucu ankastre ve konsol kompozit kirişlerde TLBO ile hasar tespit sonuçları Şekil 51 ve Şekil 52’de sunulmuştur. Şekillerden görülebileceği gibi, göz önüne alınan tüm senaryolarda hasarlı elemanlar hem gürültülü hem de gürültüsüz koşullarda doğru olarak belirlenmektedir. Gürültü sebebiyle ortaya çıkan yanlış pozitifler dikkate alınmayacak kadar küçüktür. Burada önemle belirtilmesi gereken husus, ele alınan kirişte anizotropi nedeniyle eğilme, burulma ve uzama modları arasındaki yüksek etkileşime rağmen, sadece ilk birkaç eğilme modu ile oldukça başarılı bir şekilde hasar tespiti yapılabilmektedir.

Tablo 32. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları ve bağıl hatalar

Hasar senaryosu	Gerçek hasar		Hasar tespit sonuçları					
	Eleman	Hasar şiddeti	Gürültü yok			Gürültü var		
			Hesaplanan	Hata %	$F_2(\mathbf{x})$	Hesaplanan	Hata %	$F_2(\mathbf{x})$
1	3	0,50	0,500017	0,0034	$3,10 \times 10^{-6}$	0,492462	1,5076	$2,40 \times 10^{-3}$
2	3	0,30	0,299967	0,0110	$1,26 \times 10^{-5}$	0,294486	1,8380	$2,27 \times 10^{-3}$
	4	0,20	0,199821	0,0895		0,185947	7,0265	
3	3	0,30	0,300001	0,0003	$5,85 \times 10^{-6}$	0,296781	1,0730	$2,28 \times 10^{-3}$
	4	0,10	0,099993	0,0070		0,076917	23,0830	
	8	0,10	0,099803	0,1970		0,093585	6,4150	

Tablo 33. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları ve bağıl hatalar

Hasar senaryosu	Gerçek hasar		Hasar tespit sonuçları					
	Eleman	Hasar şiddeti	Gürültü yok			Gürültü var		
			Hesaplanan	Hata %	$F_2(\mathbf{x})$	Hesaplanan	Hata %	$F_2(\mathbf{x})$
1	3	0,50	0,500661	0,1322	$1,06 \times 10^{-4}$	0,492665	1,4670	$2,69 \times 10^{-3}$
2	3	0,30	0,300128	0,0427	$6,60 \times 10^{-6}$	0,282448	5,8507	$2,61 \times 10^{-3}$
	4	0,20	0,199888	0,0560		0,207648	3,8240	
3	3	0,30	0,300798	0,2660	$1,32 \times 10^{-4}$	0,286905	4,3650	$2,54 \times 10^{-3}$
	4	0,10	0,096455	3,5450		0,105641	5,6410	
	8	0,10	0,102749	2,7490		0,094385	5,6150	

Tablo 34. İki ucu ankastre giriş için hata indeksleri

Hasar senaryosu	Gürültü yok		Gürültü var	
	I_1	I_2	I_1	I_2
1	0,003400	0,000000	1,507600	0,012378
2	0,100500	0,000469	8,864500	0,019313
3	0,204333	0,000199	30,571000	0,028087

Tablo 35. Konsol giriş için hata indeksleri

Hasar senaryosu	Gürültü yok		Gürültü var	
	I_1	I_2	I_1	I_2
1	0,132200	0,000000	1,467000	0,021907
2	0,098667	0,000000	9,674667	0,010138
3	6,560000	0,000000	15,621000	0,011546

TLBO ile hasar tespitinde önerilen yöntemin performans değerlendirmesi için ilk olarak Tablo 32 ve Tablo 33'te bağıl hatalar sunulmuştur. Tablolardan görülebileceği gibi, gürültüsüz durumda göz önüne alınan hasar senaryoları için önerilen yöntemin doğruluğu genellikle iyidir. Hata oranı sıfıra çok yakındır ($< \%1$). Bunun istisnası olarak, konsol girişte Hasar-2 durumu için hatalar $\%2$ -3 mertebelerine çıkmakla birlikte hala kabul edilebilir sınırlar içindedir. Gürültü varken doğal olarak bağıl hatalar artmaktadır. Özellikle sık hasarların tespitinde gürültü varken doğruluk azalmaktadır. Burada, koşum sayısı artırılarak veya daha büyük bir popülasyon ile çalışılarak hatanın azaltılabileceği düşünülmektedir. Ancak, tablolar genel olarak değerlendirildiğinde, yöntemin hasarları çok iyi bir doğrulukla tespit edebildiği sonucuna varılabilir.

Performans değerlendirmesi için ikinci bir yol olarak daha önce Bölüm 3.3.1'de (109) ve (110) ifadeleri ile verilen hata indeksleri hesaplanmış ve iki ucu ankastre giriş için Tablo 34'te, konsol giriş için Tablo 35'te sunulmuştur. Tablolarda verilen sonuçlar dikkate alındığında, I_2 indeks değerlerinin sıfıra çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da yöntemin hasarlı elemanları (hasar yerlerini) çok iyi bir doğrulukla tespit edebildiği anlamına gelmektedir. I_1 indeks değerleri değerlendirildiğinde ise yöntemin doğruluğu genellikle gürültüsüz durum için iyi olup, gürültülü durumda özellikle sık hasarlar bulunan çoklu hasar senaryoları için biraz azalmaktadır.

3.4.3. Genel Anizotropik Kompozit Kirişte Hasar Tespitinde Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması

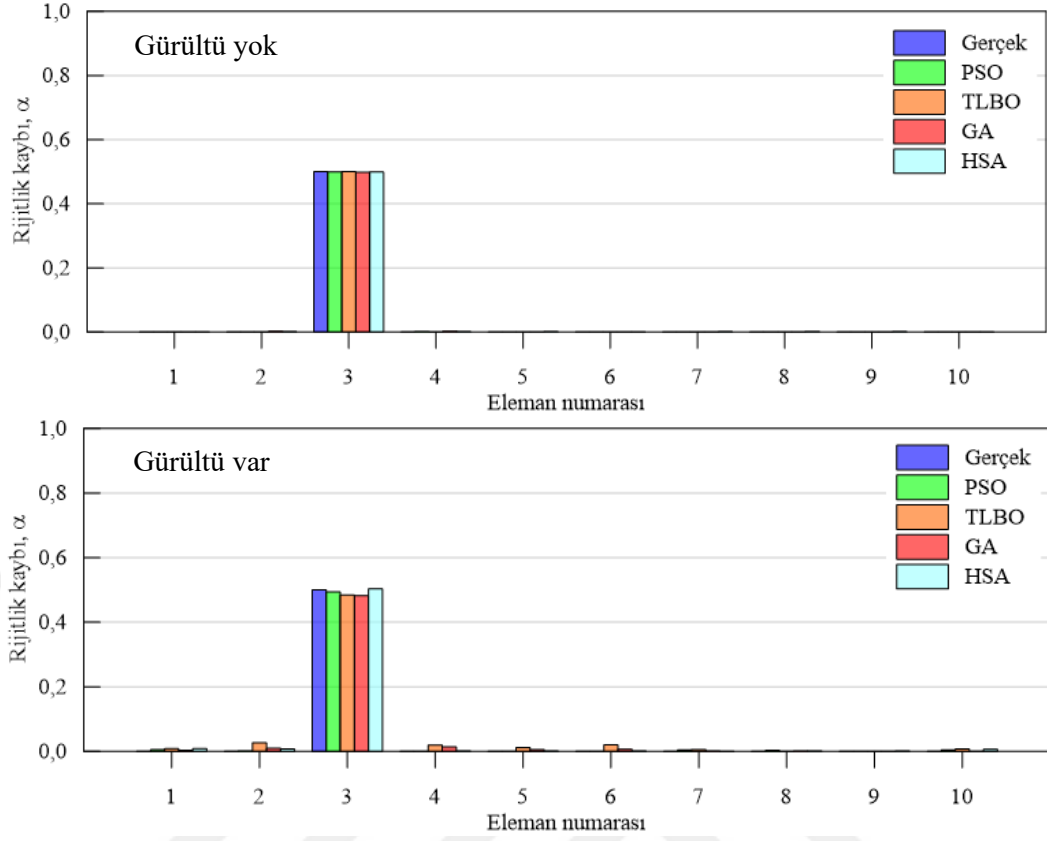
Dört farklı optimizasyon algoritması (HSA, GA, TLBO, PSO) kullanılarak hasar tespit sonuçları, bu bölümde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Hasar tespiti için (116) eşitliği ile verilen ve tez çalışması kapsamında ilk defa önerilen $F_3(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Hasar tespitinde sayısal simülasyonlarda kullanılan kirişin özellikleri Bölüm 3.3.1’de Şekil 30 ve Tablo 26’de verilmiştir. Kiriş, Bölüm 3.3.2’de Tablo 30’da gösterilen üç hasar senaryosu altında incelenmiştir. Kullanılan dört optimizasyon algoritması için seçilen başlangıç parametreleri Tablo 36’da verilmektedir. Her senaryo bağımsız olarak beş kez çalıştırılmış ve bulunan sonuçların ortalaması tablo ve grafiklerle verilmiştir.

Şekil 53-55’te iki ucu ankastre kompozit kiriş için dört farklı algoritma ile elde edilen hasar tespit sonuçları sunulmuştur. Şekillerden görülebileceği gibi, göz önüne alınan tüm senaryolarda hasarlı elemanlar hem gürültülü hem de gürültüsüz koşullarda dört algoritma yardımıyla çok iyi doğrulukla belirlenmiştir. Ek olarak, gürültünün sonuçlar üzerindeki etkisinin Hasar-3 durumunda daha belirgin olduğu görülmüştür.

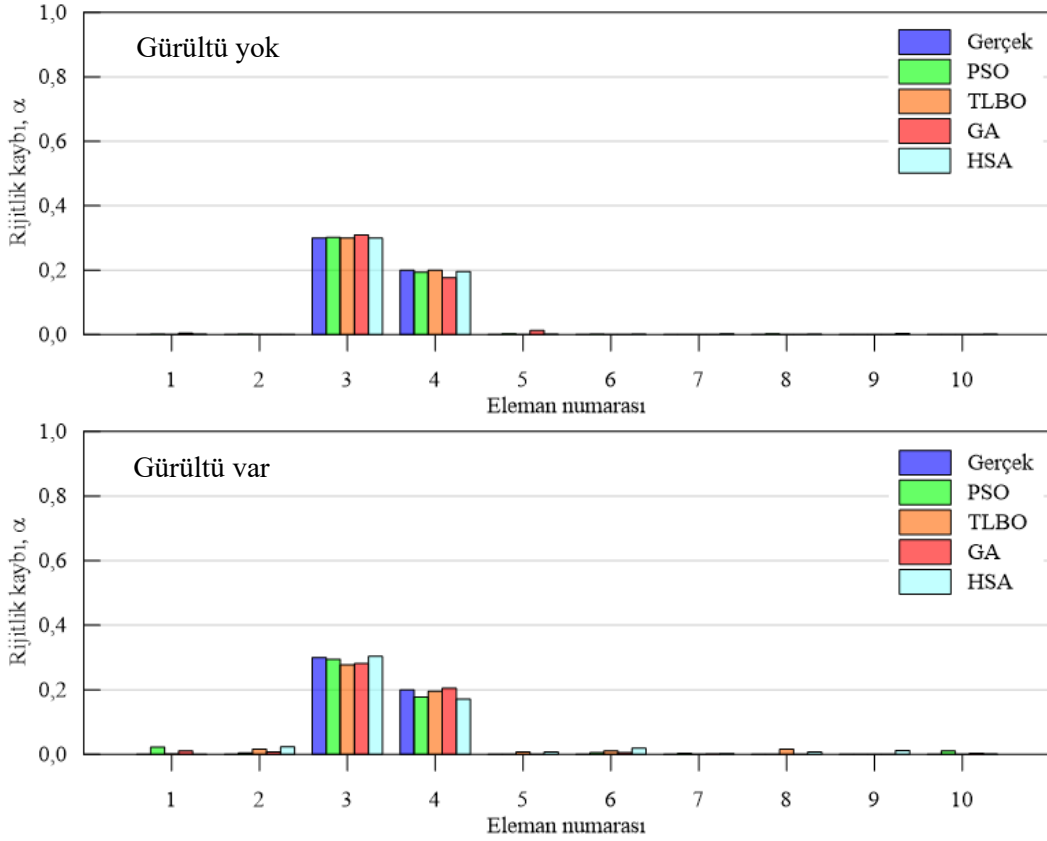
Şekil 56-58, dikkate alınan hasar senaryoları altında kompozit konsol kiriş için dört farklı algoritma ile elde edilen hasar tespit sonuçlarını vermektedir. Şekillerden görüldüğü üzere, konsol kirişte gürültü etkisi dikkate alınmadığında bile yanlış pozitif hasarlı elemanların sayısı artmıştır. Ancak, konsol kiriş için $F_3(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile hasar tespitinde yöntemin performansı bir miktar kötüleşse de sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içindedir. Grafiklerden tüm hasar senaryoları için konsol kirişte TLBO algoritmasının diğerlerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 36. Optimizasyonda dikkate alınan başlangıç parametreleri

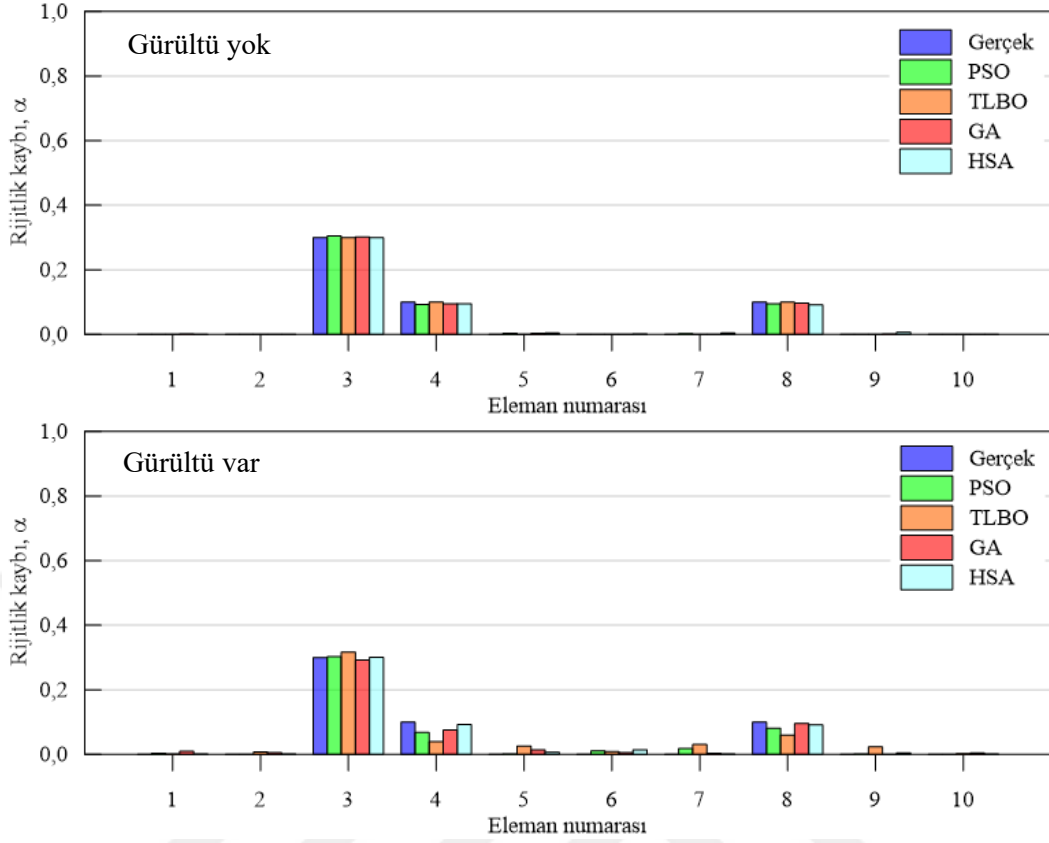
Optimizasyon algoritması	Başlangıç parametreleri
HSA	HM = 10, HMCR = 0,9, PAR = 0,25, tol = 10^{-5} , MaxIt = 25000
GA	NP = 40, tol = 10^{-5} , MaxIt = 300
PSO	NP = 30, tol = 10^{-5} , MaxIt = 100
TLBO	NP = 30, tol = 10^{-6} , MaxIt = 500



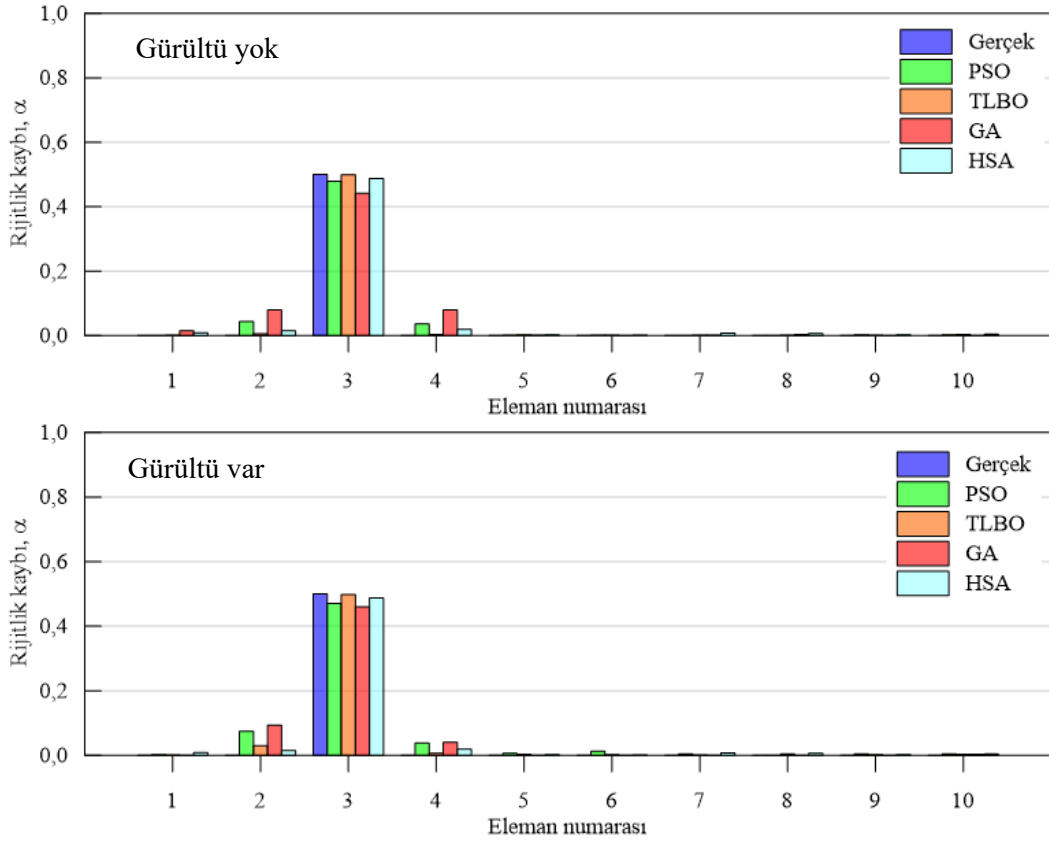
Şekil 53. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)



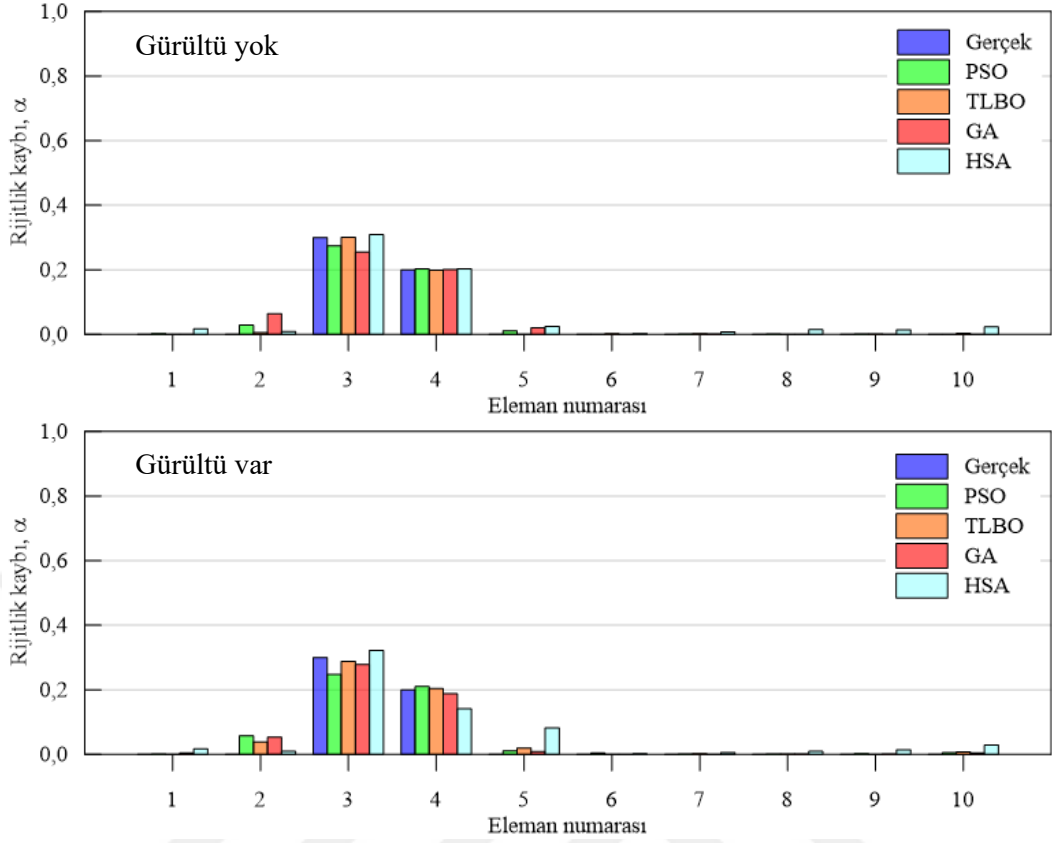
Şekil 54. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)



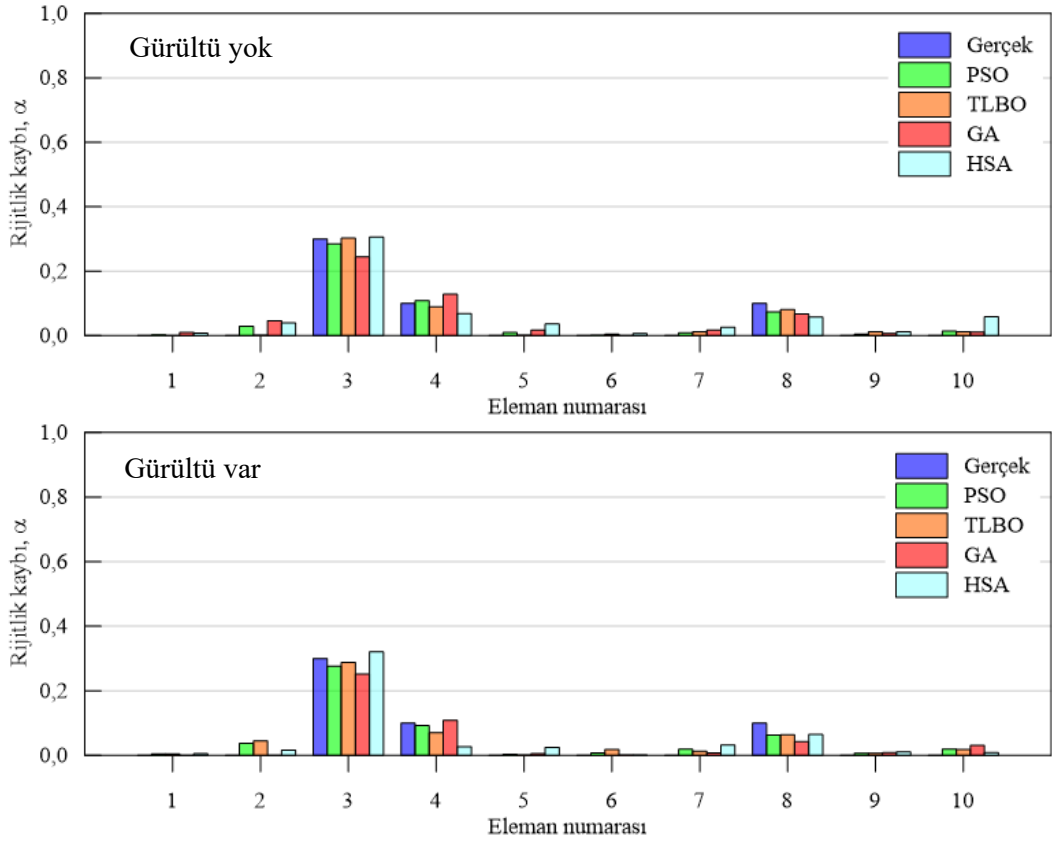
Şekil 55. İki ucu ankastre kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)



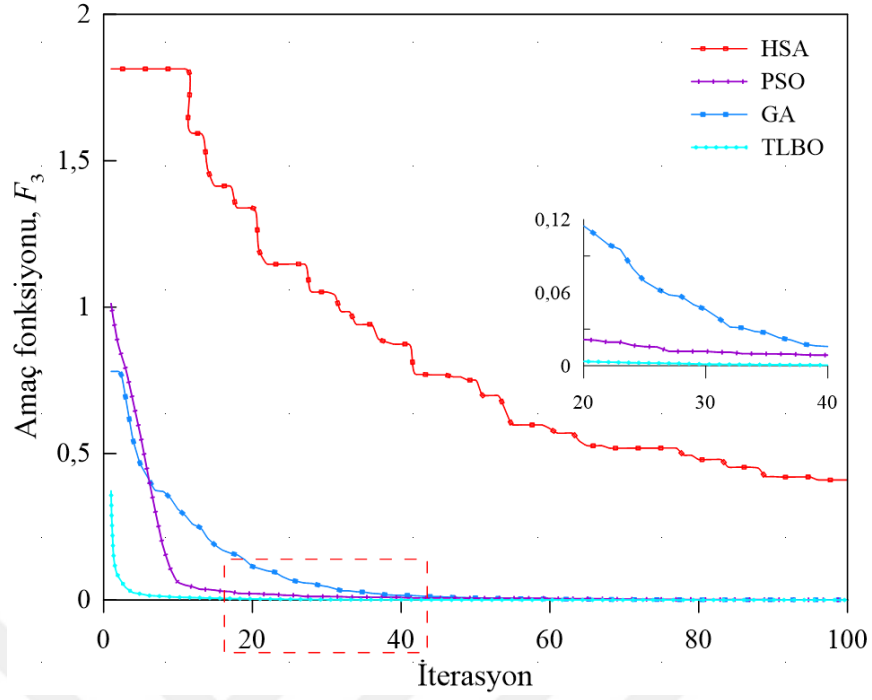
Şekil 56. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-1)



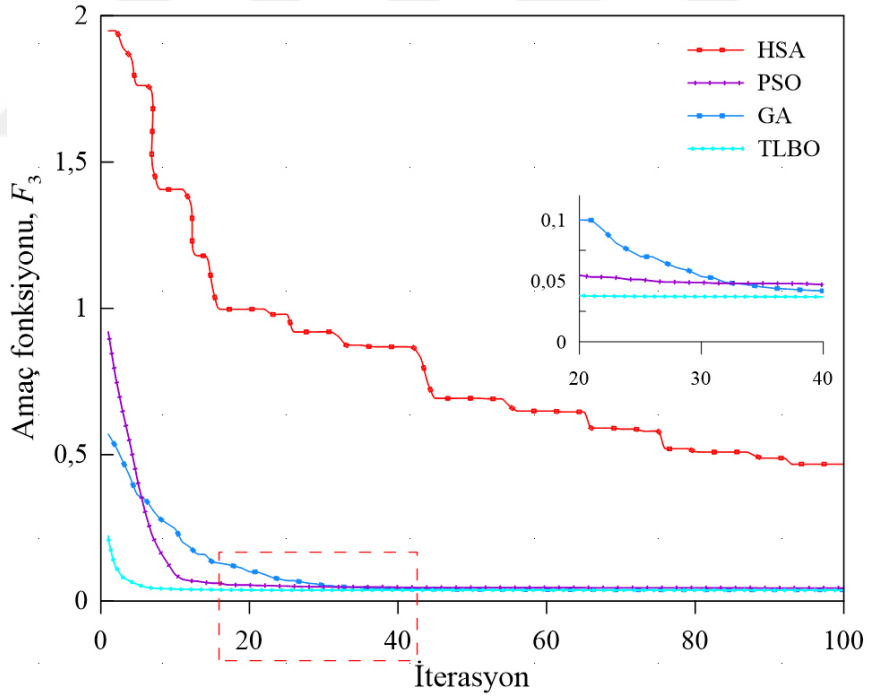
Şekil 57. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-2)



Şekil 58. Konsol kiriş için hasar tespit sonuçları (Hasar-3)



(a) Gürültü yok



(b) Gürültü var

Şekil 59. İki ucu ankastre $[30/50]_2$ kirişte dört farklı algoritma ile hasar tespitinde amaç fonksiyonun yakınsaması (Hasar-3)

İki ucu ankastre kirişte Hasar-3 durumu için dört algorithmada kullanılan $F_3(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonunun yakınsama eğrileri Şekil 59'da gösterilmiştir. Göz önüne alınan algorithmalarda maksimum iterasyon sayısı farklı olduğundan (Bkz. Tablo 36) ortak bir gösterim elde edebilmek için ilk 100 iterasyon göz önüne alınarak grafikler verilmiştir. Grafiklerden hem gürültülü hem de gürültüsüz durumda eğrilerin HSA, PSO, GA ve TLBO şeklinde yukarıdan aşağıya doğru sıralandığı görülmektedir. TLBO en hızlı yakınsayan algorithmadır. Bunu sırasıyla PSO, GA ve HSA takip etmektedir. HSA yakınsama hızı olarak diğerlerinden çok daha yavaş görünse de işlem zamanı açısından tüm algorithmalar yaklaşık aynı sürede süreci sonlandırmışlardır. Gürültüsüz durumda en iyi yakınsama değeri (10^{-5} 'ler seviyesi) TLBO için elde edilirken, gürültülü durumda tüm algorithmalar neredeyse aynı değere yakınsamaktadırlar.

Tablo 37. İki ucu ankastre kompozit kirişte Hasar-3 için dört algoritma ile elde edilen hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması

Algoritma	Gürültü yok				Gürültü var			
	Değişken	En iyi değer	Ortalama değer	Standart sapma	Değişken	En iyi değer	Ortalama değer	Standart sapma
HSA	$\alpha_3 = 0,3$	0,2992	0,2999	0,0013	α_3	0,2939	0,3006	0,0151
	$\alpha_4 = 0,1$	0,0995	0,0952	0,0066	α_4	0,1438	0,0922	0,0488
	$\alpha_8 = 0,1$	0,0993	0,0917	0,0054	α_8	0,0706	0,0918	0,0165
	$F_3(\mathbf{x})$	$4,06 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-3}$	$5,33 \times 10^{-4}$	$F_3(\mathbf{x})$	$2,64 \times 10^{-2}$	$1,22 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-2}$
GA	$\alpha_3 = 0,3$	0,2971	0,3022	0,00463	α_3	0,2917	0,2917	0,0177
	$\alpha_4 = 0,1$	0,1041	0,0947	0,00924	α_4	0,1235	0,07541	0,0469
	$\alpha_8 = 0,1$	0,0993	0,0972	0,00255	α_8	0,0944	0,09564	0,0092
	$F_3(\mathbf{x})$	$2,04 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$	$F_3(\mathbf{x})$	$1,92 \times 10^{-2}$	$3,79 \times 10^{-2}$	$1,26 \times 10^{-2}$
TLBO	$\alpha_3 = 0,3$	0,2999	0,2999	0,0000	α_3	0,2989	0,3136	0,0272
	$\alpha_4 = 0,1$	0,1000	0,0999	0,0002	α_4	0,0492	0,0411	0,0396
	$\alpha_8 = 0,1$	0,0995	0,0995	0,0002	α_8	0,1116	0,0623	0,0420
	$F_3(\mathbf{x})$	$3,1 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{-5}$	$0,08 \times 10^{-4}$	$F_3(\mathbf{x})$	$2,52 \times 10^{-2}$	$3,68 \times 10^{-2}$	$1,28 \times 10^{-2}$
PSO	$\alpha_3 = 0,3$	0,3008	0,3045	0,0031	α_3	0,2553	0,3024	0,0268
	$\alpha_4 = 0,1$	0,0952	0,0921	0,0034	α_4	0,1747	0,0678	0,0595
	$\alpha_8 = 0,1$	0,1003	0,0943	0,0047	α_8	0,0781	0,0808	0,0165
	$F_3(\mathbf{x})$	$3,16 \times 10^{-4}$	$4,82 \times 10^{-4}$	$1,95 \times 10^{-4}$	$F_3(\mathbf{x})$	$3,87 \times 10^{-2}$	$4,43 \times 10^{-2}$	$5,82 \times 10^{-3}$

Tablo 38. İki ucu ankastre kompozit kiriş için hata indekslerinin karşılaştırması

Hasar senaryosu	HSA		GA		TLBO		PSO	
	I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2
<i>Gürültü yok</i>								
1	0,1750	0,0037	0,3105	0,0053	0,0019	0,0007	0,1750	0,0037
2	3,9307	0,0077	14,6822	0,0171	0,0630	0,0005	3,9307	0,0077
3	14,9956	0,0078	8,7317	0,0061	0,5500	0,0010	14,9956	0,0078
<i>Gürültü var</i>								
1	1,2965	0,0196	3,6461	0,0417	3,2367	0,1003	1,2965	0,0196
2	12,7754	0,0457	8,9383	0,0289	9,9151	0,0513	12,7754	0,0457
3	52,1819	0,0369	31,6971	0,0437	101,0293	0,0955	52,1819	0,0369

Tablo 39. Konsol kompozit kiriş için hata indekslerinin karşılaştırması

Hasar senaryosu	HSA		GA		TLBO		PSO	
	I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2
<i>Gürültü yok</i>								
1	0,0435	0,1426	11,5364	0,1803	0,1282	0,0203	4,2920	0,0877
2	4,5350	0,1136	15,6892	0,0871	0,7986	0,0149	9,8522	0,0455
3	75,2136	0,1857	80,0980	0,1082	29,6170	0,0440	39,4446	0,0686
<i>Gürültü var</i>								
1	2,4262	0,0689	8,0938	0,1389	0,3901	0,0551	5,8410	0,1486
2	36,9434	0,1691	13,3288	0,0745	6,1370	0,0709	22,4759	0,0845
3	114,7023	0,0986	82,1337	0,0549	70,1046	0,1074	52,9791	0,0978

Tablo 37’de, iki ucu ankastre kompozit kirişte Hasar-3 durumunda dört algoritma için beş bağımsız koşuma ait hasar tespit sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tabloya göre, gürültüsüz durumda diğer algoritmalarla kıyasla TLBO algoritmasının gerçek sonuçlara en iyi yakınsamayı sağladığı, standart sapmasının sıfıra çok yakın olduğu görülmektedir. Gürültü etkisi dikkate alındığında ise dört algoritmanın birbirine yakın sonuçlar verdiği söylenebilir.

Performans değerlendirmesi için daha önce Bölüm 3.3.1’de (109) ve (110) ifadeleri ile verilen hata indeksleri hesaplanmış ve iki ucu ankastre kiriş için Tablo 38’de, konsol kiriş için ise Tablo 39’da sunulmuştur. Tablolarda I_2 indeks değerlerinin TLBO algoritmasında diğerlerine kıyasla sıfıra daha yakın olduğu görülmektedir. Bu da daha önce bahsedildiği gibi TLBO algoritmasının hasarlı elemanları çok iyi bir doğrulukla tespit edebildiği anlamına gelmektedir. I_1 indeks değerleri değerlendirildiğinde, özellikle iki ucu ankastre kirişte gürültüsüz durumda tüm hasar senaryoları için TLBO en iyi sonuçları vermektedir. Gürültülü durumda ise dört algoritmanın da performansı azalmakta, özellikle sığ hasarların tespitinde önemli hata oranları ortaya çıkmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tabakalı kompozit kirişlerin yapısal taşıyıcı elemanlar olarak mühendislik pratiğindeki uygulamalarının giderek artması bu tür malzemelerin karmaşık hasar mekanizmalarını anlamayı ve bunların zamanında tespiti için güvenilir ve uygulanması kolay hasar tespit yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, uygulaması daha kolay ve ucuz olan titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemlerinin güçlü hesaplama algoritmalarıyla birlikte bu tür malzemelerde kullanılması son derece iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, tabakalı kompozit kirişlerde titreşim verileri kullanılarak hasar tespiti için bir yöntem önerilmesi amacına yönelik olarak sırasıyla, sayısal modelleme için tabakalı kompozit kiriş sonlu elemanının geliştirilmesi, dört klasik optimizasyon algoritmasıyla (Genetik Algoritma, Armoni Arama Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ve Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması) hasar tespit probleminin bir optimizasyon problemi olarak modellenmesi ve önerilen yöntemin doğrulanması ve parametrik çalışma yapılması adımları yürütülmüştür. Geliştirilen sonlu eleman modeli, kayma deformasyonları, dönel atalet etkileri, Poisson etkisi ve anizotropinin sebep olduğu uzama, eğilme ve burulma deformasyonları arasındaki etkileşimleri dikkate alabilmektedir. Hasar, eleman rijitliklerinin azaltılması yoluyla tanımlanmış; bu arada hasar nedeniyle kütlede herhangi bir değişiklik olmadığı kabul edilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modelinin doğruluğunu göstermek üzere ANSYS 16.0 programında üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuş, ek olarak cam elyaf kompozit kiriş üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır.

Hasar tespit problemi bir optimizasyon problemi şeklinde tanımlanarak üç farklı amaç fonksiyonunun minimum değerleri aranmıştır. Bu fonksiyonlardan birincisi doğal frekans değişimlerini, ikincisi ise hem doğal frekans hem de mod şekli değişimlerini, üçüncüsü ise doğal frekans, mod şekli ve modal esneklik değişimini göz önüne alacak şekilde kurgulanmıştır. Optimizasyon işleminde dört klasik algoritma (GA, HSA, PSO, TLBO) kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde yapının sonlu eleman modelini titreşim verisinin alındığı hedef modele indirgemek için Guyan yöntemi kullanılmış; laboratuvar ortamındaki belirsizliklerin etkisini dikkate alabilmek için frekans ve mod şekillerine gürültü eklenmiştir. Önerilen hasar tespit yönteminin performansı, literatürden bazı

örneklerle karşılaştırmalar yapılmak suretiyle gösterilmiştir. Ayrıca, genel anizotropik tabakalı kompozit kiriş için parametrik çalışmalar yapılarak hem sonlu eleman modelinin hem de önerilen hasar tespit yönteminin etkinliği detaylı irdelenmiştir. Sayısal simülasyon çalışmalarına ek olarak deneysel verilerle hasar tespiti için cam elyaf kompozit kiriş çeşitli hasar senaryoları altında incelenmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır:

- Önerilen sonlu eleman modelinin (FSDT13) tabakalı kompozit kirişlerin dinamik davranışını çok iyi bir doğrulukla temsil edebildiği sayısal ve deneysel olarak gösterilmiştir.
- Kompozit kirişlerde özellikle genel anizotropi durumunda (açılı tabaka dizilimi) Poisson etkisi sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir.
- E_1/E_2 (ortotropi) oranı arttıkça hem çapraz hem de açılı tabaka dizilimli kirişler için boyutsuz doğal frekanslar azalmaktadır.
- Çapraz tabaka dizilimli kirişlerde titreşim modlarının eğilme veya burulma karakterinde çıktığı, diğer bileşenlerin (uzama ve dönme) etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmektedir. Çapraz tabaka dizilimli kompozit kirişlerde eğilme ve burulma arasında etkileşim görülmemektedir.
- Açılı tabaka dizilimli kompozit kirişlerde eğilme, burulma ve uzama etkileşimleri özellikle yüksek titreşim modlarında etkisini göstermekte ve karışık mod şekillerinin ortaya çıktığı görülmektedir.
- Kirişte hasar tanımlaması için kullanılan rijitlik azaltma yönteminin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Sonlu eleman modelinin doğrulanması için yapılan deneysel ölçümlerde sayısal ve deneysel sonuçlar arasında genel olarak uyum gözlenmekte, bazı istisnalarda hata yüzdeleri artabilmektedir. Bunun sebebinin laboratuvar ortamında kirişin mesnetleme koşullarının tam sağlanamaması, ortam gürültüsü vb. olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, sayısal ve deneysel mod şekilleri arasında çok iyi bir korelasyon elde edilmiştir.
- Test kirişinin sayısal ve deneysel mod şekli eğriliği değişimleri değerlendirilmiş; sayısal verilerle elde edilen sonuçlardan tüm hasar senaryoları için çatlak konumlarının tam olarak belirlenebildiği görülmüştür. Bunda en önemli etken, sayısal olarak modal yer değiştirme ve dolayısıyla eğrilik elde edilen koordinat

sayısının fazla olmasıdır. Deneysel verilere göre elde edilen sonuçlardan ise hasar konumlarının belirlenebildiği; ancak, bu işlemin sayısal yöntemle göre nispeten daha zor olduğu görülmektedir. Bunda, deneysel ölçümlerle mod verisi alınan koordinat sayısının daha az olmasının etkisi vardır. Eğrilik değişimi ile doğrudan hasar tespitinde giriş üzerinde bulunan ivmeölçer sayısı (dolayısıyla ölçüm alınan koordinat sayısının) ve ivmeölçerlerin hasarlı bölgeye uzaklıklarının çok önemli olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca modal eğrilik yöntemiyle hasar tespitinde, hasar şiddetinin önemli olduğu görülmektedir.

- Test girişinin sayısal ve deneysel modal esneklik değişimleri değerlendirilmiş; sayısal verilere dayalı olarak hesaplanan esneklik değişimleriyle hasar konumlarının tam olarak belirlenebildiği görülmüştür. Eğrilik değişiminde olduğu gibi esneklik değişiminde de deneysel verilerin belirli noktalardan alınmış olması sebebiyle hasar konumlarının belirlenmesi zorlaşmıştır. Esneklik değişimleri kullanılarak hasar tespitinde, şiddeti büyük olan hasarı tanımlamak kolay iken, sık hasara ait bilgiyi ayırt etmek zorlaşmaktadır. Esneklik değişimiyle hasar tespitinde de doğruluğun veri alınan koordinat sayısına ve ivmeölçerlerin konumuna bağlı olduğu görülmüştür.
- Armoni Arama Algoritması (HSA) kullanılarak yapılan parametrik çalışmada, frekans değişimlerine dayalı $F_1(\mathbf{x})$ ve hem frekans hem de mod şekil değişimlerine dayalı $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonları ile elde edilen hasar tespit sonuçları değerlendirilmiştir. Buna göre, dikkate alınan her senaryoda $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonunun hasarlı elemanları diğerine göre daha iyi bir doğrulukla tahmin ettiği görülmüştür. Sadece frekans değişimine dayalı $F_1(\mathbf{x})$ fonksiyonu ile elde edilen sonuçlarda yanlış pozitif hasarlı elemanların sayısı artmıştır. Gürültünün sonuçlar üzerindeki etkisinin $F_1(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu kullanıldığında $F_2(\mathbf{x})$ kullanımına göre daha belirgin olduğu görülmüştür. Gürültünün varlığı her iki amaç fonksiyonu için de yöntemin doğruluğunu etkilemiş, özellikle sık hasarları tespitinde yöntemin etkinliğini azaltmıştır.
- Öğretme Öğrenme Temelli Optimizasyon (TLBO) algoritması kullanılarak yapılan parametrik çalışmada $F_2(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile elde edilen hasar tespit sonuçları değerlendirilmiştir. Göz önüne alınan tüm senaryolarda hasarlı

elemanlar hem gürültülü hem de gürültüsüz koşullarda doğru olarak belirlenmiştir. Gürültü sebebiyle ortaya çıkan yanlış pozitifler dikkate alınmayacak kadar küçüktür. Ele alınan kirişte anizotropi nedeniyle eğilme, burulma ve uzama modları arasındaki yüksek etkileşime rağmen, sadece ilk birkaç eğilme modu ile oldukça başarılı bir şekilde hasar tespiti yapılabilmektedir.

- TLBO ile hasar tespitinde çoklu hasar senaryolarında gürültü varken özellikle sık hasarlar için doğruluğun azaldığı görülmüştür.
- Dört farklı optimizasyon algoritması (HSA, GA, TLBO, PSO), $F_3(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile kullanılarak elde edilen hasar tespit sonuçları değerlendirilmiş ve algoritmalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. İki ucu ankastre anizotropik kompozit kiriş için göz önüne alınan tüm senaryolarda hasarlı elemanlar hem gürültülü hem de gürültüsüz koşullarda dört algoritma yardımıyla çok iyi doğrulukla belirlenmiştir. Gürültünün sonuçlar üzerindeki etkisinin çoklu hasar durumlarında daha belirgin olduğu görülmüştür. Anizotropik kompozit konsol kiriş için dört farklı algoritma ile elde edilen hasar tespit sonuçlarında ise gürültü etkisi dikkate alınmadığında bile yanlış pozitif hasarlı elemanların sayısı artmıştır. Konsol kiriş için $F_3(\mathbf{x})$ amaç fonksiyonu ile hasar tespitinde TLBO algoritmasının diğerlerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Dört farklı optimizasyon algoritması ile yapılan hasar tespitinde performans değerlendirmesi için sonuçlar dikkate alındığında genel olarak TLBO algoritmasının performansının diğerlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Gürültünün varlığı dört algoritmanın da performansını azaltmakta, özellikle sık hasarların tespitinde önemli hata oranları ortaya çıkmaktadır.
- Dört farklı optimizasyon algoritmasında maksimum iterasyon sayısı farklı olduğundan ortak bir gösterim elde edebilmek için ilk 100 iterasyon göz önüne alınarak amaç fonksiyonunun yakınsaması birbiriyle karşılaştırılmıştır. Hem gürültülü hem de gürültüsüz durumda eğrilerin HSA, PSO, GA ve TLBO şeklinde yukarıdan aşağıya doğru sıralandığı görülmüştür. TLBO en hızlı yakınsayan algoritmadır. Bunu sırasıyla PSO, GA ve HSA takip etmektedir. HSA yakınsama hızı olarak diğerlerinden çok daha yavaş görünse de işlem zamanı açısından tüm algoritmalar yaklaşık aynı sürede süreci sonlandırmışlardır.

Gürültüsüz durumda en iyi yakınsama değeri TLBO için elde edilirken, gürültülü durumda tüm algoritmalar neredeyse aynı değere yakınsamışlardır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında bazı öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Tez kapsamında geliştirilen sonlu eleman modeli, değişken kesitli kirişler ve eğri eksenli kirişlere uyarlanabilir.
- Kiriş için burada verilen incelemeler, plak ve kabuk sistemlere genişletilebilir.
- Bu çalışmada hasar ilgili elemanlarda rijitlik azaltılması şeklinde tanımlanmıştır. Kompozitlerde yaygın olarak görülen delaminasyon, lif kopması, matris çatlağı vb. hasar türlerini modellemek için farklı modelleme teknikleri üzerinde çalışılabilir.
- Optimizasyona dayalı hasar tespitinde kullanılan amaç fonksiyonları çeşitlendirilerek birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları değerlendirilebilir.
- Makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri ile aynı çalışma tekrarlanabilir.
- Optimizasyona dayalı hasar tespitinde tez çalışmasında kullanılan algoritmaların hibrit versiyonları veya yeni nesil algoritmalar (örneğin, kuantum optimizasyon algoritmaları) ile daha yüksek doğruluk ve hızlı yakınsama sağlanabilir.
- Daha hassas ve yüksek çözünürlüklü sensörlerin kullanımı, hasar tespitinde doğruluğu artırabilir. Örneğin, fiber optik sensörler veya MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) tabanlı sensörler kullanılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdel Wahab, M. M. & De Roeck, G. (1999). Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario. *Journal of Sound and Vibration*, 226, 217-235.
- Abrate, S. (1994). Impact on Laminated Composites: Recent Advances. *Applied Mechanics Reviews*, 47, 517.
- Ahmadi-Nedushan, B. & Fathnejat, H. (2022). A Modified Teaching–Learning Optimization Algorithm for Structural Damage Detection Using a Novel Damage Index Based on Modal Flexibility and Strain Energy Under Environmental Variations. *Engineering with Computers*, 38(1), 847-874.
- Alexopoulos, N.; Bartholome, C.; Poulin, P. & Marioli-Riga, Z. (2010). Structural Health Monitoring of Glass Fiber Reinforced Composites Using Embedded Carbon Nanotube (CNT) Fibers. *Composites Science and Technology*, 70, 260-271.
- Al-Furjan, M. S. H., Fereidouni, M., Sedghiyan, D., Habibi, M. & Jung, D. (2021a). Three-Dimensional Frequency Response of the CNT-Carbon-Fiber Reinforced Laminated Circular/Annular Plates Under Initially Stresses. *Composite Structures*; 257, 113146.
- Al-Furjan, M. S. H., Samimi-Sohrforozani, E., Habibi, M. & Jung, D. & Safarpour H. (2021b). Vibrational Characteristics of a Higher-Order Laminated Composite Viscoelastic Annular Microplate via Modified Couple Stress Theory. *Composite Structures*, 257, 113152.
- Alkayem N.F., Cao, M., Zhang Y., Bayat, M. & Su, Z. (2018). Structural Damage Detection Using Finite Element Model Updating with Evolutionary Algorithms: A Survey. *Neural Computing and Applications*, 30(2), 389–411.
- Allemang, R. J. & Brown, D.L. (1982). A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis. *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, 110-116. Orlando.
- Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration*, 37, 14–21.
- Al-Qayyim, A. (2017). *A Vibration-Based Damage Detection Algorithm for Bridge Type Structures*. İ.T.U., Graduate School of Science Engineering and Technology, Ph.D. Thesis, İstanbul.
- Altunışık, A. C., Okur, F. Y. & Kahya, V. (2017a). Structural Identification of a Cantilever Beam with Multiple Cracks: Modeling and Validation. *International Journal of Mechanical Science*, 130, 74–89.

- Altunışık, A.C., Okur, F.Y. & Kahya, V. (2017b). Modal Parameter Identification and Vibration-Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam. *Engineering Failure Analysis*, 79, 154–170.
- Altunışık, A. C., Okur, F. Y. & Kahya, V. (2017c). Automated Model Updating of Multiple Cracked Cantilever Beams for Damage Detection. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 499–512.
- Amafabia D. M., Montalvão, D., David-West, O. & Haritos, G. (2017). A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures. *Structural Durability & Health Monitoring*; 11, 91–147.
- ANSYS Inc. (2016). *ANSYS Mechanical APDL Material Reference Release 18.2.*, Canonsburg, PA.
- Artar, M., Çatar, R., & Daloğlu, A. (2018). Damage Detection on Steel Plane Trusses Via Harmony Search Algorithm. *International Journal of Engineering Technologies*, 4(1), 13-20.
- ASTM. (1992). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D790).
- ASTM. (2000). Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D790). American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2000). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) Of Plastics by Displacement (ASTM D792-00). West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2008). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTM D3039/D3039M-08). West Conshohocken, PA.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M. & Gabbouj, M. (2021). A Review of Vibration-Based Damage Detection in Civil Structures: From Traditional Methods to Machine Learning and Deep Learning Applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077.
- Barman, S. K., Mishra, M., Maiti, D. K., & Maity, D. (2021). Vibration-Based Damage Detection of Structures Employing Bayesian Data Fusion Coupled with TLBO Optimization Algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(4), 2243-2266.
- Baybordi, S., & Esfandiari, A. (2022). A Novel Sensitivity-Based Finite Element Model Updating and Damage Detection Using Time Domain Response. *Journal of Sound and Vibration*, 537, 117187.

- Behtani, A., Bouazzouni, A., Khatir, S., Tiachacht, S., Zhou, Y. L., & Abdel Wahab, M. (2017). Damage Localization and Quantification of Composite Beam Structures Using Residual Force and Optimization. *Journal of Vibroengineering*, 19(7), 4977-4988.
- Farrar, C. R., Doebling, S. W., & Nix, D. A. (2001). Vibration-based Structural Damage Identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), 131–149.
- Cancelli, A., Micheli, L., Alipour, A., Laflamme, S., & Sritharan, S. (2017). Identifying The Extent and Location of Damage in A Reinforced Concrete Girder Using Health Monitoring Data. In *Structures Congress* (pp. 511–521).
- Cantwell, W. J., & Morton, J. (1989). Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP. *Composites*, 20(6), 545-551.
- Casciati, S. (2008). Stiffness Identification and Damage Localization Via Differential Evolution Algorithms. *Structural Control and Health Monitoring*, 15, 436–449.
- Cha, Y. J., & Buyukozturk, O. (2015). Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy and Hybrid Multiobjective Optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30, 347–358.
- Chandrashekhara, K., & Bangera, K. M. (1992). Free Vibration of Composite Beams Using a Refined Shear Flexible Beam Element. *Computers & Structures*, 43(4), 719-727.
- Chen, W. Q., Lü, C. F., & Bian, Z. G. (2004). A Semi-Analytical Method for Free Vibration of Straight Orthotropic Beams with Rectangular Cross-Sections. *Mechanics Research Communications*, 31(6), 725-734.
- Dai, Z., Jiang, Z., Zhang, L., & Habibi, M. (2021). Frequency Characteristics and Sensitivity Analysis of a Size-Dependent Laminated Nano Shell. *Advances in Nano Research*, 10(2), 175-189.
- Das, S., Saha, P., & Patro, S. K. (2016). Vibration-based Damage Detection Techniques Used for Health Monitoring of Structures: A review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 477-507.
- Das, S., & Dhang, N. (2022). Damage Identification of Structures Using Incomplete Mode Shape and Improved TLBO-PSO With Self-Controlled Multi-Stage Strategy. *Structures*, 35, 1101-1124.
- Ding, Z. H., Huang, M., & Lu, Z. R. (2016). Structural Damage Detection Using Artificial Bee Colony Algorithm with Hybrid Search Strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 1–13.

- Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Dang-Trung, H., & Nguyen-Thoi, T. (2017a). An Efficient Multi-Stage Optimization Approach for Damage Detection in Plate Structures. *Advances in Engineering Software*, 112, 76-87.
- Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Nguyen-Minh, N., Ho-Huu, V., & Nguyen-Thoi, T. (2017b). A Two-Stage Assessment Method Using Damage Locating Vector Method and Differential Evolution Algorithm for Damage Identification of Cross-Ply Laminated Composite Beams. *Advances in Structural Engineering*, 20(12), 1807-1827.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *Shock and Vibration Digest*, 30(2), 91–105.
- Fallahian, S., Joghataie, A., & Kazemi, M. T. (2018). Structural Damage Detection Using Time Domain Responses and Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) Algorithm. *Scientia Iranica*, 25, 3088–3100.
- Farrar, C. R., & James, G. H. (1997). System Identification from Ambient Vibration Measurements on A Bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 205, 1–18.
- Femtools (2003). Femtools Software, Version 3.3. Leuven, Belgium: Dynamic Design Solutions. (FEMtools Model Updating Theoretical Manual 2016.)
- Friswell, M. I., Garvey, S. D., & Penny, J. E. T. (1995). Model Reduction Using Dynamic and Iterated IRS Techniques. *Journal of Sound and Vibration*, 186(2), 311-323.
- Ganjdoust, F., Kefal, A., & Tessler, A. (2023). A Novel Delamination Damage Detection Strategy Based on Inverse Finite Element Method for Structural Health Monitoring of Composite Structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 192, 110202.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation*, 76, 60–68.
- Ghobadi, A. (2017). Common Type of Damages in Composites and Their Inspections. *World Journal of Mechanics*, 7(02), 24–33.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Gomes, G. F., Mendéz, Y. A. D., da Cunha, S. S., & Ancelotti, A. C. (2018a). A Numerical–Experimental Study for Structural Damage Detection in CFRP Plates Using Remote Vibration Measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 33–47.

- Gomes, G. F., Mendéz, Y. A. D., Cunha Jr, S. S., & Ancelotti Jr, A. C. (2018b). A Numerical–Experimental Study for Structural Damage Detection in CFRP Plates Using Remote Vibration Measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 33-47.
- Gomes, G. F., Cunha Jr, S. S., Ancelotti Jr, A. C. (2019a). A Sunflower Optimization (SFO) Algorithm Applied to Damage Identification on Laminated Composite Plates. *Engineering with Computers*, 10.
- Gomes, G. F., Almeida, F. A., Junqueira, D. M., Cunha Jr, S. S., & Ancelotti Jr, A. C. (2019b). Optimized Damage Identification in CFRP Plates by Reduced Mode Shapes And GA-ANN Methods. *Engineering Structures*, 181, 111-123.
- Goyal, V. K., & Kapania, R. K. (2007). A Shear-Deformable Beam Element for The Analysis of Laminated Composites. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43(6-7), 463-477.
- Gu, J., Gul, M., & Wu, X. (2017). Damage Detection Under Varying Temperature Using Artificial Neural Networks. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(11), e1998.
- Guerra, F. A., & Coelho, L. D. S. (2008). Multi-Step Ahead Nonlinear Identification of Lorenz's Chaotic System Using Radial Basis Neural Network with Learning by Clustering and Particle Swarm Optimization. *Chaos, Solitons & Fractals*, 35(5), 967-979.
- Guo, Y., Mi, H., & Habibi, M. (2021). Electromechanical Energy Absorption, Resonance Frequency, And Low-Velocity Impact Analysis of The Piezoelectric Doubly Curved System. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 157, 107723.
- Guyan, R. J. (1965). Reduction Of Stiffness and Mass Matrices. *AIAA Journal*, 3(2), 380.
- Hadi, N. H. (2016). Delamination Modeling and Assessment for Composite Laminated Plates Using Particle Swarm Optimization (PSO). *International Journal of Computer Applications*, 975, 8887.
- Hao, H., & Xia, Y. (2002). Vibration-Based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16, 222-229.
- He, R. S., & Hwang, S. F. (2007). Identifying Damage in Spherical Laminate Shells by Using a Hybrid Real-Parameter Genetic Algorithm. *Composite Structures*, 80, 32-41.
- Herman, A. P., Orifici, A. C., & Mouritz, A. P. (2013). Vibration Modal Analysis of Defects in Composite T-Stiffened Panels. *Composite Structures*, 104, 34-42.
- Heylen, W., Lammens, S., & Sas, P. (2007). *Modal Analysis Theory and Testing*. Leuven Katholieke University, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.

- Hoseini Vaez, S. R., & Fallah, N. (2017). Damage Detection of thin Plates Using GA-PSO Algorithm Based on Modal Data. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1251–1263.
- Hou, R., & Xia, Y. (2021). Review On the New Development of Vibration-Based Damage Identification for Civil Engineering Structures: 2010–2019. *Journal of Sound and Vibration*, 491, 115741.
- Huang, L., Sheikh, A. H., Ng, C. T., & Griffith, M. C. (2015). An Efficient Finite Element Model for Buckling Analysis of Grid Stiffened Laminated Composite Plates. *Composite Structures*, 122, 41-50.
- Sinou, J. J. (2009). A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in The Measurement of Linear and Non-Linear Vibrations. *Mechanical vibrations: measurement, effects and control*, 643-702.
- Jafari-Talookolaei, R. A., Abedi, M., Kargarnovin, M. H., & Ahmadian, M. T. (2012). An Analytical Approach for The Free Vibration Analysis of Generally Laminated Composite Beams with Shear Effect and Rotary Inertia. *International Journal of Mechanical Sciences*, 65, 97-104.
- Jebieshia, T. R., Maiti, D. K., & Maity, D. (2015). Damage Assessment of Composite Structures Using Particle Swarm Optimization. *International Journal of Aerospace System Engineering*, 2(2), 24-28.
- Jebieshia, T. R., Maiti, D. K., & Maity, D. (2020). Frequency-Based Damage Assessment of Composite Members Using Unified Particle Swarm Optimization. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 21, 63-79.
- Jun, L., Hongxing, H., & Rongying, S. (2008). Dynamic Finite Element Method for Generally Laminated Composite Beams. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(3), 466-480.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F. Y., Altunışık, A. C., & Aslan, M. (2019). Free Vibrations of Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks: Numerical Model and Experimental Validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 159, 30–42.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F. Y., Altunışık, A. C., & Aslan, M. (2021a). Damage Localization in Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks Based on Vibration Measurements. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 75-87.
- Kahya, V., Okur, F. Y., Karaca, S., Altunışık, A. C., & Aslan, M. (2021b). Multiple Damage Detection in Laminated Composite Beams Using Automated Model Update. In *Structures*, 34, 1665-1683.

- Kahya, V., Şimşek, S., & Toğan, V. (2022). Vibration-Based Damage Detection in Anisotropic Laminated Composite Beams by a Shear-Deformable Finite Element and Harmony Search Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, 181.
- Kargarnovin, M. H., Ahmadian, M. T., Jafari-Talookolaei, R. A., & Abedi, M. (2013). Semi-Analytical Solution for The Free Vibration Analysis of Generally Laminated Composite Timoshenko Beams with Single Delamination. *Composites Part B: Engineering*, 45, 587–600.
- Kasinos, S., Palmeri, A., & Lombardo, M. (2015). Using The Vibration Envelope as a Damage Sensitive Feature in Composite Beam Structures. In *Structures*, 1, 67–75.
- Kaveh, A., Javadi, S. M., & Maniat, M. (2014). Damage Assessment Via Modal Data with A Mixed Particle Swarm Strategy, Ray Optimizer, And Harmony Search. *Asian Journal of Civil Engineering*, 15, 95-106.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.
- Kessler, S. S., Spearing, S. M., Atalla, M. J., Cesnik, C. E., & Soutis, C. (2002). Damage Detection in Composite Materials Using Frequency Response Methods. *Composites Part B: Engineering*, 33, 87-95.
- Kessler, S. S., Spearing, S. M., & Soutis, C. (2002). Damage Detection in Composite Materials Using Lamb Wave Methods. *Smart Materials and Structures*, 11, 269-278.
- Khan, A., Ko, D. K., Lim, S. C., & Kim, H. S. (2019). Structural Vibration-Based Classification and Prediction of Delamination in Smart Composite Laminates Using Deep Learning Neural Network. *Composite Part B*, 161, 586-594.
- Khatir, S., Abdel Wahab, M., Boutchicha, D., & Khatir, T. (2019). Structural Health Monitoring Using Modal Strain Energy Damage Indicator Coupled with Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm and Isogeometric Analysis. *Journal of Sound Vibration*, 448, 230–246.
- Khatir, S., Belaidi, I., Khatir, T., Hamrani, A., & Zhou, Y. L. (2017). Multiple Damage Detection in Composite Beams Using Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm. *Mechanics*, 23(4), 514-521.
- Khatir, S., Brahim, B., Capozucca, R., & Abdel Wahab, M. (2018). Damage Detection in CFRP Composite Beams Based on Vibration Analysis Using Proper Orthogonal Decomposition Method with Radial Basis Functions and Cuckoo Search Algorithm. *Composite Structure*, 187, 344–353.
- Kim, H. Y. (2003). Vibration-Based Damage Identification Using Reconstructed Frfs in Composite Structures. *Journal of Sound and Vibration*, 259, 1131-1146.

- Kim, J. G., & Lee, P. S. (2014). An Accurate Error Estimator for Guyan Reduction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 278, 1-19.
- Kim, J. H., Jeon, H. S., & Lee, C. W. (1992). Application Of the Modal Assurance Criteria for Detecting and Locating Structural Faults. In *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference*, San Diego, CA, USA, February 3-7; pp. 536-540.
- Krawczuk, M., & Ostachowicz, W. (2002). Identification Of Delamination in Composite Beams by Genetic Algorithm. *Science and Engineering of Composite Materials*, 10(2), 147-156.
- Kundu, R. D., Mishra, M., & Maity, D. (2023). Teaching-Learning-based Optimization Algorithm for Solving Structural Damage Detection Problem in Frames Via Changes in Vibration Responses. *Architecture, Structures and Construction*, 3(4), 395-414.
- Maia, N. M. M., Almeida, R. A. B., Urgueira, A. P. V., & Sampaio, R. P. C. (2011). Damage Detection and Quantification Using Transmissibility. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, 2475-2483.
- Manjarres, D., Landa-Torres, I., & Gil-Lopez, S. (2013). A Survey on Applications of The Harmony Search Algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26, 1818-1831.
- Manoach, E., Samborski, S., Mitura, A., & Warminski, J. (2012). Vibration-Based Damage Detection in Composite Beams Under Temperature Variations Using Poincaré Maps. *International Journal of Mechanical Sciences*, 62, 120-132.
- Marinone, T., Dardeno, T., & Avitabile, P. (2018). Reduced Model Approximation Approach Using Model Updating Methodologies. *Journal of Engineering Mechanics*, 144(3), 04018005.
- Masoumi, F., Ghasemi-Ghalebahman, A., & Kokabi, M. J. (2018). Identification Of Mechanical and Damage Parameters of Composite Laminates Based on A CPAM Method. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(17), 1114-1128.
- Maurya, M., Sadarang, J., Panigrahi, I., & Dash, D. (2022). Detection Of Delamination in Carbon Fibre Reinforced Composite Using Vibration Analysis and Artificial Neural Network. *Materials Today: Proceedings*, 49, 517-522.
- Mayer, D. G., Kinghorn, B. P., & Archer, A. A. (2005). Differential Evolution – An Easy and Efficient Evolutionary Algorithm for Model Optimization. *Agricultural Systems*, 83, 315-328.
- Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2010). Impact Damage In GFRP: New Insights with Infrared Thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 1839-1847.

- Miguel, L. F. F., Kaminski Jr., J., & Riera, J. D. (2012). Damage Detection Under Ambient Vibration by Harmony Search Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 39, 9704-9714.
- Montalvão, D., Karanatsis, D., Ribeiro, A. M. R., & Joana Arina, R. B. (2014). An Experimental Study on The Evolution of Modal Damping with Damage in Carbon Fiber Laminates. *Journal of Composite Materials*, 49, 2403-2413.
- Montalvão, D., Ribeiro, A. M. R., & Duarte-Silva, J. A. B. (2011). Experimental Assessment of a Modal-Based Multi-Parameter Method for Locating Damage in Composite Laminates. *Experimental Mechanics*, 51, 1473-1488.
- Moughty, J. J., & Casas, J. R. (2017). A State-of-The-Art Review of Modal-Based Damage Detection In Bridges: Development, Challenges, And Solutions. *Applied Sciences*, 7, 510.
- O'Callahan, J. C., Avitabile, P., & Riemer, R. (1989). System Equivalent Reduction and Expansion Processes. In *Proceedings of the Seventh International Modal Analysis Conference*. Las Vegas, USA (pp. 29-37).
- O'Callahan, J. (1989). A Procedure for an Improved Reduced System (IRS) Model. *Proceedings of the 7th IMAC*. Las Vegas, NV.
- OMA (2006). *Operational Modal Analysis, Release 4.0*. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Ooijselaar, T. H., Loendersloot, R., Warnet, L. L., de Boer, A., & Akkerman, R. (2010). Vibration-Based Structural Health Monitoring of a Composite T-Beam. *Composite Structures*, 92, 2007-2015.
- Özyön, S., Yaşar, C., & Temurtaş, H. (2011). Harmoni Arama Algoritmasının Çevresel Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Uygulanması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 65-76.
- Pandey, A. K., & Biswas, M. (1994). Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 169(1), 3-17.
- Penrose, R. (1955, July). A Generalized Inverse for Matrices. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* (Vol. 51, No. 3, pp. 406-413). Cambridge University Press.
- Pérez, M. A., Gil, L., & Oller, S. (2014). Impact Damage Identification in Composite Laminates Using Vibration Testing. *Composite Structures*, 108, 267-276.
- Potel, C., Chotard, T., de Belleval, J. F., & Benzeggagh, M. (1998). Characterization Of Composite Materials by Ultrasonic Methods: Modelization and Application to Impact Damage. *Composites Part B: Engineering*, 29, 159-169.
- PULSE Analyzers and Solutions (2006).

- Qu, Z. Q. (2004). *Model Order Reduction Techniques with Applications in Finite Element Analysis*. Springer Science & Business Media.
- Rao, A. R. M., Lakshmi, K., & Kumar, S. K. (2015). Detection Of Delamination In Laminated Composites With Limited Measurements Combining PCA And Dynamic QPSO. *Advances in Engineering Software*, 86, 85-106.
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching–Learning-Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems. *Computer-Aided Design*, 43, 303–315.
- Raut, N. P., Kolekar, A. B., & Gombi, S. L. (2021). Optimization Techniques for Damage Detection of Composite Structure: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4830-4834.
- Reddy, J. N. (1997). *Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Ručevskis, S., Wesolowski, M., & Chate, A. (2009). Vibration-Based Damage Identification in Laminated Composite Beams. *Scientific Journal of Riga Technical University: Construction Science*, 10, 100–112.
- Rytter, A. (1993). *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Aalborg University, Denmark.
- Sanders, D. R., Kim, Y. I., & Stubbs, N. (1992). Nondestructive Evaluation of Damage in Composite Structures Using Modal Parameters. *Experimental Mechanics*, 32, 240-251.
- Shahrouzi, M., & Sabzi, A. H. (2018). Damage Detection of Truss Structures by Hybrid Immune System and Teaching–Learning-Based Optimization. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(7), 811-825.
- Shariati, A., Ghabussi, A., Habibi, M., Safarpour, H., Safarpour, M., Tounsi, A., & Safa, M. (2020). Extremely Large Oscillation and Nonlinear Frequency of a Multi-Scale Hybrid Disk Resting on Nonlinear Elastic Foundation. *Thin-Walled Structures*, 154, 106840.
- Song, O., Ha, T. W., & Librescu, L. (2003). Dynamics Of Anisotropic Composite Cantilevers Weakened by Multiple Transverse Open Cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 105–123.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution–A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359.

- Şimşek, S., Kahya, V., Adıyaman, G., & Toğan, V. (2022). Damage Detection in Anisotropic-Laminated Composite Beams Based on Incomplete Modal Data and Teaching–Learning-Based Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(11), 332.
- Tamer, S., & Karakuzu, C. (2006). Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ve Benzetim Örnekleri. *ELECO 2006 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Sempozyumu*, 302-306.
- Tran-Ngoc, H., Khatir, S., Ho-Khac, H., De Roeck, G., Bui-Tien, T., & Wahab, M. A. (2021). Efficient Artificial Neural Networks Based on A Hybrid Metaheuristic Optimization Algorithm for Damage Detection in Laminated Composite Structures. *Composite Structures*, 262, 113339.
- Tran-Ngoc, H., Khatir, S., Le-Xuan, T., Tran-Viet, H., De Roeck, G., Bui-Tien, T., & Wahab, M. A. (2022). Damage Assessment in Structures Using Artificial Neural Network Working and A Hybrid Stochastic Optimization. *Scientific Reports*, 12(1), 4958.
- Tuo, S., Zhang, J., Yong, L., et al. (2015). A Harmony Search Algorithm for High-Dimensional Multimodal Optimization Problems. *Digital Signal Processing*, 46, 151–163.
- Tuo, S., Yong, L., & Zhou, T. (2013). An Improved Harmony Search Based on Teaching–Learning Strategy for Unconstrained Optimization Problems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(1), 413565.
- Tuo, S., Yong, L., & Deng, F. (2017). HSTLBO: A Hybrid Algorithm Based on Harmony Search and Teaching-Learning-Based Optimization for Complex High-Dimensional Optimization Problems. *PLoS One*, 12, e0175114.
- Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Dang-Trung, H., & Nguyen-Thoi, T. (2016). A Two-Step Approach for Damage Detection in Laminated Composite Structures Using Modal Strain Energy Method and An Improved Differential Evolution Algorithm. *Composite Structures*, 147, 42-53.
- Vo-Duy, T., Nguyen-Minh, N., Dang-Trung, H., Tran-Viet, A., & Nguyen-Thoi, T. (2015). Damage Assessment of Laminated Composite Beam Structures Using Damage Locating Vector (DLV) Method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 9, 457-465.
- Vosoughi, A. R., & Gerist, S. (2014). New Hybrid FE-PSO-Cgas Sensitivity Base Technique for Damage Detection of Laminated Composite Beams. *Composite Structures*, 118, 68-73.
- Wang, Z., Yu, S., Xiao, Z., & Habibi, M. (2020). Frequency And Buckling Responses of a High-Speed Rotating Fiber Metal Laminated Cantilevered Microdisk. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.

- Wang, Z. X., Qiao, P., & Xu, J. (2015). Vibration Analysis of Laminated Composite Plates with Damage Using the Perturbation Method. *Composites Part B: Engineering*, 72, 160-174.
- Wei, Z., Liu, J., & Lu, Z. (2018). Structural Damage Detection Using Improved Particle Swarm Optimization. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 26(6), 792-810.
- Wu, J., & Habibi, M. (2021). Dynamic Simulation of the Ultra-Fast-Rotating Sandwich Cantilever Disk Via Finite Element and Semi-Numerical Methods. *Engineering Computations*, 1(3).
- Yang, X. S. (2009). Harmony Search as A Metaheuristic Algorithm. *Studies in Computational Intelligence*, 191, 1–14.
- Zara, A., Belaidi, I., Khatir, S., Brahim, A. O., Boutchicha, D., & Wahab, M. A. (2023). Damage Detection in GFRP Composite Structures by Improved Artificial Neural Network Using New Optimization Techniques. *Composite Structures*, 305, 116475.
- Zhang, Z., He, M., Liu, A., Singh, H. K., Ramakrishnan, K. R., Hui, D., Shankar, K., Morozov, E. V. (2018). Vibration-Based Assessment of Delaminations in FRP Composite Plates. *Composite Part B*, 144, 254-266.
- Zhang, Z., Shankar, K., Ray, T., Morozov, E. V., & Tahtalı, M. (2013). Vibration-Based Inverse Algorithms for Detection of Delamination in Composites. *Composite Structures*, 102, 226-236.
- Zheng, T., Luo, W., Tong, H., & Liang, X. (2022). A Two-Step Method for Delamination Detection in Composite Laminates Using Experience-Based Learning Algorithm. *Structural Health Monitoring*, 21(3), 965-983.
- Zhou, J., Duan, Z., Li, Y., Deng, J., & Yu, D. (2006). PSO-based Neural Network Optimization and Its Utilization in a Boring Machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3), 19-23.

ÖZGEÇMİŞ

Sebahat ŞİMŞEK, ilk, orta ve lise öğrenimini Kütahya’da tamamladı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2014 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümündeki lisans eğitimini yüksek onur öğrencisi olarak bölüm birinciliği ile tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2016 yılında başarı ile tamamladı. 2017 yılında aynı birimde doktora öğrenimine başladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. Evli ve bir kız çocuk annesi olan ŞİMŞEK, İngilizce bilmekte olup halen Karadeniz Teknik Üniversitesi’ndeki görevine devam etmektedir.

Ödüller

Karaca S., “İnşaat Mühendisliği Bölümü Birincilik Ödülü”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Haziran, 2014.

Projeler

Tabakalı Kompozit Yapılarda Modal Karakteristikler Yardımıyla Hasar Tespiti İçin Optimizasyon Tabanlı Bir Yöntem Geliştirilmesi, Araştırmacı, Bilimsel Araştırma Projesi (BAP01-Performansa Dayalı Temel Araştırma Projesi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Projesi, Proje No: FBA-2021-9165, 2021-2024.

Tezden üretilmiş Web of Science kapsamındaki dergilerde yayımlanmış makaleler

Şimşek, S., Kahya, V., Adıyaman, G., & Toğan, V., (2022). Damage detection in anisotropic-laminated composite beams based on incomplete modal data and teaching-learning-based optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*,65(11).

Kahya, V., Şimşek, S., & Toğan, V., (2022). Vibration-based damage detection in anisotropic laminated composite beams by a shear-deformable finite element and harmony search optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(6).

- Kahya, V., Okur, F. Y., Şimşek, S., Altunışık, A. C., & Aslan, M., (2021). Multiple damage detection in laminated composite beams using automated model update. *Structures*, 34, 1665-1683.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F. Y., Altunışık, A. C., & Aslan, M., (2021). Damage Localization in Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks Based on Vibration Measurements. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 45(1), 75-87.
- Kahya, V., Karaca, S., & Vo, T. P., (2019). Shear-deformable finite element for free vibrations of laminated composite beams with arbitrary lay-up. *Steel and Composite Structures*, 33(4), 473-487.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F. Y., Altunışık, A. C., & Aslan, M., (2019). Free vibrations of laminated composite beams with multiple edge cracks: Numerical model and experimental validation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 159, 30-42.