

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAFES VE ÇERÇEVE TAŞIYICI SİSTEMLERDE TİTREŞİM VERİLERİ
KULLANILARAK OPTİMİZASYON TABANLI HASAR TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Leman Dilara SEPİL

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KAFES VE ÇERÇEVE TAŞIYICI SİSTEMLERDE TİTREŞİM VERİLERİ
KULLANILARAK OPTİMİZASYON TABANLI HASAR TESPİTİ**

Leman Dilara SEPİL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Korhan ÖZGAN

İkinci Danışman : Prof. Dr. Volkan KAHYA

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Kafes ve Çerçeve Taşıyıcı Sistemlerde Titreşim Verileri Kullanılarak Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti” isimli bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında hazırlanmıştır.

Akademik yolumun henüz başında kesişme fırsatı bulabildiğim ve bu fırsatla beraber şu anki oluşturduğum iş ahlakında büyük katkısı olan rahmetli hocam Prof. Dr. Selim PUL'a, tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, kıymetli bilgileri, tecrübesi ve bunu paylaşma üslubuyla yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Korhan ÖZGAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocam Sayın Volkan KAHYA'ya, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bana olan inançlarıyla ve sağladıkları güvenle maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem ve babama minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Leman Dilara SEPİL

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kafes ve Çerçeve Taşıyıcı Sistemlerde Titreşim Verileri Kullanılarak Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Korhan ÖZGAN’ın 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. 23/10/2024

Leman Dilara SEPİL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	6
1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Dinamik Özelliklerin Belirlenmesi	7
1.5. Titreşim Tabanlı Hasar Tespit Yöntemi	8
1.6. Optimizasyon Tekniğı İle Hasar Tespiti	11
1.7. İteratif İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi.....	16
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMALAR	18
2.1. Çelik Düzlem Kafes Sistem Örneğı	19
2.2. Çelik Uzay Kafes Sistem Örneğı	29
2.3. Üç Boyutlu Betonarme Çerçeve Sistem Örneğı	35
2.4. Önerilen Yöntemin Performans ve Başarı Analizi	42
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	45
4. KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KAFES VE ÇERÇEVE TAŞIYICI SİSTEMLERDE TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK OPTİMİZASYON TABANLI HASAR TESPİTİ

Leman Dilara SEPİL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Korhan ÖZGAN
2024, 50 Sayfa

Yapıların güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için yapı sağlığının düzenli olarak izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla, yapıların kullanım süresi boyunca maruz kaldıkları yükler ve çevresel etkiler altında olası hasarlara karşı belirli aralıklarla kontrolü gerekmektedir. Bu bağlamda, optimizasyon algoritmaları kullanılarak titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemleri, üzerinde araştırmaların devam ettiği yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemlerde titreşim verileri kullanılarak optimizasyon tabanlı bir hasar tespit yöntemi önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, yapılar SAP2000 yazılımında modellenerek elde edilen modal analiz sonuçları SAP 2000-OAPI özelliği sayesinde MATLAB ortamına aktarılmakta ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritması ile amaç fonksiyonu minimize edilerek göz önüne alınan yapının durumunun referans duruma benzetilmesine çalışılmaktadır. Analiz sonucunda hasarlı elemanlar ve hasar şiddetleri tespit edilmektedir. Yöntem, 47 elemanlı çelik düzlem kafes sistem, 36 elemanlı çelik uzay kafes sistem ve 24 elemanlı üç boyutlu betonarme çerçeve sistem örnekleri üzerinde gürültülü ve gürültüsüz ortam koşullarında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin hasar tespitinde yeterli doğruluk ve güvenilirlik sağladığını göstermektedir. Titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemlerinin yapıların güvenliğini sağlamada etkin bir araç olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim, Hasar tespiti, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO)

Master Thesis

SUMMARY

OPTIMIZATION-BASED DAMAGE DETECTION IN TRUSS AND FRAME STRUCTURES USING VIBRATION DATA

Leman Dilara SEPİL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Professor Korhan ÖZGAN
2024, 50 Pages

Structural health monitoring is of great importance to ensure that structures are safe, durable, and long-service life. Therefore, it is necessary to periodically inspect possible damages under the loads and environmental effects to which structures are exposed throughout their service life. In this context, although damage detection methods based on vibration characteristics using optimization algorithms have gained popularity, they are still among the innovative approaches being researched.

In this study, an optimization-based damage detection method using vibration characteristics for truss and frame structural systems is proposed. In the approach, the structures are modeled by SAP2000, and the modal analysis results are transferred to the MATLAB using the SAP-OAPI feature. Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) algorithm is used to minimize the objective function and match the calculated vibration characteristics of damaged structure with those of the reference (undamaged) structure. As a result of the analysis, the damaged members and the extent of the damages are determined. The method is tested on a 47-element steel planar truss, a 36-element steel space truss, and 24-element three-dimensional reinforced concrete frame system with and without noisy conditions. The obtained results indicate that the proposed method provides sufficient accuracy and reliability in damage detection. It has been evaluated that damage detection methods based on vibration data can be used as an effective tool in ensuring the safety of structures.

Key Words: Vibration, Damage Detection, Finite Element Method, Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Önerilen hasar tespit metodolojisinin akış şeması.....	19
Şekil 2. Çelik düzlem kafes sistem modeli.....	20
Şekil 3. Çelik düzlem kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri	22
Şekil 4. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde birinci senaryo için hasar şiddetleri.....	24
Şekil 5. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde ikinci senaryo için hasar şiddetleri	25
Şekil 6. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde üçüncü senaryo için hasar şiddetleri.....	25
Şekil 7. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde dördüncü senaryo için hasar şiddetleri	25
Şekil 8. Çelik düzlem kafes sistem örneği için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği	26
Şekil 9. Çelik uzay kafes sistem modeli	29
Şekil 10. Çelik uzay kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri.....	31
Şekil 11. Çelik uzay kafes sistem örneğinde birinci senaryo için hasar şiddetleri	33
Şekil 12. Çelik uzay kafes sistem örneğinde ikinci senaryo için hasar şiddetleri	33
Şekil 13. Çelik uzay kafes sistem örneğinde üçüncü senaryo için hasar şiddetleri.....	33
Şekil 14. Çelik uzay kafes sistem örneğinde dördüncü senaryo için hasar şiddetleri	34
Şekil 15. Çelik uzay kafes sistem örneği için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği.....	35
Şekil 16. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem modeli	36
Şekil 17. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri.....	37
Şekil 18. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde birinci senaryo için hasar şiddetleri.....	40
Şekil 19. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde ikinci senaryo için hasar şiddetleri	40
Şekil 20. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde üçüncü senaryo için hasar şiddetleri.....	41
Şekil 21. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği	42

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde dikkate alınan hasar senaryoları.....	21
Tablo 2. Çelik düzlem kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri	21
Tablo 3. Çelik düzlem kafes sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri.....	22
Tablo 4. Gürültünün hesaba katılması durumunda çelik düzlem kafes sistem için elde edilen hasar şiddetleri.....	23
Tablo 5. Gürültünün hesaba katılmaması durumunda elde edilen hasar şiddetlerinin farklı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılması	28
Tablo 6. Gürültünün hesaba katılması durumunda elde edilen hasar şiddetlerinin farklı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılması	28
Tablo 7. Çelik uzay kafes sistem örneğinde dikkate alınan hasar senaryoları	30
Tablo 8. Çelik uzay kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri	31
Tablo 9. Çelik uzay kafes sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri.....	32
Tablo 10. Gürültünün hesaba katıldığı durumunda çelik uzay kafes sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri.....	32
Tablo 11. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde dikkate alınan hasar senaryoları.....	36
Tablo 12. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri	38
Tablo 13. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri...	38
Tablo 14. Gürültünün hesaba katılması durumunda betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri	39
Tablo 15. Her bir örnek için hesaplanan RMSE, I_1 ve I_2 hata indisleri.....	43

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\{\ddot{x}(t)\}$	: İvme vektörü
Φ^d	: Hasarlı duruma ait mod şekil vektörü
Φ^u	: Hasarsız duruma ait mod şekil vektörü
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$[M]$	: Kütle matrisi
$\{X\}$	: Modal genlikler (mod şekilleri)
a_i	: Hasar şiddeti
$\{x(t)\}$	: Yer değiştirme vektörü
Δ	: Değişim oranı
E	: Elastisite modülü
f	: Doğal frekans
nm	: Titreşim modu sayısı
N_p	: Popülasyon sayısı
np	: Serbestlik derecesi (koordinat) sayısı
F	: Esneklik matrisi
$f(x)$	: Amaç fonksiyonu
ne	: Sonlu eleman modelindeki eleman sayısı
η	: Yüzde cinsinden gürültü seviyesi
ω	: Açısal frekans
COMAC	: Koordinat Modal Güvence Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion)
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
MAC	: Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion)
OAPI	: Açık Uygulama Programlama Arayüzü (Open Application Programming Interface)
RMSE	: Root Median Square Error
SHM	: Yapı Sağlığı İzlemesi
T	: Dönüşüm matrisi
TLBO	: Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization)
VBDD	: Titreşim Tabanlı Hasar Tespiti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde mühendislik yapılarında kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemler sıkça kullanılmaktadır. Yapıların güvenilirliği ve dayanıklılığı, hizmet ömürleri boyunca maruz kaldıkları doğal afetler, aşırı yüklemeler ve malzeme yorulması gibi etkenler nedeniyle olumsuz etkilenebilmektedir. Hasar tespiti, bu sistemlerin uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde hizmet verebilmesi için vazgeçilmez bir gerekliliktir. Mevcut hasarların önceden tespit edilerek gerekli onarım ve güçlendirmelerin yapılmasıyla yapının ömrü uzatılabilmektedir. Bu nedenle Yapı Sağlığı İzlemesi (SHM) yöntemlerinde hasar tespiti önemli rol oynamaktadır.

Geleneksel hasar tespit yöntemleri genellikle görsel inceleme ve elle yapılan ölçümler üzerine kurulu olup, bunlar zaman alıcı ve hataya açık süreçler içermektedir. Bu bağlamda, titreşim verileri kullanılarak optimizasyon tabanlı hasar tespiti, daha hızlı, güvenilir ve hassas sonuçlar sunması nedeniyle mühendislik yapılarının bakım ve onarım süreçlerinde yenilikçi gelişmeler vadetmektedir.

Titreşim tabanlı hasar tespit yöntemlerinin arkasındaki ana fikir, yapının dayanım özelliklerini yansıtan modal parametrelerin (doğal frekanslar, mod şekilleri vb.) hasar nedeniyle değişmesidir. Dolayısıyla, modal parametrelerdeki değişiklikler hasarın tespit edilmesi, lokalizasyonu ve şiddetinin belirlenmesi için kullanılabilir.

Matematiksel olarak hasar tespiti, çözümü için farklı yöntemlerin önerildiği, belirsiz, doğrusal olmayan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Optimizasyon yaklaşımı bu tür problemlerin çözümünde en kullanışlı yöntemlerden biridir. Bu yaklaşımda hasar tespit problemi, değişkenlerin yapı elemanlarındaki hasar şiddetleri olan bir optimizasyon problemine dönüştürülür. Hasar belirleme problemi, gerçek yapı ile sonlu eleman modeli arasındaki hatanın en aza indirilmesi gerektiren bir optimizasyon problemi olarak formüle edebilir.

Hasar tespiti konusunda analitik, sayısal ve deneysel yöntemlere dayanan bir dizi araştırma yapılmıştır. Analitik veya matematik modellere dayalı çalışmalarda, hasarın varlığı ve varsa hasar bölgesinin kesin tespiti için doğrudan çözümler kullanılmaktadır.

Sonlu eleman yöntemine (FEM) dayalı sayısal yaklaşımlarda ise farklı hasar durumlarına bağlı olarak dinamik özelliklerin değişimleri üzerinden hasar durumu ve büyüklüğü yaklaşık olarak değerlendirilebilmektedir. Deneysel yöntemler, yapılar üzerinde doğrudan uygulandıkları için mevcut davranışın belirlenmesinde en gerçekçi sonuçları sağlar. Hasarlı ve hasarsız durumlar için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik özellikler karşılaştırılır ve belirlenen frekans değerleri ile mod şekilleri analiz edilerek hasar durumları ve bölgeleri hakkında değerlendirmeler yapılabilir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Yapı Sağlık İzleme ve hasar tespiti alanında titreşim tabanlı yöntemler son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Literatürdeki çalışmaların genellikle yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak için çeşitli tekniklerin geliştirilmesine ve uygulanmasına odaklandığı görülmektedir. Titreşim verilerinin analizi yoluyla hasar tespiti hakkında literatürde yer alan deneysel ve sayısal bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Rao vd. (2004), yapısal elemanlarda hasarın yerini ve şiddetini belirlemek için artık kuvvetler (residual forces) kavramını kullanan bir yöntem önermişlerdir. Hasar parametreleri, deneysel verilerin özdeğer problemine dahil edilmesiyle elde edilen dinamik artık vektörlerden türetilen hatanın en aza indirilmesiyle belirlenmiştir. Bu amaçla, normalleştirilmiş artık fonksiyon ile bir özdeğer tahmin algoritması kullanılarak amaç fonksiyonu formüle edilmiştir. Bu amaç fonksiyonunun minimize edilmesinde Genetik Algoritma (GA) optimizasyonu kullanılmıştır. Yöntem, düzlem kafes kiriş, konsol Euler-Bernoulli kirişi ve portal kafes kiriş üzerinde değerlendirilmiştir.

Nejad vd. (2005), yapıda hasar nedeniyle statik davranışta oluşan değişimleri kullanarak hasarın yerini ve boyutunu belirlemeyi amaçlamışlardır. Yöntem, ölçülen ve tahmin edilen statik tepkiler arasındaki farklara dayanan bir amaç fonksiyonunun formüle edilmesi ve bu fonksiyonun optimizasyon teknikleri kullanılarak minimize edilmesi esasına dayanmaktadır. Yöntem çeşitli sayısal örneklerle test edilmiştir.

Huynh vd. (2005), uzay kafes kiriş ve plaklar üzerinde hasarın yerini ve boyutunu belirlemek için DLV (Damage Location Vector) yöntemini kullanmışlardır. Yöntem, yapıda meydana gelen hasarın, yapının dinamik davranışında değişikliklere yol açtığı ve bu değişikliklerin izlenmesiyle hasar yerinin tespit edilebileceği esasına dayanmaktadır.

Liu vd. (2006), ayrıştırılmış bir hasar tanımlama algoritması kullanarak hasarlı elemanların sayısını, yerini ve boyutunu belirlemişlerdir. Yöntemi düzlem kafes yapısı üzerinde denemişler ve ölçülen mod sayısının yeterli olduğu durumlarda hasarın doğru bir şekilde belirlenebileceğini göstermişlerdir.

Jaishi vd. (2006), sonlu eleman model güncellenmesi ile hasar tespiti için duyarlılık analizine dayanan bir yöntem sunmuşlardır. Yöntemde, doğal frekanslar ve mod şekli değişimlerinin kullanılmasıyla mevcut sonlu eleman modelinin hasar görmüş yapının dinamik özellikleri ile uyumlu hale getirilmesi hedeflenmiştir.

Xiang vd. (2008), dalgacık analizi ve GA'nın kombinasyonu ile bir şafttaki çatlak konumunu ve derinliğini tespit etmek için yeni bir yöntem önermişlerdir.

Yun vd. (2009), Yapı Sağlık İzleme için iki aşamalı bir hasar tespit yöntemi önermişlerdir. İlk aşamada alt küme seçimi yöntemi kullanılarak birden fazla hasar konumu belirlenmekte, ikinci aşamada ise GA uygulanarak hasarlı elemanların boyutu belirlenmektedir.

Begambre ve Laier (2009), yapısal hasar tespiti için parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve simpleks algoritmasından oluşan hibrit bir algoritma önermişlerdir. Bu iki algoritmanın avantajlarını kullanarak daha etkili ve hızlı bir çözüm sunmayı amaçlamışlardır. Geliştirdikleri algoritmayı çeşitli hasar senaryoları üzerinde test etmişlerdir.

Begambre vd. (2009), 10 çubuklu bir kafes kiriş ve iki ucu serbest bir kirişte ölçüm gürültüsünün etkisini dikkate alarak eksik modal veriler ile hasar tanımlama problemini ele almışlar, hasar yerini ve boyutunu başarıyla belirlemişlerdir.

Jiang vd. (2011) bulanık sinir ağları ve veri birleştirme tekniklerini kullanarak yapısal hasar tespiti için iki aşamalı yeni bir yöntem önermişlerdir. İlk aşamada, bulanık sinir ağları ile yapısal sistemin dinamik özelliklerine dayanarak potansiyel hasar bölgeleri belirlenmiş, ikinci aşamada ise farklı sensörlerden ve veri kaynaklarından elde edilen bilgileri birleştiren veri birleştirme teknikleri kullanılarak hasarın kesin yeri ve büyüklüğü tespit edilmiştir. Önerilen yöntem, çeşitli simülasyonlar ve deneylerle test edilmiştir. Sonuçlar, iki aşamalı yaklaşımın tek aşamalı yöntemlere göre daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığını göstermiştir.

Curyn vd. (2011) sayısal ve deneysel titreşim verilerini kullanan iki aşamalı hasar tespit yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır. Yöntemde ilk aşamada, yapısal sistemin sayısal modelleri oluşturularak titreşim özellikleri ve bu özelliklerdeki değişiklikler incelenmekte

ve ikinci aşamada ise deneysel olarak elde edilen titreşim verileri ile sayısal modeller karşılaştırılarak hasar yerleri ve büyüklükleri belirlenmektedir. Sonuçlar, iki aşamalı yaklaşımın hasarın yerini ve büyüklüğünü doğru bir şekilde belirleyebildiğini göstermektedir.

Nobahari ve Seyedpoor (2011), yapısal hasar tespitinde daha yüksek doğruluk ve verimlilik sağlamak için korelasyon tabanlı yeni bir hasar indeksini modifiye edilmiş GA ile kullanmışlardır.

Xiang ve Liang (2012), ince plakalarda çoklu hasar değerlendirmesi için iki aşamalı bir yöntem geliştirmiştir. İlk aşamada, mod şekilleri üzerinde iki boyutlu dalgalık dönüşümü uygulayarak hasar yerini tespit etmeye odaklanmışlardır. İkinci aşamada ise belirlenen lokasyonlardaki hasarın boyutlarını PSO algoritmasını kullanarak elde etmişlerdir.

Kang vd. (2012) titreşim verileriyle hasar tespiti için iyileştirilmiş bir PSO algoritması sunmuşlardır. Yazarlar, kiriş ve kafes yapılar üzerinde yöntemlerini sayısal olarak test etmişler ve iyileştirilmiş PSO'nun PSO, DE (Diferansiyel Evrim) ve RCGA (Gerçek Kodlu Genetik Algoritma) algoritmalarına göre daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Xiang vd. (2014), plak benzeri yapılardaki çatlak tespiti için yeni bir iki aşamalı yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, ilk aşamada titreşim verileri kullanılarak çatlakların yerini belirlemek için modal özellikler elde edilmiştir. İkinci aşamada ise belirlenen bu yerler daha hassas bir şekilde analiz edilerek çatlakların kesin konumları ve büyüklükleri tespit edilmiştir. Bu iki aşamalı yaklaşım, özellikle ince plak yapılardaki hasarları tespit etmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada önerilen yöntem hem sayısal hem de deneysel verilerle test edilmiş ve sonuçların oldukça güvenilir olduğu gösterilmiştir.

Kaveh ve Zolghadr (2015), doğal frekans ve mod şekli değişimlerini kullanarak düzlem ve uzay kafeslerde yapısal hasar tespiti problemini bir optimizasyon problemi olarak formüle etmişlerdir. Problemi çözmek için iyileştirilmiş Yüklü Sistem Arama Algoritması (Charged System Search, CSS) geliştirmişlerdir. Yazarlar geliştirdikleri yöntemi, 10 çubuklu düzlem kafes ve 72 çubuklu uzay kafes örneği üzerinde test etmişlerdir.

Cha ve Büyüköztürk (2015), üç boyutlu çeşitli çelik yapılarda hasarları tespit için modal şekil değiştirme enerjisine dayalı çok amaçlı hibrit optimizasyon algoritmaları

kullanan yeni bir yaklaşımı önermişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi çeşitli geometriye sahip simetrik ve asimetrik çelik yapılar üzerinde kullanmışlardır.

Ghasemi vd. (2018), bir yapıda belirli bir mod şekli altında biriken enerjiyi ifade eden modal şekil değiştirme enerjisi kavramını kullanarak iki aşamalı bir hasar tespit yöntemi önermişlerdir. İlk aşamada, olası hasar görmüş elemanlar modal şekil değiştirme enerjisi kavramı kullanılarak belirlenmekte ve ikinci aşamada yapısal hasar tespit problemi, modifiye edilmiş GA ile çözülmesi gereken bir optimizasyon problemine dönüştürülmektedir. Önerilen yöntemin etkinliği birkaç örnek üzerinde değerlendirilmiştir.

Tiachacht vd. (2018), üç boyutlu çerçeve yapılarda hasar tespiti için sonlu eleman modal analizi ve GA kombinasyonunu kullanan bir yöntem sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, yapının modal verilerindeki değişiklikler, hasarın yerini ve şiddetini belirlemek için GA kullanılarak işlenmekte, ardından amaç fonksiyonu minimize edilerek en uygun çözüm bulunmaktadır.

Kim vd. (2019), kafes yapılarda çoklu hasar konumları ve boyutlarının doğru tespiti için Diferansiyel Evrim (DE) Algoritması ve titreşim verilerini kullanan etkili bir hasar tespit tekniği önermişlerdir.

Ding vd. (2019), yapısal hasar tespiti için Modifiye Edilmiş Ağaç Tohumları Algoritmasını (Tree Seeds Algorithm) kullanmışlardır. Sayısal modeller üzerinde önerilen yaklaşımın doğruluğunu göstermişlerdir.

Ho vd. (2021), Deniz Yırtıcıları Algoritmasını (Marine Predators Algorithm, MPA) kullanarak hasar tespiti için etkili bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımda, ileri beslemeli sinir ağlarının öğrenme yeteneğini geliştirmek amacıyla optimal yiyecek arama stratejisi ve metafor hafızası kullanılmaktadır. Önerilen algoritmanın sınıflandırma yeteneği, bilinen bazı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir.

Le Minh vd. (2021), sağlıklı yapının rijitliğindeki değişimi ve her hasar durumunu temsil eden ek değişkenlere dayalı olarak MAC ve MDLAC ile ilişkili yeni bir amaç fonksiyonu tanımlamışlardır. Bu amaç fonksiyonu, yapısal hasar tespit problemini çözmek için PSO algoritmasının geliştirilmiş hali olan EHVPPO (Ensemble Hybrid Velocity and Position-based Swarm Optimization) adlı akıllı bir algoritma ile birleştirilmiştir.

Abdolkhani ve Raoufi (2023), yapılarda lokal hasar tespiti için frekans alanında modal özellikleri otomatik tanımlayan bir prosedür sunmuşlardır. Çalışmada önerilen yöntemin, %5 gürültü ile dahi GA kullanılarak hasarlı yapının modal özelliklerini ve rijitlik azaltma faktörünü hassas bir şekilde tanımlayabildiği gösterilmiştir.

Barros vd. (2023), çelik makaslı köprülerde hasar tespiti için titreşim tabanlı izleme verilerini ve Model Tabanlı Karar Ağacı (Model-Based Decision Tree Algorithm, MBDTA) algoritmasını kullanan bir metodoloji geliştirmiştir. Bu algoritma, gerçek mod özelliklerine dayalı olarak yapıdaki potansiyel hasarları tespit eden ve konumlandıran uygun maliyetli rutin köprü denetim aracı olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Dang vd. (2023), zaman serisi ivme verileri kullanarak kafes kirişler için iki aşamalı hasar tespiti paradigmasına dayanan yeni bir model indirgeme yaklaşımı ve yapısal hasarın tespitinde zaman serisi ivme verilerine dayalı bir yöntem sunmaktadır. Bu çalışma, model indirgeme yoluyla hesaplama verimliliğini artırırken, hasar tespiti doğruluğunu korumayı amaçlamaktadır. Özellikle dinamik yüklemelere maruz kalan köprüler ve kuleler gibi yapılar için önem arz eden bu yöntem, yapısal güvenliği sağlamada etkili bir çözüm sunmaktadır.

Vanova vd. (2023), hasarlı bir köprünün rastgele uyarım altındaki dinamik tepkilerini değerlendirmek için zaman alanı simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. İvme istatistiklerinin analizi ile hasarlı elemanların sağlam olanlara göre ivmede daha belirgin bir artış sergilediği ve mesnetlere yakın konumlardaki hasarlı elemanlarda bu değişimin daha fazla olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma, köprü dinamiklerinin temel olarak anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve hasar tespit yöntemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Ding vd. (2023), bütünleşmiş Q-Öğrenme Tabanlı Evrimsel Algoritmayı kullanan bir teknik geliştirmişlerdir. Bu teknik, ilk kez FRP ile güçlendirilmiş yapılarda lif kopması hasarını tespit için uygulanmıştır. Çalışmada, amaç fonksiyonunu en iyi şekilde çözmek için Q-Öğrenme Evrimsel Algoritması önerilmiştir. Geliştirilen teknik, FRP ile güçlendirilmiş konsol çelik kirişe uygulanmıştır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapı Sağlık İzleme, yapıların ömürleri boyunca performanslarını değerlendirme ve potansiyel hasarları belirleme amacıyla yapılan sürekli bir gözlem ve analiz sürecidir. Bu alandaki taleplerin artmasıyla birlikte hasar tespit yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar giderek artmıştır. Yapılan çalışmaların bir kısmı modal verilerdeki değişiklikleri inceleyen yöntemlere odaklanmıştır. Kütle, sönüm ve rijitlik gibi modal parametrelerin yapının fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu temel fikri üzerine kurulan bu yöntemler, fiziksel özelliklerdeki değişikliklerin modal parametrelerde değişime yol açacağını

öngörmektedir. Bu yaklaşım, çeşitli mühendislik yapılarında kesit ve/veya eleman üzerindeki hasarları tespit etmeyi mümkün kılmaktadır.

Titreşim verileri kullanılarak optimizasyon tabanlı hasar tespiti problemlerinde genellikle belirli sistemlere özgü olarak hazırlanan kodlar kullanılmaktadır. İncelenen yapı türünün değişmesi durumunda yazılımın da değiştirilmesi zorunluğu ortaya çıkmaktadır. Farklı yapılar ve sistemler için uyarlanabilir bir kod yazmak önemli derecede uzmanlık gerektirir. Bu nedenle, yapısal modelleme ve sayısal çözümlemede ticari bir yazılım kullanmak büyük kolaylık sağlar. Bu çalışmada, SAP2000'in OAPI özelliği kullanılarak modeli oluşturulan bir yapı sisteminde MATLAB'da geliştirilen TLBO algoritması ile potansiyel hasarların tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan yaklaşımda yapı sistemi SAP2000 ticari yazılımı kullanılarak modellenmiş ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SAP2000-OAPI fonksiyonları kullanılarak MATLAB ortamına aktarılmıştır. MATLAB'da kodlanan TLBO algoritması ile amaç fonksiyonunun minimize edilmesi sağlanmıştır. SAP2000 ve MATLAB arasındaki çift yönlü veri transferi sayesinde istenilen hassasiyet sağlanana kadar devam eden bir süreç ile yapısal hasarların tespit edilmesi hedeflenmiştir. Önerilen yöntem, düzlem çelik kafes sistem, uzay çelik kafes sistem ve üç boyutlu betonarme çerçeve sistem üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tablolar ve şekiller ile sunulmuştur.

1.4. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Dinamik Özelliklerin Belirlenmesi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık yapıların davranışlarının analizi için mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, yapıların dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla sistemin daha küçük elemanlara bölünmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede, büyük ve karmaşık yapılar sonlu sayıda elemanlara bölünerek matematiksel olarak daha basit ve çözülebilir hale getirilmektedir. Oluşturulan model ne kadar fazla sayıda sonlu parçaya bölünürse yapının gerçek davranışı o kadar iyi temsil edilmiş olmaktadır. Ancak, modelin çok sayıda parçalara bölünmesi işlem hacmini arttırmaktadır. Ayrıca, belirli bir sayıdan sonra sonuçlarda herhangi bir farklılık oluşmayabilir. Bu nedenle, oluşturulan modelin sonlu eleman sayısının yapıyı en iyi şekilde temsil edecek ve optimum seviyede olacak şekilde dikkatlice seçilmesi gerekmektedir.

FEM ile dinamik özelliklerin elde edilmesi sürecinde ilk olarak yapının geometrisi ve malzeme özellikleri modellenir. Ardından model sonlu elemanlara bölünür ve her elemanın kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri belirlenir. Daha sonra bu elemanlar arasındaki ilişkiler ve sınır koşulları tanımlanır. Son olarak, modal analiz ile yapının titreşim modları ve doğal frekansları hesaplanır. Elde edilen bu veriler, yapıların dinamik performansını değerlendirmede kullanılır.

Sönümümüz serbest titreşim yapan bir yapı için hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1)$$

burada, $[M]$ kütle matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörünü ve $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörünü göstermektedir.

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (2)$$

şeklinde kabul edilsin. Burada ω açısal frekansları ve $\{X\}$ bunlara karşılık gelen modal genlikleri (mod şekilleri) göstermektedir. (2) ifadesi (1)'de yerine yazılırsa,

$$([K] - \omega^2[M])\{X\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (3)$$

elde edilir. Bu ifadenin sıfırdan farklı çözümlerinin olabilmesi için

$$\det|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (4)$$

olmalıdır. (4) ifadesi titreşimin karakteristik denklemini verir. Bunun çözümünden sistemin serbestlik derecesi kadar açısal frekans (ω) elde edilir. Bu değerlerin tekrar (3) ifadesinde yazılmasıyla her bir frekansa karşılık gelen mod şekilleri vektörü $\{X\}$ elde edilir.

1.5. Titreşim Tabanlı Hasar Tespit Yöntemi

Titreşim tabanlı hasar tespiti (VBDD), mühendislik yapılarının sağlığını değerlendirmek ve hasar tespiti yapmak amacıyla yaygın olarak kullanılan gelişmiş bir

Yapı Sağlık İzleme yöntemidir. VBDD yöntemlerinin temel prensibi, bir yapının doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik özelliklerinin yapının durumuyla doğrudan ilişkilendirilmesidir. Hasar, yapının belirtilen özelliklerinde birtakım değişikliklere yol açmaktadır. Bu değişikliklerin incelenmesiyle hasarın varlığı, konumu ve şiddeti belirlenmeye çalışılmaktadır.

Titreşime dayalı hasar tespit yöntemleri aşağıda belirtilen başlıca gruplara ayrılmaktadır (Doebbling vd., 1998):

- Frekans değişimine dayalı hasar tespiti
- Mod şekillerinin değişimine dayalı hasar tespiti
- Esneklik değişimine dayalı hasar tespiti
- Model güncellemeye dayalı hasar tespiti

Frekans değişimine dayalı hasar tespit yönteminde, bir yapının hasar durumunu belirlemek için frekanslardaki değişimler incelenmektedir. Bir yapının doğal frekansları, yapının kütle ve rijitlik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Yapıda meydana gelen bir hasar, rijitlikte azalmaya neden olur ve bu da doğal frekansların azalmasına yol açar. Dolayısı ile doğal frekanslardaki bu tür değişiklikler, hasarın varlığının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Hasar durumu, iki farklı ölçümden elde edilen frekans değerlerinin Denklem (5)'te yerine yazılması ile değerlendirilmektedir.

$$\Delta = \left| \frac{f_d - f_u}{f_d} \right| \quad (5)$$

Burada f_d hasarlı duruma ait frekans değerlerini, f_u hasarsız duruma ait frekans değerlerini ve Δ ise değişim oranını göstermektedir. Elde edilen değişim oranları değerlendirilerek yapılarda veya taşıyıcı sistem elemanlarında hasarın var olup olmadığı belirlenebilmektedir. Fakat, doğal frekanslar sıcaklık veya çevre koşullarının değişmesinden etkilenebileceğinden hasarın konumu ile ilgili sağlıklı bir bilgi verme konusunda yetersiz kalabilmektedirler.

Mod şekilleri, yapının herhangi bir frekanstaki modal yer değiştirme davranışını gösteren birimsiz modal genliklerden oluşan bir bütün olarak tanımlanmaktadır. Yapının titreşim şeklini ve genliğini göstermektedirler. Yapıda oluşan hasar, mod şekillerinde lokal değişikliklere neden olmaktadır. Mod şekillerinin incelenmesiyle hasarın yeri ve şiddeti hakkında bilgi elde edilmektedir. Analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen modal yer

değiştirme değerlerinin karşılaştırılması amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan ve Allemang ve Brown (1982) tarafından geliştirilen Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC), iki kaynaktan ele edilmiş mod şekil vektörleri arasındaki korelasyonu değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. MAC, aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Allemang, 2003; Heylen vd. 2007):

$$\text{MAC}(\Phi^d, \Phi^u) = \frac{|(\Phi^d)^T \Phi^u|}{(\Phi^d)^T \Phi^d (\Phi^u)^T \Phi^u} \quad (6)$$

Φ^d ve Φ^u , iki farklı duruma ait mod şekil vektörlerini ifade etmektedir. T üst indisi, vektörün transpozisinin alınacağını belirtir. MAC matrisinin değerleri 0 ile 1 arasında değişir. Bu değer ne kadar 1'e yakınsa mod şekilleri arasındaki benzerlik o kadar yüksektir. MAC, farklı durumlardaki mod şekil vektörlerinin genel benzerliğini ortaya koyar.

Yapı üzerindeki farklı noktalardan çeşitli yöntemlerle elde edilen modal yer değiştirmeler arasındaki korelasyonu analiz etmek amacıyla Koordinat Modal Güvence Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion, COMAC) kullanılmakta olup bu kriter aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Allemang, 2003):

$$\text{COMAC}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{np} |(\phi_{ij}^d)^T \phi_{ij}^u|^2}{\sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^d)^2 \sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^u)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, nm) \quad (7)$$

Burada ϕ_{ij}^d , d durumuna ait j . deneysel mod şekil vektörünün i . serbestlik derecesine ait modal yer değiştirme değerini, ϕ_{ij}^u , u durumuna ait j . analitik mod şekil vektörünün i . serbestlik derecesine ait modal yer değiştirme değerini göstermektedir. nm dikkate alınan mod sayısını, np ise mod şekillerinin elde edildiği koordinat sayısını ifade etmektedir. Hesaplanan COMAC değerinin 1'e yakın olması ilgili düğüm noktasındaki modal yer değiştirmelerin birbirlerine yakın olduğunu gösterir. COMAC değeri ne kadar küçük olursa o düğüm noktasında veya çevresinde hasar olabileceği anlamına gelmektedir.

Esneklik, rijitliğin tersi olarak tanımlanmaktadır. Yapıda hasar varsa esnekliğinde artış meydana gelecektir. Dolayısıyla esneklik yapısal hasarların tespitinde elverişli bir gösterge olarak değerlendirilmektedir. Esneklik matrisi

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^{nm} \frac{1}{\omega_i^2} \Phi_i \Phi_i^T \quad (8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Pandey ve Biswas, 1994). Burada, nm mod sayısını, ω_i , i . doğal frekansı, Φ_i ise i . mod şekil vektörünü göstermektedir. Hasarlı ve hasarsız durumlar için hesaplanan esneklik matrislerinin farklarının alınmasıyla,

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F}^d - \mathbf{F}^u \quad (9)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada $\mathbf{F}^d$ hasarlı durum için elde edilen esneklik matrisini $\mathbf{F}^u$ hasarsız durum için hesaplanan esneklik matrisini ve $\Delta \mathbf{F}$ ise esneklik matris değişimini göstermektedir. $\Delta \mathbf{F}$ matrisinin j . sütunlarının mutlak değerlerinin en büyüğü alınırsa

$$\bar{\delta}_j = \max |\Delta \mathbf{F}_{ij}|, i = 1 \dots m \quad (10)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada $\bar{\delta}_j$, $\Delta \mathbf{F}$ matrisinin j . sütundaki düğüm noktası değerlerinin mutlak maksimum değerini, $\Delta \mathbf{F}_{ij}$, $\Delta \mathbf{F}$ 'in i . satır j . sütun değerini ve m ise düğüm noktası sayısını göstermektedir. $\bar{\delta}_j$ 'nin büyük olduğu noktalarda bir hasar durumunun olabileceği değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

Titreşime dayalı hasar tespiti için kullanılan bir diğer yöntem, deneysel ölçümlerden elde edilen dinamik özelliklerin kullanılmasıyla yapılan model güncellemedir. Bu yöntemde, sonlu eleman modeli üzerinde yapısal parametrelerin (örneğin elastisite modülü, birim hacim ağırlığı, rijitlik, sınır koşulları vb.) değiştirilmesi esas alınmaktadır. Model güncellemenin amacı, dinamik özellikleri etkileyebilecek tüm belirsiz parametreleri dikkate alarak sonlu eleman analizi sonuçlarını deneysel dinamik özelliklere mümkün olduğunca yaklaştırmaktır. Bu sayede, hasar tespiti için gerekli korelasyon sağlanmaktadır.

1.6. Optimizasyon Tekniği İle Hasar Tespiti

Optimizasyon, belirli bir hedef doğrultusunda kullanılan değişkenlerin en uygun değerlerinin belirleme süreci olarak tanımlanmaktadır. Matematiksel modeller ve algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde genellikle maliyeti

azaltmak, verimliliği arttırmak, performansı iyileştirmek veya belirli kısıtlamalar altında en iyi çözümü bulmak amaçlanmaktadır. Optimizasyon, mühendislik problemlerinde yapısal tasarım, malzeme seçimleri, inşa süreçleri, bakım ve onarım gibi alanlarda sıkça kullanılır hale gelmiştir. Yapı tasarımında optimizasyon teknikleri ile taşıyıcı sistemlerin en uygun şekilde boyutlandırılması ve malzeme kullanımının azaltılarak maliyetin düşürülmesi sağlanmaktadır. Malzeme seçiminde yapısal dayanıklılığı artırmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için en uygun malzeme kombinasyonun belirlenmesi yine optimizasyon teknikleri ile kolayca yapılabilmekte; yapının ekonomik ve çevre dostu olacak şekilde inşa edilmesi sağlanmaktadır. Yapım yöntemleri ve süreç planlamasında da optimizasyon teknikleri sıkça kullanılmaktadır. İnşaat projelerinin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanması için iş gücü, ekipman ve malzeme gibi kaynakların en verimli şekilde kullanılması sağlanabilmektedir.

Son yıllarda optimizasyon yöntemi mühendislik yapılarının bakım ve onarım süreçlerinde sıkça kullanılır hale gelmiştir. Bu teknikler özellikle yapılardaki hasarların tespiti ve onarım yöntemlerinin belirlenmesinde etkili ve ekonomik çözümler sunmaktadır. Optimizasyon tabanlı hasar tespiti olarak adlandırılan yöntemler ile yapıların davranışları analiz edilerek, herhangi bir hasarın varlığı ve konumu tespit edilebilmektedir. Böylece, mühendislik yapılarının uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde hizmet vermesi sağlanmaktadır.

Mühendislik problemlerinde kullanılan çok çeşitli optimizasyon yöntemlerine rastlanmaktadır. TLBO algoritması, modern optimizasyon yöntemlerinden biridir. TLBO, doğal öğretim-öğrenme sürecini taklit eden bir meta-sezgisel algoritmadır ve özellikle karmaşık optimizasyon problemlerinde etkili sonuçlar vermektedir. Algoritma, öğrenci topluluğunun bir öğretmenden ve birbirlerinden öğrendiği iki aşamalı bir süreci esas almaktadır. İlk aşamada öğrenciler, öğretmenlerinden öğrenirler ve bu süreç popülasyonun genel bilgi seviyesini artırmayı hedefler. İkinci aşamada ise öğrenciler, birbirlerinden öğrendikleri bilgileri paylaşarak bireysel bilgi seviyelerini artırır. TLBO, parametre ayarlarına gerek duymaması ve basit yapısı nedeniyle diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla avantajlıdır. Ayrıca, hızlı bir şekilde yakınsama sağlayarak mühendislik problemlerinde etkili çözümler sunmaktadır. Bu nedenle TLBO, mühendislikte karmaşık problemlerin çözümünde yaygın olarak tercih edilen bir optimizasyon algoritmasıdır.

Bu çalışmada, hasar tespiti için optimizasyon probleminin çözümünde TLBO algoritması tercih edilmiştir. Birçok optimizasyon algoritmasının aksine, karmaşık

parametre ayarları gerektirmemesi, global optimuma yaklaşma konusunda oldukça etkili olması ve hızlı yakınsaması önemli avantajlarındandır. Öğretme ve öğrenme süreci algoritmanın iki önemli aşamasıdır. Öğretme süreci algoritmanın ilk aşamasıdır. Bu aşamada öğrencilere ders verecek ve sınıfın ortalamasını yükseltecek bir öğretmen çözüm uzayından seçilir. n sayıda konu ile k . yinelemede i . öğrencinin konumu aşağıdaki şekilde temsil edilebilir.

$$\theta_{i,k} = (Q_{i_1,k}, Q_{i_2,k} \dots \dots \dots Q_{i_n,k}) \quad (11)$$

Belirli bir j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) konusundaki P sayıda öğrenciye (nüfusa) sahip sınıfın k . Yinelemedeki (iterasyon) ortalama sonucu aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\theta_{j,k}^{mean} = \left(\frac{1}{P}\right) \left[\sum_{i=1}^P Q_{i1} \sum_{i=1}^P Q_{i2} \dots \dots \dots \sum_{i=1}^P Q_{in} \right] \quad (12)$$

Popülasyon arasında en iyi uygunluğa sahip öğrenci, k . yineleme için öğretmen ($\theta_{i_{best},k}^{teacher}$) olarak seçilir. Her öğrencinin konumu (13) ve (14) numaralı denklemlere göre güncellenir.

$$\theta_{j,i,k}^{new} = \theta_{j,i,k}^{old} + rand(\theta_{i_{best},k}^{teacher} - T_F \theta_{j,k}^{mean}) \quad i = (1, 2, \dots, P), j = (1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

$$T_F = round[1 + rand(0,1)] \quad (14)$$

Burada T_F öğretme faktörüne her yineleme için 1 veya 2 değeri atanır. 'rand', 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. Yeni konum $\theta_{j,i,k}^{new}$, eski konum olan $\theta_{j,i,k}^{old}$ dan daha küçük amaç fonksiyonu değerleri veriyorsa, bu konumdaki birey eskisiyle değiştirilecek ve öğrenme aşamasına girdi haline gelecektir.

TLBO algoritmasının öğrenme aşamasında öğrenciler kendi aralarında rastgele etkileşime girerek bilgilerini geliştirebilirler. Belirli bir öğrenci $Q_{j,m,k}$ ve başka bir öğrenci $Q_{j,n,k}$ öğrenen popülasyonundan ($m \neq n$) rastgele seçilir. Öğrenme aşamasının prosedürü şu şekilde formüle edilmiştir:

$$\Theta_{j,m,k}^{new} = \Theta_{j,m,k} + rand(\Theta_{j,m,k} - \Theta_{j,n,k}) \text{ if } f(\Theta_{j,m,k}) < f(\Theta_{j,n,k}) \quad (15)$$

$$\Theta_{j,m,k}^{new} = \Theta_{j,m,k} + rand(\Theta_{j,n,k} - \Theta_{j,m,k}) \text{ if } f(\Theta_{j,n,k}) < f(\Theta_{j,m,k}) \quad (16)$$

eğer m . öğrencinin yeni konumu $\Theta_{j,m,k}^{new}$ eskisinden $(\Theta_{j,m,k})$ daha iyiye bu muhafaza edilerek, diğeri atılır.

Hasar tespiti problemi bir optimizasyon problemi olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} &\text{Bilinmeyen değişkenler } \mathbf{x} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{ne}\} \\ &\text{Amaç fonksiyonu } f(\mathbf{x}) \\ &\text{Sınırlayıcılar } 0 \leq \alpha_i \leq 1 \text{ (} i = 1, 2, \dots, ne \text{)} \end{aligned} \quad (17)$$

$f(\mathbf{x})$ minimize edilecek amaç fonksiyonunu ve $\mathbf{x}$ tasarım değişkeni vektörünü göstermektedir. Bu çalışmada, titreşim parametrelerine (frekanslar, mod şekilleri ve modal esneklik) bağlı olarak aşağıdaki amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) = & w_1 \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{f_i^E - f_i^C}{f_i^E} \right)^2} + w_2 \sum_{i=1}^{nm} [1 - \text{COMAC}(i)]^2 \\ & + w_3 \frac{\|\mathbf{F}^E - \mathbf{F}^C(\mathbf{x})\|_{Fro}}{\|\mathbf{F}^C\|_{Fro}} \end{aligned} \quad (18)$$

Burada f_i i. frekansı, $\text{COMAC}(i)$ Koordinat Modal Güvence Kriterini, $\mathbf{F}$ esneklik matrisini $\|\cdot\|_{Fro}$ ise bir matrisin Frobenius normunu, nm dikkate alınan modların sayısını, E ve C indisleri ise hedef ve tahmin değerlerini göstermektedir. Ağırlık katsayıları, Denklem (18) ile verilen amaç fonksiyonundaki her bir terimin göreceli önemini yansıtmakta olup, deneme-yanılma ve mühendislik kararına dayalı olarak belirlenir. Bu çalışmada $w_1 = w_2 = w_3 = 1$ olduğu varsayılmaktadır (Kahya vd. 2022; Şimşek, 2024).

Hasar, yapının herhangi bir elemanına değeri 0 ila 1 arasında bir rijitlik kaybı parametresi (veya hasar şiddeti) α_e atanarak modellenenir. Bunun için i . hasarlı elemanda elastisite modülü şu şekilde kabul edilir:

$$E_i^d = (1 - \alpha_i)E_i^u \quad (0 \leq \alpha_i \leq 1) \quad (i = 1, 2 \dots ne) \quad (19)$$

burada, üst simgeler d ve u sırasıyla hasarlı ve hasarsız durumları belirtmekte olup ne sonlu eleman modelindeki eleman sayısıdır. Hasarın sadece rijitliği değiştirdiği, yapı kütlelerinin değişmediği kabul edilmektedir. α_i parametresi, tamamen hasarlı bir elemanı, tamamen sağlam bir elemanı ve ikisi arasındaki durumu temsil etmektedir. Her bir elemanın hasar durumu dikkate alınarak ilgili rijitlik matrislerinin güncellenmesi mümkündür. Bu güncellenmiş rijitlik matrisleri daha sonra yapının genel rijitlik matrisini oluşturmak için birleştirilir.

Gürültü, gerçek hayattaki durumları yansıtan çeşitli faktörlerden dolayı deneysel modal testlerde kaçınılmaz bir bileşendir. Bu nedenle gürültülü verileri kullanarak, önerilen yaklaşımın etkinliğini değerlendirmek çok önemlidir. Gerçek senaryoları simüle etmek için sonlu eleman modelinden sayısal analiz yoluyla elde edilen frekanslar ve mod şekillerine kasıtlı olarak gürültü eklenmiştir. Gürültünün frekanslara ve mod şekillerine eklenmesi sırasıyla aşağıdaki ifadelerle gerçekleştirilir.

$$f_i^{noise} = \left(1 + \frac{\eta}{100} \times randn\right) f_i \phi_{ij}^{noise} \quad (20)$$

$$\left(1 + \frac{\eta}{100} \times randn\right) \phi_{ij} \quad (21)$$

Burada, f_i , i . frekansı, ϕ_{ij} , i . mod şekil vektörünün j . bileşenini, η yüzde cinsinden gürültü seviyesini, $randn$ standart normal dağılımdan alınan rastgele bir sayıyı göstermektedir. Frekanslar ölçüm gürültüsünden daha az etkilendiğinden mod şekillerine kıyasla daha doğru ölçülebilmektedir. Bu nedenle çalışmada, aksi belirtilmediği sürece, frekanslar ve mod şekilleri için sırasıyla $\pm\% 0,15$ ve $\pm\%3$ 'lük bir standart hata dikkate alınmıştır (Dinh-Cong vd., 2017).

1.7. İteratif İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi

Model indirgeme, büyük ve karmaşık sistemleri daha küçük, basit ve anlaşılır parçalara bölmeyi amaçlar. Böylece karmaşık veri kümeleri ve büyük ölçekli modellerin yönetilebilir ve analiz edilebilir hale getirilmesi sağlanır. Model indirgemeyle karmaşık modellerin veya veri kümelerinin boyutu ve karmaşıklığı azaltılarak, analiz ve hesaplama süreçleri daha verimli hale getirilir. Bu işlemde gereksiz veya az bilgi içeren veriler veya model bileşenler çıkarılarak önemli ve anlamlı bilgiler korunur.

Model esaslı tekniklerin pratik zorluklarından biri ölçüm bilgilerini toplamak için kullanılan sensörlerin sınırlı sayıda olmasıdır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için model indirgeme tekniklerinin kullanılması önerilmiştir (Qu, 2004; Li, 2017). Bunun için en basit yöntem (Guyan, 1965) tarafından önerilmiştir. Bu yöntem atalet etkilerini göz ardı eder. Guyan yönteminde (veya statik indirgeme) tüm sisteme ait koordinatlar ile göz önüne alınacak aktif koordinatlar arasındaki statik dönüşüm şu şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}_G \mathbf{x}_m \quad (22)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{x}_s \end{Bmatrix}, \mathbf{T}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

olup, indirgenmiş kütle ve rijitlik matrisleri şu şekilde temsil edilir.

$$\mathbf{M}_R = \mathbf{T}_G^T \mathbf{M} \mathbf{T}_G, \mathbf{K}_R = \mathbf{T}_G^T \mathbf{K} \mathbf{T}_G \quad (24)$$

Bu ifadelerde, $\mathbf{x}$ durum vektörü, $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ ve $\mathbf{T}_G$ ise sırasıyla kütle, rijitlik ve geometrik dönüşüm matrisleri, m ve s alt simgeleri sırasıyla aktif ve pasif serbestlik derecelerini göstermektedir.

O'Callahan (1989), statik indirgeme yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için atalet terimlerini sözde-statik kuvvetler olarak tanıtmış ve İyileştirilmiş İndirgenmiş Sistem (IRS) yöntemini geliştirmiştir. IRS yönteminde koordinat dönüşüm matrisi şu şekilde yazılabilir:

$$\mathbf{T}_{IRS} = \mathbf{T}_G + \mathbf{S} \mathbf{M} \mathbf{T}_G \mathbf{M}_R^{-1} \mathbf{K}_R \quad (25)$$

burada,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{SS}^{-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

ve indirgenmiş kütle ve rijitlik matrisleri şu şekilde temsil edilir;

$$\mathbf{M}_{IRS} = \mathbf{T}_{IRS}^T \mathbf{M} \mathbf{T}_{IRS}, \mathbf{K}_{IRS} = \mathbf{T}_{IRS}^T \mathbf{K} \mathbf{T}_{IRS} \quad (27)$$

Friswell vd. (1995), iteratif iyileştirilmiş indirgeme sistemi (IIRS) adı verilen bir süreç aracılığıyla IRS'nin kesinliğini arttırmıştır. IIRS yönteminde her bir iterasyonda kullanılacak dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi yazılır:

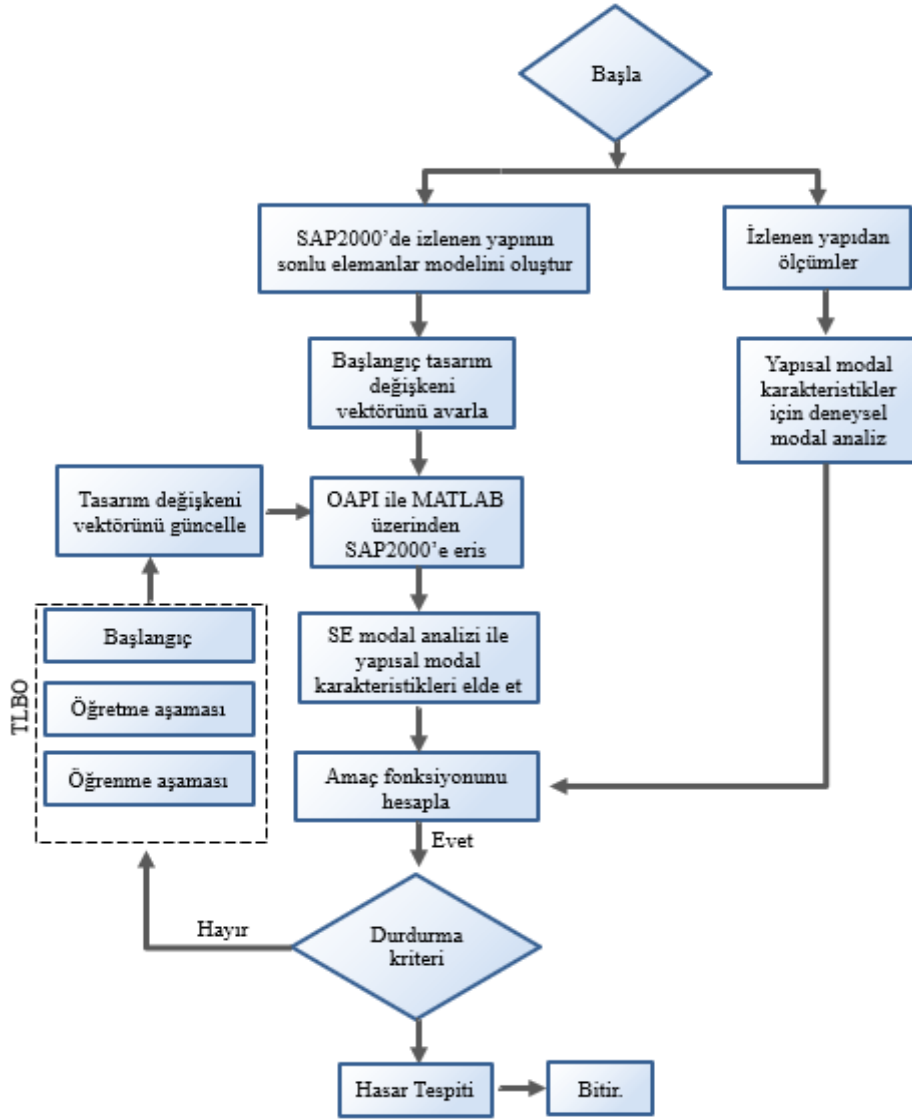
$$\mathbf{T}_{IRS,i+1} = \mathbf{T}_G + \mathbf{S} \mathbf{M} \mathbf{T}_{IRS,i} \mathbf{M}_{IRS,i}^{-1} \quad i = 2, 3, \dots \quad (28)$$

Bu iteratif süreç, hesaplama hacmini azaltırken orijinal sistemin dinamik davranışını yakalayan bir indirgenmiş model elde edilmesini sağlar.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışmasında kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemlerde hasarın konumu ve şiddetinin tespiti için titreşim verilerini kullanarak optimizasyon tabanlı bir yöntemin önerilmesi amaçlanmaktadır. Kullanılan hasar tespit metodolojisinin akış şeması Şekil 1'de verilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi incelenen yapının sonlu eleman modeli, SAP2000 yazılımında oluşturulmuştur. İlk olarak MATLAB programında yazılmış kod ile elemanların elastisite modüllerinden oluşan başlangıç tasarım değişkenleri tanımlanmaktadır. Daha sonra OAPI fonksiyonları ile SAP2000 modeline erişilmekte ve modal analiz yapılarak yapının frekans ve mod şekilleri elde edilmektedir. Bu veriler OAPI fonksiyonu yardımı ile MATLAB ortamına aktarılmakta ve referans olarak kullanılacak titreşim verileriyle birlikte optimizasyon süreci başlamaktadır. MATLAB yazılımında kodlanan TLBO algoritması kullanılarak tasarım değişkenleri güncellenmekte ve yeniden SAP2000 modeline aktarılarak modal analiz tekrarlanmaktadır. Bu şekilde devam eden ardışık çözüm amaç fonksiyonu $f(x)$ belirlenen tolerans değerine yakınsayıncaya kadar devam etmekte; durdurma kriteri sağlandığında her bir eleman için hasar şiddetleri belirlenmiş olmaktadır.

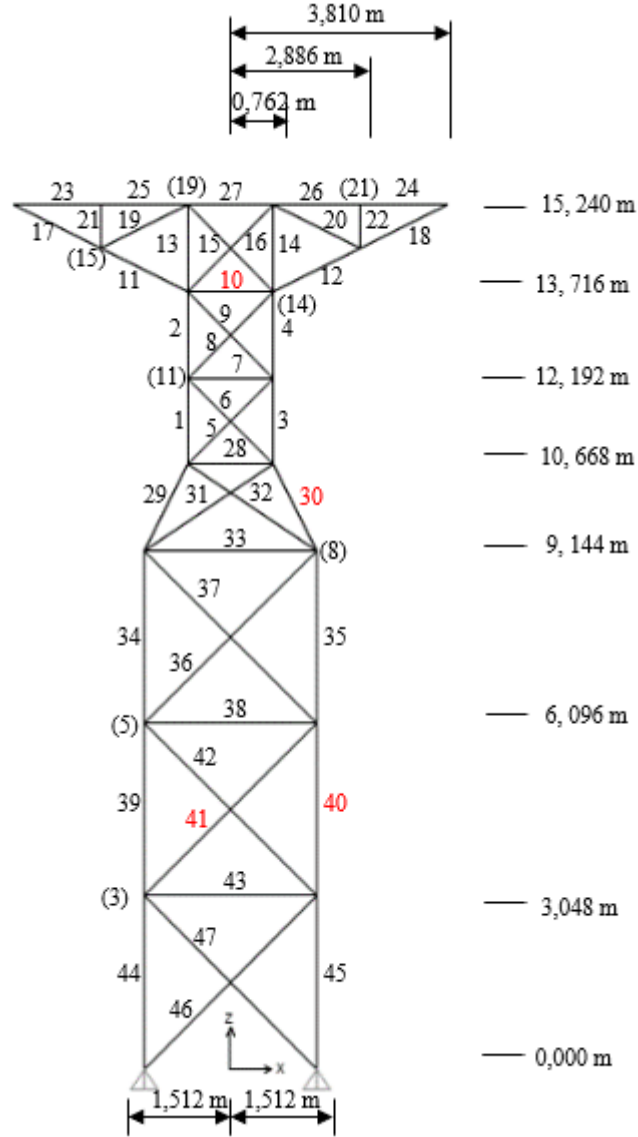
Önerilen yaklaşımın performansı üç farklı örnek sistem üzerinde kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. 47 elemanlı çelik düzlem-kafes sistem, 36 elemanlı çelik uzay kafes sistem ve 24 elemanlı üç boyutlu betonarme çerçeve sistem örnek olarak seçilerek farklı hasar senaryoları için gürültü etkisinin dikkate alınması ve alınmaması durumlarında incelenmiştir. Sayısal örneklerdeki yapısal hasarlar çubuk elemanlarının elastisite modülü azaltılarak simüle edilmiştir. Pratikte ölçüm bilgileri, yapı üzerine yerleştirilen sınırlı sayıda sensör ile toplanmaktadır. Bu nedenle, gerçek model ile sayısal modeli karşılaştırmak için önceki bölümde detayları verilen İteratif İyileştirilmiş İndirgeme Yöntemi (IIRS) kullanılmıştır. Böylece hesaplama hacmi azaltılarak gerçek sistemin dinamik davranışını yakalayan bir indirgenmiş model elde edilmiştir. Hasar tespit yönteminin etkinliği ve doğruluğu RMSE (Root Median Square Error), Hoseini Vaez ve Fallah (2017) tarafından verilen I_1 ve I_2 metrikleri ile değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Önerilen hasar tespit metodolojisinin akış şeması

2.1. Çelik Düzlem Kafes Sistem Örneği

Önerilen yöntemin hasar tespitinde uygulanabilirliğini göstermek amacıyla ilk örnek olarak Shirazi vd. (2014), Seyedpoor vd. (2014) ve Das ve Dhang (2020)'ın çalışmalarından alınan 47 elemanlı çelik düzlem kafes sistem örneği seçilmiştir. Geometrisi Şekil 2'de verilen modelde 47 eleman ve 22 düğüm noktası bulunmaktadır. Her bir düğüm noktasında iki serbestliği bulunan modelin toplam serbestlik derecesi 44'tür. Taşıyıcı sistem malzemesi çelik olan modelde birim kütle 8304 kg/m^3 , Poisson oranı 0,30 ve elastisite modülü 206.843 MPa olarak alınmıştır. Tüm elemanlar, dış çapı 4,057 cm ve et kalınlığı 1,93 cm olan boru kesite sahiptir.



Şekil 2. Çelik düzlem kafes sistem modeli

Seçilen model, Tablo 1'de verilen dört farklı hasar senaryosu altında test edilmiştir. Hasar tahmininde modelin ilk 16 doğal frekansı ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri kullanılmıştır. Kırmızı ile numaralandırılmış olan hasarlı çubuk elemanlarının yerleri, (10, 30, 40, 41) Şekil 2'de gösterilmektedir. Hasarlı yapıda titreşim verilerinin Şekil 2'de parantez içerisinde gösterilen 3, 5, 8, 11, 14, 15, 19 ve 21 numaralı düğüm noktalarına yerleştirilen 8 adet sensör yardımıyla alındığı kabul edilmiştir. Bu durumda 16 serbestlik derecesinin yanıtları ölçülmüş olmaktadır. Bu durum, indirgenmemiş sonlu eleman modelinin toplam serbestlik derecesinin yaklaşık %36,36'sına tekabül etmektedir. Kurulu sensör konumlarının uygunluğu Das ve Dhang (2020) tarafından yapılan çalışmada

doğrulanmıştır. Hasar tespitinde kullanılan TLBO algoritması için popülasyon büyüklüğü $N_p = 50$, maksimum iterasyon sayısı 100 ve durdurma kriteri 1×10^{-4} olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde dikkate alınan hasar senaryoları

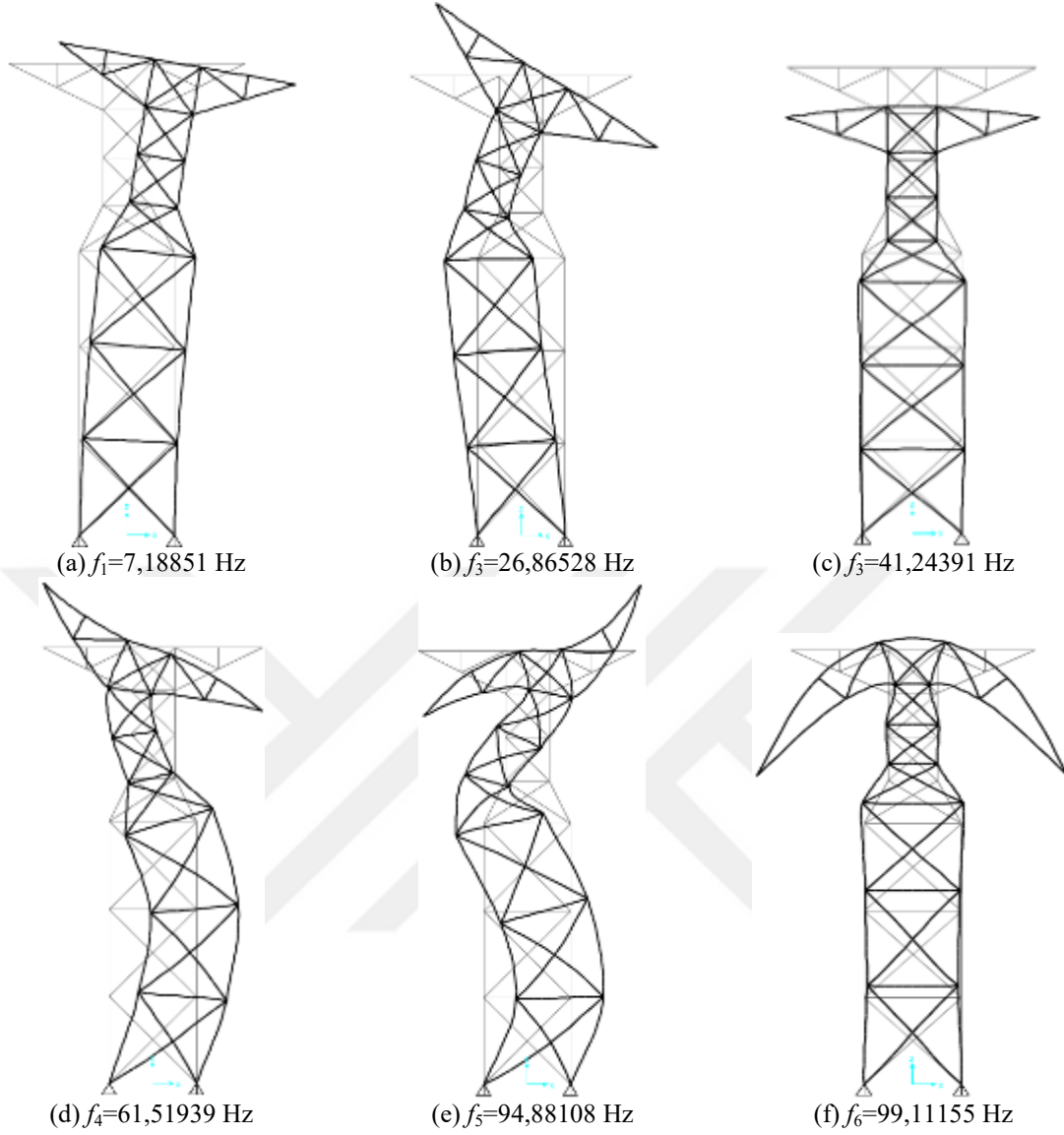
Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3		Senaryo 4	
Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti
10	0,3	30	0,3	10	0,3	40	0,3
-	-	-	-	30	0,3	41	0,3

İlk senaryoda 10 numaralı yatay elemanda %30 oranında hasar bulunduğu kabul edilmiştir. İkinci senaryoda 30 numaralı eleman seçilmiş ve hata oranı yine %30 kabul edilmiştir. Üçüncü senaryoda çoklu hasar senaryosu tercih edilmiştir. Bu senaryoda 10 ve 30 numaralı elemanların her ikisi de %30 oranında hasara sahiptir. Son senaryoda 40 numaralı düşey eleman ve 41 numaralı diyagonal çubuk seçilmiştir. Her iki çubukta da hasar oranı %30'dur.

47 elemanlı çelik düzlem kafes sistemin hasarsız durumda ilk altı doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri Şekil 3'te verilmiştir. Çelik düzlem kafes için hasarsız ve hasar senaryolu durumlarda elde edilen ilk altı doğal frekans değerleri Tablo 2'de verilmektedir. 47 elemanlı çelik düzlem kafes örneği için optimizasyon ile elde edilen hasar şiddetleri ise Tablo 3'te sunulmaktadır. Her bir senaryo için beş farklı koşumdan elde edilen hasar şiddetlerinin ortalaması (Ort.) ve standart sapma (Std. sp.) değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Çelik düzlem kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri

	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$f_3(\text{Hz})$	$f_4(\text{Hz})$	$f_5(\text{Hz})$	$f_6(\text{Hz})$
Hasarsız	7,18851	26,86528	41,24391	61,51939	94,88108	99,11155
Senaryo 1	7,18851	26,86523	41,23324	61,51931	94,88105	97,83965
Senaryo 2	7,14767	26,41288	40,87085	61,49078	93,89245	99,03232
Senaryo 3	7,14767	26,41284	40,85968	61,49069	93,89000	97,78029
Senaryo 4	7,00422	26,71777	40,23651	60,59110	94,20437	98,79563



Şekil 3. Çelik düzlem kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri

Tablo 3. Çelik düzlem kafes sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri

Senaryo	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
1	$\alpha_{10} = 0,30$	0,30159	0,29669	0,29912	0,29662	0,29928	0,29866	0,00185
2	$\alpha_{30} = 0,30$	0,29906	0,29767	0,30004	0,29847	0,29965	0,29898	0,00084
3	$\alpha_{10} = 0,30$	0,29703	0,29091	0,28836	0,29296	0,29317	0,29249	0,00286
	$\alpha_{30} = 0,30$	0,29098	0,29382	0,29584	0,29059	0,29533	0,29331	0,00217
4	$\alpha_{40} = 0,30$	0,29347	0,29723	0,29793	0,28763	0,29712	0,29468	0,00385
	$\alpha_{41} = 0,30$	0,27355	0,29150	0,28074	0,27114	0,29401	0,28219	0,00922

Senaryo 1’de 10 numaralı elemanda %30 oranında hasar bulunmaktadır. Beş farklı koşumdan elde edilen sonuçların oldukça küçük bir standart sapmayla görece tutarlı

olduğu görülmektedir. Benzer durum, 30 nolu elemanda %30 oranında hasar bulunan Senaryo 2’de de söz konusudur. Senaryo 3’te 10 ve 30 nolu elemanlarda %30 oranında hasar aranmaktadır. Her iki eleman için de hesaplanan ortalama hasar oranları gerçek orana oldukça yakındır. İki elemanda hasar bulunan bu senaryoda standart sapma değerleri ilk iki senaryoya göre daha büyük çıkmıştır. Senaryo 4’te 40 ve 41 numaralı elemanlarda %30 oranında hasar bulunmaktadır. Ortalama hasar oranları diğer senaryolara göre gerçek hasar oranına daha uzaktır ve standart sapmalar bu senaryoda daha büyük elde edilmiştir. Bu durum, hasar verilen eleman sayısının artmasının değişken sonuçlar ortaya çıkardığını göstermektedir. Görüldüğü gibi hasar şiddetleri genellikle küçük hata yüzdeleriyle yani % 0,3-5,0 aralığında belirlenmektedir. Ek olarak, hasar tespit sonuçlarının standart sapmaları nispeten küçük gözlenmiş olup, bu da mevcut yöntemin tutarlılığını göstermektedir. Çoklu hasar durumları için elde edilen hasar şiddetlerinde hatalar ve standart sapmalar bir miktar artmaktadır. Elde edilen sonuçların gerçek değerlere çok yakın olması nedeniyle bağımsız çalışma sayısının arttırılmasıyla bu hataların daha da azaltılması mümkün görünmektedir. Ancak hata oranlarının küçük olması nedeniyle bu çalışmada bağımsız çalışma sayısının arttırılmasına gerek görülmemiştir.

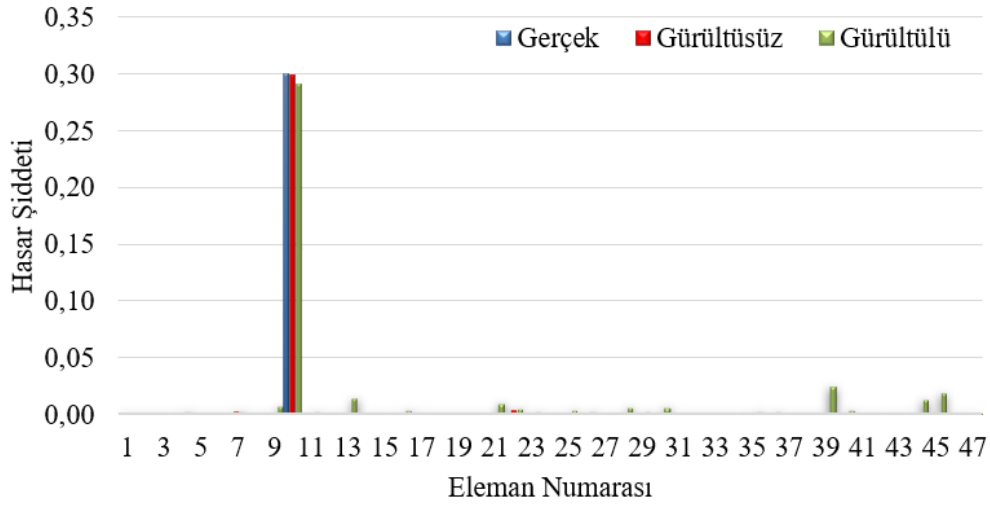
Aynı hasar senaryoları, gürültünün hesaba katılması durumu için belirlenen verilerle analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4’te sunulmuştur. Gürültünün hesaba katılması durumunda elde edilen standart sapma değerleri, gürültüsüz durumdaki sonuçlara kıyasla genel olarak biraz daha yüksektir. Bu beklenen bir durumdur; çünkü gürültü, veri setinde daha fazla varyasyon yaratmakta ve bu da sonuçların tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini azaltmaktadır.

Tablo 4. Gürültünün hesaba katılması durumunda çelik düzlem kafes sistem için elde edilen hasar şiddetleri

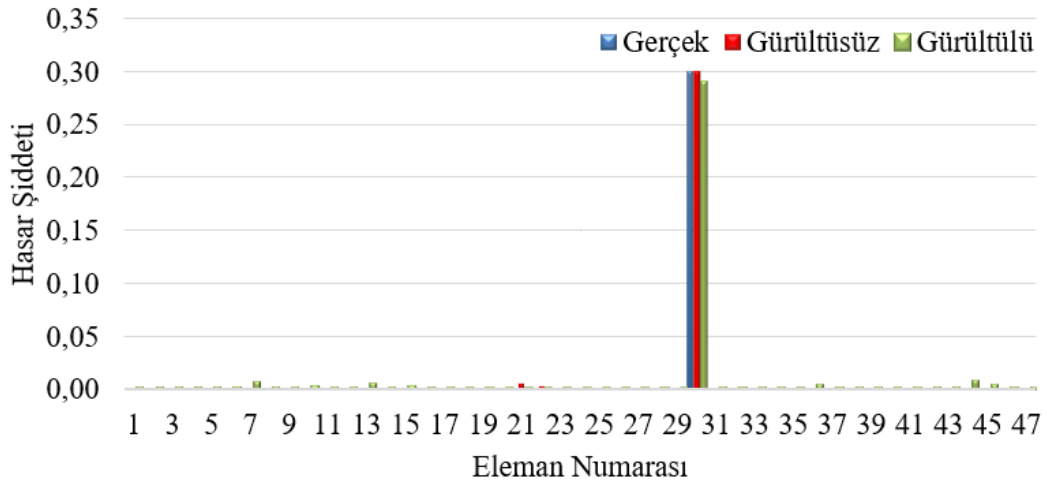
Sn.	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
1	$\alpha_{10} = 0,30$	0,31026	0,28872	0,28195	0,30058	0,27476	0,29125	0,01275
2	$\alpha_{30} = 0,30$	0,28897	0,29196	0,28967	0,28993	0,28394	0,28889	0,00127
3	$\alpha_{10} = 0,30$	0,31024	0,27196	0,29122	0,30033	0,28502	0,29175	0,01379
	$\alpha_{30} = 0,30$	0,28878	0,27619	0,29874	0,27532	0,30355	0,28851	0,01048
4	$\alpha_{40} = 0,30$	0,21736	0,28632	0,27451	0,28385	0,25995	0,26440	0,11044
	$\alpha_{41} = 0,30$	0,28645	0,25288	0,27209	0,24287	0,27517	0,26589	0,10488

47 elemanlı çelik düzlem kafes örneği için gürültünün hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlarda her bir eleman için hesaplanan ortalama hasar şiddetleri, dört farklı hasar

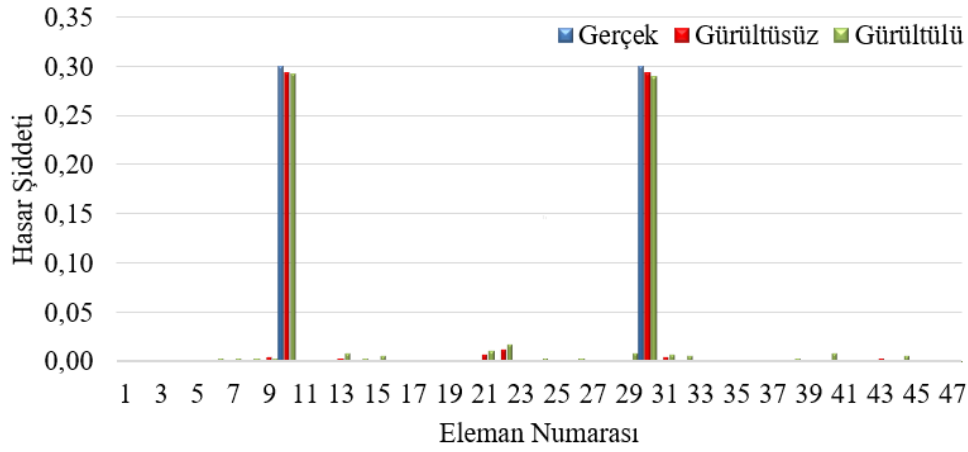
senaryosu için ayrı ayrı Şekil 4-7’de verilmektedir. Burada, gerçek durum elemanda var olan hasar durumunu, belirli bir elemanda gerçekte ne kadar rijitlik kaybı yaşandığını göstermektedir. Gürültüsüz durum, herhangi bir dış etken veya ölçüm hatasının olmadığı ideal durumu ifade etmektedir. Gürültülü durum ise ölçümlerde kirliliğin (rastgele hatalar, ölçüm yanlışlıkları vb.) var olduğu durumdur. Şekillerde, hasarsız olması gereken elemanlarda gürültülü durumda en fazla %3 civarında bir hasar şiddeti değeri hesaplanmış olduğu görülmektedir. Ancak, bu değer kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Bu durum, hasar tespit yönteminin gürültüye karşı nispeten dayanıklı olduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak, önerilen yöntemin, dikkate alınan tüm senaryolar için hasarları doğru bir şekilde tespit ettiği söylenebilir. Gürültülü durumlarda yanlış alarm unsurlarının hasar senaryosu 3 ve 4’te biraz daha belirgin olduğu görülmektedir. Ancak bu yanlış alarmlar ihmal edilebilir büyüklüktedir ve önerilen yöntemin doğruluğunu önemli ölçüde etkilememektedir.



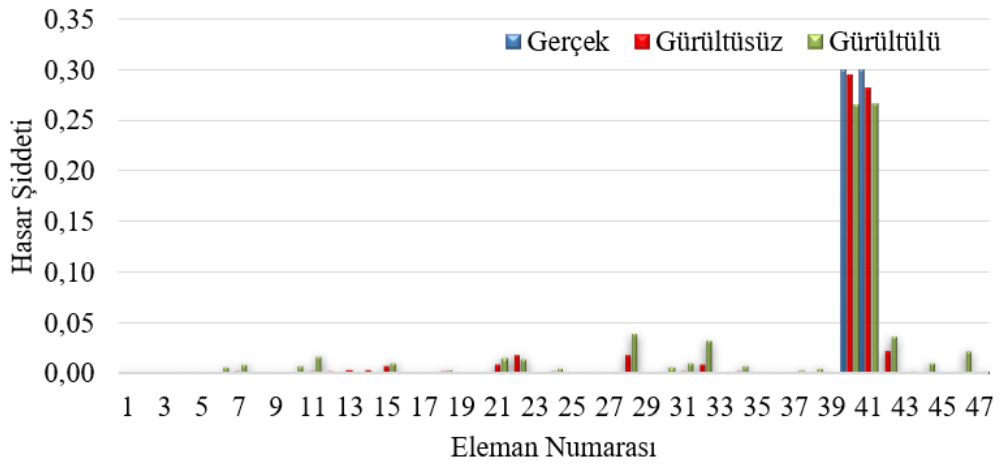
Şekil 4. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde birinci senaryo için hasar şiddetleri



Şekil 5. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde ikinci senaryo için hasar şiddetleri

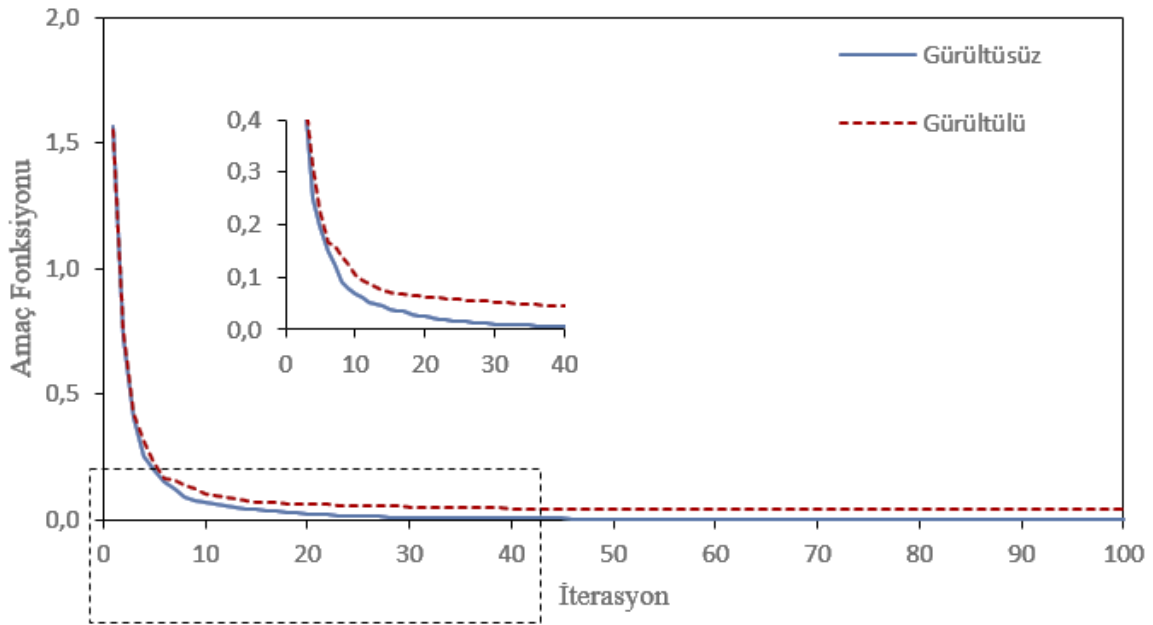


Şekil 6. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde üçüncü senaryo için hasar şiddetleri



Şekil 7. Çelik düzlem kafes sistem örneğinde dördüncü senaryo için hasar şiddetleri

Dikkate alınan tüm senaryolara ait yakınsama grafiklerini sunmak çok yer işgal edeceğinden Şekil 8’de sadece Senaryo 3’ait amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği sunulmaktadır. Diğer senaryolar için de elde edilen grafikler benzerdir. Amaç fonksiyonunun artan iterasyon sayısı ile birlikte istikrarlı bir düşüş sergilediği ve ilk 40 iterasyon sonunda yataya yakın bir seyir sergilediği görülmektedir. Şekilde, her iki durumda da amaç fonksiyonunun hızla yakınsadığı, ancak gürültülü durumda gürültüsüzüze göre bir miktar daha yüksek değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu, gürültünün optimizasyon sürecinde ve amaç fonksiyonunun değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir faktör olduğunu göstermektedir



Şekil 8. Çelik düzlem kafes sistem örneği için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği

47 elemanlı çelik düzlem kafes örneği daha önce Das ve Dhang (2022) tarafından (GA), JAYA ve çok aşamalı (TLBO-SCMS) algoritmaları ile, Das ve Dhang (2020) tarafından ise Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmanın sonuçları ile Tablo 5 ve 6’da karşılaştırılmıştır. Das ve Dhang’ın (2020) çalışmasında tüm algoritmalar için popülasyon büyüklüğü 35 olarak seçilmiştir. TLBO algoritmasının JAYA, GA ve PSO algoritmalarına göre daha az yapısal analiz ile sonuçlara ulaştığı görülmektedir. TLBO her bir senaryo için sırasıyla GA’dan %89,32, %66,67, %83,76, %78,76 ve PSO’dan %34,28, %30,33, %43,08 ve %32,09 oranında daha az analiz gerektirmiştir. Bu sayı, Jaya algoritmasına göre ise % 82,00, %78,02, %80,73,

%64,81 daha azdır. Hasar oranları ve standart sapmalar açısından TLBO, diğer algoritmalara göre yüksek performans göstermektedir. Tablo 6'da verilen gürültünün hesaba katıldığı durum için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. TLBO, diğer algoritmalara göre daha az analiz ile sonuca ulaşabilmektedir. Tabloya göre, önerilen yöntemde gerçekleştirilen analiz sayısı her bir senaryo için sırasıyla GA algoritmasına göre %84,15, %77,92, %86,28, %87,78; PSO algoritmasına göre %29,96, %40,17, %56,32, %55,53 ve Jaya algoritmasına göre %67,97, %74,66, %84,92 ve %85,37 daha azdır. Hasar tahmini ve standart sapmalar, tüm algoritmalarda benzer sonuçlar vermiştir.



Tablo 5. Gürültünün hesaba katılmaması durumunda elde edilen hasar şiddetlerinin farklı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılması

Hasar Senaryosu		Das ve Dhang (2022)									Das ve Dhang (2020)			TLBO		
		GA			JAYA			TLBO-SCMS			PSO					
		α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA
1	α_{10}	0,2992	0,0015	49145	0,3009	0,0054	29150	0,3001	0,00042	1640	0,3	0,0	7985	0,2987	0,0019	5247
2	α_{30}	0,3001	0,0013	18500	0,2999	0,0066	28050	0,3000	0,00007	1825	0,3	0,0	8850	0,2990	0,0008	6165
3	α_{10}	0,3007	0,0026	37855	0,3026	0,0055	31915	0,2999	0,00047	6640	0,3	0,0	10800	0,2925	0,0029	6147
	α_{30}	0,3000	0,0023		0,3004	0,0029		0,3001	0,00048		0,3	0,0		0,2933	0,0022	
4	α_{40}	0,2997	0,0019	42595	0,2991	0,0015	25710	0,3000	0,00014	4400	0,3	0,0	13320	0,2947	0,0039	9045

MNSA= Ortalama yapısal analiz sayısı

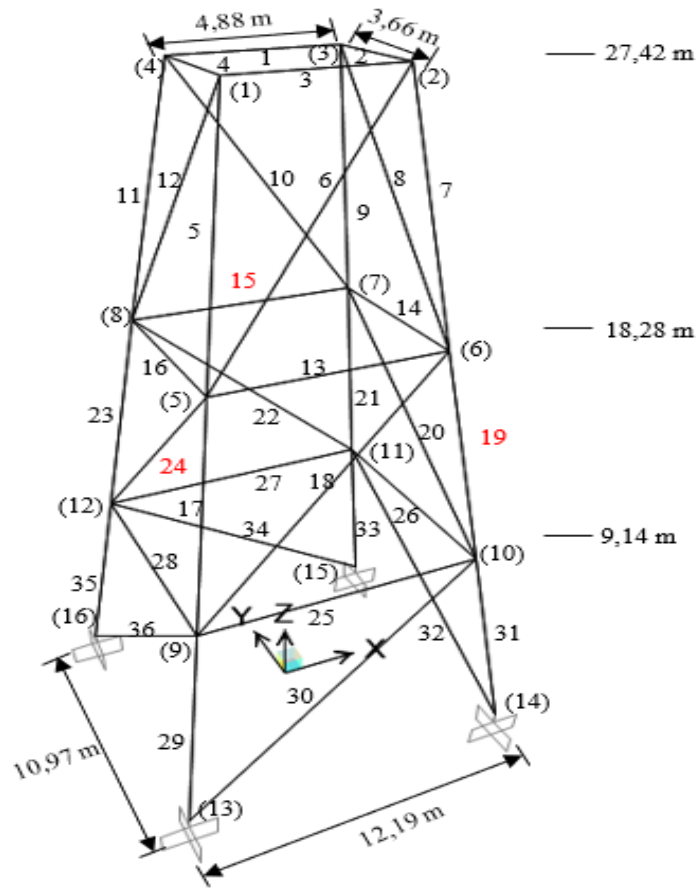
Tablo 6. Gürültünün hesaba katılması durumunda elde edilen hasar şiddetlerinin farklı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılması

Hasar Senaryosu		Das ve Dhang (2022)									Das ve Dhang (2020)			TLBO		
		GA			JAYA			TLBO-SCMS			PSO					
		α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA	α_{mean}	α_{std}	MNSA
1	α_{10}	0,3012	0,0200	57085	0,3005	0,0220	28240	0,2996	0,0200	4725	0,3019	0,0076	12915	0,2913	0,0128	9045
2	α_{30}	0,2992	0,0062	40975	0,3024	0,0047	35705	0,2999	0,0069	3625	0,2969	0,0138	15120	0,2902	0,0013	9045
3	α_{10}	0,2977	0,0110	65965	0,2965	0,0092	60015	0,2974	0,0096	7025	0,2991	0,0075	20708	0,2896	0,0138	9045
	α_{30}	0,3020	0,0120		0,3038	0,0110		0,3019	0,0120		0,2952	0,0129		0,2918	0,0105	
4	α_{40}	0,3010	0,0036	74075	0,2976	0,0049	61860	0,2999	0,0045	8120	0,2967	0,0100	20340	0,2762	0,0103	9045

MNSA= Ortalama yapısal analiz sayısı

2.2. Çelik Uzay Kafes Sistem Örneği

Nhamage vd. (2015) çalışmasından alınan ve Şekil 9'da verilen 36 elemanlı uzay kafes sistem ikinci sayısal örnek olarak seçilmiştir. Tüm çubuklar dış çapı 17,8 cm ve et kalınlığı 0,89 cm olan çelik boru kesitli elemanlardır. Her katın yüksekliği 9,14 m olan modelin oturum alanı dikdörtgen formunda olup 10,97×12,19 m ölçülerine sahiptir. Yapının yükseldikçe daralan planı en üst noktada 3,66×4,88 m ölçülerine düşmektedir. Kullanılan malzemenin elastisite modülü 210.000 MPa ve Poisson oranı 0,30'dur.



Şekil 9. Çelik uzay kafes sistem modeli

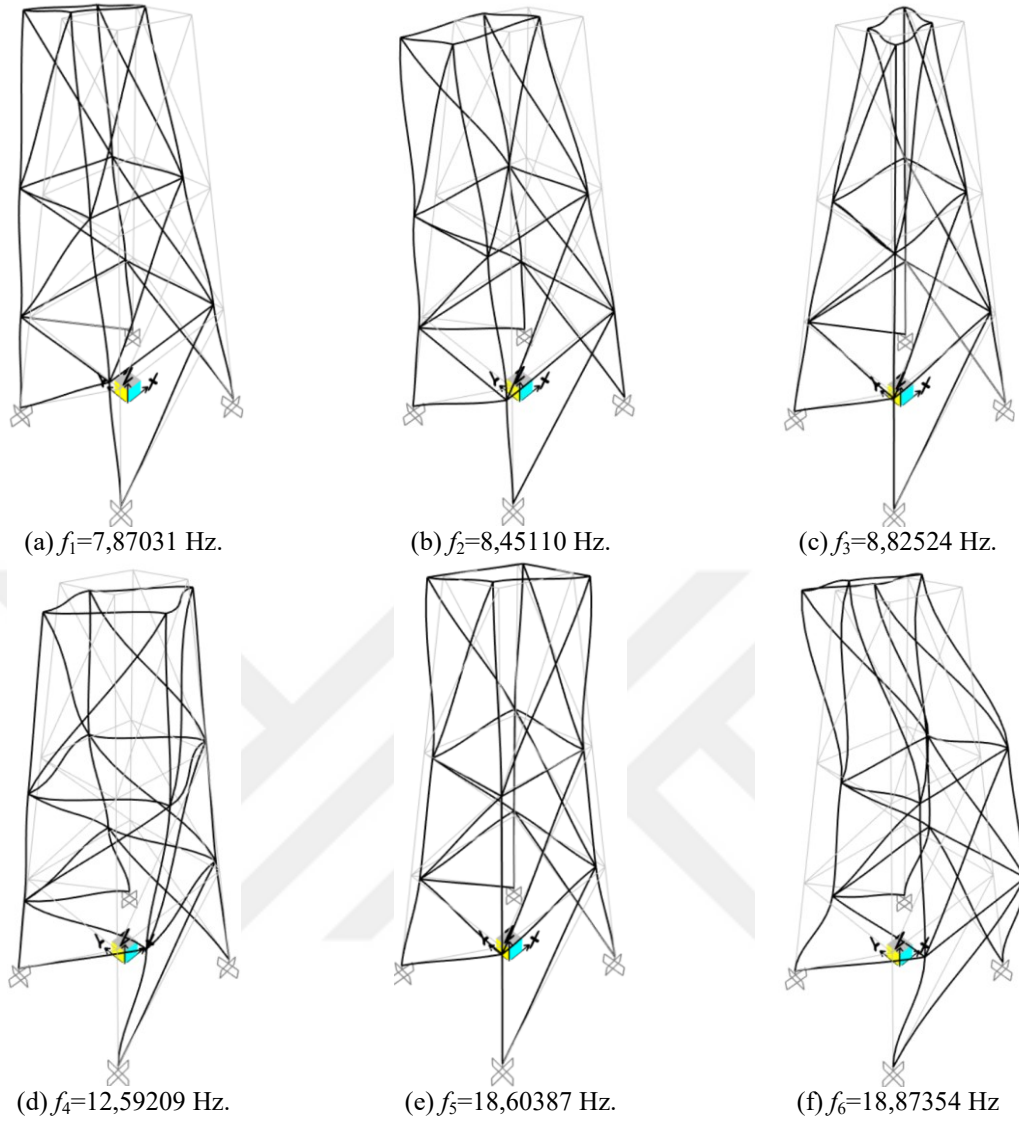
Seçilen örnek, Tablo 7'de verilen hasar senaryoları altında incelenmiştir. Kırmızı ile numaralandırılmış olan hasarlı çubuk elemanların yerleri, (15, 19, 24) Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekilde parantez içerisinde gösterilen 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 numaralı döğüm noktalarına yerleştirilen 6 adet sensörden ölçüm verisi alındığı kabul edilmiştir. Buna göre, indirgenmemiş sonlu eleman modelinin toplam serbestlik derecesinin %37,5'si temsil

edilebilmektedir. TLBO algoritmasının optimizasyon parametreleri olarak; popülasyon sayısı $N_p = 45$, maksimum iterasyon sayısı 100 ve durdurma kriteri 1×10^{-4} alınmıştır.

Tablo 7. Çelik uzay kafes sistem örneğinde dikkate alınan hasar senaryoları

Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3		Senaryo 4	
Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti
15	0,25	19	0,25	24	0,25	15	0,25
-	-	-	-	-	-	19	0,15
-	-	-	-	-	-	24	0,30

36 elemanlı uzay kafes sistem örneği öncelikle modal analize tabi tutularak elde edilen ilk altı doğal frekans değerleri ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekilleri Şekil 10'da verilmiştir. Hasar senaryolarına göre frekansların değişimi Tablo 8'de verilmektedir.



Şekil 10. Çelik uzay kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri

Tablo 8. Çelik uzay kafes sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri

	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$f_3(\text{Hz})$	$f_4(\text{Hz})$	$f_5(\text{Hz})$	$f_6(\text{Hz})$
Hasarsız	7,87031	8,45110	8,82524	12,59209	18,60387	18,87354
Senaryo 1	7,87013	8,43834	8,81447	12,57320	18,59955	18,87200
Senaryo 2	7,84051	8,35337	8,81377	12,52927	18,37740	18,79061
Senaryo 3	7,80723	8,44952	8,78916	12,52379	18,56072	18,82664
Senaryo 4	7,77552	8,38199	8,76144	12,45229	18,46606	18,72404

36 elemanlı çelik uzay kafes örneği için analiz sonrası elde edilen hasar şiddetleri Tablo 9’da sunulmaktadır. Tüm senaryolar için gürültünün hesaba katılmadığı veriler kullanılarak 5 koşum için elde edilen sonuçlar ve hasar şiddetlerinin ortalaması (Ort.) ile

standart sapma (Std. sp.) değerleri de verilmiştir. Beş farklı koşumdan elde edilen sonuçların oldukça küçük bir standart sapmayla görece tutarlı olduğu görülmektedir. Senaryo 2’de, 19 numaralı eleman %25 hasarlıdır. Hesaplanan hasar şiddetleri diğer senaryolara göre daha büyük standart sapma değerine sahiptir. Senaryo 4 için hasarlı eleman sayısı artmasına rağmen algoritma hasarlı elemanı ve hasar şiddetini doğru olarak belirlemeyi başarmıştır. Standart sapma değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Sonuçlar, önerilen yöntemin gürültünün olmadığı ideal koşullarda hasarı başarılı bir şekilde tespit ettiğini göstermektedir.

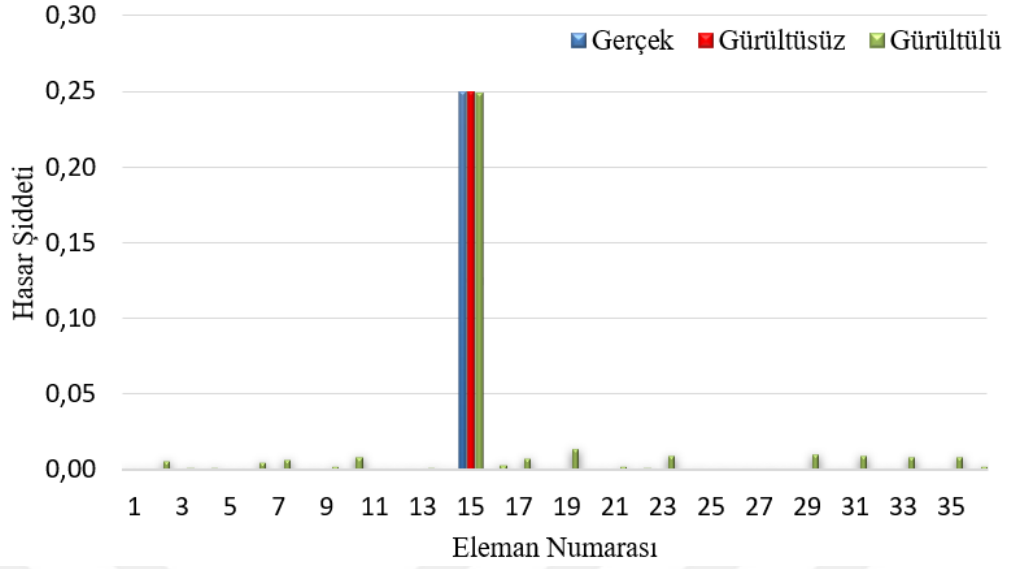
Tablo 9. Çelik uzay kafes sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri

Sn.	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
1	$\alpha_{15} = 0,25$	0,24897	0,24970	0,24873	0,24966	0,24914	0,24925	0,00038
2	$\alpha_{19} = 0,25$	0,24944	0,24916	0,24947	0,24940	0,24970	0,24943	0,01700
3	$\alpha_{24} = 0,25$	0,24966	0,24969	0,24963	0,24959	0,24990	0,24970	0,00011
	$\alpha_{15} = 0,25$	0,24852	0,24793	0,24581	0,25026	0,24514	0,24753	0,00185
4	$\alpha_{19} = 0,15$	0,14848	0,14779	0,14638	0,14651	0,14079	0,14599	0,00271
	$\alpha_{24} = 0,30$	0,29926	0,29920	0,29865	0,29990	0,29802	0,29901	0,00063

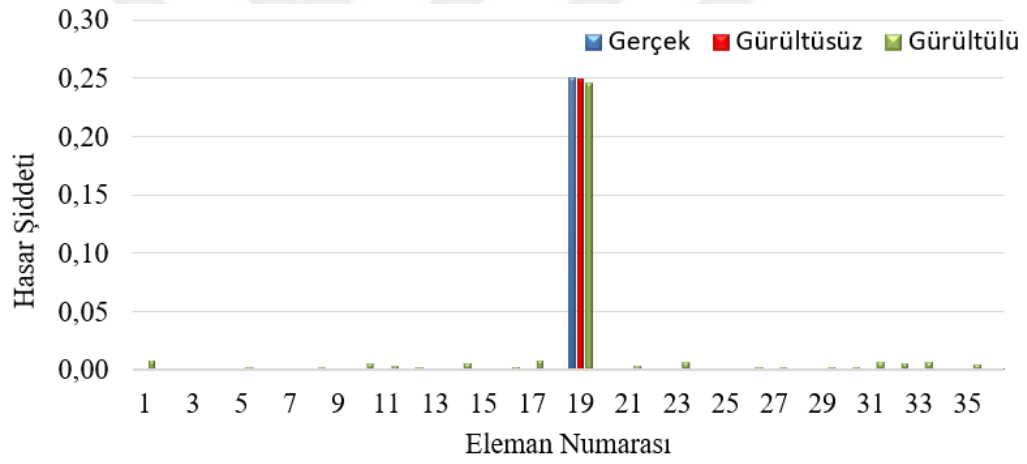
Ayrıca gürültünün hesaba katılması durumu için aynı hasar senaryoları örnek üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 10’da sunulmuştur. Genel olarak, koşumlar arasındaki sapmalar küçük olduğu için yöntemin oldukça tutarlı sonuçlar verdiği söylenebilir. Gürültünün hesaba katılmadığı duruma nazaran elde edilen standart sapma değerleri biraz daha yüksektir. Gürültü etkisinin bazı elemanlarda sapmalara yol açtığı izlenmekle birlikte genel olarak yöntem gürültüye karşı dayanıklı görülmektedir.

Tablo 10. Gürültünün hesaba katıldığı durumunda çelik uzay kafes sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri

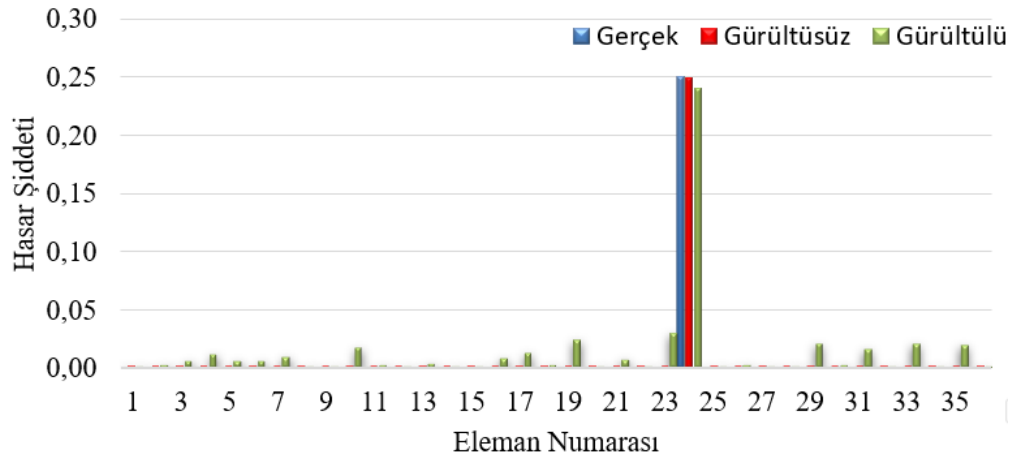
Sn.	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
1	$\alpha_{15} = 0,25$	0,25054	0,25047	0,25072	0,24576	0,24648	0,24880	0,00219
2	$\alpha_{19} = 0,25$	0,27375	0,24460	0,22202	0,23955	0,25373	0,24673	0,01700
3	$\alpha_{24} = 0,25$	0,25530	0,24839	0,22816	0,23584	0,23590	0,24072	0,00975
	$\alpha_{15} = 0,25$	0,25238	0,25111	0,25678	0,24465	0,25087	0,25116	0,00388
4	$\alpha_{19} = 0,15$	0,15347	0,12285	0,15935	0,15349	0,14847	0,14753	0,01281
	$\alpha_{24} = 0,30$	0,29569	0,29080	0,29380	0,29704	0,28410	0,29229	0,00459



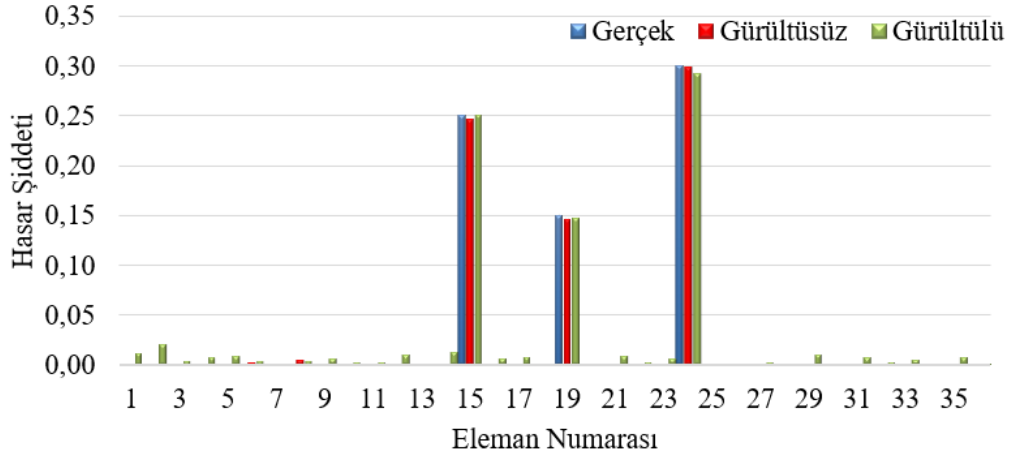
Şekil 11. Çelik uzay kafes sistem örneğinde birinci senaryo için hasar şiddetleri



Şekil 12. Çelik uzay kafes sistem örneğinde ikinci senaryo için hasar şiddetleri



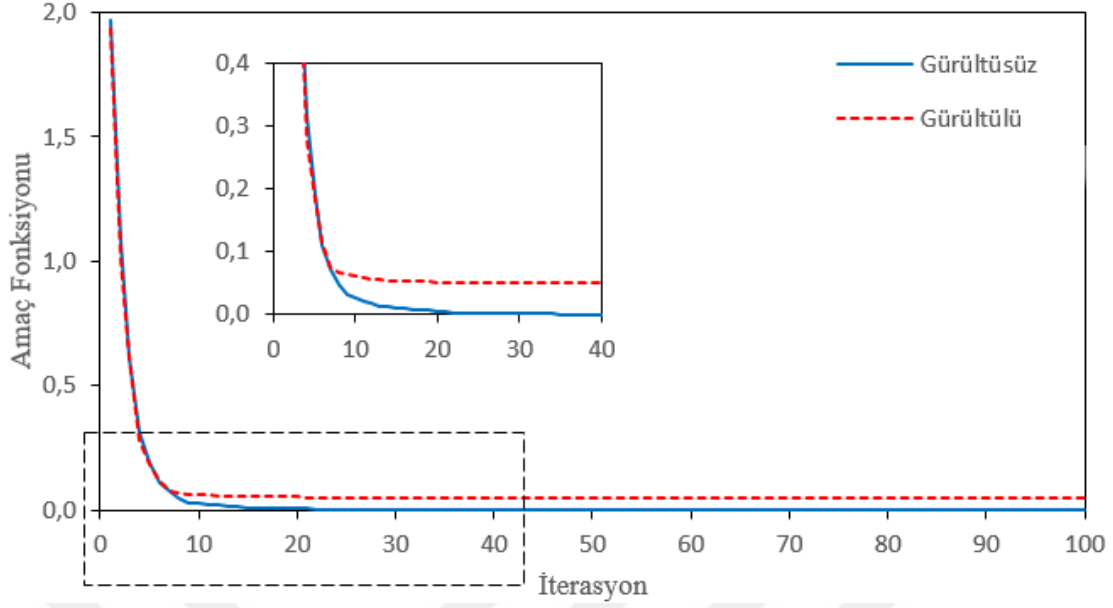
Şekil 13. Çelik uzay kafes sistem örneğinde üçüncü senaryo için hasar şiddetleri



Şekil 14. Çelik uzay kafes sistem örneğinde dördüncü senaryo için hasar şiddetleri

36 elemanlı çelik uzay kafes örneği için gürültünün hesaba katıldığı ve gürültüsüz durumda her bir eleman için hesaplanan ortalama hasar şiddetleri dört farklı hasar senaryosu için ayrı ayrı Şekil 11-14'te verilmektedir. Her bir senaryo için gürültünün hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlarda hasar şiddetlerinin başarıyla tespit edilebildiği görülmektedir. Hasarlı olmayan elemanlarda da oldukça düşük ve ihmal edilebilir seviyede hasar değeri elde edilmiştir. Şekil 14, 36 elemanlı uzay kafes kirişte birden fazla elemana hasar verilmiş bir senaryoyu temsil etmektedir. Her üç eleman üzerinde hasarlar, her durumda tespit edilebilmiştir. Bu, kullanılan hasar tespit metodunun etkili olduğunu göstermektedir. Gürültülü verilerde, özellikle düşük şiddetli hasarların tespiti daha zor olmuştur. Bu durum, gürültü yönetiminin bu tür senaryolarda ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Önerilen yöntem, dikkate alınan tüm senaryolar için hasarları başarıyla belirlemektedir. Gürültü varlığında, yanlış alarmların biraz daha belirgin olduğu dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, bu yanlış alarmlar ihmal edilebilir büyüklüktedir ve önerilen yöntemin doğruluğu üzerinde önemli bir etki yaratmamaktadır.

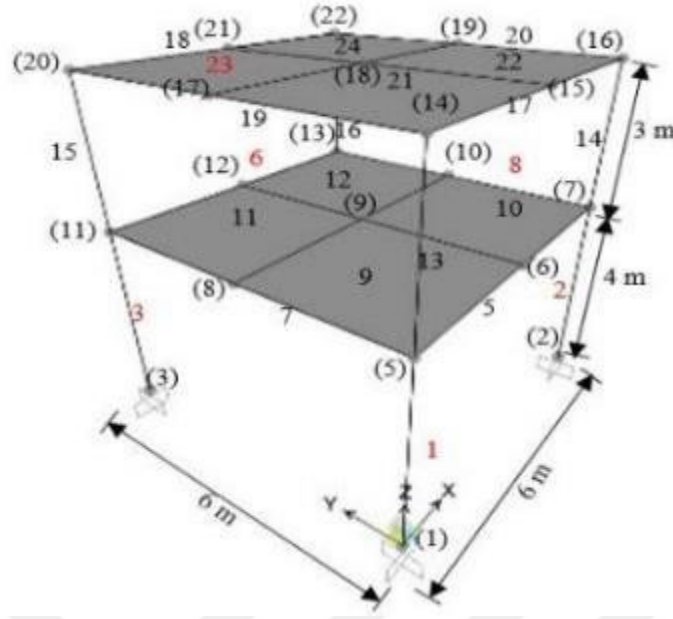


Şekil 15. Çelik uzay kafes sistem örneği için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği

Dikkate alınan tüm senaryolara ait yakınsama grafiklerini sunmak çok yer işgal edeceğinden Şekil 15'te sadece Senaryo 3'e ait amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği sunulmaktadır. Diğer senaryolar için de elde edilen grafikler benzerdir. Grafik, gürültüsüz ve gürültünün hesaba katıldığı koşullarda amaç fonksiyonu değerinin ilk 10 iterasyon içinde hızlıca düştüğünü göstermektedir. Bu durum, optimizasyon algoritmasının başlangıçta hızlı bir ilerleme kaydederek optimal çözüme yaklaştığını sonrasında yakınsama eğrisi nispeten düzleşerek büyük iyileştirmelerin zorlaştığını işaret etmektedir.

2.3. Üç Boyutlu Betonarme Çerçeve Sistem Örneği

Son sayısal örnek olarak seçilen 22 düğüm noktalı betonarme üç boyutlu çerçeve sistem Şekil 16'da verilmektedir. Her iki yönde 6'şar metre tek açıklıklı ve iki katlı olan betonarme çerçeve sistemin sonlu eleman modelinde 6 çubuk ve 8 plak eleman olmak üzere toplam 24 eleman bulunmaktadır. Birinci kat yüksekliği 4 m ve ikinci kat yüksekliği 3 m olmak üzere toplam yapı yüksekliği 7 metredir. Kolonlar 300×300 mm ölçülerinde kare kesite sahiptir. Kirişler ise 250×400 mm ölçülerinde dikdörtgen kesitlidir. Döşeme kalınlıkları 120 mm alınmıştır. Her döşeme 4 adet sonlu elemana bölünerek modellenmiştir. Analizlerde betonarmenin elastisite modülü 30.000 MPa, yoğunluğu 2500 kg/m³ ve Poisson oranı 0,20 olarak kullanılmıştır.



Şekil 16. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem modeli

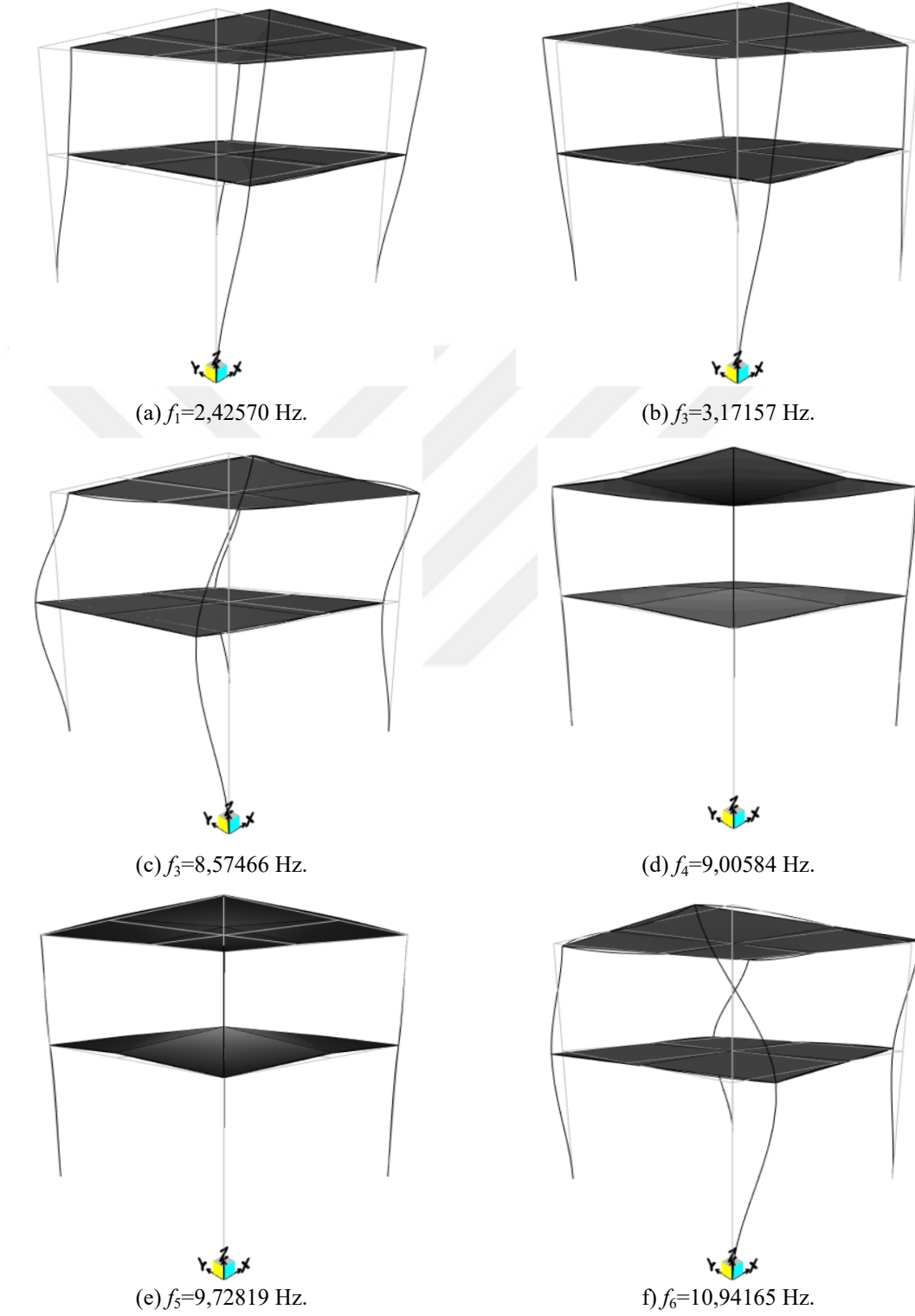
Seçilen 24 elemanlı betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği Tablo 11’de verilen üç farklı hasar senaryosu altında test edilmiştir. Kırmızı ile numaralandırılmış olan (1, 2, 3, 6, 8, 23) hasarlı elemanların yerleri, Şekil 16’da gösterilmektedir. Hasarlı yapının dinamik ölçümlerinin 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 ve 34 numaralı düğüm noktalarına yerleştirilen 10 adet sensör yardımıyla yapıldığı kabul edilmiştir. Bu durumda 60 serbestlik derecesinin yanıtları ölçülmüş olmaktadır. Bu sayı, indirgenmemiş sonlu eleman modelinin toplam serbestlik derecesinin yaklaşık %45’ine tekabül etmektedir. TLBO algoritması için popülasyon sayısı $N_p = 50$, maksimum iterasyon sayısı 150 ve durdurma kriteri 1×10^{-4} olarak belirlenmiştir.

Tablo 11. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde dikkate alınan hasar senaryoları

Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3	
Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti	Eleman numarası	Hasar şiddeti
1	0,20	2	0,30	3	0,25
-	-	6	0,20	8	0,20
-	-	-	-	23	0,25

24 elemanlı betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği, öncelikle modal analize tabi tutulmuş ve hasarsız ile hasar senaryolu durumlarda elde edilen ilk altı doğal frekans

değeri Tablo 12'de verilmiştir. Hasarsız durum için mod şekilleri ise Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri

Tablo 12. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğine ait frekans ve mod şekilleri

	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$f_3(\text{Hz})$	$f_4(\text{Hz})$	$f_5(\text{Hz})$	$f_6(\text{Hz})$
Hasarsız	2,42570	3,17157	8,57466	9,00854	9,72819	10,94165
Senaryo 1	2,38486	2,38610	3,12134	8,51118	8,51146	8,99870
Senaryo 2	2,33610	2,36041	3,07407	8,46338	8,47440	8,98157
Senaryo 3	2,34706	2,37187	3,08725	8,47455	8,48611	8,85237

24 elemanlı betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için analiz sonrası elde edilen hasar şiddetleri Tablo 13'te sunulmaktadır. Her bir senaryo için beş farklı koşum yapılarak hasar şiddetleri ortalaması (Ort.) ve standart sapma (Std. sp.) değerleri verilmiştir.

Tablo 13. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri

Sn.	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
1	$\alpha_1 = 0,20$	0,19976	0,19986	0,20006	0,20046	0,20009	0,20005	0,00024
2	$\alpha_2 = 0,30$	0,29909	0,28625	0,29789	0,29787	0,27934	0,29209	0,00791
	$\alpha_6 = 0,20$	0,19575	0,18896	0,19524	0,19746	0,18542	0,19256	0,00459
	$\alpha_3 = 0,25$	0,24156	0,24683	0,22610	0,24992	0,23935	0,24075	0,00823
3	$\alpha_8 = 0,20$	0,18520	0,19242	0,18842	0,19416	0,17734	0,18751	0,00597
	$\alpha_{23} = 0,25$	0,25171	0,25307	0,23823	0,24724	0,24795	0,24764	0,00519

Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için analiz sonrası elde edilen hasar şiddetleri ise Tablo 13'te sunulmaktadır. Her bir senaryo için beş farklı koşumdan elde edilen hasar şiddetlerinin ortalaması (Ort.) ve standart sapma (Std. sp.) değerleri verilmiştir.

Senaryo 1'de, 1 numaralı kolonda %20 hasar bulunmaktadır. Beş farklı koşum için elde edilen hasar şiddetlerinin ortalaması 0,20005 olarak hesaplanmıştır. 0,00024 olarak hesaplanan standart sapma değerine bakıldığında sonuçların oldukça güvenilir ve değişkenliğinin düşük olduğu anlaşılmaktadır. Senaryo 2'de, bir kolon ve bir kirişte hasarın birlikte bulunması durumu incelenmiştir. Senaryoya göre 2 numaralı kolonda %30 ve 6 numaralı kirişte %20 hasar bulunmaktadır. Analiz sonucunda 2 numaralı kolonda ortalama hasar şiddeti 0,29209 ve 6 numaralı kirişte ortalama hasar şiddeti 0,19257 olarak hesaplanmıştır. 2 numaralı kolon için standart sapma 0,00791 ve 6 numaralı kiriş için standart sapma 0,00459 bulunmuştur. Hesaplanan hasar şiddetleri gerçek duruma oldukça yakın olmakla birlikte ilk senaryoya göre daha yüksek oranda sapmaların bulunduğu

görülmektedir. Son senaryoda hasarlı kolon, kiriş ve döşeme üçlünün birlikte incelenmesi amaçlanmıştır. Hasarlı elemanlar olarak 3 numaralı kolon, 8 numaralı kiriş ve 23 numaralı döşeme parçası seçilmiştir. Her bir elemandaki hasar oranları sırasıyla %25, %20 ve %25 olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ortalama hasar şiddetleri sırasıyla ile 0,24075, 0,18751 ve 0,24764 olarak hesaplanmıştır. Sırasıyla 0,00823, 0,00597 ve 0,00519 olarak belirlenen standart sapma değerleri de ilk iki senaryoya göre daha büyüktür. Hasarlı eleman sayısı arttıkça koşumlardaki sapmaların arttığı görülmektedir. Ancak genel olarak, tüm senaryolar için hasarlı elemanlarda hesaplanan hasar şiddetlerinin ve sapmalarının kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir.

Aynı hasar senaryoları, gürültünün hesaba katılması durumu için belirlenen verilerle analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 14'te sunulmuştur. Senaryo 1 için 1 numaralı kolonda beş koşul sonrasında hesaplanan ortalama hasar şiddeti 0,19648 olarak gerçek değere yakındır. Standart sapma değeri de sonuçların nispeten tutarlı olduğunu göstermektedir. Senaryo 2 için analiz sonrasında hesaplanan ortalama hasar şiddeti 0,29104 gerçek değere oldukça yakındır; ancak 0,01258 standart sapma değeri tahminler arasında bir miktar değişkenlik olduğunu göstermektedir. 6 numaralı kiriş için ortalama hasar şiddeti (0,19765) gerçek değere (0,20) oldukça yakın ve standart sapma sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir. Senaryo 3 için 3 numaralı kolonda hesaplanan ortalama hasar şiddeti (0,23578) gerçek değerden (0,25) biraz düşük görünmektedir. 8 numaralı kirişte ise hesaplanan ortalama hasar şiddeti (0,18609) gerçek değerden (0,20) biraz düşük bulunmuştur. 23 numaralı döşeme parçasında hesaplanan ortalama hasar şiddeti (0,25340) gerçek değere (0,25) oldukça yakın bulunmuştur. Standart sapmaların gürültü hesaba katıldığında arttığı görülmektedir. Çünkü gürültü, veri setinde daha fazla değişkenlik yaratmakta ve bu durum hasar tahminini olumsuz etkilemektedir.

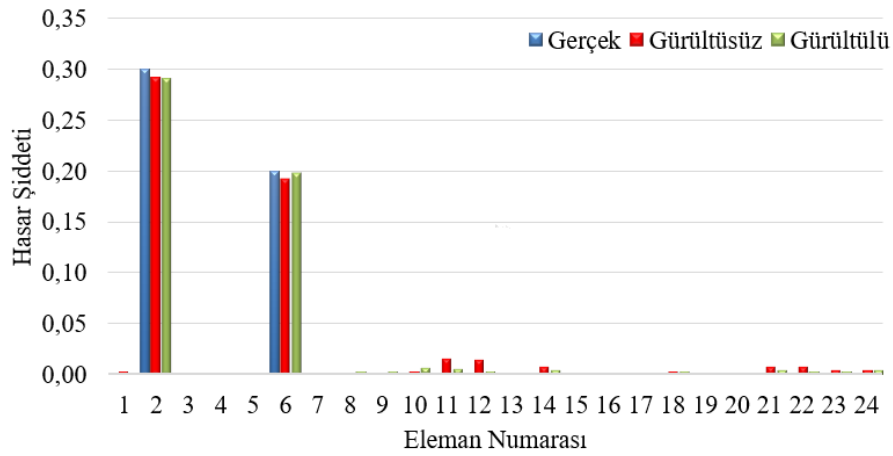
Tablo 14. Gürültünün hesaba katılması durumunda betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için elde edilen hasar şiddetleri

Sn.	Gerçek	Koşum1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
1	$\alpha_1 = 0,20$	0,18006	0,20431	0,19914	0,19759	0,20129	0,19648	0,00851
2	$\alpha_2 = 0,30$	0,27652	0,30615	0,27675	0,30308	0,29272	0,29104	0,01258
	$\alpha_6 = 0,20$	0,20734	0,20051	0,19265	0,19423	0,19351	0,19765	0,00558
3	$\alpha_3 = 0,25$	0,24156	0,22616	0,20032	0,27338	0,23749	0,23578	0,02367
	$\alpha_8 = 0,20$	0,18520	0,15292	0,18474	0,20530	0,20229	0,18609	0,01863
	$\alpha_{23} = 0,25$	0,25171	0,24805	0,26728	0,25279	0,24716	0,25340	0,00726

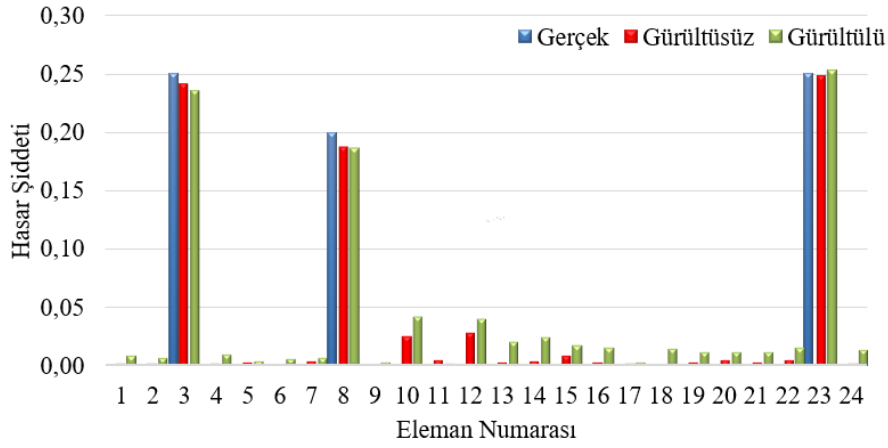
Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için gürültünün hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlarda hesaplanan ortalama hasar şiddetleri, farklı hasar senaryoları için Şekil 18-20’de verilmektedir. Her bir senaryo için hasarlı elemanlarda yoğunlaşan hasarın, diğer elemanlarda neredeyse yok denecek kadar düşük olduğu şekillerden anlaşılmaktadır. Gürültülü durumlarda yanlış alarm unsurlarının hasar senaryosu 2 ve 3’te biraz daha belirgin olduğu görülmektedir. Ancak bu yanlış alarmlar ihmal edilebilir büyüklüktedir ve önerilen yöntemin doğruluğunu önemli ölçüde etkilememektedir. Bu durum, hasar tespit yönteminin gürültüye karşı nispeten dayanıklı olduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak, önerilen yöntemin, dikkate alınan senaryolar için hasarları doğru bir şekilde tespit ettiği söylenebilir.



Şekil 18. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde birinci senaryo için hasar şiddetleri

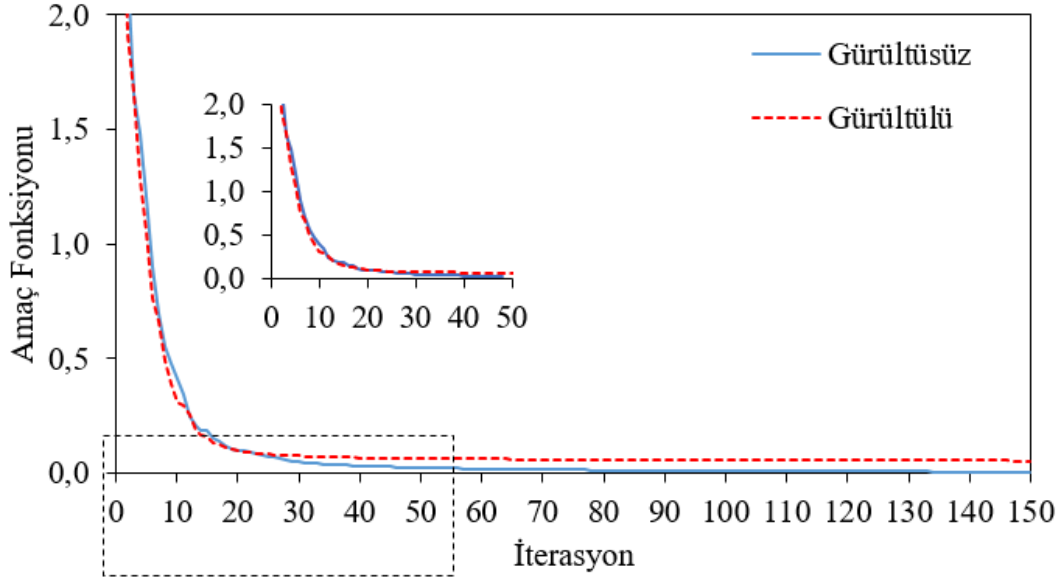


Şekil 19. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde ikinci senaryo için hasar şiddetleri



Şekil 20. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneğinde üçüncü senaryo için hasar şiddetleri

Dikkate alınan tüm senaryolara ait yakınsama grafiklerini sunmak çok yer işgal edeceğinden Şekil 21’de sadece Senaryo 3’ait amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği sunulmaktadır. Diğer senaryolar için de elde edilen grafikler benzerdir. Şekilden görüldüğü gibi gürültünün hesaba katıldığı ve katılmadığı her iki durum için başlangıçta amaç fonksiyonu değeri hızla düşmektedir. Bu düşüş, algoritmanın başlangıçta büyük iyileştirmeler yaptığını göstermektedir. İlk 20 iterasyonda her iki eğri de önemli bir düşüş yaşayarak büyük ölçüde yakınsamaktadır. Gürültünün hesaba katılmadığı durumda amaç fonksiyonunun yakınsadığı değer gürültülü durumdan daha küçüktür. Bu, gürültünün optimizasyon sürecini negatif yönde etkilediğini ve sonuçların daha az optimal olduğunu göstermektedir.



Şekil 21. Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği

2.4. Önerilen Yöntemin Performans ve Başarı Analizi

Yapısal sağlık izleme ve hasar tespiti alanlarında kullanılan performans değerlendirme metrikleri, algoritmaların etkinliğini ve doğruluğunu ölçmek için kritik öneme sahiptir. RMSE, geniş bir kullanım alanına sahip yaygın bir istatistiksel ölçüt olup, ilk olarak istatistik ve mühendislik alanlarında tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\alpha_i - \hat{\alpha}_i)^2}{n}} \quad (29)$$

I_1 ve I_2 indeksleri ise özellikle yapısal hasar tespiti çalışmalarında algoritmaların hasarlı ve hasarsız elemanları ne derece doğru belirlediğini ölçmek için oluşturulmuş özel performans göstergeleridir. Bu indeksler, hasarlı elemanlardaki tahmini hasar oranındaki mutlak hatayı ve yanlış tanımlanan hasarsız elemanların toplam hasar değerini ölçerek, kullanılan yöntemin genel verimliliğini ortaya koymaktadır. Bu metrikler, yapısal sağlık izleme literatüründe çeşitli araştırmalar tarafından adaptasyon ve özelleştirme yoluyla geliştirilmiş olup, algoritmaların gerçek dünya uygulamalarında ne kadar güvenilir ve doğru sonuçlar üretebildiğini değerlendirmek için önemlidir. Performans değerlendirmesi

açısından, Hoseini Vaez ve Fallah (2017) tarafından önerilen aşağıdaki hata indeksleri kullanılmıştır.

$$I_1 = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\alpha_i - \hat{\alpha}_i}{\alpha_i} \right| \times 100 \quad (30)$$

$$I_2 = \sum_{i=1}^{n-m} \hat{\alpha}_{i,mis} \quad (31)$$

Burada α_i i. hasarlı elemanın gerçek hasarını, $\hat{\alpha}_i$ algoritma kullanılarak aynı elemanın tahmini hasarını ve $\alpha_{i,mis}$ i. hasarsız eleman için algoritmanın hesaplamış olduğu hasarı göstermektedir. m ve n sırasıyla yapıdaki hasarlı eleman ve toplam eleman sayısına karşılık gelmektedir. RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası), tahminlerin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmaktadır. Gerçek değerler ile algoritmanın tahmin ettiği değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökü alınarak hesaplanmaktadır. RMSE, modelin tahminlerinin ne kadar sapma gösterdiğini belirlemektedir. Düşük bir RMSE, modelin daha doğru tahminler yaptığını göstermektedir. Hata indeksi I_1 , hasarlı elemanlardaki mutlak hata yüzdesini ölçerken, I_2 indeksi ise her senaryoda yanlış tanımlanan elemanların hasar değerlerinin toplamını göstermektedir. Dolayısıyla bu göstergelerin aldıkları değerlerin küçük olması, kullanılan yöntemin verimliliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Üç farklı sayısal örnek için hesaplanan I_1 ve I_2 hata indisleri ile ortalama karekök hata (RMSE) değerleri Tablo 15’te sunulmaktadır

Tablo 15. Her bir örnek için hesaplanan RMSE, I_1 ve I_2 hata indisleri

Sayısal Örnek	Senaryo	Gürültüsüz			Gürültülü		
		I_1	I_2	RMSE	I_1	I_2	RMSE
Düzlem Kafes Sistem	1	0,44680	0,01772	0,00082	2,91533	0,16042	0,00614
	2	0,34113	0,02302	0,00121	3,70253	0,07580	0,00301
	3	4,73393	0,08567	0,00332	6,57780	0,15890	0,00526
	4	7,71200	0,13448	0,00634	23,23627	0,28557	0,01327
Uzay Kafes Sistem	1	0,30200	0,00338	0,00017	0,48216	0,12189	0,00515
	2	0,22720	0,00367	0,00017	1,30736	0,09645	0,00362
	3	0,12096	0,00352	0,00016	3,71152	0,23773	0,01034
	4	3,98749	0,02731	0,00144	4,68247	0,17127	0,00676
Üç boyutlu Çerçeve Sistem	1	0,02320	0,00031	0,00004	1,76060	0,02059	0,00158
	2	6,35536	0,09491	0,00628	4,16056	0,06810	0,00396
	3	10,8893	0,12172	0,00925	12,64258	0,29957	0,01706

47 elemanlı çelik düzlem kafes sistem örneği için gürültüsüz durum dikkate alındığında tek elemanlı hasar senaryolarında (Senaryo 1 ve 2) hesaplanan hata indislerinin küçük olduğu görülmektedir. İki elemanlı hasar senaryolarında (Senaryo 3 ve 4) ise hata göstergelerinde artışlar meydana gelmektedir. Gürültülü durumlarda da aynı durum söz konusu olup, gürültüsüz duruma nazaran daha büyük hata indisleri elde edilmektedir. 36 eleman çelik uzay kafes sistem örneğinde tek elemanlı hasar senaryolarında (Senaryo 1, 2 ve 3) hesaplanan hata indis değerleri önerilen yöntemin verimliliğini açık bir şekilde göstermektedir. İkinci örnekte de ilk örnekte olduğu gibi gürültülü durumlarda gürültüsüz duruma nazaran daha büyük hata göstergeleri elde edilmektedir. 24 elemanlı üç boyutlu betonarme çerçeve sistem örneğinde Senaryo 2 ve 3 için I_1 hata indisi değerleri büyük elde edilmiştir. İlk iki örnekteki gibi gürültülü durumlarda elde edilen hata indisi değerleri gürültüsüz duruma nazaran daha büyüktür.

Genel olarak I_2 ve RMSE indisleri, dikkate alınan tüm örneklerde sıfıra yakın makul değerler sergilemektedir. Ancak bazı senaryolarda I_1 'in değerleri büyük hesaplanmıştır. Hoseini vd. (2017) çalışmasında da belirtildiği gibi bu indis tek başına algoritmanın performansına ilişkin kesin bir değerlendirme sağlayamayacağından, tüm indisler birlikte değerlendirildiğinde önerilen yöntemin yüksek düzeyde performans gösterdiği sonucuna varılabilmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemlerde titreşim verilerini kullanarak optimizasyon tabanlı bir hasar tespiti yöntemi geliştirilmiştir. SAP2000 yazılımında modellenen yapılar üzerinde gerçekleştirilen modal analiz sonuçları, SAP2000-OAPI aracılığıyla MATLAB ortamında yazılan optimizasyon koduna aktarılmıştır. Optimizasyon için TLBO algoritması kullanılarak hasarın yeri ve büyüklüğü belirlenmeye çalışılmıştır.

Yöntem, gürültünün hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar için ayrı ayrı dikkate alınarak, 47 elemanlı çelik düzlem kafes sistem, 36 elemanlı çelik uzay kafes sistem ve 24 elemanlı üç boyutlu betonarme çerçeve sistem üzerinde test edilmiştir. Her bir örnek için farklı hasar senaryoları kurgulanmış ve her senaryo için beş bağımsız koşum yapılmıştır. Önerilen yöntemin performansı I_1 ve I_2 hata indisleri ve RMSE değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Gürültünün hesaba katılmadığı koşullarda yapılan analizler, önerilen yöntemin yüksek doğrulukla hasar tespiti yapabildiğini göstermiştir. Gürültünün hesaba katıldığı koşullarda standart sapma değerleri artmakla birlikte, yöntem yine de yeterli hassasiyeti koruyarak güvenilir sonuçlar vermiştir.
- Yöntemin özellikle farklı yapı tiplerinde ve çeşitli hasar senaryolarında tutarlı sonuçlar vermesi geniş bir uygulama alanı sunduğunu göstermektedir.
- Çalışmada kullanılan örnek üzerinde TLBO algoritmasının, JAYA, GA ve PSO gibi algoritmalarla kıyasla daha az sayıda yapısal analiz ile sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Bu sonucu genelleştirmek için farklı modeller üzerinde TLBO'nun diğer algoritmalar ile performansı değerlendirilebilir.
- SAP2000-OAPI fonksiyonları kullanılarak modal analizlerin yapılması yönetime önemli bir esneklik sağlamaktadır. SAP2000-OAPI fonksiyonları sayesinde yöntem her tür büyük ve karmaşık yapı sistemlerinde kolayca kullanılabilir.
- Çalışmanın sonunda, önerilen optimizasyon tabanlı hasar tespit yönteminin Yapı Sağlık İzleme alanına önemli bir katkı sunduğu ve yapı güvenliğini artırmak amacıyla mühendislik uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Bu çalışmada önerilen optimizasyon tabanlı hasar tespiti yönteminin kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemlerde etkin bir şekilde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ancak, yöntemin daha da geliştirilmesi ve genişletilmesi için aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir.

- TLBO algoritması başarılı sonuçlar vermiş olsa da farklı optimizasyon algoritmalarının hasar tespiti sürecine dahil edilmesi ile hibrit uygulamaların araştırılması yöntemin daha geniş bir uygulama yelpazesinde etkinliğini artırabilir.
- Geliştirilen yöntemin gerçek zamanlı veriler ile test edilmesi pratik uygulamalar için fayda sağlayabilir.
- Köprüler, yüksek binalar ve tarihi yapılar gibi daha büyük ve karmaşık yapılar üzerinde test edilmesi, yöntemin uygulama alanını genişletebilir.
- Özellikle büyük ve karmaşık yapılar için tasarım değişkeni vektörünü belirli aşamalarda azaltan mekanizmalar yöntemin çözüm hızını arttırabilir.

4. KAYNAKLAR

- Abdolkhani, A., & Raoufi, M. (2023). A Genetic Optimization Algorithm for Automated Modal Parameter Identification and Damage Detection in Structures. *Engineering Structures*, 280, 115986.
- Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse. *IMAC-XX, the 20th International Modal Analysis Conference*, Los Angeles, CA.
- Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1982). A correlation coefficient for modal vector analysis. *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, 110-116.
- Barros, F., et al. (2023). A Model-Based Decision Tree Algorithm for Damage Detection in Steel Truss Bridges Using Vibration Data. *Journal of Structural Engineering*, 149(2), 04022357.
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009). A Hybrid Particle Swarm Optimization - Simplex Algorithm (PSOS) For Structural Damage Identification. *Advances in Engineering Software* 40:883–891. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2009.01.004>.
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009). Damage Identification Using Finite Element Model Updating and Considering Noisy and Missing Data. *Journal of Sound and Vibration*, 320(3), 545-569. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.09.032>.
- Cha, Y. J., & Büyüköztürk, O. (2015). Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy and Hybrid Multiobjective Optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 30:347–358. <https://doi.org/10.1111/MICE.12122>.
- Cury, A. A., Borges, C. C. H., & Barbosa, F. S. (2011). A Two-Step Technique For Damage Assessment Using Numerical and Experimental Vibration Data. *Structural Health Monitoring* 10:417–428. <https://doi.org/10.1177/1475921710379513>.
- Dang, K. D., Nguyen, N. H., Lee, S., Luong, V. H., & Le, T. A. (2023). A Novel Model Order Reduction-Based Two-Stage Damage Detection Paradigm For Trusses Using Time-Series Acceleration. *Advanced Engineering Software*, 176, Article 103374. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103374>.
- Das, S., & Dhang, N. (2020). Structural Damage Identification of Truss Structures Using Self-Controlled Multi-Stage Particle Swarm Optimization. *Smart Structure and Systems* 25:345–368. <https://doi.org/10.12989/SSS.2020.25.3.345>.
- Das, S., & Dhang, N. (2022). Damage identification of structures using incomplete mode shape and improved TLBO-PSO with self-controlled multi-stage strategy. *Structures* 35:1121-1124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.089>

- Ding, Z., Li, J., & Hao, H. (2019). Structural Damage Detection With Uncertainties Using a Modified Tree Seeds Algorithm. *Structural Engineering and Mechanics*, 70(6), 649-659. <https://doi.org/10.12989/sem.2019.70.6.649>.
- Ding, Z., Li, L., Wang, X., Yu, T., & Xia, Y. (2023). Vibration-Based FRP Debonding Detection Using a Q-Learning Evolutionary Algorithm. *Engineering Structures*, 275, Article 115254. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115254>.
- Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Dang-Trung, H., & Nguyen-Thoi, T. (2017). An Efficient Multi-Stage Optimization Approach for Damage Detection in Plate Structures. *Advances in Engineering Software*, 112, 76-87.
- Ghasemi, M. R., Nobahari, M., & Shabakhty, N. (2018). Enhanced Optimization-Based Structural Damage Detection Method Using Modal Strain Energy and Modal Frequencies. *Engineering with Computers* 34:637–647. <https://doi.org/10.1007/S00366-017-0563-5/FIGURES/9>.
- Ho, V. L., Nguyen, H. D., Mousavi, M., De Roeck, G., Bui-Tien, T., Gandomi, A. H., & Abdel Wahab, M. (2021). A Hybrid Computational Intelligence Approach For Structural Damage Detection Using Marine Predator Algorithm and Feedforward Neural Networks. *Computers & Structures*, 252, Article 106568. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106568>.
- Hoseini, Vaez, S. R., & Fallah, N. (2017). Damage Detection of Thin Plates Using GA-PSO Algorithm Based on Modal Data. *Arab J Sci Eng* 42:1251–1263. <https://doi.org/10.1007/S13369-016-2398-6/METRICS>.
- Huynh, D., He, J., & Tran, D. (2005). Damage Location Vector: A Non-Destructive Structural Damage Detection Technique. *Computers & Structures*, 83(28-30), 2353-2367.
- Jaishi, B., Ren, W. X., Zong, Z. H., & Lin, J. H. (2006). Finite Element Model Updating For Structural Damage Detection Using Natural Frequency and Mode Shape Residuals. *Journal of Sound and Vibration*, 290(1-2), 369-395.
- Jiang, S. F., Zhang, C. M., & Zhang, S. (2011). Two-Stage Structural Damage Detection Using Fuzzy Neural Networks and Data Fusion Techniques. *Expert Systems with Applications* 38:511–519. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2010.06.093>.
- Kahya, V., Şimşek, S., 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), Article 332. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03421-8>.
- Kang, F., Li, J. J., & Xu, Q. (2012). Damage Detection Based on Improved Particle Swarm Optimization Using Vibration Data. *Applied Soft Computing* 12:2329–2335. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2012.03.050>.

- Kaveh, A., & Zolghadr, A. (2015). An Improved CSS For Damage Detection Of Truss Structures Using Changes in Natural Frequencies and Mode Shapes. *Advances in Engineering Software* 80:93–100. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2014.09.010>.
- Le Minh, N., et al. (2021). An Enhanced Hybrid Velocity Particle Swarm Optimization Algorithm for Structural Damage Detection Using MAC and MDLAC-Based Objective Function. *Journal of Sound and Vibration*, 502, 116067.
- Liu, J., Tai, X., & Chan, T. F. (2006). Piecewise Constant Level Set Method For Damage Identification of Continuum Structures Based On Natural Frequencies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 31(5), 375–388.
- Nejad, A. M., Seyedpoor, S. M., & Rahai, A. (2005). A Static Damage Identification Approach for Structural Health Monitoring. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3-5), 1005-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.05.005>.
- Nhamage, I. A., Holdorf, Lopez, R., Fleck, L., & Miguel, F. (2015) An Improved Hybrid Optimization Algorithm For Vibration Based-Damage Detection. *Advances in Engineering Software* 93:47–64. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.12.003>.
- Nobahari, M., & Seyedpoor, S. M. (2011). Structural Damage Detection Using an Efficient Correlation-Based Index and a Modified Genetic Algorithm. *Math Comput Model* 53:1798–1809. <https://doi.org/10.1016/J.MCM.2010.12.058>.
- Rao, M. A., Srinivas, J., & Murthy, B. (2004). Damage Detection in Vibrating Bodies Using Genetic Algorithms. *Computers & Structures*, 82(11-12), 963-968.
- Şimşek, S. (2024). *Tabakalı Kompozit Kirişlerde Titreşim Verileri Yardımıyla Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti*. K.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Tiachacht, S., Bouazzouni, A., Khatir, S., Behtani, A., Zhou, Y.-L., & Wahab, M. A. (2018). Structural Health Monitoring Of 3D Frame Structures Using Finite Element Modal Analysis And Genetic Algorithm. *Journal of Vibroengineering*, 20(1), 202-214. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18600>.
- Vanova, A., Smith, B., & Jones, C. (2023). Structural Damage Detection From Dynamic Responses of The Bridge Deck Under a Moving Load Using Discrete Wavelet Transform. *Advances in Bridge Engineering*, 4(1), Article 28.
- Xiang, J., Matsumoto, T., Long J, et al. (2012). A Simple Method To Detect Cracks in Beam-Like Structures. *Smart Struct Syst* 9:335–353. <https://doi.org/10.12989/SSS.2012.9.4.335>.
- Xiang, J., Zhong, Y., Chen, X., & He, Z. (2008). Crack Detection in a Shaft By Combination Of Wavelet-Based Elements and Genetic Algorithm. *Int J Solids Struct* 45:4782–4795. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2008.04.014>.

- Xiang, J., & Liang, M. (2014). A Two-Step Approach To Multi-Damage Detection For Plate Structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 91, 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.04.028>.
- Yun, G. J., Ogorzalek, K. A., Dyke, S. J., & Song, W. (2009). A Two-Stage Damage Detection Approach Based on Subset Selection and Genetic Algorithms. *Smart Struct Syst* 5:1–21. <https://doi.org/10.12989/SSS.2009.5.1.001>.



ÖZGEÇMİŞ

Leman Dilara SEPİL, ilköğrenimini Kayakyolu Ç.M.İ.S. İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2014 yılında Nevzat Karabağ Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında bu bölümden mezun oldu. 2021-2022 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2023 yılında DSİ 25. Bölge Müdürlüğü Balıkesir'e İnşaat Mühendisi olarak atandı. 2023 yılından itibaren DSİ 25. Bölge Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.