



Kafes ve çerçeve sistemlerde SAP2000-MATLAB entegrasyonu ile titreşim tabanlı hasar tespiti

Vibration-based damage detection in truss and frame systems using SAP2000-MATLAB integration

Korhan Özgan^{1*}, Volkan Kahya¹, Leman Dilara Sepil²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.

kozgan@ktu.edu.tr, volkan@ktu.edu.tr

²Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.

lemandilaras@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 24.03.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 25.07.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 02.07.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.36897
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yapıların güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için yapı sağlığının düzenli olarak izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, optimizasyon algoritmaları kullanılarak titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemleri, günümüzde üzerinde araştırmaların sürdüğü yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemlerde titreşim verileri kullanılarak optimizasyon tabanlı bir hasar tespit yöntemi önerilmiştir. SAP2000 yazılımında modellenen yapıların modal analiz sonuçları, SAP2000-OAPI özelliği aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılmış ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritmasıyla işlenerek referans modele en yakın yapısal durum elde edilmeye çalışılmıştır. Yöntem, 47 elemanlı çelik düzlem kafes, 36 elemanlı çelik uzay kafes ve 24 elemanlı üç boyutlu betonarme çerçeve sistemler üzerinde, farklı hasar senaryoları ve hem gürültüsüz hem gürültülü ortam koşulları altında test edilmiştir. Hasar tespit performansı, I_1 , I_2 hata indisleri ve RMS hata (RMSE) değerleri ile nicel olarak değerlendirilmiştir. Gürültüsüz analizlerde, RMSE değerleri düzlem kafes sistem için 0.00082–0.00634, uzay kafes sistem için 0.00016–0.00144 ve çerçeve sistem için 0.00004–0.00925 aralığında kalmıştır. Gürültülü ortamlarda ise RMSE değerleri sırasıyla 0.00301–0.01327, 0.00362–0.01034 ve 0.00158–0.01706 değerlerine yükselmiştir. I_1 ve I_2 hata indisleri de benzer şekilde artmakla birlikte, her durumda hasarlı elemanların konumu ve hasar şiddeti başarıyla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin hem gürültüsüz hem de gürültülü koşullarda yeterli doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, yöntemin farklı yapı tiplerinde ve senaryolarda tutarlı sonuçlar üretmesi, geniş bir uygulama potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Yapı Sağlığı İzleme alanında katkı sunan bu yaklaşımın, gerçek zamanlı verilerle ve hibrit optimizasyon teknikleriyle desteklenerek mühendislik uygulamalarında daha da geliştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Titreşim, Hasar tespiti, Sonlu elemanlar yöntemi, Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO)

Abstract

Regular monitoring of structural health is crucial to ensure the safety, durability, and longevity of engineering structures. In this context, vibration-based damage detection methods using optimization algorithms have emerged as innovative approaches that are still under active research. This study proposes an optimization-based damage detection method for truss and frame structures using vibration data. The structures are modeled in SAP2000, and the results of modal analysis are transferred to MATLAB using the SAP2000-OAPI interface. The structural condition is then optimized using the Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) algorithm to match the reference (undamaged) model as closely as possible. The method was tested on three different structural models: a 47-element planar steel truss, a 36-element spatial steel truss, and a 24-element three-dimensional reinforced concrete frame, under both noise-free and noisy conditions. Various damage scenarios were defined for each case, and five independent runs were performed per scenario. The accuracy of the proposed method was quantitatively evaluated using I_1 and I_2 error indices along with the root mean square error (RMSE). In noise-free analyses, RMSE values ranged from 0.00082 to 0.00634 for the planar truss, from 0.00016 to 0.00144 for the spatial truss, and from 0.00004 to 0.00925 for the frame system. Under noisy conditions, these values increased to between 0.00301–0.01327, 0.00362–0.01034, and 0.00158–0.01706, respectively. Despite the expected rise in error metrics under noise, the method consistently succeeded in identifying the damaged elements and estimating their damage severity with satisfactory precision. The findings demonstrate that the proposed method offers adequate accuracy and robustness in both ideal and disturbed measurement environments. Furthermore, its consistent performance across different structure types and damage scenarios highlights its broad applicability. This optimization-based approach contributes to the field of Structural Health Monitoring and can be further improved through integration with hybrid optimization algorithms and real-time data applications for practical engineering use.

Keywords: Vibration, Damage detection, Finite element method, Teaching-learning based optimization (TLBO)

1 Giriş

Günümüzde mühendislik yapılarında kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yapıların güvenliği ve dayanımı, hizmet ömürleri boyunca karşılaşılabilecekleri doğal afetler, aşırı yükler ve malzeme

yorulması gibi etkenlerden olumsuz yönde etkilenebilir. Bu nedenle, hasar tespit süreçleri, yapıların uzun vadeli güvenliğini sağlamak için kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Oluşabilecek hasarların erken tespit edilmesi, zamanında müdahale ile gerekli onarım ve güçlendirme çalışmalarının yapılmasını sağlayarak yapı ömrünü uzatabilir. Bu bağlamda, Yapı Sağlığı İzleme (SHM) sistemlerinde hasar

*Yazışılan yazar/Corresponding author

tespiti önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel yöntemlerin yanı sıra, titreşim verilerinden yararlanarak optimizasyon tabanlı hasar tespit yaklaşımları, daha hızlı, güvenilir ve hassas analizler sunarak yapıların bakım ve onarım süreçlerinde yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu yöntemde, hasar tespiti problemi, yapı elemanlarındaki hasar seviyelerini içeren bir optimizasyon problemi şeklinde ele alınmaktadır. Gerçek yapı ile sonlu eleman modeli arasındaki farklılıkları minimize etmeye dayalı bu optimizasyon yaklaşımı, hasar belirleme sürecini daha etkin hale getirmektedir.

Son yıllarda, Yapı Sağlığı İzleme ve hasar tespiti alanında titreşim tabanlı yöntemler giderek artan bir ilgi görmektedir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğu, yapıların güvenliğini ve dayanımını artırmaya yönelik çeşitli tekniklerin geliştirilmesi ve uygulanmasına odaklanmaktadır. Rao vd. [1], yapısal elemanlardaki hasarın konumunu ve şiddetini belirlemek amacıyla artık kuvvetler (residual forces) prensibini esas alan bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, deneysel veriler özdeğer problemine entegre edilerek dinamik artık vektörler türetilmiş ve elde edilen hatanın minimize edilmesiyle hasar parametreleri belirlenmiştir. Bunun için normalleştirilmiş artık fonksiyon kullanılarak bir özdeğer tahmin algoritması geliştirilmiş ve amaç fonksiyonunun en uygun değerine ulaşmak adına Genetik Algoritma (GA) optimizasyonu uygulanmıştır. Yöntemin etkinliği, düzlem kafes kiriş, konsol Euler-Bernoulli kirişi ve portal kafes kiriş üzerinde test edilerek değerlendirilmiştir. Huynh vd. [2], uzay kafes kirişler ve plaklar üzerinde hasar yerinin ve büyüklüğünün belirlenmesi için DLV (Damage Location Vector) metodunu kullanmıştır. Bu yaklaşım, yapısal hasarın dinamik özelliklerde değişimlere neden olduğu ve bu değişimlerin izlenmesiyle hasar konumunun tespit edilebileceği temel prensibine dayanmaktadır. Jaishi vd. [3], sonlu eleman model güncellemesiyle hasar tespitine yönelik duyarlılık analizine dayanan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, doğal frekanslar ile mod şekli değişimlerinin değerlendirilmesiyle sonlu eleman modelinin hasarlı yapının dinamik karakteristikleriyle uyumlu hale getirilmesini amaçlamaktadır. Yun vd. [4], iki aşamalı bir hasar tespit stratejisi ortaya koymuştur. İlk aşamada, alt küme seçimi yöntemiyle birden fazla hasar bölgesi belirlenmiş, ardından ikinci aşamada GA optimizasyonu uygulanarak hasarlı elemanların büyüklüğü hesaplanmıştır. Kang vd. [5], titreşim verileri kullanılarak hasar tespiti yapılmasına olanak tanıyan geliştirilmiş bir PSO algoritması sunmuştur. Kaveh ve Zolghadr [6], doğal frekans ve mod şekli değişimlerini temel alarak düzlem ve uzay kafes sistemlerinde yapısal hasarın belirlenmesi için Yüklü Sistem Arama Algoritması'nı kullanarak bir model oluşturmuştur. Gomes et al. [7] presented a review of vibration based inverse methods for damage detection and identification in mechanical structures using optimization algorithms and ANN. Mishra et al. [8] proposed a novel vibration-based approach for structural damage detection, which is critical for evaluating the safety of structures. To overcome some limitations of traditional optimization methods, they employed the Ant Lion Optimization algorithm, which mimics the hunting behavior of antlions. Ho vd. [9], hasar tespitinde Deniz Yırtıcıları Algoritmasını kullanarak etkili bir yaklaşım geliştirmiştir. Önerilen algoritmanın performansı, literatürde yaygın kullanılan optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Abdolkhani ve Raoufi [10], frekans alanında modal özellikleri otomatik tanımlayabilen bir prosedür geliştirerek lokal hasar tespiti gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, önerilen yöntemin %5 gürültü seviyesinde bile GA optimizasyonu ile hasarlı yapıların modal özelliklerini ve

rijitlik kayıplarını yüksek doğrulukla belirleyebildiği ortaya konmuştur. Zacharakis and Giagopoulos [11] have presented a vibration-based method that aims to accurately detect both the location and the specific position of structural damage in complex and large-scale structures by combining AI-based metaheuristic optimization algorithms with updated finite element models. Ding vd. [12], Q-Öğrenme Tabanlı Evrimsel Algoritma ile entegre edilmiş bir teknik geliştirmiştir. Bu yöntem, ilk defa FRP ile güçlendirilmiş yapılardaki lif kopmalarının tespit edilmesi amacıyla uygulanmıştır. Çalışmada, amaç fonksiyonunu en verimli şekilde çözmek için Q-Öğrenme Evrimsel Algoritması önerilmiş ve bu teknik FRP ile güçlendirilmiş konsol çelik kiriş üzerinde test edilerek etkinliği değerlendirilmiştir. Zar et al [13] examined the effects of artificial intelligence, machine learning (such as ANN and SVM), and deep learning (CNN) on structural damage detection. They also address validation challenges, nonlinear structural behavior, and uncertainties arising from inverse analysis. Furthermore, the paper includes forward-looking recommendations such as blending real-world undamaged structural data with simulated damage scenarios and a shift toward unsupervised algorithms.

Titreşim verilerine dayalı optimizasyon tabanlı hasar tespiti problemlerinde, genellikle belirli sistemlere özgü olarak geliştirilen özel kodlar kullanılmaktadır. Ancak, incelenen yapının türü değiştiğinde, kullanılan yazılımda da çeşitli uyarlamalar yapılması gerekmektedir. Farklı yapı türlerine uygun, esnek ve uyarlanabilir bir yazılım geliştirmek ileri düzeyde uzmanlık gerektirdiğinden, yapısal modelleme ve sayısal analiz süreçlerinde ticari yazılımlardan yararlanmak önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, SAP2000 [14]'in OAPI özelliği kullanılarak modellenen bir yapı sistemi üzerinde, MATLAB [15] ortamında geliştirilen TLBO algoritması aracılığıyla olası hasarların tespit edilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada benimsenen yöntemde, yapı sistemi SAP2000 ticari yazılımı kullanılarak modellenmiş ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen veriler, SAP2000-OAPI fonksiyonları aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılmıştır. MATLAB'da geliştirilen TLBO algoritması, amaç fonksiyonunun minimize edilmesi amacıyla uygulanmıştır. SAP2000 ve MATLAB arasındaki çift yönlü veri akışı sayesinde, belirlenen doğruluk seviyesine ulaşılan kadar devam eden bir süreç ile yapısal hasarların belirlenmesi amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşım, düzlem çelik kafes sistem, uzay çelik kafes sistem ve üç boyutlu betonarme çerçeve sistem üzerinde test edilerek değerlendirilmiştir.

2 Metodoloji

2.1 İteratif İyileştirilmiş İndirgeme Sistemi

Model esaslı yaklaşımların pratikte karşılaşılan temel zorluklarından biri, ölçüm verilerinin toplanmasını sağlayan sensörlerin sayısının sınırlı olmasıdır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için literatürde model indirgeme tekniklerinin kullanılması önerilmektedir [16, 17]. Model indirgeme yöntemi, karmaşık sistemlerin veya geniş veri kümelerinin boyutunu ve hesaplama yükünü azaltarak analiz süreçlerini daha verimli hale getirmeyi amaçlamaktadır. Bu süreçte, az bilgi içeren veya gereksiz veriler elenerek, sistemin önemli ve anlamlı bileşenleri korunmaktadır. Bu çalışmada, Guyan [18] tarafından önerilen model indirgeme yöntemi benimsenmiştir. Atalet etkilerini göz ardı eden bu yöntemde, tüm sistemin koordinatları ile dikkate alınan aktif koordinatları arasındaki statik dönüşüm şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}_G \mathbf{x}_m \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{x}_s \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{T}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

$$\mathbf{M}_R = \mathbf{T}_G^T \mathbf{M} \mathbf{T}_G, \quad \mathbf{K}_R = \mathbf{T}_G^T \mathbf{K} \mathbf{T}_G \quad (3)$$

Bu ifadelerde, $\mathbf{x}$ durum vektörü, $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ ve $\mathbb{Q}_G$ ise sırasıyla kütle, rijitlik ve geometrik dönüşüm matrisleri, m ve s alt simgeleri sırasıyla aktif ve pasif serbestlik derecelerini göstermektedir. O'Callahan [19], statik indirgeme yönteminin dezavantajlarını gidermek amacıyla atalet terimlerini sözde-statik kuvvetler olarak tanımlamış ve İyileştirilmiş İndirgenmiş Sistem (IRS) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde, sistemin dinamik davranışını daha doğru bir şekilde temsil edebilmek için koordinat dönüşüm matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\mathbf{T}_{IRS} = \mathbf{T}_G + \mathbf{SMT}_G \mathbf{M}_R^{-1} \mathbf{K}_R \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{ss}^{-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ve indirgenmiş kütle ve rijitlik matrisleri aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$\mathbf{M}_{IRS} = \mathbf{T}_{IRS}^T \mathbf{M} \mathbf{T}_{IRS}, \quad \mathbf{K}_{IRS} = \mathbf{T}_{IRS}^T \mathbf{K} \mathbf{T}_{IRS} \quad (6)$$

Friswell vd. [20], iteratif iyileştirilmiş indirgeme sistemi (IIRS) adı verilen bir süreç aracılığıyla IRS'nin kesinliğini artırmıştır. IIRS yönteminde her bir iterasyonda kullanılacak dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\mathbf{T}_{IRS,i+1} = \mathbf{T}_G + \mathbf{SMT}_{IRS,i} \mathbf{M}_{IRS,i}^{-1} \mathbf{K}_{IRS,i} \quad i = 2, 3, \dots \quad (7)$$

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

2.2 Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Tekniği

Bu çalışmada, hasar tespiti probleminin optimizasyon yoluyla çözümünde, birçok optimizasyon algoritmasının aksine, karmaşık parametre ayarlarına ihtiyaç duymaması, global optimuma ulaşmada yüksek etkinlik göstermesi ve hızlı konvergenansa özelliği nedeniyle TLBO algoritması tercih edilmiştir. Algoritmanın işleyiş detayları Rao vd. [21]'de bulunabilir. Aşağıda temel denklemlerden kısaca bahsedilmiştir.

Algoritmanın temelinde iki ana aşama bulunmaktadır: öğretme ve öğrenme süreci. Öğretme aşamasında, çözüm uzayından seçilen bir öğretmen, öğrencilere rehberlik ederek sınıfın genel başarısını artırmaya çalışır. $\mathbb{Q}$ sayıda konu içeren bir sistemde, k . yinelemede i . öğrencinin konumu aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\theta_{i,k} = (Q_{i,1,k}, Q_{i,2,k}, \dots, Q_{i,n,k}) \quad (8)$$

Belirli bir $\mathbb{Q}$ ($\mathbb{Q}=1, 2, 3, \dots, \mathbb{Q}$) konusundaki P sayıda öğrenciye (nüfusa) sahip sınıfın $\mathbb{Q}$. yinelemedeki (iterasyon) ortalama sonucu aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$\theta_{j,k}^{mean} = \left(\frac{1}{P} \right) \left[\sum_{i=1}^P Q_{i1} \sum_{i=1}^P Q_{i2} \dots \dots \sum_{i=1}^P Q_{in} \right] \quad (9)$$

Popülasyon arasında en iyi uygunluğa sahip öğrenci, $\mathbb{Q}$. yineleme için öğretmen ($\theta_{best,k}^{teacher}$) olarak seçilir. Her öğrencinin konumu Denklem (10) ve Denklem (11)'e göre güncellenir.

$$\theta_{j,i,k}^{new} = \theta_{j,i,k}^{old} + rand(\theta_{best,k}^{teacher} - T_F \theta_{j,k}^{mean}) \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, \dots, P) \\ (j = 1, 2, \dots, n) \end{matrix} \quad (10)$$

$$T_F = round[1 + rand(0,1)] \quad (11)$$

Burada $\mathbb{Q}$ öğretme faktörüne her yineleme için 1 veya 2 değeri atanır. ' $\mathbb{Q}$ ' 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 aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir.

$$\theta_{j,m,k}^{new} = \begin{cases} \theta_{j,m,k} + rand(0,1)(\theta_{j,m,k} - \theta_{j,n,k}), & \text{if } f(\theta_{j,m,k}) \leq f(\theta_{j,n,k}) \\ \theta_{j,m,k} + rand(0,1)(\theta_{j,n,k} - \theta_{j,m,k}), & \text{if } f(\theta_{j,n,k}) < f(\theta_{j,m,k}) \end{cases} \quad (12)$$

eğer $\mathbb{Q}$. öğrencinin yeni konumu $\theta_{j,m,k}^{new}$ eskisinden daha iyiye bu muhafaza edilerek, diğer atılır.

3 Hasar Tespit Stratejisi

3.1 Hasarın Modellenmesi

Hasar, yapının herhangi bir elemanına değeri 0 ila 1 arasında bir rijitlik kaybı parametresi (veya hasar şiddeti) α atanarak modellenmektedir. Bu durumda $\mathbb{Q}$. hasarlı elemanda elastisite modülü Denklem (13)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E_i^d = (1 - \alpha_i) E_i^u \quad (0 \leq \alpha_i \leq 1) \quad (i = 1, 2, \dots, ne) \quad (13)$$

Burada, üst simgeler $\mathbb{Q}$ ve $\mathbb{Q}$ sırasıyla hasarlı ve hasarsız durumları belirtmekte olup $\mathbb{Q}$ sonlu eleman modelindeki eleman sayısıdır. Hasarın sadece rijitliği değiştirdiği, yapı kütlelerinin değişmediği kabul edilmektedir. 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.

3.2 Gürültünün Modellenmesi

Gürültü, gerçek hayattaki durumları yansıtan çeşitli faktörlerden kaynaklanan ve deneysel modal testlerde karşılaşılan kaçınılmaz bir sorundur. 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 gerçekleştirilmiştir.

$$f_i^{noise} = \left(1 + \frac{\eta}{100} \times randn \right) f_i \quad (14)$$

$$\phi_{ij}^{noise} = \left(1 + \frac{\eta}{100} \times randn \right) \phi_{ij} \quad (15)$$

Burada, ω_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 [22].

3.3 Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti

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

Bilinmeyen değişkenler $x = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{ne}\}$

Amaç fonksiyonu $f(x)$

Sınırlayıcılar $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ($i = 1, 2, \dots, ne$)

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

$$f(x) = w_1 \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{f_i^E - f_i^C}{f_i^E} \right)^2} + w_2 \sqrt{\sum_{i=1}^{nm} [1 - \text{COMAC}(i)]^2} + w_3 \frac{\|F^E - F^C(x)\|_{Fro}}{\|F^C\|_{Fro}} \quad (16)$$

Burada ω_i i. frekansı, $\text{COMAC}(i)$ Koordinat Modal Güvence Kriterini, 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 [23, 24].

Koordinat Modal Güvence Kriteri,

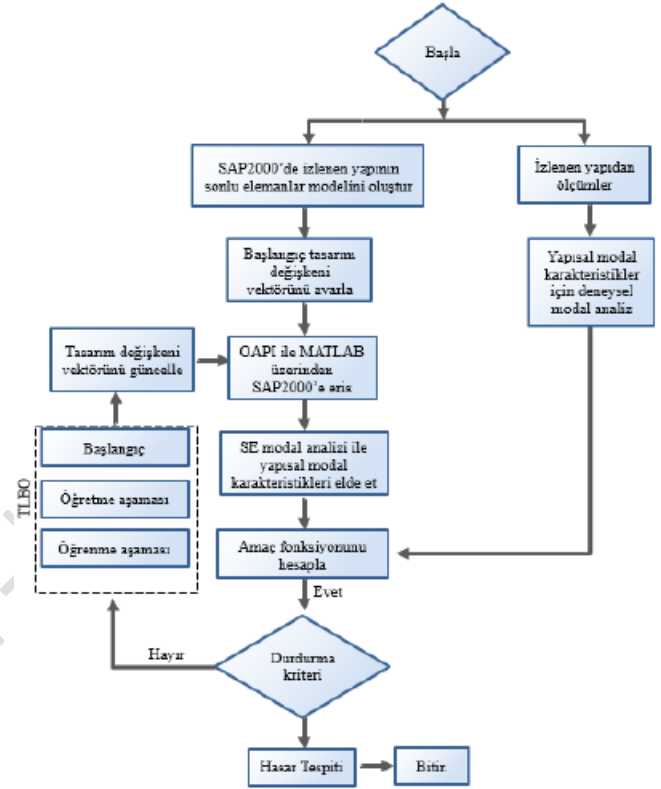
$$\text{COMAC}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{np} |(\phi_{ij}^T) \phi_{ij}^u|^2}{\sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^d)^2 \sum_{j=1}^{np} (\phi_{ij}^u)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, nm) \quad (17)$$

Esneklik matrisi,

$$F = \sum_{i=1}^{nm} \frac{1}{\omega_i^2} \Phi_i \Phi_i^T \quad (18)$$

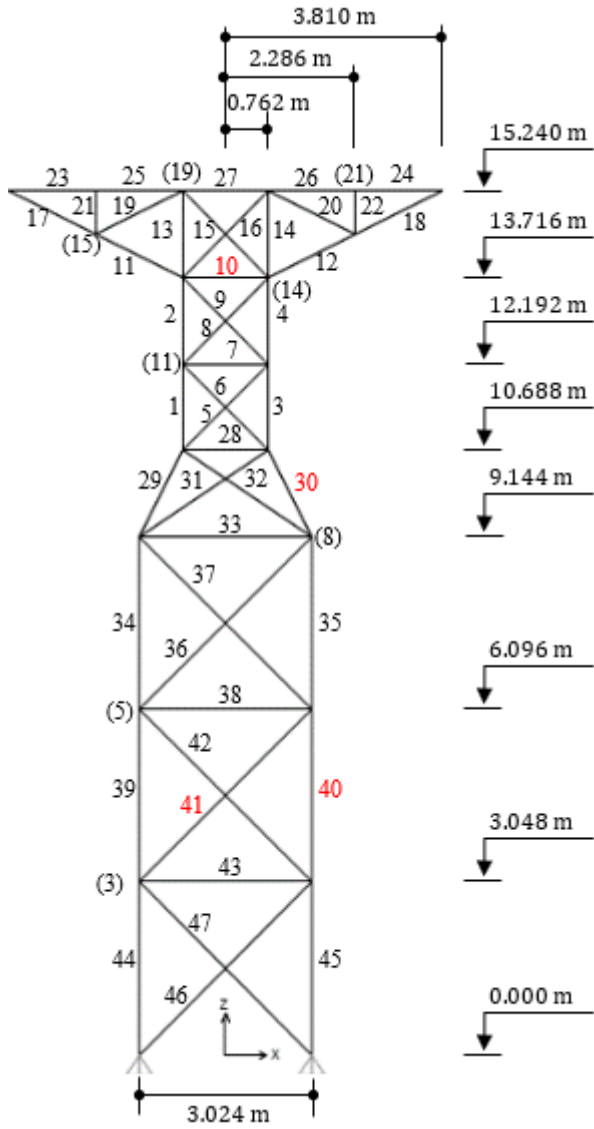
şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ϕ_{ij}^d durumuna ait j . deneysel mod şekil vektörünün i . serbestlik derecesine ait modal yer değiştirme değerini, ϕ_{ij}^u , u durumuna ait j . analitik mod şekil vektörünün i . serbestlik derecesine ait modal yer değiştirme değerini göstermektedir. np , mod şekillerinin elde edildiği koordinat sayısını, ω_i , i . doğal frekansı, η ise η . mod şekil vektörünü ifade etmektedir.

Optimizasyon sürecinde, $f(x)$ fonksiyonunu minimize eden x ile gösterilen rijitlik kaybı parametreleri kümesi (tasarım değişkenleri) yapı elemanlarının aranan hasar durumunu temsil etmektedir. x vektörünün her güncellenmesinde izlenen yapının sonlu eleman analizleri yenilenmektedir. SAP2000-OAPI fonksiyonları sayesinde MATLAB ile SAP2000 arasında sağlanan iki yönlü veri alışverişi analizleri yinelenmeli optimizasyon sürecini kolaylaştırarak otomatik bir şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 1'de verilmektedir [25].

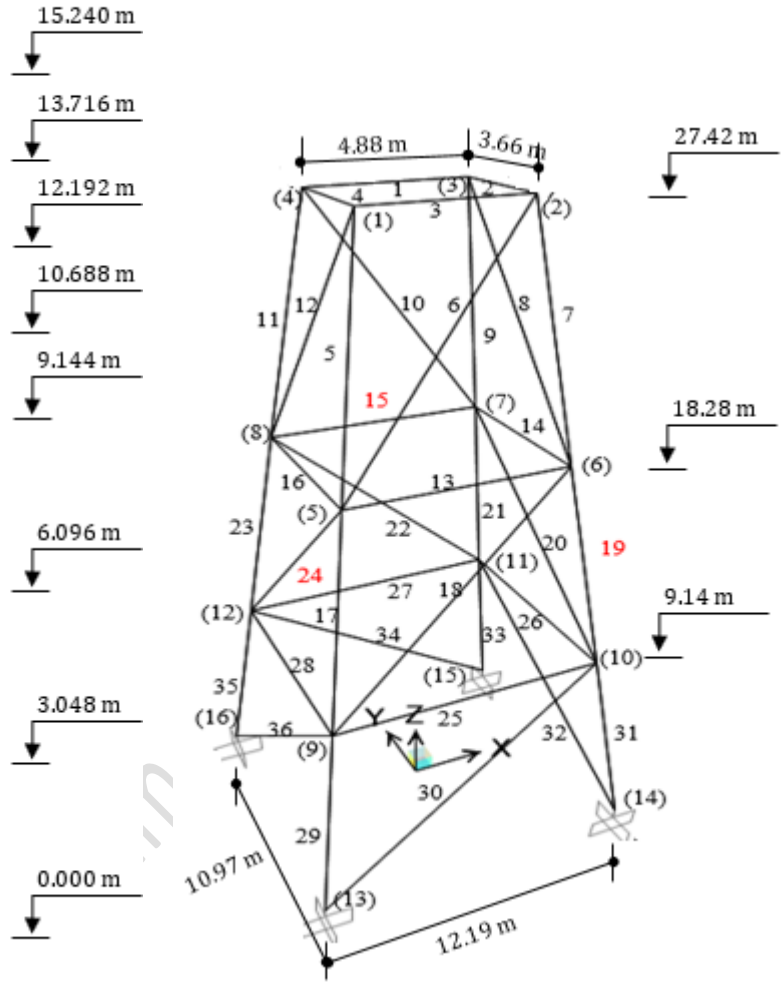


Şekil 1. Önerilen hasar tespit metodolojisinin akış şeması.

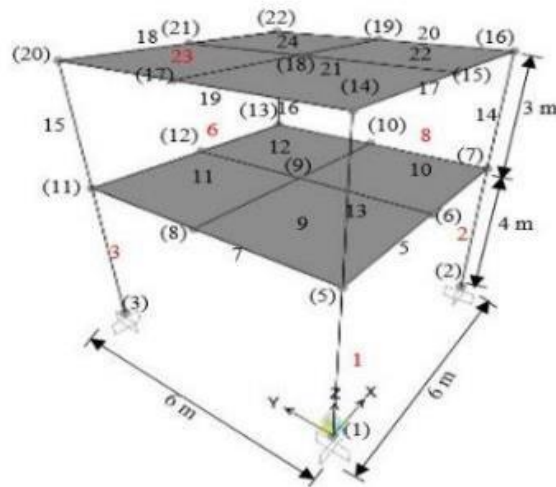
Figure 1. The flowchart of the proposed damage detection methodology.



(a) 47 çubuklu çelik düzlem kafes



(b) 52 çubuklu uzay kafes



(c) Üç boyutlu betonarme çerçeve

Şekil 2. Test için kullanılan modeller.

Figure 2. Model considered in this study.

3.4 47-Elementli Düzlem Kafes

Önerilen yöntemin test edilmesi için ilk olarak, Das ve Dhang [22]'in çalışmalarında yer alan 47 elementli çelik düzlem kafes sistemi örneği seçilmiştir. Şekil 2a'da geometrisi verilen modelde 47 eleman ve 22 düğüm noktası bulunmaktadır. Modelde her bir düğümde iki serbestlik olduğu için toplam serbestlik derecesi 44'tür. Çelik malzeme kullanılarak oluşturulan taşıyıcı sistemde, birim kütle 8304 kg/m^3 , Poisson oranı 0.30 ve elastisite modülü ise 206843 MPa olarak belirlenmiştir. Tüm elemanlar, dış çapı 4.057 cm ve et kalınlığı 1.93 cm olan boru kesitte tasarlanmıştır.

Tablo 1'de verilen dört farklı hasar senaryosu dikkate alınarak önerilen model test edilmiştir. Modelin ilk 16 doğal frekansı ve mod şekilleri kullanılarak hasar tahmini yapılmaktadır. Yapının 3, 5, 8, 11, 14, 15, 19 ve 21 numaralı düğüm noktalarına yerleştirildiği kabul edilen 8 adet sensör yardımıyla titreşim verileri alınmaktadır. Dolayısı ile indirgenmemiş sonlu eleman modelinin toplam serbestlik derecesinin yaklaşık %36.36'sı dikkate alınmış olmaktadır. Her bir hasar senaryosu için beş farklı koşum yapılar belirlenen hasar şiddetlerinin ortalaması (Ort.) ve standart sapma (Std. sp.) değerleri ile Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 1. 47-elementli düzlem kafes için dikkate alınan hasar senaryoları.

Table 1. Damage scenarios for 47-bar planar truss.

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

Tablo 2. 47-elementli düzlem kafes için beş bağımsız koşumdan elde edilen sonuçlar.

Table 2. Statistical results of five independent runs for each scenario for 47-bar planar truss.

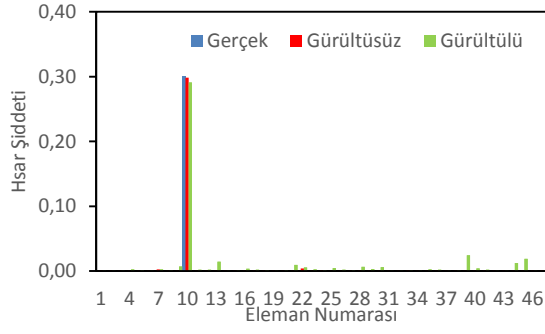
Senaryo	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
Gürültüsüz								
1	$\alpha_{10} = 0.30$	0.30159	0.29669	0.29912	0.29662	0.29928	0.29866	0.00185
2	$\alpha_{30} = 0.30$	0.29906	0.29767	0.30004	0.29847	0.29965	0.29898	0.00084
3	$\alpha_{10} = 0.30$	0.29703	0.29091	0.28836	0.29296	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
Gürültülü								
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

Senaryo 1 ve 2'de hesaplanan standart sapma değerleri sonuçların oldukça tutarlı olduğunu göstermektedir. Senaryo 3'te ise standart sapma değerleri ilk iki senaryoya göre daha büyük olmasına rağmen hasar oranları gerçek orana oldukça yakın çıkmıştır. Diğer senaryolara göre daha uzak hasar oranı veren Senaryo 4 hasarlı eleman sayısının artmasının hasar tahminini zorlaştırdığını göstermektedir. Ancak genel olarak hasar şiddetleri küçük hata yüzdeleriyle belirlenmiştir. Gürültünün varlığı beklendiği gibi standart sapma değerlerini arttırmıştır. Veri setinde daha fazla varyasyon yaratan gürültü sonuçların tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini azaltmaktadır.

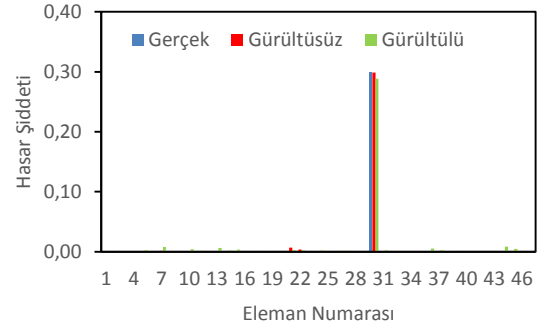
Hesaplanan ortalama hasar şiddetleri her bir hasar senaryosu için Şekil 3'te ayrı ayrı verilmektedir. Gürültülü ve gürültüsüz

ortamlarda hesaplanan hasar şiddetlerinin genel olarak doğru bir şekilde hesaplandığı söylenebilir. Gürültüden kaynaklanan yanlış alarmların 3 ve 4 numaralı hasar senaryolarında daha belirgin olduğu görülmektedir. Ancak ihmal edilebilir büyüklükte olduğu görülen yanlış alarmların önerilen yöntemin doğruluğunu önemli ölçüde etkilemediği söylenebilir.

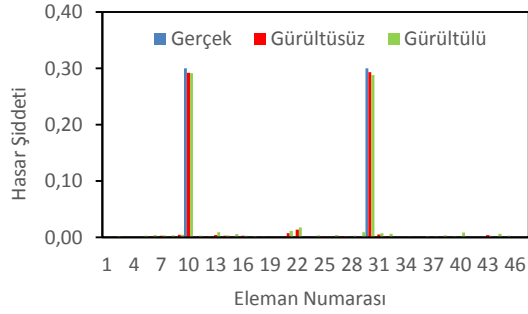
Hasar senaryosu 3'ün yakınsama geçmişi Şekil 4'te verilmektedir. Amaç fonksiyonunun hızlı bir düşüş sergilediği ve ilk 40 iterasyon sonunda yataya yakın bir seyir sergilediği görülmektedir. Ancak gürültülü durumda bir miktar daha yüksek değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu, gürültünün hasar belirleme sürecinde dikkate alınması gereken önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.



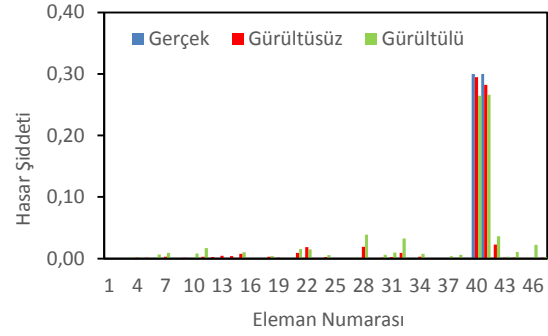
(a) Senaryo 1



(b) Senaryo 2



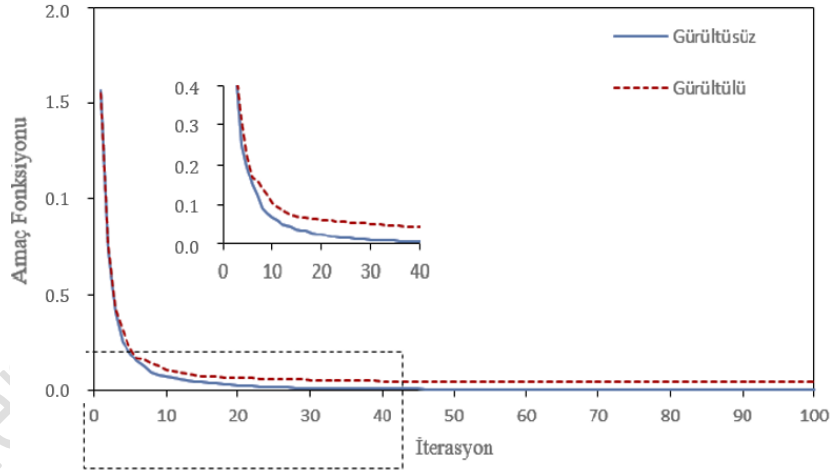
(c) Senaryo 3



(d) Senaryo 4

Şekil 3. 47 çubuklu düzlem kafes için hasar şiddetleri.

Figure 3. Damage ratios for 47-bar planar truss.



Şekil 4. Senaryo 3 için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği.

Figure 4. Convergence history for scenario 3 of 47-bar planar truss.

3.5 52-Elementli Uzak Kafes

36 elemanlı uzak kafes sistem ikinci örnek olarak seçilmiştir. Kafes sistemde boru kesite sahip çubukların dış çapı 17.8 cm ve et kalınlığı 0.89 cm'dir. Kat yüksekliği 9,14 m olan modelin oturum alanı 10.97×12.19 m ölçülerine sahiptir. Yapının yükseldikçe daralan planı en üst noktada 3.66×4.88 m ölçülerine düşmektedir. Malzemenin Poisson oranı 0.30 ve elastisite modülü 210000 MPa'dır (Şekil 2b).

Titreşim verilerinin 1, 3, 5, 7, 9 ve 11 numaralı düğüm noktalarına yerleştirilen 6 adet sensör yardımıyla alındığı kabul edilen model, Tablo 3'te verilen dört farklı hasar senaryosu altında test edilmiştir. Buna göre, toplam serbestlik derecesinin %37.5'i temsil edilebilmektedir. Her bir senaryo için beş farklı koşumdan elde edilen hasar şiddetlerinin ortalaması (Ort.) ve standart sapma (Std. sp.) değerleri ile Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 3. 36-elemanlı uzay kafes için dikkate alınan hasar senaryoları.

Table 3. Damage scenarios for 36-bar space truss.

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

Tablo 4. 36-elemanlı uzay kafes için beş bağımsız koşumdan elde edilen sonuçlar.

Table 4. Statistical results of five independent runs for each scenario for 36-bar space truss.

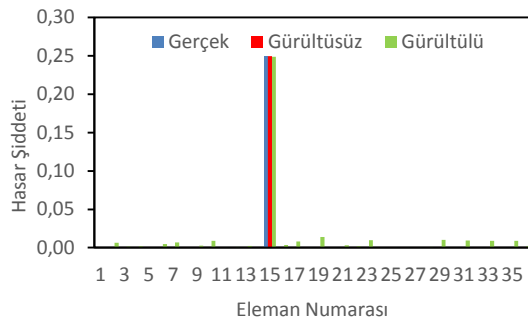
Senaryo	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
Gürültüsüz								
1	$\alpha_{15} = 0.25$	0.24897	0.24970	0.24873	0.24966	0.24914	0.24925	0.00038
2	$\alpha_{19} = 0.25$	0.24944	0.24916	0.24947	0.24940	0.24970	0.24943	0.01700
3	$\alpha_{24} = 0.25$	0.24966	0.24969	0.24963	0.24959	0.24990	0.24970	0.00011
4	$\alpha_{15} = 0.25$	0.24852	0.24793	0.24581	0.25026	0.24514	0.24753	0.00185
	$\alpha_{19} = 0.15$	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
Gürültülü								
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
4	$\alpha_{15} = 0.25$	0.25238	0.25111	0.25678	0.24465	0.25087	0.24116	0.00388
	$\alpha_{19} = 0.15$	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

Beş farklı koşum yapılarak belirlenen hasar şiddetleri gerçek duruma oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Hesaplanan standart sapmalarda oldukça küçük çıkmıştır. Senaryo 4'te üç farklı elemanda hasar bulunmasına rağmen algoritma hasar şiddetini ve hasarlı elemanı belirlemeyi başarmıştır. Sonuçlar önerilen algoritmanın gürültüsüz koşullarda oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Gürültülü durumda standart sapmalar biraz artmakla ve bazı elemanlarda sapmalara yol açmakla birlikte yeterli doğrulukta sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Algoritmanın gürültüye karşı yeterli dayanıklılığa sahip olduğu söylenebilir.

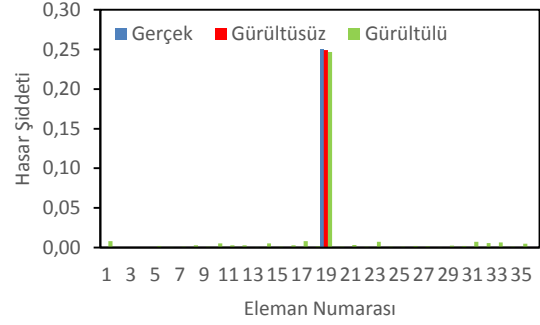
Gürültülü ve gürültüsüz ortamlar için hesaplanan ortalama hasar şiddetleri ayrı ayrı Şekil 5'te verilmektedir. Grafiklerden

görüldüğü gibi hasarlı eleman ve hasar şiddetleri başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Hasarsız elemanlarda oldukça küçük ve ihmal edilebilir düzeyde hasar şiddetleri hesaplanmıştır. Gürültülü ortamlarda yanlış alarmların daha belirgin olduğu görülmektedir. Yanlış alarmların ihmal edilebilir seviyede olduğu ve algoritmanın doğruluğu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

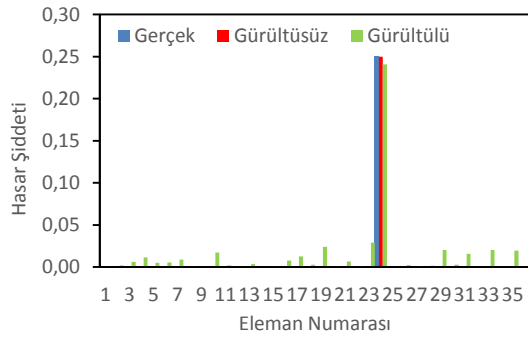
Şekil 6'da hasar senaryosu 3 için verilen amaç fonksiyonu değerinin gürültüsüz ve gürültülü koşullarda ilk 10 iterasyon içinde hızlıca yakınsadığı görülmektedir. Sonrasında eğrinin nispeten yatay durumda seyrederek büyük iyileştirmelerin azaldığı görülmektedir.



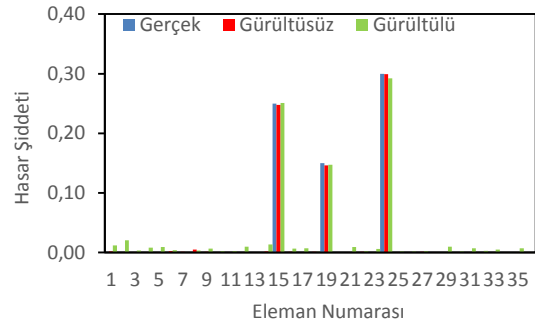
(a) Senaryo 1



(b) Senaryo 2



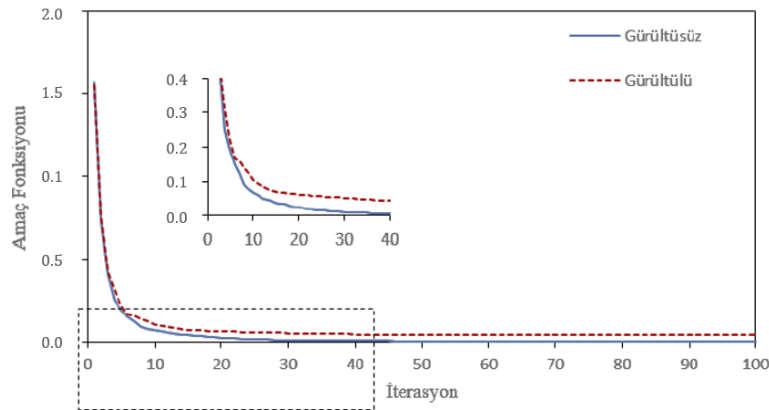
(c) Senaryo 3



(d) Senaryo 4

Şekil 5. 36 çubuklu uzay kafes için hasar şiddetleri.

Figure 5. Damage ratios for 36-bar space truss.



Şekil 6. Senaryo 3 için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği.

Figure 6. Convergence history for scenario 3 of 36-bar spacer truss.

3.6 Üç Boyutlu Çerçeve Sistem

Son sayısal örnek olarak seçilen 22 düğüm noktalı betonarme üç boyutlu çerçeve sistem Şekil 2c'de verilmektedir. Sonlu eleman modeli 6 çubuk ve 8 plak eleman olmak üzere toplam 24 elemandan oluşan betonarme çerçeve sistem iki doğrultuda 6'şar metre açıklığa sahiptir. İki katlı olan betonarme üç boyutlu çerçeve toplam 7 metre yüksekliğindedir. Birinci kat 4 m ve ikinci kat 3 m yüksekliğe sahiptir. Kolon kesitleri 300×300 mm, kiriş kesitleri 250×400 mm ve döşeme kalınlığı 120 mm olarak alınmıştır. Döşemeler dört eşit elemana bölünerek modellenmiştir. Betonarmenin yoğunluğu 2500 kg/m³,

Tablo 5. Betonarme üç boyutlu çerçeve için dikkate alınan hasar senaryoları.

elastisite modülü 30000 MPa ve Poisson oranı 0.20 olarak alınmıştır.

Tablo 5'te verilen üç farklı senaryo için test edilen modelin dinamik ölçümleri 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 ve 34 numaralı düğümlere konumlandırılan sensörler yardımıyla alınmıştır. Bu durum indirgenmemiş sonlu eleman modelinin toplam yaklaşık %45'ine karşılık gelmektedir. Analiz sonucunda beş farklı koşumdan elde edilen hasar şiddetleri, hasar şiddetlerinin ortalamaları (Ort.) ve standart sapma (Std. sp.) değerleri ile Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 5. Damage scenarios for 3D reinforced concrete frame.

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

Tablo 6. Betonarme üç boyutlu çerçeve için beş bağımsız koşumdan elde edilen sonuçlar.

Table 6. Statistical results of five independent runs for each scenario for 3D reinforced concrete frame.

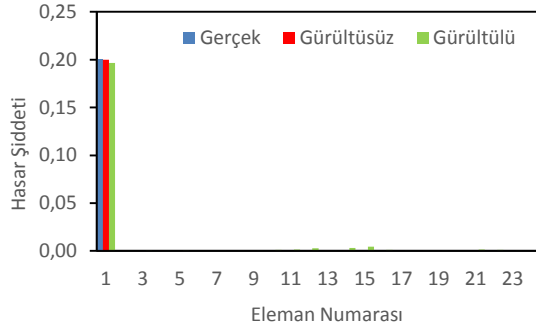
Senaryo	Gerçek	Koşum 1	Koşum 2	Koşum 3	Koşum 4	Koşum 5	Ort.	Std. sp.
Gürültüsüz								
1	$\alpha_1 = 0.20$	0.19976	0.19986	0.20006	0.20046	0.20009	0.20005	0.00024
2	$\alpha_2 = 0.30$	0.29909	0.28625	0.29789	0.29787	0.27934	0.29209	0.00791
	$\alpha_6 = 0.20$	0.19575	0.18896	0.19524	0.19746	0.18542	0.19256	0.00459
3	$\alpha_3 = 0.25$	0.24156	0.24683	0.22610	0.24992	0.23935	0.24075	0.00823
	$\alpha_8 = 0.20$	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
Gürültülü								
1	$\alpha_1 = 0.20$	0.18006	0.20431	0.19914	0.24576	0.24648	0.24880	0.00219
2	$\alpha_2 = 0.30$	0.27652	0.30615	0.27675	0.23955	0.25373	0.24673	0.01700
	$\alpha_6 = 0.20$	0.20734	0.20051	0.19265	0.23584	0.23590	0.24072	0.00975
3	$\alpha_3 = 0.25$	0.24156	0.22616	0.20032	0.24465	0.25087	0.24116	0.00388
	$\alpha_8 = 0.20$	0.18520	0.15292	0.18474	0.15349	0.14847	0.14753	0.01281
	$\alpha_{23} = 0.25$	0.25171	0.24805	0.26728	0.29704	0.28410	0.29229	0.00459

Sonuçların oldukça güvenilir ve standart sapma değerlerinin yeterince düşük olduğu görülmektedir. Birden fazla elemanda hasar bulunan senaryolarda sapmalarda artışlar meydana geldiği görülmekle birlikte sapmaların kabul edilebilir düzeyde olduğu ve hasar şiddetlerinin başarılı bir şekilde belirlendiği görülmektedir. Gürültülü durumlarda hasar tahmini olumsuz etkilenmesine ve standart sapmaların artmasına rağmen hasar şiddetlerinin kabul edilebilir seviyelerde hesaplandığı görülmektedir.

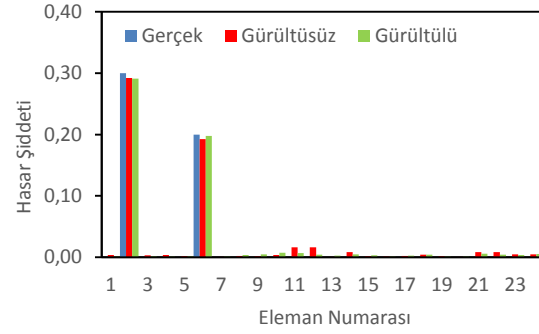
Betonarme üç boyutlu çerçeve sistem örneği için gürültünün hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlarda hesaplanan ortalama hasar şiddetleri, farklı hasar senaryoları için Şekil 7’de verilmektedir. Şekillerden belirlenen hasar şiddetlerinin gerçekte hasarlı olan elemanlarda yoğunlaştığı, hasarsız

elemanlarda ise oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Özellikle 2 ve 3 numaralı senaryolarda daha belirgin olan yanlış alarmların ihmal edilebilir seviyede olduğu ve algoritmanın başarısını önemli ölçüde etkilemediği görülmektedir. Özellikle gürültülü koşullarda elde edilen sonuçlar algoritmanın gürültüye karşı dayanıklılığını göstermektedir.

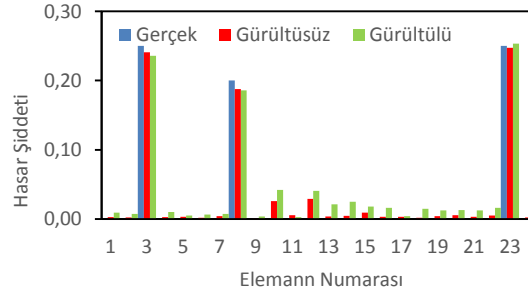
Şekil 7’de Senaryo 3 için verilen yakınsama grafiğinden başlangıçta amaç fonksiyonu değerinin hızla düştüğü anlaşılmaktadır. Özellikle ilk 20 iterasyona kadar eğrilerde önemli bir düşüş meydana gelerek büyük ölçüde yakınsama görülmektedir. Beklenildiği gibi gürültünün süreci negatif yönde etkilediği ve gürültünün hesaba katılmadığı duruma göre daha büyük bir değere yakınsadığı görülmektedir.



(a) Senaryo 1



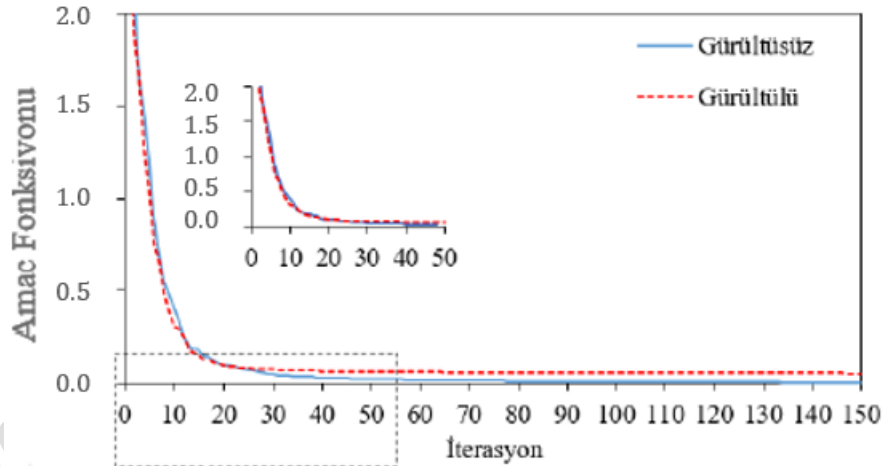
(b) Senaryo 2



(c) Senaryo 3

Şekil 7. Üç boyutlu betonarme çerçeve için hasar şiddetleri.

Figure 7. Damage ratios for 3D-reinforced concrete frame.



Şekil 8. Senaryo 3 için amaç fonksiyonunun yakınsama grafiği.

Figure 8. Convergence history for scenario 3 of 3D reinforced concrete frame.

3.7 Önerilen Yöntemin Performans ve Başarı Analizi

Bilindiği gibi yapısal sağlık izleme ve hasar tespiti alanlarında algoritmaların verimliliğini ve başarısını ölçmek kritik öneme sahiptir. Bunun için kullanılan çeşitli performans değerlendirme metrikleri bulunmaktadır. Geniş bir kullanım alanına sahip RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası) bu metriklerden biridir. İstatistik ve mühendislik alanlarında tahmin modellerinin performansını değerlendirmek amacıyla geliştirilen bir istatistiksel ölçüttür.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\alpha_i - \hat{\alpha}_i)^2}{n}} \quad (19)$$

I_1 ve I_2 indeksleri de yine bu amaçla kullanılan metriklerdir. Özellikle yapısal hasar tespiti çalışmalarında algoritmaların hasarlı ve hasarsız elemanları ne derece doğru belirlediğini ölçmek için oluşturulmuş özel performans göstergeleridir. Hasarlı tahminindeki mutlak hatayı ve yanlış tahminlerin toplam hasar değerini ölçerek, yöntemin genel verimliliğini ortaya koymak için kullanılırlar. Performans değerlendirmesi

açısından, Vaez ve Fallah [26] tarafından önerilen aşağıdaki hata indeksleri kullanılmıştır.

$$I_1 = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\alpha_i - \hat{\alpha}_i}{\alpha_i} \right| \times 100 \quad (20)$$

$$I_2 = \sum_{i=1}^{n-m} \hat{\alpha}_{i,mis} \quad (21)$$

Burada α_i i. hasarlı elemanın gerçek hasarını, $\hat{\alpha}_i$ algoritma kullanılarak aynı elemanın tahmini hasarını ve $\hat{\alpha}_{i,mis}$ i. hasarsız eleman için algoritmanın hesaplamış olduğu hasarı göstermektedir. m ve n sırasıyla yapıdaki hasarlı eleman ve toplam eleman sayısına karşılık gelmektedir. Üç farklı sayısal örnek için hesaplanan I_1 ve I_2 hata indisleri ile ortalama karekök hata (RMSE) değerleri Tablo 7’de sunulmaktadır.

Tablo 7. Her bir örnek için hesaplanan RMSE, I_1 ve I_2 hata indisleri.

Table 7. The error indices RMSE, I_1 and I_2 calculated for each example.

Model	Senaryo	Gürültüsüz			Gürültülü		
		I_1	I_2	RMSE*	I_1	I_2	RMSE
Düzlem Kafes	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	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 betonarme çerçeve	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	10.88930	0.12172	0.00925	12.64258	0.29957	0.01706

Düzlem kafes sistem örneğinde, gürültüsüz koşullar altında incelenen tek elemanlı hasar senaryoları (Senaryo 1 ve 2) için hesaplanan hata indislerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık, iki elemanlı hasar senaryolarında (Senaryo 3 ve 4) hata göstergelerinde belirgin bir artış meydana gelmektedir. Gürültülü durumlarda da benzer bir eğilim görülmekte olup, bu koşullarda elde edilen hata indisleri gürültüsüz duruma kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Uzay kafes sistemine ait tek elemanlı hasar senaryolarında (Senaryo 1, 2 ve 3) hesaplanan hata indislerinin, önerilen yöntemin etkinliğini açıkça ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. İkinci örnekte de ilk örnekte olduğu gibi, gürültülü ortamda hesaplanan hata göstergeleri, gürültüsüz duruma göre daha yüksek çıkmaktadır. Üç boyutlu betonarme çerçeve sistem örneğinde ise Senaryo 2 ve 3 için I_1 hata indislerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. İlk iki örnekte olduğu gibi, bu örnekte de gürültülü koşullarda hesaplanan hata indisleri, gürültüsüz duruma oranla daha büyük değerlere sahiptir. Genel olarak, I_2 ve RMSE indisleri incelenen tüm örneklerde sıfıra yakın ve kabul edilebilir seviyelerde bulunmuştur. Ancak, bazı senaryolarda I_1 indisi yüksek değerler göstermiştir. Vaez ve Fallah [26] tarafından yapılan çalışmada da ifade edildiği üzere, bu indisin tek başına algoritmanın performansını kesin bir şekilde değerlendirmek için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Tüm indisler birlikte ele alındığında, önerilen yöntemin yüksek düzeyde bir performans sergilediği sonucuna ulaşılmaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, titreşim verilerinden yararlanarak kafes ve çerçeve taşıyıcı sistemlerde optimizasyon tabanlı bir hasar tespiti yöntemi geliştirilmiştir. SAP2000 yazılımında modellenen yapılar üzerinde gerçekleştirilen modal analizlerin sonuçları, SAP2000-OAPI entegrasyonu aracılığıyla MATLAB ortamına aktarılmış ve burada yazılan optimizasyon kodu ile

işlenmiştir. Hasarın konumu ve boyutunun belirlenmesi amacıyla TLBO algoritması kullanılmıştır.

Yöntem, gürültünün dahil edildiği ve edilmediği durumlar ayrı ayrı ele 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 çeşitli hasar senaryoları oluşturulmuş ve her senaryo için beş bağımsız koşum gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği, I_1 ve I_2 hata indisleri ile RMSE değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen temel bulgular aşağıda sunulmaktadır.

- Gürültüsüz koşullarda gerçekleştirilen analizler, önerilen yöntemin hasar tespitinde yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur. Gürültülü koşullarda ise standart sapma değerlerinde artış gözlemlenmesine rağmen, yöntem yeterli hassasiyetini koruyarak güvenilir sonuçlar üretmeyi başarmıştır.
- Çalışmada önerilen yöntemle yapılan koşumlar neticesinde elde edilen sonuçların standart sapmaları genellikle %2’nin altında olduğu görülmektedir. Bu durum algoritmanın doğasında bulunan rasgele değer atama işleminin sonuçlar üzerinde çok fazla etkisi olmadığını göstermektedir. Standart sapmalarında çok fazla artış görülen senaryolar, çoklu hasar içeren ve görel olarak daha kompleks durumlardır. Bu tür hasar senaryolarında koşum sayısının artırılması önerilmektedir. Böylece, standart sapma değerlerinin diğerlerinde olduğu gibi küçülerek daha makul seviyelere ulaşması beklenmektedir.

- Yöntemin, farklı yapı tipleri ve çeşitli hasar senaryoları üzerinde tutarlı sonuçlar üretmesi, geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir.
- SAP2000-OAPI fonksiyonlarının kullanımı, modal analizlerin gerçekleştirilmesinde yöntemle önemli bir esneklik kazandırmaktadır. Bu fonksiyonlar sayesinde yöntem, büyük ve karmaşık yapı sistemlerine kolayca uyarlanabilmektedir.
- Çalışmanın sonucunda, önerilen optimizasyon tabanlı hasar tespit yönteminin Yapı Sağlık İzleme alanına önemli bir katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, yapı güvenliğini artırmak amacıyla mühendislik uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.
- TLBO algoritması başarılı sonuçlar elde etmiş olsa da, farklı optimizasyon algoritmalarının hasar tespiti sürecine entegre edilmesiyle hibrit yaklaşımlar geliştirilebilir ve yöntemin daha geniş bir uygulama alanında etkinliği artırılabilir.
- Geliştirilen yöntemin gerçek zamanlı verilerle test edilmesi, pratik mühendislik uygulamalarına yönelik ek faydalar sağlayabilir.
- Köprüler, yüksek binalar ve tarihi yapılar gibi daha büyük ve karmaşık yapı sistemleri üzerinde test edilmesi, yöntemin uygulama alanını genişletebilir.
- Özellikle büyük ve karmaşık yapılar için, tasarım değişkeni vektörünü belirli aşamalarda azaltan mekanizmalar entegre edilerek yöntemin çözüm hızı artırılabilir.

5 Conclusions

In this study, an optimization-based damage detection method was developed for truss and frame structural systems using vibration data. The results of the modal analyses performed on structures modeled in SAP2000 were transferred to MATLAB via SAP2000-OAPI integration and processed using an optimization code written in MATLAB. The TLBO algorithm was employed to determine the location and extent of the damage.

The method was tested on a 47-element steel planar truss system, a 36-element steel space truss system, and a 24-element three-dimensional reinforced concrete frame system, considering both noise-free and noisy conditions separately. Various damage scenarios were created for each example, and five independent runs were performed for each scenario. The effectiveness of the proposed method was evaluated by calculating the ϵ_1 and ϵ_2 error indices and RMSE values. The key findings obtained from the study are presented below.

- Analyses conducted under noise-free conditions have demonstrated that the proposed method achieves high accuracy in damage detection. Although an increase in standard deviation values was observed under noisy conditions, the method maintained sufficient precision and successfully produced reliable results.
- The results obtained from the runs performed using the proposed method in the study generally exhibit standard deviations below 2%. This indicates that the random initialization inherent to the algorithm has a minimal impact on the outcomes. Scenarios with significantly higher standard deviations correspond to more complex cases involving multiple damages.

For such damage scenarios, it is recommended to increase the number of runs, which is expected to reduce the standard deviation values to more reasonable levels, similar to those observed in other cases.

- The method's ability to produce consistent results across different structural types and various damage scenarios demonstrates its broad applicability.
- The use of SAP2000-OAPI functions provides significant flexibility in conducting modal analyses. These functions allow the method to be easily adapted to large and complex structural systems.
- The study concludes that the proposed optimization-based damage detection method makes a significant contribution to the field of Structural Health Monitoring. Additionally, it has been observed that the method can be effectively utilized in engineering applications to enhance structural safety.
- Although the TLBO algorithm has achieved successful results, hybrid approaches can be developed by integrating different optimization algorithms into the damage detection process, potentially increasing the method's effectiveness across a wider range of applications.
- Testing the developed method with real-time data could provide additional benefits for practical engineering applications.
- Expanding the method's application to larger and more complex structural systems, such as bridges, high-rise buildings, and historical structures, could further broaden its scope.
- Especially for large and complex structures, the speed of the method can be improved by integrating mechanisms that reduce the design variable vector at specific stages.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 ve 2 fikrin oluşması, kodların yazılması, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında; Yazar 3 ise tasarımın yapılması, literatür taraması, analizlerin yapılması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve metne dönüştürülmesi aşamalarında katkı sunmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır."

8 Kaynaklar

- [1] Rao MA, Srinivas J, Murthy B. "Damage Detection in Vibrating Bodies Using Genetic Algorithms". *Computers & Structures*, 82 (11-12), 963-968, 2004.
- [2] Huynh D, He J, Tran, D. "Damage Location Vector: A Non-Destructive Structural Damage Detection Technique". *Computers & Structures*, 83 (28-30), 2353-2367, 2005.
- [3] Jaishi B, Ren WX, Zong ZH, Lin JH. "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, 2006.

- [4] Yun GJ, Ogorzalek KA, Dyke SJ, Song W. "A Two-Stage Damage Detection Approach Based on Subset Selection and Genetic Algorithms". *Smart Struct Syst*, 5, 1–21, 2009.
- [5] Kang F, Li JJ, Xu Q. "Damage Detection Based on Improved Particle Swarm Optimization Using Vibration Data". *Applied Soft Computing*, 12, 2329–2335, 2012.
- [6] Kaveh A, Zolghadr A. "An Improved CSS For Damage Detection Of Truss Structures Using Changes in Natural Frequencies and Mode Shapes". *Advances in Engineering Software*, 80, 93–100, 2015.
- [7] Gomes GF, Mendez AD, Alexandrio PSL, Cunha SS, Anceletti AC. "A Review of Vibration Based Inverse Methods for Damage Detection and Identification in Mechanical Structures Using Optimization Algorithms and ANN". *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26, 883–897, 2019.
- [8] Mishra M, Barman SK, Maity D, Kumar D. "Ant lion optimization algorithm for structural damage detection using vibration data". *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9, 117–136, 2019.
- [9] Ho VL, Nguyen HD, Mousavi M, De Roeck G, Bui-Tien T, Gandomi AH, Abdel Wahab M. "A Hybrid Computational Intelligence Approach for Structural Damage Detection Using Marine Predator Algorithm and Feedforward Neural Networks". *Computers & Structures*, 252, 106568, 2012.
- [10] Abdolkhani A, Raoufi M. "A Genetic Optimization Algorithm for Automated Modal Parameter Identification and Damage Detection in Structures". *Engineering Structures*, 280, 115986, 2023.
- [11] Zacharakis I, Giagopoulos D. "Vibration-based damage detection using finite element modeling and the metaheuristic particle swarm optimization algorithm". *Sensors*, 22(14), 5079, 2022.
- [12] Ding Z, Li L, Wang X, Yu T, Xia Y. "Vibration-Based FRP Debonding Detection Using a Q-Learning Evolutionary Algorithm". *Engineering Structures*, 275, 115254, 2023.
- [13] Zar A, Hussain Z, Akbar M, Rabczuk T, Lin Z, Li S, Ahmed B. "Towards vibration-based damage detection of civil engineering structures: overview, challenges, and future prospects". *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 20, 591–662, 2024.
- [14] SAP2000 V21. "Structural and Earthquake Engineering Software". Computers and Structures, Inc. (2021). SAP2000 (Version 24.1.0) [Computer software]. Berkeley, CA, USA: CSI.
- [15] MATLAB. "The Language of Technical Computing". Mathworks, Natick, MA, USA, 2009.
- [16] Qu Z-Q. *Model Order Reduction Techniques*. Springer London, London, 2004.
- [17] Li D. "Discussion of Model Reduction and Reservation". *Procedia Eng*, 188, 354–361, 2017.
- [18] Guyan RJ. "Reduction of stiffness and mass matrices". *AIAA Journal*, 3, 380–380, 1965.
- [19] O'Callahan JC. "A Procedure for an Improved Reduced System (IRS) Model". In: *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, Las Vegas, 17–21, 1989.
- [20] Friswell MI, Mottershead JE. *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Springer Netherlands, Dordrecht, 1995.
- [21] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia DP. "Teaching–Learning–Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems". *Computer-Aided Design*, 43(3), 303–315, 2011.
- [22] Das S, Dhang N. "Damage identification of structures using incomplete mode shape and improved TLBO-PSO with self-controlled multi-stage strategy". *Structures*, 35, 1101–1124, 2020.
- [23] Kahya V, Şimşek S, Adıyaman G, Toğan, V. "Damage Detection in Anisotropic-Laminated Composite Beams Based on Incomplete Modal Data and Teaching–Learning–Based Optimization". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(11), 2022.
- [24] Şimşek S. Tabakalı Kompozit Kirişlerde Titreşim Verileri Yardımıyla Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti. Karadeniz Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, M.Sc. Thesis, Trabzon, Türkiye, 2024.
- [25] Sepil LD. Kafes ve Çerçeve Taşıyıcı Sistemlerde Titreşim Verileri Kullanılarak Optimizasyon Tabanlı Hasar Tespiti. Karadeniz Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, Trabzon, Türkiye, 2024.
- [26] Vaez HSR, Fallah N. "Damage Detection of Thin Plates Using GA-PSO Algorithm Based on Modal Data". *Arab J Sci Eng*, 42, 1251–1263, 2017.