

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KADEMELİ KİRİŞLERDE ÇATLAK TESPİTİ İÇİN TİTREŞİM
TABANLI DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ezgi SEVİLMİŞ

ARALIK 2025
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KADEMELİ KİRİŞLERDE ÇATLAK TESPİTİ İÇİN TİTREŞİM
TABANLI DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI**

Ezgi SEVİLMİŞ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12/ 12 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 29 / 12 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Volkan KAHYA

Trabzon 2025

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Ezgi SEVİLMİŞ Tarafından Hazırlanan**

**KADEMELİ KİRİŞLERDE ÇATLAK TESPİTİ İÇİN TİTREŞİM
TABANLI DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 09 / 2025 gün ve 2121 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANSTEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Volkan KAHYA

Üye : Prof. Dr. Murat YAYLACI

Üye : Doç. Dr. Gökhan ADIYAMAN

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Kademeli Kirişlerde Çatlak Tespiti İçin Titreşim Tabanlı Derin Öğrenme Yaklaşımı” isimli tez çalışmamın her aşamasında bilgi, deneyim ve yol göstericiliğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Volkan KAHYA'ya en derin şükranlarımı sunarım. Kendisi yalnızca akademik rehberliğiyle değil, aynı zamanda araştırma sürecine kazandırdığı bilimsel bakış açısı ve titizliğiyle bu tez çalışmasının şekillenmesine büyük katkı sağlamıştır. Onun yönlendirmeleri, araştırma disiplininin gelişmesinde ve bilimsel olgunluk kazanmamda önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca tez sürecinde bilgi ve tecrübelerini paylaşarak çalışmalarımın ilerleyişine değerli katkılar sunan Dr. Sebahat ŞİMŞEK'e teşekkür ederim. Tez süresi boyunca bana motivasyon sağlayan değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Yılmaz YILMAZ, Arş. Gör. Selenay GENÇCELEP ve Cemile DUMAN'a ayrıca teşekkür etmek isterim.

Hayatım boyunca yanımda olan aileme en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Özellikle, her zaman bana inanan, sabrı ve anlayışıyla en zor anlarımda yanımda duran sevgili anne ve babama, her zaman bana moral veren ve desteği ile motivasyon kaynağım olan kız kardeşime minnettarım. Bu tez çalışmasının, gelecekte yapılacak araştırmalara yardımcı olmasını ve alana katkı sağlayacak yeni çalışmalara ilham vermesini temenni ederim.

Ezgi SEVİLMİŞ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kademeli Kirişlerde Çatlak Tespiti İçin Titreşim Tabanlı Derin Öğrenme Yaklaşımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Volkan KAHYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 29/12/2025

Ezgi SEVİLMİŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Taraması.....	3
1.2.1. Yerel Esneklik Kavramı ile Analitik Modelleme.....	4
1.2.2. Optimizasyon Tabanlı Yöntemlerle Hasar Tespiti.....	11
1.2.3. Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Hasar Tespiti.....	16
1.3. Amaç ve Hedefler	19
1.4. Tezin Kapsamı	19
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	21
2.1. Problemin Tanımı	21
2.2. Yerel Esneklik Kavramı.....	23
2.3. Transfer Matrisi Yöntemi ile Analitik Modelleme	26
2.4. Hasar Tespit Metodolojisi.....	33
2.4.1. Senaryo Üretim Algoritması.	34
2.4.2. Veri Ön İşleme	36
2.4.3. Model Seçimi	37
2.4.4. Değerlendirme Protokolü	43
3. BULGULAR VE İRDELEME	46
3.1. Analitik Sonuçlar	41
3.1.1. Düzgün Doğrusal Kesitli Konsol Kiriş.	46
3.1.2. Kademeli Değişken Kesitli Kiriş.....	50
3.2. Makine Öğrenmesi ile Hasar Tespiti Sonuçları.....	54

3.2.1. Sentetik Veri Dağılımı Değerlendirmesi.....	55
3.2.2. Model Değerlendirmesi.....	58
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72
5. KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

KADEMELİ KİRİŞLERDE ÇATLAK TESPİTİ İÇİN TİTREŞİM TABANLI DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI

Ezgi SEVİLMİŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Volkan KAHYA
2025, 79 Sayfa

Yapı Sağlığı İzlemesi (YSİ), mühendislik yapılarının güvenliğinin korunması, hizmet ömrünün uzatılması ve olası hasarların erken dönemde tespit edilmesi açısından son derece önemli bir araştırma alanıdır. Bu kapsamda, taşıyıcı elemanlarda meydana gelen hasarlar, kesitin yerel rijitliğini azaltarak titreşim davranışında değişikliklere yol açar. Titreşim tabanlı hasar tespit yöntemlerinde bu değişimler, doğal frekanslar ve mod şekillerindeki farklılıklar üzerinden izlenir.

Bu tez çalışmasında kademeli elastik kirişlerde titreşim verileri kullanılarak derin öğrenme tabanlı bir hasar tespit yöntemi önerilmiştir. Modelin eğitimi için gerekli veri çatlaklı kirişin analitik modelinden elde edilmiştir. Analitik modelde, kiriş üzerindeki çatlaklar kütesiz dönel yay modeli ile temsil edilerek yerel esneklik katsayıları elde edilmiştir. Frekans denklemi, Transfer Matrisi Metodu (TMM) kullanılarak türetilmiştir. Farklı hasar senaryoları ve sınır şartları için kirişin doğal frekans ve mod şekli eğriliğini içeren kapsamlı bir sentetik modal veri seti oluşturulmuştur. Bu sentetik veri, bir boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı (1D-CNN) modeli ile kullanılarak kiriş üzerinde çatlak konum ve şiddetleri tahmin edilmiştir.

Çalışmada, analitik modelin sağladığı doğruluk ile yapay zekâ temelli modellerin genelleme kapasitesi bir araya getirilerek kademeli kirişler için farklı sınır koşullarına uyarlanabilir, hızlı ve güvenilir bir titreşim tabanlı hasar tespit yaklaşımı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yapı Sağlığı İzlemesi; Kademeli kiriş; Yerel esneklik; Hasar tespiti; Transfer Matrisi Metodu; Derin Öğrenme

M.Sc. Thesis

SUMMARY

VIBRATION-BASED DEEP LEARNING APPROACH FOR CRACK DETECTION IN STEPPED BEAMS

Ezgi SEVİLMİŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering, Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Volkan KAHYA
2025, 79 Pages

Structural Health Monitoring (SHM) is an extremely important research area for maintaining the safety of engineering structures, extending their service life, and detecting potential damage early. In this context, damage occurring in load-bearing elements reduces the local rigidity of the cross-section, leading to changes in vibration behavior. In vibration-based damage detection methods, these changes are monitored through differences in natural frequencies and mode shapes.

This thesis proposes a deep learning-based damage detection method using vibration data in stepped elastic beams. The data required for training the model was obtained from the analytical model of a cracked beam. In the analytical model, cracks on the beam were represented by a massless rotational spring model, and local flexibility coefficients were obtained. The frequency equation was derived using the Transfer Matrix Method (TMM). A comprehensive synthetic modal dataset containing the natural frequency and mode shape curvature of the beam was created for different damage scenarios and boundary conditions. This synthetic data was used with a 1D Convolutional Neural Network (1D-CNN) model to predict crack location and intensity on the beam.

This study combines the accuracy provided by analytical models with the generalization capabilities of AI-based models to develop a fast and reliable vibration-based damage detection approach adaptable to different boundary conditions for stepped beams.

Keywords: Structural Health Monitoring; Stepped beam; Local flexibility; Damage detection; Transfer Matrix Method; Deep Learning

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kademeli değişken kesitli kirişin geometrisi ve koordinat takımı.....	22
Şekil 2. Genel yükleme koşulları altında dairesel ve dikdörtgen kesite sahip çatlaklı kiriş elemanları	23
Şekil 3. Çatlak düzleminde tanımlı ζ - η yerel koordinat takımı (a) Dikdörtgen kesitli kiriş (b) Dairesel kesitli kiriş	25
Şekil 4. Çatlaklı kesitte kütsüz dönel yay tanımı	27
Şekil 5. Hasar tespit metodolojisi akış diyagramı.	34
Şekil 6. Önerilen 1D-CNN tabanlı çok girişli-çok başlı regresyon modelinin mimarisi	41
Şekil 7. Düzgün doğrusal kesitli konsol kirişin geometrisi.....	45
Şekil 8. Düzgün doğrusal kesitli konsol kirişte hasar senaryoları.....	46
Şekil 9. Düzgün doğrusal kesitli hasarsız konsol kirişin ilk altı mod şekli.....	48
Şekil 10. Düzgün doğrusal kesitli hasarlı konsol kirişin (Hasar 4) ilk altı mod şekli.....	48
Şekil 11. Kademeli kirişin genel geometrik formu	49
Şekil 12. Hasarsız ve hasarlı durum için mod şekillerinin karşılaştırılması	52
Şekil 13. Hasar-5 durumunda mod şeklinde çatlaklı kesitlerde ani eğim değişimleri	53
Şekil 14. Tek sınır şartı altında bir çatlaklı basamaklı kiriş senaryolarında konum ve derinlik dağılımları.....	54
Şekil 15. Tek sınır şartı altında iki çatlaklı basamaklı kiriş senaryolarında konum, derinlik ve çatlaklar arası mesafe dağılımları.	55
Şekil 16. Tek sınır şartı altında üç çatlaklı basamaklı kiriş senaryolarında konum, derinlik ve çatlaklar arası mesafe dağılımları.	56
Şekil 17. $k = 1$ için c1 çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri	60
Şekil 18. $k = 2$ için c1 çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri.....	61
Şekil 19. $k = 2$ için c2 çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri.....	62
Şekil 20. $k = 3$ için c1 çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri	63
Şekil 21. $k = 3$ için c2 çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri.....	64
Şekil 22. $k = 3$ için c3 çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri.....	65
Şekil 23. Konum tahmini için sınır koşullarına göre normalize ortalama mutlak hata (nMAE, %) dağılımı	66
Şekil 24. Derinlik oranı (d/h) tahmini için sınır koşullarına göre normalize ortalama mutlak hata (nMAE, %) dağılımı.....	67

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Yaygın sınır koşulları altında yay sabitlik katsayıları.....	21
Tablo 2. Farklı öğrenme yaklaşımlarının metrikler üzerinden karşılaştırılması	40
Tablo 3. Hiper parametreler ve tarama ağırlıkları.....	42
Tablo 4. Düzgün doğrusal kesitli konsol kirişin farklı hasar senaryoları altında doğal frekansları.....	47
Tablo 5. Basamaklı kirişin doğal frekanslarının farklı sınır koşulları altında karşılaştırılması	50
Tablo 6. Grid Search sonuçları: En iyi 10 hiper parametre kombinasyonu ve performans Değerleri	58
Tablo 7. Konum ve derinlik tahminleri için sınır koşulu bazlı değerlendirme metrikleri.....	68

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Kesit alanı
a	: Çatlak derinliği
A_c	: Çatlak kesiti alanı
b	: Dikdörtgen kesit genişliği
$B_{i,j}$	: i . basamağın j . parçasının katsayılar matrisi
C	: Yerel esneklik katsayısı
$C_{i,j}$	: i . basamağın j . parçasının esneklik matrisi
C_{55}	: Eğilme momentine karşılık gelen esneklik bileşeni
C_{ij}	: Esneklik katsayısı matris bileşeni
c_i	: Çatlak numarası
D	: Dairesel kesit çapı
D_{tahmin}	: Model tarafından tahmin edilen değer
$D_{gerçek}$	: Ölçülen/hesaplanan gerçek değer
dx_{ij}	: İki çatlak arası mesafe
E	: Elastisite modülü
E'	: Düzlem şekil değiştirme durumunda elastisite modülü
F_{ni}	: Boyutsuz çatlak şekil fonksiyonu
h	: Dikdörtgen kesit yüksekliği
$H(\lambda)$	: Boyutsuz bir integral fonksiyonu
I	: Atalet momenti
I_c	: Dairesel kesitin atalet momenti
I_r	: Dikdörtgen kesitin atalet momenti
J	: Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonu
k	: Çatlak sayısı
κ	: Eğrilik
K_i	: Doğrusal yay katsayısı
K_{ni}	: Gerilme yoğunluk faktörü (SIF)
K_i	: Dönel yay katsayısı
L	: Uzunluk

$M(x)$	: Eğilme momenti
N	: Senaryo sayısı
N_i	: i . basamaktaki çatlak sayısı
P_i	: Genelleştirilmiş yükleme bileşenleri
$Q_{(i,j)}(x)$	: i . basamağın j . parçasının yer matrisi
R_i	: Basamak geçiş matrisi
$S(x)$	: Konum fonksiyonu
$T(t)$	: Zamana bağlı bir fonksiyon
T_i	: Lokal transfer matrisi
T_{global}	: Global transfer matrisi
U	: Şekil değiştirme enerjisi
u_i	: P_i doğrultusundaki ilave yer değiştirme
$V(x)$	: Kesme kuvveti
W	: Sınır şartı matrisi
x	: Çatlak konumu
$x_{(i,j)}$	: i . basamakta j . çatlağın konumu
$Y(x)$	: Uzaysal çözüm fonksiyonu
$y(x, t)$	: Yer değiştirme fonksiyonu
β	: Dalga sayısı parametresi
ζ, η	: Çatlak düzlemi eksenleri
$\theta(x)$	: Eğim
λ	: Normalize edilmiş çatlak derinliği parametresi
ρ	: Birim hacim kütlesi
σ_i	: Gerilme
ϕ, ψ	: Normalize edilmiş koordinatlar
ω	: Doğal frekans

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

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Mühendislik yapılarının güvenliğinin sağlanması ve hizmet ömürlerinin uzatılması, inşaat mühendisliği disiplininin temel amaçlarından biridir. Yapılarda meydana gelen hasarların erken dönemde tespit edilememesi, ani göçmelere yol açarak ciddi can ve mal kayıplarına sebep olabilmektedir. Özellikle çatlakların ilerlemesi, taşıyıcı elemanların rijitliğini azaltmakta ve yük taşıma kapasitelerini sınırlayarak yapının bütüncül güvenliğini tehlikeye düşürmektedir. Bu nedenle literatürde çatlak tespiti, çatlak büyümesinin önlenmesi ve hasarın yapısal davranış üzerindeki etkilerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar kapsamında kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri arasında akustik emisyon, ultrasonik, akusto-ultrasonik, kılavuzlu dalgalar ve özellikle Lamb dalgaları öne çıkmaktadır (Pallarés vd., 2021; Capineri vd., 2021). Bu teknikler, lokal çatlak tespitinde yüksek hassasiyet sağlamalarına rağmen büyük ölçekli ve karmaşık yapıların tamamına uygulandığında zaman alıcı olmakta ve özellikle erişimi güç bölgelerde yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlılıklar hızlı, güvenilir ve sürekli gözetim sağlayabilen bütünleşik Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmıştır.

YSİ, disiplinler arası niteliğiyle bilgisayar bilimleri, elektronik, malzeme bilimi ve inşaat mühendisliğini bir araya getirerek mühendislik yapılarının davranışlarının gerçek zamanlı izlenmesini ve olası hasarların erken tespitini amaçlamaktadır. Günümüzde köprüler, barajlar, yüksek yapılar ve enerji iletim hatları gibi kritik üstyapı sistemlerinde güvenliğin sağlanabilmesi için vazgeçilmez hale gelmiştir (Pallarés vd., 2021). YSİ sistemleri sayesinde elde edilen veriler, yapının bütünsel durumu hakkında sürekli bilgi sunmakta ve bakım-onarım süreçlerinde etkin kararların alınmasına imkân tanımaktadır (Sami vd., 2025). Bununla birlikte, YSİ yöntemleri tarihsel gelişim içerisinde önemli bir evrim geçirmiştir.

Titreşim tabanlı yaklaşımlar, yapıyı dinamik bir sistem olarak ele almakta ve kütle, rijitlik ve sönüm özelliklerindeki değişimleri doğal frekans, mod şekli ve modal sönüm oranları gibi parametreler aracılığıyla incelemektedir. Çatlak oluşumu yapıda rijitlik değişimine, dolayısıyla dinamik parametrelerde değişime yol açtığından, hasarın varlığı ve

şiddeti titreşim karakteristikleri üzerinden değerlendirilebilmektedir. Hızlı ve görece düşük maliyetli olmaları sebebiyle köprülerden rotor ve borulara kadar farklı mühendislik yapılarında yaygın biçimde kullanılmaktadırlar (Bodke vd., 2025). Bununla birlikte, çevresel gürültü, sıcaklık değişimleri ve değişken yükleme koşulları, titreşim tabanlı yöntemlerin güvenilirliğini olumsuz etkileyebilmekte; karmaşık yapıların dinamik davranışlarının doğru şekilde modellenmesi her zaman mümkün olamamaktadır.

Değişken kesitli kirişler, mühendislik uygulamalarında yaygın kullanımları nedeniyle ayrı bir önem taşımaktadır. Kesit geometrisindeki kademeli değişimler, bu tür kirişlerin gerilme dağılımlarında düzensizliklere sebep olmakta ve bu bölgeleri potansiyel hasar noktaları haline getirmektedir. Çatlaklar genellikle kesit değişiminin bulunduğu bölgelerde veya yüksek eğilme momentine maruz kalan noktalarda meydana gelmekte ve yapının rijitliğinde değişime sebep olmaktadır. Bu durum doğal frekanslarda düşüşlere, mod şekillerinde bozulmalara ve genel olarak titreşim davranışında değişimlere yol açmaktadır. Literatürde çatlaklı kirişlerin modellenmesinde yaygın olarak çatlak bölgesi eşdeğer bir dönel yay ile temsil edilmekte (Dimarogonas, 1990; Shifrin & Ruotolo, 1999), böylece rijitlik azalması matematiksel olarak sistem denklemlerine dâhil edilmektedir. Yapılan çalışmalar, tekli ya da çoklu çatlakların serbest titreşim davranışı üzerinde farklı seviyelerde frekans kaymalarına yol açtığını, doğal frekanslardaki azalmanın çatlak derinliği ve konumu ile doğrudan ilişkili olduğunu ve mod şekillerindeki değişimlerin çatlak yerinin belirlenmesinde ek bilgi sunduğunu göstermektedir (Khiem & Lien, 2001; Patil & Maiti, 2003; 2005). Bu nedenle, değişken kesitli kirişlerde hasarın doğru modellenmesi ve tespit edilmesi, yapısal güvenliğin sağlanmasında kritik rol üstlenmektedir.

Titreşim tabanlı hasar tespit yöntemlerinin gelişimi zaman içerisinde farklı analiz tekniklerinin ve hesaplama yaklaşımlarının entegrasyonu ile desteklenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (Mahmoud, 1999; Shifrin & Ruotolo, 1999; Lee, 2009), Transfer Matrisi Metodu (Transfer Matrix Method, TMM) (Mahmoud, 1999; Shifrin & Ruotolo, 1999; Lin, 2002), kuvvet serisi teknikleri (Zheng & Fan, 2001) ve Newton–Raphson (Lee, 2009) tabanlı çözümler bu kapsamda öne çıkan sayısal yöntemlerdir. Bununla birlikte, artan hesaplama gücü ve sinyal işleme alanındaki gelişmeler sayesinde optimizasyon algoritmaları da hasar tespitinde yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, armoni arama ve benzeri meta-sezgisel yöntemler, ölçüm verileri ile sayısal modellerin sonuçlarını karşılaştırarak hasarın yerini ve

şiddetini belirleme konusunda önemli avantajlar sağlamıştır. Ancak bu teknikler de yüksek boyutlu problemlerde hesaplama yükü nedeniyle her zaman yeterli olmamış ve özellikle gürültülü veriler altında kararlılık sorunları ile karşılaşmıştır (Mishra vd., 2020).

Bu sınırlılıkların aşılabilmesi amacıyla son yıllarda makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar hızla önem kazanmıştır. Makine öğrenmesi algoritmaları, sensörlerden elde edilen büyük veri setlerini işleyerek hasarın konumunu ve şiddetini tahmin edebilmekte, derin öğrenme yöntemleri ise karmaşık titreşim verilerinden otomatik özellik çıkarımı yapabilmeleri sayesinde daha hassas ve güvenilir sonuçlar sunabilmektedir. Evrimsel sinir ağları (Convolutional Neural Networks, CNN), tekrarlayan sinir ağları (Recurrent Neural Networks, RNN) ve uzun-kısa vadeli bellek ağları (Long Short-Term Memory Networks, LSTM) gibi mimariler, yapısal titreşim verilerindeki karmaşık örüntüleri yakalayıp hasar tespitinde güçlü araçlar haline gelmiştir. Böylece, klasik yöntemlerin yetersizliklerinden doğan ihtiyaç, titreşim tabanlı yöntemlerle giderilmiş; bu yöntemlerin sınırlılıklarını aşmak için optimizasyon algoritmaları geliştirilmiş; günümüzde ise bu yaklaşımların da ötesine geçilerek makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı sistemlere yönelim hız kazanmıştır (Bodke vd.,2025).

YSİ alanındaki bu gelişmeler, mühendislik yapılarının güvenliğini artırırken bakım ve onarım maliyetlerini azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine de önemli katkı sunmaktadır. Özellikle değişken kesitli kirişler gibi karmaşık taşıyıcı elemanlarda çatlak tespitine yönelik titreşim tabanlı yöntemlerin ve yapay zekâ destekli yaklaşımların yaygınlaşması, alanda süregelen tarihsel yöntem gelişiminin sonucudur.

1.2. Literatür Taraması

Bu tezde çatlaklı kirişlerin serbest titreşim davranışına dayalı hasar tespiti ile ilgili literatür üç ana ekseninde incelenmiştir: analitik/yarı-analitik çözümler, optimizasyon temelli yaklaşımlar ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler. İlk grupta, çatlak etkisi çoğunlukla yerel esneklik yaklaşımıyla kütsüz dönel yay olarak modellenerek, transfer matrisi gibi analitik veya sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemlerle çözülmüş; elde edilen sonuçlar, doğal frekans ve mod şekillerindeki değişimlerin hasar konumu ve şiddetine duyarlı göstergeler sunduğunu ortaya koymuştur. İkinci grupta, ölçüm/simülasyon verileri ile model çıktılarının uyumsuzluğunu minimize eden meta-sezgisel ve türev tabanlı optimizasyon stratejileri kullanılarak çatlak parametrelerinin ters yönde tahmini

hedeflenmiş; ancak özellikle çoklu çatlak ve yüksek boyutlu arama uzaylarında hesaplama maliyeti ile gürültüye duyarlılık temel sınırlılıklar olarak raporlanmıştır. Üçüncü grupta ise doğal frekanslar ve mod şekli temelli öznelitliklerden yararlanan veri güdümlü modellerle hasar tespiti probleminin doğrudan kestirim problemine dönüştürüldüğü; uygun veri temsili ve değerlendirme protokolü ile karmaşık hasar konfigürasyonlarında genelleme kabiliyetinin artırılabilirdiği gösterilmiştir.

1.2.1. Yerel Esneklik Kavramı ile Analitik Modelleme

Çatlaklı kirişlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri çatlak bölgesindeki rijitlik kaybını kütesiz dönel yay (rotational spring) olarak temsil eden modeldir. Bu yaklaşım, lineer elastik kırılma mekaniğine dayalı yerel esneklik (local flexibility) kavramını esas almakta ve hem hesaplama kolaylığı hem de doğruluk açısından öne çıkmaktadır (Shifrin & Routolo, 1999). Bununla birlikte, çatlaklı sistemlerin analitik ve sayısal çözümlerinde farklı yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle TMM, çoklu çatlaklı veya çok basamaklı kirişlerin dinamik analizinde sağladığı hesaplama kolaylığı nedeniyle geniş uygulama alanı bulmuştur (Patil & Maiti, 2003). TMM, sistemin her alt elemanını temsil eden matrislerin ardışık çarpımıyla tüm sistem davranışını ortaya koyarak karmaşık sınır şartları veya çoklu hasar durumlarının ele alınmasına olanak sağlar.

Literatürde çatlak tespitine yönelik çalışmalar genel olarak çatlakların doğal frekanslar ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristikler üzerindeki etkilerinin doğrudan incelenmesi ve ölçülen dinamik verilerden yararlanılarak ters problem çözümü ile çatlak parametrelerinin tahmini başlıkları altında toplanmaktadır (Attar vd., 2012). Bu tür ters problemlerde doğru ve etkin matematiksel modellerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde çatlak tespitine yönelik ilk yaklaşım grubu, çatlağın kiriş elemanının dinamik davranışında oluşturduğu değişimleri ileri problem çerçevesinde doğrudan analiz etmeye odaklanmaktadır. Bu çalışmalarda çatlak, çoğunlukla yerel rijitlik kaybı veya lokal esneklik artışı olarak modellenmekte; dönel yay/yerel esneklik katsayısı gibi idealleştirmelerle sistemin rijitliği güncellenerek doğal frekanslardaki azalma, mod şekillerindeki bozulma ve özellikle mod şekli eğriliği/şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu gibi hasar göstergeleri nicel olarak değerlendirilmektedir. Böylece çatlak konumu ve derinliği arttıkça frekans kaymalarının ve mod şekli türevlerindeki lokal anomalilerin nasıl

değiştirdiği sistematik biçimde ortaya konmakta; farklı sınır koşulları, geometri değişimleri ve çoklu çatlak durumları altında duyarlılık eğilimleri karşılaştırılmaktadır (Bakhtiari & Nejad, 2014).

Dimarogonas vd. (1983), yapı elemanlarındaki çatlağın ilgili kesitte yerel esneklik oluşturarak sistemin titreşim davranışını değiştirdiğini ve sisteme doğrusal olmayan dinamik özellikler kazandırdığını tespit etmiştir. Dimarogonas & Paipetis (1983), genel yükleme altında ve açık kenar çatlaklarına sahip kirişin yerel esneklik katsayılarını 6×6 boyutlarında bir matris kullanarak modellemiş ve kullanışlı bir model oluşturmuşlardır. Dimarogonas & Rizos (1990), enine yüzey çatlağı bulunan dikdörtgen kesitli ankastre kirişlerin eğilme titreşimlerini inceleyerek, çatlak konumu ve derinliği ile titreşim modları arasında bir ilişki kurmuşlardır. Bu sayede, yapıların modal özelliklerinin çatlak tespiti amacıyla kullanılabileceğini ortaya çıkartmışlardır. Ancak oluşturulan sistemde sadece bir ve iki çatlaklı sistemler için çözüm sağlanabilmiştir. Araştırmacılar daha sonraki çalışmalarında (Dimarogonas vd., 1998), çatlak bölgesindeki yer değiştirmeyi kullanarak çatlak elemanlarının sürekli esneklik elemanları olarak modellenebileceğini ileri sürmüşlerdir.

Gasch vd. (1993), farklı çatlak türlerinin modellenmesi üzerine çalışmış; bu çatlak tiplerinin yerel esneklik üzerindeki etkilerini ve buna bağlı olarak sistemin titreşim davranışında meydana gelen değişimleri detaylı olarak incelemiştir.

Hu vd. (1993), Castigliano teoremini kullanarak çatlakların neden olduğu yerel rijitlik kaybını (kütlesiz yay modeli) analitik olarak ifade etmiş ve bu rijitlik değişiminin yapının doğal frekanslarında oluşturduğu değişimler ile çatlakların konumu arasında doğrudan, matematiksel bir ilişki kurmuştur.

Mahmoud vd. (1999), enine kenar çatlağı olan düzgün kirişlerin doğal frekans ve mod şekillerinin belirlenmesi için hesaplama açısından verimli bir sayısal yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada çatlağın neden olduğu yerel esneklik, kırılma mekaniği ilkelerine dayalı olarak modellenmiş; elde edilen sonuçlar, basit mesnetli ve sönümsüz Euler–Bernoulli kirişlerinde çatlak varlığının dinamik davranışı belirgin biçimde değiştirdiğini, yer değiştirmeleri artırdığını ve mod şekillerinde karakteristik değişimlere yol açtığını ortaya koymuştur. Ayrıca, çatlak derinliği arttıkça söz konusu etkilerin güçlendiği belirlenmiş ve böylece çatlak parametrelerinin sistem titreşimi üzerindeki belirleyici rolü vurgulanmıştır.

Shifrin & Routolo (1999), birden fazla enine çatlağa sahip kirişlerin doğal frekanslarını hesaplamak üzere çatlakların kütsüz dönel yaylarla temsil edildiği hesaplama açısından yeni ve verimli bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem, n çatlak için yalnızca $(n+2)$ lineer denklem gerektirmekte, böylece daha önceki yaklaşımlara kıyasla hesaplamada kullanılan transfer matrisi boyutunu büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu özelliği sayesinde özellikle ters problem çözümlerinde kullanılan optimizasyon temelli yaklaşımlarda önemli ölçüde zaman kazancı sağlanmıştır.

Zheng & Fan (2001), enine açık çatlaklara sahip değişken kesitli kirişlerin doğal frekanslarını hesaplamak için modifiye Fourier serilerine dayalı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, çatlaklı kiriş problemi sürekli ortam varsayımı çerçevesinde standart bir lineer özdeğer problemine indirgenmiştir. Bu sayede, doğrusal olmayan cebirsel denklemlerle uğraşmaya gerek kalmaksızın çözüm sağlanabilmektedir. Yöntemin bir diğer önemli avantajı, çatlaklı kirişin rijitlik matrisine yalnızca ek bir matris eklenerek analizin tamamlanabilmesidir. Ayrıca tüm formülasyonlar birleşik matris biçiminde ifade edilebildiğinden sayısal uygulamalarda kolaylık ve esneklik sağlanmaktadır. Bir diğer çalışmalarında ise boşluklu kesitli çatlaklı kirişler için çatlak derinliğine bağlı yerel esneklik katsayıları kırılma mekaniği temelli olarak tanımlanmış, Gauss integrasyonu ile sayısal olarak hesaplanıp açık formda ifade edilmiştir (Zheng & Fan, 2003). Bu katsayılar, dönel yaylarla modellenen alt segmentli kiriş ve sonlu eleman modellerine entegre edilerek doğal frekans ve mod şekillerinin daha hassas elde edilmesi sağlanmış; böylece çatlaklı kirişlerin dinamik analizinde hem hesaplama verimliliği hem de doğruluk açısından kayda değer iyileşmeler sunulmuştur.

Khiem & Lien (2001), birden çok çatlak içeren kirişlerin doğal frekans analizi için yeni bir analitik yöntem geliştirmişlerdir. Ayrıca, elastik mesnet koşullarını da kapsayan genel sınır şartları için kapalı formda frekans denklemleri elde edilmiştir.

Lin vd. (2002), sonlu sayıda enine açık çatlak içeren kirişlerin serbest titreşim analizine yönelik hibrit bir analitik/sayısal çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemde yalnızca dört bilinmeyen katsayı yer almakta ve matris boyutu çatlak sayısından bağımsız kalmaktadır. Bu yönüyle yöntem, sonlu eleman ve benzeri analitik yaklaşımlarda karşılaşılan yüksek boyutlu matris sistemlerini sadeleştirerek hesaplama verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Fernández-Sánchez vd. (2002), çatlaklı Euler–Bernoulli kirişlerinin eğilme titreşimlerinde temel frekansın yaklaşık hesaplanması amacıyla esneklik etki fonksiyonları

yöntemini kullanmışlardır. Çatlak, dönel elastik yay ile modellenmiş ve bu doğrultuda sınır koşulları ile eğim süreksizlikleri dikkate alınarak etki fonksiyonları oluşturulmuştur. Elde edilen integral formdaki özdeğer problemi, kapalı formda çözümlerle temel frekansa ilişkin ardışık alt sınırların elde edilmesini sağlamıştır. Sonuçlar, sonlu eleman analizleriyle karşılaştırılmış ve ikinci alt sınır için elde edilen değerlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi (The Finite Element Method, FEM) sonuçlarıyla yüksek düzeyde örtüştüğü gösterilmiştir. Loya vd. (2005), aynı yöntemi Timoshenko kiriş kuramına genişletmişler; pertürbasyon yöntemi ile sığ çatlaklar için daha sade ve pratik frekans ifadeleri sunmuşlardır.

İkinci yaklaşım grubu ise ölçülen dinamik verilerden yararlanarak çatlak parametrelerini ters problem olarak kestirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ölçümden elde edilen dinamik karakteristiklerle sayısal/analitik bir modelin ürettiği tahminler arasındaki farkı minimize eden amaç fonksiyonları tanımlanmakta; optimizasyon tabanlı yöntemler ve son yıllarda veri güdümlü makine öğrenmesi modelleri ile parametre uzayında arama yapılmaktadır.

Patil & Maiti (2003; 2005), çoklu çatlak içeren Euler–Bernoulli kirişlerinde çatlak yeri ve derinliğinin belirlenmesi amacıyla frekans değişimlerine dayalı bir yöntem önermişlerdir. Yöntemde, çatlaklar dönel yaylarla modellenmiş ve TMM kullanılarak titreşim davranışı analiz edilmiştir. Doğal frekanslardaki değişimlere karşılık gelen hasar parametreleri üzerinden ters problem çözülmüş, bu süreçte enerji temelli bir yaklaşım benimsenmiştir. Kiriş sanal segmentlere ayrılarak her birine bir hasar indeksi atanmış, bu indeksler yardımıyla çatlak konumları ve boyutları başarıyla tahmin edilmiştir. Yöntemin geçerliliği sayısal örneklerle gösterilmiş, ardından iki ve üç çatlaklı kirişler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Lee vd. (2009a), çoklu çatlakların tespiti amacıyla iki farklı yaklaşım sunmuşlardır. Çatlakları dönel yaylarla modelleyerek sonlu eleman yöntemiyle ileri problemi çözmüş; ardından Newton–Raphson yöntemiyle ters problemi çözerek çatlakların konum ve boyutları başarıyla tahmin etmişlerdir. Sayısal örneklerde tekil ve çoklu çatlak senaryoları değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların yüksek doğruluk taşıdığı gösterilmiştir. Aynı yıl yayımlanan ikinci çalışmada ise, zorlanmış titreşim genliklerindeki değişimlerden yararlanılarak çatlak tayini gerçekleştirilmiştir (Lee vd., 2009b). Bu yöntemde, ters problem çözümünde Newton–Raphson yöntemi ile tekil değer ayrışımı (SVD) kullanılmış ve çatlak sayısına ilişkin belirsizlik, artık kareler toplamı analiziyle giderilmiştir. Ayrıca,

geliştirilmiş burulma rijitliği modeli sayesinde çatlak derinliği tahminlerinin doğruluğu artırılmıştır.

Caddemi vd. (2008), çok çatlaklı Euler–Bernoulli kolonların burkulma analizinde çatlakları Dirac delta fonksiyonlarıyla modelleyerek kapalı formda çözümler elde etmişlerdir. Bu yaklaşım, klasik süreklilik koşullarına ihtiyaç duymadan kritik yükün analitik olarak belirlenmesini sağlamıştır. Bir diğer çalışmada ise yöntem, çoklu çatlaklı kirişlerin titreşim analizine uyarlanmış; doğal frekanslar ve mod şekilleri kapalı formda ifade edilmiştir (Caddemi vd.,2009). Her iki çalışmada da çözümler, yalnızca dört integrasyon sabitiyle tanımlanmakta ve farklı sınır koşullarına uygulanabilir niteliktedir. Bu yönüyle yöntem, çatlaklı elemanların analitik modellenmesinde önemli bir katkı sunmaktadır.

Caddemi & Morassi (2010), çok çatlaklı kirişlerde statik yer değiştirme verilerine dayalı hasar tespitine odaklanmışlardır. Her çatlak, kirişin iki segmentini bağlayan eşdeğer bir lineer yayla modellenmiş; ters problem, statik deformasyonlardaki değişimleri esas alan kapalı formda ifadelerle çözülmüştür. Ayrıca sonraki çalışmalarında (Caddemi & Morassi, 2013), dönel yay modelinin matematiksel temeli verilmiş ve çatlak bölgesinde rijitliğin çok dar bir aralıkta sıfıra yaklaştığı sürekli bir sistemin limit durumunda bu modele indirgenebildiği gösterilmiştir. Bu çalışmalar, çatlak tespiti ve analitik modelleme açısından önemli teorik katkılar sağlamıştır.

Attar (2012), keyfi sayıda enine çatlak içeren ve farklı sınır şartlarına sahip kademeli Euler–Bernoulli kirişlerin serbest titreşim analizi için analitik bir yöntem önermiştir. Çalışmada, çatlaklar dönel yaylarla modellenmiş ve kiriş, homojen alt segmentlere ayrılarak TMM ile analiz edilmiştir. Elde edilen genel frekans denklemi; çatlak sayısı, konumu ve derinliğinin yanı sıra, kirişin fiziksel ve geometrik özellikleri ile sınır koşullarına bağlı olarak tanımlanmıştır. Ters problem kapsamında, $2N$ doğal frekans ölçümüne karşılık N çatlakın yer ve derinliğini belirlemeye olanak tanıyan $2N$ bilinmeyenli bir denklem sistemi oluşturulmuş ve bu sistem Newton–Raphson yöntemiyle çözülmüştür. Geliştirilen yöntem, çeşitli sayısal örneklerle doğrulanmış ve elde edilen sonuçların sonlu eleman analizleri ve deneysel verilerle yüksek düzeyde uyum sağladığı gösterilmiştir. Bu yönüyle çalışma, çatlak tespiti ve titreşim tabanlı hasar analizi alanlarında güçlü ve hesaplama açısından verimli bir yaklaşım sunmaktadır.

Bakhtiari & Nejad (2014), çatlaklı kirişlerin doğal frekans ve mod şekillerini tahmin etmek amacıyla Rayleigh yöntemine dayalı analitik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu

yöntemde çatlak etkisi, hasarsız kirişin mod şekline eklenen polinom terimleriyle modellenmiş ve doğal frekanslar açık formda elde edilmiştir. Yöntem, özellikle çatlak yeri ve derinliğinin etkilerini analitik olarak inceleme imkânı sunarken, belirli çatlak derinliği oranlarına kadar %5–7 hata sınırları içinde güvenilir sonuçlar vermiştir. Bu yönüyle çalışma, önceki literatürde eksik kalan doğruluk sınırlarını sistematik biçimde ortaya koymuştur.

Nandakumar & Shankar (2013; 2014; 2015), her düğümde iki serbestlik derecesine sahip yeni bir çatlaklı kiriş sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Bu model kapsamında, çatlaklı kiriş elemanının kütle ve rijitlik matrisleri tanımlanmış, çatlaklar ise dönel yay yaklaşımıyla temsil edilerek ilgili eleman için transfer matrisi türetilmiştir. Yöntem, çoklu çatlak içeren bir konsol kiriş ve kafes sistemdeki çatlaklı çubuk eleman üzerinde sayısal olarak uygulanmış ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu yaklaşımın öne çıkan yönü, tek bir sonlu eleman içerisinde birden fazla çatlağın modellenmesine olanak tanımasıdır. Daha sonra gerçekleştirdikleri çalışmalarında ise çatlaklı kirişlerde hasar tespiti için yeni bir spektral TMM sunmuşlardır (Nandakumar & Shankar, 2021). Bu yöntem, kırılma mekaniğine dayalı trigonometrik fonksiyonlarla oluşturulan transfer matrisini kullanarak doğal frekansları yüksek doğrulukla belirlemekte ve ters problem yaklaşımıyla çatlak konumu ve derinliğini tespit etmektedir. Sayısal simülasyonlar ve deneysel doğrulamalarla yöntemin diğer transfer matrisi yaklaşımlarına göre üstün performans gösterdiği ortaya konulmuştur.

Zhao (2016), çatlaklı Euler–Bernoulli kirişlerin zorlanmış titreşim tepkilerini analitik olarak belirlemek amacıyla Green fonksiyonlarını geliştirmiştir. Çatlaklı kesitler, literatürde yer alan beş farklı yerel esneklik modeliyle tanımlanmış ve çözümde TMM ile koordinat dönüşüm tekniği kullanılmıştır. Elde edilen çözümler, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış; ayrıca çatlak derinliği ve konumunun dinamik davranış üzerindeki etkileri ile iki çatlak arasındaki etkileşim incelenmiştir. Sunulan açık formdaki çözümlerin YSI, hasar tespiti ve onarım gibi ileri mühendislik uygulamalarına temel teşkil edebileceği vurgulanmıştır.

Jung vd. (2017), burulma etkisindeki Bernoulli–Euler kirişlerinin doğal frekans ve mod şekillerini hassas şekilde belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir TMM önermişlerdir. Çalışmada, her çatlak hem düzlem içi hem de düzlem dışı yönlerde dönel yaylarla modellenmiş, doğal frekanslar başarıyla hesaplanmıştır. Yöntem, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmış ve çatlak derinliği, konumu ile burulma etkisinin frekanslar

üzerindeki rolü incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çatlakların hem düzlem içi hem de dışı titreşim frekanslarını azalttığını göstermiştir.

Eroğlu vd. (2017), düzlemsel eğri kirişlerdeki çatlakların serbest titreşim davranışını TMM ile modellemiş ve çatlak etkilerini doğrusal elastik kırılma mekaniği ile tanımlamıştır. Çatlağın eksen üzerindeki konumunun yanı sıra kesit içindeki konumunun da titreşim davranışını etkilediği vurgulanmış ve bu durum sayısal örneklerle ortaya konmuştur. Çatlak tespiti için diferansiyel evrim algoritması kullanılmış ve yöntemin hem sayısal hem deneysel verilerle yüksek doğruluk sağladığı gösterilmiştir.

Kim vd. (2018), çatlaklı Timoshenko kirişlerinin serbest titreşimleri rastgele sınır şartlarını da kapsayacak şekilde modellemiştir. Çatlak bölgesi, dönel ve öteleme yaylarıyla temsil edilmiş; sınır koşulları ise elastik yaylarla ifade edilerek genelleştirilmiştir. Rayleigh–Ritz yöntemiyle formülasyon elde edilmiş ve yöntem, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak doğruluğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, esneklik katsayısının doğal frekanslar üzerindeki etkisi detaylı biçimde incelenmiştir.

Khiem vd. (2018), çok kademeli konsol kirişlerdeki bilinmeyen sayıda çatlağın yalnızca doğal frekans ölçümleriyle tespitini sağlayan kapalı formda bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile çatlak yeri ve derinliği doğrudan tanımlanabilmiştir. Önerilen yöntem, sayısal ve deneysel verilerle doğrulanmıştır ve sınırlı frekans verisiyle çoklu çatlak tespiti için etkili ve uygulanabilir bir araç sunmaktadır.

Nikolić vd. (2020), çatlaklı kirişleri elastik mafsallarla bağlanmış çok sayıda rijit parçaya bölmüş; bu sayede eksenel ve enine titreşimler ile aralarındaki etkileşimi, özellikle sınır koşullarına bağlı olarak incelemişlerdir. Yöntem, hem Euler–Bernoulli hem de Timoshenko kiriş teorilerine uygulanabilmekte ve farklı sınır koşulları altında yüksek sayısal verimlilikle çözüm sağlamaktadır. Çalışma, önceki araştırmaların ötesine geçerek eksenel titreşimlerin ihmal edilebileceği ve edilemeyeceği durumlar için açık sınırlar ortaya koymuştur.

Haskul vd. (2021), genişliği sabit ancak kalınlığı doğrusal değişen çatlaklı konik kirişlerin serbest titreşim davranışını analiz etmişlerdir. Çatlak bölgesi, lineer elastik kırılma mekaniğine dayalı olarak tanımlanan kütesiz yay ile modellenmiş; doğal frekanslar ve mod şekilleri, Bernoulli-Euler kiriş teorisi kapsamında elde edilmiştir. Çalışma, çatlak konumu, derinliği ve koniklik oranının dinamik davranış üzerindeki etkilerini farklı sınır koşulları altında inceleyerek yöntemin doğruluğunu literatürle uyumlu şekilde ortaya koymuştur.

Zhao vd. (2022), birden fazla çatlak içeren eğrisel Euler–Bernoulli kirişlerin sönümlü ve zorlanmış titreşimlerini incelemiş ve bu amaçla hesaplamayı kolaylaştıran yeni bir TMM yaklaşımı geliştirmişlerdir. Model ile çatlak derinliği ve konumu, kirişin eğriliği ve sönümün titreşim tepkisine etkileri değerlendirilmiş; sonuçların sonlu eleman ve deney verileriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

1.2.2. Optimizasyon Tabanlı Yöntemlerle Hasar Tespiti

Mühendislikte sistemlerin performansını artırmak ve mevcut koşullar altında en uygun çözümü elde etmek için başvurulmuş temel yaklaşımlardan biri optimizasyon algoritmalarıdır. YSİ ve hasar tespitinde bu yöntem, özellikle titreşim temelli çalışmalar bağlamında literatürde önemli yere sahiptir. Optimizasyon tabanlı hasar tespitinde öne çıkan yöntemlerden biri olan analitik optimizasyon, maliyet fonksiyonlarının minimum veya maksimum değerlerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Bu kapsamda, hasar tespitinde kullanılan optimizasyonlar genel olarak iki yaklaşıma ayrılmaktadır: (i) deneysel olarak elde edilen modal veriler ile sayısal modelden hesaplanan değerler arasındaki farkların minimize edilmesi ve (ii) hasarsız ve hasarlı modellerden elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıkların belirlenmesi. Söz konusu süreç, yalnızca yapının mevcut durumunun gerçeğe en yakın biçimde temsil edilmesini sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda sonlu eleman modelinin güncellenerek ilerleyen aşamalarda yapılacak değerlendirmeler için güvenilir bir referans oluşturmasına katkı sunmaktadır. Titreşim verilerine dayalı hasar tespitinin özünde bir ters problem niteliği taşıdığı dikkate alındığında bir optimizasyon problemi olarak ele alınabileceği görülür. Bu noktada, evrimsel algoritmalar, geniş arama uzayını tarama ve yerel minimumlara takılmadan çözüm üretebilme kabiliyetleri sayesinde öne çıkmakta ve sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu yaklaşımlar içinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Genetik Algoritmadır (Genetic Algorithm, GA).

He vd. (2001), rotor-mil sistemlerinde çatlakların yeri ve boyutunu bir ters problem olarak ele almış ve GA tabanlı yeni bir yaklaşım önermiştir. Bu çalışma ile geleneksel yöntemlerin karşılaştığı yerel minimumlara takılma ve karmaşık modelleme zorlukları aşılmış, GA'nın ters problemlerde uygulanabilirliği gösterilerek sonraki araştırmalara zemin hazırlanmıştır.

Vakil-Baghmisheh vd. (2007), kiriş benzeri yapılarda çatlak konumu ve derinliğini belirlemek için ikili ve sürekli GA'lara dayalı bir yöntem geliştirmiştir. Doğal frekans değişimlerine dayalı yeni bir uygunluk fonksiyonu tanımlayarak hem sayısal hem de deneysel verilerde yüksek doğruluk sağlamış, özellikle düşük popülasyonlu ve yüksek mutasyon oranlı parametrelerle global minimuma ulaşma başarısını artırmışlardır.

GA'nın çoklu hasar tespitine uyarlanmasına yönelik dikkat çekici bir çalışma da Guo vd. (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, kanıt teorisi ile mikro-arama genetik algoritmayı (MSGa) birleştiren iki aşamalı bir yöntem geliştirmiştir. İlk aşamada kanıt teorisi ile hasarlı bölgeler daraltılmış, ikinci aşamada ise MSGa yardımıyla hasar şiddeti optimize edilmiştir. Bu yaklaşım, arama uzayını ciddi ölçüde daraltarak geleneksel GA'ya kıyasla hem daha verimli hem de daha doğru sonuçlar elde etmesini sağlamış ve çoklu hasar senaryoları için etkin bir çerçeve sunmuştur.

Waisman vd. (2010), XFEM ile GA'yı entegre ederek doğrusal elastostatik yapılarda farklı kusurların tespitini hedeflemiştir. XFEM, yeniden ağ üretimine gerek kalmadan kusurları modele dâhil ederken, GA ölçülen şekil değiştirme verilerinden yararlanarak kusurların yeri ve boyutunu optimize etmiştir.

GA, hasar tespiti çalışmalarında güçlü ve esnek bir araç olarak öne çıkmakla birlikte bazı sınırlılıklara da sahiptir. Literatürdeki bulgular, sonlu eleman simülasyonları üzerinden elde edilen titreşim parametreleriyle hasar konumu ve şiddetinin yüksek doğrulukla belirlenebildiğini, ancak deneysel ölçüm verileri kullanıldığında bu doğruluğun azaldığını göstermektedir. Ayrıca GA, büyük veri setleri ve karmaşık optimizasyon problemleri söz konusu olduğunda yüksek işlem maliyeti ve uzun hesaplama süreleri gerektirebilmektedir. Algoritmanın başarısı, özellikle çaprazlama ve mutasyon oranları gibi parametrelerin seçimine oldukça duyarlıdır ve bu durum yakınsama hızını olumsuz etkileyebilmektedir (Vakil-Baghmisheh vd.,2008). Tüm bu dezavantajlara rağmen, günümüz analizlerine temel hazırlayan optimizasyon tekniklerinden biri olan GA, çeşitli iyileştirmeler ve hibrit yöntemlerle desteklenmesi sayesinde günümüzde de yapılarda hasar tespiti uygulamalarında hala kullanılmaktadır.

Begambre & Laier (2009), temel Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritması ile Nelder–Mead yöntemini birleştiren hibrit bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmişleridir. Frekans yanıt fonksiyonlarına dayalı hasar tespitinde kullanılan bu yöntem, gürültülü ve eksik veri koşullarında dahi yüksek doğrulukla çalıştığını ortaya koymuştur.

Kang vd. (2012), titreşim verilerine dayalı hasar tespiti için yapay bağışıklık sistemi mekanizmaları ile güçlendirilmiş İyileştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu (Improved/Improvement Enhanced Particle Swarm Optimization, IEPSO) algoritmasını geliştirmişlerdir. Basit mesnetli kiriş ve kafes yapı örnekleri üzerinde yapılan karşılaştırmalar, IEPSO'nun temel PSO, Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution, DE) ve Gerçek Kodlamalı Genetik Algoritmaya (Real-Coded Genetic Algorithm, RCGA) kıyasla daha doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Khatir & Abdel Wahab (2019), Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (eXtended Finite Element Method, XFEM) ve Genişletilmiş İzogeometrik Analiz (eXtended Isogeometric Analysis, XIGA) yöntemlerini, PSO ve Jaya algoritması ile bütünleştirilerek plak yapılarında çatlak tespitinde kullanmışlardır. Çalışmada elde edilen bulgular, Jaya'nın PSO'ya kıyasla daha hızlı ve doğru sonuçlar ürettiğini, ayrıca XIGA-Jaya kombinasyonunun sayısal ve deneysel doğrulamalarda en üstün performansı sunduğunu göstermiştir.

Wei vd. (2018), klasik PSO'nun erken yakınsama sorununu aşmak amacıyla Bozulmalı Parçacık Sürü Optimizasyonu (Disturbed Parçacık Sürü Optimizasyonu, DPSO) algoritmasını geliştirmişlerdir. Kiriş, kafes ve plak üzerindeki uygulamalar sonucunda DPSO'nun gürültü varlığında dahi etkin, sağlam ve verimli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Hu vd. (2023), Bayesian model güncelleme ve geliştirilmiş PSO algoritmasını birlikte kullanmışlardır. Karşıtlık Temelli Öğrenme (Opposition-based learning, OBL) ve sınırdan sekme (boundary rebound) stratejisi ile iyileştirilen PSO'nun, klasik ve diğer PSO algoritmalarına kıyasla daha doğru sonuçlar verdiğini; ayrıca hasar yeri ve boyutunu başarıyla tespit ederek; belirsizliği, parametrelerin veriden sonra elde edilen olasılık dağılımlarına bakarak değerlendirmişlerdir.

Yapılan çalışmalar, PSO'nun yapısal hasar tespitinde etkili olmakla birlikte tek başına kullanıldığında bazı sınırlılıklar taşıdığını göstermektedir. Özellikle karmaşık ve yüksek boyutlu problemlerde erken yakınsama, sınırlı ölçüm verisinde tanımlanamama ve gürültü altında doğruluk kaybı gibi sorunlar raporlanmıştır. Bu nedenle PSO çoğunlukla Bayesian çıkarım, bağışıklık temelli mekanizmalar ve DE/GA/Jaya gibi yöntemlerle hibrit edilerek güçlendirilmekte; böylece yakınsama hızı, kararlılık ve tahmin doğruluğu artırılmaktadır. Sonuç olarak PSO, tek başına yeterli olmaktan ziyade hibrit çerçevelerde tamamlayıcı bir bileşen olarak değerlendirilmiştir. (Hu vd.,2023).

Armoni Arama Algoritması (Harmony Search Algorithm, HSA), çok sayıda mühendislik optimizasyonunda etkili biçimde uygulanmıştır (Geem vd., 2001; Manjarres vd., 2013). Yöntemin öne çıkan avantajları arasında, karar değişkenleri için özel bir başlangıç değerine ihtiyaç duymaması, çoklu çözüm üzerinden arama yaparak yerel minimumlardan kaçabilmesi ve hem sürekli hem de ayrık değişkenlerle çalışabilme esnekliği yer almaktadır. Bununla birlikte, arama uzayını geniş biçimde taraması nedeniyle yakınsama hızının görece düşük olması HSA'nın temel dezavantajlarından biridir. Ancak algoritmanın hibrit yaklaşımlara kolayca entegre edilebilmesi bu sınırlılığın aşılmasına katkı sağlamaktadır (Yang vd., 2009; vd., 2017).

Miguel vd. (2012), ortam titreşimleri altında hasar tespiti için Stokastik Altuzay Tanımlama (Stochastic Subspace Identification, SSD) tabanlı modal tanımlamayı HSA ile bütünleştirmiş ve hem sayısal hem de deneysel kiriş çalışmalarıyla yöntemin hasarın yerini ve şiddetini doğru biçimde belirlediğini, ayrıca GA'ya kıyasla daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Jin vd. (2015), vinç yapılarında modal parametrelerin belirlenmesi için sensör yerleşimini optimize ederken HSA'yı Modal güvence ölçütü (Modal Assurance Criterion, MAC) yöntemiyle birleştirmiş, optimizasyon parametrelerinin etkisini inceleyerek uygun aralıklar önermiş ve üç boyutlu titreşim özellikleri dikkate alınarak en uygun sensör konumlarını belirlemiştir.

Kahya vd. (2022), tabakalı kompozit kirişlerde sınırlı modal veriyi kullanarak hasar tespiti için HSA tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada hasar, rijitlik kaybı katsayısı üzerinden modellenmiş; doğal frekanslara dayalı ve mod şekli değişimlerine dayalı olmak üzere iki farklı amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, gürültü içeren koşullarda orta ve ciddi hasarların başarıyla tespit edilebildiğini, ancak küçük ve çoklu hasar durumlarında tespit doğruluğunun belirgin şekilde azaldığını ortaya koymuştur.

Jiménez-Alonso vd. (2021), GA, PSO ve HSA'yı karşılaştırmış ve laboratuvar ölçeğinde yaya köprüsü deneyleriyle HSA'nın FEM güncellemede uygulanabilir olduğunu, ancak daha fazla doğrulamaya ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir.

Pérez vd. (2021), hibrit bir Sigma Noktalı Kalman Filtreli HSA (Unscented Kalman Filter HSA, UKF-HS) algoritması ile daha hızlı yakınsama ve yüksek doğruluk elde etmiştir. Bir başka çalışmada ise çok amaçlı HSA'yı Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis, PCA), yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks, ANN) ve active-set optimizasyonu ile birleştirerek hesaplama süresini azaltmış ve gerçek bir çelik

yaya köprüsü üzerinde geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün performans sağlandığını göstermiştir (Perez vd., 2020).

HSA, sonlu eleman modeli güncelleme ve yapı sağlığı izleme problemlerinde başarılı sonuçlar verse de bazı dezavantajlara sahiptir. Öncelikle, karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerinde oldukça yüksek hesaplama süresi gerektirir; bu da gerçek mühendislik uygulamalarında kullanımını zorlaştırır. Ayrıca, algoritma sonucunda elde edilen çözümler genellikle seyrek ve dağınık olduğundan en uygun güncellenmiş modeli seçmek ciddi bir karar verme problemine dönüşür. Bu durum, model güncellemenin doğruluğunu ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebilir. Dolayısıyla HSA tek başına kullanıldığında hem yüksek simülasyon maliyeti hem de çözüm seçimindeki belirsizlikler nedeniyle pratik mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır (Pérez vd., 2021).

Mishra vd. (2020), büyük ölçekli uzaysal kafes yapılarda hasarın konumu ve şiddetini belirlemek amacıyla, doğal frekanslar ve mod şekillerini birlikte kullanan bir amaç fonksiyonu üzerinden 10 popülasyon tabanlı meta-sezgisel optimizasyon yöntemini, ölçüm gürültüsü etkisini de dikkate alarak karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre TLBO, diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek kestirim hassasiyeti sağlamış; ayrıca daha az fonksiyon değerlendirmesi ve daha kısa hesaplama süresiyle üstün performans göstermiştir.

Barman vd. (2021), Bayesian veri füzyonu ile olası hasarlı elemanları önce daraltmış; ardından TLBO'yu ikinci aşamada bu aday elemanlar üzerinde çalıştırarak frekans ve mod şekli uyumsuzluğunu minimize edecek şekilde hasarın konum ve şiddetini belirlemişlerdir. Bu iki aşamalı kurgu sayesinde tek aşamada tüm elemanları tarayan yaklaşımlara kıyasla arama uzayı küçülmüş ve hesaplama süresi belirgin biçimde azalırken gürültülü veri için de tespit başarımı korunmuştur.

Ding-Cong vd. (2019), plak benzeri yapılarda hasar değerlendirmesi için iki aşamalı bir yaklaşım önermiş; ilk aşamada enerji temelli bir göstergeyle olası hasar bölgelerini belirleyerek hasarsız elemanların büyük kısmını elemiştir. İkinci aşamada ise Jaya algoritmasını kullanarak seçilen amaç fonksiyonunu minimize etmiş ve böylece ölçüm gürültüsü altında dahi hasarın yerini doğrulayıp şiddetini yüksek hassasiyetle kestirirken, modal esneklik değişimine dayalı amaç fonksiyonunun hesaplama maliyetini mod şekli değişimine kıyasla daha fazla düşürdüğünü göstermiştir.

Majumdar vd. (2012), kafes sistemlerde doğal frekanslardaki değişimleri esas alan hasar tanımlama problemini bir ters/optimizasyon problemi olarak formüle etmiş ve çözüm

için ACO tabanlı bir arama stratejisi önermiştir. Yürütülen sayısal incelemeler, önerilen yaklaşımın gürültü içeren ölçümler altında dahi eleman rijitliğindeki azalmalarla temsil edilen hasarın konumunu ve şiddetini yeterli doğrulukla kestirebildiğini göstermiştir.

1.2.3. Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Hasar Tespiti

Titreşim tabanlı hasar tespitinde temel yaklaşım, yapının doğal frekans, mod şekli ve bunların türevleri gibi dinamik özelliklerindeki değişimleri izlemektir (Alves vd., 2015). Bu amaçla, sensör tabanlı sistemlerden (Amabilia vd., 2017) ve görüntü tabanlı bilgisayarlı görü uygulamalarından (Feng vd., 2018) elde edilen titreşim ve yer değiştirme kayıtları kullanılarak modal büyüklükler çıkarılmakta, hasarsız ve hasarlı durumlar bu büyüklükler üzerinden karşılaştırılmaktadır. Ayrıca kirişin serbest titreşim davranışını analitik olarak inceleyerek doğal frekans, mod şekli bilgileri de elde edilebilmektedir (Avcı vd., 2021). Bu tür girdilerle çalışan makine öğrenmesi modelleri, ölçümlerden elde edilen öznitelikler ile hasarın varlığı, konumu ve/veya şiddeti arasında veri temelli bir ilişki öğrenerek sınıflandırma ya da regresyon problemlerini çözmektedir (Hastie vd., 2009; Murphy, 2012). Literatürde kullanılan yöntemler çoğunlukla dört ana grupta toplanmaktadır:

- 1 Ağaç tabanlı yöntemler, karar ağaçları ve bunların birleştirilmesine dayanan topluluk yaklaşımlarını kapsamakta olup bu grubun yaygın bir örneği Rastgele Orman (Random Forest, RF) modelidir (Breiman vd., 1984).
- 2 Çekirdek (kernel) tabanlı yöntemler, doğrusal olmayan ayrımı çekirdek fonksiyonları ile temsil ederek yapan modellerdir ve bu grupta Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) ile regresyon problemleri için Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression, SVR) öne çıkmaktadır (Bishop, 2006).
- 3 Klasik yapay sinir ağları, özellikle Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP) mimarisi etrafında şekillenmekte ve genel olarak Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network, ANN) ailesi içinde değerlendirilmektedir (Bishop, 2006).
- 4 Derin öğrenme yaklaşımları ise otomatik temsil/özellik öğrenme kabiliyeti nedeniyle yaygınlaşmış olup bu sınıfta Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional

Neural Network, CNN) sıklıkla kullanılmaktadır (Breiman vd., 1984; Bishop, 2006; Goodfellow vd., 2016).

Ağaç tabanlı modeller, veriyi ardışık bölmelerle yorumlanabilir karar kurallarına ayırırken; çekirdek tabanlı yöntemler, uygun bir çekirdek seçimiyle daha yüksek boyutlu uzaylarda ayırım yapabilmektedir (Breiman vd., 1984; Bishop, 2006). Buna karşılık derin öğrenme yaklaşımları, özellikle ham sinyal ya da zenginleştirilmiş temsiller üzerinden ayırt edici öznitelikleri model içinde öğrenerek daha bütünleşik (uçtan uca) bir tanılama hattı kurma potansiyeli sunmaktadır (LeCun, Bengio ve Hinton, 2015; Goodfellow vd., 2016). Bu sınıflandırma, çatlaklı Euler–Bernoulli kirişlerde analitik ileri modelden elde edilen modal göstergelerin, farklı model aileleri altında nasıl kullanıldığı ve hangi koşullarda daha iyi genelleştiğinin sistematik biçimde tartışılmasına olanak tanımaktadır (Hastie vd., 2009; Bishop ve Bishop, 2023).

Bakhary vd. (2006) farklı hasar seneryoları altında plak için sonlu eleman modelinden analitik/modal parametreler elde edilmiştir. Bu modal parametreler, MLP kullanılarak eğitilmiştir. Sonuçlar, tamamen sayısal verilerle eğitilen modelin laboratuvar deneylerinden elde edilen ölçülerle de tatmin edici doğrulukta hasar tespiti yapabildiğini göstermektedir

Hakim vd. (2009), sabit mesnetli I-kiriş üzerinde deneysel olarak doğal frekans değişimlerini ANN ile ilişkilendirerek hasarın yeri ve şiddetini tahmin etmiş; çift çatlak ve gürültülü veri koşullarında dahi güvenilir sonuçlar elde etmişlerdir. Böylece laboratuvar ölçeğinde kiriş temelli ANN yaklaşımlarının uygulanabilirliği doğrulanmıştır.

Zhou vd. (2014), yapısal hasar tespiti için titreşim sinyallerinden elde edilen verileri önce hasara duyarlı özellik vektörlerine dönüştürmeyi, ardından Rastgele Orman (Random Forest, RF) temelli önem analizi ve RF-RFE ile en bilgilendirici özellik alt kümesini seçmeyi önermişlerdir. Seçilen özellikler k-NN (k-Nearest Neighbors) ile test edilerek hasarın yeri ve şiddeti sınıflandırılmış; dört katlı çelik bina modeli üzerinde yapılan deneyler, daha az özellik kullanımıyla doğruluğun arttığını/korunduğunu ve hesaplama yükünün azaldığını göstermiştir.

Alves vd. (2015), hasar tespitinde yalnızca doğal frekans ve mod şekli karşılaştırmasına dayanmak yerine ham ivme sinyallerinin doğrudan kullanılabileceğini önermektedir. İvme verisi Sembolik Veri Analizi (Symbolic Data Analysis, SDA) ile sembolik temsillere dönüştürülmüş ve ardından Bayesian karar ağaçları, yapay sinir ağları (ANN/MLP) ve SVM ile yapısal durumlar sınıflandırılmıştır. Kiriş ve köprü deneyleri

yöntemin uygulanabilir olduğunu ve çevresel etkilerin (özellikle sıcaklık) sonuçlar üzerinde belirleyici olabildiğini ortaya koymuşlardır.

Abdeljaber vd. (2017), titreşim tabanlı hasar tespitinde el ile özellik çıkarımını azaltmak amacıyla 1B Evrişimsel Sinir Ağı (1D-CNN) tabanlı bir yaklaşım önermektedirler. Çalışma, titreşim sinyallerinden ayırt edici örüntülerin doğrudan ağ içinde öğrenilebildiğini ve bu sayede hasar durumunun sınıflandırılabilirdiğini göstermektedir.

Avci vd. (2018), hasar tespiti için 1D-CNN tabanlı bir yaklaşımını referans veri seti üzerinde test etmişlerdir. Bulgular, 1D-CNN'in ham veya az işlenmiş titreşim verisinden temsil öğrenerek geleneksel özellik mühendisliğine olan bağımlılığı azaltabildiğini göstermektedir.

Jayasundara vd. (2020), kemer köprülerin karmaşık titreşim özelliklerine yönelik bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, frekans cevap fonksiyonu (Frequency Response Function, FRF) verilerindeki değişimler temel alınmış, boyut indirgeme için Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis, PCA) uygulanmış ve Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN) ile kemer kirişindeki hasarın yeri ve şiddeti başarıyla tahmin edilmiştir.

Hu & Wu (2022), yapısal parametrelerden mod şekli tahmini için CNN ve oto kodlayıcı (Autoencoder) tabanlı bir çerçeve önermişlerdir. Bu yaklaşım, özellikle hızlı mod şekli üretimi ve veri zenginleştirme açısından titreşim tabanlı hasar tespiti çalışmalarına dolaylı bir katkı sunmaktadır.

Pang vd. (2023), yüksek katlı çelik yapılarda hasar tespiti için Attention mekanizmalı Yinelemeli Sinir Ağları (RNN-Attention) modeli önermişlerdir. Yazarlar çalışmalarında hasar tespit problemini bir zaman serisi problemi olarak ele almışlardır. Bulgular, zaman bağımlılıklarını ve "kritik zaman adımlarını" birlikte öğrenmenin hasar ayırımında daha etkili olabildiğini göstermektedir.

De Sousa vd. (2023), kiriş benzeri yapıların bütünlüğünü izlemek için doğal frekans ve FRF'den türetilen hasar indekslerini kullanarak farklı makine öğrenmesi algoritmalarını (kNN, SVM, DT, RF, NB) uygulamışlardır. Hem sayısal hem de deneysel verilerle gerçekleştirilen analizlerde, sayısal veriler için %100, deneysel veriler için ise %95'e varan sınıflandırma doğruluğu elde edilmişlerdir.

Teng vd. (2023) çubuk elemanlardan oluşan bir köprü sistemine ait analitik model, derin öğrenme tabanlı hasar tespiti için güvenilir bir veri üretim aracı olarak kullanılmıştır. Çalışma, sayısal modelden öğrenen 1D CNN'in karmaşık ve deneysel senaryolarda dahi

hasarı yüksek doğrulukla tespit edebildiğini; doğrulukta yaklaşık %40–50 artış ve eğitim süresinde belirgin azalma sağlandığını ortaya koymaktadır.

Park & Kim (2024), titreşim tabanlı hasar tespitinde 1D-CNN yöntemini hem sayısal benzetim verisi hem de gerçek bir kafes köprüden toplanan saha verisiyle test etmişler; sensör sayısı/konumu, veri pencere uzunluğu, ağ yapısı ve hiperparametreler gibi etkenlerin performansa etkisini ayrıntılı biçimde incelemişlerdir. 1D-CNN modelinin birçok ML/DL yöntemine göre daha başarılı olduğunu raporlanmıştır. Ancak etiketli veri gereksinimi ve gerçek yapılarda hasarlı veri bulmanın zorluğu nedeniyle saha uygulamalarında önemli bir kısıt bulunduğunu belirtilmiştir.

Velez vd. (2024), köprüden alınan ivme tabanlı titreşim verilerinden modal frekansları öznitelik olarak kullanarak yapının güçlendirme öncesi–sonrası durumunu sınıflandırmayı amaçlamışlardır. RF modeli, diğer modellere göre çok daha yüksek başarıyla güçlendirme etkisini ayırt etmiş ve veri setinde %99+ doğruluk düzeyine ulaşmışlardır.

Qui vd. (2025), çelik kafes sistemi için farklı elemanlarda çeşitli hasar düzeyleri tanımlamış ve modal parametreleri matris/harita formuna getirerek 2D CNN'e giriş olarak vermişlerdir. Ağ, hasarlı elemanların yerini ve hasar derecesini eşzamanlı olarak öğrenmiştir. Sonuçlar, 2D CNN'in gürültü altında bile konum tespiti ve düşük bağıl hata ile hasar şiddeti tayini yapabildiğini ve klasik indeks-tabanlı yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve gürültü dayanımı sunduğunu göstermektedir.

1.3. Amaç ve Hedefler

Bu tez çalışmasının amacı, üzerinde birden fazla çatlak bulunan kademeli değişken kesitli Euler–Bernoulli kirişlerinin serbest titreşim davranışlarını analitik olarak incelemek ve analitik yolla üretilen sentetik modal veriler yardımıyla hasarın yeri ve şiddetini makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle tahmin etmektir. Bu kapsamda, bir çatlağın kiriş dinamiği üzerindeki etkileri yerel esneklik yaklaşımı ile analitik olarak modellenerek doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmektedir. Analitik modelden türetilen bu veriler, derin öğrenme tabanlı bir regresyon modeline girdi olarak kullanılarak, analitik ve veri temelli yaklaşımların bütünleştiği bir hasar tespiti çerçevesi sunulması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında belirlenen temel hedefler aşağıda sıralanmıştır:

- Kademeli değişken kesitli, çok basamaklı Euler–Bernoulli kirişlerde çatlakların neden olduğu yerel esneklik etkilerini dikkate alan analitik bir serbest titreşim modelinin geliştirilmesi ve doğrulanması,
- Geliştirilen analitik model yardımıyla, hasarsız ve farklı çatlak senaryolarına ait sentetik modal verilerin (doğal frekanslar ve mod şekilleri) sistematik olarak üretilmesi,
- Elde edilen sentetik modal veriler kullanılarak 1D evrişimsel sinir ağı (1D-CNN) tabanlı bir makine öğrenmesi modelinin eğitilmesi,
- Eğitilen model aracılığıyla çatlakların konumunun ve şiddetinin geri tahmin edilmesi ve tahmin sonuçlarının uygun hasar metrikleri ve hata ölçütleri üzerinden değerlendirilerek yöntemin başarımının ortaya konulması.

1.4. Tezin Kapsamı

Bu tez üç bölüm halinde yapılandırılmıştır. Birinci bölümde, çalışmanın konusu ve önemi açıklanmış; çatlaklı kirişler ve titreşim tabanlı hasar tespiti alanında yapılan önceki çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde, konuya ilişkin temel kavramlar sunulmuş; kademeli değişken kesitli Euler–Bernoulli kirişin analitik modeli formüllerle açıklanmış, kullanılan derin öğrenme yaklaşımı ve seçilen 1D CNN mimarisi ve bu mimarinin tercih edilme nedenleri ile veri hazırlama süreci açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise kurulan analitik ve makine öğrenmesi modelleri ile elde edilen sonuçlar sunulmuş, hasar tespit performansı çeşitli metrikler üzerinden değerlendirilmiş ve bulgular tartışılmıştır. Dördüncü bölümde, elde edilen bulgular özetlenerek çalışmanın genel sonuçları ortaya konulmuş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilere yer verilmiştir. Bu bölümlerin ardından tez, Kaynaklar ve Özgeçmiş bölümleri ile tamamlanmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Problemin Tanımı

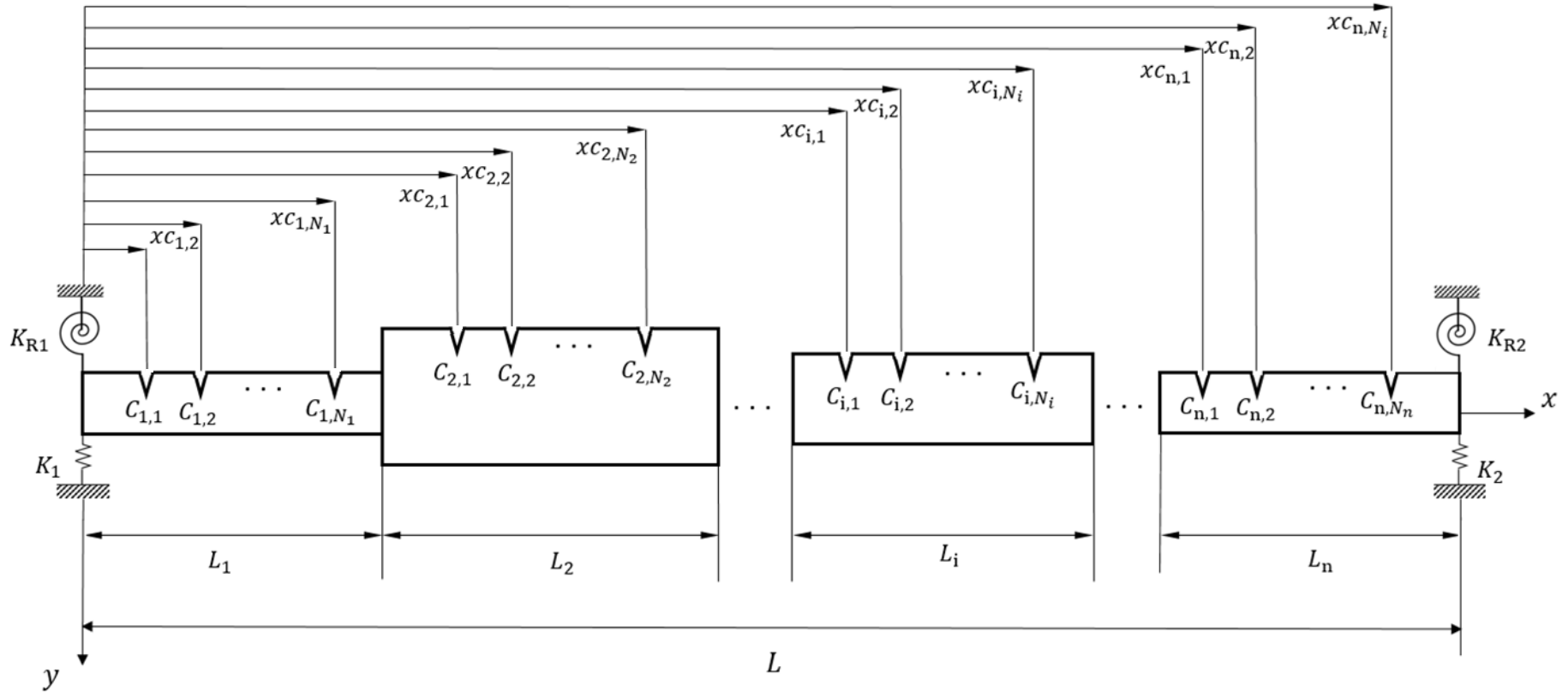
Kademeli değişken kesitli elastik kirişin geometrisi ve koordinat takımı Şekil 1’de gösterilmiştir. Kiriş, her biri doğrusal n adet basamağa sahiptir. Her bir basamaktaki çatlak sayısı N_i ile ifade edilmiştir. Kiriş sınır koşullarının genelliğini sağlamak için sol ve sağ uçta öteleme ve dönme yayları kullanılmıştır. Yay sabitleri değiştirilerek kirişin sınır şartları istenildiği gibi düzenlenebilmektedir. Tablo 1’de, uygulamada yaygın olarak karşılaşılan beş farklı sınır şartı için kullanılacak karakteristik yay sabitleri sunulmuştur.

2.2. Yerel Esneklik Kavramı

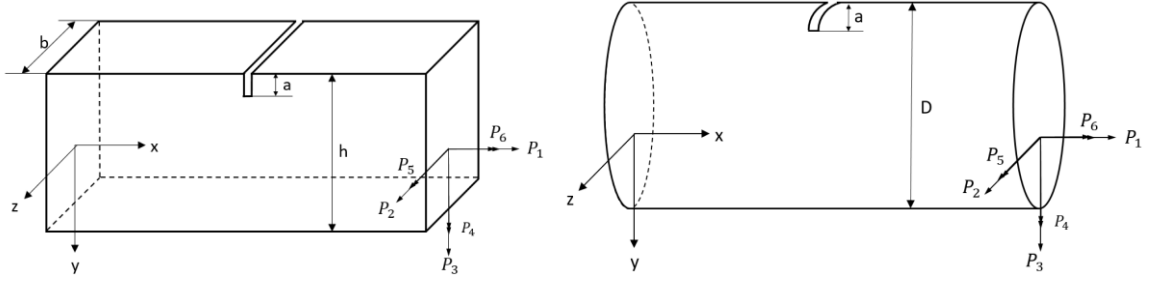
Elastik yapılarda meydana gelen açık kenar çatlakları, çatlak ucunda yoğunlaşan şekil değiştirme enerjisi sebebiyle yapı elemanında yerel rijitlik kayıplarına yol açar. Bu olgu, çatlak bölgesinde yapı elemanının ilave bir esneklik kazandığı şeklinde yorumlanır (Dimarogonas, 1990; Shifrin & Ruotolo, 1999). Dış yükler ile çatlak etrafında biriken şekil değiştirme enerjisi arasındaki ilişkiyi temsil edebilmek için çatlaklar genellikle kütsüz dönel yaylar aracılığıyla modellenmektedir. Burada, çatlağın bulunduğu kesit, kiriş elemanını sağ ve sol olmak üzere iki alt parçaya (segment) ayırmakta ve bunlar, bir kütsüz dönel yay aracılığıyla birbirine bağlanmaktadır. Dolayısıyla, tek basamaklı bir kiriş üzerindeki N adet çatlak, yapıyı $N + 1$ adet kiriş elemanına bölmekte ve N adet kütsüz dönel yay aracılığıyla da sistemin bütünlüğü sağlanmaktadır.

Tablo 1. Yaygın sınır koşulları altında yay sabitleri

Sınır koşulları	Sol uç		Sağ uç	
	K_1	K_{R1}	K_2	K_{R2}
Ankastre – Serbest	∞	∞	0	0
Basit – Basit	∞	0	∞	0
Ankastre – Basit	∞	∞	∞	0
Ankastre – Ankastre	∞	∞	∞	∞
Serbest – Serbest	0	0	0	0



Şekil 1. Kademeli değişken kesitli kirişin geometrisi ve koordinat takımı



Şekil 2. Genel yükleme koşulları altında dairesel ve dikdörtgen kesite sahip çatlaklı kiriş elemanları

Şekil 2’de, kenar çatlağı bulunan dairesel ve dikdörtgen kesitli kiriş elemanının sol ve sağ uçlarında kesit tesirleri gösterilmektedir. Buna göre, sol ve sağ kesitteki iç kuvvet ve moment bileşenleri, aksenal kuvvet P_1 , kesme kuvvetleri P_2 ve P_3 , eğilme momentleri P_4 ve P_5 ve burulma momenti P_6 olarak tanımlanmıştır. Castigliano Teoremine göre çatlak sebebiyle oluşan ilave yer değiştirme miktarı

$$u_i = \frac{\partial U}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} \left[\int_{A_c} J dA \right] \quad (1)$$

şeklinde elde edilir. Burada U çatlak sebebiyle oluşan şekil değiştirme enerjisini, A_c çatlaklı kesit alanını, u_i ise P_i yükü doğrultusunda meydana gelen ilave yer değiştirmeyi ifade etmektedir. J şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu fonksiyonu

$$J = \left(\frac{1}{E'} \right) \left[\left(\sum_{i=1}^6 K_{Ii} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 K_{IIi} \right)^2 + (1 + \nu) \left(\sum_{i=1}^6 K_{IIIi} \right)^2 \right] \quad (2)$$

olarak tanımlanmaktadır (Tada, 2000). Burada, ν Poisson oranı, E elastisite modülüdür. Düzlem gerilme halinde $E' = E$, düzlem şekil değiştirme halinde ise $E' = E/(1-\nu^2)$ şeklinde tanımlıdır. İfadedeki K_{ni} ($n = I, II, III$) terimleri, P_i genel yükleme durumuna karşılık gelen çatlak gerilme şiddeti faktörleri olup

$$K_{ni} = \sigma_i \sqrt{\pi a F_{ni}} \quad (n = I, II, III), \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

şeklinde tanımlıdır (Tada, 2000). Burada, σ_i dış yüke bağlı olarak çatlak kesitinde oluşan gerilmeyi, a çatlak derinliğini ve F_{ni} çatlak geometrisine bağlı boyutsuz çatlak şekil fonksiyonunu göstermektedir.

Yukarıda verilen tanımlamalar doğrultusunda esneklik katsayısı aşağıdaki ifadeyle verilmektedir:

$$C_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \left[\int_{A_c} J dA \right] \quad (4)$$

Buna göre, yapı elemanında yerel esneklik çatlak kesitinde ortaya çıkan iç kuvvet ve moment bileşenleriyle ilişkili serbestlik derecelerine bağlı olarak 6×6 boyutunda bir matris ile ifade edilebilir. Bu tez çalışması kapsamında sadece $x - y$ düzlemindeki eğilme titreşimleri inceleneceğinden kirişin maruz kalabileceği tek iç kuvvet bileşeni P_5 olmaktadır. Dolayısıyla, çalışma kapsamında esneklik matrisinin sadece C_{55} bileşeni göz önüne alınacak olup

$$C_{55} = \frac{\partial^2}{\partial^2 P_5} \left[\int_{A_c} \left(\frac{K_{I5}^2}{E'} \right) dA \right] = \frac{\partial^2}{\partial^2 P_5} \left[\int_0^a \int_{-b/2}^{b/2} \left(\frac{K_{I5}^2}{E'} \right) d\eta d\zeta \right] \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Görüleceği üzere (5) ifadesinde integrasyon çatlak düzleminde tanımlanmış $\zeta - \eta$ yerel koordinat takımına göre gerçekleştirilmektedir. Yerel koordinat takımının çatlak düzleminde konumlandırılması Şekil 3'te dikdörtgen ve dairesel kesitli kirişler için gösterilmiştir.

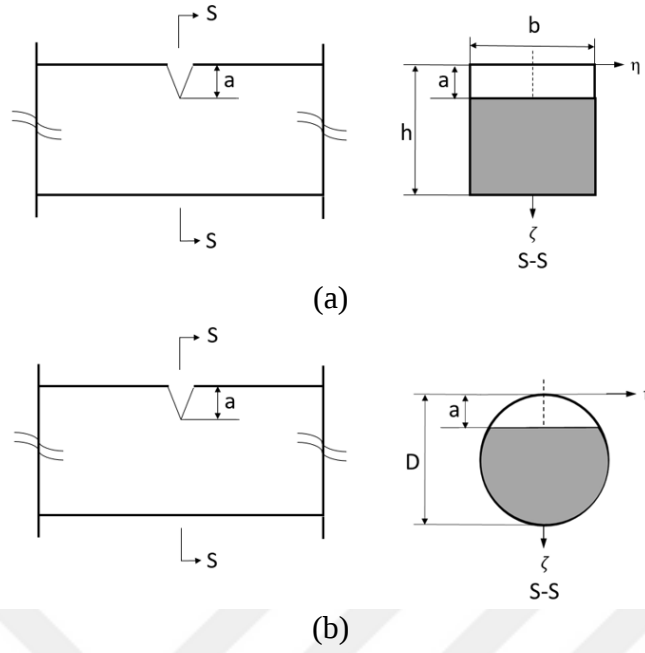
(3) ifadesi, (5) ifadesinde yazılırsa (Tada, 2000)

$$K_{I5} = \sigma_5 \sqrt{\pi \zeta} F_{I5} \quad (6-a)$$

şeklinde K_{I5} gerilme şiddeti faktörü elde edilir. Burada

$$\sigma_5 = \frac{P_5 h}{2I} \quad (6-b)$$

olarak tanımlıdır. Burada P_5 eğilme momentini, I ise kesit atalet momentini ifade etmektedir.



Şekil 3. Çatlak düzleminde tanımlı $\zeta - \eta$ yerel koordinat takımı (a) Dikdörtgen kesitli kiriş (b) Dairesel kesitli kiriş

(6) ifadesi (5) ifadesinde yerine konulursa yerel esneklik sabiti dikdörtgen kesitli kiriş için

$$C = \frac{6\pi h}{E'I_r} \left[\int_0^{a/h} \phi [H(\lambda)]^2 d\phi \right] \quad (7-a)$$

şeklinde, daireseel kesitli kiriş için ise

$$C = \frac{16D}{E'I_c} = \left[\int_0^{a/D} \left\{ \int_{-\sqrt{\phi-\phi^2}}^{\sqrt{\phi-\phi^2}} [1 - 4\Psi^2] \left[2\phi + \sqrt{1 - 4\Psi^2} - 1 \right] [H(\lambda)]^2 d\Psi \right\} d\phi \right] \quad (7-b)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadelerde, h dikdörtgen kesit yüksekliğini, D daireseel kesit çapını, $I_r = bh^3/12$ dikdörtgen kesit için atalet momentini ve $I_c = \pi D^4/64$ daireseel kesit için atalet momentini göstermektedir. Tez kapsamında esneklik matrisinin sadece C_{55} elemanı dikkate alınacağın sadeleştirme amacıyla C olarak ifade edilmiştir. (7) ifadelerinde ayrıca,

dikdörtgen kesitte $\phi = \zeta/h$ ve dairesel kesitte $\phi = \zeta/D$ ve $\Psi = \eta/D$ şeklinde normalize koordinatlar kullanılmıştır. İfadelerde görülen $H(\lambda)$ fonksiyonu ise

$$H(\lambda) = \frac{\sqrt{(2/\pi\lambda)\tan(\pi\lambda/2)} (0.923 + 0.199(1 - \sin(\pi\lambda/2))^4)}{\cos(\pi\lambda/2)} \quad (8)$$

şeklinde tanımlıdır (Tada, 2000). (7) ve (8) ifadeleriyle C değerlerinin elde edilmesi oldukça karmaşık bir integrasyon süreci gerektirmektedir. Zheng vd. (2003), farklı kesit durumları için bu integralleri sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Tez kapsamında esneklik katsayıları belirtilen bu kaynaktan alınmıştır.

2.3. Transfer Matrisi Yöntemi ile Analitik Modelleme

Düzgün doğrusal kesitli elastik Euler-Bernoulli kirişinin serbest titreşimleri için yönetici diferansiyel denklemi

$$EI \frac{d^4 y(x, t)}{dx^4} + \rho A \frac{d^2 y(x, t)}{dt^2} = 0 \quad (9)$$

şeklinde olup, kesit alanı A ve birim hacim kütle ρ ile tanımlanmıştır. Burada $y(x, t)$, kirişin x eksenı boyunca ve t anındaki düşey yer değiştirme fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu diferansiyel denklemin çözümü için

$$y(x, t) = Y(x) T(t) \quad (10)$$

olarak tanımlanır ve (9) ifadesinde yerine yazılırsa

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \beta^4 Y(x) = 0 \quad (11-a)$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} - \omega^2 T(t) = 0 \quad (11-b)$$

şeklinde iki adi diferansiyel denklem elde edilir. Burada $\beta^4 = \omega^2(\rho A/EI)$ olup, ω elastik kirişin doğal frekansını temsil etmektedir. (11) denklemlerinin çözümü

$$Y(x) = B_1 \cos(\beta x) + B_2 \sin(\beta x) + B_3 \cosh(\beta x) + B_4 \sinh(\beta x) \quad (12-a)$$

$$T(t) = a_0 \sin(\omega t) + b_0 \cos(\omega t) \quad (12-b)$$

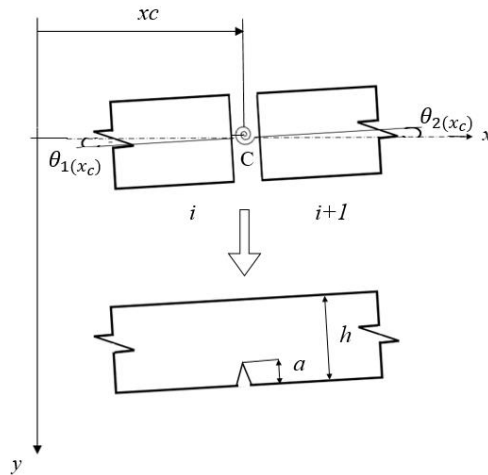
şeklinde elde edilir. Burada görülen $B_1 - B_4$ ile a_0 ve b_0 katsayıları, integrasyon sabitleri olup problemin sınır ve başlangıç şartları yardımıyla elde edileceklerdir.

(12-a) ifadesi dikkate alınarak kirişin dönme $\theta(x)$, eğilme momenti $M(x)$, kesme kuvveti $V(x)$ ifadeleri, ilgili türevler yardımıyla, aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \theta(x) &= \frac{\partial Y(x)}{\partial x} \\ &= \beta [-B_1 \sin(\beta x) + B_2 \cos(\beta x) + B_3 \sinh(\beta x) + B_4 \cosh(\beta x)] \end{aligned} \quad (13-a)$$

$$\begin{aligned} M(x) &= EI \frac{\partial^2 Y(x)}{\partial x^2} \\ &= EI \beta^2 [-B_1 \cos(\beta x) - B_2 \sin(\beta x) + B_3 \cosh(\beta x) + B_4 \sinh(\beta x)] \end{aligned} \quad (13-b)$$

$$\begin{aligned} V(x) &= EI \frac{\partial^3 Y(x)}{\partial x^3} \\ &= EI \beta^3 [B_1 \sin(\beta x) - B_2 \cos(\beta x) + B_3 \sinh(\beta x) + B_4 \cosh(\beta x)] \end{aligned} \quad (13-c)$$



Şekil 4. Çatlaklı kesitte kütleli dönel yay tanımı

Elastik kirişte çatlak, kütsüz dönel yay ile temsil edilmiştir. Şekil 4'te görüleceği üzere çatlağın bulunduğu kesitten kiriş sol ve sağda iki adet sağlam kiriş ve bir adet dönel yay ile birbirine bağlanmaktadır. Çatlağın solundaki ve sağındaki sağlam kiriş segmentleri için ye değiştirme, dönme, eğilme momenti ve kesme kuvveti (12-a) ve (13) ifadelerinden faydalanılarak

$$\begin{Bmatrix} Y_i(x) \\ \theta_i(x) \\ M_i(x) \\ V_i(x) \end{Bmatrix} = [S(x)] \begin{Bmatrix} B_i^1 \\ B_i^2 \\ B_i^3 \\ B_i^4 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} Y_{i+1}(x) \\ \theta_{i+1}(x) \\ M_{i+1}(x) \\ V_{i+1}(x) \end{Bmatrix} = [S(x)] \begin{Bmatrix} B_{i+1}^1 \\ B_{i+1}^2 \\ B_{i+1}^3 \\ B_{i+1}^4 \end{Bmatrix}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,

$$[S(x)] = \begin{bmatrix} \cos(\beta x) & \sin(\beta x) & \cosh(\beta x) & \sinh(\beta x) \\ -\beta \sin(\beta x) & \beta \cos(\beta x) & \beta \sinh(\beta x) & \beta \cosh(\beta x) \\ -EI\beta^2 \cos(\beta x) & -EI\beta^2 \sin(\beta x) & EI\beta^2 \cosh(\beta x) & EI\beta^2 \sinh(\beta x) \\ EI\beta^3 \sin(\beta x) & -EI\beta^3 \cos(\beta x) & EI\beta^3 \sinh(\beta x) & EI\beta^3 \cosh(\beta x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

şeklindedir.

Çatlak kesitinde süreklilik koşulları aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} Y_{i+1}(x_c) &= Y_i(x_c) \\ \theta_{i+1}(x_c) &= \theta_i(x_c) + C M_i(x_c) \\ M_{i+1}(x_c) &= M_i(x_c) \\ V_{i+1}(x_c) &= V_i(x_c) \end{aligned} \quad (16)$$

Bu ifade, aşağıdaki gibi matris formda yeniden yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} Y_{i+1}(x_c) \\ \theta_{i+1}(x_c) \\ M_{i+1}(x_c) \\ V_{i+1}(x_c) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & C & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_i(x_c) \\ \theta_i(x_c) \\ M_i(x_c) \\ V_i(x_c) \end{Bmatrix} \quad (17)$$

(17) ifadesi daha kısa formda aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\{Q_{i+1}(xc)\} = [C]\{Q_i(xc)\} \quad (18)$$

Çok basamaklı değişken kesitli kiriş için (14) ifadeleri genelleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\{Q_{i,j}(x)\} = [S_i(x)]\{B_{i,j}\} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, N_i + 1 \quad (19)$$

ifadesi geçerlidir. Burada

$$\{Q_{i,j}(x)\} = \begin{Bmatrix} Y_{i,j}(x) \\ \theta_{i,j}(x) \\ M_{i,j}(x) \\ V_{i,j}(x) \end{Bmatrix} \quad (20-a)$$

$$\{B_{i,j}\} = \begin{Bmatrix} B_{i,j}^1 \\ B_{i,j}^2 \\ B_{i,j}^3 \\ B_{i,j}^4 \end{Bmatrix} \quad (20-b)$$

$$[S_i(x)] =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\beta_i x) & \sin(\beta_i x) & \cosh(\beta_i x) & \sinh(\beta_i x) \\ -\beta_i \sin(\beta_i x) & \beta_i \cos(\beta_i x) & \beta_i \sinh(\beta_i x) & \beta_i \cosh(\beta_i x) \\ -EI_i \beta_i^2 \cos(\beta_i x) & -EI_i \beta_i^2 \sin(\beta_i x) & EI_i \beta_i^2 \cosh(\beta_i x) & EI_i \beta_i^2 \sinh(\beta_i x) \\ EI_i \beta_i^3 \sin(\beta_i x) & -EI_i \beta_i^3 \cos(\beta_i x) & EI_i \beta_i^3 \sinh(\beta_i x) & EI_i \beta_i^3 \cosh(\beta_i x) \end{bmatrix} \quad (20-c)$$

şeklindedir. Benzer şekilde (18) ifadesi de aşağıdaki gibi genel formda yazılabilir:

$$\{Q_{i,j+1}(xc_{i,j})\} = [C_{i,j}]\{Q_{i,j}(xc_{i,j})\} \quad (21-a)$$

Burada,

$$[C_{i,j}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & C_{i,j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21-b)$$

olarak tanımlıdır.

(19) ve (21-a) ifadelerinden bir basamak içerisinde bulunan ardışık iki segmentin katsayı matrisleri, $x = x_{i,j}$ olmak üzere,

$$\{B_{i,j+1}\} = [S_i(x_{i,j})]^{-1} [C_{i,j}] [S_i(x_{i,j})] \{B_{i,j}\} \quad (22)$$

şeklinde birbirlerine bağlanabilirler. Burada

$$\{B_{i,j+1}\} = [P_{i,j}] \{B_{i,j}\} \quad (23-a)$$

$$[P_{i,j}] = [S_i(x_{i,j})]^{-1} [C_{i,j}] [S_i(x_{i,j})] \quad (23-b)$$

olarak tanımlıdır. (26-a) ifadesinden yola çıkarak, N_i tane çatlak bulunan i . basamağın $(N_i + 1)$. parçasının katsayılar matrisi ile birinci parçasının katsayılar matrisi arasında

$$\{B_{i,(N_i+1)}\} = [P_{i,N_i}] [P_{i,(N_i-1)}] \dots [P_{i,2}] [P_{i,1}] \{B_{i,1}\} \quad (24)$$

bağıntısı kurulabilir. Bu ifade daha kompakt bir formda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\{B_{i,(N_i+1)}\} = [T_i] \{B_{i,1}\} \quad (25-a)$$

Burada $[T_i]$ lokal transfer matrisi olup

$$[T_i] = [P_{i,N_i}] [P_{i,(N_i-1)}] \dots [P_{i,2}] [P_{i,1}] \quad (25-b)$$

şeklinde tanımlıdır.

Kirişte kesit değişimlerinin olduğu noktada süreklilik koşulları gereğince

$$\{Q_{(i+1),1}(x_i)\} = \{Q_{i,(N_i+1)}(x_i)\} \quad (26)$$

ifadesi geçerlidir. (25-a) ve (26) ifadeleri dikkate alınarak kesit değişimi olan noktanın sağında ve solundaki basamakların birinci parçalarına ait katsayı matrisleri arasındaki ilişki

$$\{B_{(i+1),1}\} = [R_i]\{B_{i,1}\} \quad (27-a)$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$[R_i] = [S_{i+1}(x_i)]^{-1}[S_i(x_i)][T_i] \quad (27-b)$$

olarak tanımlıdır. (27-a) ifadesi, tüm ardışık basamaklar için tekrarlandığında

$$\{B_{n,(N_n+1)}\} = [T_n][R_{i-1}][R_{i-2}] \dots [R_2][R_1]\{B_{1,1}\} = [T_{global}]\{B_{1,1}\} \quad (28)$$

elde edilir. Bu ifade, basamaklı kirişin son basamağının son parçası ile ilk basamağının ilk parçası arasında bir ilişki kurar. İfadedeki

$$[T_{global}] = [T_n][R_{i-1}][R_{i-2}] \dots [R_2][R_1] \quad (29)$$

global transfer matrisini göstermektedir.

Kirişte sınır şartlarının uygulanma prosedürü izleyen kısımda açıklanmıştır. Buna göre, kirişte mesnet şartlarının uygulandığı sol uç ($x = 0$) ve sağ uç ($x = L$) arasında (19) ve (28) ifadeleri göz önüne alındığında aşağıdaki ilişki kurulabilir:

$$\{Q_{n,(N_n+1)}(L)\} = [S_n(x_{n,(N_n+1)})][T_{global}][S_1(0)]^{-1}\{Q_{1,1}(0)\} = [Z]\{Q_{1,1}(0)\} \quad (30)$$

Şekil 1'e göre problemin genel sınır şartları

$$M(0) = K_{R1} \theta(0) \quad (31-a)$$

$$V(0) = -K_1 Y(0) \quad (31-b)$$

$$M(L) = -K_{R2} \theta(L) \quad (31-c)$$

$$V(L) = K_2 Y(L) \quad (31-d)$$

olarak yazılır. (31) ifadeleri (30) ifadesinde yerine yazıldığında

$$\begin{pmatrix} Y_{n,(N_n+1)}(L) \\ \theta_{n,(N_n+1)}(L) \\ -K_{R2} \theta_{n,(N_n+1)}(L) \\ K_2 Y_{n,(N_n+1)}(L) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{1,1}(0) \\ \theta_{1,1}(0) \\ K_{R1} \theta_{1,1}(0) \\ -K_1 Y_{1,1}(0) \end{pmatrix} \quad (32)$$

matris denklemi elde edilir. Bu ifade

$$[W] \begin{Bmatrix} Y_{1,1}(0) \\ \theta_{1,1}(0) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (33-a)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Burada

$$[W] = [[W_1] - [W_2]] \quad (33-b)$$

$$[W_1] = \begin{bmatrix} K_2 & 0 \\ 0 & K_{R2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} - K_1 Z_{14} & Z_{12} + K_{R1} Z_{13} \\ Z_{21} - K_1 Z_{24} & Z_{22} + K_{R1} Z_{23} \end{bmatrix} \quad (33-c)$$

$$[W_2] = \begin{bmatrix} Z_{41} - K_1 Z_{44} & Z_{42} + K_{R1} Z_{43} \\ Z_{31} - K_1 Z_{34} & Z_{32} + K_{R1} Z_{33} \end{bmatrix} \quad (33-d)$$

olarak tanımlanmıştır. (33-a) ifadesinin sıfır olmayan çözümleri

$$\det[W] = 0 \quad (34)$$

ile elde edilen karakteristik fonksiyonun kökleri olup, kirişin doğal frekanslarını (ω) vermektedir.

(28) ifadesi (32) denkleminde yazılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B_{1,1}^1 \\ B_{1,1}^2 \\ B_{1,1}^3 \\ B_{1,1}^4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (35)$$

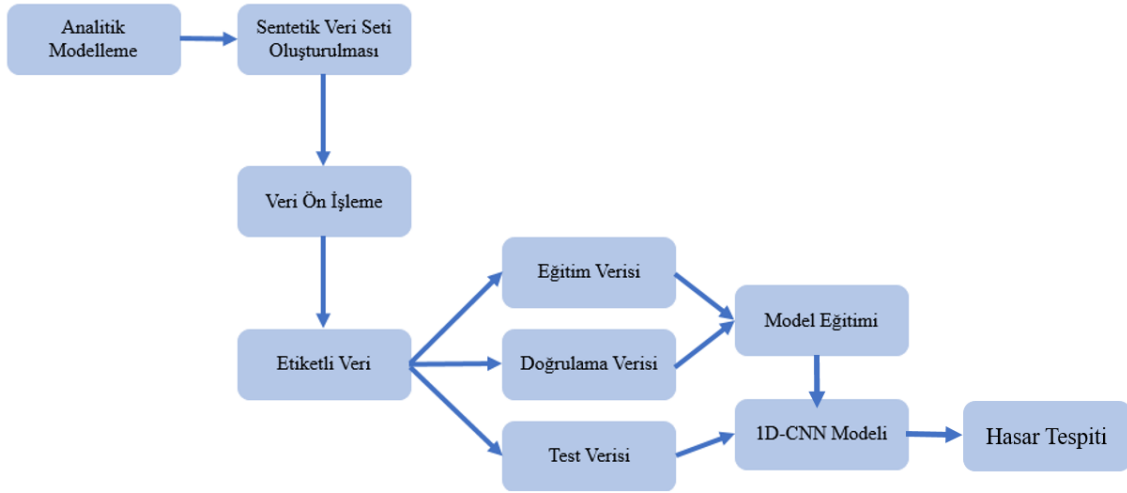
ifadesi elde edilir. Burada Q matrisinin elemanları

$$\begin{aligned}
Q_{1,1} &= EI_1 m_1^2 \\
Q_{1,2} &= K_{R1} m_1 \\
Q_{1,3} &= -EI_1 m_1^2 \\
Q_{1,4} &= K_{R1} m_1 \\
Q_{2,1} &= -K_1 \\
Q_{2,2} &= EI_1 m_1^3 \\
Q_{2,3} &= -K_1 \\
Q_{2,4} &= -EI_1 m_1^3 \\
Q_{3,1} &= -K_{R2}(T_{21} - EI_1 m_1^2 T_{23}) - T^{31} + EI_1 m_1^2 T_{33} \\
Q_{3,2} &= -K_{R2} m_1 (T_{22} - EI_1 m_1^2 T_{24}) - m_1 (T_{32} - EI_1 m_1^2 T_{14}) \\
Q_{3,3} &= -K_{R2}(T_{21} + EI_1 m_1^2 T_{23}) - T_{31} - EI_1 m_1^2 T_{33} \\
Q_{3,4} &= -K_{R2} m_1 (T_{22} + EI_1 m_1^2 T_{24}) - m_1 (T_{32} + EI_1 m_1^2 T_{14}) \\
Q_{4,1} &= K_2 (T_{11} - EI_1 m_1^2 T_{13}) - T_{41} + EI_1 m_1^2 T_{43} \\
Q_{4,2} &= K_2 m_1 (T_{12} - EI_1 m_1^2 T_{14}) - m_1 (T_{42} - EI_1 m_1^2 T_{44}) \\
Q_{4,3} &= K_2 (T_{11} + EI_1 m_1^2 T_{13}) - T_{41} - EI_1 m_1^2 T_{43} \\
Q_{4,4} &= K_2 m_1 (T_{12} + EI_1 m_1^2 T_{14}) - m_1 (T_{42} + EI_1 m_1^2 T_{44})
\end{aligned} \tag{36}$$

şeklinde tanımlıdır. (34) denkleminde elde edilen kökler (doğal frekanslar) sırayla (35) ifadesinde yazılarak B katsayıları kirişin sol ucundaki parça için elde edilir. Ardından (28) yardımıyla diğer parçaların katsayıları da belirlenerek kirişin o frekansa ait mod şekli elde edilmiş olur.

2.4. Hasar Tespit Metodolojisi

Bu çalışmada hasar tespiti süreci, analitik modelleme temelli olarak oluşturulan sentetik verilerin makine öğrenmesi yaklaşımlarıyla değerlendirilmesine dayalı bütüncül bir metodoloji çerçevesinde ele alınmıştır. Önerilen metodoloji, analitik çözümden başlayarak veri üretimi, veri işleme, model eğitimi ve hasar tespiti sonuçlarının elde edilmesine kadar uzanan çok aşamalı bir iş akışından oluşmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Hasar tespit metodolojisi akış diyagramı

İlk aşamada, yapısal sistemin analitik modeli kurularak farklı hasar senaryolarını temsil eden karakteristik dinamik çıktılar elde edilmiştir. Bu çıktılar kullanılarak, hasarlı ve hasarsız durumları kapsayan etiketli bir sentetik veri seti oluşturulmuştur. Ardından, elde edilen veriler uygun ön işleme adımlarından geçirilerek makine öğrenmesi uygulamalarına elverişli hâle getirilmiştir.

Ön işleme sürecini takiben veri seti; eğitim, doğrulama ve test alt kümelerine ayrılmıştır. Eğitim ve doğrulama verileri kullanılarak seçilen derin öğrenme tabanlı modelin parametreleri belirlenmiş ve model performansı optimize edilmiştir. Son aşamada ise, eğitilen model test verisi üzerinde uygulanarak hasar tespitine ilişkin nihai sonuçlar elde edilmiştir.

Bu bölümde sunulan metodoloji, hasar tespit problemine sistematik ve tekrarlanabilir bir yaklaşım getirmekte olup, her bir aşama izleyen alt bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

2.4.1. Sentetik Veri Seti Oluşturma

Ham veri seti, kirişin tüm boyu boyunca farklı olası hasar senaryolarını temsil edecek şekilde tasarlanmış; tek bir bölgeye veya tek bir hasar tipine yığılmayan, genellenebilirliği yüksek bir örneklem uzayı hedeflenmiştir.

Veri seti tasarlanırken ilk kritik husus, çatlak sayısına göre sınıfların veri içinde birbirini domine etmesini engellemektir. Bu çalışmada yapılan deneme eğitimlerinde, bazı

hasar türlerinin veri setinde baskın olması halinde modelin tahminlerinin bu örüntüler etrafında yoğunlaştığı, ancak nadir senaryolarda hata seviyelerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle toplam senaryo sayısı mümkün olduğunca dengeli bir dağılım hedeflenerek kurgulanmıştır. Böylece model hem tek çatlaklı hem çoklu çatlaklı durumları karşılaştırılabilir sayıda görerek öğrenmekte; veri setinin istatistiksel yapısı, öğrenme sürecinde tek bir senaryo grubunun baskın hale gelmesini önlemektedir.

Hasarsız durum, her bir sınır koşulu için fiziksel olarak tek bir temel duruma karşılık gelmesine rağmen, pratikte tek bir “hasarsız örnek” ile modelin hasarsız davranışı güvenilir biçimde öğrenemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle hasarsız durumu daha gerçekçi bir veri seti ile temsil edebilmek için doğal frekanslar ile mod şekillerine düşük seviyeli gürültü eklenerek hasarsız sınıf içinde kontrollü bir çeşitlilik oluşturulmuştur. Böylece model, hasarsız durumu tek bir örnek üzerinden değil, hasarsız davranışın beklenen değişkenliği içerisinde öğrenmektedir.

Çatlaklı senaryolar hem tek çatlak hem de çoklu çatlak durumlarını içerecek şekilde üretilmiştir. Çoklu çatlak senaryolarının veri setinde yer alması, problemin daha gerçekçi ve daha zorlayıcı bir formunu temsil etmesi; aynı zamanda modelin çatlaklar arası etkileşim durumlarını öğrenebilmesini sağlamıştır. Senaryolar oluşturulurken yalnızca çatlak sayısının dengeli temsil edilmesi değil, çatlakların giriş boyu üzerindeki konumsal dağılımının ve çatlak şiddetini temsil eden derinlik oranlarının da kapsayıcı olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, çatlakların belirli bir bölgeye yığılmasını önleyecek şekilde konumsal dengeleme gözetilmiş; benzer şekilde derinlik oranlarının da belirli aralıklarda yoğunlaşmasını engellemek amacıyla farklı derinlik seviyelerini temsil eden örneklerin veri setinde dengeli yer almasına dikkat edilmiştir. Böylece eğitim setinin hem girişin tamamını hem de farklı hasar şiddeti düzeylerini birlikte temsil eden bir öğrenme uzayı sunması amaçlanmıştır.

Veri setinin kalitesini doğrudan etkileyen diğer bir husus, birbirine aşırı benzeyen senaryoların veri setinde tekrarlı biçimde yer almasıdır. Çok benzer konum ve derinlik kombinasyonlarına sahip örneklerin artması, modelin gereksiz tekrarlar üzerinde öğrenmesine ve gerçek çeşitliliğin azalmasına yol açtığı yapılan ön değerlendirmelerde gözlemlenmiştir. Bu nedenle, senaryo üretiminde aynı veya neredeyse aynı parametrelerle oluşan örneklerden kaçınılmış; böylece veri setinin etkin çeşitliliği korunmuştur. Bu yaklaşım, modelin yalnızca belirli örüntüleri ezberlemesini değil, farklı hasar kombinasyonları arasında genelleme yapabilmesini destekler.

Ham veri setinde her senaryo önce çatlak sayısı ve hasar durumu üzerinden etiketlenmiştir. En üst seviyede senaryolar, hasarsız ve hasarlı olarak ayrılmakta; bununla birlikte modelin çoklu çatlak durumlarını öğrenebilmesi için çatlak varlığı bilgisi her çatlak indeksi için ayrıca temsil edilmektedir. Bu amaçla hasarlı senaryolarda her bir potansiyel çatlak, üç temel parametre üzerinden tanımlanmıştır: (i) çatlak var/yok bilgisi, (ii) çatlak konumu ve (iii) çatlak derinliği. Bu temsil, çoklu çatlak problemlerde hem sayısal kararlılık hem de model çıktılarının standardize edilmesi açısından avantaj sağlar; çünkü model tüm senaryolarda sabit boyutlu bir çıktı uzayında işlem yapar ve “olmayan çatlaklar” var/yok etiketi ile ayrıştırılır.

Her bir senaryoya ait modal çıktı seti iki temel bileşen üzerinden tanımlanmıştır: doğal frekanslar ve mod şekilleri. Doğal frekanslar, hasarın sistem dinamiği üzerindeki toplam (küresel) etkisini sayısal olarak özetleyen, düşük boyutlu ancak ayırt edici bir göstergedir. Buna karşın mod şekilleri, kiriş boyunca yer değiştirme dağılımını içerdiğinden daha zengin bir işaret sunar. Bu nedenle ham veri setinde her senaryo için seçilen ilk modlara ait doğal frekanslar kaydedilmiş; mod şekilleri ise kiriş eksenini boyunca tanımlanan sabit bir konum ızgarasında örneklendirilerek sayısallaştırılmıştır. Böylece her senaryo, sabit uzunlukta bir frekans vektörü ve aynı boyutta bir mod şekli dizisi ile temsil edilmekte; bu standart temsil biçimi, farklı hasar durumlarının doğrudan karşılaştırılmasını ve derin öğrenme modellerinin tutarlı bir giriş formatı üzerinde eğitilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu yaklaşımlar sayesinde, kirişin farklı konum ve hasar şiddeti düzeylerini kapsayan geniş bir senaryo uzayı oluşturulmuş; böylece derin öğrenme modelinin farklı hasar konfigürasyonlarında genelleme yapmasını destekleyen tutarlı ve temsil gücü yüksek bir eğitim veri seti hedeflenmiştir.

2.4.2. Veri Ön İşleme

Veri ön işleme adımı farklı ölçeklerdeki değişkenlerin öğrenme sürecini olumsuz etkilemesini engellemek ve optimizasyonu daha düzenli hâle getirmek için kullanılan standartlaştırma/ölçekleme yaklaşımına dayanmaktadır. Bu tezde yapılan uygulamalarda, ölçek uyumsuzluğu giderildiğinde sapmaların daha tutarlı olduğu ve modelin farklı senaryolar üzerindeki genelleme performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu gözlem

doğrultusunda işlenmiş veri seti, frekans ve uzaysal bileşenlerin her biri için ayrı fakat tutarlı bir dönüşümle kurgulanmıştır.

Frekans bileşeni için her mod frekansı Z-skor dönüşümü ile standartlaştırılarak istatistiksel olarak karşılaştırılabilir bir ölçeğe taşınmıştır. Z-skor, bir değişkeni kendi ortalaması etrafında merkezleyip standart sapmasına bölerek boyutsuzlaştırır ve her bir özelliğin dağılımını sıfır ortalama–birim varyans ölçeğine taşır. Matematiksel tanımı

$$\frac{x - \mu}{\sigma} \quad (39)$$

şeklindedir. Burada μ ilgili özelliğin ortalaması, σ standart sapmasıdır (Izanman, 2008). Z-skorun bu amaçla kullanımı her değişkenin ortalamasının çıkarılması ve standart sapmasına bölünmesiyle birim varyanslı bir temsil elde edilmesine dayanır. Standartlaştırılmış frekans temsili kullanıldığında modelin eğitim sürecinin daha kararlı olduğu ve farklı k (çatlak sayısı) sınıflarındaki performans dengesinin iyileştiği görülmüştür.

Uzaysal bileşende ise ham mod şekli ordinatları, hasarın yerel etkisini daha belirgin yakalayabilmek amacıyla eğrilik temsiline dönüştürülmüştür. Eğrilik temsili, türev tabanlı olduğu için ($\kappa = Y''$) uç değerlere daha duyarlıdır. Bu çalışmada eğrilik büyüklüğü, her senaryo için mutlak değerlerin %99'luk dilimi (p99) esas alınarak, uç değerlerin etkisini azaltacak şekilde daha güvenilir bir ölçekleme yapılmış; değerler $[0,1]$ aralığında normalize edilerek uzaysal bir ölçeklenmiş harita üretilmiştir. Bu ölçekleme sonrası girdilerin sayısal aralığının daha tutarlı hale geldiği, uç değerlerin eğitim sürecini baskılamasının azaldığı ve kayıp fonksiyonunun daha düzenli yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca, tüm senaryoların aynı boyutta (101 nokta $\times$ mod sayısı) ve aynı sayı aralığında bir uzaysal temsil taşınması, giriş formatını standartlaştırarak eğitim/karşılaştırma süreçlerini kolaylaştırmıştır.

Sonuç olarak, ön işleme; ham veri setindeki etiketleme şemasını koruyacak biçimde senaryo kimliği ve sınır koşulu bilgileri, çatlak sayısı, çatlak parametreleri ve modal girdiler olarak her modun Z-skor değeri ile eğrilik tabanlı ölçeklenmiş uzaysal haritalarını içeren tutarlı bir öğrenme tabanı sunmaktadır. Ön işleme adımlarının tanımı ve kullanılan temel ayarların meta olarak kaydedilmesi ise veri üretim sürecinin izlenebilirliğini ve deneylerin tekrarlanabilirliğini destekleyen tamamlayıcı bir bileşen olarak ele alınmıştır.

2.4.3. Model Seçimi

Model mimarisinin seçimi ve nihai regresyon omurgasının belirlenmesi aşaması, bu tez kapsamında ön denemelerle yürütülen bir metodoloji adımıdır. Titreşim tabanlı ters problemde amaç, her senaryoya ait mosal girdilerden hareketle çatlakların konumu ve derinliğinin tahmin edilmesidir. Bu tür bir problemde girişler tek bir skaler özelliğe indirgenemediğinden; farklı ölçeklerdeki global ve yerel bilgiyi birlikte kullanabilen, aynı zamanda yüksek boyutlu girdiden kararlı biçimde genelleme yapabilen bir model sınıfına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle model seçimi, doğrudan tek bir yöntem varsayımıyla değil; farklı öğrenme yaklaşımlarının performansının sistematik biçimde denenip karşılaştırılmasıyla yapılmıştır.

Bu kapsamda RF, başlangıç için güçlü bir kıyas modeli olarak seçilmiştir. RF; çok sayıda karar ağacının birlikte çalıştığı bir ansambl yapı olduğu için doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilir ve genel olarak tek bir ağaca göre daha kararlı sonuç verir. Ayrıca özellik ölçeklemesine aşırı duyarlı olmaması ilk tarama aşamasında RF'yi pratik bir seçenek haline getirmiştir (Zhou vd., 2014). MLP, verinin vektör biçiminde işlendiği temel bir derin öğrenme yaklaşımı olarak test edilmiştir. Burada frekans bileşeni ile uzaysal girdilerin (harita/seri gibi) düzleştirilerek tek bir özellik vektöründe birleştirilebilmesi MLP'yi doğal bir aday yapmaktadır (Goodfellow vd., 2016). Böylece, tam bağlantılı katmanlarla regresyon yaklaşımının problem üzerindeki performansı doğrudan gözlemlenebilmiştir. Ek olarak XGBoost, tablolastırılmış veri üzerinde yüksek performanslı ve yarışmacı algoritmalar arasında yer aldığı için değerlendirmeye dahil edilmiştir. Ağaç tabanlı gradyan artırma mantığıyla çalışması ve düzenleme seçenekleri sayesinde özellikle sınırlı öznitelik mühendisliğiyle dahi güçlü sonuçlar verebildiği bilinmektedir. Bu nedenle XGBoost, hem RF'ye göre daha gelişmiş bir ağaç tabanlı alternatif hem de derin öğrenmeye geçmeden önce önemli bir kıyas noktası olarak kullanılmıştır (Garg vd., 2021). Özetle, bu üç yöntemin seçilme gerekçesi; mühendislik problemlerinde yaygın kullanımları, hızlı prototiplemeye uygun olmaları ve farklı öğrenme varsayımlarıyla (ansambl ağaç, tam bağlantılı ağ, gradyan artırma) aynı probleme farklı açılardan yaklaşarak güvenilir bir karşılaştırma zemini sunmalarıdır.

Ön denemeler, geniş boyunca tanımlanan uzaysal girdinin RF, MLP ve XGBoost'a düzleştirilmiş bir vektör olarak verilmesinin önemli bir bilgi kaybına yol açtığını göstermiştir. Çünkü mod şekli/eğrilik temsili yalnızca değerlerden ibaret değildir; asıl ayırt

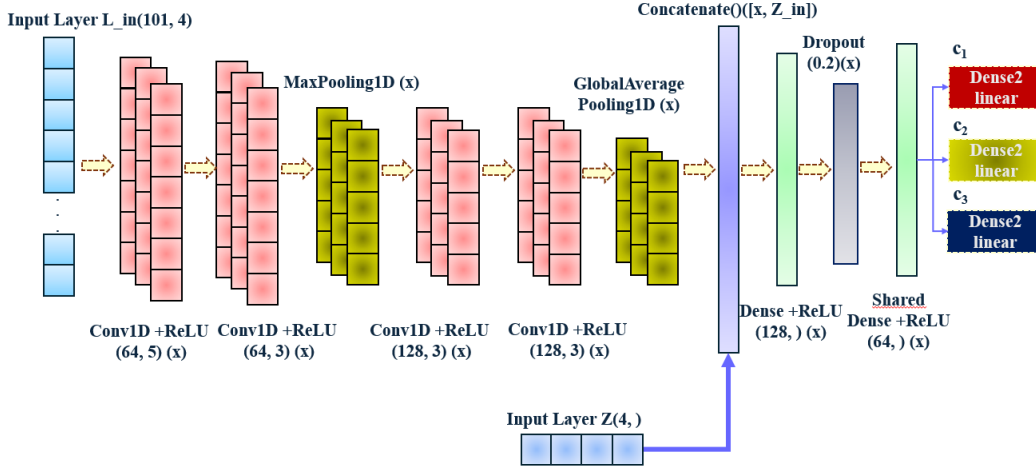
edici bilgi çoğu zaman komşu noktaların birlikte oluşturduğu yerel desenlerde (çatlak bölgesindeki lokal bozulmalar gibi) taşınır. Vektörleştirme, bu komşuluk ilişkilerini zayıflatır ve modelin yerel örüntüleri öğrenmesini güçleştirir. Buna karşılık evrişimsel yaklaşımlar, veriyi baştan itibaren 1B uzaysal bir sinyal olarak ele alır ve küçük pencereler üzerinden filtreleme yaparak yerel yapıları doğrudan yakalayabilir. Bu nedenle, uzaysal temsilden hasara duyarlı işaretleri daha verimli çıkardığı gözlenmiş; nihai model sınıfı seçiminde bu bulgu belirleyici olmuştur. Farklı öğrenme yaklaşımları ön denemelerde MAE (Mean Absolute Error, Ortalama Mutlak Hata) üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda uzaysal girdinin yerel örüntülerini daha iyi yakalaması nedeniyle en düşük ve en dengeli hata davranışının 1D-CNN ile elde edildiği Tablo 9’da görülmektedir.

Bu gözlemler doğrultusunda, nihai model omurgası olarak 1B Evrişimsel Sinir Ağı (1D-CNN) tercih edilmiştir. Şekil 6’da görüldüğü üzere uzaysal giriş, dört farklı moda ait haritaların birlikte kullanıldığı (101, 4) boyutlu bir yapıdadır. Ağın ön bölümünde yer alan ardışık Conv1D+ReLU katmanları (64 filtre-çekirdek 5 ve 64 filtre-çekirdek 3), giriş boyunca küçük pencereler üzerinden ilerleyerek çatlak bölgesinde oluşan yerel değişimleri yakalamayı hedefler. Bunu izleyen MaxPooling1D adımı, temsili daha kompakt hale getirerek öğrenmeyi kararlılaştırır ve hesap yükünü azaltır. Ardından gelen iki adet Conv1D+ReLU katmanı (128 filtre-çekirdek 3) ile daha soyut ve ayrıştırıcı özellikler çıkarılır; Global Average Pooling (GAP) ile bu uzaysal özellikler tek bir özet vektöre indirgenir .

Şekil 6’da modelin ikinci girişi olarak, frekanslara/özet ölçütlere karşılık gelen Z(4,) vektörü yer almakta ve GAP sonrası elde edilen özet vektör ile birleştirme (Concatenate) katmanında bir araya getirilmektedir. Böylece model, frekansların sunduğu global hasar bilgisini ve uzaysal haritaların taşıdığı yerel işaretleri aynı temsilde bütünleştirerek öğrenir. Birleştirilmiş özellik vektörü, Dense (128, ReLU) ve Dense (64, ReLU) katmanları üzerinden işlenmekte; araya eklenen Dropout (0.2) ile özellikle benzer sentetik senaryolarda görülebilen aşırı öğrenme eğilimi sınırlandırılmaktadır .

Tablo 2. Farklı öğrenme yaklaşımlarının metrikler üzerinden karşılaştırılması

Model	Çatlak Sayısı (k)	Çatlak numarası (c _i)	Konum (x)			Derinlik (d/h)		
			MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²
RF	1	c ₁	0,004	0,010	0,985	0,027	0,044	0,860
	2	c ₁	0,011	0,018	0,941	0,052	0,071	0,657
		c ₂	0,021	0,031	0,768	0,060	0,080	0,560
	3	c ₁	0,016	0,030	0,711	0,061	0,085	0,548
		c ₂	0,032	0,042	0,677	0,084	0,104	0,344
		c ₃	0,016	0,026	0,785	0,055	0,072	0,590
XG-Boost	1	c ₁	0,004	0,010	0,986	0,017	0,032	0,925
	2	c ₁	0,011	0,017	0,951	0,043	0,063	0,726
		c ₂	0,019	0,028	0,800	0,056	0,078	0,575
	3	c ₁	0,015	0,027	0,778	0,051	0,074	0,653
		c ₂	0,030	0,039	0,716	0,082	0,104	0,344
		c ₃	0,015	0,024	0,820	0,050	0,069	0,625
MLP	1	c ₁	0,013	0,023	0,925	0,044	0,076	0,588
	2	c ₁	0,025	0,039	0,732	0,065	0,089	0,456
		c ₂	0,033	0,042	0,551	0,069	0,090	0,444
	3	c ₁	0,022	0,034	0,629	0,085	0,116	0,158
		c ₂	0,039	0,051	0,515	0,107	0,139	0,172
		c ₃	0,052	0,068	0,453	0,083	0,108	0,077
CNN	1	c ₁	0,007	0,009	0,987	0,021	0,027	0,946
	2	c ₁	0,014	0,020	0,946	0,037	0,052	0,971
		c ₂	0,012	0,016	0,963	0,049	0,064	0,952
	3	c ₁	0,010	0,014	0,959	0,045	0,061	0,921
		c ₂	0,010	0,013	0,969	0,050	0,069	0,880
		c ₃	0,011	0,014	0,969	0,048	0,065	0,920



Şekil 6. Önerilen 1D-CNN tabanlı çok girişli–çok başlı regresyon modelinin mimarisi

Çıkış katmanını tasarımı, çoklu çatlak yapısına uygun olacak şekilde çok başlı (multi-head) regresyon olarak kurgulanmıştır. Ortak (shared) temsil üzerinden beslenen her bir başlık, ilgili çatlakın konum ve derinlik parametrelerini üreten iki boyutlu doğrusal (Dense2-linear) bir çıktı üretir. Böylece model, tek ileri geçişte üç potansiyel çatlak için toplam altı sürekli değişken tahmin eder; bu yaklaşım hem yorumlanabilirliği artırır hem de her çatlak ayrı bir hedef alt-problem şeklinde ele alarak öğrenmenin daha düzenli biçimde gerçekleşmesine katkı sağlar.

Veri setinde bazı senaryolarda belirli çatlakların bulunmaması doğrudan regresyon çıktıları için yapısal bir zorluk doğurur; çünkü, olmayan çatlakın konumu/derinliği fiziksel olarak tanımsızdır ve bu hedeflerin kayba dahil edilmesi modelin yanlış bir öğrenme sinyali almasına neden olur. Bu problemi çözmek amacıyla, her çatlak için var/yok bilgisinden türetilen maskeler, eğitimde `sample_weight` olarak kullanılmıştır. Çatlak mevcut değilse ilgili başlığın `sample_weight` değeri 0 yapılarak o örneğin o başlıktaki kayba katkısı sıfırlanır; çatlak mevcutsa ağırlık 1'dir. Böylece model yalnızca fiziksel olarak anlamlı hedeflerden öğrenir; aynı mimari tekli ve çoklu çatlaklı senaryoları birlikte kapsayacak şekilde tutarlı biçimde eğitilebilir. Bu maskeleye yaklaşımı, çoklu hedefli ters problemlerde “tanımsız hedeflerin kayba girmesini” engelleyen pratik ve etkili bir çözüm olarak uygulanmıştır.

Eğitim–doğrulama–test ayrımı, veri setindeki dağılımın bozulmaması için katmanlı (stratified) bölme ile yapılmıştır. Katmanlama için temel değişken olarak çatlak sayısı k kullanılmış; veri %75 eğitim, %15 doğrulama ve %10 test olacak şekilde iki adımda ayrılmıştır. Ayrıca, çok çatlaklı senaryolarda çatlaklar arası mesafe belirli aralıklara

bölünerek katmanlama etiketine eklenmiş; böylece, bölme sonrasında hem çatlak sayısı dağılımı hem de çatlak aralığı dağılımı train – doğrulama – test içinde korunmuştur.

Sonuç olarak, model seçimi RF/MLP/XGBoost gibi güçlü kıyas yöntemleri ile 1D-CNN tabanlı mimarinin aynı veri temsilleri üzerinde karşılaştırılmasıyla yapılmış; elde edilen hata metrikleri üzerinde yapılan değerlendirmelerde en düşük ve en dengeli hata davranışının 1D-CNN yaklaşımıyla elde edildiği gözlenmiştir. Bu nedenle, tez kapsamında devam eden geliştirme adımları, 1D-CNN omurgası üzerine odaklanmış; mimari blokların, birleşik temsilin ve maskeleme stratejisinin iyileştirilmesiyle performansın artırılması hedeflenmiştir.

Model seçiminin ardından 1D-CNN için kullanılacak hiperparametreler ve bu hiperparametrelerin taranacağı aralıklar literatürdeki yaygın uygulamalar dikkate alınarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda maksimum epoch sayısı (epochs_max), mini-batch büyüklüğü (batch_size), öğrenme oranı (learning rate), ve optimizasyon algoritmasından (optimizer) oluşan hiperparametre uzayı oluşturulmuştur. Tanımlanan hiperparametre uzayında en uygun kombinasyonun belirlenmesi amacıyla ızgara araması (grid search) uygulanmıştır. Grid search yaklaşımında, önceden belirlenen tüm hiperparametre kombinasyonları sistematik olarak denenmiş; her bir kombinasyon için doğrulama ve test kümelerinde kayıp/metrik değerleri hesaplanmış ve model seçimi doğrulama performansına göre yapılmıştır. Hiperparametre ve tarama aralıkları Tablo 3'te sunulmuştur. Aşırı uyumu sınırlamak ve gereksiz epoch çalıştırılmasını önlemek amacıyla Early Stopping kullanılmış; doğrulama kaybı (val_loss) iyileşmediğinde eğitim sonlandırılmış ve en iyi doğrulama performansını veren ağırlıklar geri yüklenmiştir (patience = 10). Yapılan değerlendirmelerin ardından en iyi model hiper parametreleri grid search sonuçlarına göre epochs_max = 100, batch_size = 32, optimizer = Adam ve learning rate = 1×10^{-3} olarak seçilmiştir.

Tablo 3. Hiper parametreler ve tarama aralıkları

Hiper parametre	Kod değişkeni	Tarama aralığı
Maksimum epoch sayısı	epochs_max	60, 80, 100
Mini-batch büyüklüğü	batch_size	8, 16, 32
Öğrenme oranı	learning_rate	1×10^{-4} , 3×10^{-4} , 1×10^{-3} , 3×10^{-3}
Optimizasyon algoritması	optimizer	Adam, RMSprop, SGD

2.4.4. Değerlendirme Protokolü

Model başarısı, yalnızca tek bir genel hata değeri üzerinden değil; çatlak sayısı, hedef türü ve geometrik koşullara göre ayrıştırılmış çok katmanlı bir değerlendirme protokolü ile incelenmiştir. Amaç, modelin ortalama olarak iyi görünmesine rağmen belirli senaryo gruplarında sistematik hata üretip üretmediğini ortaya koymak ve özellikle ters problem doğası gereği kritik olan konumsal hassasiyet ile derinlik hassasiyetini ayrı ayrı izleyebilmektir. Bu nedenle değerlendirme; (i) metrik seçimi, (ii) veri bölme stratejisi ve (iii) senaryo kırılımlı analiz adımları birlikte tasarlanmıştır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (D_{gerçek} - D_{tahmin})^2}{\sum_1^n (D_{gerçek} - \bar{D}_{gerçek})^2} \quad (40)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_1^n |D_{tahmin} - D_{gerçek}| \quad (41)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (D_{tahmin} - D_{gerçek})^2} \quad (42)$$

Bu çalışmada model performansını değerlendirmek için üç temel metrik kullanılmıştır (Jierula vd., 2021). (40) ifadesinde gösterilen Determinasyon Katsayısı (coefficient of determination, R^2), modelin yaptığı tahminlerin ölçülen gerçek değerlere ne kadar benzediğini gösteren bir uyum katsayısıdır; değeri 1'e yaklaştıkça modelin veriyi iyi açıkladığı, 0'a yaklaştıkça tahminlerinin gerçeğe uzaklaştığı anlaşılır. (41) ifadesinde Ortalama Mutlak Hata (mean absolute error, MAE) verilmiştir. MAE modelin yaptığı tahminlerin gerçek değerlerden ortalama olarak ne kadar saptığını gösteren bir hata ölçüsüdür ve değeri ne kadar küçükse tahminler gerçek değerlere o kadar yakındır. (42) ifadesinde ise Kök Ortalama Kare Hata (root mean square error, RMSE), tahmin hatalarının karelerinin ortalamasının karekökünü alan bir hata ölçüsüdür ve büyük hatalara MAE'ye göre daha fazla ağırlık verir. Böylece, bu üç metrik birlikte kullanılarak modelin hem uyum düzeyi hem de hata büyüklüğü bütüncül olarak değerlendirilmektedir. Burada n toplam örnek sayısı, D_{tahmin} model tarafından tahmin edilen değer, $D_{gerçek}$ ölçülen/hesaplanan gerçek değerdir.

Değerlendirme, veri setindeki senaryoların yapısal çeşitliliğini yansıtacak şekilde çatlak sayısına (k) göre ayrıştırılmıştır. Buna göre metrikler, k 'ya bağlı alt gruplar için ayrı ayrı hesaplanmış; tek çatlaklı ve çok çatlaklı durumlarda performansın nasıl değiştiği açık biçimde izlenmiştir. Ayrıca, çok başlı çıktı yapısı nedeniyle mevcut olmayan çatlaklar için tanımsız hedefler modelin hata hesaplarına dahil edilmemiş; ilgili başlıklar yalnızca çatlağın gerçekten mevcut olduğu örneklerde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, metriklerin fiziksel anlamlılığı koruyacak şekilde hesaplanmasını ve karşılaştırmaların yanıltıcı olmamasını sağlamıştır.

Veri bölme stratejisi ile her alt kümenin, çatlak sayısı dağılımı bakımından birbirini temsil etmesi sağlanmış; değerlendirme sonuçlarının belirli bir senaryo grubuna aşırı duyarlı hale gelmesi önlenmiştir. Bu bölümlenme, hem model seçimi hem de nihai raporlama için tutarlı bir değerlendirme zemini oluşturmuştur.

Bu değerlendirme protokolü sayesinde, modelin performansı hem ortalama başarı düzeyinde hem de pratikte hata üretme riski daha yüksek olan alt senaryo gruplarında ayrıntılı biçimde raporlanmıştır. Böylelikle geliştirilen mimarinin güçlü ve zayıf yönleri, yalnızca tek bir skorla değil; çatlak sayısı, hedef tipi ve kritik geometrik koşullar bağlamında sistematik olarak ortaya konmuştur.

3. BULGULAR VE İRDELEME

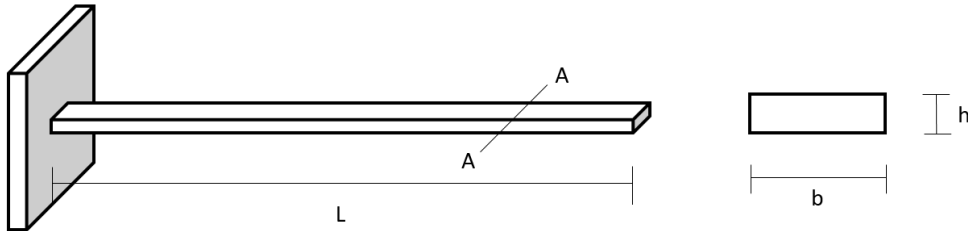
3.1. Analitik Sonuçlar

Bu bölümde, seçilen iki örnek üzerinde analitik sonuçlar sunulmuş; literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Farklı sınır şartları altında çeşitli hasar senaryoları için analitik frekanslar ve mod şekilleri tablo ve grafiklerle verilmiş; çatlak konumu ve derinliğinin sonuçlara etkisi tartışılmıştır.

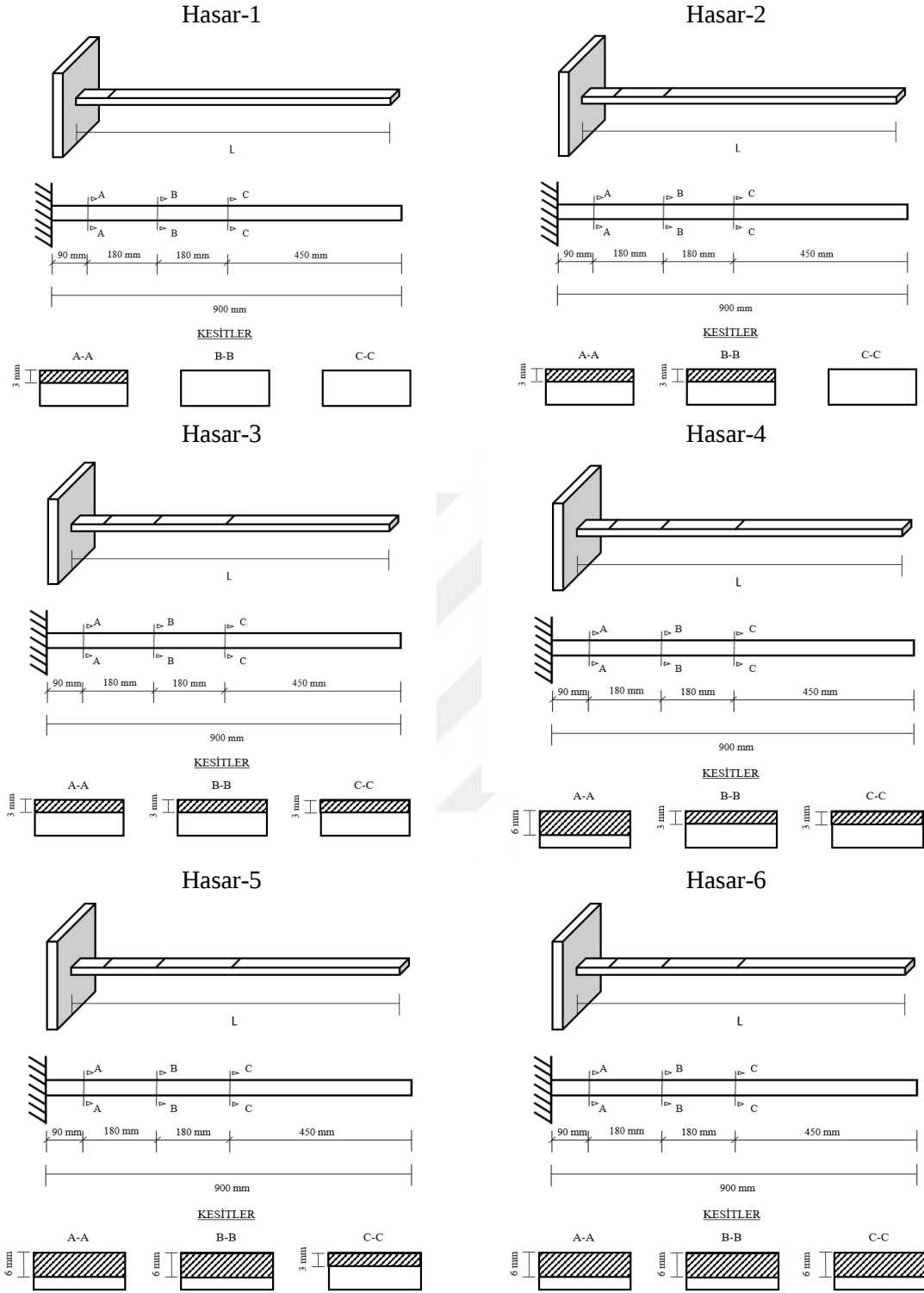
3.1.1. Düzgün Doğrusal Kesitli Konsol Kiriş

İlk örnek olarak düzgün doğrusal kesite sahip konsol kiriş problemi ele alınmıştır. Kiriş malzemesi için $E = 206 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$ ve $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır. Kiriş geometrisi ve boyutları Şekil 6'da sunulmuştur. Kirişin toplam boyu 90 cm, kesit yüksekliği 1 cm ve genişliği 3 cm'dir.

Kiriş, Şekil 8'de görülen altı ayrı hasar senaryosu için incelenmiş; elde edilen doğal frekanslar ilk altı mod için Tablo 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tabloya göre, çalışma sonuçları Karaca (2012)'de verilen sonlu eleman ve deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Şekil 9 ve 10'da sırasıyla kirişin hasarsız ve Hasar-4 durumlarına ait ilk altı mod şekli görülmektedir. Mod şekilleri de beklenildiği gibi elde edilmiş olup, hasar etkisiyle çatlaklı kesitlerde eğrinin eğiminde ani değişimler görülmektedir.



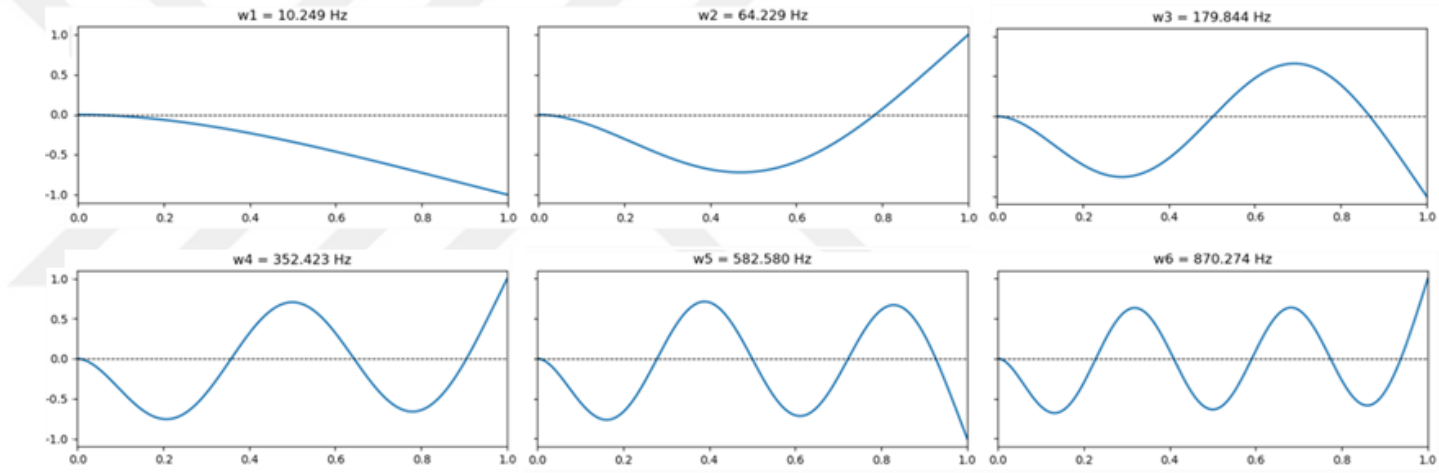
Şekil 7. Düzgün doğrusal kesitli konsol kirişin geometrisi (Karaca, 2012)



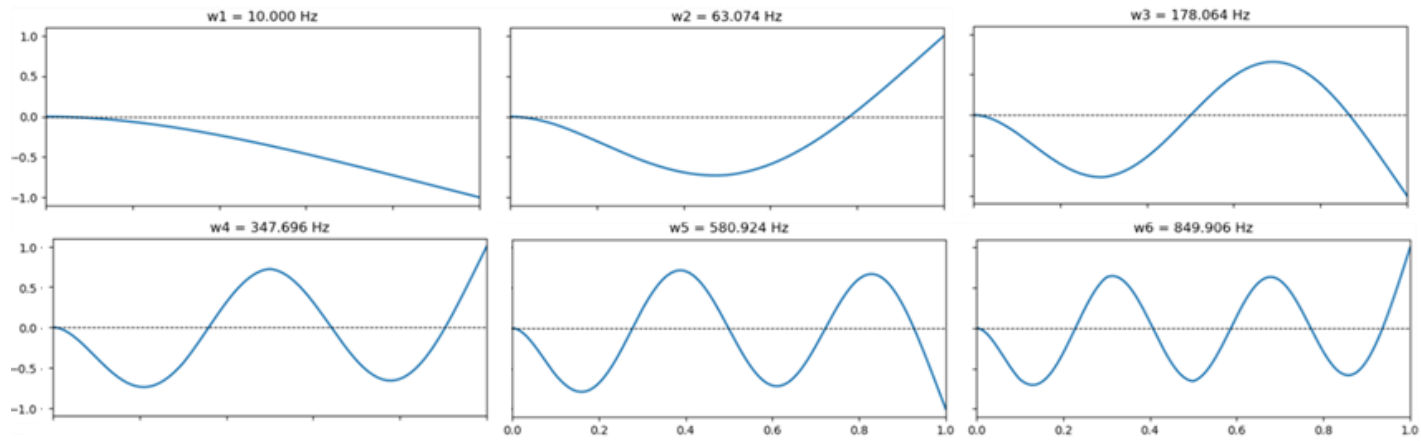
Şekil 8. Düzgün doğrusal kesitli konsol kirişte hasar senaryoları (Karaca, 2012)

Tablo 4. Düzgün doğrusal kesitli konsol kirişin farklı hasar senaryoları altında doğal frekansları

Hasar senaryosu	Bu çalışma						SEM (Karaca, 2012)						Deneysel (Karaca, 2012)					
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Hasarsız	10,249	64,229	179,844	352,423	582,58	870,274	10,249	64,229	179,844	352,423	582,58	870,274	9,926	62,53	175,30	342,10	562,00	856,70
Hasar-1	10,093	63,875	179,656	352,404	581,58	866,146	10,093	63,875	179,656	352,404	581,58	866,146	9,769	62,26	175,21	341,80	560,60	850,30
Hasar-2	10,023	63,735	178,068	351,290	580,925	858,165	10,023	63,735	178,068	351,290	580,925	858,165	9,699	61,98	173,40	340,90	559,10	844,40
Hasar-3	10,000	63,074	178,064	347,696	580,924	849,906	10,000	63,074	178,064	347,696	580,924	849,906	9,748	61,64	173,70	338,60	560,00	828,60
Hasar-4	9,250	61,445	177,193	347,636	575,932	831,232	9,250	61,445	177,193	347,636	575,932	831,232	8,926	59,96	172,80	338,30	552,10	808,60
Hasar-5	8,953	60,576	169,380	342,514	572,168	798,574	8,953	60,576	169,38	342,514	572,168	798,574	8,678	59,34	167,20	334,80	548,20	776,70
Hasar-6	8,861	57,479	169,136	325,261	572,068	771,080	8,861	57,479	169,136	325,261	572,068	771,080	8,591	57,54	166,90	325,30	547,50	763,50



Şekil 9. Düzgün doğrusal kesitli hasarsız konsol kirişin ilk altı mod şekli

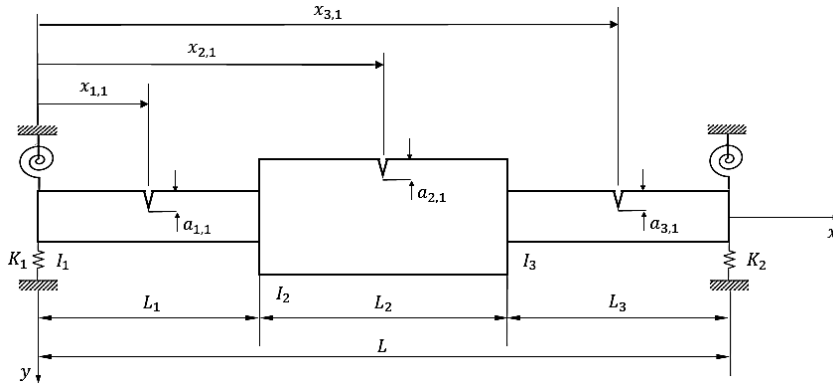


Şekil 10. Düzgün doğrusal kesitli hasarlı konsol kirişin (Hasar 4) ilk altı mod şekli

3.1.2. Kademeli Değişken Kesitli Kiriş

İkinci örnek olarak, üç basamaklı kademeli değişken kesitli kirişin çeşitli sınır şartları ve hasar senaryoları altında serbest titreşimleri analitik olarak incelenmiştir. Kirişin genel geometrik formu Şekil 10'da sunulmuştur. Kiriş malzemesi için $E = 210$ GPa, $\nu = 0,3$ ve $\rho = 7860$ kg/m³ olarak alınmıştır Kiriş toplam boyu $L = 30$ cm; $L_1 = L_2 = L_3 = 10$ cm basamak genişlikleri $b_1 = b_2 = b_3 = 2$ cm ; basamak yükseklikleri $h_1 = h_3 = 0.75$ cm, $h_2 = 0,975$ cm'dir. Çatlak konumları ise $x_{1,1} = 6$ cm, $x_{2,1} = 15$ cm, $x_{3,1} = 24$ cm'dir. Modelde, basamak yükseklikleri birbirinden farklı seçilmiş, genişlik ise tüm basamaklarda sabit tutulmuştur. Çalışmada daha kapsamlı bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, dört farklı hasar durumu ele alınmış ve bu senaryolar Ankastre-Serbest (A-S), Basit-Basit (B-B), Ankastre-Basit (A-B), Ankastre-Ankastre (A-A), Serbest-Serbest (S-S) sınır şartları altında incelenmiştir.

Tablo 5'te TMM ile elde edilen frekans değerleri ile FEM analizi sonuçları karşılaştırılmış; değerlerin uyumlu olduğu ortaya koyulmuştur. Tablo incelendiğinde, hasar derinliği oranları arttıkça tüm sınır koşulları için doğal frekansların sistematik olarak azaldığı özellikle yüksek modlarda daha belirgin olmak üzere, kirişin titreşim davranışını zayıflattığını göstermektedir. Hasarsız durum için normalize mod şekilleri, hasarlı durumlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 12'de verilmiştir. Bu karşılaştırma, hasar derinliği arttıkça mod şekillerinde belirgin sapmalar oluştuğunu ve sistemin titreşim karakteristiğinde düzensizlikler meydana geldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Şekil 13'te, beşinci senaryo için elde edilen normalize edilmiş mod şekilleri tüm sınır koşulları altında çizilmiş; hasarın bulunduğu bölgelerde mod şekillerinde lokal kırılmaların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



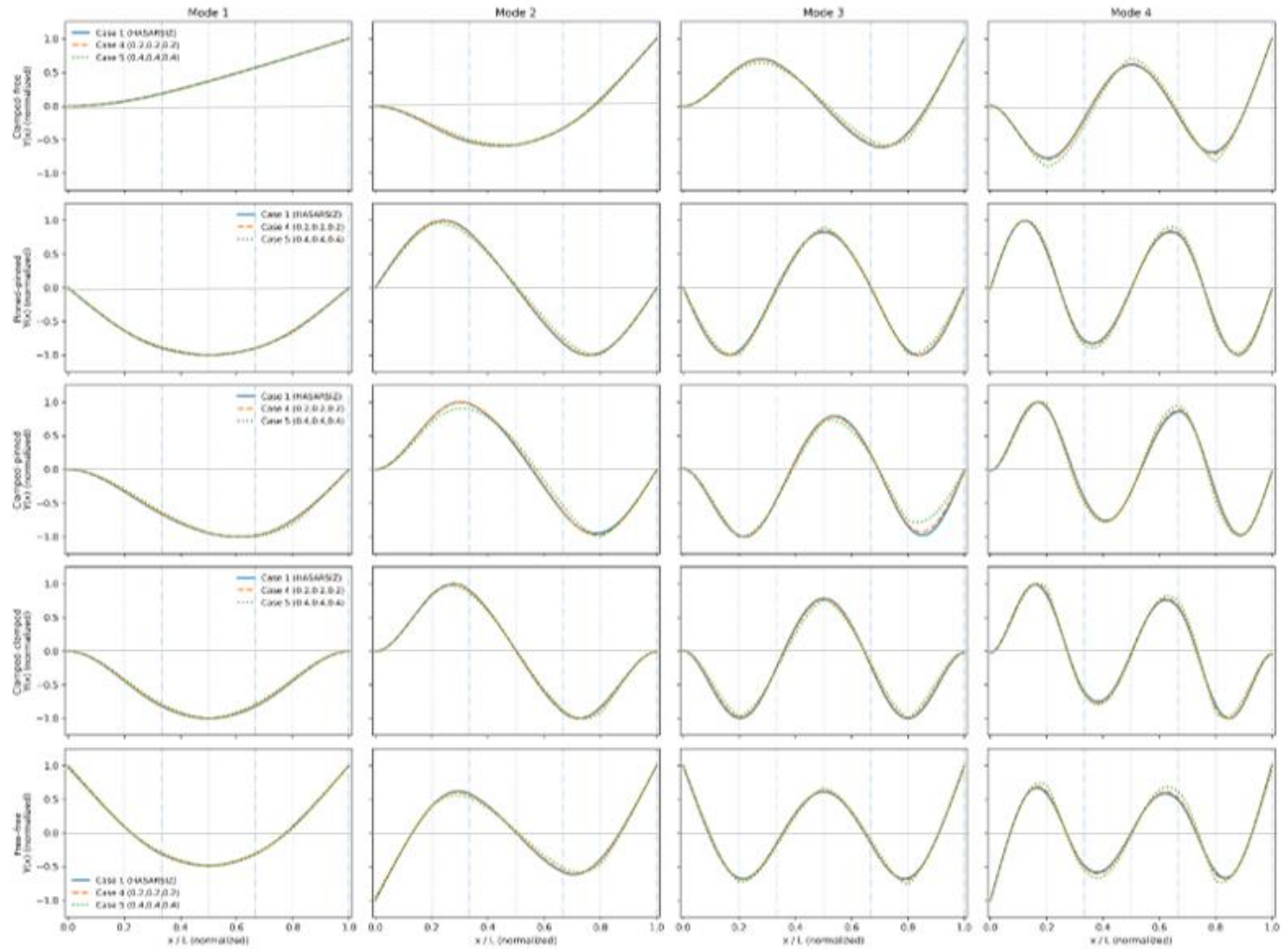
Şekil 11. Kademeli kirişin genel geometrik formu

Tablo 5. Basamaklı kirişin doğal frekanslarının farklı sınır koşulları altında karşılaştırılması

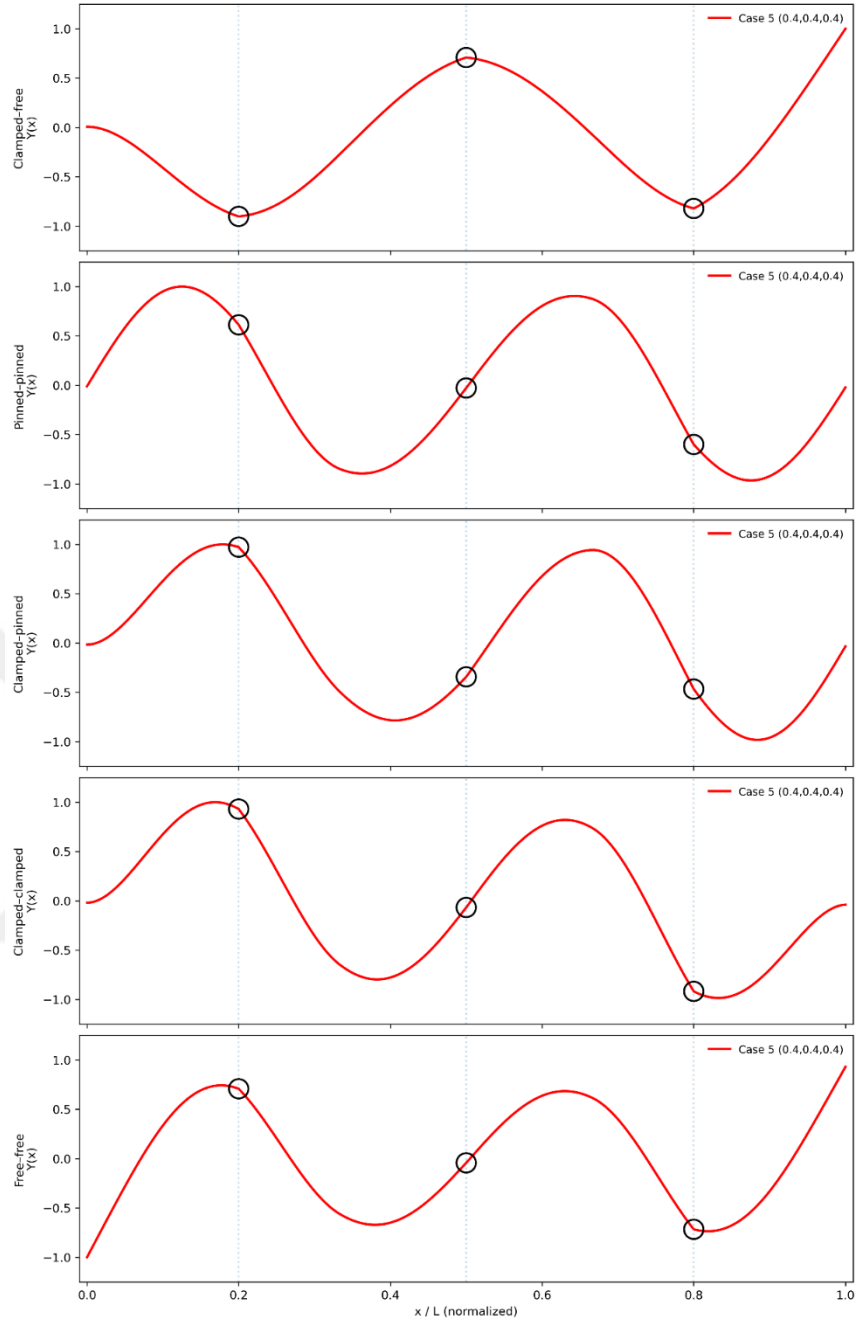
Sınır Koşulu	Senaryo	a_1/h_1	a_2/h_2	a_3/h_3	Analitik Model				SEM (Attar, 2012)			
					ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
A-S	1	0,0	0,0	0,0	448,039	3086,454	8032,321	16272,342	445,805	3054,13	7903,62	15951,10
	2	0,2	0,0	0,0	442,877	3086,230	8001,319	16143,625	440,571	3053,88	7873,46	15824,80
	3	0,2	0,2	0,0	442,220	3052,684	8001,076	15929,269	439,911	3020,52	7872,83	15615,00
	4	0,2	0,2	0,2	442,186	3044,779	7931,544	15758,222	439,880	3012,60	7804,34	15446,60
	5	0,4	0,4	0,4	423,367	2912,845	7613,850	14306,529	420,414	2878,26	7483,90	13993,30
B-B	1	0,0	0,0	0,0	1371,914	5068,596	12098,653	21288,416	1360,120	5012,35	11924,90	20732,60
	2	0,2	0,0	0,0	1365,206	5018,495	12005,232	21237,353	1353,400	4962,65	11832,50	20682,20
	3	0,2	0,2	0,0	1352,615	5018,477	11846,413	21237,338	1341,020	4962,59	11674,80	20681,70
	4	0,2	0,2	0,2	1346,207	4969,122	11753,453	21185,393	1334,670	4913,14	11582,40	20629,00
	5	0,4	0,4	0,4	1266,443	4661,185	10734,589	20883,217	1260,720	4599,61	10555,80	20312,30
A-B	1	0,0	0,0	0,0	2031,976	6468,287	14089,960	24063,640	2014,260	6378,69	13832,40	23339,50
	2	0,2	0,0	0,0	2031,284	6450,498	13987,970	23896,280	2013,570	6361,10	13733,80	23179,90
	3	0,2	0,2	0	2016,430	6440,722	13824,790	23852,510	1998,730	6352,30	13571,80	23132,80
	4	0,2	0,2	0,2	2003,446	6378,297	13732,400	23820,350	1985,930	6290,10	13479,90	23105,20
	5	0,4	0,4	0,4	1913,109	6095,884	12691,770	23155,440	1898,150	6004,78	12438,80	22437,90

Tablo 5. Devamı

Sınır Koşulu	Senaryo	a_1/h_1	a_2/h_2	a_3/h_3	Analitik Model				SEM (Attar, 2012)			
					ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
A-A	1	0,0	0,0	0,0	2916,036	7964,931	16310,682	27134,803	2887,00	7826,96	15956,80	26165,70
	2	0,2	0,0	0,0	2916,036	7933,113	16181,541	26969,918	2887,00	7796,24	15832,40	26011,80
	3	0,2	0,2	0,0	2891,399	7933,105	15964,401	26969,760	2862,68	7796,18	15618,70	26011,10
	4	0,2	0,2	0,2	2891,397	7901,862	15840,044	26803,236	2862,62	7765,39	15498,70	25852,30
	5	0,4	0,4	0,4	2811,821	7708,875	14516,653	25870,408	2784,33	7572,49	14188,70	24928,50
S-S	1	0,0	0,0	0,0	3332,819	8088,776	16234,451	27085,798	3298,36	7968,34	15945,50	26267,50
	2	0,2	0,0	0,0	3322,831	8019,899	16058,614	26888,072	3288,37	7900,60	15772,10	26075,20
	3	0,2	0,2	0,0	3281,469	8019,865	15847,352	26887,846	3247,02	7900,48	15563,50	26074,60
	4	0,2	0,2	0,2	3272,024	7952,582	15676,810	26687,450	3237,60	7833,88	15395,70	25877,90
	5	0,4	0,4	0,4	3082,632	7519,900	14093,359	25575,186	3044,27	7395,94	13802,90	24758,90



Şekil 12. Hasarsız ve hasarlı durum için mod şekillerinin karşılaştırılması



Şekil 13. Hasar-5 durumunda mod şeklinde çatlaklı kesitlerde ani eğim değişimleri

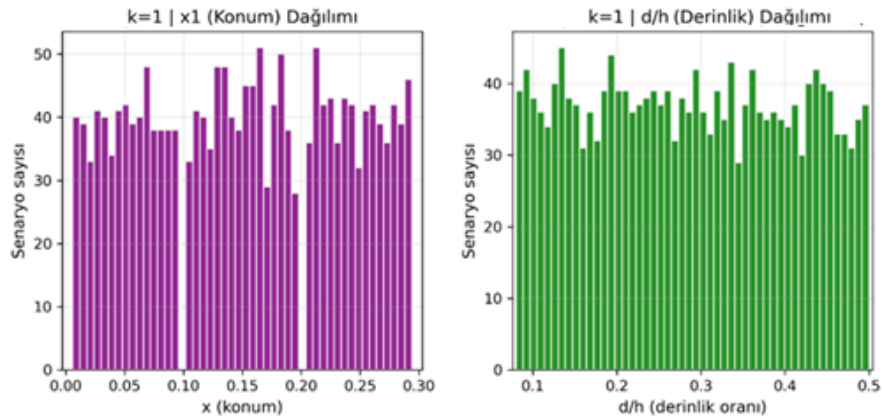
3.2. Makine Öğrenmesi ile Hasar Tespiti Sonuçları

Bu bölümde, titreşim tabanlı hasar tespiti problemi için oluşturulan makine öğrenmesi yaklaşımının performansı sayısal olarak ortaya konulmaktadır. Öncelikle, çatlak sayısı, konumu (uç bölgeler/basamak geçişleri) ve derinliği bakımından temsil gücü yüksek olacak şekilde dengeli senaryolardan oluşan bir veri seti hazırlanmış; böylece model değerlendirmelerinin önyargısız ve karşılaştırılabilir yapılması hedeflenmiştir.

Ardından, dört farklı model aynı eğitim-doğrulama-test protokolü ve ortak metrikler altında karşılaştırılmış, en yüksek doğruluk ve genelleme başarımı sağlayan yaklaşım seçilerek nihai model olarak geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, beş yaygın sınır koşulu ile iki elastik sınır koşulu için ayrı ayrı raporlanmış; doğal frekanslar ve mod şekillerinden türetilen girdiler üzerinden çatlak konumu ve derinliği tahminindeki doğruluk düzeyleri, hata dağılımları ve senaryo dağılımları ile değerlendirilmiştir.

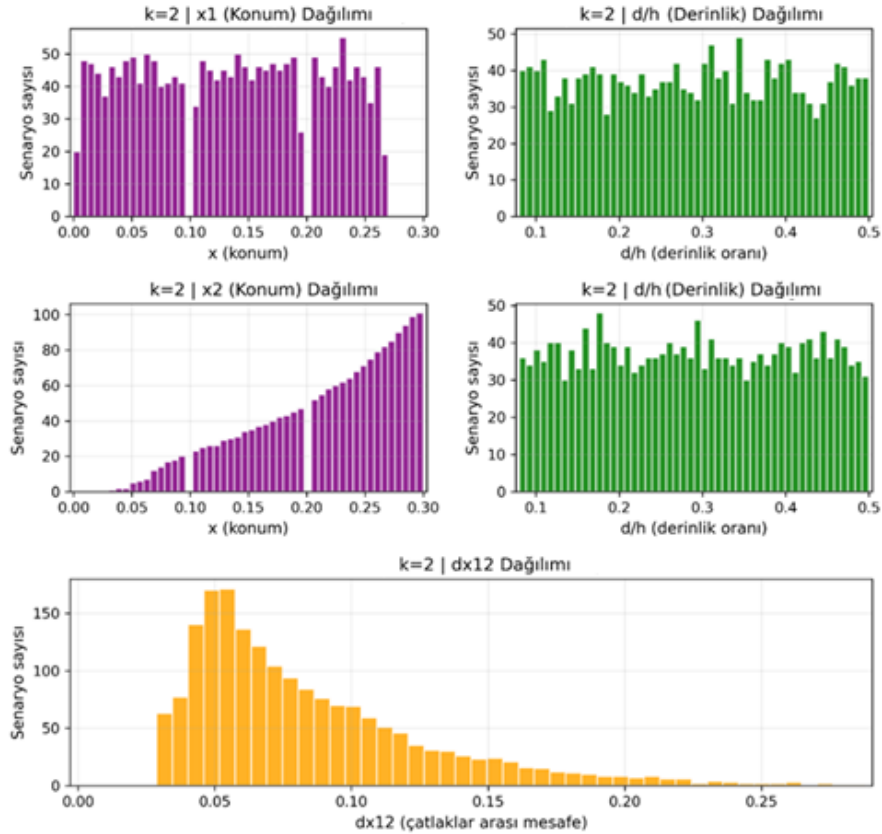
3.2.1. Sentetik Veri Dağılımı Değerlendirmesi

Sentetik veri üretiminin ardından veri dağılımının doğruluğunu kontrol etmek amacı ile her durum için konum, derinlik ve çatlaklar arası uzaklık grafikleri çizdirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir. Şekil 14'te tek çatlaklı tek basamaklı ($k=1$) kiriş için tek bir sınır şartı (ankastre-ankastre) altında oluşturulan sentetik veri setinde çatlak konumu (x_1) ve boyutsuz derinlik oranına (d/h) göre senaryo sayılarının dağılımı gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde, senaryoların kiriş uzunluğu boyunca ve belirli derinlik oranı aralığında genel olarak dengeli bir dağılım sergilediği, belirli bir bölgede belirgin bir yığılma oluşmadığı görülmektedir. Bu sonuç, tek çatlaklı senaryolar açısından veri setinin hedeflenen dağılım dengesini sağladığını ve konum–derinlik uzayının temsil edici biçimde örneklendiğini göstermektedir.

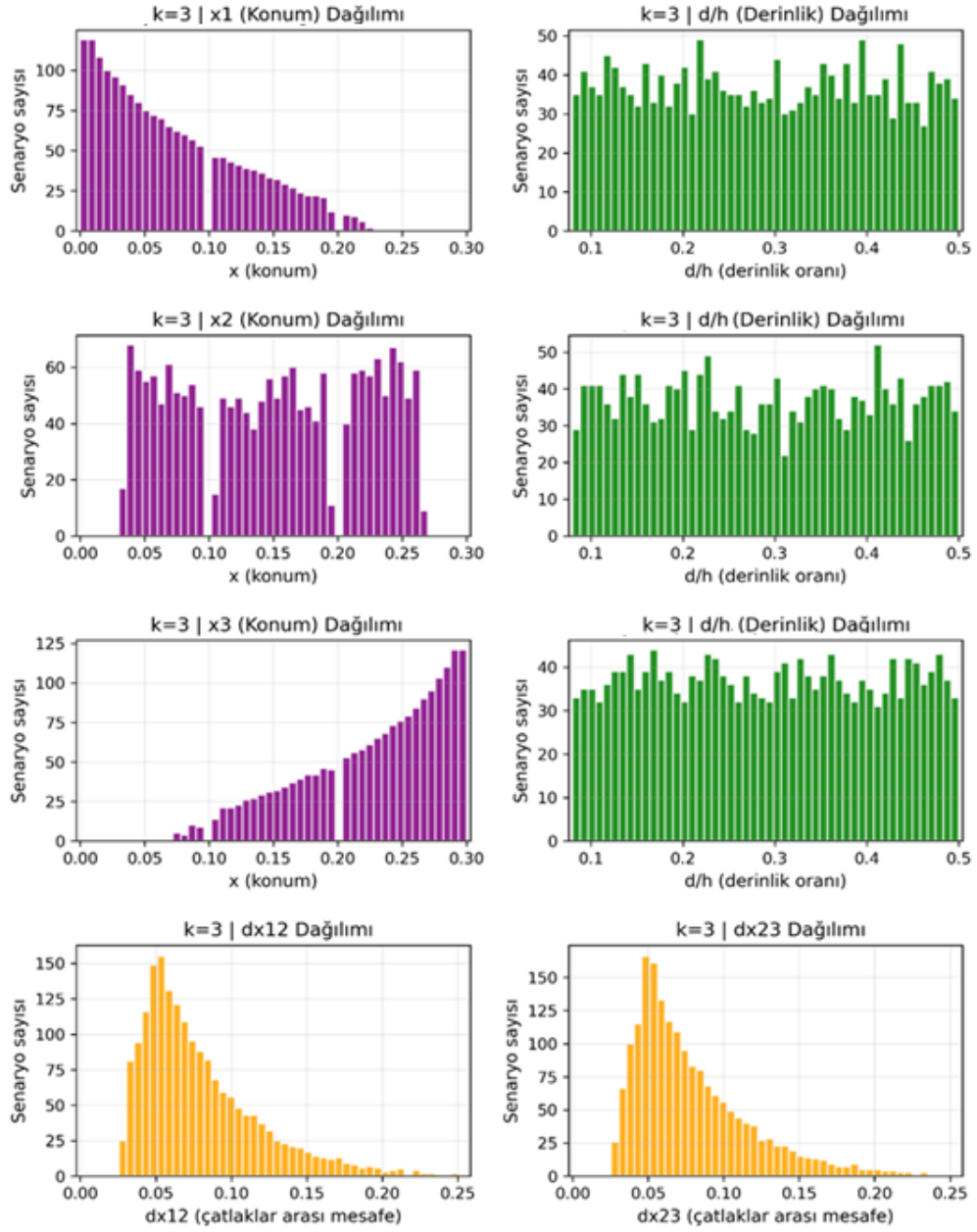


Şekil 14. Tek sınır şartı altında bir çatlaklı basamaklı kiriş senaryolarında konum ve derinlik dağılımları

Şekil 15'te tek bir sınır şartı altında oluşturulan iki çatlaklı ($k=2$) basamaklı kiriş senaryolarında çatlak konumu, çatlak derinliği ve çatlaklar arası mesafe dağılımları sunulmuştur. Mor renkli histogramlar birinci (x_1) ve ikinci (x_2) çatlağın konum dağılımlarını, yeşil histogramlar ise her bir çatlağa ait derinlik oranı dağılımlarını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, algoritma tarafından çatlakların sıralı biçimde yerleştirilmesi nedeniyle ikinci çatlağın kirişin son bölgelerine doğru yerleşme eğilimi sergilediği görülmüş; ancak bu eğilimin tek bir konum aralığında belirgin bir yığılmaya dönüşmediği değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, çatlaklar arası mesafeye (dx_{12}) ilişkin histogramda değerlerin tek bir aralıkta toplanmadığı, aksine geniş bir bandta dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, iki çatlaklı senaryolarda konum–derinlik–mesafe değişkenlerinin genel olarak temsil edici biçimde örneklendiğini göstermektedir.



Şekil 15. Tek sınır şartı altında iki çatlaklı basamaklı kiriş senaryolarında konum, derinlik ve çatlaklar arası mesafe dağılımları



Şekil 16. Tek sınır şartı altında üç çatlaklı basamaklı kiriş senaryolarında konum, derinlik ve çatlaklar arası mesafe dağılımları

Şekil 16'da tek sınır şartı altında oluşturulan üç çatlaklı ($k=3$) basamaklı kiriş senaryolarında çatlak konumu, derinlik oranı ve çatlaklar arası mesafe dağılımları sunulmuştur. Üretim algoritmasında çatlakların yerleşimi sıralı bir mantıkla gerçekleştirilmiş; öncelikle orta bölgede konumlanan çatlak yerleştirilmiş, ardından diğer iki çatlak, kalan uzunluk aralıklarına dağıtılmıştır. Bu yerleştirme stratejisine bağlı olarak, birinci çatlağın kiriş başlangıcına ($x \approx 0$) yakın, üçüncü çatlağın ise kiriş sonuna ($x \approx L$) yakın konumlanma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, söz konusu eğilimin

tek bir konum noktasında belirgin bir yığılmaya dönüşmediği; dağılımların ilgili bölgeler içinde yayılım sergilediği değerlendirilmiştir. Derinlik oranı histogramları incelendiğinde, her bir çatlak için değerlerin çalışma aralığı boyunca homojen biçimde dağıldığı ve belirli bir derinlik bandında yoğunlaşma oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çatlaklar arası mesafeye ilişkin dx_{12} ve dx_{23} dağılımlarında, küçük mesafeli (yakın çatlak) senaryoların daha yüksek frekansta üretildiği; ancak değerlerin geniş bir bantta yayılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, $k=3$ senaryolarında konum–derinlik–mesafe değişkenlerinin genel olarak temsil edici biçimde örneklendiğini ve veri setinde belirgin bir yığılma davranışı bulunmadığını göstermektedir.

3.2.2. Model Değerlendirmesi

1D-CNN modelinde optimum hiper parametrelerin tespiti için hiper parametre aralıkları tanımlanmış ve grid search ile seçilen bu aralıklarda en iyi sonucu bulmak için taranma yapılmıştır. En iyi 10 sonuç Tablo 6’da gösterilmiş olup nihai seçilen model hiper parametreleri $epochs_max = 100$, $batch_size = 32$, $optimizer = Adam$ ve $learning\ rate = 1 \times 10^{-3}$ şeklindedir.

Tablo 1’de verilen yaygın sınır koşullarına ek olarak elastik bir sınır şartı da tanımlanmış ve toplam altı sınır şartı için üretilen sentetik veri seti, ön işleme adımlarının tamamlanmasının ardından birleştirilerek model eğitimi gerçekleştirilmiştir. Veri seti %75 eğitim–%15 doğrulama–%10 test oranlarıyla ayrılmış; eğitim sürecinde MAE metriği izlenmiş, eğitim tamamlandıktan sonra ise eğitim/doğrulama/test kümeleri için regresyon grafikleri çizdirilerek MAE ve R^2 değerleri raporlanmıştır. Altı sınır şartı için toplam 6×6000 senaryodan oluşan birleşik veri setiyle eğitilen modelin regresyon sonuçları Şekil 17–22’de sunulmaktadır.

Regresyon grafiklerinin genelinde, tahminlerin 45° referans doğrusu çevresinde yoğunlaştığı ve eğitim–doğrulama–test kümelerinde benzer bir dağılım yapısının korunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, uç bölgelere yakın konumlar, basamak geçiş bölgeleri ve çok düşük derinlik oranları ($d/h < 0,08$) gibi koşullarda saçılımın arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük derinlik oranlarında hasarın dinamik yanıtındaki etkisinin sınırlı kalmasının yanı sıra sınır şartı ve geometrik süreksizlik etkilerinin daha baskın hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca çoklu çatlak durumunda çatlaklar arası etkileşim,

özellikle çatlaklar birbirine yaklaştığında, her bir çatlığa ait izlerin ayrışmasını zorlaştırarak hata seviyesini artırabilmektedir.

Şekil 17’de, tek çatlaklı durumda hem konum hem derinlik oranı için doğrusal uyum yüksektir. Regresyon doğruları, konum için eğimin $\approx 1,01-1,02$ ve sabit terimin ≈ 0 olduğunu; derinlik oranı için eğimin $\approx 0,98$ ve sabit terimin $\approx 0,01$ olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, konum tahminlerinin genel olarak gerçek değerlerle uyumlu seyrettiğini; derinlik tarafında ise küçük değerlerde tahminlerin gerçek değerlerin bir miktar üzerinde, büyük değerlerde ise referans doğrusunun az da olsa altında kalabildiğini işaret etmektedir.

Şekil 18’de iki çatlaklı senaryoda birinci çatlak için uyum büyük ölçüde korunmaktadır. Konum için eğimin $\approx 0,98-0,99$, derinlik oranı için eğimin $\approx 0,97$ ve sabit terimin $\approx 0,01$ olması, modelin her iki değişkeni de istikrarlı biçimde takip ettiğini göstermektedir. Saçılımın özellikle uç/basamak geçişi yakınında ve düşük d/h aralığında belirginleşmesi, bu örneklerin toplam hataya daha fazla katkı verdiğine işaret etmektedir.

Şekil 19’da ikinci çatlak için saçılımın özellikle derinlik tahminlerinde, $c1$ ’e göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Derinlik oranı eğiminin $\approx 0,93-0,94$ bandına gerilemesi, derinlik tahminlerinde doğrusal ilişkinin zayıfladığını göstermektedir. Buna ek olarak, iki çatlak arasındaki mesafe azaldıkça hatanın artma eğilimi gözlemlenmiştir. Çatlaklar birbirine yaklaştığında dinamik etkilerin üst üste binmesi, ikinci çatlığa ait konum ve derinlik bilgisinin ayrıştırılmasını güçleştirmekte ve saçılımı artırmaktadır.

Tablo 6. Grid Search sonuçları: En iyi 10 hiper parametre kombinasyonu ve performans değerleri

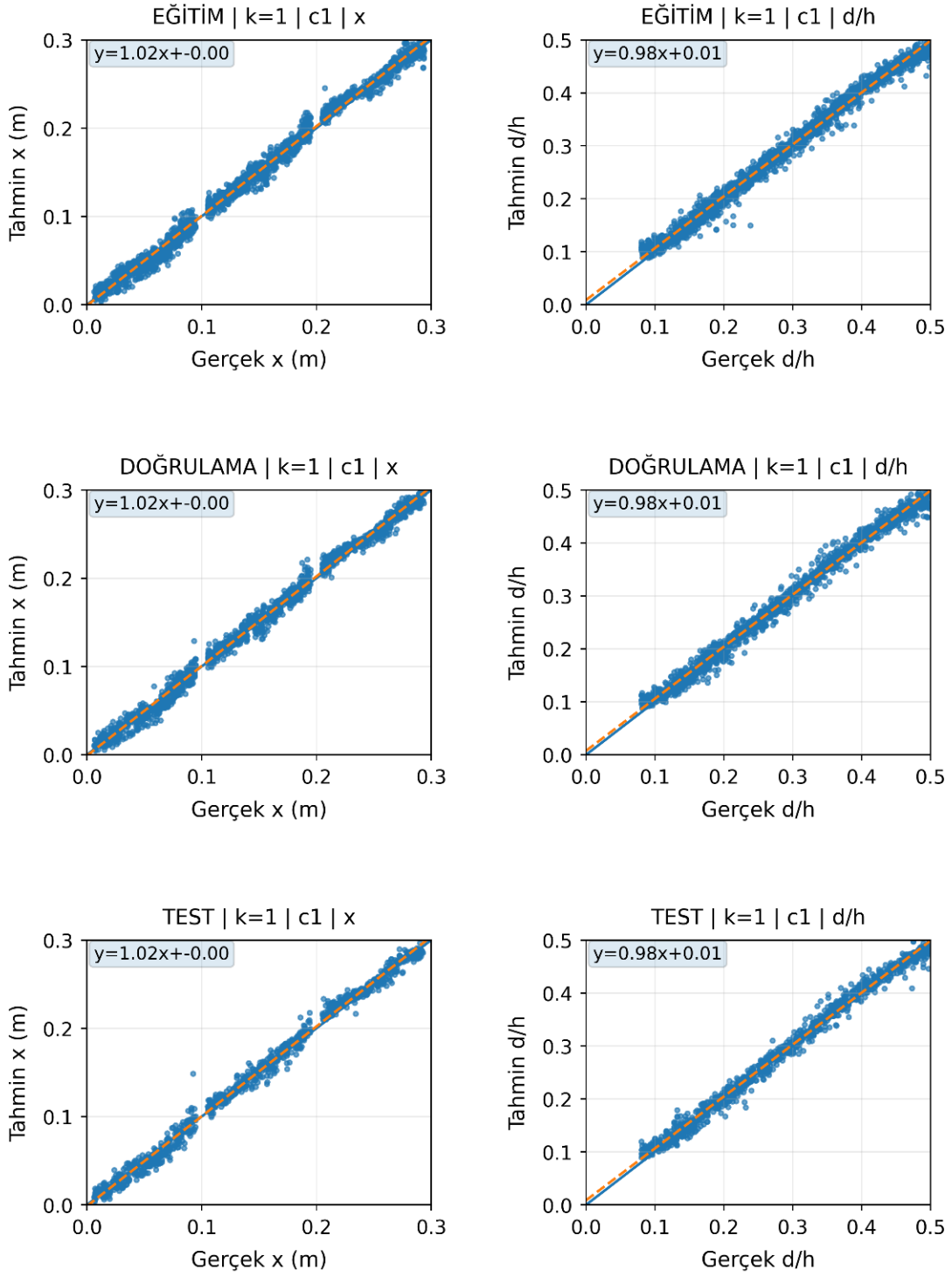
epochs_max	batch_size	optimizer	learning_rate	best_epoch	VAL_mean_MAE
100	32	Adam	0,001	91	0,0144
80	32	Adam	0,001	77	0,0151
100	8	Adam	0,0003	98	0,0146
60	8	Adam	0,001	58	0,0157
100	8	Adam	0,001	58	0,0157
80	8	Adam	0,001	58	0,0157
80	16	Adam	0,001	63	0,0157
100	16	Adam	0,001	63	0,0157
60	16	Adam	0,001	56	0,0153
80	8	Adam	0,0003	80	0,0163

Şekil 20’de üç çatlaklı senaryoda c1 konumu için doğrusal uyum korunmakta ($\approx 0,97-0,98$ eğim), ancak derinlik tahminlerinde saçılımın arttığı görülmektedir ($\approx 0,92-0,93$ eğim, $\approx 0,02$ sabit terim). Bu durum, çatlak sayısının artmasıyla birlikte derinlik bilgisinin dinamik yanıtıtan ayrıştırılmasının daha zor hale geldiğini göstermektedir.

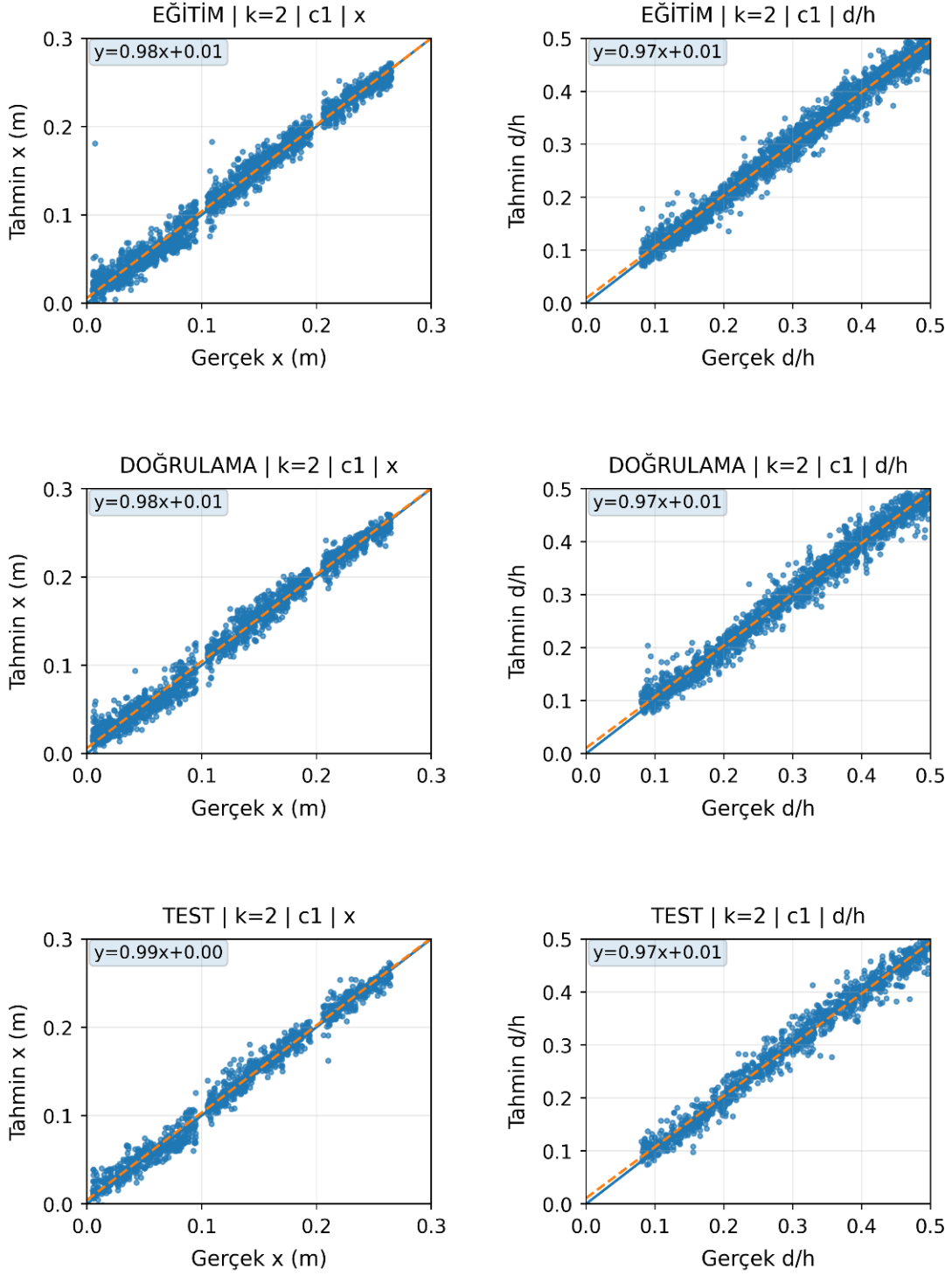
Şekil 21’de orta çatlak için konum tahminleri referans doğrusu çevresinde toplanmakla birlikte, derinlik tahminlerinde eğimin $\approx 0,90-0,93$ aralığına düşmesi dikkat çekmektedir. c2’nin konumsal olarak diğer çatlaklara yakın olma olasılığının yüksek olması, çatlaklar arası etkileşimi bu başlıkta daha görünür kılmakta; özellikle çatlaklar arası mesafenin küçüldüğü senaryolarda derinlik tahminlerinde saçılım artmaktadır.

Şekil 22’de, c3 konumu için doğrusal uyum güçlü biçimde sürmektedir ($\approx 0,98$ eğim, $\approx 0,00$ kesişim). Buna karşılık derinlik tarafında eğimin $\approx 0,90-0,92$ bandında kalması ve sabit terimin $\approx 0,02$ olması, derinlik tahminlerinin çoklu çatlak etkileşimine ve zorlu bölgelere daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Üçüncü çatlağın bazı senaryolarda diğer çatlaklara ve/veya basamak geçiş bölgelerine yakın konumlanabilmesi, derinlik tahminlerindeki saçılımın artmasına katkı verebilmektedir.

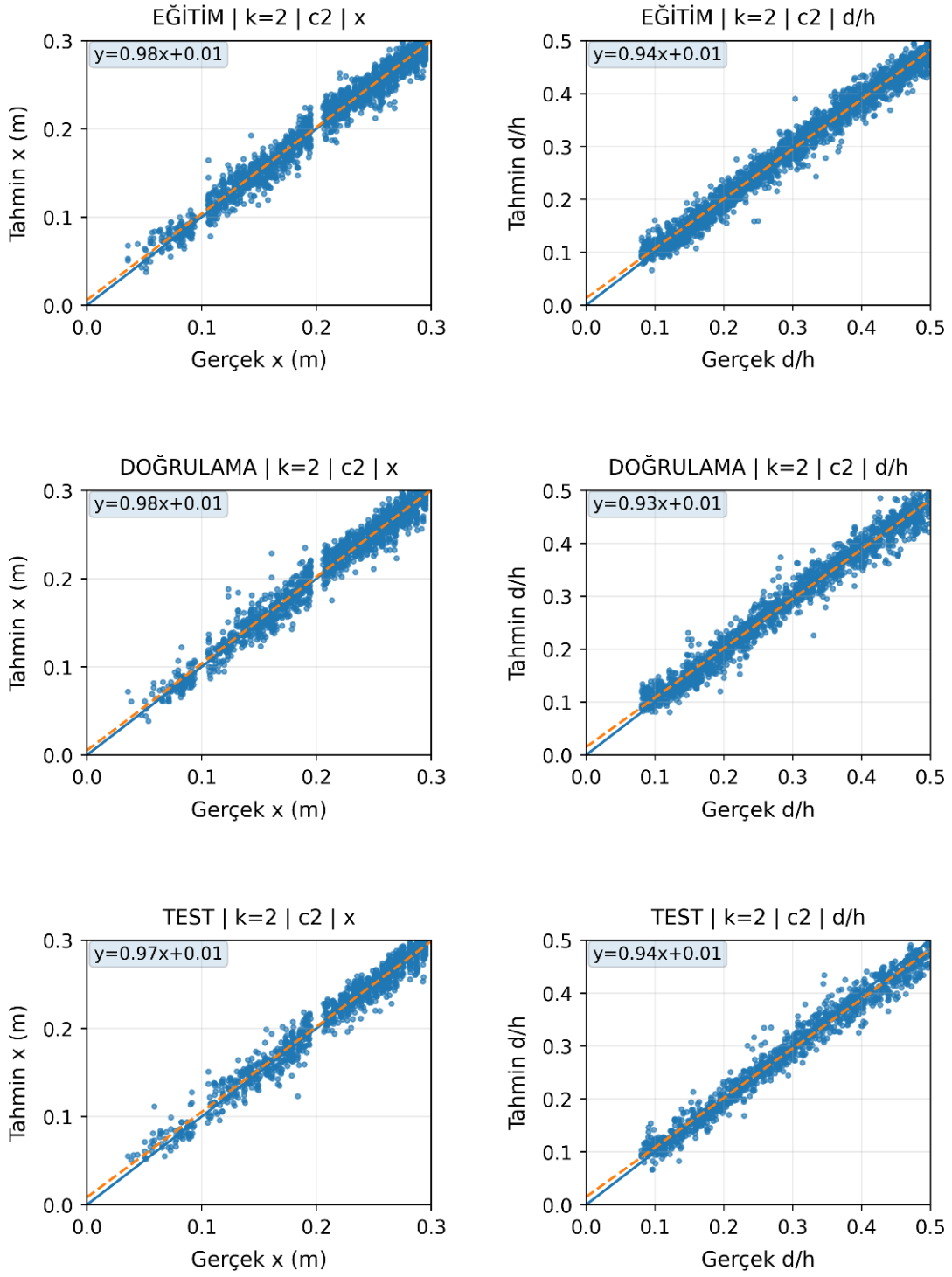
Şekil 23’te konum tahminlerine ait normalize ortalama mutlak hata (nMAE, %) değerleri, Şekil 24’te ise derinlik tahminlerine ait nMAE(%) sonuçları sunulmuştur. Bu iki şekil Tablo 7 ile birlikte değerlendirildiğinde, tek çatlaklı durumda ($k=1$) konum tahmin hatalarının yaklaşık $\%1,5-\%2,1$ aralığında kaldığı, iki çatlaklı senaryolarda ($k=2$) hem c1 hem de c2 için bu değerlerin yaklaşık $\%2,2-\%3,3$ bandına yükseldiği ve üç çatlaklı durumlarda ($k=3$) hata seviyelerinin daha da artarak özellikle orta çatlak (c2) panelinde bazı sınır koşulları altında $\sim\%4$ civarına yaklaştığı gözlemlenmektedir. Derinlik tahminlerinde ise benzer bir ölçeklenme eğilimi söz konusu olup, hata seviyeleri $k=1$ için $\sim\%0,02-\%0,03$, $k=2$ için $\sim\%0,04-\%0,06$ ve $k=3$ için çoğunlukla $\sim\%0,05-\%0,07$ aralığında değişmektedir. Üç çatlaklı senaryolarda, özellikle c2 ve c3 panellerinde hataların görece daha yüksek seviyelere ulaşması, çoklu çatlaklarda hasar etkilerinin üst üste binmesi ve komşu çatlak etkileşimlerinin artması nedeniyle konum ve derinlik bilgilerinin ayrıştırılmasının zorlaştığını göstermektedir. Sınır koşulları açısından bakıldığında aynı (k, c) kombinasyonu için belirli farklılıklar gözlemlense de, hata davranışında baskın belirleyici unsurun sınır koşullarından ziyade çatlak sayısı ve çatlaklar arası etkileşim karmaşıklığı olduğu söylenebilir. Buna ek olarak, farklı sınır koşulları altında elde edilen hata değerlerinin genel olarak benzer seviyelerde kalması, geliştirilen modelin farklı yapısal durumlar için tutarlı ve genellenebilir bir tahmin performansı sunduğunu göstermektedir.



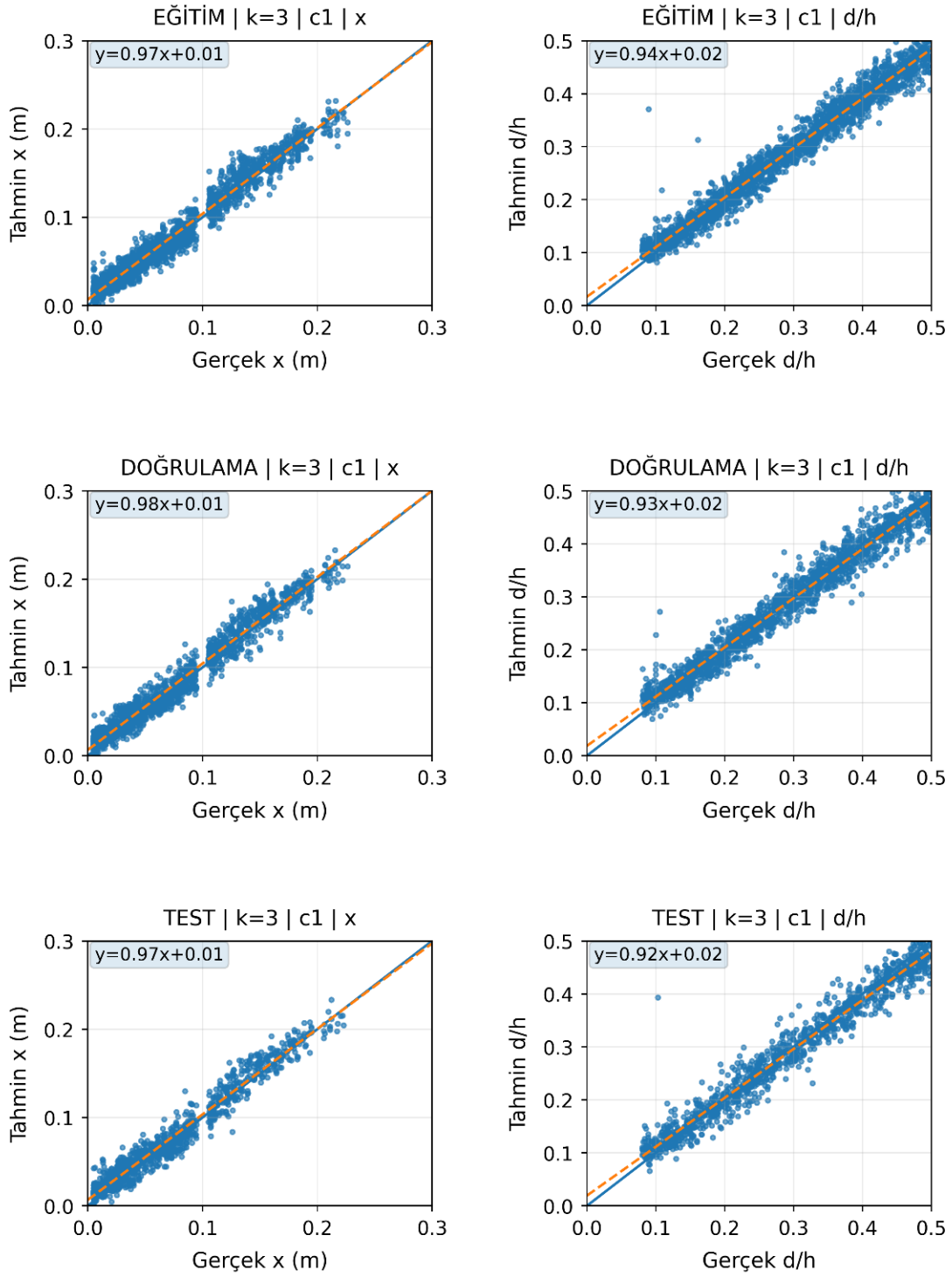
Şekil 17. $k = 1$ için $c1$ çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri



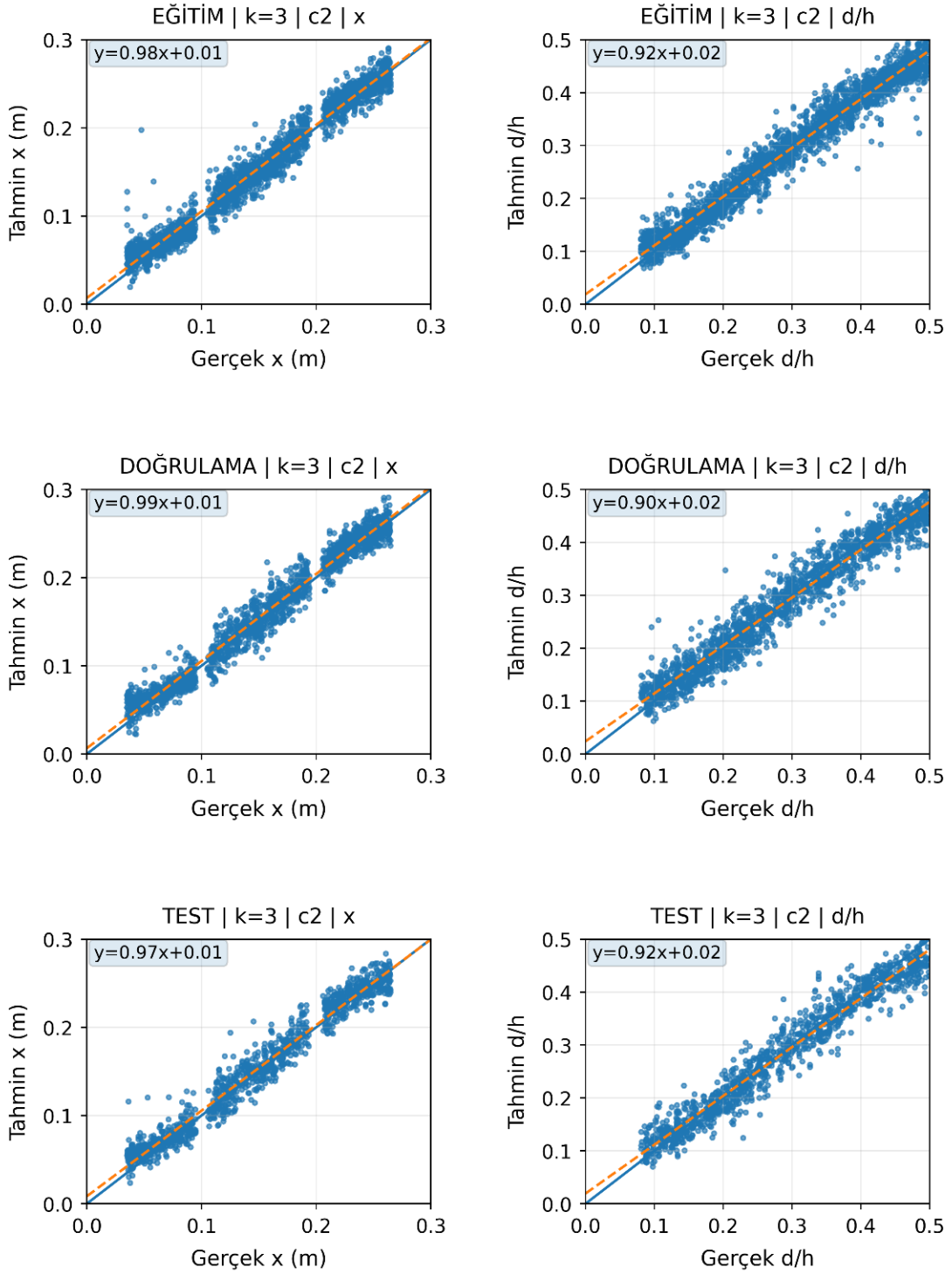
Şekil 18. $k = 2$ için $c1$ çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri



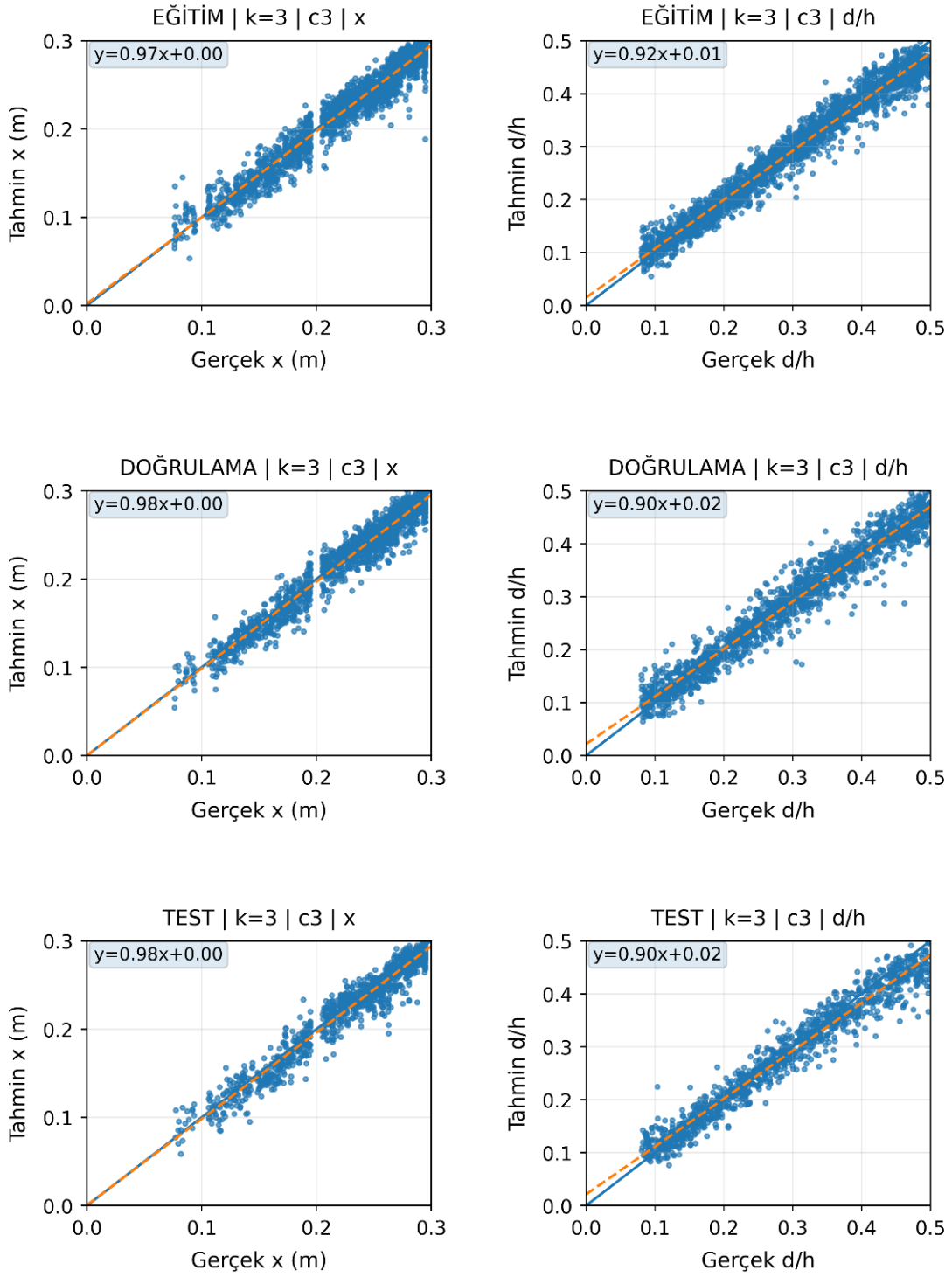
Şekil 19. $k = 2$ için $c2$ çatlakına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri



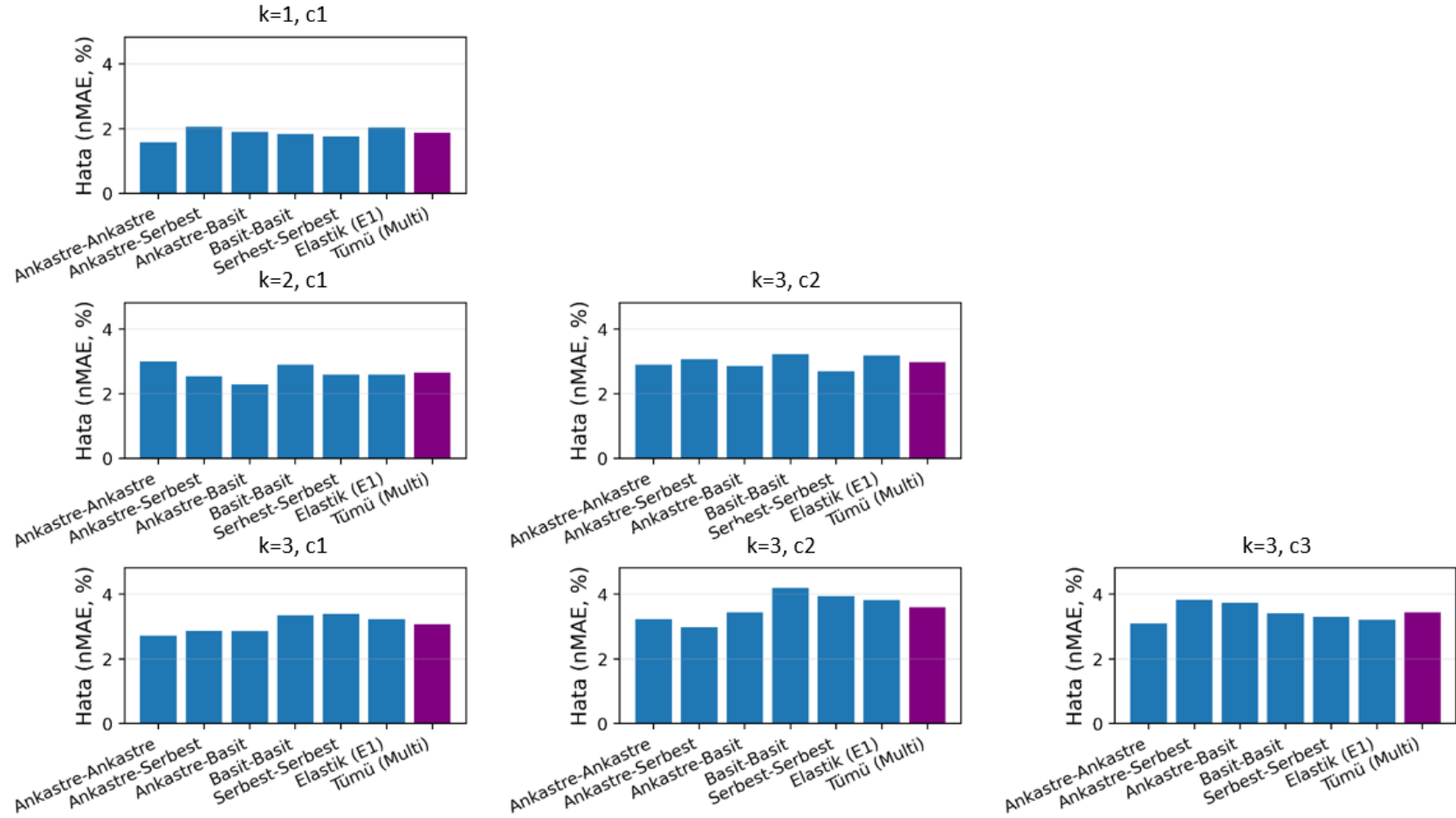
Şekil 20. $k = 3$ için $c1$ çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri



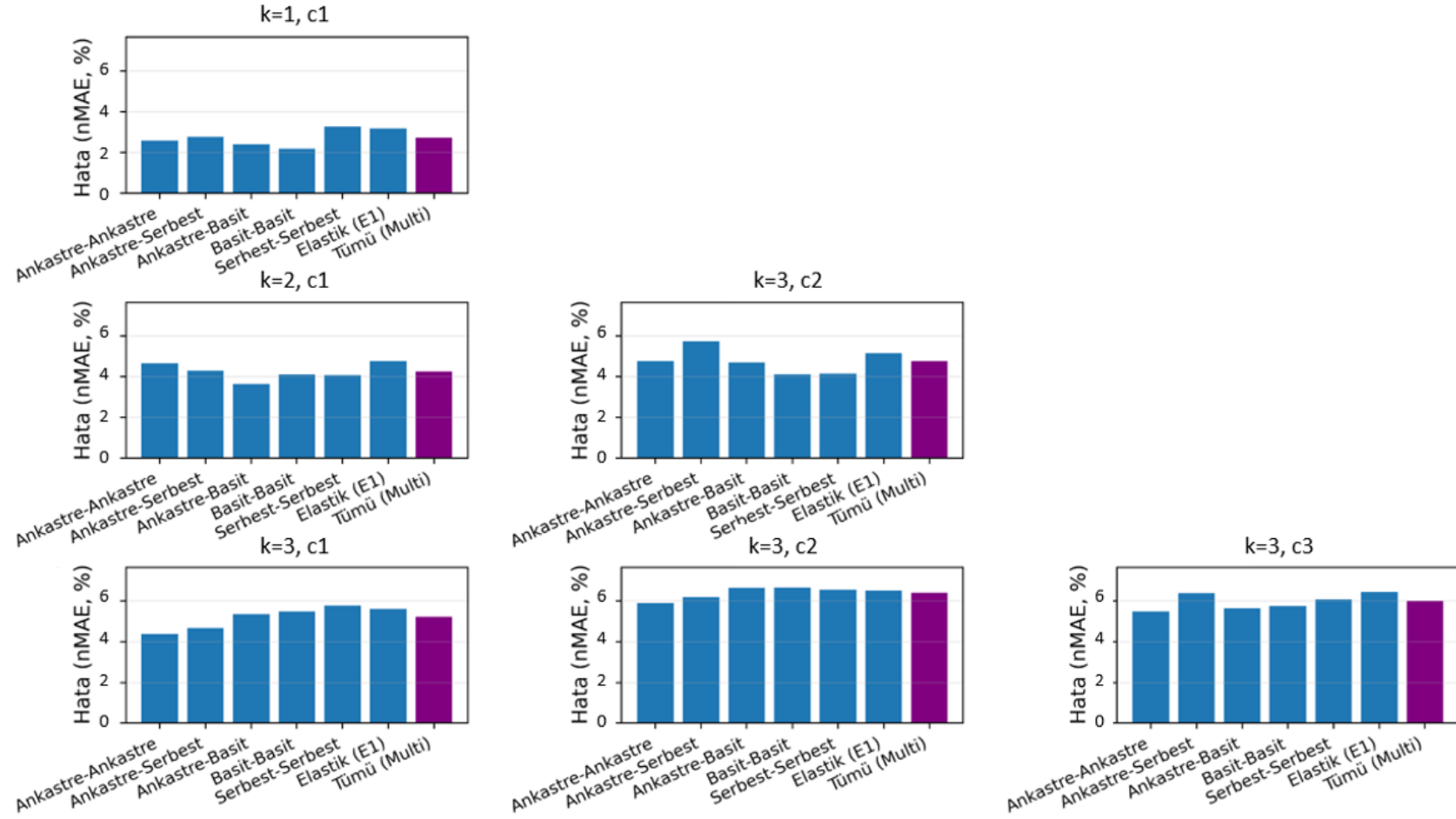
Şekil 21. $k = 3$ için $c2$ çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri



Şekil 22. $k = 3$ için $c3$ çatlağına ait eğitim, doğrulama ve test regresyon grafikleri



Şekil 23. Konum tahmini için sınır koşullarına göre normalize ortalama mutlak hata (nMAE, %) dağılımı



Şekil 24. Derinlik oranı tahmini için sınır koşullarına göre normalize ortalama mutlak hata (nMAE, %) dağılımı

Tablo 7. Konum ve derinlik tahminleri için sınır koşulu bazlı değerlendirme metrikleri

Sınır Şartı	Çatlak Sayısı	Çatlak numarası	Konum				Derinlik			
			MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²	nMAE (%)	MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²	nMAE (%)
A-A	1	c1	4,751	5,769	0,995	1,584	0,077	0,102	0,990	0,026
	2	c1	8,988	11,317	0,977	2,996	0,140	0,216	0,962	0,047
		c2	8,694	10,641	0,973	2,898	0,143	0,195	0,960	0,048
	3	c1	8,145	10,147	0,957	2,715	0,132	0,167	0,972	0,044
		c2	9,686	11,986	0,971	3,229	0,177	0,247	0,944	0,059
		c3	9,285	12,230	0,954	3,095	0,164	0,229	0,948	0,055
A-S	1	c1	6,170	7,759	0,992	2,057	0,083	0,124	0,985	0,028
	2	c1	7,630	9,593	0,983	2,543	0,129	0,193	0,961	0,043
		c2	9,223	11,934	0,965	3,074	0,172	0,256	0,933	0,057
	3	c1	8,622	11,194	0,957	2,874	0,141	0,196	0,964	0,047
		c2	8,949	11,225	0,973	2,983	0,186	0,246	0,946	0,062
		c3	11,484	15,063	0,920	3,828	0,192	0,278	0,921	0,064
A-B	1	c1	5,720	7,155	0,993	1,907	0,072	0,090	0,992	0,024
	2	c1	6,890	9,267	0,985	2,297	0,110	0,147	0,980	0,037
		c2	8,570	11,178	0,968	2,857	0,141	0,212	0,952	0,047
	3	c1	8,579	10,594	0,962	2,860	0,160	0,227	0,953	0,053
		c2	10,336	14,178	0,958	3,445	0,199	0,283	0,928	0,066
		c3	11,201	14,585	0,928	3,734	0,170	0,269	0,915	0,057
S-S	1	c1	5,274	6,536	0,994	1,758	0,098	0,182	0,967	0,033
	2	c1	7,797	10,085	0,981	2,599	0,122	0,175	0,970	0,041
		c2	8,091	10,216	0,970	2,697	0,124	0,173	0,972	0,041
	3	c1	10,173	12,748	0,944	3,391	0,173	0,273	0,929	0,058
		c2	11,799	15,840	0,954	3,933	0,197	0,275	0,934	0,066
		c3	9,896	12,930	0,950	3,299	0,183	0,275	0,937	0,061

Tablo 7. Devamı

Sınır Şartı	Çatlak Sayısı	Çatlak numarası	Konum				Derinlik			
			MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²	nMAE (%)	MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²	nMAE (%)
B-B	1	c1	5,513	7,843	0,991	1,838	0,065	0,082	0,993	0,022
	2	c1	8,700	10,486	0,979	2,900	0,123	0,167	0,974	0,041
		c2	9,670	12,213	0,963	3,223	0,124	0,168	0,973	0,041
	3	c1	10,070	12,607	0,947	3,357	0,165	0,241	0,943	0,055
		c2	12,573	15,520	0,950	4,191	0,200	0,263	0,937	0,067
		c3	10,235	13,377	0,947	3,412	0,173	0,248	0,935	0,058
Elastik-1	1	c1	6,141	7,619	0,992	2,047	0,095	0,160	0,972	0,032
	2	c1	7,792	10,687	0,982	2,597	0,143	0,191	0,968	0,048
		c2	9,523	12,991	0,962	3,174	0,155	0,224	0,954	0,052
	3	c1	9,678	11,936	0,949	3,226	0,168	0,243	0,940	0,056
		c2	11,470	14,439	0,956	3,823	0,196	0,268	0,929	0,065
		c3	6,141	7,619	0,992	2,047	0,095	0,160	0,972	0,032
Tümü	1	c1	5,274	6,536	0,994	1,758	0,098	0,182	0,967	0,033
	2	c1	7,797	10,085	0,981	2,599	0,122	0,175	0,970	0,041
		c2	8,091	10,216	0,970	2,697	0,124	0,173	0,972	0,041
	3	c1	10,173	12,748	0,944	3,391	0,173	0,273	0,929	0,058
		c2	11,799	15,840	0,954	3,933	0,197	0,275	0,934	0,066
		c3	9,896	12,930	0,950	3,299	0,183	0,275	0,937	0,061

Son olarak Tümü (Multi) (mor) çubukları, Şekil 23–24’te çoğu panelde tekil sınır koşullarıyla aynı mertebede yer almakta ve bazı durumlarda en iyi tekil BC’den bir miktar yüksek olsa da genel geçer/ortalama performansı temsil eden tutarlı bir seviyeyi korumaktadır. Bu durum, Tablo 11’de raporlanan metriklerle birlikte okunduğunda, altı sınır koşulunun birleştirilmesiyle eğitilen modelin sınır şartları değişse dahi tahmin hatasını kontrollü tutabildiğini; yani genellenebilirliği artıran bir toplu eğitim kazanımı sağladığını desteklemektedir.

Tablo 7’de raporlanan diğer performans göstergeleri, $nMAE(\%)$ ile gözlenen eğilimleri nicel olarak desteklemektedir. Öncelikle, MAE ortalama sapmayı temsil ederken RMSE daha büyük hatalara daha duyarlı olduğundan, RMSE’nin MAE’den sistematik olarak daha yüksek gerçekleşmesi, hata dağılımında sınırlı sayıda örnekte daha belirgin sapmaların bulunduğunu göstermektedir. Bu durum özellikle $k=3$ senaryolarında ve $c2/c3$ başlıklarında daha belirgin olup, çoklu çatlak etkilerinin üst üste binmesiyle bazı kombinasyonların model tarafından daha zor temsil edilmesiyle uyumludur. Buna karşılık, Tablo 7’deki R^2 değerlerinin genel olarak yüksek seviyelerde kalması, modelin hem konum hem de derinlik çıktılarında değişkenliğin büyük bir bölümünü açıklayabildiğini ve doğrusal uyumun korunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, çatlak sayısı arttıkça R^2 ’nin kademeli olarak düşmesi, problem karmaşıklığındaki artışın yalnızca ortalama hatayı yükseltmekle kalmayıp açıklayıcılığı da sınırladığını işaret etmektedir. Son olarak, tek tek sınır koşullarına ait metriklerle toplu eğitim sonuçlarının birlikte okunması, farklı sınır koşullarından gelen örneklerin tek model altında bir araya getirilmesine rağmen performansın tutarlı biçimde korunabildiğini; ancak çoklu çatlak durumlarında (özellikle orta çatlak için) etkileşim temelli belirsizliğin devam ettiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle Tablo 7’deki MAE–RMSE– R^2 üçlüsü, Şekil 23 ve Şekil 24’te histogramlarla görülen artış, hata dağılımının karakterini ve modeli yorumlamaya olanak vermektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

YSİ alanında titreşim tabanlı yöntemler, taşıyıcı elemanlarda meydana gelen hasarın konum ve şiddetini modal parametreler üzerinden tahribatsız biçimde belirleme imkânı sunan yaygın ve etkili bir yaklaşımdır. Bu tez kapsamında, çok basamaklı ve çatlaklı Euler–Bernoulli kirişlerin titreşim davranışları analitik olarak modellenmiş; çatlakların sebep olduğu yerel rijitlik kayıpları, kütesiz dönel yay modeli ile temsil edilmiştir. Analitik çatlak modellerinden elde edilen bu yerel esneklik katsayıları TMM formülasyonuna entegre edilerek, farklı çatlak sayıları, konumları ve derinlik oranları için doğal frekansları ve mod şekillerini içeren kapsamlı bir sentetik modal veri seti oluşturulmuştur. Bu veriler daha sonra bir boyutlu evrimsel sinir ağı (1D-CNN) modeli ile eğitilerek, kiriş üzerindeki çatlakların konum ve şiddetinin titreşim temelli olarak tahmin edilmesi amaçlanmış ve analitik modelleme ile derin öğrenme tabanlı hasar tespiti bütüncül bir çerçevede birleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Geliştirilen 1D-CNN modeli kademeli değişken kesitli kirişlerde çatlak konumunu büyük oranda doğru tahmin etmiştir. Çatlak derinliği (d/h) tahminleri de genel olarak dengeli bir performans sergilemiş; göz önüne alınan sınır şartlarının genelinde, konum ve derinlik tahmin başarı oranı yaklaşık %90, tüm senaryolar birlikte ele alındığında ise %85'in üzerinde gerçekleşmiştir.
2. Çatlak sayısı arttıkça özellikle orta bölgede yer alan çatlakların tahmini zorlaşmıştır. Birbirine çok yakın çatlakların bulunduğu senaryolarda model, mod şekillerindeki küçük değişimleri tam olarak ayırt edemediği için derinlik tahmininde belirgin sapmalar üretmiş; bu durum, aralarındaki mesafe daha fazla olan çatlaklara kıyasla yüksek hata değerlerine yol açmıştır. Ayrıca, yakın çatlak içeren bazı senaryolarda model, iki çatlağın yerini zaman zaman birbirisiyle karıştırmıştır.
3. Kirişin basamak geçiş bölgelerinde ve uç (baş/son) bölgelerinde yer alan çatlaklarda modal hassasiyetin görece düşük olması nedeniyle, modelin hem konum hem derinlik tahmininde zorlandığı ve hata değerlerinin diğer bölgelere göre arttığı görülmüştür.

4. Model, sığ çatlaklarda hasarsız durum ile çatlaklı durumu ayırt etmekte güçlük çekmiş ve bu tür çatlaklar için hem konum hem derinlik tahminlerinde sapmaların belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar ışığında, gelecek çalışmalara yol göstermesi açısından aşağıdakiler önerilmektedir:

1. Analitik olarak üretilen sentetik modal verilerin, laboratuvar ortamında elde edilecek deneysel modal test sonuçları ile karşılaştırılması önerilmektedir. Ayrıca, 1D-CNN modelinin gerçek ölçüm sonuçlarına dayanıklılığını artırmak için, sensör gürültüsü ve ölçüm hatalarını temsil eden kontrollü gürültülü veri setleri üretilerek modelin bu koşullar altındaki dayanıklılığı ve kararlılığı değerlendirilmelidir.
2. Bu tez kapsamında ön çalışma niteliğinde gerçekleştirilen model karşılaştırmaları geliştirilebilir; farklı derin öğrenme mimarilerinin ve hibrit yaklaşımların çatlak konumu ve şiddeti tahminindeki performansları ayrıntılı olarak incelenerek, daha güçlü ve genellenebilir tahmin modelleri elde edilebilir.
3. Özellikle çatlak derinliği tahmininde daha yüksek doğruluk elde edebilmek amacıyla, daha ayrıntılı bilgi içeren özniteliklerin geliştirilmesi ve analize dâhil edilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda, kullanılan mod sayısının artırılması ve daha yüksek modlardan elde edilecek bilgilerin değerlendirilmesi, çatlak derinliğine duyarlılığı artırarak model performansının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir.
4. Geliştirilen 1D-CNN tabanlı yaklaşımın, farklı kaynaklardan elde edilen verilerle eğitilerek daha geniş veri yapıları üzerinde denenmesi ve daha karmaşık taşıyıcı sistemlere uygulanması önerilmektedir. Bu sayede yöntemin farklı yapı tiplerine uygulanabilirliği artırılabilir ve yapısal sağlık izleme çalışmalarında daha genel bir çerçeve sunulabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdeljaber, O., Avci, O., Kiranyaz, S., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2017). Real-Time Vibration-Based Structural Damage Detection Using One-Dimensional Convolutional Neural Networks. *Journal of Sound and Vibration*, 388, 154–170.
- Alves, V. N., Cury, A., Roitman, N., Magluta, C., & Cremona, C. (2015). Structural Modification Assessment Using Supervised Learning Methods Applied to Vibration Data. *Engineering Structures*, 99, 439–448.
- Amafabia, D. M., Montalvão, D., David-West, O., & Haritos, G. (2017). A Review of Structural Health Monitoring Techniques Applied to Composite Structures. *Structural Durability & Health Monitoring*, 11, 91–147.
- Attar, M. (2012). A Transfer Matrix Method for Free Vibration Analysis and Crack Identification of Stepped Beams with Multiple Edge Cracks and Different Boundary Conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 57, 19–33.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2018). 1-D CNNs for Structural Damage Detection: Verification on a Structural Health Monitoring Benchmark Data. *Neurocomputing*, 275.
- Bakhary, N. (2006). Vibration-Based Damage Detection of Slab Structure Using Artificial Neural Network. *Jurnal Teknologi*, 44B, 17–30.
- Bakhtiari-Nejad, F., Khorram, A., & Rezaeian, M. (2014). Analytical Estimation of Natural Frequencies and Mode Shapes of a Beam Having Two Cracks. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78, 193–202.
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009). A Hybrid Particle Swarm Optimization–Simplex Algorithm (PSOS) for Structural Damage Identification. *Advances in Engineering Software*, 40(9), 883–891.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Bishop, C. M., & Bishop, H. (2023). *Deep Learning: Foundations and Concepts*. Springer Cham.
- Bodke, K., Bhirud, S., & Sangle, K. K. (2025). Structural Health Monitoring Using Image Processing and Advanced Technologies for the Identification of Deterioration of Building Structure: A Review. *Structural Durability & Health Monitoring*, 19(6), 1547–1562.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group.

- Caddemi, S., & Calio, I. (2008). Exact Solution of the Multi-Cracked Euler–Bernoulli Column. *International Journal of Solids and Structures*, 45, 1332–1351.
- Caddemi, S., & Calio, I. (2009). Exact Closed-Form Solution for the Vibration Modes of the Euler–Bernoulli Beam with Multiple Open Cracks. *Journal of Sound and Vibration*, 327, 473–489.
- Caddemi, S., & Morassi, A. (2011). Detecting Multiple Open Cracks in Elastic Beams by Static Tests. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(2), 113–124.
- Caddemi, S., & Morassi, A. (2013). Multi-Cracked Euler–Bernoulli Beams: Mathematical Modeling and Exact Solutions. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 944–956.
- Capineri, L., & Bulletti, A. (2021). Ultrasonic Guided-Waves Sensors and Integrated Structural Health Monitoring Systems for Impact Detection and Localization: A Review. *Sensors*, 21(9), 2929.
- Cha, Y.-J., Ali, R., Lewis, J., & Büyüköztürk, O. (2024). Deep Learning-Based Structural Health Monitoring. *Automation in Construction*, 161, 105328.
- Chondros, T. G., & Dimarogonas, A. D. (1998a). A Continuous Cracked Beam Vibration Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 215(1), 17–34.
- Chondros, T. G., & Dimarogonas, A. D. (1998b). Vibration of a Cracked Cantilever Beam. *Journal of Vibration and Acoustics*, 120, 742–746.
- Chondros, T. G., Dimarogonas, A. D., & Yao, J. (1998). Longitudinal Vibration of a Continuous Cracked Bar. *Engineering Fracture Mechanics*, 61, 593–606.
- De Sousa, A. A. S. R., da Silva Coelho, J., Machado, M. R., & Dutkiewicz, M. (2023). Multiclass Supervised Machine Learning Algorithms Applied to Damage and Assessment Using Beam Dynamic Response. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*.
- Dimarogonas, A. D. (1996). Vibration of Cracked Structures: A State-of-the-Art Review. *Engineering Fracture Mechanics*, 55(5), 831–857.
- Dimarogonas, A. D., & Paipetis, S. A. (1983). *Analytical Methods in Rotor Dynamics*. Applied Science Publisher.
- Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms* (Doktora Tezi). Politecnico di Milano, Italy.
- Eroglu, U., & Tufekci, E. (2017). Crack Modeling and Identification in Curved Beams Using Differential Evolution. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131–132, 435–450.

- Feng, D., & Feng, M. Q. (2018). Computer Vision for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure: From Dynamic Response Measurement to Damage Detection – A Review. *Engineering Structures*, 156, 105–117.
- Fernandez-Saez, J., & Navarro, C. (2002). Fundamental Frequency of Cracked Beams in Bending Vibrations: An Analytical Approach. *Journal of Sound and Vibration*, 256, 17–31.
- Garg, Y., Masih, A., & Sharma, U. (2021). Predicting Bridge Damage During Earthquake Using Machine Learning Algorithms. In *Proceedings of the Confluence 2021: 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science and Engineering* (pp. 725–728). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Gasch, R. (1993). A Survey of the Dynamic Behaviour of a Simple Rotating Shaft With a Transverse Crack. *Journal of Sound and Vibration*, 160(2), 313–332.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Guo, H. Y., & Li, Z. L. (2009). A Two-Stage Method to Identify Structural Damage Sites and Extents by Using Evidence Theory and Micro-Search Genetic Algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 769–782.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction* (2nd ed.). Springer.
- He, Y., Guo, D., & Chu, F. (2001). Using Genetic Algorithms and Finite Element Methods to Detect Shaft Crack Rotor-Bearing System. *Mathematics and Computers in Simulation*, 57, 95–108.
- Hu, J., & Liang, R. Y. (1993). An Integrated Approach to Detection of Cracks Using Vibration Characteristics. *Journal of the Franklin Institute*, 330(5), 841–853.
- Hu, J., & Wu, Z. (2022). Mode Shape Prediction Based on Convolution Neural Network and Autoencoder. *Structures*, 38, 419–429.
- Izenman, A. J. (2008). *Modern Multivariate Statistical Techniques: Regression, Classification, and Manifold Learning*. Springer.
- Jayasundara, N., Thambiratnam, D. P., Chan, T. H. T., & Nguyen, A. (2020). Locating and Quantifying Damage in Deck Type Arch Bridges Using Frequency Response Functions and Artificial Neural Networks. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(10), 2042010.
- Jierula, A., Wang, S., Oh, T.-M., & Wang, P. (2021). Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data. *Applied Sciences*, 11(5), 2314.

- Jiménez-Alonso, J. F., Naranjo-Perez, J., Pavic, A., & Sáez, A. (2021). Maximum Likelihood Finite-Element Model Updating of Civil Engineering Structures Using Nature-Inspired Computational Algorithms. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(5), 620–637.
- Jin, H., Xia, J., & Wang, Y. (2015). Optimal Sensor Placement for Space Modal Identification of Crane Structures Based on an Improved Harmony Search Algorithm. *Journal of Zhejiang University Science A*, 16, 464–477.
- Kahya, V., Şimşek, S., & Toğan, V. (2022). Vibration-Based Damage Detection in Anisotropic Laminated Composite Beams by a Shear-Deformable Finite Element and Harmony Search Optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, 181.
- Kang, F., Li, J.-j., & Xu, Q. (2012). Damage Detection Based on Improved Particle Swarm Optimization Using Vibration Data. *Applied Soft Computing*, 12(8), 2329–2335.
- Karaca, S. (2016). Çatlaklı Elastik Kirişlerin Dinamik Davranışlarının Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Khatir, S., & Wahab, M. A. (2019). A Computational Approach for Crack Identification in Plate Structures Using XFEM, XIGA, PSO and Jaya Algorithm. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103, 102240.
- Khiem, N. T., & Lien, T. V. (2001). A Simplified Method for Natural Frequency Analysis of a Multiple Cracked Beam. *Journal of Sound and Vibration*, 245(4), 737–751.
- Khiem, N. T., et al. (2018). A Closed-Form Solution to the Problem of Crack Identification for a Multistep Beam Based on Rayleigh Quotient. *International Journal of Solids and Structures*, 150, 154–165.
- Kim, K., Kim, S., Sok, K., et al. (2018). A Modeling Method for Vibration Analysis of Cracked Beam with Arbitrary Boundary Condition. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 3, 367–381.
- Lee, J. (2009a). Identification of Multiple Cracks in a Beam Using Natural Frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 320, 482–490.
- Lee, J. (2009b). Identification of Multiple Cracks in a Beam Using Vibration Amplitudes. *Journal of Sound and Vibration*, 326, 205–212.
- Lee, J. W., & Lee, J. Y. (2017). A Transfer Matrix Method Capable of Determining the Exact Solutions of a Twisted Bernoulli–Euler Beam with Multiple Edge Cracks. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 474–493.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.

- Lin, H. P., Chang, S. C., & Wu, J. D. (2002). Beam Vibrations with an Arbitrary Number of Cracks. *Journal of Sound and Vibration*, 258(5), 987–999.
- Mahmoud, M. A. (2000). Effect of Cracks on the Dynamic Response of a Simple Beam Subject to a Moving Load. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 215, 207–215.
- Mahmoud, M. A. (2001). Stress Intensity Factors for Single and Double Edge Cracks in a Simple Beam Subject to a Moving Load. *International Journal of Fracture*, 111, 151–161.
- Mahmoud, M. A., & Abou Zaid, M. A. (2002). Dynamic Response of a Beam with a Crack Subject to a Moving Mass. *Journal of Sound and Vibration*, 256(4), 591–603.
- Mahmoud, M. A., Zaid, M. A., & Harashani, S. A. (1999). Numerical Frequency Analysis of Uniform Beams with a Transverse Crack. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 15, 709–715.
- Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H., & Bahreininejad, A. (2008). Damage Detection of Truss Bridge Joints Using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 35, 1122–1131.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F., Kaminski, J., & Riera, J. D. (2012). Damage Detection Under Ambient Vibration by Harmony Search Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 39, 9704–9714.
- Murphy, K. P. (2012). *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. MIT Press.
- Nandakumar, P., & Shankar, K. (2021). Crack Damage Detection of Structures Using Spectral Transfer Matrix. *Structural Health Monitoring*, 20(6), 3036–3055.
- Naranjo-Pérez, J., Infantes, M., Jiménez-Alonso, J. F., & Sáez, A. (2020). A Collaborative Machine Learning-Optimization Algorithm to Improve the Finite Element Model Updating of Civil Engineering Structures. *Engineering Structures*, 225, 111327.
- Naranjo-Pérez, J., Jiménez-Alonso, J. F., Pavic, A., & Sáez, A. (2021). Finite-Element-Model Updating of Civil Engineering Structures Using a Hybrid UKF-HS Algorithm. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(5), 620–637.
- Nikolić, N., & Šalinić, S. (2020). Free Vibration Analysis of Cracked Beams by Using Rigid Segment Method. *Applied Mathematical Modelling*, 84, 158–172.
- Pallarés, F. J., Betti, M., Bartoli, G., & Pallarés, L. (2021). Structural Health Monitoring (SHM) and Nondestructive Testing (NDT) of Slender Masonry Structures: A Practical Review. *Construction and Building Materials*, 297, 123768.
- Park, S., & Kim, S. (2024). Enhancing Vibration-Based Damage Assessment With 1D-CNN: Parametric Studies and Field Applications. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(7), 2934–2951.

- Patil, D. P., & Maiti, S. K. (2003). Detection of Multiple Cracks Using Frequency Measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 1553–1572.
- Patil, D. P., & Maiti, S. K. (2005). Experimental Verification of a Method of Detection of Multiple Cracks in Beams Based on Frequency Measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 281, 439–451.
- Qi, F., Teng, S., Wang, S., He, Y., & Liu, Z. (2025). Element Modal-Based Structural Damage Detection by Two-Dimensional Convolutional Neural Networks. *Buildings*, 15(21), 3905.
- Rizos, P. F., Aspragathos, N., & Dimarogonas, A. D. (1990). Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam from the Vibration Modes. *Journal of Sound and Vibration*, 138, 381–388.
- Ruotolo, R., & Surace, C. (2004). Natural Frequencies of a Bar with Multiple Cracks. *Journal of Sound and Vibration*, 272, 301–316.
- Sami, A., Tian, G. Y., Marindra, A. M. J., & Song, H. (2025). A Comprehensive Review on Passive RFID Sensors for Structural Health Monitoring: Developments, Challenges, and Opportunities. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*.
- Satpal, S. B., Guha, A., & Banerjee, S. (2016). Damage Identification in Aluminum Beams Using Support Vector Machine: Numerical and Experimental Studies. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(3), 446–457.
- Shifrin, E. I., & Ruotolo, R. (1999). Natural Frequencies of a Beam with an Arbitrary Number of Cracks. *Journal of Sound and Vibration*, 222(3), 409–423.
- Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R. (2000). *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. ASME Press.
- Teng, S., Chen, G., Yan, Z., Cheng, L., & Bassir, D. (2023). Vibration-Based Structural Damage Detection Using One-Dimensional Convolutional Neural Network and Transfer Learning. *Structural Health Monitoring*, 22(4), 2888–2909.
- Vakil-Baghmisheh, M., Peimani, M., Sadeghi, M. H., & Eftefagh, M. M. (2008). Crack Detection in Beam-Like Structures Using Genetic Algorithms. *Applied Soft Computing*, 8(2), 1150–1160.
- Waisman, H., Chatzi, E., & Smyth, A. W. (2010). Detection and Quantification of Flaws in Structures by the Extended Finite Element Method and Genetic Algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 82(3), 303–328.
- Wei, Z., Liu, J., & Lu, Z. (2018). Structural Damage Detection Using Improved Particle Swarm Optimization. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 26(6), 792–810.

- Zhao, X., Zhao, Y. R., Gao, X. Z., Li, X. Y., & Li, Y. H. (2016). Green's Functions for the Forced Vibrations of Cracked Euler–Bernoulli Beams. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 68–69, 155–175.
- Zhao, X., et al. (2022). Nonlinear Forced Vibration Analysis of a Multi-Cracked Euler–Bernoulli Curved Beam with Inclusion of Damping. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 180, 109147.
- Zheng, D. Y., & Fan, S. C. (2001). Natural Frequencies of a Non-Uniform Beam with Multiple Cracks Via Modified Fourier Series. *Journal of Sound and Vibration*, 242(4), 701–717.
- Zheng, D. Y., & Fan, S. C. (2003). Vibration and Stability of Cracked Hollow-Sectional Beams. *Journal of Sound and Vibration*, 267(4), 933–954.
- Zheng, D. Y., & Kessissoglou, N. J. (2004). Free Vibration Analysis of a Cracked Beam by Finite Element Method. *Journal of Sound and Vibration*, 273, 457–475.
- Zhong, Q., Huang, J., & Chen, H. (2022). Vibrational Energy Estimation of Cracked Composite Beams Using Radiative Energy Transfer Method. *Composite Structures*, 294, 115710.
- Zhou, Q., Zhou, H., Zhou, Q., Yang, F., & Luo, L. (2014). Structure Damage Detection Based on Random Forest Recursive Feature Elimination. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 46(1), 82–90.

ÖZGEÇMİŞ

Ezgi SEVİLMİŞ, ilk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (İngilizce) Bölümü'nü kazandı. 2022 yılında lisans eğitiminden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2025 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı.

1. Sevilmiş, E., Kahya, V., & Şimşek, S., (2025). Effect of cracks on dynamic behavior of stepped beams with general boundary conditions. Proceedings of the 4th International Civil Engineering & Architecture Conference (ICEARC'25), Volume 1: Civil Engineering, s. 2242–2248. Golden Light Publishing. Trabzon.