

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma Optimizasyonu Kullanılarak Yapı Elemanlarında Titreşim Verileri Yardımıyla Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında bir yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Volkan KAHYA’ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU’na, Sayın Arş. Gör. Dr. Osman Tuğrul BAKİ’ye ve Sayın Arş. Gör. Dr. Sebahat ŞİMŞEK’e, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşım Mohamad ALHASAN’a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümündeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Son olarak doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Nahida DADAŞOVA ve babam Rovshan DADAŞOVA’a, abim Mirhabib DADAŞOV’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Aghamehdi DADASHOV
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma Optimizasyonu Kullanılarak Yapı Elemanlarında Titreşim Verileri Yardımıyla Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Volkan KAHYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, analizleri ilgili programlarda 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. 16/08/2024

Aghamehdi DADASHOV

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.2.1. Modal Karakteristiklerin Değişimine Dayalı Hasar Tespitiyle İlgili Çalışmalar	2
1.2.2. Optimizasyon ile Hasar Tespitine Yönelik Çalışmalar	7
1.2.3. Yapay Sinir Ağları ile Hasar Tespitine Yönelik Çalışmalar	10
1.3. Tezin Kapsamı, Amaç ve Hedefleri	13
1.4. Temel Denklemler ve Teorik Altyapı	14
1.4.1. Yapay Sinir Ağları (YSA).....	14
1.4.2. Genetik Algoritma (GA)	20
1.4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY).....	22
1.4.4. Guyan Yöntemi	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	27
2.1. Giriş	27
2.2. Hasar Tespit Metodolojisi	27
2.2.1. Yapay Sinir Ağları ile Hasar Tespiti İçin Ağın Eğitilmesi	27
2.2.2. Genetik Algoritma (GA) ile Hasar Tespiti.....	42
2.2.3. YSA ve GA Optimizasyonu ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	44
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54

4. KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksel Lisans Tezi

ÖZET

YAPAY SİNİR AĞLARI VE GENETİK ALGORİTMA OPTİMİZASYONU KULLANILARAK YAPI ELEMANLARINDA TİTREŞİM VERİLERİ YARDIMIYLA HASAR TESPİTİ

Aghamehdi DADASHOV

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Volkan KAHYA
2024, 78 Sayfa

Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Genetik Algoritma (GA) optimizasyon tekniklerinin titreşim verilerine dayalı hasar tespiti uygulamalarındaki etkinliği ve potansiyeli kiriş yapıları özelinde değerlendirilmiştir. Kirişte hasar, ilgili elemanlarda rijitliğin (elastisite modülünün) azaltılması ile tanımlanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde hasar tespitinde YSA'nın etkinliğini değerlendirmek üzere ANSYS Workbench yardımıyla bir konsol kiriş modeli oluşturulmuş; Design Experiments aracı yardımıyla rastgele 1000 hasar durumu simüle edilmiştir. Elde edilen bu veri, YSA eğitiminde kullanılmıştır. Eğitilen ağ kullanılarak 10 farklı hasar senaryosu üzerinde performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde GA optimizasyonu ile hasar tespiti yapılmıştır. Bunun için yapının iki durumuna ait frekans ve mod şekli değişimlerini göz önüne alan bir amaç fonksiyonunu minimum yapan rijitlik kaybı seti araştırılmıştır. Eldeki sınırlı veriyi sonlu eleman modelinden elde edilenle karşılaştırmak amacıyla sayısal modele Guyan yöntemiyle model indirgeme işlemi uygulanmıştır. YSA ve GA'nın performansı değerlendirilmiş ve ayrıca birbirleriyle karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Sinir Ağları, Genetik Algoritma, Hasar Tespiti, Yapı Sağlığı İzlemesi, Optimizasyon, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Master's Thesis

SUMMARY

DAMAGE DETECTION IN STRUCTURAL ELEMENTS WITH THE HELP OF VIBRATION DATA USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND GENETIC ALGORITHM OPTIMIZATION

Aghamehdi DADASHOV

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Volkan KAHYA
2024, 78 Pages

In this study, the effectiveness and potential of Artificial Neural Networks (ANN) and Genetic Algorithm (GA) optimization techniques in damage detection applications based on vibration data were evaluated specifically for beam structures. Damage in beams was defined by reducing the stiffness (modulus of elasticity) in the relevant elements. In the first part of the study, a cantilever beam model was created with the help of ANSYS Workbench to evaluate the effectiveness of ANN in damage detection; 1000 random damage cases were simulated with the help of Design Experiments tool. This obtained data was used in ANN training. Performance evaluation was performed on 10 different damage scenarios using the trained network. In the second part of the study, damage detection was performed with GA optimization. For this purpose, a stiffness loss set that minimizes an objective function considering the frequency and mode shape changes of the two states of the structure was investigated. To compare the limited data obtained with the one obtained from the finite element model, a model reduction process was applied to the numerical model with the Guyan method. The performance of ANN and GA was evaluated and compared with each other.

Key Words: Artificial Neural Networks, Genetic Algorithm, Damage Detection, Structural Health Monitoring, Optimization, Finite Element Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Biyolojik sinir hücresinin yapısı (ForumGerçek, 2014).....	15
Şekil 2. Sinir sistemi (ForumGerçek, 2014)	16
Şekil 3. Yapay sinir hücresinin yapısı (Öztemel, 2006)	16
Şekil 4. ÇKYSA yapısı (ForumGerçek, 2014)	17
Şekil 5. Sonlu eleman tipleri (Karaca, 2016).....	23
Şekil 6. SOLID186 elemanı (ANSYS, 2013).....	28
Şekil 7. Çalışmada kullanılan konsol kirişin sonlu eleman modeli	28
Şekil 8. Çalışmada kullanılan konsol kirişin Ansys Workbench ile elde edilen ilk beş mod şekli	29
Şekil 9. 5 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi	34
Şekil 10. 10 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi	34
Şekil 11. 15 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi	35
Şekil 12. 20 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi	35
Şekil 13. 25 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi	36
Şekil 14. 5 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri.....	37
Şekil 15. 10 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri.....	38
Şekil 16. 15 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri.....	39
Şekil 17. 20 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri.....	40
Şekil 18. 25 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri.....	41
Şekil 19. Optimizasyon tabanlı hasar tespiti akış şeması	43
Şekil 20. GA optimizasyonu için bazı hasar senaryolarına ait yakınsama eğrileri.....	45
Şekil 21. Hasar-1 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	50
Şekil 22. Hasar-2 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	50
Şekil 23. Hasar-3 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	50
Şekil 24. Hasar-4 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	51
Şekil 25. Hasar-5 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	51

Şekil 26. Hasar-6 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	51
Şekil 27. Hasar-7 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	52
Şekil 28. Hasar-8 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	52
Şekil 29. Hasar-9 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	52
Şekil 30. Hasar-10 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar	53



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çalışmada kullanılan konsol kirişin Ansys Workbench ile elde edilen ilk beş doğal frekansı	28
Tablo 2. ÇKYSA modeli için kullanılan değişkenler	31
Tablo 3. YSA tahmin modeli performans değerlendirme sonuçları	32
Tablo 4. Çalışmada göz önüne alınan hasar senaryoları.....	44
Tablo 5. Hasar-1 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	45
Tablo 6. Hasar-2 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	46
Tablo 7. Hasar-3 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	46
Tablo 8. Hasar-4 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	46
Tablo 9. Hasar-5 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	47
Tablo 10. Hasar-6 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	47
Tablo 11. Hasar-7 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	47
Tablo 12. Hasar-8 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	48
Tablo 13. Hasar-9 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	48
Tablo 14. Hasar-10 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları.....	48
Tablo 15. Konsol kirişte hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması	49

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	: Kiriş genişliği
$e_i^2(w)$	: Hata terimi
f	: Hata fonksiyonu
$f(x)$	: Uygunluk fonksiyonu
f_i^{Hedef}	: Hedef frekanslar
f_i^{Tahmin}	: Tahmin frekanslar
$g_i(x)$	: Eşitsizlik kısıtları
h	: Kiriş yüksekliği
j_k	: Jakobiyen matrisi
m	: Mod sayısı
w_0	: Ağırlık dizisine başlangıç değeri
w_i	: i . frekans ve mod şekli için ağırlık katsayıları
w_k	: Parametre vektörü
$\mathbf{x}$	: Rijitlik kaybı vektörü
$\bar{y}$	: Ölçüm değerlerinin ortalaması
y_d	: Gerçek çıktı
y_i	: Ölçüm değerleri
y	: Hedef çıktı
yt_i	: Tahmin değerleri
$\hat{E}$	: Bir eleman için elastisite modülü
E	: Elastisite modülü
$E(w)$	: Hata terimlerinin karelerinin toplamı
$F(\mathbf{x})$	: Minimumu aranan amaç fonksiyonunu
$\mathbf{F}_n$	: Kuvvet vektörü
$\mathbf{I}$	: Birim matris
$\mathbf{K}_n$	: Rijitlik matrisi
L	: Kiriş uzunluğu
N	: Sonlu eleman sayısı
$\mathbf{X}_n$	: Yer değiştirme vektörü

P	: Popölasyon
α	: Hasar şiddeti
λ	: Marquardt parametresi
Φ^{Hedef}	: Hedef mod şekil matrisi
Φ^{Tahmin}	: Tahmin edilen mod şekil matrisi

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

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapılar, insanlığın yaşamını şekillendiren ve medeniyetin ilerlemesine katkı sağlayan temel unsurlardır. Barınma, çalışma, üretim ve yaşam alanları olarak kullanılan yapılar, güvenlik ve refah açısından kritik öneme sahiptir. Ancak, doğal afetler, iklim değişikliği ve insan hataları gibi çeşitli faktörler nedeniyle sürekli tehdit altındadırlar. Bu nedenle, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı, yapı mühendisliğinin temel amaçlarından biridir (Farrar & Worden, 2012).

Yapı mühendisliği, yapıların tasarımı, inşası, bakımı ve güçlendirilmesiyle ilgilenir. Bu disiplin, yapıların sağlamlığı ve güvenliği için gereken mühendislik ilkelerini geliştirir ve uygular. Daha önce yaşadığımız acı tecrübeler gerek güvenlik gerekse ekonomik açıdan bakıldığında inşa edilen, özellikle kritik yapıların, sürekli izlenmesi ihtiyacını önemli bir konu olarak karşımıza çıkarmaktadır. Yapıların sürekli izlenmesiyle olası hasarlar erken teşhis edilebilmekte ve böylece sonuçları çok ciddi olabilecek daha büyük sorunların ortaya çıkması önlenebilmektedir (Aktan vd., 2000.).

Yapı Sağlığı İzleme (YSİ), yapıların performansını sürekli olarak değerlendiren ve olası hasarları erken safhalarda tespit etmeyi amaçlayan bir süreçtir. Bu süreçte kullanılan yöntemler arasında görsel denetimler, akustik emisyon ve ultrasonik testler gibi geleneksel yöntemler bulunmaktadır (Amafabia vd., 2017; Kahya vd., 2022). Ancak bu yöntemler, büyük oranda kullanıcı tecrübesine bağlı olmaları, kullanılan ekipmanın pahalı olması veya her zaman her koşulda kullanılamamaları vb. gibi durumlarda yetersiz kalabilmektedirler. Bu bağlamda, uygulaması diğerlerine göre nispeten daha kolay ve ekonomik olan titreşim tabanlı izleme ve hasar tespit yöntemleri son zamanlarda büyük ilgi çekmektedir. Bilindiği üzere, yapının herhangi bir elemanında meydana gelecek bir değişiklik yapı rijitliğini ve dolayısıyla yapının modal karakteristiklerini değiştirecektir. Titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemleri de bu prensibe dayalı olarak işlemektedir. Bu yöntemlerin ileri hesaplama teknikleriyle beraber kullanımı ise modern ve etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır.

İleri hesaplama teknikleri denilince akla ilk olarak optimizasyon, Yapay Sinir Ağları (YSA), Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme gibi yöntemler gelmektedir. Teknolojik ilerlemelerin de etkisiyle bu yöntemlerin YSİ ve hasar tespiti uygulamalarındaki kullanımı

üzerine son yıllarda artan bir ilgi vardır. Bu sebeple, bu tez çalışma kapsamında yapısal hasarların tespitinde akıllı (ileri) hesaplama tekniklerinin uygulaması ele alınmıştır. Bunun için bir konsol kirişte hasar tespit problemi seçilmiş; YSA ve Genetik Algoritma (GA) optimizasyonu problemin çözümünde kullanılacak ileri hesaplama teknikleri olarak düşünülmüştür. Bu çalışma, YSI ve hasar tespitinde modern hesaplama tekniklerinin etkinliğini göstermeye yönelik literatüre küçük bir katkı sunmaktadır.

1.2. Literatür Özeti

YSİ ve hasar tespiti üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Yapısal dayanıklılık ve güvenlik açısından kritik öneme haiz olması nedeniyle bu konuya yönelik yöntem ve uygulamaların araştırılması ve sürekli iyileştirilmesi yapı mühendisliğinde önemli bir çalışma alanı olagelmıştır.

Hasar tespit yöntemleri arasında görsel denetimler, ultrasonik testler, manyetik parçacık incelemeleri, akustik emisyon teknikleri ve titreşim analizleri yer almaktadır. Titreşim verilerine dayalı yöntemler, yapıların dinamik özelliklerindeki değişimleri kullanarak hasarın varlığını, konumunu ve şiddetini belirlemeye çalışır. Bu yöntemler, özellikle erken aşama hasar tespiti için değerli olup, bunların ileri hesaplama teknikleriyle beraber kullanımı büyük avantaj ve kolaylık sağlamaktadır. Bu bölümde, YSI ve hasar tespitinde modal karakteristiklerin değişimine dayalı yöntemlerin ileri hesaplama teknikleriyle birlikte kullanıldığı çalışmalar özetlenmiştir.

1.2.1. Modal Karakteristiklerin Değişimine Dayalı Hasar Tespitiyle İlgili Çalışmalar

Modal karakteristiklere dayalı hasar tespit yöntemleri, doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi temel titreşim özelliklerinde meydana gelen değişiklikler yardımıyla olası hasarın/hasarların konumunu ve şiddetini belirlemeye çalışır. Yapı elemanlarında meydana gelecek değişikliklerin modal parametreleri de değiştirmesi, modal analizin özellikle erken aşama hasar tespiti için değerli bir araç olmasını sağlar (Pandey vd., 1991).

Cawley & Adams (1979), yapıların doğal frekanslarındaki değişimleri kullanarak hasar yerlerinin belirlenmesi problemini incelemişlerdir. Kullanılan yöntem, yapılarda

hasarın var olup olmadığı, var ise yapının neresinde olduğunu belirlemede güvenilir sonuçlar sağlamıştır.

Pandey vd. (1991), hasar tespitinde modal eğrilik değişimlerinin kullanımını incelemiştir. Modal eğriliklerdeki değişimlerin hasar yerini ve büyüklüğünü belirlemede son derece tutarlı sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Kullanılan yöntem, hasar tespiti ve yapı sağlığı izlemesi süreçlerinde önemli bir yenilik sunmuştur.

Rytter (1993), sivil mühendislik yapılarında titreşime dayalı izleme yöntemlerini ele almıştır. Çalışmasında, yapısal hasar tespiti için kullanılan modal analiz tekniklerini kapsamlı bir şekilde incelemiş ve çeşitli yapı türleri için uygunluklarını değerlendirmiştir.

Stubbs & Kim (1996), mod şekillerindeki değişimleri kullanarak hasarın yerini ve şiddetini tahmin etmişlerdir. Yazarlar, deneysel modal veriler ile yapının sonlu eleman modelinden elde edilen sayısal verileri birleştiren bir sistem tanımlama yöntemi geliştirmişlerdir.

Salawu (1997), yapısal değerlendirme prosedürlerinde doğal frekansların hasar teşhis parametresi olarak kullanımını tartışmıştır. Doğal frekansların yapısal bütünlüğe işaret eden hassas göstergeler olduğu gerçeğine dayanarak periyodik frekans ölçümlerinin yapı durumunun izlenmesinde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Araştırmacının önerdiği yöntemin en büyük avantajı, doğal frekansların kolay ve ucuz bir şekilde elde edilebilmesi sebebiyle pratik ve ekonomik bir yöntem olmasıdır.

Nandwana & Maiti (1997), değişken kesitli konsol bir kirişte çatlak yeri ve boyutunu tespit etmek için doğal frekans ölçümüne dayalı bir yöntem sunmuşlardır. Çatlak, dönel yay modeli ile temsil edilmiştir. Analitik olarak elde edilen karakteristik denklem yardımıyla üç farklı moda ait eğriler çizilmiştir. Bu üç eğrinin kesişim noktası, çatlağın yerini belirtmektedir. Çatlağın boyu ise rijitlik ile aralarındaki standart ilişki kullanılarak hesaplanmıştır. Yazarlar, yöntemin kullanılabilirliğini ve doğruluğunu gösteren bir örnek sunmuşlardır.

Maia & Silva (1997), modal analizle modal parametrelerin belirlenmesi tekniklerini ele almışlardır. Çalışmalarında, çeşitli modal analiz tekniklerinin yapısal hasar tespiti ve değerlendirilmesinde nasıl kullanılabileceğini kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir.

Friswell & Penny (1997), çeşitli yapı elemanlarında titreşim verileri ile hasar tespitinin nasıl gerçekleştirilebileceğini ele almışlar; titreşim tabanlı yöntemlerin etkinliğini incelemiştir.

Doebbling vd. (1998), yapı sistemlerinde titreşim tabanlı hasar tespit yöntemlerine genel bir bakış sunmuşlardır. Hasar tespitinde kullanılan titreşim tabanlı yöntemler, sağladıkları hasar tespit seviyesi (sadece hasarın varlığını tespit, sadece hasarın yerini tespit, hasarın yerini ve şiddetini tespit ve yapının kalan ömrünü tahmin), modele dayalı ve modele dayalı olmayan yöntemler, lineer ve lineer olmayan yöntemler gibi çeşitli kriterlere göre kategorize edilmiştir. Çalışma, bu yöntemlerin temel prensiplerini, avantajlarını ve sınırlamalarını ele almakta, modal analiz ve frekans değişimlerine dayalı tekniklerin yapısal hasarın yerini ve şiddetini belirlemedeki etkinliğini değerlendirmektedir.

Farrar & Jauregui (1998), dinamik özelliklere dayalı çeşitli hasar tespit yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Gerçek bir köprüden elde edilen dinamik verileri kullanarak teknik literatürde geçen beş farklı yöntemden elde edilen sonuçları karşılaştırmış ve tartışmışlardır.

Abdel Wahab & De Roeck (1999), önerilmeli betonarme bir köprüde hasar tespiti için modal eğrilik değişimlerinin kullanımını araştırmışlardır. Bu amaçla yazarlar, farklı konumlarda hasarlı bölümler içeren basit ve sürekli kirişler üzerinde simüle edilmiş veriler kullanmışlar ve “eğrilik hasar faktörü” olarak adlandırılan bir hasar göstergesi önermişlerdir. Önerilen yöntem, İsviçre’de Bern ve Zürih arasında yer alan Z24 köprüsüne uygulanmıştır.

Chinchalkar (2001), doğal frekanslar ile kirişlerde çatlak konumlarını belirlemeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Yazar çalışmasında, çatlakların konumunun kirişin doğal frekanslarındaki değişikliklerin değerlendirilmesi yoluyla doğru bir şekilde tespit edilebileceğini göstermiştir. Çalışmada ayrıca, kirişlerin titreşim davranışları analiz edilerek, çatlak tespiti için doğal frekansların nasıl kullanılabileceği detaylandırılmıştır. Sonuçlar, doğal frekansların yapısal hasarların yerini belirlemede etkili bir araç olduğunu ve bu yöntemin yapısal değerlendirme süreçlerinde etkin bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur.

Sohn & Farrar (2001), yapısal hasar tespiti için yeni bir zaman serisi analizi yöntemi sunmuşlardır. Önerdikleri yöntem, çeşitli çalışma koşullarında çalışan bir mekanik sistemde hasar yerlerini belirlemek için geliştirilmiştir. Hasarın yeri, yalnızca ilgili yapıdan kaydedilen ivme zaman geçmişleri analiz edilerek belirlenmiştir. Bunun için bir veri normalizasyon prosedürü önermişlerdir. Bu prosedür, yapının hasarsız olduğu durumda kaydedilen sinyaller topluluğundan yeni elde edilen sinyale en yakın referans sinyali seçmektedir. Çalışma, zaman serisi analizinin YSİ ve hasar tespitinde nasıl kullanılabileceğini ve bu yöntemin etkinliğini göstermektedir.

Ren & De Roeck (2002), yapısal hasar tespitinde modal verilerin kullanımını inceleyen iki önemli çalışma gerçekleştirmişlerdir. İlk çalışmada, modal verilerin kullanımı simülasyonlarla doğrulanmış ve modal parametrelerdeki değişikliklerin hasar tespitinde nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, modal verilerin hasar tespiti için güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymuştur. İkinci çalışmada ise geliştirilen yöntemin deneysel doğrulaması yapılmış, gerçek yapı örnekleri üzerinde yapılan testlerle modal verilerin hasar tespiti yetenekleri değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, simülasyon bulgularını desteklemiş ve modal verilerin yapısal hasarın yerini ve şiddetini belirlemede etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu iki çalışma, modal verilerin hem simülasyon hem de pratik testlerde hasar tespiti için etkili bir araç olduğunu kanıtlamış ve bu alandaki literatüre önemli katkılar sağlamıştır.

Kim & Melhem (2004), dalgacık analizi ile hasar tespiti üzerine yapılan araştırmaları değerlendirmişlerdir. Sürekli ve ayırık dalgacık dönüşümünü içeren dalgacık analizi teorisinin YSİ'ye uygulaması ele alınmıştır. Yazarlar, bir kirişte çatlak tespiti, mekanik dişli ve rulo hasarı gibi daha spesifik uygulamalar üzerinde yöntemin genel bir değerlendirmesini yapmışlardır.

Hu & Afzal (2006), ahşap kirişlerde modal test verileriyle hasar tespiti için yeni bir istatistiksel algoritma önermişlerdir. Algoritmanın doğrulanması için farklı hasar senaryoları altında simülasyonlar yapmışlardır. Çalışmada, mod şekillerine dayalı hasar göstergelerinin hasar şiddeti ve konumlarına duyarlı olduğu ve hasarın tespitinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir.

Yang vd. (2007), frekans kayması ve mod şekli eğriliğini birleştirerek yapısal hasarı tespit etmek için bir yöntem sunmuşlardır. Çalışma, hasar yeri ve şiddetinin belirlenmesinde doğruluğu artırmayı amaçlamaktadır. Önerilen yöntemin etkinliği, sayısal simülasyonlar ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Koo vd. (2008), sıcaklık değişiminden kaynaklanan hasarları tespit için modal esneklik matrisini kullanan yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde temel fikir, bir köprüdeki sıcaklık değişiminin tüm köprü boyunca deplasmanlarda küresel bir artış veya azalmaya neden olacağıdır. Çalışma sonuçları, sıcaklık değişimleri altında nispeten küçük bir hasar durumu için hasarın başarıyla tespit edildiğini göstermiştir.

Radzienski vd. (2011), deneysel olarak elde edilen modal parametrelere dayanan yeni bir hasar tespit yöntemi önermişlerdir. Yöntemin ilk adımı, ölçülen modal parametrelere dayanan en sık kullanılan hasar göstergeleriyle hasar tespiti denemesini içermektedir. Bu

amaçla, test edilen göstergelerin etkinliğini artıran özel bir sinyal işleme tekniği önerilmiştir. Ancak elde edilen sonuçlar tatmin edici olmadığından doğal frekansların ve herhangi bir mod şeklinin (ölçülen veya modellenmiş) değişimini kullanarak yeni hasar göstergeleri tanımlanmışlardır.

Wang (2013), sınırlı modal veriler ile üç boyutlu çerçeve yapılarda hasarı tespiti amacıyla iteratif modal şekil değiştirme enerjisi (IMSE) yöntemini önermişlerdir. Bu yöntem, mekânsal olarak eksik mod şekillerini doğrudan algoritmaya dahil etmek için yeni bir prosedür olup, bu prosedürde hasar yerini ve hasar şiddetini değerlendirmek için bağımlı serbestlik dereceleri iteratif güncelleme prosedürü (SDUP) geliştirilmiştir. Algoritmanın uygulanabilirliğini ve etkinliğini göstermek için sonlu eleman modellerinden elde edilen verilere dayalı olarak üç boyutlu bir deniz platformu üzerinde sayısal çalışmalar yapılmıştır. Sayısal sonuçlar, mevcut yöntemin sınırlı modal veriler ile üç boyutlu çerçeve yapıların hasar değerlendirmesinde etkili olduğunu göstermiştir.

Laier & Villalba (2015), bir kiriş yapısının yapısal bütünlüğünün değerlendirilmesi için adaptif PSO yöntemini önermişlerdir. Ayrıca, doğru hasar tespiti için gerekli optimal modal veri miktarının nasıl belirleneceğine değinmişlerdir. Adaptasyon, PSO parametrelerinin deneme yanılma yoluyla tanımlanmasını önlemek için uygulanmıştır. Sonuçlar, hasar tespit metodolojisinin başarısı için minimum miktarda modal veri gerektiğini ve hasar yerinin ve şiddetinin belirlenmesi yeteneğinin aşırı bilgi kullanılarak iyileştirilemeyeceğini göstermiştir.

Altunışık vd. (2017), çok sayıda çatlağı bulunan içi boş dairesel kesitli bir konsol kirişte modal parametrelerin tanımlaması ve titreşime dayalı hasar tespitine yönelik ayrıntılı bir araştırma sunmuşlardır. Sayısal çözümler için ANSYS yazılımında sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, sonuçlar deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır. Hasarsız ve hasarlı kirişler için hesaplanan ve ölçülen doğal frekanslar ve mod şekilleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Hasar tespitinde farklılıkları en aza indirmek amacıyla Bayes parametre tahminine dayalı modal duyarlılık yöntemi kullanılarak otomatik model güncelleme yapılmıştır.

Sotoudehnia vd. (2019), belirli bir sıvı-yapı sistemi için sıvı-yapı etkileşimini dikkate alarak model güncellemeye dayalı yeni bir hasar tespit formülasyonu sunmuşlardır. Formülasyon, eksik modal verilerin yardımıyla birleşik asimetrik özdeğer problemi temelinde açıkça önerilmiştir. Sunulan yöntemin doğruluğunu ve performansını göstermek için tamamen ve kısmen sıvı dolu iki tank farklı hasar durumları altında analiz edilmiştir.

Önerilen stratejinin hasar yerini ve şiddetini yüksek doğrulukla belirleyebildiği gösterilmiştir.

1.2.2. Optimizasyon ile Hasar Tespitine Yönelik Çalışmalar

Yapısal hasarların tespiti, bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir. Burada, yapısal davranışı tanımlayan bir fonksiyonun belli koşullar altında minimum yapılması amaçlanır. Bu minimumu sağlayan veri seti, yapının o anki gerçek durumu hakkındaki bilgiyi taşımaktadır. Bu bölümde, optimizasyon tekniklerinin hasar tespit uygulamalarındaki kullanımı üzerine yapılmış çalışmalar özetlenmiştir (Chou & Ghaboussi, 2001).

Buezas vd. (1995), Genetik Algoritma (GA) optimizasyonu ile yapı elemanlarında çatlak tespiti problemini ele almışlardır. Çalışmada, açılıp kapanan çatlaklara sahip bir yapı elemanının dinamik davranışı iki ve üç boyutlu modellemeler kullanılarak elde edilmiştir. Analizlerde çatlak, yapı elemanı üzerinde bir çentik şeklinde simüle edilmiştir. Tüm simülasyonlar FlexPDE sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilmiş; çatlak tespiti için GA optimizasyon yöntemi başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Hasarlı yapının bazı noktalarındaki dinamik tepkiler, göz önüne alınan her çatlak derinliği ve konumu için en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanan sonlu eleman modeli çözümü ile karşılaştırılmış ve bu çatlak parametrelerinin tahmini için optimize edilecek bir amaç fonksiyonu ortaya çıkarılmıştır. Hasarlı bir konsol kiriş üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile elde edilen değerler önerilen hasar tespit algoritmasına girdi olarak kullanılmıştır.

Chou & Ghaboussi (2001), statik yer değiştirme ölçümlerindeki değişikliklere dayalı olarak hasarı belirlemek için bir GA optimizasyonu kullanmışlardır. Yazalar, önerdikleri yöntemle hasarın konumunu ve boyutunu tespit etmişlerdir.

Clerc (2006), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tekniğinin mühendislik problemlerindeki uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Yapısal hasar tespiti alanında PSO gibi optimizasyon yöntemlerinin karmaşık yapısal modellerden elde edilen verileri iyi şekilde kullanarak hasarın yerini ve büyüklüğünü belirlemek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Worden & Staszewski (2008), kompozit panellerde darbe etkisiyle meydana gelecek kusurların tespitinde Yapar Sinir Ağları (YSA) ve GA tekniklerinin beraber kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada plak üzerine yerleştirilen piezoelektrik sensörler aracılığıyla elde edilen şekil değiştirmeler kullanılmıştır. Bu sensörlerin yapısal davranışın en iyi temsil

edildiği noktalara yerleştirilebilmesi için GA ile sensör yerleştirme optimizasyonu yapılmıştır. Çalışma sonuçları, az sayıda sensörden elde edilen verilerle hasar yerlerinin başarılı bir şekilde belirlenebildiğini göstermektedir.

Gomes & Silva (2008), yapısal hasar tespiti problemini doğal frekans kaymalarını kullanarak GA optimizasyonu ile ele almışlardır. Çalışmada ilk beş doğal frekans kullanılarak orta dereceli hasar senaryoları başarıyla tespit edilmiştir. GA ile hasar konumları etkili bir şekilde tespit edilebilmekle beraber, hasar şiddetinin bulunmasında bazı sınırlamalar ortaya çıkmıştır. Çalışmada, GA'nın hasar konumu belirlemede YSA'ya kıyasla avantajları vurgulanmış; ancak, her iki yöntemin de parametrik yapısal model değerlendirmesi için yoğun hesaplama gerektirdiğini belirtilmiştir.

Begambre & Laier (2009), yapısal hasar tespiti için hibrit bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Çalışmada, PSO ve Nelder-Mead Simpleks Algoritmasının güçlü yönlerinden yararlanılmıştır. Frekans verileri kullanılarak hasarın konumu ve şiddetin doğru bir şekilde belirlenmiştir.

Moradi vd. (2011), kiriş yapılarda çatlak tespiti için Arı Algoritması (AA) optimizasyon tekniğinin kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada çatlak, bir dönel yay modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonu doğal frekansların değişimini esas almaktadır. Algoritmanın etkinliğini doğrulamak için hasarlı konsol kirişler üzerinde hem sayısal hem de deneysel çalışmalar yapmışlardır. PSO sonuçları ile yapılan karşılaştırmalarda, sayısal modelde PSO'nun daha doğru sonuçlar verdiği, deneysel modelde ise AA'nın daha iyi performans gösterdiği ve pratik uygulamalarda üstün olduğu görülmüştür. AA'nın pratik uygulamalarda basit, doğru ve tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Syedpoor (2012), modal şekil değiştirme enerjisi tabanlı bir hasar indisi tanımlayarak PSO ile yapısal hasarı tespitinde iki aşamalı bir yöntem sunmuştur. İlk aşamada, potansiyel hasar yerlerini belirlemek için modal şekil değiştirme enerjisine dayalı hasar indisi hesaplanmış; ikinci aşamada ise PSO, hasar şiddetini bulmak üzere uygulanmıştır. Yöntemin etkinliği sayısal simülasyonlar üzerinde gösterilmiştir.

Abdulkareem & Hadi (2012), eğri eksenli kirişlerde hasar tespiti için GA optimizasyonundan faydalanmışlardır. Eğri eksenli kiriş için eleman rijitlik ve kütle matrisleri Hamilton prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Hasarın tespiti, bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Modal özellikler dayalı iki amaç fonksiyonun minimizasyonunda ikili ve sürekli GA tekniklerinin kullanımı incelenmiştir. Çalışma

sonuçları, doğal frekans değişimlerine dayalı amaç fonksiyonun hasar konumlarının belirlenmesinde iyi olduğunu, fakat hasar şiddeti tahmininde küçük hatalar barındırdığını göstermiştir. Ayrıca, sürekli GA tekniğinin ikili GA'ya göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Samir vd. (2015), GA ile yapılarda çoklu hasarların tespiti problemini ele almışlardır. Çalışmada, rijitlik azalmasının doğal frekanslar üzerindeki etkisi tartışılarak, doğal frekans değişimine dayalı bir amaç fonksiyon kullanımının başarılı sonuçlar vereceği belirtilmiştir. Araştırma hem doğal frekans hem de mod şekli korelasyonuna dayalı hibrit fonksiyonlar kullanmanın hasar tespitinde doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir. GA'nın ölçüm gürültüsünün hesaba katılması durumunda dahi yüksek düzeyde doğru sonuçlar ürettiği belirtilmiştir.

Nhamage vd. (2016), titreşime dayalı hasar tespiti hedef optimizasyon problemini çözmeyi sağlayan hibrit stokastik/deterministik Pincus-Nelder-Mead optimizasyon algoritmasında (P-NMA) bir iyileştirme önerilmişlerdir. İyileştirilmiş optimizasyon algoritmasının (IP-NMA) doğruluğunu ve verimliliğini test etmek için, sonuçları P-NMA ve metaheuristik uyum arama algoritması (HS) ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, üç algoritmanın sağlamlığını test etmek için bir istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Önerilen iyileştirilmiş optimizasyon algoritması, daha doğru ve daha düşük hesaplama maliyeti gerektirdiği için, P-NMA'nın orijinal versiyonundan ve metaheuristik HS'den daha iyi performans göstermiştir ve hasar tespiti ve değerlendirmesindeki kapasitesini vurgulanmıştır.

Lin vd. (2018), çok hedefli optimizasyon ile yapısal hasar tespiti odaklı çok türde sensör yerleştirme yöntemi geliştirmişlerdir. İlk olarak, çok türde yanıt kovaryans duyarlılığına dayalı hasar tespit yöntemi tanıtılmışlardır. Ardından, optimal sensör yerleştirme için iki amaç fonksiyonu, yanıt kovaryans duyarlılığı ve yanıt bağımsızlığı açısından tanıtılmışlardır. İki amaç fonksiyonu kullanılarak çok amaçlı optimizasyon problemi oluşturulmuş ve en iyi yapısal hasar tespitini sağlamak için optimal çok türde sensör yerleştirmeyi bulmak amacıyla baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA)-II kullanılmıştır.

Sahu & Nayak (2020), hasar yerini bulmak için önerilen bir evrimsel algorithmadan bahsetmişlerdir. Genetik Algoritmanın (GA) çeşitli problemlere uygulanmasında uyarlanabilir olduğu bilinen bir gerçektir, ancak bazı eksiklikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada bu eksiklikler tartışılmış ve GA'nın hasar yerini bulma konusundaki uyarlanabilirliğini geliştirmek için bir yöntem önerilmiştir.

Şimşek vd. (2022), rastgele yerleşimli lamine kompozit kirişlerdeki hasarların tespiti için verimli bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu çalışmada, sınırlı titreşim verilerine dayalı sonlu eleman modeli güncellemesi ve bir metaheuristik optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Bu amaçla, gerçek yapının sayısal simülasyonu için on üç serbestlik derecesine (DOF) sahip bir kiriş sonlu eleman (FE) modeli kullanılmıştır. Sınırlı sayıda sensör verisini simüle etmek için Guyan yöntemi kullanılmıştır. Hasar tespit problemi, kısıtsız bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonu, frekanslardaki kök-mean-square hata ve iki mod şekli arasındaki korelasyon hatası olan Modal Güvence Kriteri (MAC) olarak temsil edilen hatanın ağırlıklı doğrusal kombinasyonu olarak formüle edilmiştir. Optimizasyon için metaheuristik bir araç olarak Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin anizotropik lamine kompozit kirişlerdeki tek ve çoklu hasarları yeterli doğrulukla tespit edebileceğini ve diğer algoritmalara göre doğruluk ve hesaplama maliyeti açısından daha üstün olduğunu göstermiştir.

Zhang vd. (2024), piezoelektrik empedans kullanarak hasar yerini ve şiddetini belirlemek için çok hedefli bir optimizasyon formülasyonu geliştirilmiştir. Optimizasyon hedeflerinden biri, hasar parametre uzayında sonlu eleman model tahmini ile yanıt ölçümünü eşleştirmek iken, diğeri ise hasar yerlerinin sayısı, yani hasar indeksi olarak çözüm vektörünün seyrekliği olduğu belirtilmiştir. Burada, esneklik sağlamak için iyileştirme potansiyeline sahip zeki sürü optimizasyonunu kullanarak yeni bir ters tanımlama çerçevesi geliştirilmiştir. İlk olarak, seyrekliği doğal olarak içeren bir çözüm deposu oluşturan optimizasyonun nüfus üretimine seyrelme uygulama sürecini yerleştirilmiş, daha sonra, ajanların çözümleri çeşitlendirmek amacıyla yerel stratejileri uyarlanabilir şekilde seçebilmeleri için pekiştirmeli öğrenme uygulanmıştır. Deneysel veriler kullanarak yapılan vaka analizleri, bu seyrekliği dikkate alan çok hedefli parçacık sürü optimizasyon tekniğinin, genellikle gerçek hasar senaryosunu kapsayan küçük bir çözüm setine yol açabileceğini göstermiştir.

1.2.3. Yapay Sinir Ağları ile Hasar Tespitine Yönelik Çalışmalar

Yapay Sinir Ağları (YSA), mühendislikte karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan güçlü makine öğrenme araçlarıdır. YSA modelleri, veriye dayalı yaklaşımlar kullanılarak yapısal davranışın tahmini ve yapılarda hasar tespiti için eğitilebilirler. İyi eğitilmiş bir YSA kullanımı, genellikle yüksek düzeyde doğruluk ve esneklik sunmaktadır.

Bu bölümde, YSA'ların yapı mühendisliğindeki ve özellikle hasar tespiti uygulamalarındaki kullanımı üzerine çalışmalar sunulmuştur (Bakhary vd., 2010).

Şahin & Sheno (2003), kiriş yapılarda hasar yerini ve şiddetini tahmin için global (doğal frekanslardaki değişiklikler) ve lokal (eğrilik mod şekilleri) titreşim tabanlı analiz verilerini girdi olarak kullanan bir hasar tespit algoritması sunmuşlardır. Sonlu eleman analizi, sağlam ve hasarlı kirişlerin dinamik özelliklerini elde etmek için kullanılmıştır. Çeşitli YSA modelleri duyarlılık analizleri kullanılarak eğitilmiş ve çelik kirişlerde yüzeye bağlı şekil değiştirme ölçerler ve ivmeölçerler kullanılarak elde edilen deneysel verilerle doğrulama yapılmıştır.

Bakhary (2008), sonlu eleman modeli ve ölçülen verilerdeki belirsizlikleri dikkate alarak olasılıksal bir YSA modeli önermiştir. Rossenblueth nokta tahmin yöntemi (Rosenblueth, 1981), önerilen YSA modelinin eğitim ve testinde hesaplama hacmini azaltmak için kullanılmış; modelin doğruluğu Monte Carlo simülasyonları ile doğrulanmıştır. Olasılıksal YSA modeli ile, göz önüne alınan sistemde her bir elemandaki hasar olasılığını hesaplamak için kullanılacak rijitlik parametrelerinin istatistik değerleri tahmin edilmiştir. Bu yöntemin güvenilirliği ve etkinliği hem sayısal hem de deneysel örnekler ile gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntemin farklı hasar ve belirsizlik seviyelerine olan duyarlılığını araştırmak için parametrik çalışma yapılmıştır.

Bakhary vd. (2010), kompleks inşaat mühendisliği yapılarında hasar tespiti için olasılık yöntemini içeren çok aşamalı bir YSA önermişlerdir. Bu yöntemde, yapı birkaç alt yapıya bölünmüş ve her alt yapı bağımsız olarak değerlendirilmiştir. Birbirini izleyen her aşamada, yalnızca hasarlı alt yapılar analiz edilmiş ve nihayetinde küçük yapısal hasarların yeri ve şiddeti tespit edilebilmiştir. Önerilen yaklaşım, hesaplama süresini ve hesaplama için gerekli bilgisayar belleğini büyük ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, frekans ve mod şekillerindeki belirsizlikleri işleme dahil edebilmek için olasılıksal bir yöntem kullanılmıştır.

Sumangala & Jeyasehar (2011), öngermeli betonarme kirişler için YSA ile hasar değerlendirme prosedürü geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak formüle edilmiştir. Hasarsız ve hasarlı kirişlerin davranışını incelemek için hem statik hem de dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Statik ve dinamik testlerden elde edilen veriler ağı eğitmek için girdi olarak kullanılmıştır.

Bilgehan vd. (2012), çatlaklı kolonların burkulma yükünü tahmin etmek için YSA kullanımını araştırmışlardır. Araştırmada, geri yayılım algoritması ile çok katmanlı bir sinir

ağı kullanılmıştır. YSA sonuçları, çeşitli mesnet koşulları için transfer matrisi yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bulgular, YSA'nın analitik yöntem ile elde edilen kritik burkulma yükü değerlerine yakın sonuçlar verdiğini ve hesaplama süresini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu yaklaşımın kenar çatlaklı kolonlarda elastik burkulma yüklerinin tahmini için etkili bir araç olduğunu kanıtlamışlardır.

Hakim & Razak (2013), çelik köprü kirişlerinde hasar tespiti için YSA ve sonlu eleman modelleri kullanmışlardır. Yapısal hasarların frekanslar üzerindeki güçlü etkisi nedeniyle çalışmada ağ eğitiminde doğal frekanslar girdi parametreleri olarak kullanılmıştır.

Lee vd. (2016), YSİ verilerine dayalı olarak sonlu eleman model güncellemesi ile köprülerin yorulma ömrünü tahmin için olasılıksal bir yaklaşım sunmuşlardır. Yöntem, bir köprünün modal özelliklerini belirlemeyi, bu özellikleri kullanarak sonlu eleman modelinde yapısal parametreleri güncellemeyi ve köprünün muhtemel yorulma ömrünü tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Yazarlar, önerilen yaklaşımın malzeme özellikleri, araç yükleri ve çevresel koşullardaki belirsizlikleri etkili bir şekilde hesaba katabildiğini ve köprünün yorulma ömrünün daha doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermişlerdir.

Khouri vd. (2017), demiryolu köprülerinde hasar tespiti için makine öğrenmesini kullanan bir yöntem sunmuşlardır. Yaklaşım, demiryolu trafiği altında hava sıcaklığı ve ivme verilerini toplamayı, bu verileri ön işlemden geçirmeyi, referans verilerle YSA ve Gauss süreçlerini eğitmeyi ve tahmin edilen ve ölçülen tepkileri karşılaştırarak köprünün sağlığını sınıflandırmayı içermektedir. Yöntemin etkinliği, İtalya'daki tarihi San Michele Köprüsü üzerinde gösterilmiş olup, önceki çalışmalarla iyi bir uyum sergilemiş ve pratik uygulamalar için potansiyelini doğrulamıştır.

Weinstein vd. (2018), köprülerde yapısal hasar tespitinde operasyonel modal analiz verilerini kullanarak YSA ağını eğitmişlerdir. Eğitim sürecinde köprünün farklı konumlarında ölçülen gerilme ve deformasyon verileri kullanılmıştır. Çalışma, YSA'nın denetimsiz öğrenme yaklaşımı ile eğitilmiş olmasına rağmen hasar tespitinde yüksek doğruluk ve etkinlik sağladığını göstermiştir. Bu yöntem, köprülerde YSİ sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Malekjafarian vd. (2019), araç geçişi sırasında köprü üzerinde ölçülen tepkilerin analizine dayanan yenilikçi bir makine öğrenmesi yaklaşımı sunmuşlardır. İlk aşamada, sağlıklı köprüye ait davranış verileri kullanılarak YSA ağı eğitilmiştir. Önerilen yöntemde, aracın ivmesi veya ivmenin Ayrık Fourier Dönüşüm (DFT) spektrumu girdi olarak kullanılmış, çoklu geçişlerde aracın davranışı tahmin edilmiştir. İkinci aşamada ise tahmin

hatalarının Gauss dağılımını kullanan bir hasar indisi tanımlanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin köprülerdeki sığ hasarları bile başarılı bir şekilde tespit edebildiğini göstermiştir. Çalışma, araç-köprü etkileşimi yoluyla köprü hasarlarının tespitinde makine öğrenmesi tekniklerinin etkinliğini ortaya koymaktadır.

Ruffels vd. (2020), çelik kemer bir köprünün laboratuvar modelini kullanarak modelden bağımsız bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritmanın etkinliği çeşitli hasar durumları için incelenmiştir. Araç geçişinin simülasyonu, köprü üzerinde bir yuvarlanan kütle ile yapılmış ve ivmeölçer ile yapının tepkisi kaydedilmiştir. YSA ağı hasarsız yapıdan toplanan verilere dayanarak köprü ivmelerini tahmin için eğitilmiştir. Hasara duyarlı özellikler, ölçülen veriler ile YSA tahminleri arasındaki kök ortalama kare hataları olarak tanımlanmış, yeni verilerin karşılaştırılabileceği bir referans sağlıklı durum oluşturulmuştur. Referans durumundan olası sapmaların hasarın bir göstergesi olduğu kabul edilmiştir.

Teng vd. (2022), modal verileri kullanarak köprü hasarını tespit etmek için konvolüsyonel sinir ağlarının kullanımını araştırmışlardır. Yaklaşım, doğal frekanslar ve mod şekilleri gibi modal verilerden özellikler çıkarmak için konvolüsyonel sinir ağlarından yararlanmaktadır. Yöntemin etkinliği, çeşitli sayısal simülasyonlar ve deneysel çalışmalarla gösterilmiş olup, köprü yapılarında doğru ve güvenilir hasar tespiti için yöntemin potansiyeli vurgulanmıştır.

Teng vd. (2022), konvolüsyonel sinir ağlarının (Convolutional Neural Network, CNN) köprülerde hasar tespiti için uygulanabilirliği ve tutarlılığı kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Bunun için öncelikle çok sayıda rastgele köprü modeli üretilmiş, üretilen bu popülasyonun hasar özellikleri CNN tarafından çıkarılmıştır. Ardından, rastgele oluşturulan yeni modellerin hasar tespitinde CNN uygulanmıştır. Sonuçlar, en iyi tespit sonuçlarının (%99,4 doğruluk) ivme sinyallerinin CNN girdisi olarak kullanılmasıyla elde edilebileceğini göstermektedir.

1.3. Tezin Kapsamı, Amaç ve Hedefleri

Bu tez çalışmasının amacı, YSA ve optimizasyon tekniklerinin titreşim verilerine dayalı hasar tespiti uygulamalarındaki etkinliğini ve potansiyelini kiriş yapıları özelinde değerlendirmektir. Kirişte hasar, ilgili elemanlarda rijitliğin (elastisite modülünün) azaltılması ile tanımlanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde hasar tespitinde YSA'nın

etkinliğini değerlendirmek üzere ANSYS Workbench yardımıyla bir konsol kiriş modeli oluşturulmuştur. Bu modele yine Ansys Workbench'in Design Experiments aracı yardımıyla rastgele hasarlar eklenmesi sağlanmış ve böylece 1000 adet farklı hasar durumu simüle edilmiştir. Elde edilen bu veri, YSA ağıının eğitiminde kullanılmıştır. Daha sonra eğitilen ağı kullanılarak 10 adet farklı hasar senaryosu üzerinde performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise GA optimizasyonu ile hasar tespiti uygulaması yapılmıştır. Bunun için yapının iki durumuna ait (sayısal model ve gerçek model) frekans ve mod şekli değişimlerini göz önüne alan bir amaç fonksiyonunu minimum yapan rijitlik parametresi seti araştırılmıştır. Gerçekte yapı üzerinden tüm noktalardan ölçüm alınması mümkün olmadığından, eldeki sınırlı veriyi sonlu eleman modelinden elde edilenle karşılaştırabilmek amacıyla sayısal modelde Guyan yöntemiyle model indirgeme işlemi yapılmıştır. YSA ve GA'nın performansı değerlendirilmiş ve ayrıca birbirleriyle karşılaştırma yapılmıştır.

Tez çalışmasının hedefleri şunlardır:

- ANSYS Workbench kullanarak konsol kiriş modelleri oluşturmak ve farklı hasar durumlarının simülasyonlarını gerçekleştirmek
- Simülasyonlardan elde edilen verileri analiz ederek YSA modelini oluşturmak ve eğitmek
- Model indirgeme yönteminin gerekliliğini ve önemini vurgulamak
- Oluşturulan YSA ve GA modellerinin hasar tespiti performanslarını değerlendirmek, yapay zekâ tekniklerinin yapısal mühendislik alanındaki potansiyelini vurgulamak

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçların endüstriyel uygulamalarda daha güvenilir yapılar için küçük bir katkı sağlayacağı ve yapı mühendisliği alanındaki bu türden araştırmalara yön verebileceği değerlendirilmektedir.

1.4. Temel Denklemler ve Teorik Altyapı

1.4.1. Yapay Sinir Ağları (YSA)

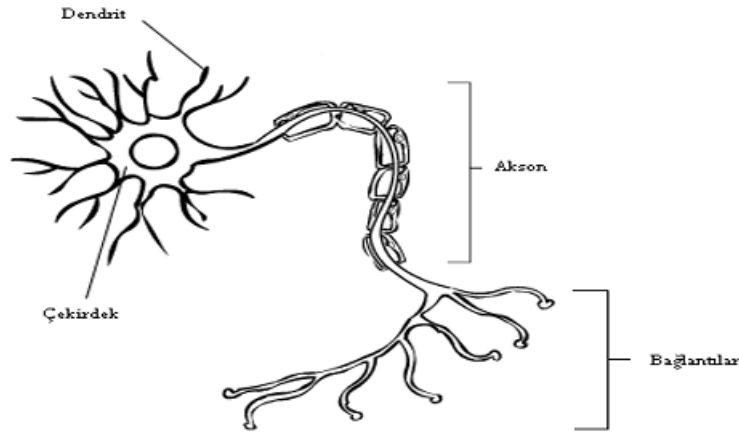
Yapay Sinir Ağları (YSA), biyolojik sinir ağlarını taklit eden sayısal modellerdir. YSA'nın işleyişini anlamak için öncelikle biyolojik sinir sisteminin nasıl çalıştığını bilmek

gerekir. Biyolojik sinir sistemlerinin temel yapı taşları olan nöronlar, YSA modellerinin de temelini oluşturur.

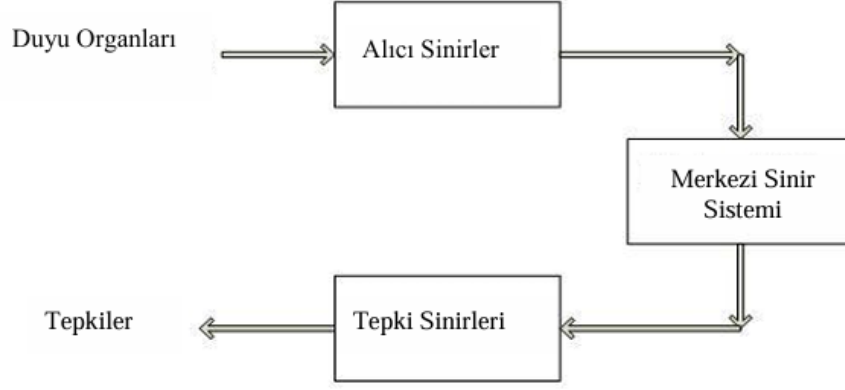
Biyolojik sinir sisteminin en temel yapı taşı olan nöronlar dört ana bölümden oluşur (Şekil 1): dendritler, akson, çekirdek ve sinaptik bağlantılar. Dendritler, nöronun sinyal alıcı kısmı olarak ağaç köküne benzer bir yapıdadır ve diğer nöronlardan veya duyu organlarından gelen sinyalleri nöronun çekirdeğine taşırlar. Çekirdek, aldığı bu sinyalleri işler ve aksone iletir. Akson, işlenen sinyalleri nöronun diğer ucundaki sinaptik bağlantılara aktarır. Bu bağlantılar, sinyalleri diğer nöronlara ileterek sinirsel iletişimin devamlılığını sağlarlar.

İnsan beyinde bulunan yaklaşık 10 milyar sinir hücresinin (nöron) 60 trilyon kadar bağlantı kurduğu düşünülmektedir. Bu nöronlar, duyu organlarından aldıkları bilgileri işlerler. Alıcı sinirler bu sinyalleri bir sonraki nöronun merkezi sinir sistemine kadar taşırlar. Merkezi sinir sistemi, bu sinyalleri değerlendirip analiz ettikten sonra tepki üretir ve bu tepkiler tepki sinirleri aracılığıyla ilgili organlara iletilir. Böylece, sinir sistemi tarafından duyu organlarından alınan bilgilere karşı tepki organlarına uygun sinyaller iletilmiş olur. Şekil 2, bir sinir sisteminin şemasını göstermektedir.

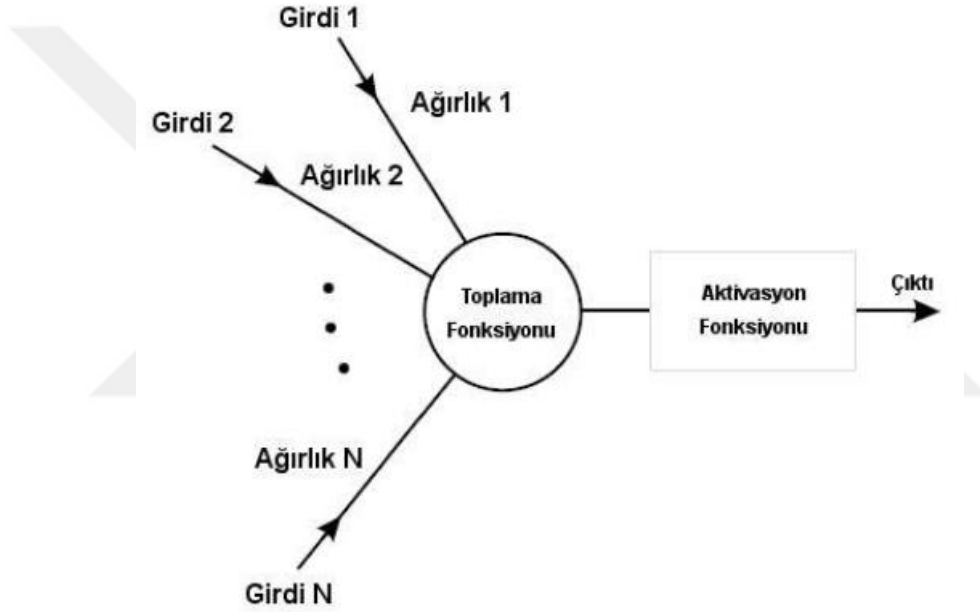
Tıpkı biyolojik sinir hücrelerinin işleyişinde olduğu gibi yapay sinir hücreleri de girdileri alır ve bunları ağırlıklarla çarparak toplar. Daha sonra birleştirme ve aktivasyon fonksiyonları ile gelen bilgi işlenir ve çıktı üretilir. Bir yapay sinir hücresinin yapısı Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 1. Biyolojik sinir hücresinin yapısı (ForumGercek, 2014)



Şekil 2. Sinir sistemi (ForumGercek, 2014)



Şekil 3. Yapay sinir hücresinin yapısı (Öztemel, 2006)

Girdiler, yapay sinir hücrelerine ulaşan verilerdir. Bu girdiler başka bir hücreden ya da doğrudan dış dünyadan sağlanabilir. Biyolojik nöronlarda olduğu gibi, bu veriler toplanıp yapay sinir hücresinin çekirdeğine yönlendirilir. Yapay sinir hücresine ulaşan bilgiler, çekirdeğe iletilecekleri sırada belirli ağırlıklar ile çarpılır. Bu işlem her bir girdinin üretilecek çıktı üzerindeki etkisini düzenler. Ağırlıklar pozitif, negatif veya sıfır değer alabilir. Ağırlığı sıfır olan bir girdi, çıktı üzerinde herhangi bir etki yaratmaz (Öztemel, 2006).

Birleştirme (veya toplama) fonksiyonu, yapay sinir hücresine ulaşan ve ağırlıklarla çarpılan girdileri toplayarak, hücrenin net girdisini hesaplar. Bu fonksiyon, gelen verilerin ağırlıklı toplamının aktivasyon fonksiyonuna iletilmesini sağlar. Birleştirme fonksiyonunda

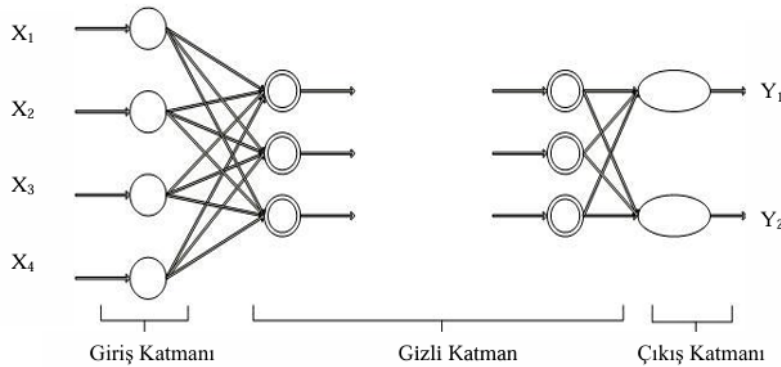
$$NET = \sum_{i=1}^N X_i \cdot W_i \quad (1)$$

ifadesine göre toplanan ağırlıklı NET, hücrenin çıktısını oluşturmak üzere aktivasyon fonksiyonuna iletilir. Aktivasyon fonksiyonları doğaları gereği genellikle doğrusal olmayan yapıdadır. Aktivasyon fonksiyonu seçilirken geri yayılım sırasında kolayca türev alınabilmesi önem taşır. Bu, özellikle geri beslemeli ağlarda eğitim sürecini optimize eder ve işlem hızını artırır.

Yapay sinir hücrelerinin bir araya gelmesiyle oluşan yapı, Yapay Sinir Ağı (YSA) olarak adlandırılır. Günümüzde çok çeşitli YSA modelleri geliştirilmiştir. YSA'lar içinde ilk geliştirilen modeller, doğrusal problemleri çözebilme yeteneğiyle ön plana çıkmışlardır. Ancak bu modeller, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmede belirli zorluklarla karşılaşmışlardır. Bu sorunu aşmak amacıyla çok katmanlı algılayıcılar geliştirilmiştir.

Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları (ÇKYSA), birbiriyle bağlantılı birden fazla yapay sinir hücresi katmanından oluşur. Bu yapı genellikle üç ana katmandan meydana gelir: girdi katmanı, ara (gizli) katman ve çıktı katmanı. Her katman, önceki katmandan aldığı verileri işler ve sonraki katmana ileterek bilginin derinlemesine işlenmesini sağlar. Şekil 4, bir ÇKYSA modelinin ağ yapısını göstermektedir.

ÇKYSA'da ağın girdi katmanı dış dünyadan alınan bilgileri içerir. Bu katmandaki değişkenler X ile ifade edilir ve ağda dışarıdan alınacak girdi sayısı kadar nöron bulunması gerekir. Bu katmanda veriler işlenmez, sadece alınan bilgiler doğrudan bir sonraki katmana aktarılır. Girdi katmanındaki her nöron bir sonraki katmanda bulunan tüm elemanlara bağlıdır. Girdi katmanından sonra gelen ara katman veya gizli katman olarak adlandırılan bölümde veriler işlenir ve bir sonraki katmana gönderilir. Bu bölümde birden fazla katman bulunabilir. Bu katmanlardaki her bir eleman bir sonraki katmandaki elemanlara bağlıdır.



Şekil 4. ÇKYSA yapısı (ForumGercek, 2014)

Çıktı katmanı ise bir önceki katmandan gelen işlenmiş verileri alır ve ağ tarafından üretilen sonuçları (Y) dış dünyaya iletir. Bu katmanda birden fazla eleman bulunabilir ve her eleman kendisinden önceki tüm elemanlara bağlıdır (Kankal, 2010).

ÇKYSA'lar öğretmenli öğrenme modeli altında çalışır. Bu modelde, eğitim sırasında hem girdiler hem de bu girdilere karşılık üretilmesi beklenen çıktılar ağa tanıtılır. Ağın öğrenmesi en küçük kareler yöntemine dayalı Delta Öğrenme Kuralının genelleştirilmiş hali olan Genelleştirilmiş Delta Kuralı (GDK) ile sağlanır. Eğitim sürecinde kullanılacak her örnek için hem girdilerin hem de beklenen çıktılarının belirlendiği bir eğitim seti gereklidir. GDK iki aşamadan oluşur: İlk aşama, ileri doğru hesaplama olup ağın çıktısını hesaplar. İkinci aşama ise geriye doğru hesaplama olup ağırlıkları ayarlar (Öztemel, 2006).

ÇKYSA'nın çalışma süreci aşağıdaki adımları kapsamaktadır:

1. Örneklerin toplanması: Ağın çözmesi gereken olaylar için geçmişte gerçekleşmiş örnekler toplanır. Bu örnekler, ağın eğitimi (eğitim seti) ve test edilmesi (deneme seti) için kullanılır. Eğitim sırasında deneme seti ağa gösterilmez ve eğitim setindeki örnekler tek tek ağa sunularak öğrenme sağlanır. Öğrenme sonrası ağın performansı, deneme setindeki örneklerle test edilir; ağın daha önce görmediği verilere karşı başarısı, öğrenme yeteneğinin bir göstergesi olarak değerlendirilir.
2. Ağın yapısının belirlenmesi: Çözülecek olaya göre ağın yapısının tasarlanması bu adımda gerçekleşir. Kaç adet girdi birimi, ara katman, işlem elemanı ve çıktı elemanı olacağı belirlenir.
3. Öğrenme parametrelerinin ayarlanması: Ağın öğrenme hızı, momentum katsayısı ve diğer işlem fonksiyonları bu aşamada ayarlanır.
4. Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması: İşlem elemanlarını birbirine bağlayan ağırlıklar ve eşik değerler başlangıçta genellikle rastgele değerlerle atanır. Ağ, öğrenme sürecinde bu değerleri kendiliğinden ayarlar.
5. Öğrenme takımından örneklerin seçilmesi ve sunulması: Öğrenme sürecini başlatmak ve ağın ağırlıklarını öğrenme kuralına uygun şekilde ayarlamak için örnekler belirli bir düzende ağa sunulur.
6. İleri hesaplamaların yapılması: Sunulan girdiler için beklenen çıktılar hesaplanır.
7. Gerçekleşen çıktının beklenen çıktı ile karşılaştırılması: Ağ tarafından üretilen çıktılar, beklenen çıktılarla karşılaştırılarak hata değerleri hesaplanır.

8. Ağırlıkların değiştirilmesi: Geriye doğru hesaplama yöntemi ile hataların azaltılması için ağırlıklar ayarlanır.

Yukarıda sıralanan adımlar, ağıın öğrenmesi tamamlanana kadar devam eder; yani, gerçekleşen çıktılar ile beklenen çıktılar arasındaki hatalar kabul edilebilir bir seviyeye (durdurma kriteri) düşene kadar işlem sürer (Öztemel, 2006).

YSA mimarilerinin belirlenmesi ve bağlantı ağırlıklarının ayarlanması süreçlerinde örneklerden öğrenme metodolojisi olarak bilinen tümevarımsal öğrenme yöntemleri kullanılır. Bu metodolojide, öğrenilecek olan dizgeye ilgili kavramlarla ilgili örnekler sunulur ve dizgenin bu örneklerden genellemeler yaparak istenilen kavramı modellemesi beklenir. Bu tez çalışması kapsamında, Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları (ÇKYSA) modelleri için Levenberg-Marquardt (LM) öğrenme algoritması kullanılmıştır.

Levenberg-Marquardt (LM) algoritması (Boos vd., 2024), temelini maksimum komşuluk ilkesinden alır ve genel olarak yavaş yakınsama problemlerinden etkilenmez. Bu algoritma, özellikle ileri beslemeli yapay sinir ağlarında kullanıldığında en hızlı öğrenme metotlarından biri olarak bilinir. Bu metot, $E(w)$ amaç fonksiyonunu minimize etmek için kullanılır. $E(w)$, m adet hata teriminin karelerinin toplamı olup aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$E(w) = \sum_{i=1}^m e_i^2(w) = \| f(w)^2 \| \quad (2)$$

Bu eşitlikte $e_i^2(w)$ hata terimleri olup

$$e_i^2(w) \equiv (y_i - y_{d_i})^2 \quad (3)$$

şeklinde tanımlıdır. LM algoritması, ağıın eğitimi sırasında bu hata terimlerini kullanarak ağıın hızlı ve etkili bir şekilde öğrenmesini sağlar. Böylece ağıın öğrenme süreci sırasında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelinir.

LM algoritması, belirli bir noktada parametre vektörü w ve Jakobiyen J 'nin bilindiği varsayımı üzerine çalışır. Algoritmanın temel amacı, $E(w)$ fonksiyonunun minimum olduğu w değerini tespit etmektir. Bu süreçte, w_k olarak ifade edilen mevcut vektörden yola çıkarak w_{k+1} adı verilen yeni vektör aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$w_{k+1} = w_k + \delta w_k \quad (4)$$

Burada w_k şöyle hesaplanır:

$$(J_k^T J_k + \lambda I) \delta w_k = -J_k^T f(w_k) \quad (5)$$

Bu ifadede, J_k , f hata fonksiyonunun w_k 'da değerlendirilmiş Jakobiyesi, λ , Marquardt parametresi ve I , birim veya tanımlama matrisidir.

LM algoritmasının işlem adımları aşağıdaki gibidir:

1. $E(w_k)$ 'yı hesapla
2. Küçük bir λ değeri (mesela $\lambda = 0,01$) ile başla
3. (5) eşitliğinden δw_k değerini bul ve $E(w_k + \delta w_k)$ değerini hesapla
4. Şayet $E(w_k + \delta w_k) \geq E(w_k)$ ise λ 'yı 10 kat artır ve 3. adıma git
5. Şayet $E(w_k + \delta w_k) < E(w_k)$ ise λ 'yı 10 kat azalt; w_k değerini $(w_k + \delta w_k)$ olarak güncelle ve 3. adıma git

Hedef çıktı değerlerini hesaplamak amacıyla çok katmanlı nöronların LM algoritması kullanılarak eğitimi, ağırlık dizisine başlangıç değeri (w_0) atanarak başlatılır ve hataların karelerinin toplamının (e_i^2) hesaplanması ile sürdürülür. Her bir e_i^2 terimi, hedef çıktı y ile gerçek çıktı y_d arasındaki farkların karelerini temsil eder. Tüm veri seti boyunca e_i^2 hata terimlerinin elde edilmesinden sonra ağırlıklar birinci adımdan beşinci adıma kadar olan işlemler ile ayarlanır (Mete, 2008).

1.4.2. Genetik Algoritma (GA)

Genetik Algoritma (GA), John Holland tarafından 1970'lerde geliştirilen, evrimsel hesaplama alanına ait bir optimizasyon tekniğidir. Bu algoritmalar, biyolojik evrimin temel prensiplerinden esinlenerek, karmaşık problemlere etkin çözümler bulmayı amaçlar. Doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi biyolojik süreçlerin simülasyonu ile çalışan GA, başlangıçta rastgele oluşturulan bir çözüm popülasyonunu, zamanla daha iyi çözümler bulacak şekilde evrimleştirir. Bu yöntem, özellikle büyük çözüm uzaylarına sahip ve analitik yöntemlerle çözülmesi zor problemlerde güçlü bir araç olarak kabul edilmektedir (Sahu & Nayak, 2020).

GA'nın temel yapısı, genetik kod ve biyolojik süreçlere dayanan birkaç ana bileşenden oluşur. İlk olarak, bir popülasyon oluşturulur; bu popülasyon, çözüm adaylarını temsil eden bireylerden meydana gelir. Her birey, genellikle bit dizisi olarak ifade edilen bir kromozom ile temsil edilir. Bu kromozomlar, problemi tanımlayan değişkenlerin değerlerini içerir. Algoritmanın çalışması sırasında, popülasyon üyeleri bir uygunluk veya amaç (fitness) fonksiyonu ile değerlendirilir. Amaç fonksiyonu, her bireyin ne kadar iyi bir çözüm sunduğunu belirleyen bir ölçüttür. Daha yüksek uygunluk değerine sahip bireyler, sonraki nesillerde daha fazla temsil edilme şansına sahiptir.

GA'da, popülasyonun evrimini sağlayan üç ana operatör vardır: seçim, çaprazlama ve mutasyon. Seçim işlemi, yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin, bir sonraki nesilde yer alma olasılığını artırır. Çaprazlama (crossover), iki bireyin genetik materyalinin birleştirilmesi yoluyla yeni bireyler oluşturur. Bu süreç, çeşitliliği artırarak daha iyi çözümler bulunmasını sağlar. Son olarak, mutasyon, kromozomlardaki genlerin rastgele olarak değiştirilmesini ifade eder. Mutasyon, çözüm uzayında yeni noktalar keşfetmeyi mümkün kılarak yerel maksimumlardan kaçınılmasına yardımcı olur (Abdulkareem & Hadi, 2012).

GA, mühendislik, yapay zekâ, ekonomi ve biyoinformatik gibi birçok alanda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Mühendislikte, optimizasyon problemlerinin çözümünde, yapay zekâ alanında öğrenme algoritmalarının geliştirilmesinde ve ekonomi alanında piyasa analizlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, biyoinformatikte, gen dizilimlerinin analizi ve protein yapı tahmini gibi biyolojik verilerin işlenmesi için de genetik algoritmalar tercih edilmektedir. Bu geniş uygulama alanı, GA'nın esnek ve güçlü bir optimizasyon aracı olduğunu göstermektedir.

GA optimizasyonunda aşağıdaki süreç işletilir:

1. Başlangıç:
 - a. Popülasyon Oluşturma: Bir P popülasyonu rastgele bireylerden oluşturulur.
 - b. Kromozomlar: Her birey, problemi tanımlayan parametrelerin bir dizisi olarak temsil edilir.
2. Değerlendirme:
 - c. Uygunluk Fonksiyonu: Her bireyin çözüm kalitesini ölçen bir uygunluk fonksiyonu $f(x)$ kullanılarak, bireyler değerlendirilir.
3. Seçim:
 - d. Seçim Operatörü: Uygunluk fonksiyonuna göre, yüksek uygunluk değerine sahip bireyler daha fazla üreme şansına sahiptir.

4. Genetik Operatörler:

- e. Çaprazlama (Crossover): İki ebeveyn bireyin kromozomlarından genetik materyal birleştirilerek yeni bireyler (çocuklar) oluşturulur.
- f. Mutasyon: Belirli bir olasılıkla, bireylerin kromozomlarında rastgele gen değişiklikleri yapılır.

5. Yeni Nesil:

- g. Popülasyon Güncelleme: Çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda yeni bir nesil oluşturulur. Bu süreç, çözüm kalitesinde iyileşme sağlanana kadar tekrarlanır.

6. Durdurma Kriteri:

- h. Durdurma Kriteri: Algoritma, önceden belirlenmiş bir kriter (örneğin, belirli bir nesil sayısı veya uygunluk değeri) karşılandığında sonlandırılır.

Bu süreç, optimizasyon problemlerine yönelik olarak etkili çözümler bulmak için kullanılır ve GA'nın esnek yapısı, çeşitli problemlere uyarlanabilirliğini sağlar (Samir vd., 2015).

1.4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), mühendislik ve fizik alanlarında karmaşık problemlerin sayısal çözümü için yaygın olarak kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip yapıların veya sistemlerin davranışını modellemek için kullanılan bir yaklaşımı temsil eder. SEY, sürekli bir yapı veya ortamı, daha küçük ve basit parçalara, yani sonlu elemanlara bölerek çalışır. Bu elemanların her biri, basit şekillerde (üçgen, dörtgen, tetrahedron gibi) temsil edilir (Şekil 5) ve bu şekilde problem, çözülmesi daha kolay bir hale getirilir.

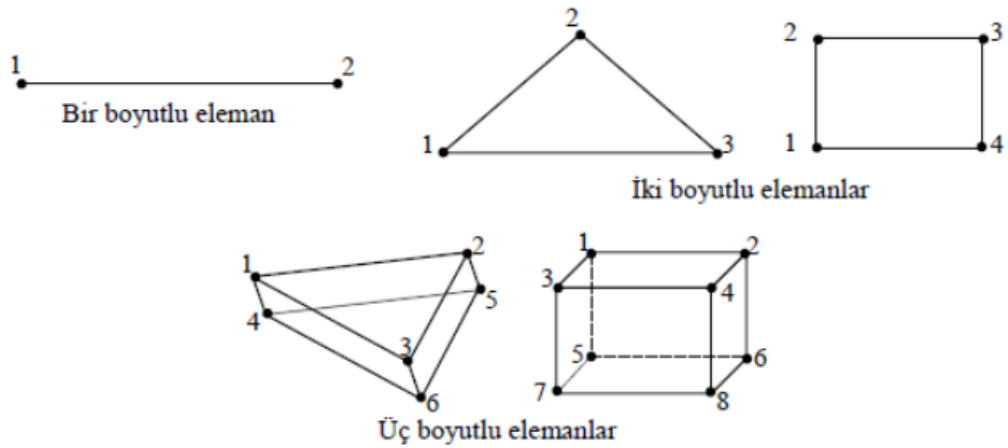
Sonlu elemanlar yönteminin temel prensibi, çözüm alanını küçük ve yönetilebilir alt alanlara (elemanlar) bölmek ve her elemanda temel denklemleri (örneğin, denge denklemleri, termal denklemler vb.) uygulamaktır. Bu denklemler, elemanların sınırlarında uygun sınır koşulları ile birleştirilir. SEY, sürekli bir fonksiyonu, elemanlar içinde belirli şekil fonksiyonları ile yaklaşık olarak temsil eder. Bu şekil fonksiyonları, elemanlar arasındaki sürekli geçişi sağlamak için dikkatlice seçilir. Problemin global çözümü, bu yerel çözümlerin birleştirilmesiyle elde edilir.

Sonlu elemanlar yöntemi, özellikle mühendislik ve fiziksel bilimlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Mühendislikte, yapısal analiz, termal analiz, akışkanlar dinamiği,

elektromanyetik alan analizi gibi çeşitli problemlerin çözümünde kullanılır. Örneğin, köprüler, binalar, otomotiv parçaları veya uçak kanatları gibi karmaşık yapıların gerilme ve deformasyon analizlerinde SEY sıklıkla tercih edilir. Ayrıca, biyomedikal mühendislikte, kemik ve doku modelleme veya implant tasarımı gibi biyomekanik problemler için de bu yöntem uygulanır.

SEY'in en büyük avantajı, karmaşık geometrilere ve yükleme koşullarına sahip problemlerin çözümünde sağladığı esneklik ve hassasiyettir. Bununla birlikte, büyük ölçekli sistemler için gerekli olan hesaplama gücü ve veri depolama kapasitesi, yöntemin kullanımını sınırlandırabilir. Ayrıca, doğru sonuçlar elde etmek için dikkatli bir eleman ağ yapısı ve uygun şekil fonksiyonlarının seçimi gereklidir. Bu nedenle, SEY uygulamaları, iyi bir mühendislik sezgisi ve deneyim gerektirir.

Sonlu eleman modeli oluşturma sürecinde, malzeme özellikleri ve sınır şartlarının yapıyı doğru bir şekilde temsil edecek şekilde tanımlanması gereklidir. Yapıların inşası sırasında kullanılan malzemelerin dayanımlarının değişebileceği göz önünde bulundurularak, gerek duyulduğu durumlarda her bir inşa aşaması için farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir. Aynı şekilde, yapının zeminle etkileşimi, mesnetlenme şartları ve sistem içerisindeki bağlılık özellikleri dikkate alınmalı ve model, gerçek şartları olabildiğince yansıtacak şekilde oluşturulmalıdır (Karaca, 2016).



Şekil 5. Sonlu eleman tipleri (Karaca, 2016)

1.4.4. Guyan Yöntemi

Model indirgeme, karmaşık sistemlerin daha basit ve yönetilebilir bir biçimde temsil edilmesi için kullanılan bir teknikler kümesidir. Bu yöntem, büyük ölçekli matematiksel modellerin boyutunu azaltarak hesaplama yükünü ve analiz süresini düşürmeyi amaçlar. Özellikle mühendislik, fizik ve biyoloji gibi alanlarda karmaşık dinamik sistemlerin simülasyonları sırasında ortaya çıkan yüksek boyutlu modellerin daha az sayıda denklemlerle ifade edilmesi, model indirgeme teknikleri ile mümkün hale gelir. Böylece, sistemlerin analizi ve kontrolü daha verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Model indirgeme, sistemin temel özelliklerini ve davranışlarını koruyarak, gereksiz ayrıntılardan arındırmayı hedefler. Bu süreç, genellikle sistemin girdi-çıkış ilişkisini veya dinamik tepkisini mümkün olduğunca doğru bir şekilde koruyacak şekilde gerçekleştirilir. Temel olarak, model indirgeme yöntemleri, orijinal modeldeki yüksek boyutlu durum uzayını daha düşük boyutlu bir alt uzaya yansıtmayı içerir.

Yapıların sonlu eleman modelleri çok sayıda serbestlik derecesine ait bilgiyi içermektedir. Hasar tespiti uygulamasında ise yapı üzerinden belli noktalardan alınan ölçüm verileri kullanılır. Bu noktalardaki sınırlı sayıda serbestlik derecesi (koordinat) ait bilginin sonlu eleman modeliyle karşılaştırılması mümkün değildir. Bunu yapabilmek için model indirgeme yöntemlerinden yararlanılır. Literatürde önerilen model indirgeme yöntemleri arasında en basiti ve en çok bilineni Guyan yöntemi veya statik indirgeme yöntemidir (Guyan, 1965).

Guyan yöntemi aşağıdaki statik denge denklemini kullanır (Marinone vd., 2018):

$$\mathbf{K}_n \mathbf{X}_n = \mathbf{F}_n \quad (6)$$

Burada $\mathbf{K}_n$ rijitlik matrisi, $\mathbf{X}_n$ yer değiştirme vektörü ve $\mathbf{F}_n$ kuvvet vektörüdür. Bu ifade aktif (tutulan) ve pasif (silinen) koordinatlar dikkate alınarak aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ad} \\ \mathbf{K}_{da} & \mathbf{K}_{dd} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{X}_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_d \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Burada alt simgeler a ve d sırasıyla aktif ve pasif serbestlik derecelerini belirtir. Pasif serbestlik dereceleri için kuvvet vektörü $\mathbf{F}_d = \mathbf{0}$ olduğu varsayılırsa (7) ifadesinin ikinci denkleminde

$$\mathbf{X}_d = -\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{K}_{da}\mathbf{X}_a \quad (8)$$

elde edilir. Bunun (7) ifadesinin ilk denkleminde yazılmasıyla aşağıdaki koordinat dönüşüm ilişkisi elde edilir:

$$\mathbf{X}_n = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{X}_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{K}_{da} \end{Bmatrix} \mathbf{X}_a = \mathbf{T}_G \mathbf{X}_a \quad (9)$$

Burada $\mathbf{T}_G$ Guyan dönüşüm matrisidir. Bu eşitlik, genel enerji denge formülünde kullanılırsa indirgenmiş rijitlik matrisi aşağıdaki şekilde elde edilir (Guyan, 1965; Marinone vd., 2018):

$$\mathbf{K}_a = \mathbf{T}_G^T \mathbf{K}_n \mathbf{T}_G \quad (10)$$

Guyan yöntemi dinamik etkileri dikkate almamakla birlikte araştırmacılar dinamik sistemlerde kütle matrisinin de (10) ifadesine benzer şekilde yazılabileceğini belirtmişlerdir. Buna göre indirgenmiş kütle matrisi

$$\mathbf{M}_a = \mathbf{T}_G^T \mathbf{M}_n \mathbf{T}_G \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir. (10) ve (11) ifadeleri açık olarak aşağıdaki gibi yazılabilirler:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_a &= \mathbf{K}_{aa} - \mathbf{K}_{ad}\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{K}_{da} \\ \mathbf{M}_a &= \mathbf{M}_{aa} - \mathbf{K}_{ad}\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{M}_{da} - \mathbf{M}_{ad}\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{K}_{da} - \mathbf{K}_{ad}\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{M}_{ad}\mathbf{K}_{dd}^{-1}\mathbf{K}_{da} \end{aligned} \quad (12)$$

Guyan indirgeme yöntemi, statik denge denkleminde dayandığından rijitlik terimleri korunurken eylemsizlik etkisi ihmal edilmektedir. Bu nedenle, Guyan yöntemiyle indirgenmiş bir modelin özdeğerleri her zaman indirgenmemiş sonlu eleman modelinin (tam

sistem) özdeğerlerinden daha yüksek olarak elde edilir. Burada elde edilen özdeğerlerin niteliği, tutulan (aktif) serbestlik derecelerinin konumuna ve ilgilenilen mod şekline bağlıdır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

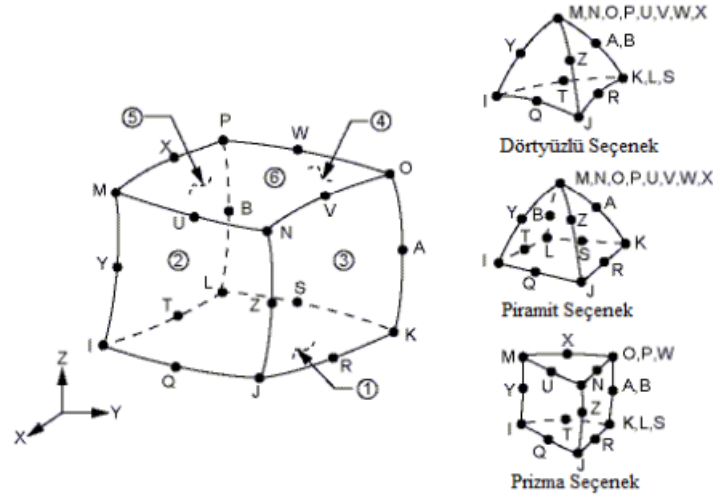
2.1. Giriş

Tez çalışması kapsamında elastik kirişlerde titreşim verilerine dayalı hasar tespiti için iki yöntem kullanılmıştır: YSA ve GA optimizasyonu. Aşağıdaki bölümlerde bu iki yöntemin titreşim verileriyle hasar tespitinde nasıl kullanıldığına ilişkin detaylar verilmiş; ardından, çeşitli hasar senaryoları altında çelik bir konsol çubuk için optimizasyon ve yapay sinir ağları yaklaşımları ile elde edilen hasar tespit simülasyon sonuçları sunulmuş ve irdelenmiştir.

2.2. Hasar Tespit Metodolojisi

2.2.1. Yapay Sinir Ağları ile Hasar Tespiti İçin Ağın Eğitilmesi

YSA ile hasar tespiti için ilk adım ağın eğitimidir. Bu amaçla, uzunluğu $L = 1$ m, genişliği $b = 35$ cm ve yüksekliği $h = 25$ cm olan bir çelik konsol kiriş ele alınmıştır. Kirişin sayısal modeli Ansys Workbench yazılımında oluşturulmuştur. Kirişin üç boyutlu modellemesinde SOLID186 katı elemanı kullanılmıştır. Bu eleman, toplam 20 düğüm noktasına ve her bir düğüm noktasında 3 serbestlik derecesine sahiptir olup Şekil 6’da görülmektedir. Kirişte hasar, eleman rijitliğinin azaltılması ile yapılmıştır. Bunun için kiriş Şekil 7’de görüldüğü üzere 10 elemana bölünmüş; her bir eleman için elastisite modülü $\hat{E} = (1 - \alpha)E$ şeklinde tanımlanmıştır. Burada α hasar şiddeti (veya rijitlik azaltma sabiti) olup değer 0 ila 1 arasında değişmektedir. $\alpha = 0$ ilgili elemanda hasar olmadığını, $\alpha \neq 0$ ise elemanda hasar olduğunu ifade edilmektedir. Sağlam kirişin elastisite modülü $E = 2 \times 10^{11}$ Pa olarak alınmış, hasar sebebiyle kirişin kütlesinde herhangi bir değişimin olmadığı kabul edilmiştir. Tablo 1, Ansys Workbench kullanılarak hasarsız kiriş için elde edilen ilk beş doğal frekansı ve Şekil 8 ise ilk beş mod şeklini göstermektedir.



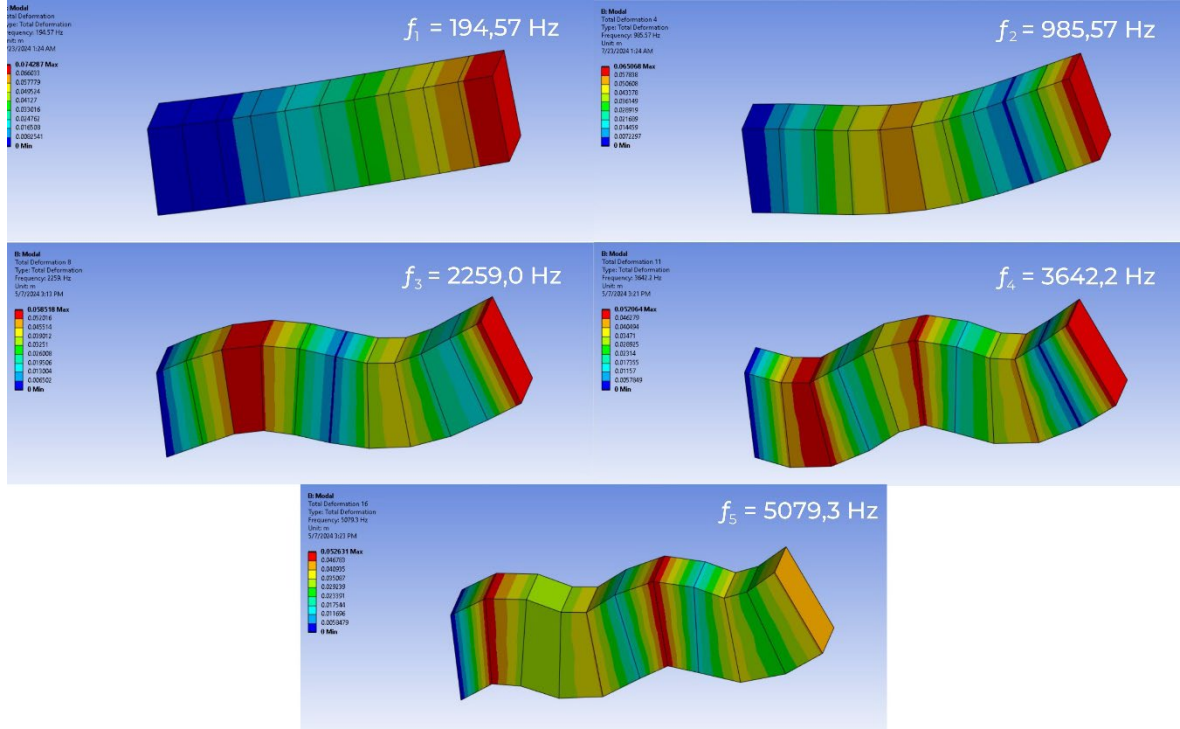
Şekil 6. SOLID186 elemanı (ANSYS, 2013)



Şekil 7. Çalışmada kullanılan konsol kirişin sonlu eleman modeli

Tablo 1. Çalışmada kullanılan konsol kirişin Ansys Workbench ile elde edilen ilk beş doğal frekansı

Mod	Frekans [Hz]
1	194,57
2	985,57
3	2259,0
4	3642,2
5	5079,3



Şekil 8. Çalışmada kullanılan konsol kirişin Ansys Workbench ile elde edilen ilk beş mod şekli

Eğitim için kullanılacak veri seti, Ansys Workbench'in Design of Experiments aracı yardımıyla üretilmiştir. Bu işlemde kısıtlayıcı olarak her bir elemana ayrı ayrı atanan elastisite modülü değerlerinin 1×10^{11} Pa ile 2×10^{11} Pa arasında değiştiği kabul edilmiş ve bu şekilde 1000 farklı rastgele hasar senaryo üretilmesi sağlanmıştır. Elde edilen veri seti, ağırlık eğitimi, doğrulama ve test aşamalarında kullanılmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Verilerin %60'ı eğitim, %20'si doğrulama ve geri kalan %20'si test aşamalarında kullanılmıştır. Bağımsız değişkenlerin farklı büyüklüklere sahip olması optimizasyonu zorlaştıran bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, optimizasyonu kolaylaştırmak için veri seti (13) denkleminde verilen formül kullanılarak 0,1 ile 0,9 arasında normalleştirilmiştir. Tahmin analizlerinden sonra tahmin sonuçlarını karşılaştırmak ve ham verilerle daha kolay yorum yapabilmek için normalleştirilmiş veriler tekrar eski hallerine getirilmiştir.

$$\text{Normalize Değer} = \left[\frac{\text{Ham Değer} - \text{Minimum Değer}}{\text{Maksimum Değer} - \text{Minimum Değer}} \right] (0,9 - 0,1) + 0,1 \quad (13)$$

Kurulan tahmin modelleriyle elde edilen sonuçlar, performans değerlendirme ölçütleri kullanılarak analiz edilmiştir. Modeller arasında daha iyi bir karşılaştırma

yapılabilmesi ve sonuçların doğruluğunun daha anlaşılır olması için birden fazla değerlendirme ölçütü kullanılmıştır. Bu amaçla, Karesel Hatanın Ortalama Karekökü (KHOK), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Nash-Sutcliffe (NSE) verimlilik katsayısı kullanılmıştır. Bunlara ait formüller sırasıyla (14-16) ifadelerinde verilmiştir.

$$KHOK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - yt_i)^2} \quad (14)$$

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(y_i - yt_i)| \quad (15)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - yt_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

Bu eşitliklerde; N , veri sayısını; y_i ölçüm değerlerini; yt_i , tahmin değerlerini ve $\bar{y}$ ise ölçüm değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Burada, KHOK ve OMH değerlerinin sıfıra yakın olması tahmin ve ölçüm seti arasındaki uyumun iyi olduğunu göstermektedir. NSE ise tahmin ve ölçüm seti arasındaki farkı ölçen ve modelin gerçek verilere ne kadar uyduğunu gösteren bir istatistik değerdir. NSE değerleri $-\infty$ ila 1 arasında değişir. NSE değerinin 1'e yakın olması modelin ölçüm değerlerine mükemmel uyum sağladığını belirtirken, 0'a yakın olması, modelin zayıf tahmin gücüne sahip olduğunu ifade eder. Negatif değerler ise modelin tahminlerinin ölçüm değerlerinden daha kötü olduğunu ve modelin anlamsız olduğunu gösterir.

Rastgele üretilmiş hasar senaryolarına dayalı veri ile eğitilen ağın yukarıda bahsedilen kriterlere göre yapılan performans değerlendirilmesi sonucunda, en iyi tahminlerin elde edildiği modellerin ara katman sayısı, öğrenme ve momentum katsayıları ile performans kriteri değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Bu tablo incelendiğinde, ağ eğitimi için en iyi sonuçların 25 ara katmanlı modelden elde edildiği görülmektedir. Burada dikkati çeken husus, konsol kirişin ucuna doğru yaklaşıldıkça bu bölgedeki elemanlar için tahminlerde performansların düştüğüdür. 25 ara katmanlı model kullanılarak bu bölge için doğruluk arttırılmaya çalışılmış, en uçtaki eleman hariç %80 (NSE'ye göre) üzerinde doğruluk yakalanmıştır.

Tablo 2. ÇK-YSA modeli için kullanılan değişkenler

Ara katman sayısı	Öğrenme katsayısı	Momentum katsayısı
5, 10, 15, 20, 25	0,1	0,1
		0,5
		1,0
	0,5	0,1
		0,5
		1,0
	1	0,1
		0,5
		1,0

Ağ eğitimi için farklı öğrenme katsayıları ve momentum katsayıları kullanılarak Çok Katmanlı YSA (ÇKYSA) yardımıyla tahmin modelleri oluşturulmuştur. Tablo 2’de görülen beş farklı ara katman sayısı ile üç farklı öğrenme ve üç farklı momentum katsayısı kullanılarak 45 farklı kombinasyon ile analizler yapılmıştır. Ağın eğitimi için kullanılan iterasyon sayısı 10.000 ile sınırlandırılmıştır.

Şekil 9-13’te sırasıyla 5, 10, 15, 20 ve 25 ara katmanlı modellere ait zaman serisi grafikleri sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde genellikle 10 ve üzeri katman kullanıldığında eğitim modelinin doğruluğu arttığı görülmektedir. Daha doğru bir sonuca ulaşmak için bu grafikleri, Şekil 14-18’de verilen saçılım grafikleriyle birlikte değerlendirmek uygundur. Buna göre, 5 ara katmanlı model, sınırlı bir performans sergilerken, 10 ara katmanlı modelle birlikte tahmin doğruluğunda belirgin bir iyileşme gözlenmiştir. 15 ve 20 ara katmanlı modellerde tahmin performansı daha da artmış, sapmalar minimal düzeyde kalmıştır. En yüksek doğruluğa ve en düşük hata oranına sahip olan 25 ara katmanlı model, gözlenen ve tahmin edilen değerler arasında en güçlü ilişkiyi göstererek elastisite modülü tahmini için en uygun model olarak öne çıkmıştır.

Gerek Tablo 3 gerekse Şekil 9-13 ve Şekil 14-18’den elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, ara katman sayısının artmasıyla tahmin performansının iyileştiği ve gözlenen elastisite modülü değerlerine daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Tüm modellerde elde edilen düşük standart sapma değerleri, tahminlerin güvenilirliğini ve tutarlılığını vurgulamaktadır. Kiriş uç elemanlarında doğruluğu arttırmak için ara katman sayısının arttırılması artık bir iyileşme sağlamadığından ve ayrıca ara katman sayısının artmasıyla hesaplama süresinin uzayacağı dikkate alındığında, bu çalışmada kullanılacak optimum ağ modeli 25 ara katmanlı YSA modeli olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3. YSA tahmin modeli performans değerlendirme sonuçları

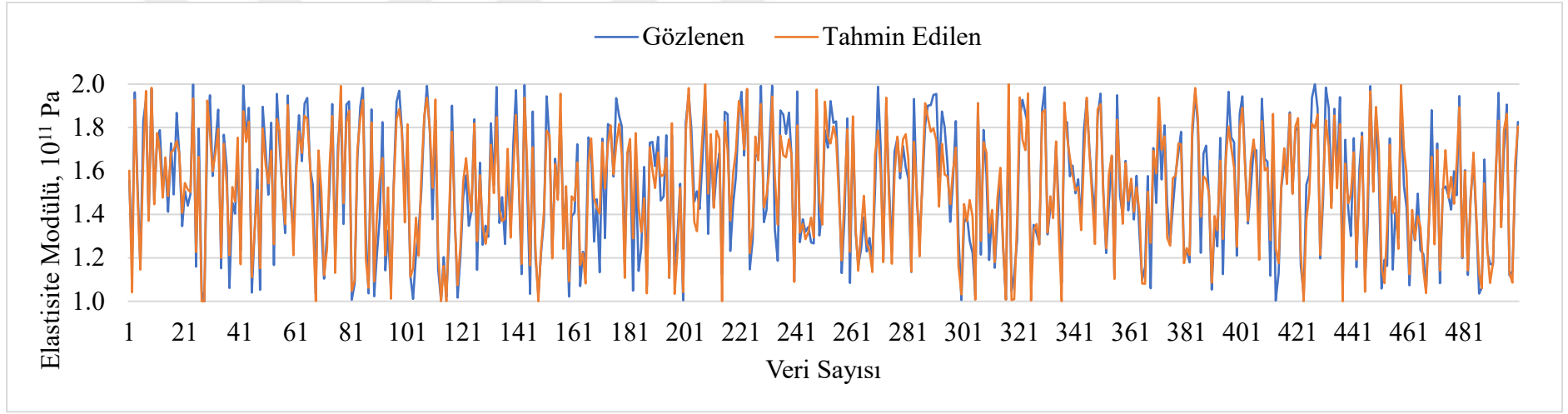
Kriter	5×0,1×0,5			10×0,1×1			15×1×0,5			20×0,5×0,5			25×1×1		
	E	D	T	E	D	T	E	D	T	E	D	T	E	D	T
KHOK (×10 ⁹)	9,84	8,69	9,51	3,82	3,15	4,32	2,57	2,07	3,10	2,77	2,54	3,11	1,76	1,69	1,35
	16,09	17,49	15,61	5,38	5,97	5,01	4,30	4,22	6,28	4,04	4,23	6,27	3,54	3,01	3,35
	22,92	22,11	20,67	6,85	6,53	6,49	6,44	5,86	7,29	5,29	4,84	7,31	5,34	4,71	5,80
	23,61	20,99	23,48	9,51	7,35	8,86	8,96	7,28	8,63	7,90	6,20	8,63	8,11	5,54	7,17
	24,13	20,62	22,69	10,43	8,96	10,17	9,62	9,30	9,20	8,60	7,95	9,22	8,11	7,34	7,77
	20,43	19,41	18,19	10,53	10,41	11,17	9,99	9,31	11,59	9,59	8,65	11,60	8,58	8,64	9,16
	18,98	17,67	18,52	12,21	11,13	11,09	10,88	9,86	11,65	10,41	9,84	11,66	10,09	9,48	10,47
	21,11	20,22	21,27	12,71	10,83	11,38	11,51	10,22	11,56	11,24	9,46	11,57	10,36	8,12	10,49
	19,51	16,38	18,12	13,60	12,48	13,16	13,03	11,70	12,89	12,69	11,24	12,87	12,16	10,37	12,01
OMH (×10 ⁹)	26,98	29,55	29,07	20,08	19,86	17,88	17,72	18,05	17,73	17,65	17,67	17,75	16,96	17,04	16,02
	8,04	6,84	7,39	3,01	2,51	3,47	1,79	1,52	2,40	2,09	1,94	2,41	1,17	1,19	1,04
	12,92	14,02	12,45	4,32	4,81	3,80	3,37	3,45	4,82	3,12	3,34	4,81	2,67	2,33	2,55
	18,95	18,47	16,52	5,41	4,97	4,98	5,04	4,53	5,74	4,15	3,61	5,76	4,19	3,45	4,31
	19,17	16,95	19,26	6,90	6,04	6,84	7,04	5,92	6,73	6,24	4,96	6,74	6,42	4,41	5,78
	19,84	16,67	18,30	7,75	6,73	7,82	7,42	7,10	7,20	6,59	6,06	7,24	6,22	5,70	6,15
	16,57	15,19	15,29	8,16	7,99	8,66	7,84	7,31	9,20	7,49	6,50	9,21	6,48	6,69	7,55
	15,28	13,96	15,22	9,45	8,70	8,59	8,30	7,58	9,03	7,83	7,48	9,06	7,41	6,90	8,01
	16,92	16,16	17,33	10,00	8,55	9,13	8,87	8,04	9,10	8,78	7,30	9,11	7,86	6,12	7,90
	15,76	12,98	14,59	10,78	10,35	10,31	10,46	9,40	10,36	9,94	9,23	10,34	9,27	8,08	8,91
	22,95	25,91	25,46	15,82	16,42	14,33	13,88	14,39	13,95	13,70	14,33	13,97	13,03	13,26	11,94

E: Eğitim, D: Doğrulama, T: Test

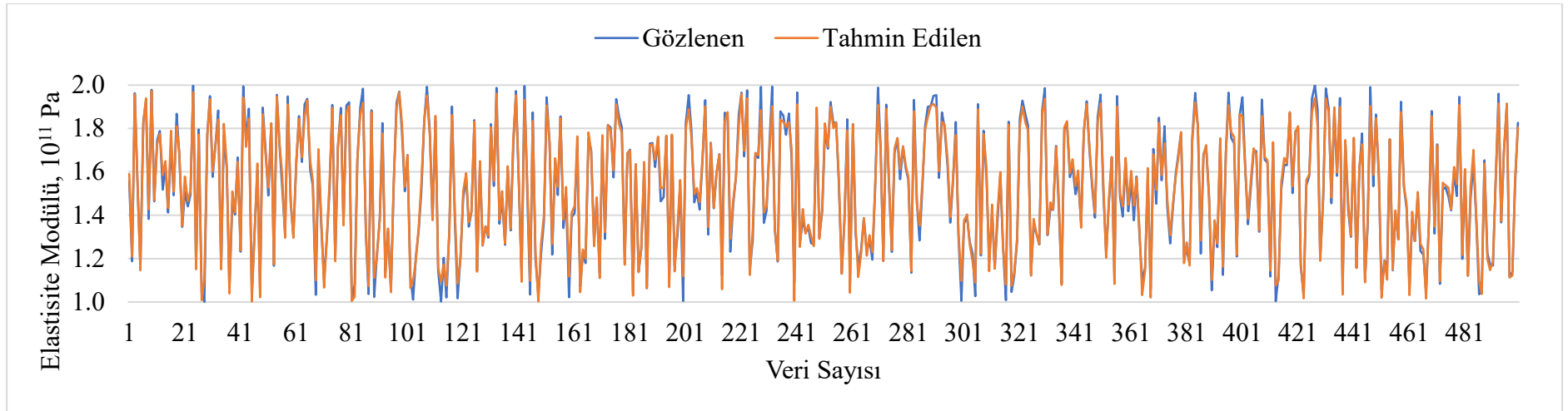
Tablo 3'ün devamı

Kriter	5×0,1×0,5			10×0,1×1			15×1×0,5			20×0,5×0,5			25×1×1		
	E	D	T	E	D	T	E	D	T	E	D	T	E	D	T
NSE	0,89	0,90	0,89	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	0,68	0,64	0,72	0,96	0,96	0,97	0,98	0,98	0,95	0,98	0,98	0,95	0,98	0,99	0,99
	0,34	0,46	0,48	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,93	0,96	0,97	0,93	0,96	0,98	0,96
	0,33	0,44	0,37	0,89	0,93	0,91	0,90	0,93	0,91	0,92	0,95	0,91	0,92	0,96	0,94
	0,34	0,51	0,35	0,88	0,91	0,87	0,90	0,90	0,89	0,92	0,93	0,89	0,93	0,94	0,92
	0,51	0,58	0,60	0,87	0,88	0,85	0,88	0,90	0,84	0,89	0,92	0,84	0,91	0,92	0,90
	0,59	0,56	0,58	0,83	0,83	0,85	0,87	0,86	0,83	0,88	0,86	0,83	0,88	0,87	0,87
	0,49	0,50	0,39	0,81	0,86	0,83	0,85	0,87	0,82	0,85	0,89	0,82	0,88	0,92	0,85
	0,52	0,69	0,61	0,77	0,82	0,79	0,79	0,84	0,80	0,80	0,85	0,80	0,81	0,88	0,83
	0,09	-0,01	0,06	0,50	0,54	0,65	0,61	0,62	0,65	0,61	0,64	0,65	0,64	0,66	0,72

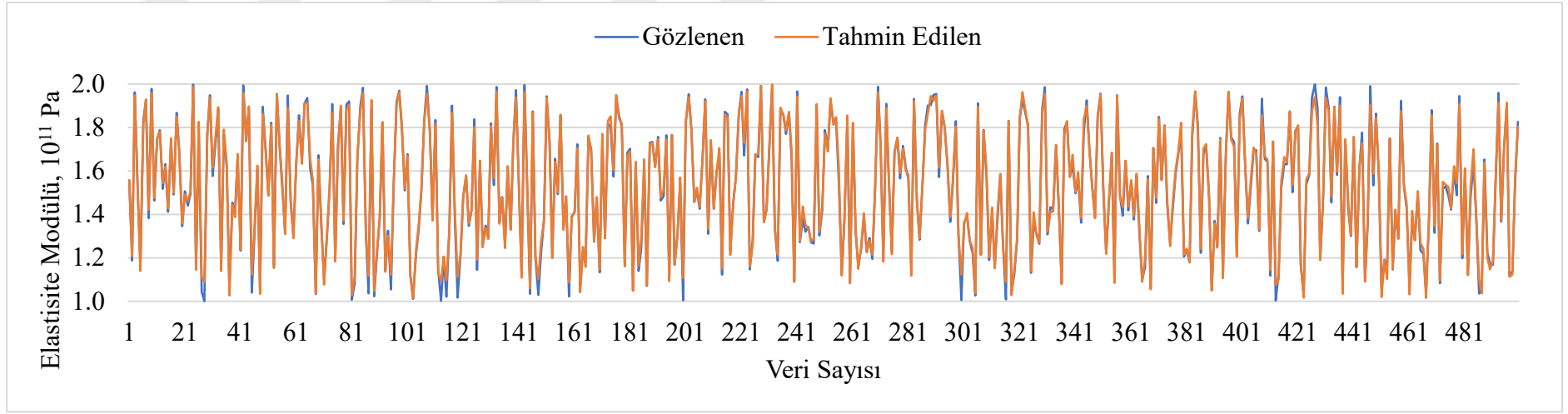
E: Eğitim, D: Doğrulama, T: Test



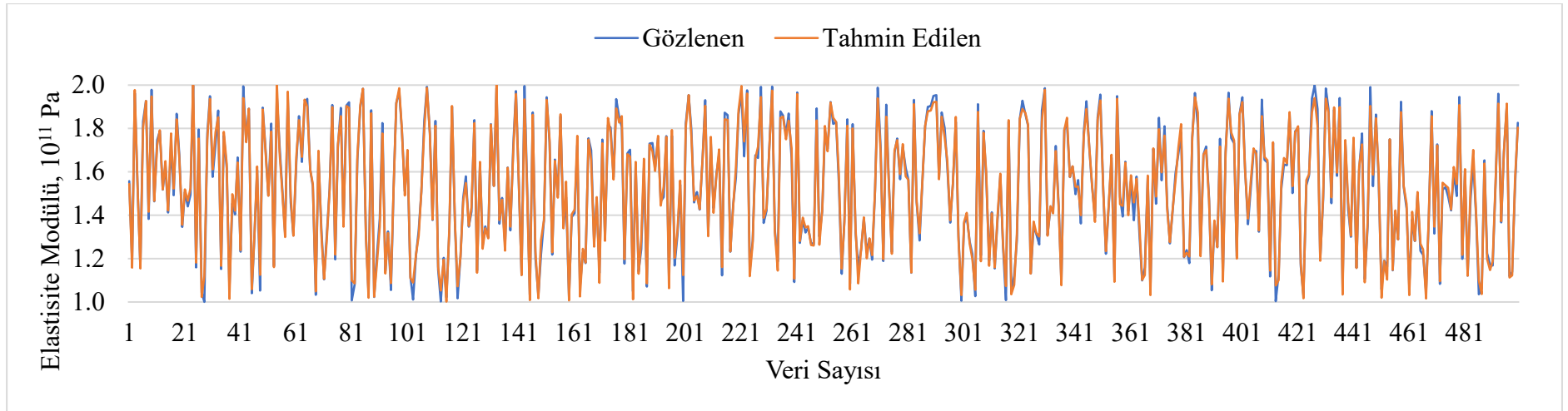
Şekil 9. 5 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi



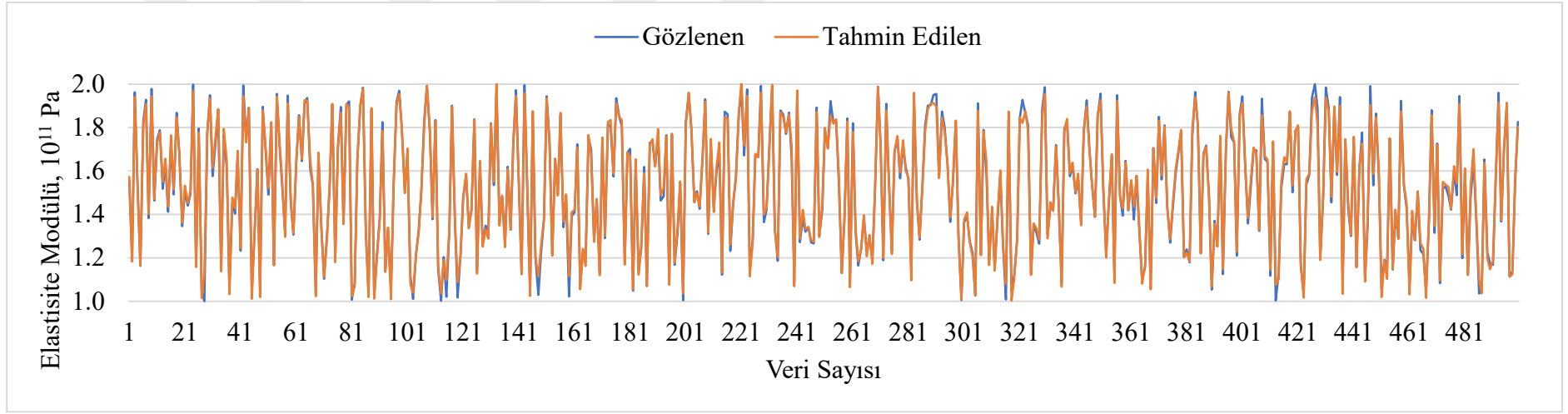
Şekil 10. 10 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi



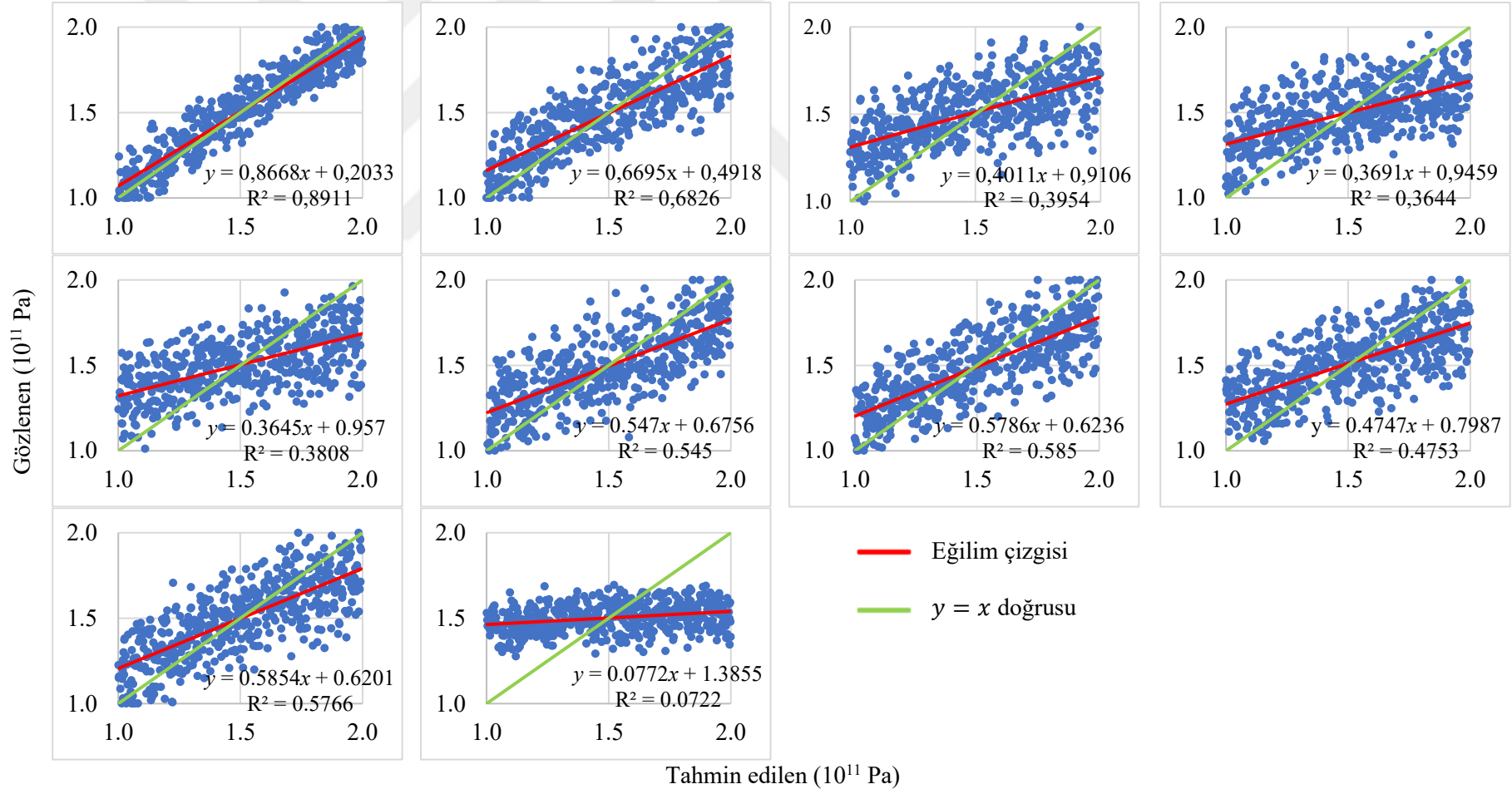
Şekil 11. 15 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi



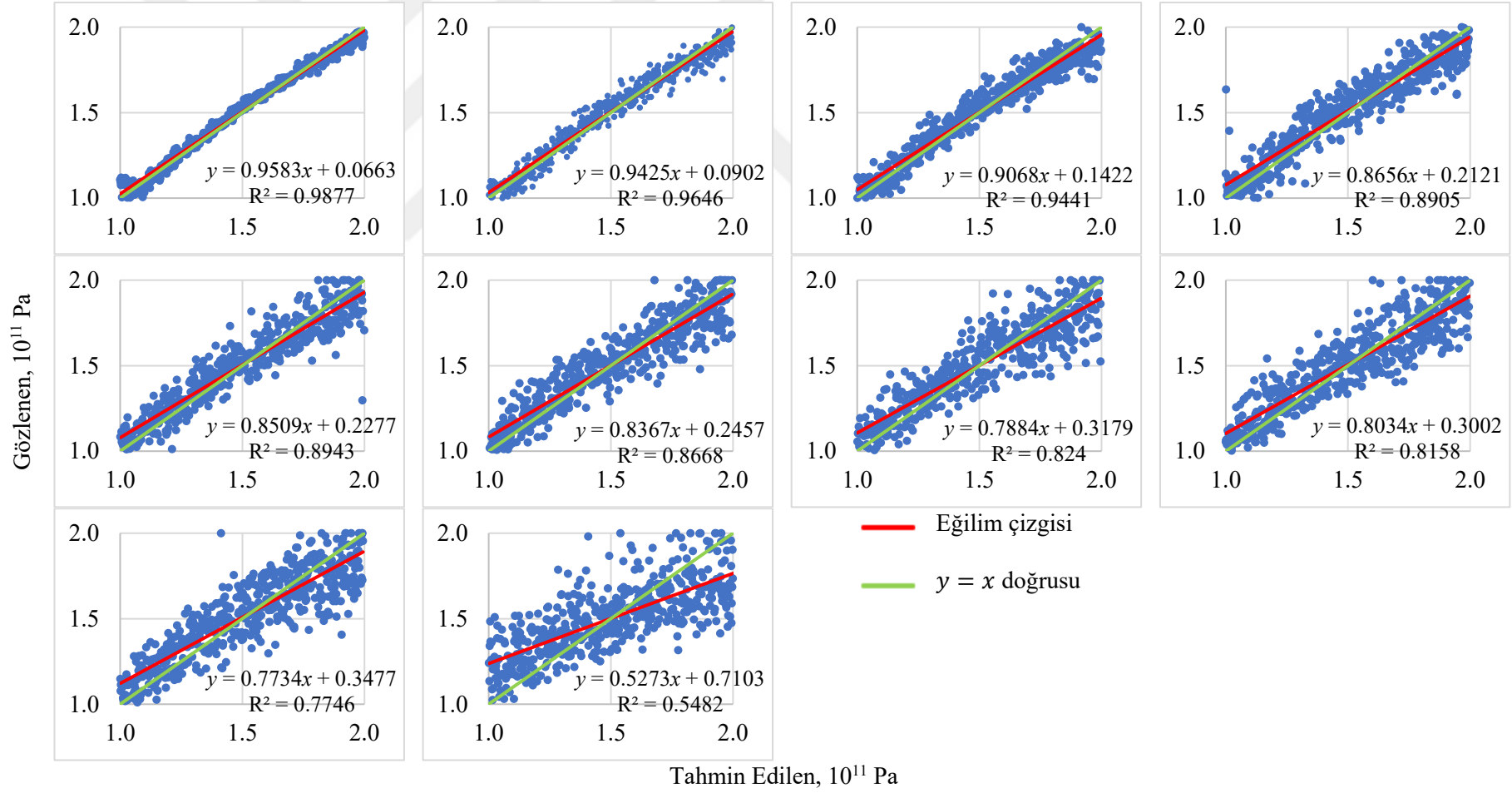
Şekil 12. 20 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi



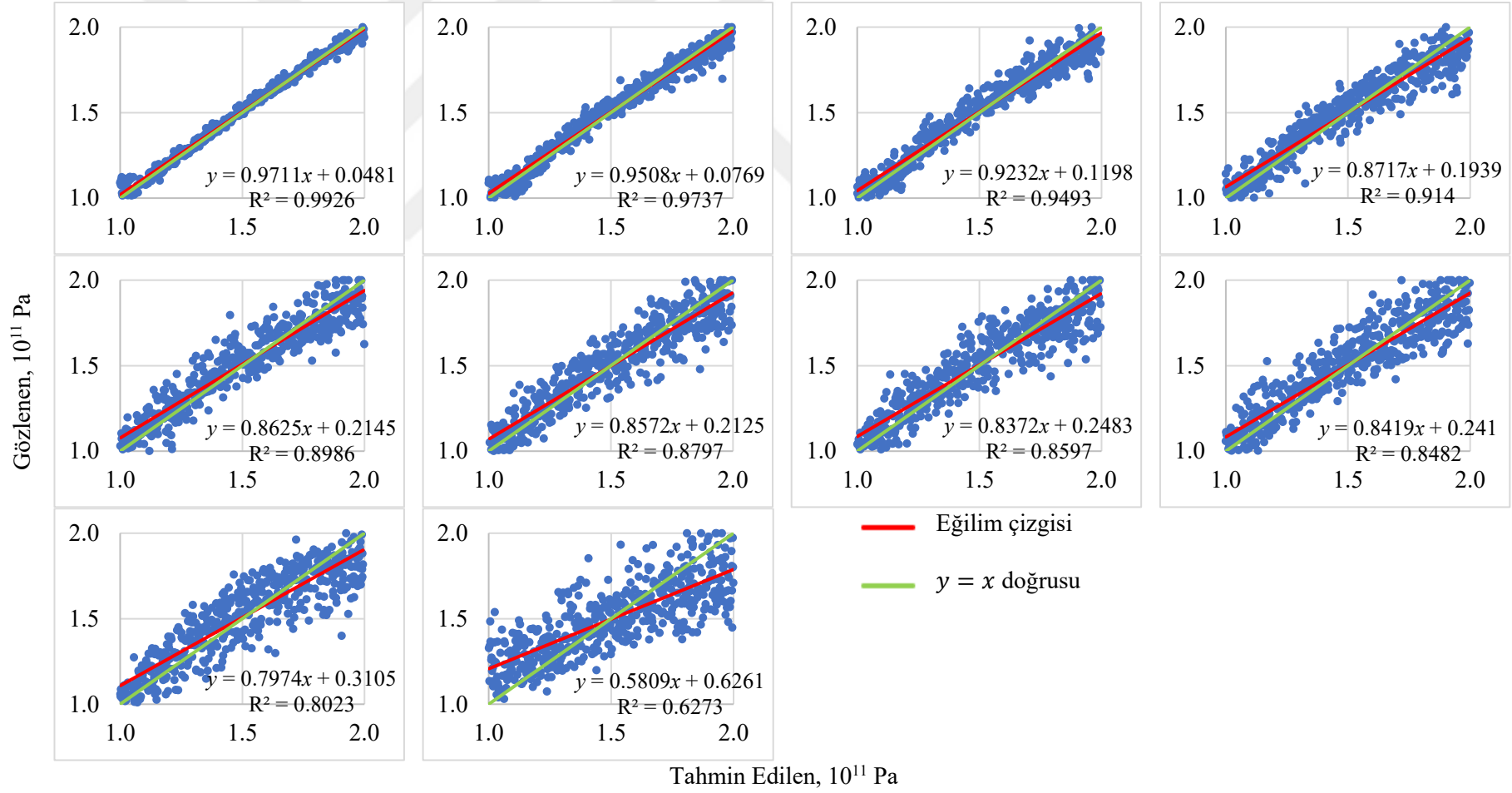
Şekil 13. 25 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait zaman serisi



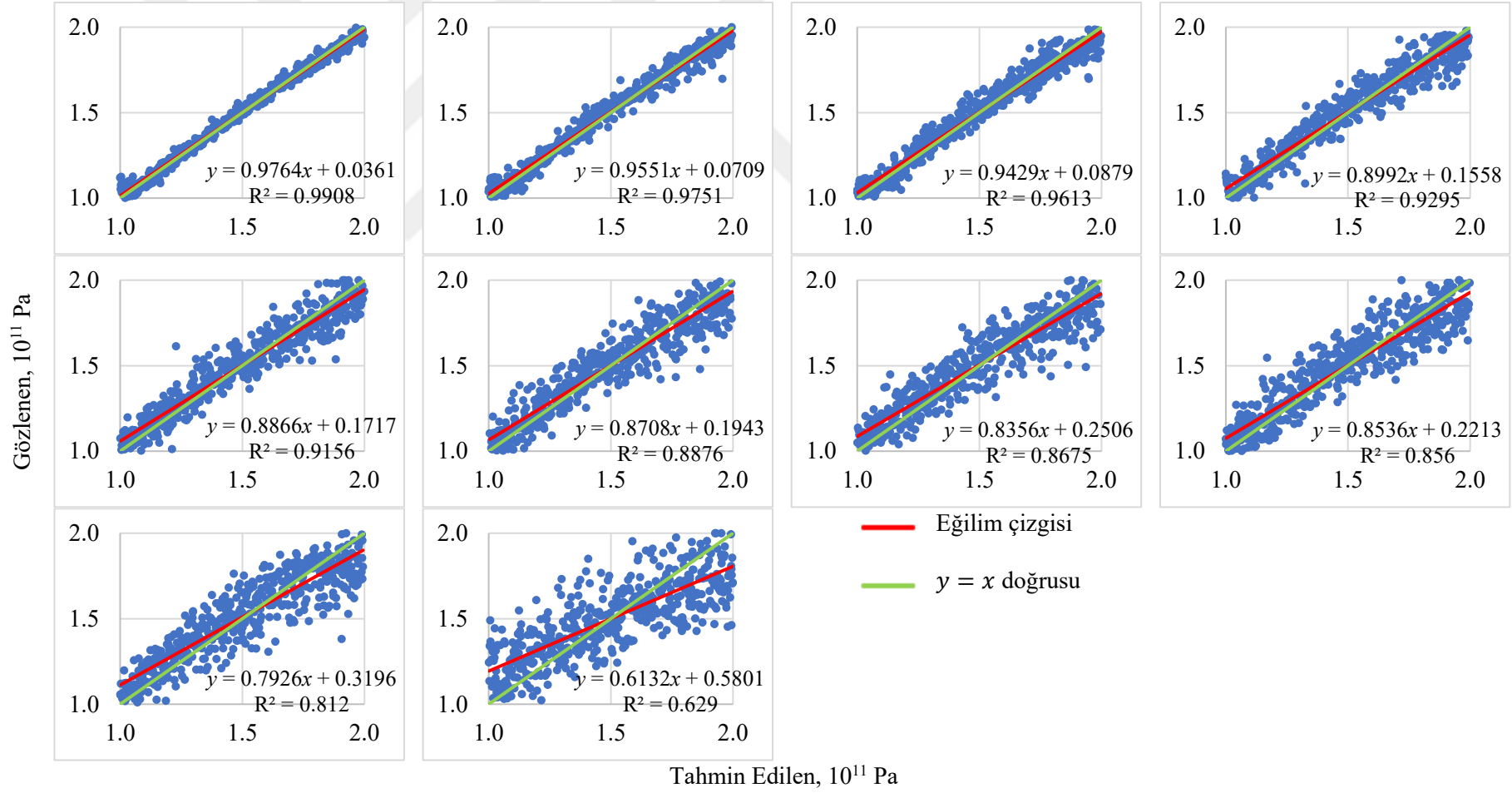
Şekil 14. 5 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri



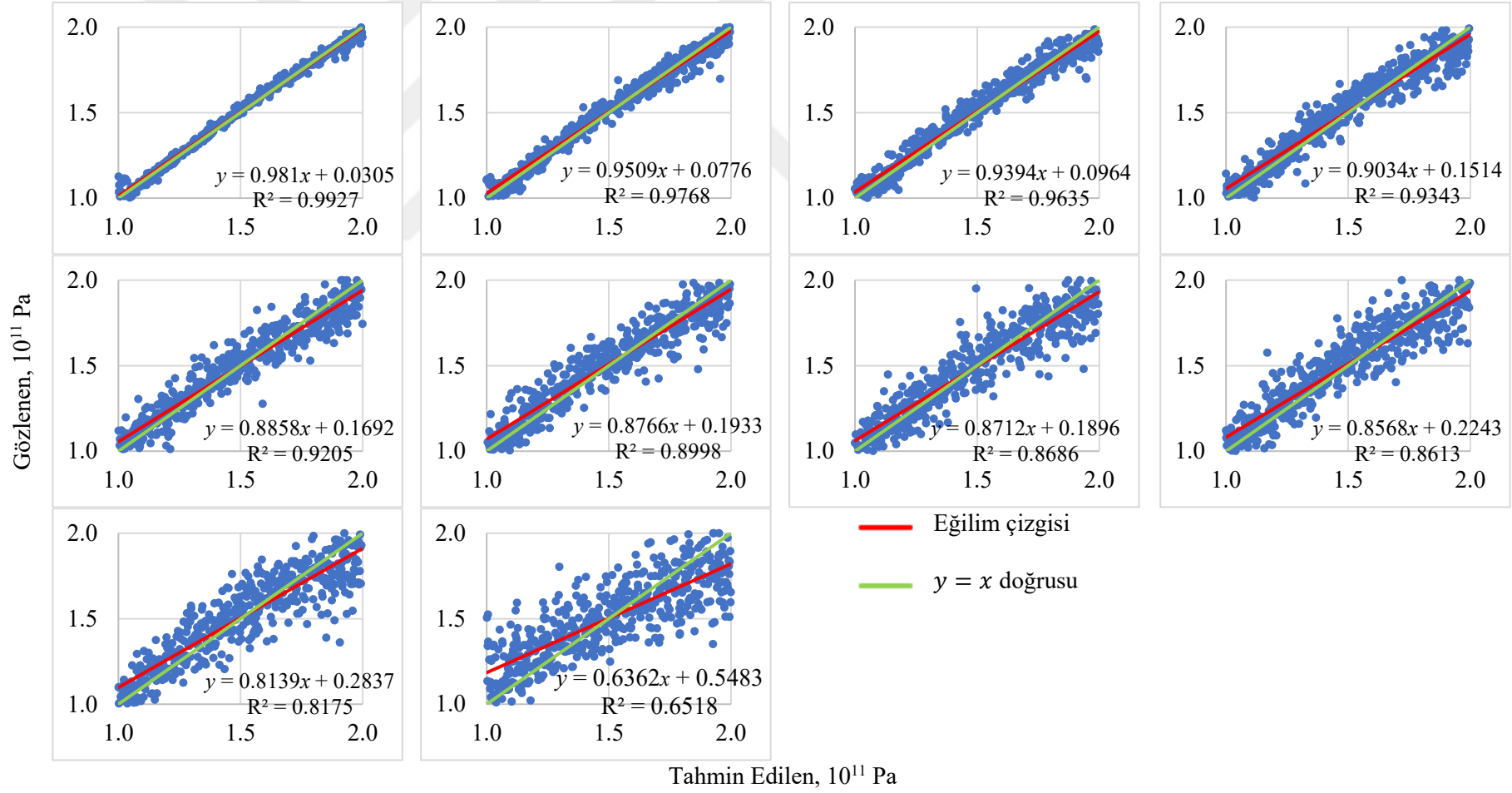
Şekil 15. 10 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri



Şekil 16. 15 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri



Şekil 17. 20 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri



Şekil 18. 25 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri

2.2.2. Genetik Algoritma (GA) ile Hasar Tespiti

Genetik Algoritma (GA), doğadaki evrimsel süreçleri model alan bir optimizasyon tekniğidir. Özellikle karmaşık ve çok boyutlu problemler için etkili çözümler sunan GA, popülasyon tabanlı bir arama algoritması olarak çalışır ve çözüm uzayında en iyi sonuca ulaşmayı amaçlar. Bu süreçte, genetik operatörler (seçim, çaprazlama ve mutasyon) kullanılarak yeni çözümler oluşturulur ve değerlendirilir.

Hasar tespit problemi, bir amaç fonksiyonunun minimumlarının arandığı bir optimizasyon problemi şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} &\text{Find } \mathbf{x} = \{\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_N\} \\ &\text{Min } F(\mathbf{x}) \\ &\text{s.t. } 0 \leq \alpha_e \leq 1 \quad (e = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (17)$$

Burada $F(\mathbf{x})$ minimumu aranan amaç fonksiyonunu, $\mathbf{x}$ rijitlik kaybı vektörünü ve N sonlu eleman modelindeki eleman sayısını göstermektedir. Belirli bir hasar koşulu için tahmin edilen rijitlik kaybı vektörü, amaç fonksiyonunu minimum yapıyorsa, yani amaç fonksiyonu teorik olarak sıfıra eşitse, bu set gerçek yapısal hasar durumunu temsil etmektedir. Tez çalışma kapsamında kullanılan optimizasyon tabanlı hasar tespit metodolojisinin akış şeması Şekil 19'da verilmiştir.

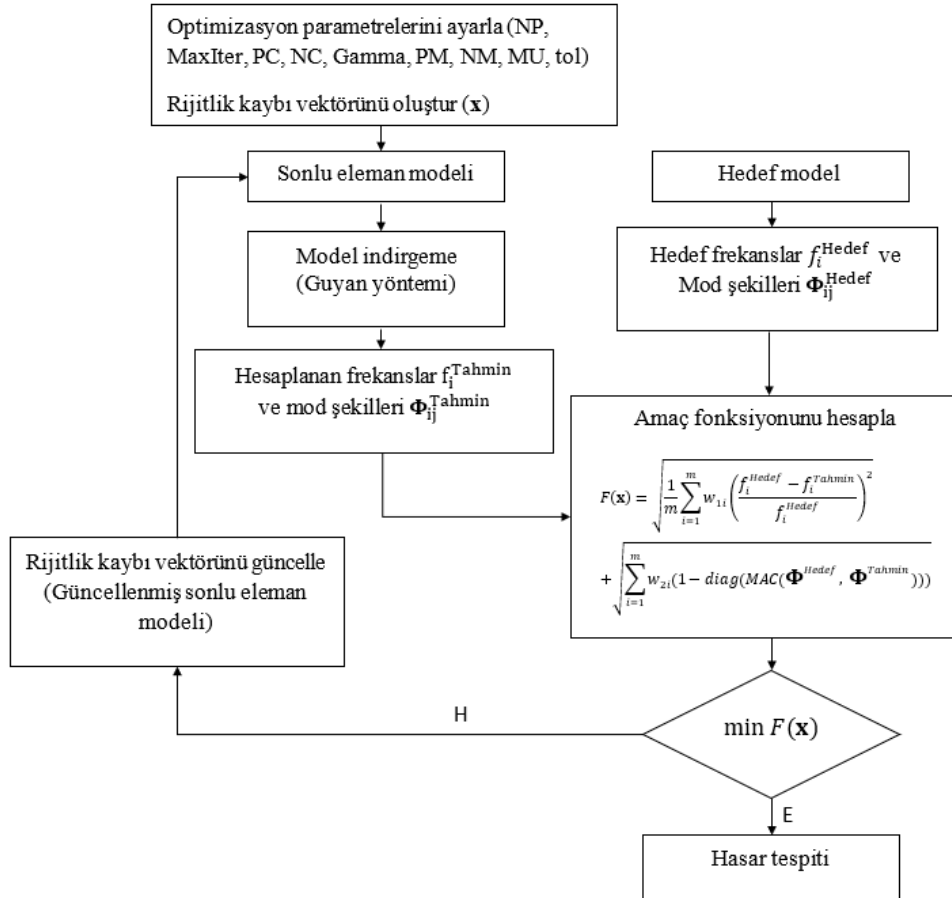
Modal parametreler arasında frekanslar gürültüden daha az etkilenir ve kolaylıkla elde edilebilirler. Ancak, yalnızca frekansları kullanarak hasarları etkili bir şekilde tespit etmek mümkün değildir. Bu çalışmada, amaç fonksiyonu, frekanslardaki kök-ortalama-kare hatası ile iki mod şekli arasındaki korelasyonun ağırlıklı doğrusal kombinasyonu olarak aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}) = & \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_{1i} \left(\frac{f_i^{\text{Hedef}} - f_i^{\text{Tahmin}}}{f_i^{\text{Hedef}}} \right)^2} \\ & + \sqrt{\sum_{i=1}^m w_{2i} (1 - \text{diag}[\text{MAC}(\Phi^{\text{Hedef}}, \Phi^{\text{Tahmin}})])} \end{aligned} \quad (18)$$

Burada, f_i^{Hedef} ve f_i^{Tahmin} sırasıyla hedef ve tahmin edilen i . frekansları, Φ^{Hedef} ve Φ^{Tahmin} sırasıyla hedef ve tahmin edilen mod şekil matrislerini, m dikkate alınan mod sayısını göstermektedir. İfadede görülen w_{1i} ve w_{2i} çarpanları sırasıyla i . frekans ve mod şekli için ağırlık katsayıları olup bu çalışmada $w_{1i} = w_{2i} = 1$ olarak seçilmiştir (Kahya vd., 2022). (18) ifadesi hem doğal frekanslardaki hem de mod şekillerindeki değişimi dikkate almaktadır. Burada mod şekilleri arasındaki korelasyonu tanımlamak üzere Modal Güvence Kriteri (MAC) kullanılmış olup

$$\text{MAC}(\Phi^{\text{Hedef}}, \Phi^{\text{Tahmin}}) = \frac{|(\Phi^{\text{Hedef}})^T \Phi^{\text{Tahmin}}|^2}{[(\Phi^{\text{Hedef}})^T \Phi^{\text{Hedef}}][(\Phi^{\text{Tahmin}})^T \Phi^{\text{Tahmin}}]} \quad (19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, üst simge T , bir matrisin transpozisini belirtmektedir. MAC matrisi 0 ila 1 arasında değerleri olan elemanlardan oluşmaktadır. İki vektör arasında tam uyum varsa MAC matrisinin diyagonal elemanları 1, diğerleri ise 0 değerini alır.



Şekil 19. Optimizasyon tabanlı hasar tespiti akış şeması

2.2.3. YSA ve GA Optimizasyonu ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

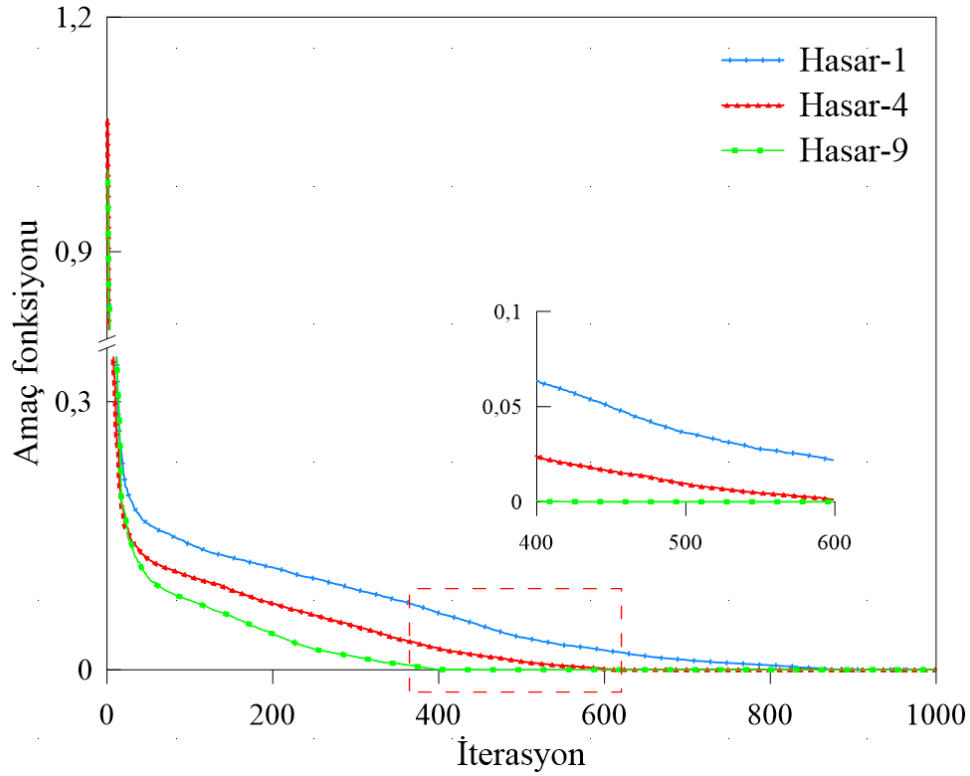
Bu bölümde, eğitilen YSA ağı ile Tablo 4'te verilen hasar senaryolarının tespitine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla Genetik Algoritma (GA) kullanılarak optimizasyon tabanlı hasar tespit sonuçları kullanılmıştır. Burada sayısal analizlerde kullanılmak üzere Fortran programında yazılmış ve detayları Şimşek (2024)'te verilen altı serbestlik dereceli giriş sonlu eleman modeli, Matlab programında yazılmış GA kodu ile birleştirilmiştir.

GA için optimizasyon parametreleri; popülasyon boyutu PS = 50, çaprazlama oranı CR = 0,7, mutasyon oranı MR = 0,01, her iterasyonda oluşturulacak yeni birey sayısı GC = 34, mutant sayısı NM = 15, maksimum iterasyon sayısı MaxIt = 1000 ve yakınsama kriteri $tol = 1 \times 10^{-5}$ olarak seçilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının tutarlılığını sağlamak için beş bağımsız koşum yapılmış ve ortalama değerler verilmiştir.

Şekil 20'de 1, 4 ve 9 nolu hasar senaryoları için amaç fonksiyonunun GA optimizasyonu ile elde edilen yakınsama eğrileri görülmektedir. Görüleceği üzere eğriler tüm hasar senaryoları için hızla yakınsamaktadır. Şekle göre, 1 nolu hasar senaryosu (tekli hasar) için 900, 4 nolu hasar senaryosu (ikili hasar) için 600 ve 9 nolu hasar senaryosu (üçlü hasar) için 400 iterasyon civarında yakınsama sağlanmaktadır. Benzer durum diğer hasar senaryoları için de görülmektedir. Burada çoklu hasar senaryoları için eğrilerin daha hızlı yakınsaması, kullanılan amaç fonksiyonunun çoklu hasarları yakalayabilme kabiliyetinin güçlü olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Çalışmada göz önüne alınan hasar senaryoları

Hasar senaryosu	Hasarlı eleman(lar)			Hasar şiddeti, α		
1	1	-	-	0,40	-	-
2	5	-	-	0,40	-	-
3	10	-	-	0,40	-	-
4	1	2	-	0,30	0,20	-
5	5	6	-	0,30	0,20	-
6	9	10	-	0,20	0,20	-
7	2	3	4	0,20	0,20	0,20
8	2	3	9	0,20	0,20	0,20
9	2	3	4	0,30	0,20	0,20
10	2	3	9	0,30	0,30	0,20



Şekil 120. GA optimizasyonu için bazı hasar senaryolarına ait yakınsama eğrileri

Tablo 5-14’de, göz önüne alınan 10 hasar senaryosu için her bir bağımsız koşuma ait optimizasyon sonuçları ve istatistik değerleri verilmiştir. Tablolardan da görüleceği üzere GA ile yapılan optimizasyon tabanlı hasar tespitinde tüm senaryolarda hasarlı elemanlar çok iyi bir doğrulukla elde edilebilmektedir. Tüm senaryolarda, amaç fonksiyonu $10^{-5} \sim 10^{-6}$ mertebelerine yakınsamıştır. Hem tekli hem de çoklu hasar senaryolarında tahmin değerlerinin standart sapması son derece küçüktür. Bu durum, göz önüne alınan amaç fonksiyonu ve optimizasyon parametrelerinin son derece tutarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Hasar-1 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum	Hasar şiddeti, $\alpha_1 = 0,40$	Amaç fonsiyonu, F
Koşum 1	0,39736	$2,82 \times 10^{-4}$
Koşum 2	0,39990	$9,17 \times 10^{-6}$
Koşum 3	0,39930	$6,54 \times 10^{-5}$
Koşum 4	0,39868	$1,31 \times 10^{-4}$
Koşum 5	0,39817	$1,87 \times 10^{-4}$
En iyi değer	0,39990	-
Ortalama değer	0,39868	-
Standart sapma	0,00088	-

Tablo 6. Hasar-2 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum	Hasar şiddeti, $\alpha_2 = 0,40$	Amaç foksiyonu, F
Koşum 1	0,39989	$7,73 \times 10^{-6}$
Koşum 2	0,39928	$4,78 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,39985	$8,44 \times 10^{-6}$
Koşum 4	0,39981	$1,03 \times 10^{-5}$
Koşum 5	0,39954	$3,19 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,39989	-
Ortalama değer	0,39967	-
Standart sapma	0,00023	-

Tablo 7. Hasar-3 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti, $\alpha_{10} = 0,40$	Amaç foksiyonu, F
Koşum 1	0,39995	$9,86 \times 10^{-6}$
Koşum 2	0,39982	$3,95 \times 10^{-6}$
Koşum 3	0,39981	$9,95 \times 10^{-6}$
Koşum 4	0,39986	$9,27 \times 10^{-6}$
Koşum 5	0,39984	$9,59 \times 10^{-6}$
En iyi değer	0,39995	-
Ortalama değer	0,39986	-
Standart sapma	0,00005	-

Tablo 8. Hasar-4 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti		Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_1 = 0,30$	$\alpha_2 = 0,20$	
Koşum 1	0,29910	0,20089	$6,33 \times 10^{-5}$
Koşum 2	0,29909	0,20154	$8,43 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,29927	0,20079	$5,29 \times 10^{-5}$
Koşum 4	0,29931	0,20077	$5,19 \times 10^{-5}$
Koşum 5	0,29895	0,20100	$7,39 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,29931	0,20154	-
Ortalama değer	0,29914	0,20100	-
Standart sapma	0,00013	0,00028	-

Tablo 9. Hasar-5 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti		Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_5 = 0,30$	$\alpha_6 = 0,20$	
Koşum 1	0,29945	0,19973	$2,10 \times 10^{-5}$
Koşum 2	0,29963	0,19951	$2,01 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,29951	0,19975	$1,82 \times 10^{-5}$
Koşum 4	0,29979	0,19982	$9,44 \times 10^{-6}$
Koşum 5	0,29967	0,19975	$1,43 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,29979	0,19982	-
Ortalama değer	0,29961	0,19971	-
Standart sapma	0,00011	0,00010	-

Tablo 10. Hasar-6 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti		Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_9 = 0,20$	$\alpha_{10} = 0,20$	
Koşum 1	0,20010	0,19952	$2,52 \times 10^{-5}$
Koşum 2	0,19978	0,19994	$1,43 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,19988	0,19990	$9,77 \times 10^{-6}$
Koşum 4	0,19990	0,19994	$8,96 \times 10^{-6}$
Koşum 5	0,20052	0,19968	$5,13 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,19990	0,19994	-
Ortalama değer	0,20003	0,19980	-
Standart sapma	0,00026	0,00016	-

Tablo 11. Hasar-7 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti			Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_2 = 0,20$	$\alpha_3 = 0,20$	$\alpha_4 = 0,20$	
Koşum 1	0,20023	0,19948	0,20016	$2,24 \times 10^{-5}$
Koşum 2	0,20005	0,20029	0,19976	$1,80 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,19933	0,20041	0,19982	$3,26 \times 10^{-5}$
Koşum 4	0,20037	0,19935	0,20009	$2,75 \times 10^{-5}$
Koşum 5	0,19941	0,20054	0,19988	$2,69 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,20005	0,20029	0,20009	-
Ortalama değer	0,19988	0,20001	0,19994	-
Standart sapma	0,00042	0,00049	0,00015	-

Tablo 12. Hasar-8 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti			Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_2 = 0,20$	$\alpha_3 = 0,20$	$\alpha_9 = 0,20$	
Koşum 1	0,20006	0,19975	0,20003	$9,98 \times 10^{-6}$
Koşum 2	0,20009	0,19987	0,19997	$8,18 \times 10^{-6}$
Koşum 3	0,19993	0,19981	0,19998	$9,72 \times 10^{-6}$
Koşum 4	0,20064	0,19945	0,20007	$3,67 \times 10^{-5}$
Koşum 5	0,19944	0,20013	0,19992	$2,54 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,19993	0,19987	0,19998	-
Ortalama değer	0,20003	0,19980	0,19999	-
Standart sapma	0,00038	0,00022	0,00005	-

Tablo 13. Hasar-9 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

Koşum no	Hasar şiddeti			Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_2 = 0,20$	$\alpha_3 = 0,20$	$\alpha_4 = 0,20$	
Koşum 1	0,300005	0,20008	0,19973	$1,17 \times 10^{-5}$
Koşum 2	0,300637	0,19877	0,20054	$6,01 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,300111	0,19989	0,19981	$9,77 \times 10^{-6}$
Koşum 4	0,299825	0,20008	0,19995	$9,84 \times 10^{-6}$
Koşum 5	0,299683	0,20039	0,19985	$1,95 \times 10^{-5}$
En iyi değer	0,300005	0,20008	0,19995	-
Ortalama değer	0,300052	0,19984	0,19998	-
Standart sapma	0,000327	0,00056	0,00029	-

Tablo 14. Hasar-10 senaryosu için bağımsız koşumlara ait hasar tespit sonuçları

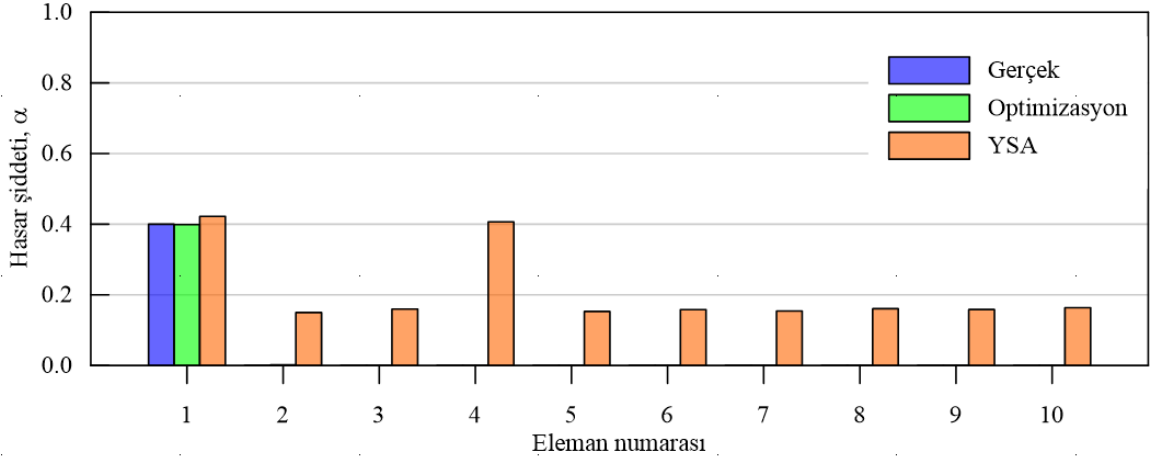
Koşum no	Hasar şiddeti			Amaç foksiyonu, F
	$\alpha_2 = 0,30$	$\alpha_3 = 0,30$	$\alpha_9 = 0,20$	
Koşum 1	0,30008	0,29945	0,20013	$2,71 \times 10^{-5}$
Koşum 2	0,29948	0,30006	0,20000	$2,87 \times 10^{-5}$
Koşum 3	0,29996	0,29984	0,20002	$9,87 \times 10^{-6}$
Koşum 4	0,30006	0,29964	0,20006	$1,76 \times 10^{-5}$
Koşum 5	0,29985	0,29999	0,19996	$9,94 \times 10^{-6}$
En iyi değer	0,29996	0,29999	0,20000	-
Ortalama değer	0,29989	0,29980	0,20003	-
Standart sapma	0,00021	0,00022	0,00005	-

Tablo 15, YSA ve GA ile elde edilen hasar tespit sonuçlarını karşılaştırılmaktadır. Burada % hata ile tahmin sonucunun gerçek değere göre sapması ifade edilmektedir. Tabloya göre, GA optimizasyonu kullanılarak elde edilen sonuçlar tüm senaryolar için %1'in altında hata oranına sahiptir. YSA ile elde edilen tahmin sonuçları ise GA kadar başarılı değildir. Özellikle kiriş ucuna yakın bölgede hasarlı eleman bulunan senaryolarda

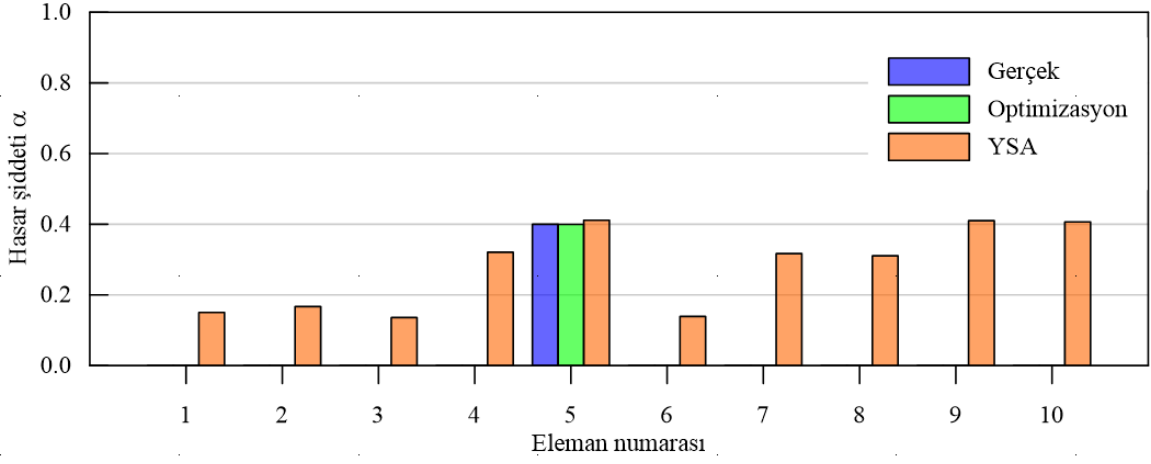
hata yüzdesi çok yüksek değerler almaktadır. Şekil 17’de verilen 25 ara katmanlı YSA ile elde edilen tahmin modeline ait saçılım grafikleri hatırlanırsa, 1-5 nolu elemanlar için tahmin performansları %90 üzerinde iken, 5-10 nolu elemanlarda bu değerler %90 altına düşmektedir. Özellikle 10 nolu eleman için tahmin performansı %65 civarında kalmaktadır. Çalışmada ele alınan hasar senaryolarının çoğu 5 ila 10 arasında hasarlı eleman olacak şekilde seçilmiş olması ve ayrıca tamamen rastgele üretilmiş hasar senaryoları kullanılarak ağın ancak bu seviyede eğitilebilmiş olması, çalışmadaki YSA modelinin tahmin performansının kötü çıkmasının nedenleri olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 15. Konsol kirişte hasar tespit sonuçlarının karşılaştırılması

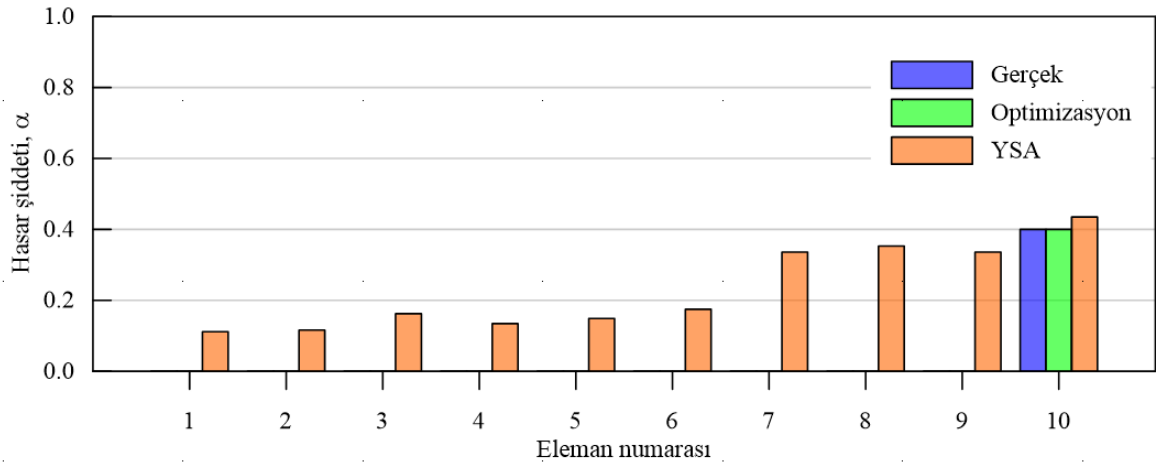
Hasar senaryosu	Gerçek		YSA		GA		Amaç fonksiyonu
	Eleman	Şiddet	Tahmin	Hata %	Tahmin	Hata %	
1	1	0,40	0,42218	5,54	0,39868	0,33	$1,35 \times 10^{-4}$
2	5	0,40	0,41126	2,81	0,39967	0,08	$1,80 \times 10^{-5}$
3	10	0,40	0,43504	8,76	0,39986	0,03	$8,52 \times 10^{-6}$
4	1	0,30	0,27573	8,09	0,29914	0,28	$6,53 \times 10^{-5}$
	2	0,20	0,18658	6,71	0,20100	0,50	
5	5	0,30	0,36837	22,79	0,29961	0,29	$1,66 \times 10^{-5}$
	6	0,20	0,15908	20,46	0,19971	0,14	
6	9	0,20	0,10031	49,84	0,20003	0,01	$2,19 \times 10^{-5}$
	10	0,20	0,10453	47,73	0,19980	0,06	
7	2	0,20	0,24158	20,79	0,19988	0,06	$2,55 \times 10^{-5}$
	3	0,20	0,19482	2,59	0,20001	0,01	
	4	0,20	0,24496	22,48	0,19994	0,03	
8	2	0,20	0,23224	16,12	0,20003	0,01	$1,81 \times 10^{-5}$
	3	0,20	0,20096	0,48	0,19980	0,11	
	9	0,20	0,11181	44,09	0,19999	0,01	
9	2	0,30	0,25835	13,33	0,30005	0,16	$2,22 \times 10^{-5}$
	3	0,20	0,23070	13,88	0,19984	0,08	
	4	0,20	0,11908	40,46	0,19998	0,01	
10	2	0,30	0,25091	16,66	0,29989	0,04	$1,86 \times 10^{-5}$
	3	0,30	0,29542	1,53	0,29980	0,07	
	9	0,20	0,13547	32,26	0,20003	0,01	



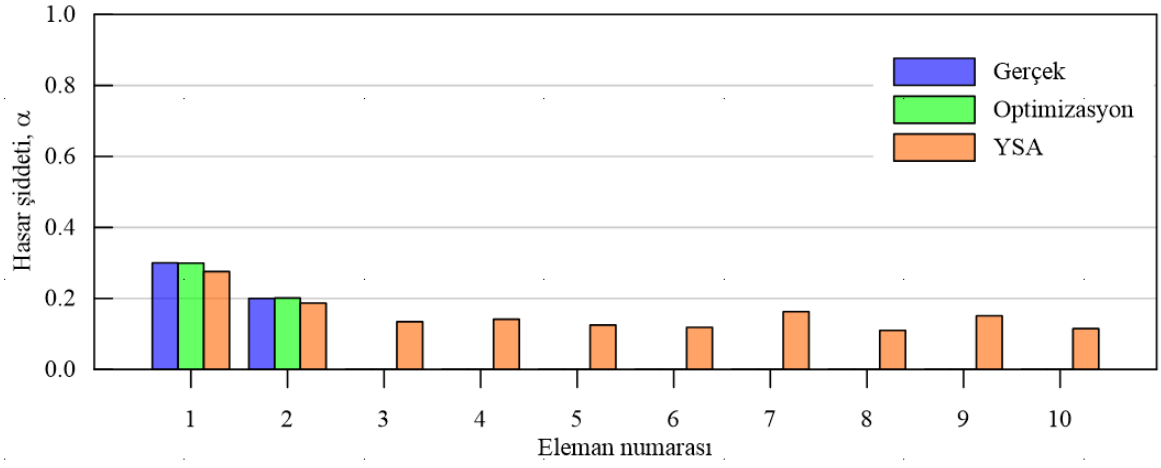
Şekil 21. Hasar-1 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



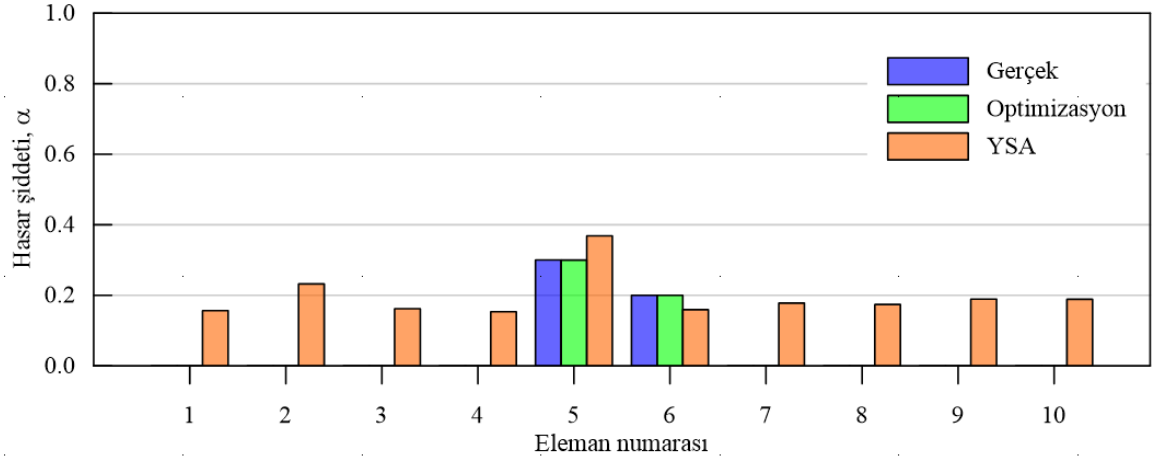
Şekil 22. Hasar-2 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



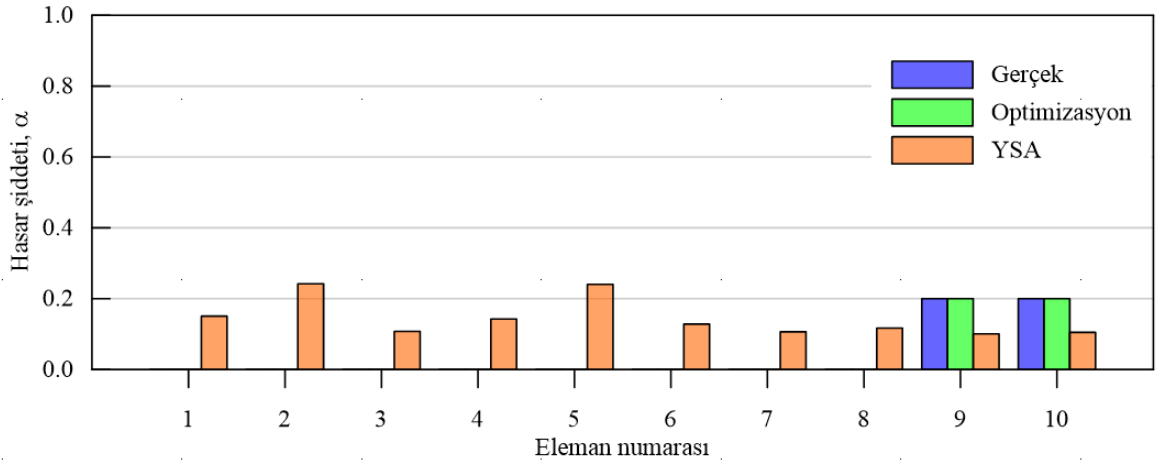
Şekil 23. Hasar-3 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



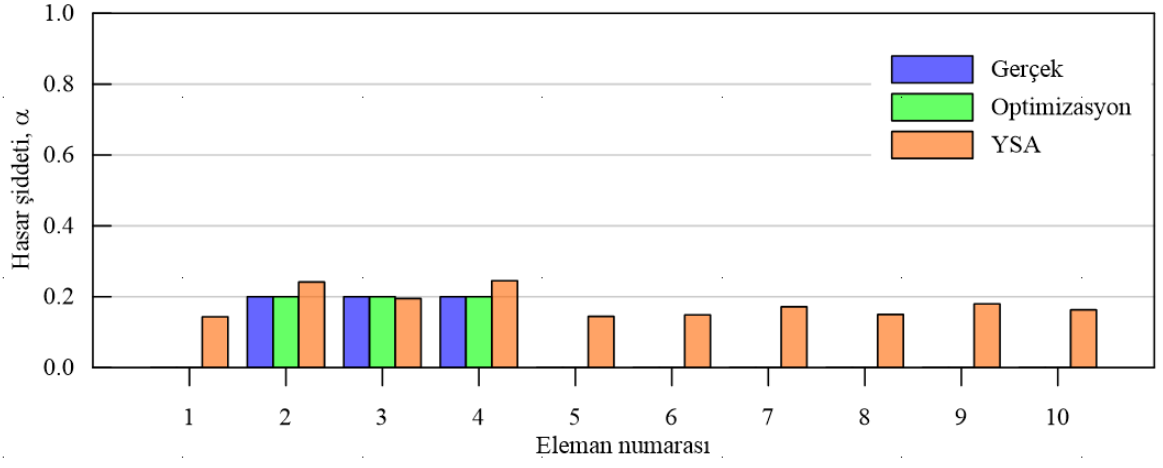
Şekil 24. Hasar-4 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



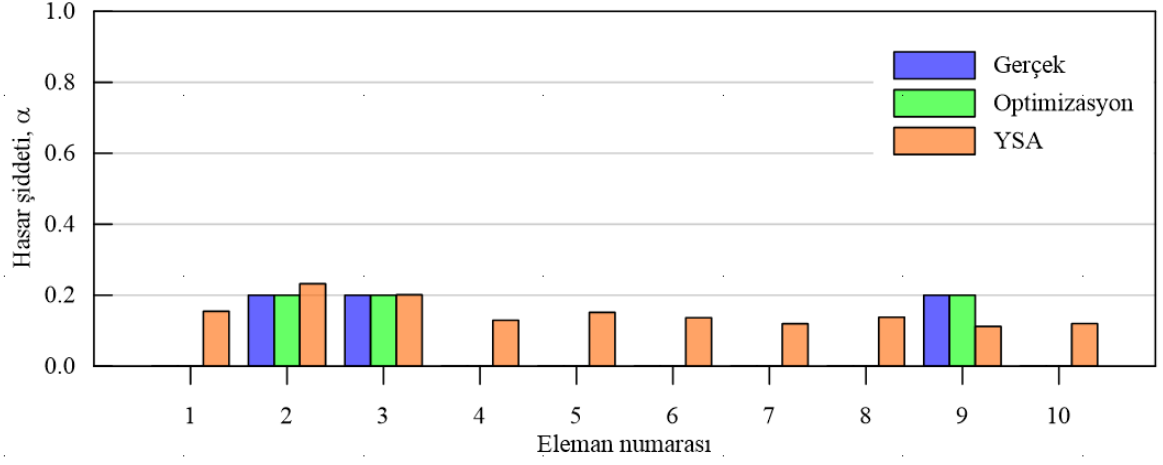
Şekil 25. Hasar-5 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



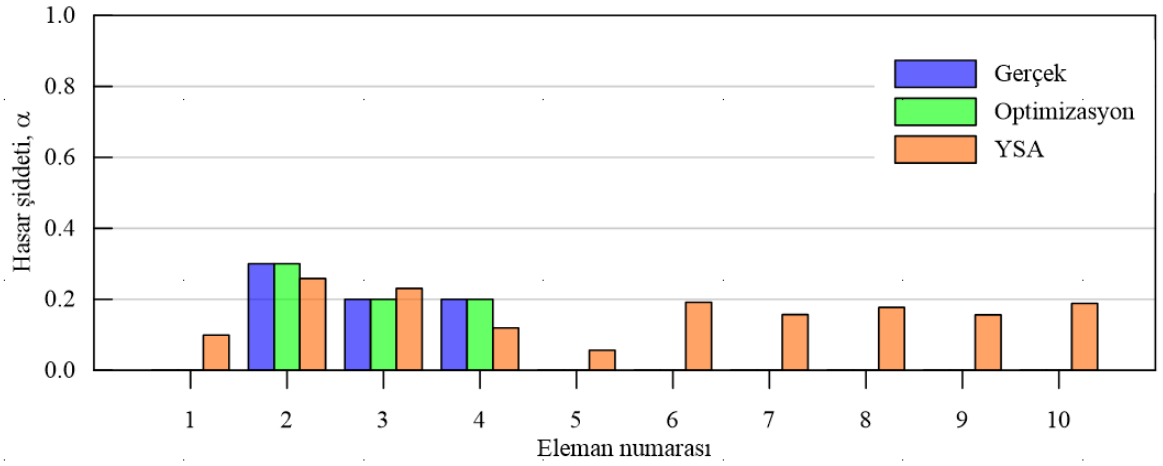
Şekil 26. Hasar-6 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



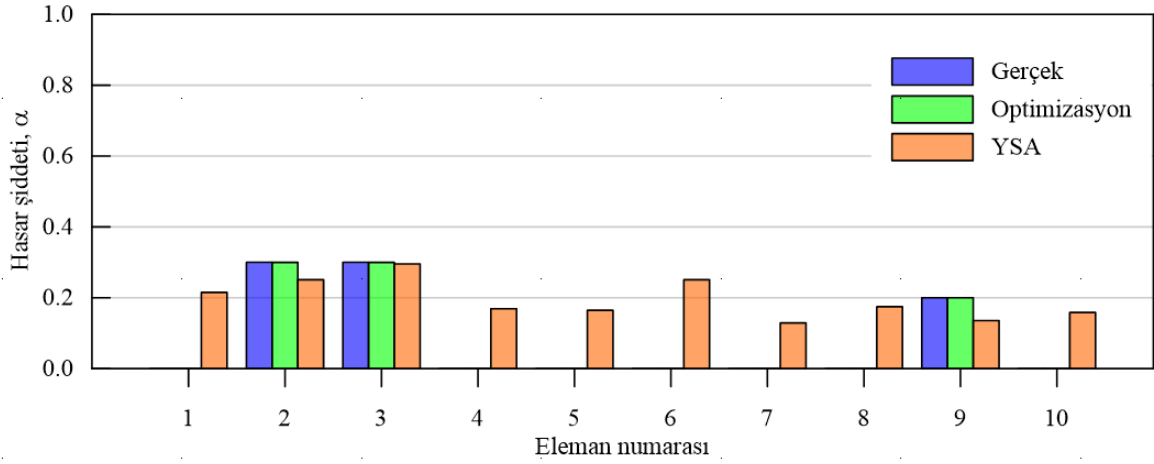
Şekil 27. Hasar-7 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



Şekil 28. Hasar-8 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



Şekil 29. Hasar-9 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar



Şekil 30. Hasar-10 için YSA ve GA ile elde edilen sonuçlar

Şekil 21-30'da her bir hasar senaryosu için YSA ve GA optimizasyonu ile elde edilen hasar tespit sonuçları gösterilmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, Tablo 15'de de ifade edildiği üzere GA optimizasyonu ile tüm hasar senaryoları çok başarılı bir şekilde tespit edilebilmiştir. Optimizasyon işleminde görülmesi çok sıradan olan yanlış alarm elemanlar (hasarsız olduğu halde algoritmanın hasar değeri bulması durumu) ortaya çıkmamıştır. YSA ile elde edilen sonuçlara gelince, hasar senaryolarında belirtilen elemanlarda hasar değeri bulunabilmiştir. Fakat, YSA ile yanlış alarm eleman sayısı çok fazla olup, neredeyse tüm elemanlarda hasar değeri bulunmuştur. Bunun en önemli sebebi, eğitimde kullanılan verinin tamamen rastgele üretilmiş senaryolara ait olmasıdır. Eğitim için hasar senaryolarının üretildiği Design of Experiments aracı, belirlenen aralıklarda tüm elemanlara hasar değeri atayarak senaryoları üretmiş, hiçbir elemana sıfır hasar değeri atamamıştır. Yani, kullanılan ağ modeli, eğitim verisinde olmadığı için hasarsız elemanı bilmemektedir. Bu nedenle, tüm elemanlara değeri atayarak korelasyonu sağlamaya çalışmaktadır. Ancak genel olarak değerlendirildiğinde, bu tip bir eğitim verisiyle dahi göz önüne hasar senaryolarındaki elemanlara en yüksek hasar şiddeti değerlerinin atandığı grafiklerden açık bir şekilde görülmektedir. Ağın hasarsız elemanları da içeren durumların bulunduğu bir eğitim verisiyle eğitilmiş olması durumunda YSA tahminlerinin çok daha başarılı olacağı değerlendirilmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, konsol kirişlerde titreşim verileri ile hasar tespiti problemi ele alınmıştır. Bunun için Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Genetik Algoritma (GA) optimizasyonu kullanılmıştır. Kirişte hasar, ilgili elemanlarda rijitliğin (elastisite modülünün) azaltılması ile tanımlanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde hasar tespitinde YSA'nın etkinliğini değerlendirmek üzere Ansys Workbench'in Design Experiments aracı yardımıyla rastgele hasar senaryoları üretilerek 1000 farklı hasar durumu simüle edilmiştir. Elde edilen bu veri, YSA ağının eğitiminde kullanılmıştır. Daha sonra eğitilen ağ kullanılarak on farklı hasar senaryosu üzerinde performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise GA optimizasyonu ile hasar tespiti uygulaması yapılmıştır. Bunun için yapının iki durumuna ait (sayısal model ve gerçek model) frekans ve mod şekli değişimlerini göz önüne alan bir amaç fonksiyonunu minimum yapan rijitlik kaybı seti araştırılmıştır. Gerçekte yapı üzerinden tüm noktalardan ölçüm alınması mümkün olmadığından, eldeki sınırlı veriyi sonlu eleman modelinden elde edilenle karşılaştırmak amacıyla sayısal modelde Guyan yöntemiyle model indirgeme işlemi yapılmıştır. YSA ve GA'nın performansı değerlendirilmiş ve ayrıca birbirleriyle karşılaştırma yapılmıştır.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Rastgele üretilen 1000 senaryoya ait veri seti ile ağ eğitiminde göz önüne alınan problem için en iyi performans 25 ara katmanlı tahmin modeli için elde edilmiştir. Bu ağ modeli, kirişte mesnetli uç ile kiriş ortasında kalan bölgedeki elemanlarda %90 üzerinde, kirişin ortasından uca doğru olan bölgedeki elemanlar için ise %90 altında performans göstermiştir.
2. Çalışmada göz önüne alınan hasar senaryolarında YSA ile hasar tespitinde kötü performans elde edilmektedir. Bunda en önemli etken, ağın eğitiminde kullanılan verinin kirişin her elemanına hasar değeri atanmış senaryolardan elde edilmiş olmasıdır. Yani kullanılan model hasarsız elemanı bilmemektedir. Dolayısıyla da her elemana hasar değeri atayarak korelasyonu yakalamaya çalışmaktadır. Ancak yine de kullanılan 25 katmanlı YSA ile göz önüne alınan hasar senaryoları için ilgili hasarlı elemanlarda en yüksek hasar şiddetleri elde edilebilmiştir. Bu, YSA'nın hasar tespiti için potansiyelini ortaya koyan önemli bir sonuçtur.

3. GA ile yapılan optimizasyon tabanlı hasar tespitinde tüm senaryolarda hasarlı elemanlar çok iyi bir doğrulukla elde edilebilmektedir. Tüm senaryolarda, amaç fonksiyonu $10^{-5} \sim 10^{-6}$ mertebelerine yakınsamıştır. Hem tekli hem de çoklu hasar senaryolarında tahmin değerlerinin standart sapması son derece küçük olup, bu durum, göz önüne alınan amaç fonksiyonu ve optimizasyon parametrelerinin son derece tutarlı olduğunu göstermektedir.
4. YSA'nın hasarsız elemanları da içeren durumların bulunduğu bir eğitim verisiyle eğitilmiş olması durumunda YSA tahminlerinin çok daha başarılı olacağı ve GA optimizasyonunun gösterdiği performansa ulaşabileceği değerlendirilmektedir.

Gerek literatür incelemesi ve gerekse bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan hareketle, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması ümit edilen bazı öneriler aşağıda verilmektedir:

1. Çalışmada sadece konsol kirişler göz önüne alınmıştır. Farklı sınır koşulları için çalışma tekrarlanabilir. Özellikle simetrik sınır koşulları (basit kiriş, iki ucu ankastre kiriş gibi) durumunda kullanılan frekans ve mod şekillerine dayalı hibrit amaç fonksiyonu hasarlı elemanın olduğu yerde değil de tam simetriğinde çıkmasına yol açabilmektedir. Bu durumun iyi eğitilmiş bir YSA ile giderilebileceği değerlendirilmektedir.
2. Literatürde yeni olan optimizasyon algoritmaları ile çalışma tekrarlanabilir.
3. Optimizasyon, YSA eğitiminde gerekli parametrelerin optimal değerlerinin bulunması için kullanılarak, çalışma bu optimal değerler ile tekrarlanabilir.
4. YSA ağıının eğitimi için veri üretimini daha sistematik yapan bir algoritma geliştirilebilir. Böylece, YSA tahmin performansı artırılabilir.
5. Literatürde daha yeni olan Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme gibi daha üst teknikler kullanılarak çalışma tekrarlanabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdel Wahab, M. M., & De Roeck, G. (1999). Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario. *Journal of Sound and Vibration*, 226(2), 217–235.
- Abdulkareem, A. A., & Hadi, A. P. D. N. H. (2012). Damage Detection and Assessment of Stiffness and Mass Matrices in Curved Simply Supported Beam Using Genetic Algorithm.
- Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion—Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration*, 37, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.chemg.eo.2006.02.014>
- Altunışık, A. C., Okur, F. Y., & Kahya, V. (2017). Modal Parameter Identification and Vibration Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam. *Engineering Failure Analysis*, 79, 154–170. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.026>
- Amafabia, D. M., Montalvão, D., David-West, O., & Haritos, G. (2017). A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures. *Structural Durability & Health Monitoring*, 11, 91–147.
- ANSYS, (2013). Swanson Analysis System, USA
- Avcı, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). A Review of Vibration-Based Damage Detection in Civil Structures: From Traditional Methods to Machine Learning and Deep Learning Applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077>
- Bakhary, N. (2008). Structural Condition Monitoring and Damage Identification With Artificial Neural Network. Dissertation, University of Western Australia, Perth, WA, Australia.
- Bakhary, N., Hao, H., & Deeks, A. (2010). Substructuring Technique for Damage Detection Using Statistical Multi-Stage Artificial Neural Network. *Advances in Structural Engineering*, 13(4), 619–639.
- Bakhary, N., Hao, H., & Deeks, A. J. (2010). Damage Detection Using Artificial Neural Network With Consideration of Uncertainties. *Engineering Structures*, 32(11), 3683–3692. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.019>
- Baki, O. T. (2016). Atıksu Arıtma Tesislerinde Biyokimyasal Oksijen İhtiyacının Farklı Yapay Zeka Teknikleri ile Modellenmesi: Antalya Hurma Atıksu Arıtma Tesisi Örneği. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

- Baki, O. T., Karadeniz, G. E., & Bayram, A. (2019). Estimation of Manganese (II) Ion Concentration From Turbidity Measurements From a Dam Reservoir: A Case Study From the Erfelek Dam (Sinop), Northeastern Turkey. *International The 1st Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering Conference (iSTE-CE'2019)*, Haziran, Hatay, Proceedings, 630–639.
- Bandara, R. P., Chan, T. H., & Thambiratnam, D. P. (2014). Structural Damage Detection Method Using Frequency Response Functions. *Structural Health Monitoring*, 13(4), 418–429.
- Begambre, O., & Laier, J. E. (2009). A Hybrid Particle Swarm Optimization–Simplex Algorithm (PSOS) for Structural Damage Identification. *Advances in Engineering Software*, 40, 883–891.
- Benítez, J. M., Castro, J. L., & Requena, I. (1997). Are Artificial Neural Networks Black Boxes? *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8(5), 1156–1164.
- Bilgehan, M., Gurel, M. A., Pekgokgoz, R. K., & Kisa, M. (2012). Buckling Load Estimation of Cracked Columns Using Artificial Neural Network Modeling Technique. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(4), 568–579.
- Bishop, C. M. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: Oxford University Press.
- Boos, E., Gonçalves, D. S., & Bazán, F. S. V. (2024). Levenberg-Marquardt Method With Singular Scaling and Applications. *Applied Mathematics and Computation*, 474, 128688.
- Buezas, F. S., Rosales, M. B., & Filipich, C. P. (2010). Damage Detection With Genetic Algorithms Taking Into Account a Crack Contact Model. *Engineering Fracture Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.11.008>
- Casciati, S. (2008). Stiffness Identification and Damage Localization via Differential Evolution Algorithms. *Structural Control and Health Monitoring*, 15, 436–449. <https://doi.org/10.1002/stc.236>
- Castellini, P., & Marco Revel, G. (2000). Experimental Technique for Structural Diagnostic Based on Laser Vibrometry and Neural Networks. *Shock and Vibration*, 7(6), 381–397.
- Cawley, P., & Adams, R. D. (1979). The Location of Defects in Structures From Measurements of Natural Frequencies. *Journal of Strain Analysis*, 14(2), 49–57.
- Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C. (2003). Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2, 257–267. <https://doi.org/10.1177/1475921703036169>

- Cheung, S. O., Tam, C. M., & Harris, F. C. (2002). Genetic Algorithm and Its Application to the Optimum Layout of Precast Yard. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(3), 180–186.
- Chinchalkar, S. (2001). Determination of Crack Location in Beams Using Natural Frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 247, 417–429.
- Chou, J. H., & Ghaboussi, J. (2001). Genetic Algorithm in Structural Damage Detection. *Computers & Structures*, 79(14), 1335–1353. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00020-5)
- Clerc, M. (2006). Particle Swarm Optimization. ISTE Ltd
- Das, S., & Dhang, N. (2022). Damage Identification of Structures Using Incomplete Mode Shape and Improved TLBO-PSO With Self-Controlled Multi-Stage Strategy. *Structures*, 35, 1101–1124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.089>
- Das, S., Saha, P., & Patro, S. K. (2016). Vibration-Based Damage Detection Techniques Used for Health Monitoring of Structures: A Review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 477–507. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0168-5>
- Deb, K. (2000). Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples. Prentice-Hall.
- Dinh-Cong, D., Dang-Trung, H., & Nguyen-Thoi, T. (2018). An Efficient Approach for Optimal Sensor Placement and Damage Identification in Laminated Composite Structures. *Advances in Engineering Software*, 119, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.02.005>
- Dinh-Cong, D., Nguyen-Thoi, T., & Nguyen, D. T. (2021). A Two-Stage Multi-Damage Detection Approach for Composite Structures Using MKECR-Tikhonov Regularization Iterative Method and Model Updating Procedure. *Applied Mathematical Modelling*, 90, 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.002>
- Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Dong-Trung, H., & Nguyen-Thoi, T. (2017a). An Efficient Multi-Stage Optimization Approach for Damage Detection in Plate Structures. *Advances in Engineering Software*, 112, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.06.015>
- Dinh-Cong, D., Vo-Duy, T., Nguyen-Minh, N., Ho-Huu, V., & Nguyen-Thoi, T. (2017b). A Two-Stage Assessment Method Using Damage Locating Vector Method and Differential Evolution Algorithm for Damage Identification of Cross-Ply Laminated Composite Beams. *Advanced Structural Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1369433217695620>

- Doebling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *Shock and Vibration Digest*, 30, 91–105. <https://doi.org/10.1177/058310249803000201>
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review. Los Alamos, NM.
- Fallahian, S., Joghataie, A., & Kazemi, M. T. (2018). Structural Damage Detection Using Time Domain Responses and Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) Algorithm. *Scientia Iranica*, 25, 3088–3100. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4238>
- Farrar, C. R., & Jauregui, D. A. (1998). Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Bridge: I. Experiment. *Smart Materials and Structures*, 7(5), 704.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons.
- ForumGercek. (2014). Yapay Zeka Amacı ve Tarihçesi-Gelecekte Yapay Zeka. Alındığı tarih 22 Ağustos 2014, <http://www.forumgercek.com/bilimsel-calismalar-ve-haberler/95658-yapay-zeka-amaci-ve-tarihcesi-gelecekte-yapay-zeka.html>
- Friswell, M. I., & Penny, J. E. T. (1997). Is Damage Detection Using Vibration Measurements Practical? *Journal of Sound and Vibration*, 205(4), 631–649.
- Giannakeas, I. N., Sharif Khodaei, Z., & Aliabadi, M. H. (2023). An Up-Scaling Temperature Compensation Framework for Guided Wave-Based Structural Health Monitoring in Large Composite Structures. *Structural Health Monitoring*, 22(2), 777–798.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- Gomes, H. M., & Silva, S. M. (2008). Genetic Algorithms in Damage Detection: Modal Analysis and Optimization. *Journal of Physics: Conference Series*, 97, 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/97/1/012017>
- González, I., & Karoumi, R. (2015). BWIM Aided Damage Detection in Bridges Using Machine Learning. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(5), 715–725.
- Guyan, R. J. (1965). Reduction of Stiffness and Mass Matrices. *AIAA Journal*, 3(2), 380.
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., & Beale, M. H. (1996). *Neural Network Design*. Boston, MA: PWS Publishing.

- Hakim, S. J., & Razak, H. A. (2013). Structural Damage Detection of Steel Bridge Girder Using Artificial Neural Networks and Finite Element Models. *Structural Health Monitoring*, 14(4).
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
- Hu, C. S., & Afzal, M. T. (2006). A Statistical Algorithm for Comparing Mode Shapes of Vibration Testing Before and After Damage in Timbers. *Journal of Wood Science*, 52, 348–352.
- Huang, T., Chaves-Vargas, M., Yang, J., & Schröder, K.-U. (2016). A Baseline-Free Damage Detection Method Based on Node Displacement in Mode Shape. 8th European Workshop on Structural Health Monitoring. Bilbao, Spain.
- Huang, Y., & Sun, Y. (2019). Structural Damage Identification Using Modal Data With a Data-Driven Approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 124, 484–500. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.044>
- Jang, W. S. (2004). Optimizing Construction Site Space Layout Using Genetic Algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(5), 725–732.
- 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.
- Karaca, S. (2016). Çatlaklı Elastik Kirişlerin Dinamik Davranışlarının Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Trabzon.
- Khan, A., Ko, D. K., Lim, S. C., & Kim, H. S. (2019). Structural Vibration-Based Classification and Prediction of Delamination in Smart Composite Laminates Using Deep Learning Neural Network. *Composites Part B: Engineering*, 161, 586–594.
- Khoury Chalouh, E., Gonzalez, I., Gentile, C., & Karoumi, R. (2017). Damage Detection in Railway Bridges Using Machine Learning: Application to a Historic Structure. *Procedia Engineering*, 199, 1931–1936.
- Kim, H., & Melhem, H. (2004). Damage Detection of Structures by Wavelet Analysis. *Engineering Structures*, 26(3), 347–362.
- Kohonen, T. (1988). An Introduction to Neural Computing. *Neural Networks*, 1, 3–6.
- Koo, K. Y., Lee, J. J., & Yun, C. B. (2008). Damage Detection of Bridge Structures Using Modal Flexibility Under Temperature Variations. *Proceedings of the 17th World*

- Congress, The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, 15762–15767. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.1828>
- Laier J. E., & Villalba, J. D. (2015). Ensuring Reliable Damage Detection Based on the Computation of the Optimal Quantity of Required Modal Data. *Computers and Structures*, 147, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.09.020>
- Lapedes, A., & Farber, R. (1987). How Neural Nets Work. In *Neural Information Processing Systems*, Denver, Colorado, USA.
- Lee, Y., & Cho, S. (2016). SHM-Based Probabilistic Fatigue Life Prediction for Bridges Based on FE Model Updating. *Sensors*, 16(3), 317.
- Li, H., & Love, P. E. D. (2000). Genetic Algorithm for Solving the Site-Level Unequal-Area Facility Layout Problem. *Automation in Construction*, 9(2), 217–226.
- Lin, J. F., Xu, Y. L., & Law, S. S. (2018). Structural Damage Detection-Oriented Multi-Type Sensor Placement With Multi-Objective Optimization. *Journal of Sound and Vibration*, 422, 568–589. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.01.047>
- Maia, N. M. M., & Silva, J. M. M. (1997). Modal Analysis Identification Techniques. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), 29–40.
- Malekjafarian, A., Golpayegani, F., Moloney, C., & Clarke, S. (2019). A Machine Learning Approach to Bridge-Damage Detection Using Responses Measured on a Passing Vehicle. *Sensors*, 19(18).
- Marinone, G., Cantini, A., & Salvadori, A. (2018). Model Order Reduction for Large-Scale Dynamical Systems With Applications. *Computational Mechanics*, 62(5), 1179–1196.
- Mathworks Inc. (1998). MATLAB 5.3. Neural Network Toolbox: User's Guide (5th Printing, Version 3). Natick, MA: Mathworks Inc.
- Mawdesley, M. J., & Al-Jibouri, S. H. (2002). Augmented Genetic Algorithm for Cost Optimization of Construction Site Layouts. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(6), 418–425.
- Mete, B., Nacar, S., Bayram, A., & Baki, O. T. (2023). Estimation of Total Suspended Solids Concentration in Streams Using Regression and Artificial Neural Networks Methods. *Journal of Natural Hazards and Environment*, 9(1), 125–135.
- Mete, T. (2008). Kesikli Bir Biyoreaktörde Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Minak, G., Palazzetti, R., Trendafilova, I., & Zucchelli, A. (2010). Localization of a Delamination and Estimation of Its Length in a Composite Laminate Beam by the VSHM and Pattern Recognition Methods. *Mechanics of Composite Materials*, 46(4), 387–394.
- Moradi, S., Razi, P., & Fatahi, L. (2011). On the Application of Bees Algorithm to the Problem of Crack Detection. *Computers and Structures*, 89, 2169–2175.
- Nacar, S. (2014). Farklı Yapay Zeka Yöntemleriyle Günlük Akarsu Akım Değerlerinin Tahmini-Haldizen Deresi Örneği. *Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray*.
- Nandwana, B. P., & Maiti, S. K. (1997). Detection of the Location and Size of a Crack in Stepped Cantilever Beams Based on Measurements of Natural Frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 203(3), 435–446.
- Nayyar, A., Baneen, U., Ahsan, M., Zilqurnain Naqvi, S. A., & Israr, A. (2022). Damage Detection Based on Output-Only Measurements Using Cepstrum Analysis and a Baseline-Free Frequency Response Function Curvature Method. *Science Progress*, 1, 1–25.
- Negru, I., Gillich, G. R., Praisach, Z. I., Tufoi, M., & Gillich, N. (2015). Natural Frequency Changes Due to Damage in Composite Beams. *Journal of Physics: Conference Series*, 628(1), 012091.
- Nhamage, I. A., Lopez, R. H., & Miguel, L. F. F. (2016). An Improved Hybrid Optimization Algorithm for Vibration-Based Damage Detection. *Advances in Engineering Software*, 93, 47–64. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.12.003>
- Öztemel, E. (2006). *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). Damage Detection From Changes in Curvature Mode Shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 321–332. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B)
- Radzienski, M., Krawczuk, M., & Palacz, M. (2011). Improvement of Damage Detection Methods Based on Experimental Modal Parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38(2), 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.10.005>
- Ramón y Cajal, S. (1911). *Histologie du Systémenerveux de l’Hommeet ds Vertébrés*.
- Ren, F., Giannakeas, I. N., Sharif Khodaei, Z., & Aliabadi, M. H. F. (2023). Sensitivity Analysis of Temperature Effects on Guided Wave-Based Damage Detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 196, 110322.
- Ren, W. X., & De Roeck, G. (2002). Structural Damage Identification Using Modal Data I: Simulation Verification. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 128, 8795.

- Rosenblueth, E. (1981). Point Estimates for Probability. *Applied Mathematical Modelling*, 5, 329–335.
- Ruffels, A., Gonzalez, I., & Karoumi, R. (2020). Model-Free Damage Detection of a Laboratory Bridge Using Artificial Neural Networks. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*.
- Rytter, A. (1993). *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Doktora Tezi, Aalborg University.
- Sahu, S., & Nayak, B. B. (2020). An Adaptive Genetic Algorithm Method for Damage Detection in Structural Elements. *Materials Today: Proceedings*, 26, 581–585. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.162>
- Said, H., & El-Rayes, K. (2013). Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(4), 319–328.
- Salawu, O. S. (1997). Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency: A Review. *Engineering Structures*, 19, 718–723.
- Samir, K., Idir, B., Serra, R., Brahim, B., & Aicha, A. (2015). 11th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2015), *Journal of Physics: Conference Series*, 628, 012035.
- Seyedpoor, S. M. (2012). A Two-Stage Method for Structural Damage Detection Using a Modal Strain Energy-Based Index and Particle Swarm Optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 47, 1–8.
- Shu, J., Zhang, Z., Gonzalez, I., & Karoumi, R. (2013). The Application of a Damage Detection Method Using Artificial Neural Network and Train-Induced Vibrations on a Simplified Railway Bridge Model. *Engineering Structures*, 52, 408–421.
- Singh, K. P., Ankita, B., Amrita, M., & Gunja, J. (2009). Artificial Neural Network Modeling of the River Water Quality—A Case Study. *Ecol. Model.*, 220, 888–895.
- Sohn, H., & Farrar, C. R. (2001). Damage Diagnosis Using Time Series Analysis of Vibration Signals. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(6), 586–594.
- Sotoudehnia, E., Shahabian, F., & Aftabi Sani, A. (2019). A New Method for Damage Detection of Fluid-Structure Systems Based on Model Updating Strategy and Incomplete Modal Data. *Ocean Engineering*, 187, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106200>
- Stubbs, N., & Kim, J. T. (1996). Damage Localization in Structures Without Baseline Modal Parameters. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 34, 1644–1649.

- Sumangala, K., & Jeyasehar, C. A. (2011). A New Procedure for Damage Assessment of Prestressed Concrete Beams Using Artificial Neural Network. *Advanced Art of Neural Systems*, 2011, 1–9.
- Şahin, M., & Shenoi, R. A. (2003). Quantification and Localization of Damage in Beamlike Structures by Using Artificial Neural Networks With Experimental Validation. *Engineering Structures*, 25(14), 1785–1802.
- Tachi, S. E., Ouerdachi, L., Remaoun, M., Derdous, O., & Boutaghane, H. (2016). Forecasting Suspended Sediment Load Using Regularized Neural Network: Case Study of the Isser River (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 29(1), 75.
- Teng, S., Chen, X., Chen, G., Cheng, L., & Bassir, D. (2022a). Structural Damage Detection Based on Convolutional Neural Networks and Population of Bridges. *Measurement*, 202, 111747. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111747>
- Teng, Y., Wang, Z., & Zhang, W. (2022b). Application of Convolutional Neural Networks in Bridge Damage Identification Based on Modal Data. *Journal of Sound and Vibration*, 532, 115718. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.115718>
- Uygunoğlu, T., & Yurtcu, Ş. (2006). Yapay Zeka Tekniklerinin İnşaat Mühendisliği Problemlerinde Kullanımı. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1), 61–70.
- Wang, S. (2013). Damage Detection in Offshore Platform Structures From Limited Modal Data. *Applied Ocean Research*, 41, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.02.004>
- Weinstein, J., Sanayei, M., & Brenner, B. (2018). Bridge Damage Identification Using Artificial Neural Networks. *Journal of Bridge Engineering*, 23(11).
- Worden, K., & Staszewski, W. J. (2000). Impact Location and Quantification on a Composite Panel Using Neural Networks and a Genetic Algorithm. *Strain*, 36(2). <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2000.tb01175>
- Yang, X. B., Liu, Y., & Jiang, J. (2007). Damage Detection in Structures Using a Combination of Frequency Shift and Mode Shape Curvature. *Journal of Sound and Vibration*, 304(1-2), 78–89.
- Yurtoğlu, H. (2005). Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği (Uzmanlık Tezi). *Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Zhang, Y., Zhou, K., & Tang, J. (2024). Piezoelectric Impedance-Based High-Accuracy Damage Identification Using Sparsity Conscious Multi-Objective Optimization Inverse Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 209, 111093. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111093>

Zhang, Z., He, M., Liu, A., Singh, H. K., Ramakrishnan, K. R., & Hui, D. (2018). Vibration-Based Assessment of Delaminations in FRP Composite Plates. *Composites Part B: Engineering*, 144, 254–266.



ÖZGEÇMİŞ

Aghamehdi DADASHOV, ilk, orta ve lise öğrenimini Bakü'de tamamladı. 2018 yılında Khazar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2022 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümündeki lisans eğitimini yüksek onur öğrencisi olarak bölüm ikinciliği ile tamamladı. Aynı yıl Türkiye burslusu olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı zamanda KTÜ'de Azerbaycan topluluğunun başkan yardımcısı olan DADASHOV, İngilizce ve orta düzeyde Rusça bilmektedir.

