

# Kiriş Benzeri Yapılarda Titreşim Temelli Analizler ve Yapay Sinir Ağları ile Hasar Tespiti

Melin Şahin

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
msahin@metu.edu.tr

## Özet

*Bu çalışmada kiriş benzeri yapılardaki hasarın tespiti titreşim temelli analizler kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan teknik, yapının titreşim karakteristiklerini (doğal frekans ve eğrilik biçim şekillerini) yapay sinir ağlarına girdi olarak vermekte ve bu parametrelerin değişik kombinasyonlarının yapıdaki hasarın şiddet ve yer tespiti üzerindeki etkisini incelemektedir. Çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, sağlam ve hasarlı çelik kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modelleri oluşturulmuş ve ilk üç eğilme kipideki doğal frekans değerleri ve yerdeğiştirme biçim şekilleri elde edilmiştir. Daha sonra bu biçim şekilleri düzelenmiş ve merkezi fark yöntemi kullanılarak kirişin eğrilik biçim şekilleri oluşturulmuştur. Hasara bağlı olarak ortaya çıkan doğal frekanstaki yüzde azalma değerleri, sağlam ve hasarlı kirişlerin eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farkın azami büyüklüğü ve bu büyüklüğün yeri hasar tespit kriterleri olarak seçilmiş ve tasarlanmış yapay sinir ağlarına veri olarak iletilmiştir. Araştırmanın ikinci bölümünde sağlam ve hasarlı çelik kirişler üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış, hasarın şiddeti ve yerine ait yapay sinir ağı tahminlerini içeren önceki çalışmalarla karşılaştırılarak bu tahminlerin doğruluğu araştırılmıştır.*

## 1. Giriş

Hasar, serviste buldukları süre zarfında birçok mühendislik yapısında ortaya çıkan ve yapıların mekanik özelliklerini değiştirerek mukavemetlerinin azalmasına neden olan önemli bir unsurdur. Bu nedenle, mekanik bütünlüklerinin devamlığını sağlamak için servis hayatları boyunca yapılar düzenli şekilde kontrol edilmeli ve izlenmelidir. Mühendislik yapılarının hasar tespitinde tahribatsız muayene metodları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür rutin bakımlar için yapı servis dışına alınmalı, hasarlı parçanın yeri önceden bilinmeli ve bu yer denetim için ulaşılabilir olmalıdır. Belirtilmiş olan sınırlamalar dahilinde yoğun iş gücü gerektiren bu tür metodlar zaman almakta ve yüksek maliyet

içermektedir. Bu noktada yapılması gereken, entegre edilmiş algılayıcılarıyla hasar hakkında önceden bilgi verebilen, akıllı algoritmalar kullanan ve örüntü tanıma kabiliyetine sahip bir sistem tasarlanmasıdır.

Hasar tespitindeki hiyerarşi [1] dört ana bölüme toplanabilir.

1. Seviye: Yapıda hasar bulunup bulunmadığına karar verilmesi
2. Seviye: Hasarın yerinin tespiti
3. Seviye: Hasarın şiddetinin tespiti
4. Seviye: Yapının kalan ömrünün tahmini

Yapının titreşim cevapları hasarın varlığı hakkında doğrudan bilgi vereceğinden birinci seviyede hasar tespiti düz problem olarak kabul edilirken, ikinci ve üçüncü seviye hasar tespitleri ters problem kategorisinde incelenirler. Bunlara ilaveten, yapı üzerinde farklı geometrik yerlerde bulunan değişik şiddetlerdeki hasarların yarattığı etkiler aynı olabileceğinden problem tekçözümlü değildir. Adaptasyon, genelleme, soyutlama ve gerçek zamanda çalışma özellikleri sebebiyle yapay sinir ağları [2,3] bu tür problemlerin çözümünde alternatif olarak kullanılmaktadır. Literatürde isotropik [4,5,6] ve kompozit [7,8,9,10,11] malzelerden oluşan yapılardaki hasarın şiddet ve yer tespitine yönelik çalışmalara da sıklıkla rastlanmaktadır. Fakat deneysel doğrulamaların bulunduğu çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu nedenle çalışmada, ikinci ve üçüncü seviyede hasar tespitinde kullanılacak deneysel olarak doğrulanmış algoritmanın tasarlanması hedeflenmiştir.

## 2. Kirişin modellenmesi

Modele bağımlı titreşim temelli analizlerde deneysel çalışmalar öncesinde detaylı ve doğru tasarlanmış sayısal model yaratılması önemlidir. Bu çalışmada sağlam ve hasarlı kirişlerin modellenmesinde paket program olan ANSYS 6.1@ [12] kullanılmıştır. Kirişler, 450mm uzunluğunda (L), 40mm genişliğinde ve 3mm kalınlığında çelikten ibarettir. Burada hasarlı olarak adlandırılan ve deneylerde kullanılan yapı, üzerinde orta noktası ankastre uçtan 0.4556L uzaklıkta olan, 2mm derinliğinde (%66.67 hasar), 10mm genişliğinde yiv bulduran kiriştir. Kirişlerin modellenmeleri sırasında dört düğümlü, her düğüm noktasında altı

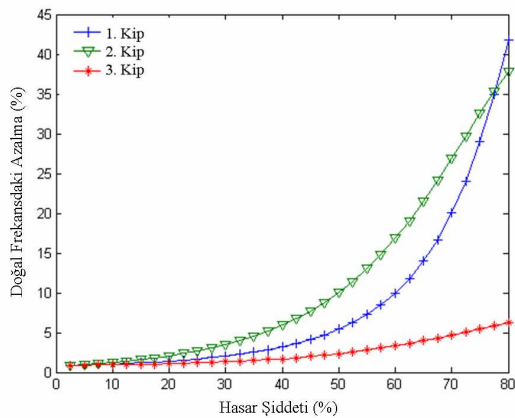
serbestlik derecesine sahip, iki-boyutlu, doğrusal kabuk elemanlar (SHELL63) kullanılmıştır. Ankastre-serbest mesnet konfigürasyonunda eğilme titreşimlerinin ilk üç doğal frekansı (Çizelge 1) ve bu frekanslara karşılık gelen yerdeğiştirme biçim şekilleri modal analizler sonucunda elde edilmiştir. Daha sonra, bu biçim şekilleri düzgelenmiş ve merkezi fark yöntemi kullanılarak kirişlerin eğrilik biçim şekilleri [13] oluşturulmuştur.

**Çizelge 1.** Ankastre çelik kirişlerin doğal frekansları: Sonlu elemanlar çözümü

Kip	Sağlam Kiriş [Hz]	Hasarlı Kiriş [Hz]	Hasarlı / Sağlam
1. Eğilme	12.3859	10.7415	0.8672
2. Eğilme	77.6044	60.3581	0.7778
3. Eğilme	217.5093	212.4555	0.9768

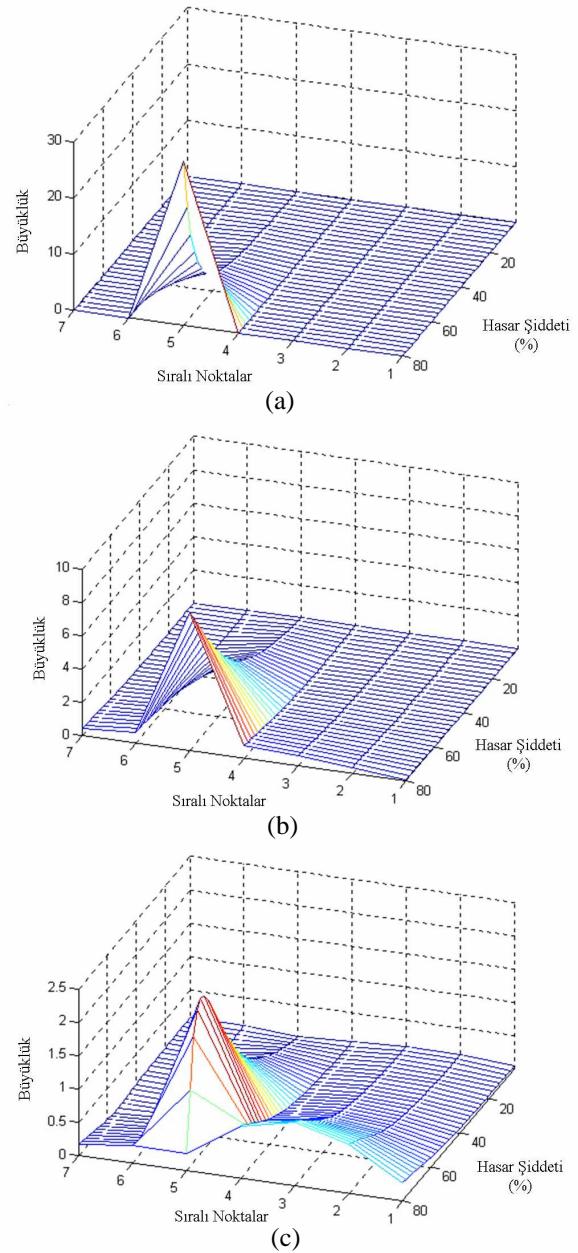
### 3. Hasar senaryoları ve öznelilik bulma çalışmaları

Sonlu elemanlar modelinde, kiriş üzerindeki 15 farklı yerde (Çizelge 2) 10 mm genişliğinde seçilen elemanların kalınlıklarının 32 değişik şiddette (%2.5' tan başlayarak %80'e kadar) azaltılması suretiyle 480 lokal hasar senaryosu yaratılmıştır. Öznelilik bulma çalışmaları ise iki ana bölümde toplanmıştır. Birinci bölümde, hasarların şiddet ve kiriş üzerindeki yerlerine bağlı olarak değişen doğal frekanslardaki yüzde azalma miktarları incelenmiş ve Şekil 1 de ankastre uçtan 0.44L uzaklıkta modellenmiş hasarların ilk üç frekans üzerindeki etkisi örnek olarak gösterilmiştir. Bu miktarlar hasarın yer ve şiddetine bağlı olarak her kipte farklılık gösterdiğinden kirişin birden fazla (ilk üç) kipinden elde edilen titreşim bilgileri hasar tespitinde kullanılmıştır.



**Şekil 1.** Yeri 0.44L olan değişik şiddetteki hasarların doğal frekanslarda yarattığı yüzde azalma miktarları. İkinci bölümde ise, sağlam ve hasarlı kirişlerin eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farklılığın değişik şiddetteki hasarların kiriş üzerindeki yerine bağlı olarak değişimi ilk üç kip gözönüne alınarak

incelenmiş ve 0.44L deki hasarlar için bu değişimler Şekil 2 de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Sağlam ve hasarlı kirişlerin eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farklılığın, yeri 0.44L olan değişik şiddetteki hasarlarla değişimi: (a) 1. Kip (b) 2. Kip (c) 3. Kip

Şekildeki her sıralı nokta deneysel çalışmada kullanılan uzama ölçerlerin kiriş üzerindeki yerlerine karşılık gelmektedir. Bu çalışmanın bir başka amacı da titreşim temelli analizlerden gelecek olan verileri (yapay sinir ağı girdilerini) olabildiğince azaltmak ve diğer tarafta hasar tahminlerinde yüksek doğruluk sağlamaktır. Bu nedenle, doğal frekanslardaki yüzde azalma, sağlam ve hasarlı kirişlerin eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farklılığın azami büyüklüğü ve bu büyüklüğün kiriş

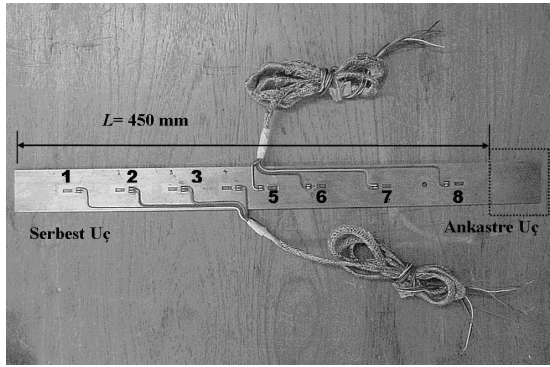
üzerindeki geometrik yeri öznitelik olarak seçilmiş ve tasarlanmış yapay sinir ağlarına girdi olarak verilmiştir.

**Çizelge 2.** Hasarların ankastre uçtan olan uzaklıkları

0.044L	0.24L	0.44L	0.64L
0.10L	0.30L	0.50L	0.70L
0.14L	0.34L	0.54L	0.74L
0.20L	0.40L	0.60L	

#### 4. Deneysel çalışmalar

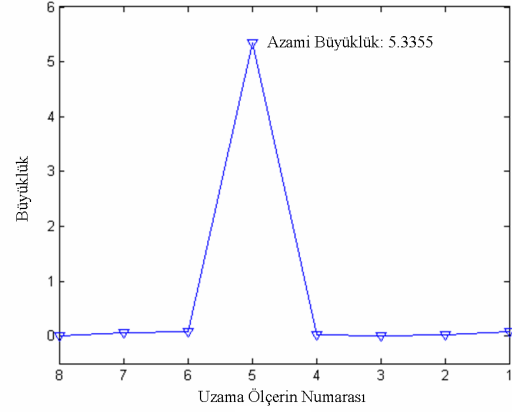
Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile modeli ve modal analizleri yapılmış olan sağlam ve hasarlı kirişlerin dinamik sistem cevapları deneysel olarak elde edilmiştir. Denejde kullanılan çelik kiriş, yüzeyine yapılandırılmış olan sekiz uzama ölçer ve kiriş üzerindeki yerleri Şekil 3 de gösterilmiştir.



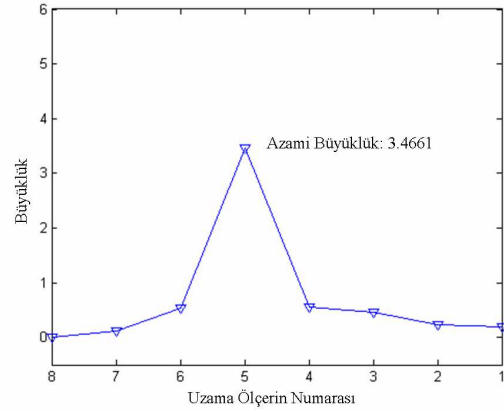
**Şekil 3.** Çelik kiriş ve uzama ölçerler

Kirişler öncelikle elektro-dinamik titreşimci yardımıyla frekansı 3Hz ile 253Hz arasında değişen sinüs dalgası ile uyarılmış, sistem cevapları serbest uca tutturulmuş ivme ölçerden alınmış ve ilk üç eğilme rezonans frekansları Çizelge 3 de verilmiştir. Görüldüğü üzere, sonlu elemanlar analizleri kullanılarak elde edilen frekans değerleri (Çizelge 1) deneysel yolla elde edilenlerden (Çizelge 3) biraz farklılık göstermekle birlikte kabuledilebilir ölçüdedir. Geometri (uzunluk, genişlik, kalınlık) ve malzeme (yoğunluk, elastisite modulu) özelliklerindeki değişim, sınır koşulu farklılıkları, ölçüm hassasiyeti ve diğer etkenler (ivme ölçerlerin ağırlığı, uzama ölçerlerin kabloları vb.) bu farklılığın muhtemel sebepleri arasında sayılabilir. Daha sonra, kirişler her bir rezonans frekansında sabit sinüs dalgası ile uyarılmış ve sistemin lokal uzama cevapları kiriş yüzeyine dağıtılmış sekiz uzama ölçer yardımıyla toplanmıştır. Bu veriler ankastre uca en yakın uzama ölçerinin (Şekil 3 deki 8 nolu uzama ölçer) değerine oranlanmış ve böylelikle sağlam ve hasarlı kirişler için düzgelemlenmiş uzama biçim şekilleri elde edilmiştir. Bu biçim şekilleri arasındaki mutlak farklılıklar hesaplanmış ve değerler üç ayrı

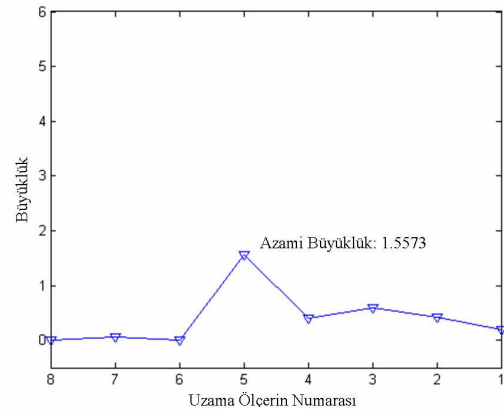
kip için Şekil 4 de gösterilmiştir. Şekilde görülen azami büyüklük ve bu büyüklüğe karşılık gelen yer deneysel öznitelik olarak alınmış ve hasarın şiddet ve yerinin tahmininde veri olarak kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.** Sağlam ve hasarlı kirişlerin uzama biçim şekilleri arasındaki mutlak farklılık  
(a) 1. Kip (b) 2. Kip (c) 3. Kip

**Çizelge 3.** Ankastre çelik kirişlerin rezonans frekansları: Deneysel sonuçlar

Kip	Sağlam Kiriş [Hz]	Hasarlı Kiriş [Hz]	Hasarlı Sağlam
1. Eğilme	11.8	9.2	0.7796
2. Eğilme	73.1	50.5	0.6908
3. Eğilme	205.6	200.8	0.9766

## 5. Yapay sinir ağı uygulamaları

### 5.1. Tasarım, eğitim ve doğrulama

Titreşim temelli analizlerden çıkarılan öznelilikleri kullanarak hasarın şiddet ve yerini tespit edecek olan en etkin yapay sinir ağı (YSA) mimarisinin oluşturulması için Çizelge 4 de gösterilmiş olan tek saklı tabakalı, ileri-beslemeli, geri-yayımlı yapay sinir ağları MATLAB® [14] paket programı kullanılarak tasarlanmıştır. Bu çizelgedeki yapay sinir ağları ortalama karesel hatayı en aza indirmeleri ve daha iyi yakınsama değerleri vermeleri nedeniyle daha önceki sayısal çalışmadan [11] seçilmiştir.

**Çizelge 4.** Çalışmada kullanılan yapay sinir ağları

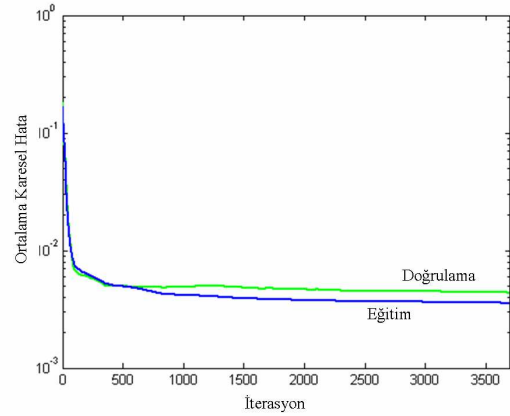
YSA No	Girdi	Çıktı	YSA Yapısı
1	DFA	HŞ	3:6:1
2	EBMF	HY	3:6:1
3	EBMF&YER	HY	6:9:1
4	EBMF&YER	HŞ&HY	6:12:2
5	DFA&EBMF&YER	HŞ&HY	9:18:2

Çizelge 4 de DFA (doğal frekanstaki yüzde azalma), EBMF (eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farkın azami büyüklüğü), YER (EBMF nin kiriş üzerinde bulunduğu yer), HŞ (hasarın şiddeti) ve HY (hasarın yeri) kısaltmaları kullanılmıştır. YSA yapısı altındaki rakamlar da sırası ile giriş, saklı ve çıkış tabakasındaki düğüm sayısını göstermektedir. Örneğin, 1 numaralı YSA da doğal frekanstaki yüzde azalma (DFA) girdi olarak kullanılmakta ve hasarın sadece şiddeti (HŞ) tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Diğer taraftan 4 numaralı YSA, eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farkın azami büyüklüğü (EBMF) ve kiriş üzerinde bulunduğu yeri (YER) girdi olarak almakta ve aynı anda hem hasarın şiddetini (HŞ) hemde hasarın yerini (HY) tahmin etmektedir.

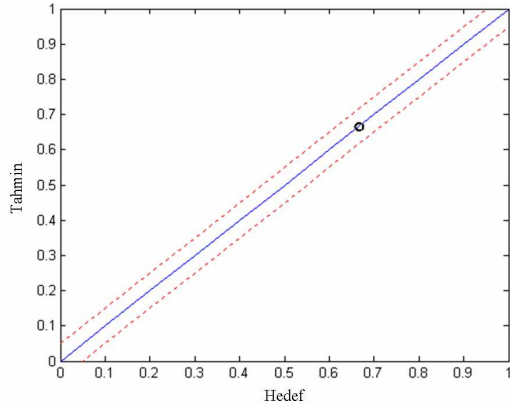
Analizlerde 480 farklı hasar senaryosu içinden rastgele 450 girdi-çıkıta çifti YSA ya eğitime verisi ve geri kalan 30 çift de YSA nın eğitimi sırasındaki doğrulama ve genellemenin kontrol edilmesi için kullanılmıştır.

### 5.2. Hasar tahminleri

Bu bölümde YSA ların hasar şiddet ve yer tahminlerini sunulmuştur. Şekil 5a da 1 numaralı YSA nın (Çizelge 4, DFA-HŞ) eğitim performansı (hedef ve tahmin arasındaki ortalama karesel hata) artan iterasyon sayısına bağlı olarak verilmiştir. Aynı YSA daha sonra deneysel girdi ile test edilmiş ve hasar şiddet tahmini de Şekil 5b de gösterilmiştir. Bu şekildeki noktalı çizgiler tahminin hedeften %5 uzaklıkta olan sınırını belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 6 da 3 numaralı YSA (Çizelge 4, EBMF&YER-HY) nın eğitim performansını (Şekil 6a) ve hasar yer tahminini (Şekil 6b) göstermektedir.



(a)

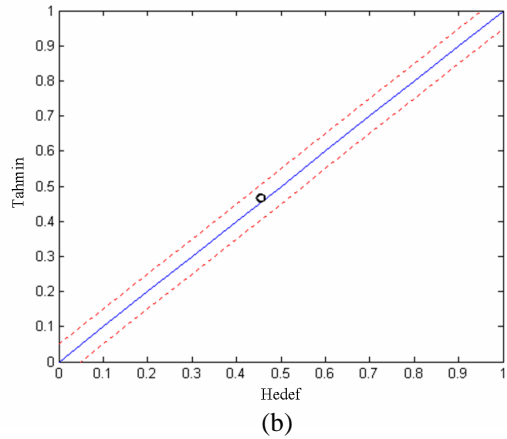
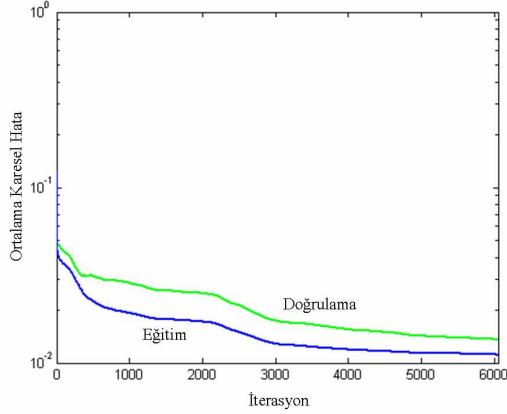


(b)

**Şekil 5.** 1 numaralı YSA nın tahmini

(a) Eğitim performansı (b) Hasarın şiddet tahmini

Tasarlanmış ve hasar tespitinde kullanılmış tüm YSA larının tahminleri Çizelge 5 de verilmiştir. Bu çizelgede görüldüğü üzere DFA (1 numaralı YSA) hasarın şiddet tahmininde etkili olurken (hedef ve tahmin arasında 0.0014 fark), EBMF ve YER bilgisinin kullanıldığı YSA (3 numaralı YSA) hasarın yerinin tahmininde EBMF nin tek başına girdi olarak kullanıldığı YSA (2 numaralı YSA) dan daha doğru tahminde bulunmuştur. Diğer ağlar (4 ve 5 numaralı YSA) hasarın şiddet ve yerini tek tahminde bulmaya çalıştıklarından hedef ve tahmin arasındaki farklar daha yüksektir.



**Şekil 6.** 3 numaralı YSAnın tahmini  
(a) Eğitim performansı (b) Hasarın yer tahmini

**Çizelge 5.** Yapay sinir ağı hasar tahminleri

YS No	Hedef	Tahmin		
1	0.6667	0.6653		
2	0.4556	0.4866		
3	0.4556	0.4656		
4	0.6667	0.4556	0.6291	0.4610
5	0.6667	0.4556	0.7123	0.4375

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada kiriş benzeri yapılarındaki hasarın titreşim temelli analizler ve yapay sinir ağı ile tespitinin deneysel olarak doğrulanması gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen kirişler üzerinde farklı hasar senaryoları yaratılmış ve kirişlerin titreşim cevaplarından hasar tespitinde kullanılacak öznelikler seçilmiştir. Bu öznelikler tasarlanan yapay sinir ağlarına girdi olarak verilmiş, eğitim ve doğrulamalar yapılmıştır. Daha sonra bu sinir ağına deneysel veriler gönderilmek suretiyle hasarın şiddet ve yer tahmininde kullanılmışlardır. Sonuç olarak bu çalışma, doğal frekanstaki azalmanın hasarın varlığı

ve şiddeti hakkında doğrudan bilgi verdiğini, eğrilik biçim şekilleri arasındaki mutlak farkın azami büyüklüğünün de yer bilgisi ile birlikte kullanılmasının hasar yer tahminlerindeki doğruluğu arttırdığını göstermiş ve sonuçları deneysel olarak doğrulamıştır.

## 7. Kaynaklar

- [1] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime ve D.W. Shevitz, *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A literature Review*, Tech. Rep. No: LA-13070-MS. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [2] C.M. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Clarendon Press, Oxford, 1995.
- [3] D.W. Patterson, *Artificial Neural Networks: Theory and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [4] K. Worden ve A.D. Ball, "Modal Analysis-based Condition Assessment of Structures using Neural Networks", *Proceedings of 6<sup>th</sup> International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, 139-146, 1994.
- [5] S.V. Barai ve P.C. Pandey, "Vibration Signature Analysis using Artificial Neural Networks", *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, 9(4), 1995, 259-265.
- [6] M.F. Elkordy, K.C. Chang ve G.C. Lee, "Neural Networks Trained by Analytically Simulated Damage States", *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, 7(2), 1993, 130-145.
- [7] A.S. Islam ve K.C. Craig, "Damage Detection in Composite Structures using Piezoelectric Materials", *Smart Materials and Structures*, 3(3), 1994, 318-328.
- [8] A.C. Okafor, K. Chandrashekhara ve Y.P. Jiang, "Delamination Prediction in Composite Beams with Built-in Piezoelectric Devices using Modal Analysis and Neural Network", *Smart Materials and Structures*, 5(3), 1996, 338-347.
- [9] Y.G. Xu, G.R. Liu, Z.P. Wu ve X.M. Huang, "Adaptive Multilayer Perceptron Networks for Detection of Cracks in Anisotropic Laminated Plates", *International Journal of Solids and Structures*, 38(32-33), 2001, 5625-5645.
- [10] M. Sahin ve R.A. Shenoi, "Damage Detection in FRP Laminated Beams using Neural Networks", *First European Workshop on Structural Health Monitoring, Proceeding of the First European Workshop*, 726-733, Ecole Normale Supérieure, Cachan (Paris), July 10-12, 2002.
- [11] M. Sahin ve R.A. Shenoi, "Vibration-based Damage Identification in Beam-like Composite Laminates by using Artificial Neural Networks", *Proceedings of the IMechE, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(6), 2003, 661-676.
- [12] ANSYS®, *User Manual*, ANSYS, Inc., 2002
- [13] A.K. Pandey, M. Biswas ve M.M. Samman, "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes", *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 1991, 321-332.
- [14] H. Demuth ve M. Beale, *Neural Network Toolbox, User's Guide*, Version 4. The Math Works, Inc., 2000.