

## KİRİŞ BENZERİ YAPILARDA TESTERE KESİĞİ TİPİ HASARLARIN BİRLEŞİK GENETİK ALGORİTMA VE LİNEER OLMAYAN OPTİMİZASYON İLE TESPİTİ

Seyfullah AKTAŞOĞLU\*  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Melin ŞAHİN†  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Hasar, herhangi bir yapıda yapısal niteliklerin bozulmasından dolayı o yapının taşıyabileceği ve/veya dayanabileceği sınır yükün düşmesi olarak tanımlanabilir. Bu düşüş, yapının işlevini tamamen ve aniden kaybetmesi olasılığını artırır. Bu durumdan kaçınmak özellikle havacılıkta hayati önem arz etmektedir. Bu bildiri, ankastre izotropik kiriş benzeri yapılarda hasar yerinin ve şiddetinin tespitinde kullanılmak üzere tasarlanmış olan genetik algoritma ile lineer olmayan eniyileme sistemini sunmaktadır. Titreşim tabanlı özellikler olan doğal frekanslar (yani eigendeğerleri) ve yerdeğiştirme biçim şekilleri (yani eigenvektörleri) düzlem dışı ilk iki eğilme biçim şekilleri göz önüne alınarak testere kesimi hasar tespitleri için belirteç olarak kullanılmıştır. Bu amaca yönelik olarak söz konusu belirteçleri elde etmek için sağlam ve hasarlı yapıların modelleme ve analizlerinde ticari sonlu elemanlar programı olan Msc. Patran/Nastran kullanılmıştır. Kalınlıktaki azalma olarak modellenen testere kesimi tipi hasarlar için sonlu elemanlar modeli kullanılarak çeşitli hasar senaryoları oluşturulmuştur. Bu modeller tek boyutlu bar tipi elemanlar kullanarak Msc. Patran da modellenmiş, sonrasında eleman kütle ve esneklik matrislerini elde etmek için ise Msc. Nastran da normal mod analizlerine tabi tutulmuştur. Duyarlılık matrisleri genel kütle ve esneklik matrislerini oluşturmak için eleman kütle ve esneklik matrislerinin katsayısı olarak kullanılmış ve elde edilen bu matrisler yapının artık kuvvet matrislerinin oluşturması için birleştirilmiş, genetik algoritma ve lineer olmayan eniyileme birleşik sistemi ile yapıdaki hasarların yerini ve şiddetini bulmak için de minimize edilmişlerdir.*

### GİRİŞ

Hasar tanılama sistemi dört farklı düzeyde değerlendirilebilir [12];

- Düzey 1: Hasarın varlığının tespiti
- Düzey 2: Hasarının yapı üzerindeki yerinin tespiti
- Düzey 3: Hasar şiddetinin niceliksel değerlendirilmesi
- Düzey 4: Yapının kalan hizmet ömrünün tahmini

Titreşim temelli hasar tanılama metotları sadece düzey 1 ve düzey 2'yi gösterebilirken, model içeren titreşim karakteristiği incelemeleri düzey 3 e kadar çıkabilmektedir. Düzey 4 tahminleri genelde daha çok kırılma mekaniği, yapısal tasarım değerlendirilmesi ve yorulma ömrü analizleri alanlarına girmektedir. Düzey 3 hasar tanılama metotları için daha önce de belirtildiği üzere yapısal modelleme gerekmektedir. Yapılar analitik olarak ya da sonlu eleman analiz yöntemleri kullanılarak modellenenbilirler. Sonlu eleman analizleri, son yıllarda, karmaşık yapıları dahi doğru bir şekilde ve ekonomik olarak modelleyebildiği için yoğun ilgi görmektedir [13]. Doğal frekanslar ve bu

\* Msc., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: seyf@ae.metu.edu.tr

† Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: msahin@metu.edu.tr

frekanslara karşılık gelen titreşim biçim şekilleri gibi yapının dinamik özelliklerini verebilmesinden dolayı son yıllarda yapılan hasar tanılama metotları sonlu eleman çıktıları [8] ya da direkt olarak anlık sonlu eleman model güncellemesi metotlarını [10] kullanmaktadır. Sonlu elemanlar modellemelerini kullanan araştırmacılar da, kendi sonlu eleman kodlarını geliştiren araştırmacılar [9] ve ticari paket program kullanan araştırmacılar olmak üzere ikiye ayrılabilir. Kendi sonlu eleman analiz kodunu geliştiren araştırmacılar hasar tanılama aşamasında daha fazla değişken üzerinde ayarlama kolaylıklarına sahip olsalar da, inceleyebilecekleri yapıların karmaşıklıkları açısından kısıtlanmaktadır.

Hasar tanılama konusundaki zorluk, hasarın titreşim karakteristikleri üzerindeki yaptığı değişikliklerin tersten bulunması ve bu değişiklikleri sağlayan birden fazla hasar konfigürasyonunun var olmasıdır. Yani farklı tipteki hasarlar, değişik konumlarda ve farklı şiddette, titreşim karakteristikleri üzerinde aynı değişime sebep olabilirler [7]. Bu nedenle hasar tipine duyarlı algoritmalar, doğru hasar tipini bulabilirlerse, daha iyi hasar yer ve şiddet tespitinde de bulunabilirler. Farklı hasar tipleri gerçek yapılar üzerinde farklı değişikliklere sebep olurlar. Yapının modal parametreleri fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu düşünülürse, fiziksel özelliklerde olan değişikliklerin modal parametreleri etkileyeceği çıkarımı da yapılabilir [3]. Örneğin, yapı üzerinde çarpma sonucu oluşan hasarın etkisi, sonlu elemanlarda bu noktaya karşılık gelen elemanların esneklik matrislerinde yüzdesel düşüş olarak modellenenmektedir [10], [1].

Hasar tanılamadaki bu zorluklardan dolayı genelde klasik eniyileme yaklaşımları yerel minimumların birinde takılı kalmaktadır. Genetik algoritma tüm çözüm alanını inceleme ve global optimumu bulma potansiyelinden dolayı, bu metotlara önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Fakat zor veya zaman harcatıcı amaç fonksiyonlarıyla çalışırken genetik algoritma doğasından ötürü yavaş kalmaktadır. Bu nedenle çözüm alanındaki doğru yeri bulmak için genetik algoritma ile hızlı yakınsama özelliğinden dolayı da bir yerel eniyileme programı bu araştırmada birlikte kullanılmıştır.

## METHOD

Bu çalışma kapsamında bir boyutlu ankastre izotropik kiriş tipi yapılarının çoklu testere kesigi hasarı tanınmasında kullanılmak üzere genetik algoritma ile lineer olmayan eniyileme sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Amaç, yapılarda oluşabilecek hasarların yapının görev kaybından önce tespit edilip önlemlerinin alınabilmesini sağlamaktır. Bu amaca ulaşmak için yapının titreşim karakteristiklerindeki değişimlerin (yani eigendeğerlerinin ve eigenvektörlerinin) sonlu eleman model çıktıları üzerinden izlenilmesine çalışılarak, hasarın yeri ve şiddeti tespit edilmiştir. Sonlu eleman modelleri tek boyutlu bar tipi elemanlar kullanılarak MSC®/PATRAN [5] da modellenmiş sonrasında eleman esneklik matrisleri MSC®/NASTRAN [6] paket programının doğal frekans analiz modülü (*natural frequency analysis module 103*) ile elde edilmiştir. Söz konusu değişimler, yapının dinamik denkleminin düzenlenerek artık kuvvet vektörü şeklinde yazılması ile kullanılmıştır. Elde edilen bu denklemin eniyilemesi hasarın tanınmasını yer ve şiddet cinsinden vermektedir. Kalınlıktaki azalma olarak modellenen testere kesigi tipi hasarlar için sonlu elemanlar modeli kullanılarak çeşitli hasar senaryoları da oluşturulmuş ve hasar tespit sistemi test edilmiştir.

Çalışmanın ana adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yapının sonlu elemanlar modelinin yaratılması
- Modelin teorik veriler ve referans makale [9] ile karşılaştırılarak doğrulanması
- Hasarın tanımlanması ve sonlu elemanlar modeli üzerinde hasar senaryoları yaratılması
- Hasar tespit algoritmasının oluşturulması
- Yaratılan hasar senaryoları üzerinde hasar tespit algoritmasının testi ve sonuçlarının sunumu

## TEORİ

Yapının doğal frekans ve titreşim şekilleri bilgilerinin yanı sıra kütle ve esneklik matris bilgileri artık kuvvet vektörü (*Residual Force Vector (RFV)*) adlı tek bir fonksiyonda formüle edilebilir.

Çoklu serbestlik derecesine sahip sönümleyici olmayan yapıların dinamik denklemleri aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir:

$$[M_s]\{\ddot{X}(t)\} + [K_s]\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Bu denklemde  $n \times n$  boyutundaki  $[M_s]$  ve  $[K_s]$  matrisleri sağlam yapının sırasıyla kütle ve esneklik matrislerini,  $\{X(t)\}$  ve  $\{F(t)\}$  ise sırasıyla yer değiştirme vektörünü ve uygulanan yük vektörünü temsil etmektedir.

1. eşitlikten yararlanarak,  $j$ . eigendeğeri denklemi kuvvetten bağımsız titreşim şartlarında aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$[K_s]\{\phi_j\} - \lambda_j[M_s]\{\phi_j\} = 0 \quad (2)$$

Bu denklemde  $\lambda_j$  eigendeğerine,  $\{\phi_j\}$  ise bu eigendeğerine karşılık gelen kütle matrisine göre normalize edilmiş eigenvektörüne karşılık gelmektedir. Aynı denklem hasarlı yapı için aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$[K_h]\{\phi_{jh}\} - \lambda_{jh}[M_h]\{\phi_{jh}\} = 0 \quad (3)$$

Hasarlı yapının esneklik matrisi ( $[K_h]$ ) ve hasarlı yapının kütle matrisi ( $[M_h]$ ) kullanılan yukarıdaki denklem hasarlı yapının titreşim şekilleri ( $\{\phi_{jh}\}$ ) ve eigendeğerleri ( $\lambda_{jh}$ ) ile beslenirse eşitlik sağlanmaktadır. Bu makalede incelenen testere kesiği tipi hasar hem kütle hem de esneklik matrisi üzerinde değişime sebep olduğundan hasarlı esneklik ve kütle matrisleri aşağıdaki denklemlerdeki şekilde tanımlanabilir:

$$[K_h] = [K_s] + [\Delta K] \quad (4)$$

$$[M_h] = [M_s] + [\Delta M] \quad (5)$$

Hem kütle hem de esneklik matrisindeki değişim, 4. ve 5. eşitliklerde sırası ile  $\Delta M$  ile  $\Delta K$  gösterilmiştir ve bu değişim matrisi bilinmemektedir. Formül 3'e hasarlı yapının matrisleri (kütle ve esneklik) yerine sağlam yapının matrislerini koyduğumuzda denklem 6 daki eşitlikte de gösterildiği gibi bir artık değer vermektedir;

$$\{R_j\} = [K_s]\{\phi_{jh}\} - \lambda_{jh}[M_s]\{\phi_{jh}\} \quad (6)$$

6 nolu eşitlik de gösterilen artık kuvvet vektörü, her mod için yazılabileceği gibi,  $j$ . mod için de yazılmıştır. Artık kuvvet vektöründeki her bir sıra, yapının bir serbestlik derecesine karşılık gelmektedir. Bu eşitlikteki artık değer sağlayan serbestlik derecelerinin yerinin bulunması aynı zamanda o yapı üzerindeki hasarın yerinin bulunması anlamına da gelmektedir. Hasarın şiddetinin bulunması ise artık kuvvet vektörü üzerinde ilave analizler gerektirmektedir. Bu amaç doğrultusunda 'm' adet elemandan oluşan hasarlı yapının esneklik matrisi ( $[K_h]$ ), kendisiyle ilişkili olan hasar şiddetini temsil eden azaltma faktörleriyle ( $\beta_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ) çarpılarak toplanan element esneklik matrisleri şeklinde eşitlik 7 ile gösterilmektedir. Eşitlik 8 de bu durumun kütle matrisine karşılık gelen ifadesi sunulmuştur.

$$[K_h] = \sum_{i=1}^m S_s(\beta_i, i) \cdot [k]_i \quad (7)$$

$$[M_h] = \sum_{i=1}^m S_m(\beta_i, i) \cdot [m]_i \quad (8)$$

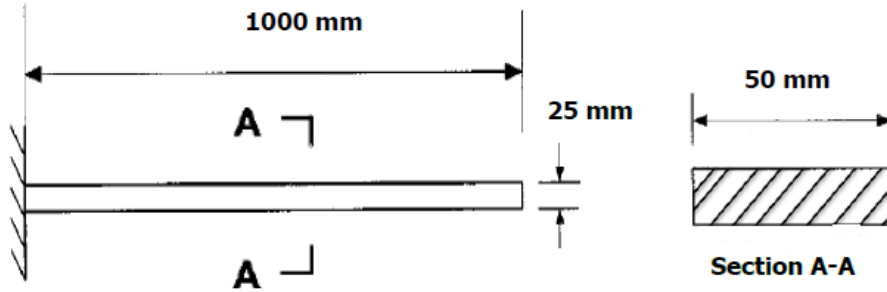
Yukarıdaki eşitlikte  $[k]_i$   $i$ . elemanın esneklik matrisine,  $[m]_i$  ise  $i$ . elemanın kütle matrisine karşılık gelmektedir.  $S_s(\beta_i, i)$  ve  $S_m(\beta_i, i)$  sırasıyla esneklik ve kütle matrislerinde yapının kalınlığındaki değişimi simüle eden duyarlılık matrisleridir. Azaltma faktörlerinin değeri,  $(\beta_i)$ , 0 dan 1'e kadar değişmektedir. 1 değeri hasarsızlığa karşılık gelirken 0 değeri yapının tamamen kaybına işaret etmektedir. Bunların dışında herhangi bir değer 1 değerine olan uzaklığı, ilişik olduğu elemandaki hasarın şiddetinin yüzde cinsinden değerine karşılık gelmektedir. Eşitlik 7 ve 8, eşitlik 6'daki yerine geçirilirse, artık kuvvet vektörünün tanımı aşağıdaki formüldeki gibi olur;

$$\{R_j\} = \sum_{i=1}^m S_s(\beta_i, i) \cdot [k]_i \{\phi_{jh}\} - \lambda_{jh} \cdot \sum_{i=1}^m S_m(\beta_i, i) \cdot [m]_i \{\phi_{jh}\} \quad (9)$$

ve bu vektörün normu sadece doğru azalma faktörü kombinasyonunda 0'a eşit olur. Bir eniyileme süreci olan doğru kombinasyonun bulunması işlemi eniyileme algoritmalarına amaç fonksiyon olarak verilmiş ve sonuçları sonraki bölümde gösterilmiştir.

### SONLU ELEMANLAR MODEL VE ANALİZLERİ

Çalışmada kullanılan yapının şekli ve yapısal özellikleri sırasıyla Şekil 1'de gösterilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ankastre kiriş benzeri yapının geometrisi

Tablo 1. Kiriş benzeri çelik yapının özellikleri

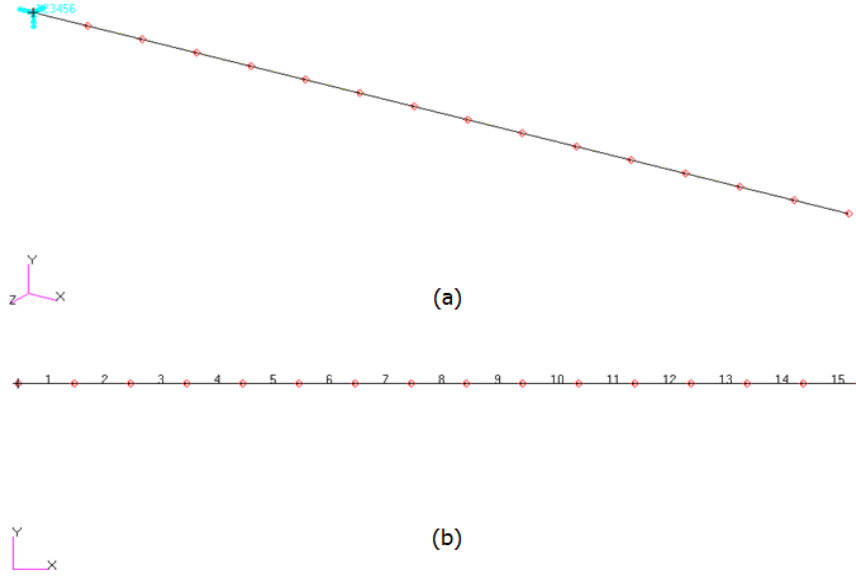
Yoğunluk ( $\rho$ )	7827 kg/m <sup>3</sup>	Atalet Momenti ( $I$ )	6.51×10 <sup>-8</sup> kg.m <sup>2</sup>
Elastik Modülü ( $E$ )	2.06×10 <sup>11</sup> Pa	Kesit Alanı ( $A$ )	1.25×10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup>
Uzunluk ( $L$ )	1.00 m	Birim uzunluğunun kütlesi ( $m$ )	9.78 kg/m

Tablo 1'deki bilgiler doğrultusunda, yapının düzleme dik ilk iki titreşim biçim şekline sahip teorik doğal frekansları ( $\omega_n$ ) hesaplanmış ve bu veriler referans alınan makaledeki sonuçlar [9] ve değişik ağ sıklığındaki sonlu eleman modellerinin MSC®/NASTRAN paket programı doğal frekans analiz modülü kullanılarak elde edilen doğal frekanslar ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2).

**Tablo 2.** Kiriş tipi yapının doğal frekanslarının karşılaştırılması

Düzleme Dik Titreşim Biçim Şekli Numarası	Teori [11]	Referans [9]		Sonlu Elemanlar Analizi	
	$\omega_n$ [Hz]	$\omega_n$ [Hz]	% Farkı	$\omega_n$ [Hz]	% Farkı
1	20.72	21.00	1.33	20.67	-0.24
2	129.84	131.30	1.11	128.58	-1.00

Ağ sıklığı, doğal frekanslar açısından tatmin edici sonuçların alınması (yani % Fark  $\leq 1$ ) ve referans makale ile uyumlu olması açısından 15 elemanlı olarak seçilmiş ve Şekil 2 de gösterilmiştir.

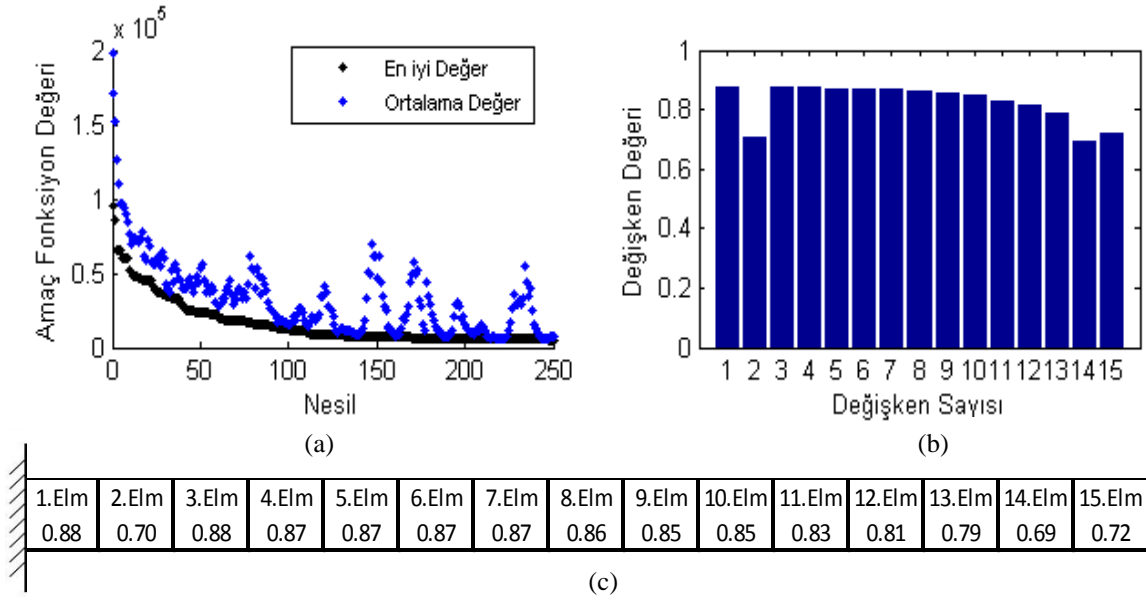


**Şekil 2.** Ankastre kirişin bar2 sonlu elemanlarından oluşan modeli  
(a) Eş yönlü görüntüsü (b) Üstten görüntüsü ile eleman numaralandırılması

Şekil 2(a) da görülen sınır koşulu kökteki düğüm noktasının tüm eksenlerde yer değiştirme ve dönüş serbestlik derecelerinin sınırlandırılmasıyla elde edilmiştir. Şekil 2(b) deki model eleman numaralandırılması; hasar yerlerinin gösterilmesinde de kullanılacağı için önem arz etmektedir.

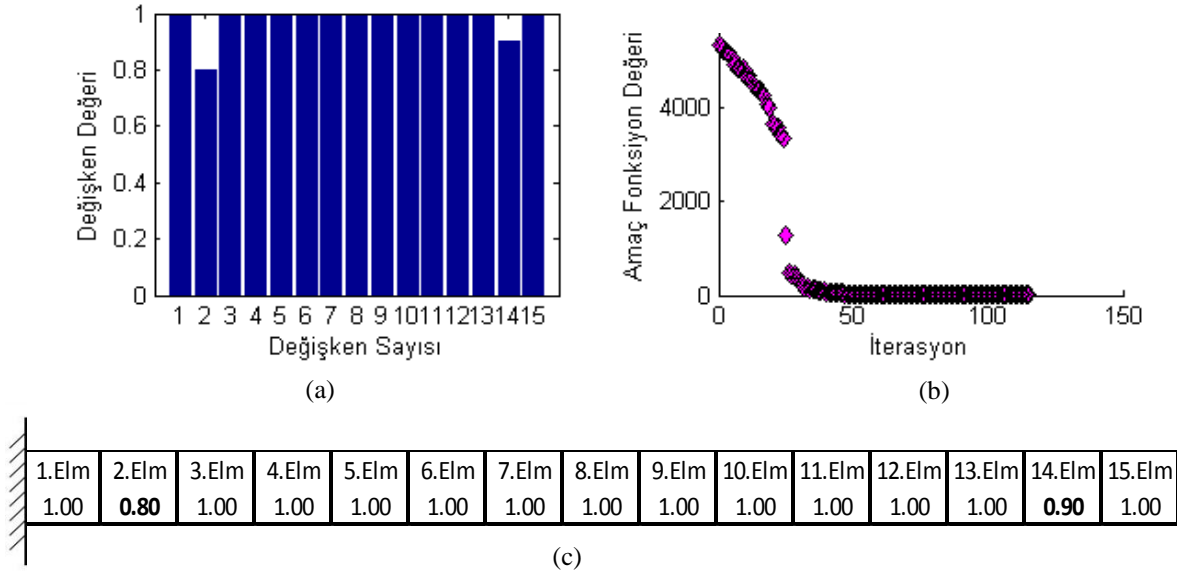
Hasar modelleme kısmında; testere kesiği tipi hasar, eleman kalınlığı üzerinden yüzdesel azalma olarak modellenmiştir. En ciddi hasar söz konusu katsayının %70 incelenmesi olarak modellenirken en hafif hasar %10 incelme olarak belirlenmiştir. Çoklu hasar modellemesi için hasarlı eleman sayısı iki olarak seçilmiş ve yaratılan senaryolarda iki elemanında farklı şiddette hasarlı olması sağlanmıştır. Eniyileme algoritması olarak MATLAB® [2] eniyileme araç kutusundan “genetik algoritma” ve “lineer olmayan sınırlandırılmış çok değişkenli minimizasyon fonksiyonu (FMINCON)” birleşik olarak kullanılmıştır. Buradaki amaç, genetik algoritmanın karmaşık çözüm alanlarında dahi global en iyiyi bulma yeteneği ile fonksiyon eğimine bağlı çalışan FMINCON'un bölgesel eniyilemedeki hızını birleştirmektir [4]. Bu birleşik hasar tespit algoritması Şekil 2'deki sonlu elemanlar modeliyle otuz farklı senaryoda test edilmiş ve senaryolardan biri aşağıda örneklendirilmiştir.

Bu örnekte, sonlu elemanlar modelinde kökten 2. ve 14. elemanların kalınlık değerleri sırasıyla 0.8 ve 0.9 katsayıları ile çarpılmak suretiyle bu elemanlarda sırasıyla %20 ve %10 testere kesiği hasarı modellenmesi yapılmış ve bu hasarlı modelin ilk iki doğal frekans değerleri ve karşılık gelen titreşim biçim şekilleri hasar tespit algoritmasına girdi olarak verilmiştir. İlk önce eniyileme problemini genetik algoritma ele almış, 250 nesil yaratıp problemi çözüm aralığına soktuktan sonra FMINCON'a devretmiştir. Genetik algoritmanın ara sonuçları Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekillerin (c) kısmında verilen sayılar 1 değerinde hasarsızlık gösterirken, 0 (sıfır) ile 1 arasındaki tüm sayılar eleman sağlamlık değerlerini vermektedir.



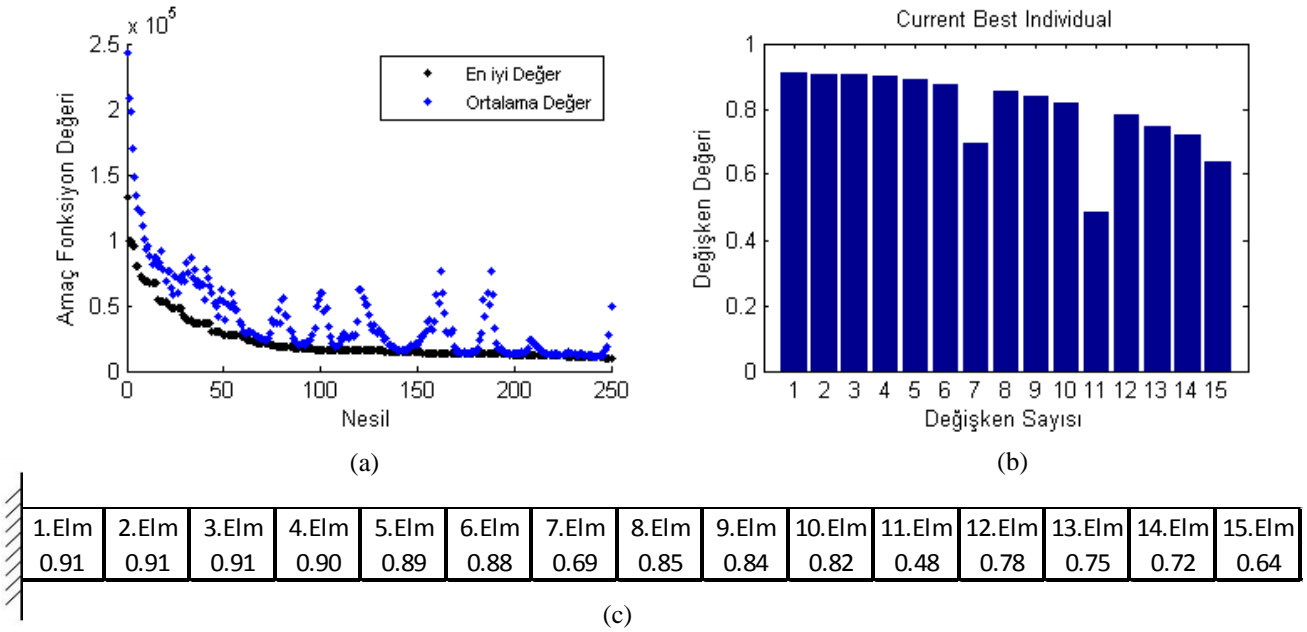
**Şekil 3.** Kökten 2. elemanda %20 ve 14. elemanda %10 olarak yaratılan testere kesici hasarının Genetik Algoritma sonuçları (a) Yakınsama Geçmişi (b) Tanılanan hasar yeri ve şiddeti (c) Tanılanan hasar durumunun sayısal sonuçları

Şekil 3(c) bölümündeki sayılar yapının eleman bölgelerine karşılık gelen sağlamlık değerlerini vermektedir. FMINCON, Şekil 3 (c) noktasından aldığı aynı amaç fonksiyonlu eniyileme problemini, elde edebildiği minimum amaç fonksiyonu değerinde sonlandırmıştır (Şekil 4).

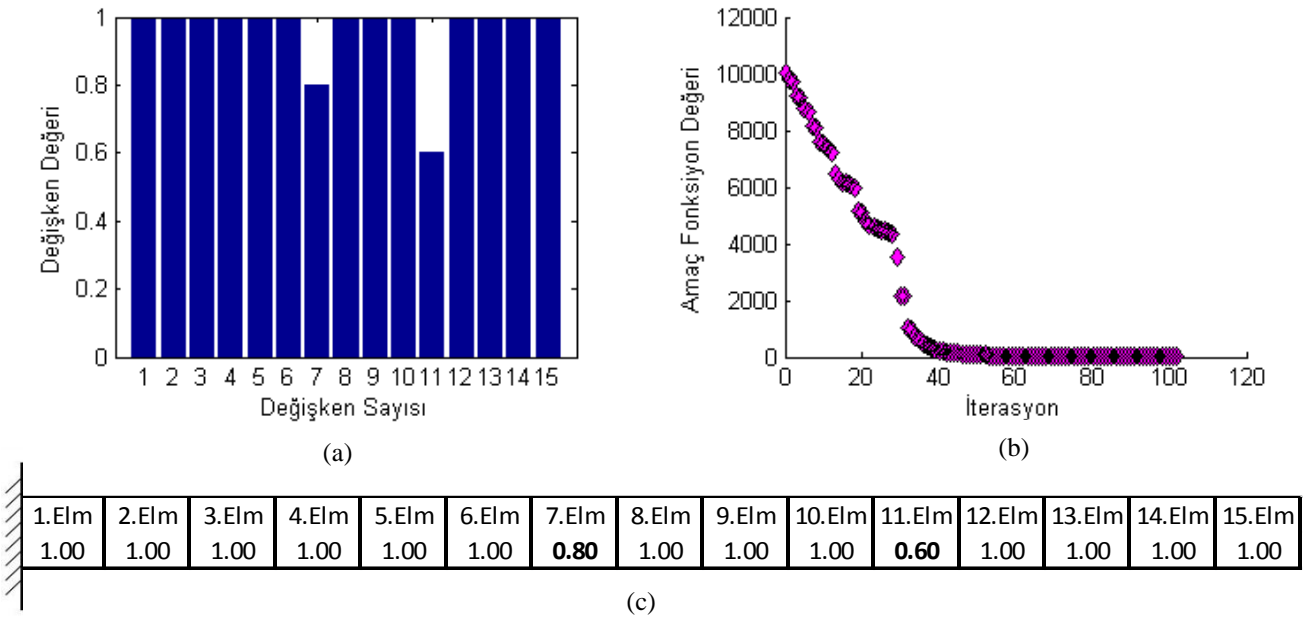


**Şekil 4.** Kökten 2. elemanda %20 ve 14. elemanda %10 olarak yaratılan testere kesici hasarının FMINCON sonuçları (Hibrit fonksiyon olarak) (a) Tanılanan hasar yeri ve şiddeti (b) Yakınsama Geçmişi (c) Tanılanan hasar durumunun sayısal sonuçları

İkinci örnekte, hasarlar ilk örnekle aynı şekilde fakat bu sefer kökten 7. ve 11. elemanlar üzerinde sırasıyla %20 ve %40 olarak modellenmiştir. Genetik algoritma problemin çözüm aralığını Şekil 5 (b)'de görüldüğü gibi daraltıp, Şekil 5 (c) de gösterilen noktalarda FMINCON'a devretmiştir.



**Şekil 5.** Kökten 7. elemanda %20 ve 11. elemanda %40 olarak yaratılan testere keşiği hasarının Genetik Algoritma sonuçları (a) Yakınsama Geçmişi (b) Tanılanan hasar yeri ve şiddeti (c) Tanılanan hasar durumunun sayısal sonuçları



**Şekil 6.** Kökten 7. elemanda %20 ve 11. elemanda %40 olarak yaratılan testere keşiği hasarının FMINCON sonuçları (Hibrit fonksiyon olarak) (a) Tanılanan hasar yeri ve şiddeti (b) Yakınsama Geçmişi (c) Tanılanan hasar durumunun sayısal sonuçları

FMINCON, problemi Şekil 6 'de gösterildiği gibi başarıyla sonlandırmış, yapıdaki hasarları beklendiği üzere 7. ve 11. elemanlarda sırasıyla %20 ve %40 şiddette olarak bulmuştur.

## SONUÇ

Yapılan analizler ışığında tasarlanan birleşik eniyileme sisteminin artık kuvvet amaç fonksiyonu ile testere kesimi tipindeki hasarın yeri ve şiddeti cinsinden tanınması konusunda başarılı olduğu gösterilmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] Aktaşoğlu, S., Şahin M.Kiriş Benzeri Yapılarda Birleşik Genetik Algoritma ve Lineer Olmayan Optimizasyon ile Hasar Tespiti: SAVTEK, 2012.
- [2] MATLAB® [Çevrimiçi] MathWorks. [Alıntı Tarihi: 23 Şub. 12] <http://www.mathworks.com/help/toolbox/optim/>
- [3] Aktaşoğlu, S., Şahin M. Damage Detection in Beam-Like Structures via Combined Genetic Algorithm and Non-Linear Optimisation : Aerospace Engineering, Middle East Technical University, 2012.
- [4] Meruane, V. and Heylen, W. Damage Detection by a Real-Parameter Hybrid Genetic Algorithm. Poland : Proceedings of the Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring, 1073-1080, July 2008.
- [5] MSC®/PATRAN v2007 r1b (2007), “Reference Manual”, MSC.Software.
- [6] MSC®/NASTRAN v2007 (2007), “Reference Manual”, MSC.Software.
- [7] Şahin M. Damage Identification in Beam-like Structures by Vibration-based Analysis and Artificial Neural Networks. : University of Southampton, March 2004
- [8] Zak A., Krawczuk and W. Ostachowicz. Vibration Analysis of Composite Plate with Closing Delamination. : Journal of Intelligent Material Systems and Structures 12: 545, 2001
- [9] Friswell, M. I., Penny, J.E.T. and Garney, S.D. A combined Genetic Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures. : Comput. Struct; 69:547-556., 1998
- [10] Mares, C. and Surace, C. An Application of Genetic Algorithms to Identify Damage in Elastic Structure. :Journal of Sound and Vibration; 195(2):195-215, 1996.
- [11] Blevins, R.D. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. :Krieger Publishing Company, Melbourne, Florida., 1995
- [12] Rytter, A. Vibration based inspection of civil engineering structures Doctoral Dissertation. : Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1993.
- [13] Rieger, N. F. The Relationship Between Finite Element Analysis and Modal Analysis. New York : Journal of Sound & Vibration, 1986