

KİRİŞ BENZERİ YAPILARDA ARTIK KUVVET VEKTÖRÜ VE MOD ŞEKİL EĞRİLİĞİ METOTLARIYLA ÇARPMA TİPİ HASAR TESPİTİ

Seyfullah AKTAŞOĞLU¹, Melin ŞAHİN²

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 giriş 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 eigen değerleri) ve yer değiştirme biçim şekilleri (yani eigen vektörleri) ve bunların ikinci türevleri (yani titreşim şekil eğrileri) düzlem dışı ilk eğilme biçim şekli göz önüne alınarak çarpma tipi hasar tespiti için belirteç olarak kullanılmıştır. Bu amaca yönelik olarak söz konusu belirteçleri elde etmek için sağlam ve hasarlı yapıların modelleme ve analizlerde ticari sonlu elemanlar programı olan Msc. Patran/Nastran ve ilgili matematiksel hesaplamalar için MATLAB® kullanılmıştır. Elemanların esneklik matrisinde azalma olarak modellenen çarpma 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. Bu minimizasyon işleminde katsayı kullanılacak matris sayısı (yani hasar lokasyonları) mod şekil eğrilikleri metodu kullanılarak daraltılmış bu da global optimuma ulaşım süresini kısaltmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hasar tespiti, genetik algoritma, lineer olmayan eniyileme, sonlu eleman analizi, artık kuvvet vektör metodu, mod şekil eğriliği, giriş benzeri yapılar

GİRİŞ

Hasar tanılama sistemi dört farklı düzeyde değerlendirilebilir [Rytter, 1993];

- 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 söylendiği gibi yapısal model gerekmektedir. Yapılar analitik olarak ya da sonlu eleman analizleri ile modellenebilir. Sonlu eleman analizleri, son yıllarda, karmaşık yapıları dahi doğru bir şekilde ve ekonomik olarak

¹ ODTÜ, TUBİTAK UZAY TEK. ARAŞ. ENST., 06800, Ankara, seyfullah.aktasoglu@tubitak.gov.tr

² Doç. Dr., ODTÜ, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06800, Ankara, msahin@metu.edu.tr

modelleyebildiği için yüksek ilgi görmektedir [Rieger, 1986]. Doğal frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen titreşim biçim şekilleri gibi yapının dinamik özelliklerini verebilmesinden dolayı son yıllarda yapılan hasar tanılama metotları sonlu eleman çıktıları [Zak A., Krawczuk and W. Ostachowicz, 2001] ya da direkt olarak anlık sonlu eleman model güncellemesi metotlarını [Mares, C., Surace, C, 1996] kullanmaktadır. Sonlu elemanlar modellemelerini kullanan araştırmacılar da, kendi sonlu eleman kodu olan araştırmacılar [Friswell, M. I., Penny, J.E.T. and Garney, S.D., 1998] ve ticari paket program kullanan araştırmacılar olmak üzere ikiye ayrılabilir. Kendi sonlu eleman analiz kodunu yazan araştırmacılar hasar tanılama aşamasında daha fazla değişken üzerinde ayarlama kolaylıklarına sahip olsalar da, inceleyebilecekleri yapıların şekilleri 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 [Şahin, 2004]. 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 değişimlere sebep olurlar. Yapının modal parametreleri fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu düşünülürse, fiziksel özelliklerde olan değişiklikler modal parametreleri etkileyeceği çıkarımı da yapılabilir. Örneğin, yapı üzerinde çarpma sonucu oluşan hasarın etkisi, sonlu elemanlarda bu noktaya karşılık gelen elemanların esneklik matrislerinde yüzdesel düşüş olarak modellenenilmektedir [Mares, C., Surace, C, 1996].

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. Çözüm alanını daraltmak adına mod şekil eğriliği metodu da sisteme dahil edilmiştir. Böylelikle genetik algoritmanın tüm elemanlarda hasar araması yerine sadece işaret edilen elemanlarda hasar araması sağlanmıştır. Hasar lokasyonunu mod şekil eğriliği metodu tam olarak söyleyemediği için genetik algoritmayı devreden çıkarmak henüz mümkün değildir.

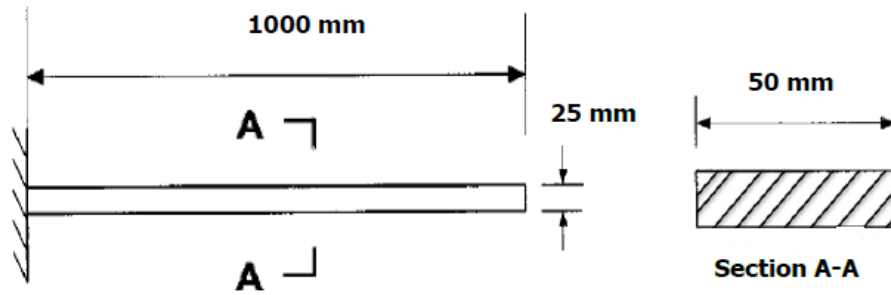
TEORİ

Bu çalışma kapsamında bir boyutlu ankastre izotropik kiriş tipi yapılarının çoklu çarpma hasarı tanınmasında kullanılmak üzere genetik algoritma ile lineer olmayan eniyileme sistemi tasarlanmıştır ve uygulanmıştır. Amaç, yapılarda oluşabilecek hasarları yapının görev kaybından önce tespit edilip önleminin alınabilmesini sağlamaktır. Bu amaca ulaşmak için yapının titreşim karakteristiklerindeki değişimler (yani eigen değerleri ve eigen vektörleri) sonlu eleman model çıktıları üzerinden yakalanmaya çalışılarak, hasarın yeri ve şiddeti tespit edilmiştir. Sonlu eleman modelleri tek boyutlu bar tipi elemanlar kullanılarak MSC®/PATRAN [MSC®/PATRAN v2007 r1b, "Reference Manual"] da modellenmiş sonrasında eleman esneklik matrislerini elde etmek için MSC®/NASTRAN [MSC®/NASTRAN v2007, "Reference Manual"] paket programı 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 kullanılmış ve bu denklemin eniyilemesi hasarın tanınmasını yeri ve şiddeti cinsinden vermektedir. Elastik modüldeki azalma olarak modellenen çarpma tipi hasarlar için sonlu elemanlar modeli kullanılarak çeşitli hasar senaryoları da oluşturulmuş ve hasar tespit sistemi test edilmiştir. Daha sonra mod şekil eğriliği metodu da hasar lokasyon tespiti konusunda farklı senaryolarda test edilmiş ve ana sisteme monte edilmiştir.

Çalışmanın ana adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Titreşim karakteristiklerinin incelenecek sonlu elemanlar modelinin yaratılması ve doğruluğunun teorik verilere ve referans makale ile karşılaştırılarak doğrulanması
- Doğal frekans analiz modülü sonuçlarının karşılaştırılması ile en uygun ağ sıklığının bulunması
- Hasarın tanımı ve sonlu elemanlar modeli üzerinde hasar senaryoları yaratma prosedürünün anlatılması
- Hasar tespit algoritmasının yaratılması
- Gösterilen hasar senaryoları üzerinde hasar tespit algoritmasının testi ve sonuçlarının gösterimi

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

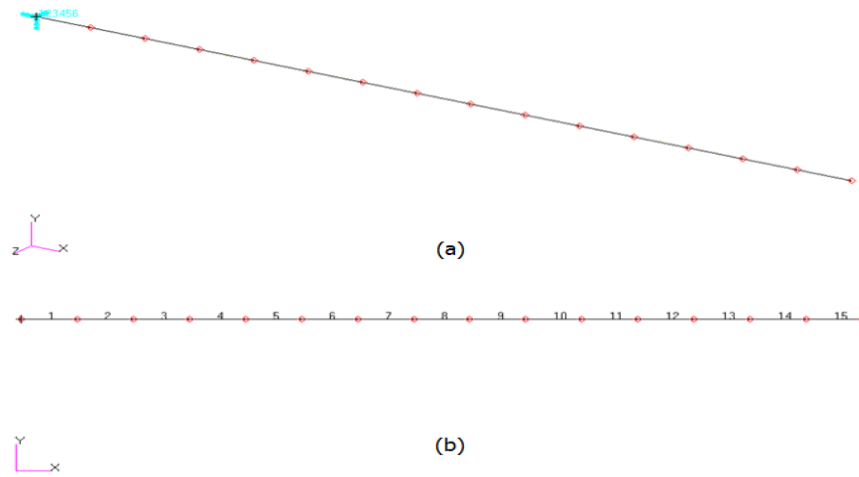
Yoğunluk (ρ)	7827 kg/m^3	Atalet Momenti (I)	$6.51 \times 10^{-8} \text{ kg.m}^2$
Elastik Modülü (E)	$2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$	Kesit Alanı (A)	$1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Uzunluk (L)	1.00 m	Birim uzunluğunun kütlesi (m)	9.78 kg/m

Tablo 1'deki bilgiler doğrultusunda, yapının ilk düzleme dik titreşim biçim şekline sahip teorik doğal frekansları (ω_n) hesaplanmış ve bu veriler referans alınan makaledeki sonuçlar 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 [Blevins, 1995]	Referans [Friswell, M. I., Penny, J.E.T. and Garney, S.D., 1998]		Sonlu Elemanlar Analizi	
	ω_n [Hz]	ω_n [Hz]	% Farkı	ω_n [Hz]	% Farkı
1	20.72	21.00	1.34	20.67	-0.25

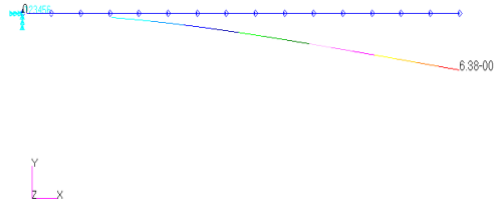
Ağ sıklığı, doğal frekans açısından tatmin edici sonuçların alınması (yani % Fark ≤ 1) ve referans makale ile bağlantılı olması açısından 15 elemanlı olarak seçilmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



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 sıfırlanmasıyla elde edilmiştir. Şekil 2(b) deki model eleman numaralandırılması; hasar yerlerinin gösterilmesinde de kullanılacağı için önem arz etmektedir. Sonlu elemanlar modelindeki her elemanın yapısal özellikleri programa ayrı ayrı girilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda Tablo 2'de elde edilen doğal frekans değerlerine karşılık gelen titreşim biçim şekilleri Şekil 3'de gösterilmiştir.

Fringe: Default, A1 Mode 1 : Freq. = 20.667, Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: Default, A1 Mode 1 : Freq. = 20.667, Eigenvectors, Translational.



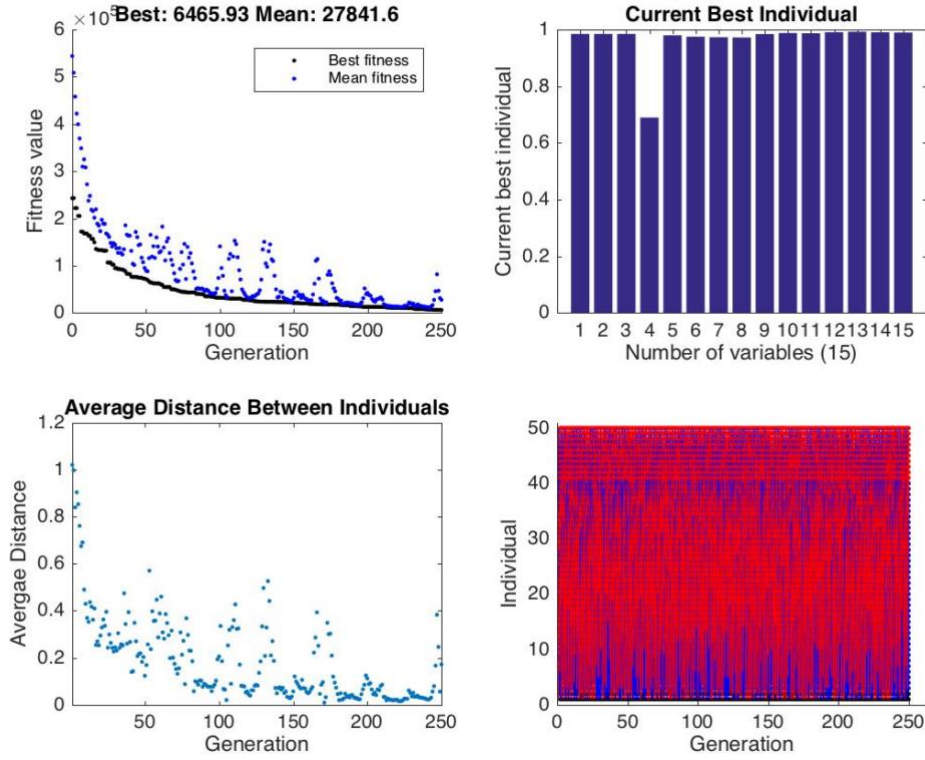
Şekil 3. Ankastre kirişin ilk düzleme dik eğilme biçim şekli

Hasar modelleme kısmında; çarpma tipi hasar, eleman elastik modülü katsayısı üzerinden yüzdesel düşüş olarak modellenmiştir. En ciddi hasar söz konusu katsayının %70 düşüşü olarak modellenirken en hafif hasar %10 düşüş olarak belirlenmiştir. Eniyileme algoritması olarak MATLAB® [MATLAB®, 2012] 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 [Meruane, V., Heylen, W., 2008]. Bu birleşik hasar tespit algoritması Şekil 2'deki sonlu elemanlar modeliyle yüz beş farklı senaryoda test edilmiştir. Bu yüz beş senaryo için mod şekil eğriliği metodunun hasar lokasyon tespitleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Bu tablodaki veriler eğer mod şekil eğriliği metodu yalnız başına kullanılırsa hasar lokasyonunu neresi olarak bulacağını göstermektedir. Bu metod 105 farklı senaryo için hasar lokasyonunu; işaret ettiği yer ve bir sonraki elemana ek olarak baştaki ve sondaki elemanlar şeklinde tüm çözüm aralığında 4 elemana indirgemektedir.

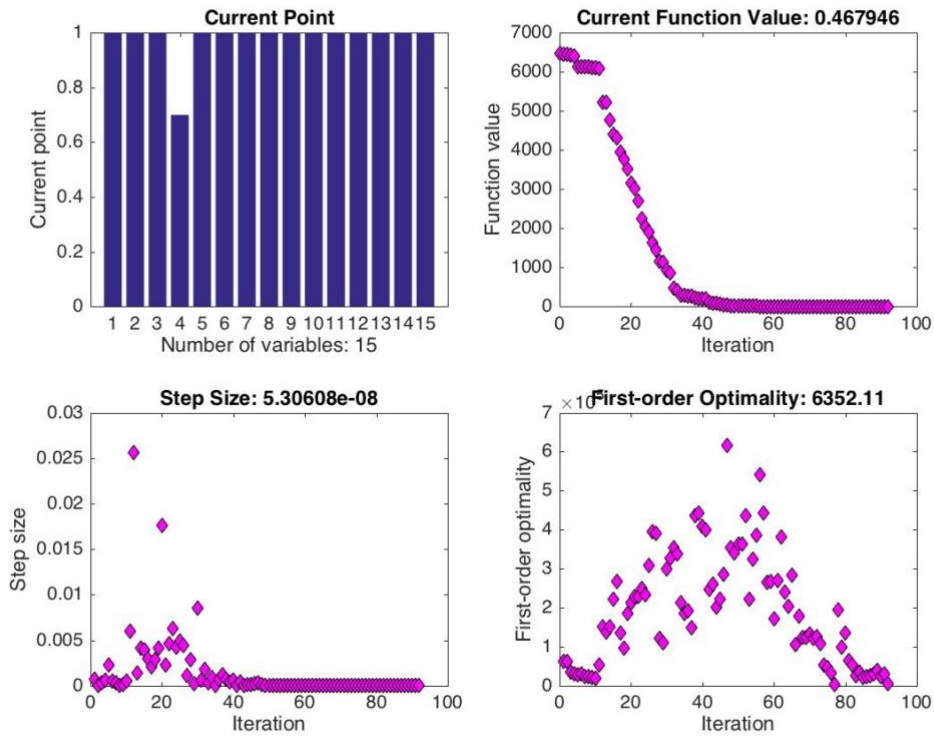
Tablo 3. Mod Şekil Eğriliği metodu ile hasar lokazisasyonu

Eleman Numarası / Hasar Şiddeti	%70	%60	%50	%40	%30	%20	%10
1	2	2	2	2	3	3	3
2	2	2	3	3	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	3	3	3	3	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7
8	7	7	7	7	7	7	7
9	8	8	8	8	8	8	8
10	9	9	9	9	9	9	9
11	10	10	10	10	10	10	10
12	11	11	11	11	11	11	11
13	12	12	12	12	12	12	12
14	13	13	13	13	13	13	13
15	14	14	14	14	14	14	14

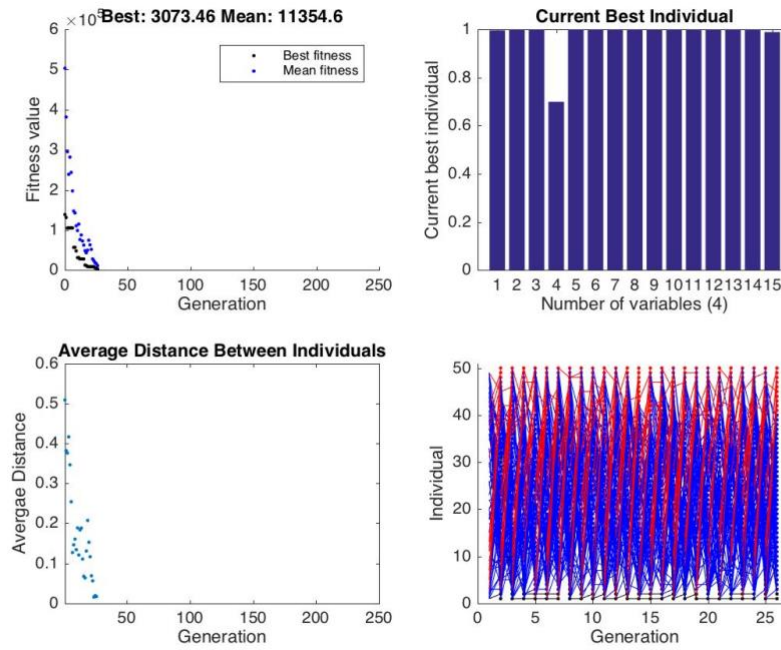
Örnek olarak, sonlu elemanlar modelindeki 4. elemanın elastik modül katsayısı 0.7 değerleriyle çarpılarak, bu elemanda %30 çarpma hasarı modellenmesi yapılmış, bu hasarlı modelin ilk iki düzleme dik titreşim doğal frekans değerleri ve karşılık gelen titreşim biçim şekilleri hasar tespit algoritmasına girdi olarak verilmiştir. Titreşim biçim şekillerinden mod şekil eğriliği metodu kullanılarak hasar lokasyon olasılıkları daraltılmış bu şekilde problemi genetik algoritma ele almış, hedef fonksiyon değerine ulaşana kadar nesil yaratıp (Şekil 6) problemi çözüm aralığına soktukten sonra FMINCON'a devretmiştir (Şekil 7). Çözüm aralığına sokma kriteri de eski çalışmalarda [Aktasoglu S. ve Şahin M, SAVTEK 2012], [Aktasoglu S. ve Şahin M, UHUK 2012] kullanılan 250 nesil yaratma(iterasyon) değerinde uygunluk fonksiyonun aldığı değere göre belirlenmiştir. Bu iterasyonlarda genetik algoritma hedef fonksiyonunu 5000-10000 değeri arasına aldığında problemi lineer olmayan eniyileme algoritmasına devretmektedir. Bu nedenle yeni sistemde genetik algoritmanın durma kriteri olarak hedef fonksiyon için 5000 değeri kullanılmıştır.



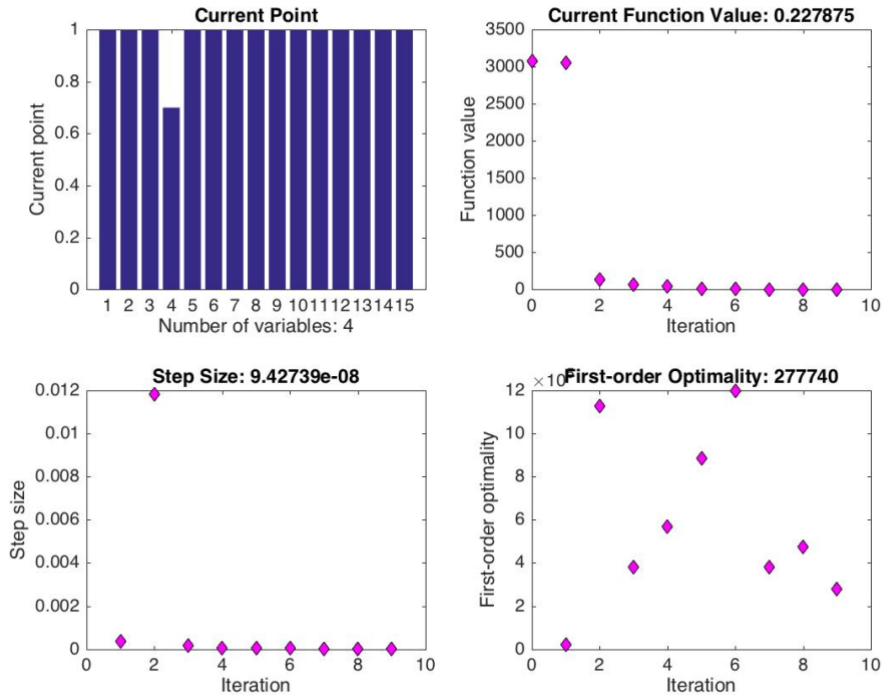
Şekil 4. Mod Şekil Eğriliği kullanılmadan GA çözüm geçmişi (30% şiddette 4. elemanda)



Şekil 5. Mod Şekil Eğriliği kullanılmadan FMINCON çözüm geçmişi (30% şiddette 4. elemanda)



Şekil 6. Mod Şekil Eğriliği kullanılarak GA çözüm geçmişi (30% şiddette 4. elemanda)



Şekil 7. Mod Şekil Eğriliği kullanılarak FMINCON çözüm geçmişi (30% şiddette 4. elemanda)

Aynı problem iki farklı koşulda (Şekil 4-7) 1.3 GHz Intel Core i5 işlemci ve 4 GB 1600 MHz DDR3 macOS High Sierra işletim sisteminde koşturulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. İki çözüm sistemi de hasarı beklendiği üzere 4. elemanda %30 şiddette olarak bulmuştur.

SONUÇ

Yapılan analizler ışığında tasarlanan birleşik eniyileme sisteminin artık kuvvet amaç fonksiyonu ile hasarın yeri ve şiddeti cinsinden tanınması konusunda başarılı olduğu gösterilmiş ve mod şekil eğriliği metodunun çözüm sistemine dahil edilmesiyle kaynak kullanımı açısından iyileştirmeler elde edilmiştir. Sayısal değerlerle bu iyileştirmeyi ortaya koymak için; herhangi bir hasar senaryo probleminin 5 kez tekrar analizleri gerçekleştirilip ve çözüm sürelerinin ortalamaları alınarak metotlar karşılaştırıldığında mod şekil eğriliğinin çözüm sistemine katılmasının çözüm süresinde 9.5 kat iyileştirme yarattığı görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Aktasoglu S. ve Şahin M., 2012. *Kiriş benzeri yapılarda testere kesiği tipi hasarların birleşik genetik algoritma ve lineer olmayan optimizasyon ile tespiti*, İstanbul, UHUK, 12-14 Eylül.
- Aktasoglu S. ve Şahin M., 2012. *Kiriş benzeri yapılarda birleşik genetik algoritma ve Lineer olmayan optimizasyon ile hasar tespiti*, Ankara, SAVTEK, 20-22 Haziran.
- Blevins, R.D., 1995. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Krieger Publishing Company, Melbourne, Florida.
- Friswell, M. I., Penny, J.E.T. and Garney, S.D., 1998. *A combined Genetic Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures*, Comput. Struct; 69:547-556.
- Mares, C. and Surace, C., 1996. *An Application of Genetic Algorithms to Identify Damage in Elastic Structure*. :*Journal of Sound and Vibration*, 195(2):195-215.
- MATLAB® [Çevrimiçi] MathWorks. [Alıntı Tarihi: 23 Şub. 12]
<http://www.mathworks.com/help/toolbox/optim/>
- Meruane, V. and Heylen, W., 2008. *Damage Detection by a Real-Parameter Hybrid Genetic Algorithm*, Poland : Proceedings of the Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring, 1073-1080, July.
- MSC®/PATRAN v2007 r1b (2007), "Reference Manual", MSC.Software.
- MSC®/NASTRAN v2007 (2007), "Reference Manual", MSC.Software.
- Rieger, N. F., 1986. *The Relationship Between Finite Element Analysis and Modal Analysis*, New York : Journal of Sound & Vibration.
- Rytter, A., 1993. *Vibration based inspection of civil engineering structures Doctoral Dissertation*, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg.
- Şahin M., 2004. *Damage Identification in Beam-like Structures by Vibration-based Analysis and Artificial Neural Networks*, University of Southampton, March.
- Zak A., Krawczuk and W. Ostachowicz, 2001. *Vibration Analysis of Composite Plate with Closing Delamination*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 12: 545.