Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology

İki Noktaya İndirgeme Tekniğinin Hasar Belirlemede Kullanımı

Barlas Özden ÇAGLAYAN[1], Ahmed ALQAYYIM[2]

ÖZET: Dinamik test verileri kullanılarak yapılarda hasar tespiti ve hasar tespit yöntemleri konusundaki araştırmalar son 30 yılda büyük bir artış göstermiştir. Teknolojik gelişme, ölçüm ve data toplama sistemlerinin maliyetlerini düşürmüş, daha detaylı ve hassas ölçümlere olanak sağlanmasına, test maliyetlerinin belirgin şekilde düşmesine neden olmuş ve bilgisayar ortamında çok büyük verilerle dahi hafıza sorunu olmaksızın işlem yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu gelişmeler yeni ölçüm tekniklerinin ve hesap yöntemlerinin gelişmesine yardımcı olmuş ve olmaya devam etmektedir. Yapı üzerindeki hasarın tespit edilebilmesi için birçok test ve hasar belirleme yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak her birinin bir diğerine göre üstün ve/veya üstün olmayan yönleri, uygulama kolaylıkları ya da zorlukları vardır. Bazılarının maliyeti diğerlerine göre yüksek, ya da bazılarının sonuç vermesi için oldukça yoğun işlem hacmi gerektiğinden problemin çözümü uzun zaman dilimine bağlı olabilir. Bazıları ise oldukça karmaşıktır, uzman olmayan biri tarafından uygulanamayabilir ve hatta çözülemeyebilir. Yöntemin data toplama süresi uzun, işlem süresi ise kısa olabilir. Bazı yöntemlerde ise tam tersine data toplama süresi kısa, datayı işleme ve sonuç elde etme süresi uzun olabilir. Bu makalede, köprü hasarlarının dinamik test datası yardımı ile saptanması için uygulaması kolay, kısa zamanda sonuç alınabilen, karmaşık olmayan ve işlem hacmi küçük, dolayısıyla ekonomik olduğu düşünülen geliştirilmiş yöntem ve bu yöntemin bir prototip üzerindeki uygulaması anlatılmış ve sonuçları verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik indirgeme, dinamik test, hasar belirleme

Application of Two Point Condensation Technique for Damage Detection

ABSTRACT: During the past few decades, nondestructive damage evaluation (NDE) techniques using experimental dynamic test data are widely applied in structures. Technological advancements increase in cost-effective computing memory and speed, advances in sensors, and adaptation and advancements of finite element method represent technical developments that have contributed to recent improvements in vibration based damage detection without memory lackness and long calculation time. In addition, adaptation and advancements in experimental techniques such as modal testing and development of linear and non-linear system identification methods are both reason and results of the abovementioned improvements. Testing and vibration based damage identification methods that are applied to structures have some advantages and disadvantages against each other. Some of them are very easy to apply to structures, some are not. Some of them are very expensive, some are not. Some of them are very complicated, some are not. Some of them need intensive and extra knowledge of testing and identification. In this paper, an application of one of these NDE techniques is discussed, which is named Two Points Condensation technique (TPC). This method helps to detect the damage without applying complicated calculation by using acceleration data gathered during the test of the structure under free or ambient vibration. In this study, the developed technique is applied to the experimental data of a steel truss bridge model structure after introducing damage by removing an element from the specimen. The results show that the method detects the damage location and level of damage.

Keywords: Damage detection, dynamic condensation, dynamic test

Cilt/*Volume:* 8, Sayı/*Issue:* 1, Sayfa/*pp:* 125-132, 2018
ISSN: 2146-0574, e-ISSN: 2536-4618 DOI: 10.21597/jist.407857

[1] Barlas Özden CAGLAYAN (0000-0002-8986-9188), İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği, İstanbul, Türkiye
[2] Ahmed ALQAYYIM (0000-0001-7065-3873), University of Babylon, Civil Engineering Department, Civil Engineering, Babylon, Irak
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Barlas Özden ÇAĞLAYAN, caglayan@itu.edu.tr

Geliş tarihi / *Received:* 01.06.2017
Kabul tarihi / *Accepted:* 27.08.2017

GİRİŞ

Yapıların sürekli izlenmesi ve hasarın mümkün olduğunca erken bir safhada belirlenmesi özellikle inşaat, mekanik ve uzay mühendislerinin ilgisini çekmektedir. Yapıların dinamik özelliklerini ve/veya davranışlarını değiştiren hasar veya kusurun tespiti için yapılan çalışmalarda ana fikir, modal parametrelerin (frekans, mod şekli, modal sönüm) yapının fiziksel özelliklerinin (kütle, sönüm ve rijitlik) bir fonksiyonu olmasıdır. Fiziksel parametrelerde herhangi bir değişim, modal parametrelerde bir değişime neden olacaktır.

İdeal hasar tespit yönteminin adımları; yapıda hasarın olup olmadığının saptanması, yapıda hasar bulunuyorsa yerinin belirlenmesi, hasarlı bölgenin ölçüm aletleriyle donatılıp hasarın miktarının ve ciddiyetinin saptanması ve son olarak yapının kalan ömrünün tayin edilmesi safhalarından oluşur. Bu akış diyagramı aynı zamanda otomasyona da uygundur. Ancak önemli bir sorun bu noktada karşımıza çıkmaktadır; yapı, yapılır yapılmaz (inşa sonrası), üzerine yerleştirilecek ölçüm aletleri ile ölçülmelidir ki, ileride hasar tespiti sırasında bu ölçümler referans teşkil ederek yeni ölçümlerle arasında kıyaslama yapılması mümkün olabilsin. Ayrıca hasar tespit metotlarının rahat uygulanabilir olması ve yapının işlevsellik kısıtlamalarını da göz önünde tutması gerektiği açıktır. Örneğin literatürde yer alan birçok hasar tespit yönteminde yapının kütlesinin yapıda oluşan hasar sonucunda değişmediği kabul edilmekle beraber, bazı yapılarda bu kabulün doğru olmadığı bilinmektedir; açık deniz platformları buna uygun bir örnektir. Bir diğer önemli problem de model ile yapı arasındaki davranış farklılıklarıdır. Geliştirilen bilgisayar modeli ve gerçek yapı davranışı arasında göz önüne alınmayan etkiler nedeniyle oluşacak farklılıklar, yapıda hasar olmamasına rağmen, yapıda hasar bulunuyormuş gibi yorumlanmasına neden olabilir. Yapı üzerindeki hasarın etkisi lineer veya lineer olmayan olarak sınıflandırılabilir. Lineer hasarda, yapı üzerinde hasarın oluşmasından sonra da yapı lineer davranış içerisinde kalır. Modal özelliklerdeki değişiklikler, yapının geometrisinin ve/veya malzemenin değişmesinden kaynaklandığında yapının davranışı halen lineer hareket denklemi kullanılarak modellenebilir. Lineer olmayan hasarda ise, yapı üzerinde oluşan hasar nedeniyle lineer davranış içerisinde olan yapının lineer olmayan bir davranış içerisine girmesi söz konusudur. Yapının dış yükler altındaki titreşimi sırasında zaman zaman açılıp kapanan yorulma çatlakları lineer olmayan hasara örnek olarak verilebilir. Yapılmış çalışmaların büyük bir bölümü sadece lineer olan sistemler üzerinedir.

Modal parametrelerin kullanılmasına dayanan, yapı hasarlarının tespiti konusunda detaylı bir araştırma 1979 yılında yapılmıştır (Richardson, 1980). Bu araştırma daha çok büyük yapılar, nükleer santraller, açık deniz platformları ve döner makinalar üzerinedir ve yapıların değişik bölümlerinin birlikte çalışmasının kontrolü, yapı üzerindeki titreşimleri sürekli izleme ve modal özelliklerindeki değişikliklerin kontrolü safhalarından oluşmaktadır. Birçok doktora çalışması sırasında Hasar tespit ve bununla ilgili konularda birçok yayın incelenmiş ve birbirleriyle kıyaslanarak iyi ve kötü tarafları yayınlanmıştır (Rytter, 1993; Doebling, 1995).

Hasar tespit yöntemlerini aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Rytter, 1993):

- Sınıf 1 Yapı üzerinde hasarın olup olmadığının tespiti
- Sınıf 2 Yapı üzerindeki hasarın geometrik yerinin belirlenmesi
- Sınıf 3 Hasarın seviyesinin belirlenmesi
- Sınıf 4 Yapının geri kalan servis ömrünün belirlenmesi

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda sadece Sınıf 1 ve Sınıf 2 göz önünde tutulmuş, Sınıf 3 hasar miktarının ne kadar belirlenebileceği araştırılmış ve mevcut hasar tespit yöntemlerine ek olarak etkin bir hasar tespit yöntemi geliştirilmiştir. Hasar tespitiyle ilgili çalışmalar incelendiğinde, hasar tespitinde kullanılan ölçüm datasına ve kullanılan tekniğe göre frekans değişimleri, ileri problem, tersinir problem, mod şekli değişimleri, fleksibilite değişiminin kıyaslanması, teklik kontrolü, rijitlik hata matrisi metodu, artık fleksibilitenin etkileri, ölçülmüş rijitlik matrisindeki değişimler, matris güncelleme yöntemleri, optimum matris güncellemesi metodu, duyarlılık analizlerine dayalı güncelleme metodları, özdeğer benzeşim metodu, hibrid matris güncelleme metodları ve yöntemler, lineer olmayan yöntemler, sinir ağına dayalı metodlar, diğer metotlar olarak bir sıralama yapmak mümkündür.

Tüm yöntemlerle ilgili daha detaylı bir referans listesi için Alqayyim'ın doktora çalışması incelenebilir (Alqayyim, 2016).

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada taşıyıcı sistemlerde K_c rijitlik değişimini ve bu değişimin yerini saptayabilen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma indirgenmiş sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve arazi ölçümlerinde kaydedilen ivme verisini kullanmaktadır. Ölçüm ve kaydedilen verilerden gerçek yapı davranışına geçerken karşılaşılan en büyük sorun analitik model ile test modelinin üst üste düşmemesidir. Bunun en büyük nedeni analitik modelde olan bütün serbestlik derecelerinin test modelinden ölçülmemesi veya ölçülememesidir.

Genellikle bu problemin üstesinden kütle, sönüm ve rijitlik matrislerin indirgenmesi ile gelinmektedir. Bazen bunun tersi ile de karşılaşılabilir, bu durumda matrisleri genişletme yoluna gidilebilir. Matrislerin indirgenmesi için birçok yöntem vardır ancak genel olarak bakıldığında bunun ikiye ayrıldığı görülür; statik indirgeme ve dinamik indirgeme yöntemleri. Bu çalışmada SEREP (*System Equivalent Reduction Expansion Process*) olarak adlandırılan dinamik indirgeme yöntemi kullanılmıştır. TPC (two point condensation) tekniği rijitlik matrisindeki değerlerin değişimlerinin gözlenmesine dayanan analitik bir yöntemdir. Bu teknik indirgenmiş teorik rijitlik matrisi K_r ile optimizasyon sonucu hesaplanmış rijitlik matrisinin K_c birbiriyle mukayesesine dayanır. Teorik rijitlik matrisi K_o mevcut imalat paftaları kullanılarak hesaplanır. İndirgenmiş rijitlik matrisi K_r teorik rijitlik matrisi K_o kullanılarak serbest titreşim denkleminin yazılacağı iki-serbestlik dereceli sisteme indirgenmiş rijitlik matrisidir. Bu serbestlik dereceleri, köprü üzerine yerleştirilmiş ivmeölçerlerin yerine göre belirlenir.

Bu çalışmada kullanılan indirgeme yöntemi SEREP' in, özellikle dinamik problemlerin çözümünde daha iyi performans gösterdiği, rijitlik matrisinde daha az hataya neden olduğu birçok araştırmacı tarafından makalelerinde belirtilmiştir (Koh et al., 2006). İndirgenmiş matrislerle oluşturulan hareket denklemi Eşitlik 1' de verilmiştir (Chopra, 2012).

$$[M_r]_{2x2}\{\ddot{u}\}_{2x1} + [C_r]_{2x2}\{\dot{u}\}_{2x1} + [K_r]_{2x2}\{u\}_{2x1} = 0 \quad (1)$$

Bu formülde, K_r indirgenmiş rijitlik matrisi, M_r indirgenmiş kütle matrisi, C_r sönüm matrisi, ü ivme vektörü, u̇ ivme vektörü kullanılarak hesaplanan hız vektörü, u ivme vektörü kullanılarak hesaplanan yer değiştirme vektörüdür (Leis, 2011). Ölçülen ivme kayıtları kullanılarak sistemin birinci ve ikinci mod şekilleri ve ilgili frekanslar, sönüm matrisinin ve hesap yoluyla bulunacak rijitlik matrisinin hesap ve kontrollerinde kullanılmaktadır.

Akış diyagramı Şekil 1' de verilen bu yöntemde kütle matrisinin sisteme etki edecek kadar değişmediği kabul edilmiştir (Pokharkar and Shrikhande, 2010). Yapısal dinamik analizlerde en yaygın olarak kullanılan sönüm modeli doğrusal viskoz sönümü modelleyen Rayleigh sönüm modelidir. Bu model kullanım kolaylığı sağlaması nedeniyle çok yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada da sönüm matrisi (C) bu model kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlik matrisindeki değişim ile sönüm matrisinin de değişimi göz önüne alınmıştır. Oluşturulan hareket denkleminin optimizasyonu için yazılan kod çok hedefli optimizasyon çözücüsünü içermektedir. Matlab ve Octav ortamlarında bu teknik için yazılmış kod çalıştırılabilir. Çok hedefli optimizasyon bir matematik optimizasyon problemidir ve aynı anda birden fazla değişkenin optimizasyonuna olanak verir. Bu çalışmada rijitlik matrisinin optimum değerleri (K_c) (simetri korunacak şekilde) q minimize edilerek hesaplanmaktadır.

$$\sum \left[0 - \left[[M_r]\{\ddot{u}\} + [C_r]\{\dot{u}\} + [K_c]\{u\}\right]\right]^2 \quad (2)$$

Sönüm matrisi C_r Rayleigh viskoz sönüm kullanılarak kütle ve rijitlikle orantılı olarak Eşitlik 3' te tanımlandığı gibi hesaplanmıştır:

$$C_r = \alpha M_r + \beta K_r \tag{3}$$

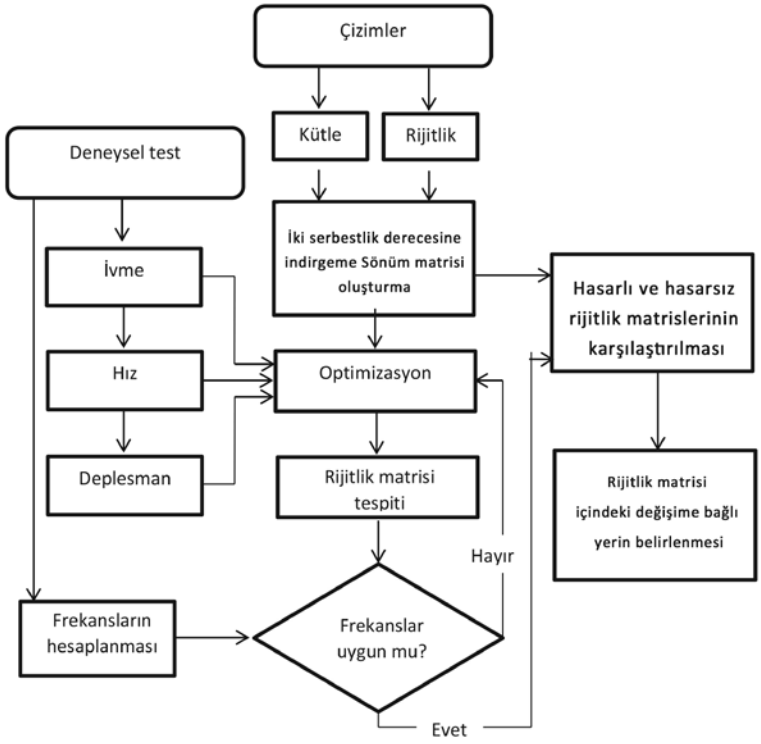
ve β değerleri i ve j modlarına ait: ξ_i ve ξ_j sönüm oranlarından hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix}. \tag{4}$$

Sönüm oranları ξ_i ve ξ_j birinci ve ikinci modlar kullanılarak Half-Power Bandwidth yöntemine göre Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanmıştır (Silva and Clarence, 2000).

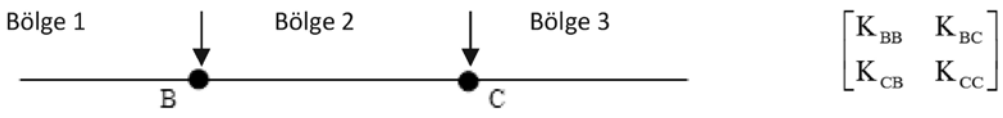
$$2\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n}. \tag{5}$$

ω_n frekansları her bir mod için Hızlı Fourier dönüşümü tekniği kullanılarak elde edilmiştir (Monson, 1996).



Şekil 1. Geliştirilen TPC tekniğinin ana adımları.

Optimizasyon sonucunda bulunan K_c matrisi K_r ile kıyaslanarak değişim belirlenir.

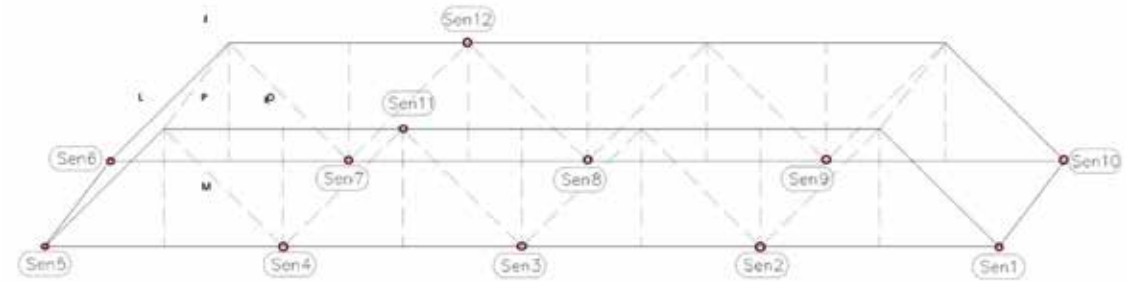


Şekil 2. Bölge ve indirgenmiş rijitlik matrisi

B ve C ölçüm noktaları olmak üzere, hasar eğer Bölge 2 de ise değişim en çok K_{BC} ve K_{CB} de görülmektedir. Hasar Bölge 1 de ise değişim en çok K_{BB} de görülmektedir. Hasar Bölge 3 de ise değişim en çok K_{CC} de görülmektedir. Hasar yayılı olarak Bölge 1, Bölge 2, Bölge 3 de ise değişim en çok K_{BB} ve K_{CC} de görülmektedir.

Geliştirilen yöntem Şekil 3'te görülen model bir köprü üzerinde etkinliğinin belirlenmesi için uygulanmıştır. Test köprüsü 6 metre açıklığında zemine serbest oturan, üç tip farklı boru elemandan üretilmiş bir kafes köprüdür. Test için 12 ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerlerin yerleşim şeması, test ekipmanları ve test düzeni Şekil 3' de görülmektedir.



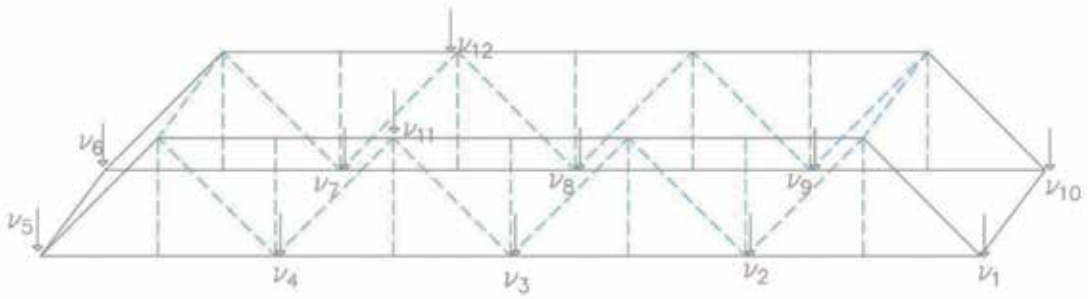


Şekil 3. 6m açıklıklı kafes köprü ve ivmeölçerlerin yerleşim planı

Model köprü üzerinde hasarın tarifinin yapılabilmesi için sırasıyla seçilen elemanlar modelden çıkarılmıştır. Hasar senaryosu için 4 farklı set kullanılmıştır (Şekil 3). İlk hasar senaryosu için model köprüden J-K elemanı sökülmüştür. İkinci hasar senaryosu için J-K elemanı yerine monte edilmiş ve L-M elemanı yerinden sökülmüştür. Üçüncü hasar senaryosu için P-M elemanı yerinden sökülmüştür. Sonuncu senaryo için L-M, P-M nin yanı sıra L- O elemanı da yerinden sökülmüştür. Sökülecek elemanlar mod şekline ve frekansa en hassas ve en az hassas olacak şekilde seçilmiştir. Böylece geliştirilen yöntemin hasarlı bölgeyi bulmadaki yeterliliği sınanmıştır.

Kafes model köprü çek ve ani bırak yöntemiyle titreştirilmiştir. Hız ve deplasman verileri ivme kaydının integrasyonu sonucu elde edilmiştir. Kaydedilen sinyal ve integrasyon sonucu bulunan hız ve deplasmanlar optimizasyon sırasında kullanılmıştır. Optmizasyon sonucu elde edilen rijitlik matrisine bağlı bulunan yapı mod şekilleri ve ilgili frekanslar ölçümden elde edilen değerlerle kontrol edilmiştir.

İndirgeme sırasında kullanılan serbestlik dereceleri (DOF) Şekil 4' de verilmiştir. Serbestlik dereceleri ν_1, ν_2, ν_3, ν_4, ve ν_5 ön aksta, diğer serbestlik dereceleri ν_6, ν_7, ν_8, ν_9 ve ν_{10} arka aksta bulunmaktadır. Yerleştirilen sen1- sen12 adlı ivmeölçerler ν_1 - ν_{12} yönündeki ivme değerlerini kaydetmektedir. Hasarın belirlenmesi için sırasıyla ön ve arka aksta 2 serbestlik derecesi seçilmiştir. Hasarın yeri rijitlik matrisindeki en büyük değişimi gösteren elemanın yerine göre belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4. Bu çalışma için dikkate alınan serbestlik dereceleri

İndirgenmiş rijitlik matrisi ile optimizasyon ile bulunmuş rijitlik matrislerinden hesaplanacak değişim matrisinin elemanlarındaki değişim miktarı ve yeri hasarın yerinin ve hasar miktarının belirlenmesinde yol gösterici bir faktördür (Eşitlik 6).

$$\Delta K_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta k_{ii} & \Delta k_{ij} \\ \Delta k_{ji} & \Delta k_{jj} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Burada, ΔK_{ij} i ve j serbestlik derecelerindeki değişim matrisi, $\Delta k_{ii}, \Delta k_{jj}, \Delta k_{ij}, \Delta k_{ji}$ indirgenmiş K_r rijitlik matrisi ile hesaplanmış K_c rijitlik matrislerindeki karşılıklı gelen elemanlarındaki % cinsinden değişimi göstermektedir.

Δk_{ii} ve Δk_{jj} birbiriyle kıyaslandığında, büyük değişimin olduğu eleman hasarın yönünü de göstermektedir. Örneğin Δk_{ii} nin Δk_{jj} den büyük olması hasarın "i" serbestlik derecesinin bulunduğu yere daha yakın olduğunu işaret etmiş olur.

BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk hasar senaryosu için sırasıyla v2 - v4, v7 – v9, v11 – v12 serbestlik dereceleri seçilmiştir (Şekil 4). Çizelge 1' de her seçilen serbestlik dereceleri için önerilen yöntemin uygulanması sonucu hesaplanan değişim matrisi verilmiştir. Çizelge 1' de verilen değişim matrisleri incelendiğinde, en büyük değişimin v2-v4 serbestlik dereceleri matrisinde k_{v4v4} elemanında olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Hasar senaryosu 1 için hesaplanan değişim matrisi

Göz önüne alınan serbestlik dereceleri	**Rijitlik matrisindeki değişim (ΔK %)**
v_2 , v_4	$\begin{bmatrix} 10.50 & 11.37 \\ 11.37 & 21.15 \end{bmatrix}$
v_7 , v_9	$\begin{bmatrix} 14.22 & 12.07 \\ 12.07 & 8.38 \end{bmatrix}$
v_{11} , v_{12}	$\begin{bmatrix} 18.24 & 10.65 \\ 10.65 & 9.56 \end{bmatrix}$

Sen2 adlı ivmeölçere hasarlı bölgenin daha yakın olduğu anlaşılmaktadır. v7-v9 serbestlik dereceleri matrisinde k_{v7v7} elemanında k_{v9v9} elemanına göre daha büyük bir değişim olduğu için, Sen7 adlı ivmeölçere hasarlı bölgenin daha yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bu iki sonuç hasarın köprünün sol tarafında olduğunu işaret etmektedir. $v_{11} - v_{12}$ serbestlik dereceleri incelendiğinde, k_{v11v11} değerinin daha büyük bir değişime işaret etmesinden dolayı ise hasarlı bölgenin ön akstaki panelde olduğu anlaşılmaktadır. Hasar senaryosu 2, 3 ve 4 için hazırlanan Çizelge 2 incelendiğinde, hasarlı bölgenin yeri tayin edilebilmektedir.

Çizelge 2. Hasar senaryosu 2, 3 ve 4 için değişim matrisleri.

Serbestlik dereceleri	**Değişim matrisi (ΔK %) durum 2**	**Değişim matrisi (ΔK %) durum 3**	**Değişim matrisi (ΔK %) durum 4**
$\nu_2 \quad \nu_3$	$\begin{bmatrix} 9.52 & 12.05 \\ 12.05 & 13.97 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 8.83 & 10.44 \\ 10.44 & 13.25 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.09 & 10.66 \\ 10.66 & 15.17 \end{bmatrix}$
$\nu_8 \quad \nu_9$	$\begin{bmatrix} 20.33 & 13.13 \\ 13.13 & 10.12 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 21.67 & 11.33 \\ 11.33 & 9.99 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 25.26 & 9.23 \\ 9.23 & 9.42 \end{bmatrix}$
$\nu_{11} \quad \nu_{12}$	$\begin{bmatrix} 10.65 & 11.01 \\ 11.01 & 18.19 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.97 & 10.50 \\ 10.50 & 17.28 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 8.28 & 10.46 \\ 10.46 & 19.81 \end{bmatrix}$

Geliştirilen yöntemin özellikle hasarın yerini işaret etmesi bakımından iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Büyük değişimler gri renkle taranmıştır. Şekil 2 de verilen bilgilerin ışığı altında, hasarın ne tarafta olduğu açık olarak görülebilmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada taşıyıcı sistemlerde K_c rijitlik değişimini ve bu değişimin yerini saptayabilen geliştirilmiş bir yöntem sunulmuştur. Karşılaşılan ana sorun, analitik olarak modellenmiş sistem ile deneysel olarak ölçülmüş sistemin çoğunlukla serbestlik dereceleri bakımından birbiriyle uyum içinde bulunmamasıdır. Analitik modellenmiş sistemin bütün serbestlik derecelerinden ölçüm kaydı alınmadığı için yapı davranışının ölçümlerden çıkarılması her zaman kolay olmamaktadır. Rijitlik ve kütle matrislerinin indirgenmesi bu aşamada büyük kolaylık sağlamaktadır. İki noktaya SEREP algoritması kullanılarak indirgenen kütle ve rijitlik matrisi ve dolaylı olarak hesaplanan sönüm matrisi üzerinden yazılan hareket denkleminin test edilen yapı üzerinden kaydedilen ivme kayıtlarının kullanılmasıyla rijitlik matrisinin optimizasyonu sonucu rijitlik matrisi içindeki değişim ve değişimin yerine bağlı olarak rijitlikteki düşüş/artış ile muhtemel hasarın yeri belirlenebilmektedir. Bu yöntemin en etkin yönlerinden biri, sistemdeki bilinmeyenlerin sayısı indirgeme nedeniyle azaldığı için hesaplamaların çok hızlı yapılabilmesidir ve iki ivmeölçer ile yapılacak birkaç testten faydalanarak muhtemel hasarlı bölgenin hızlıca belirlenmesi ve o bölgenin daha detaylı olarak ölçülmesine daha uzun süre ayrılabilmesi için olanak sağlamasıdır.

Bu yöntemin etkinliği ve güvenirliği prototip bir kafes köprü üzerinde sınanmıştır. Ölçümlerle elde edilen frekans ve modşekilleri, optimizasyon sırasında ayrı bir parametre olarak kullanılmış ve hesaplanan rijitlik matrisi sonrası bulunan mod şekli ve frekanslarla uyumu kontrol edilmiştir. Böylece hasarlı bölgenin optimizasyon ile bulunması sırasında sınır koşullar kısıtlanarak daha doğru bir sonucun elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen datanın geliştirilmiş olan yöntem ile değerlendirilmesi sonucu, prototip taşıyıcı üzerinden sonradan çıkarılan elemanlarının neden olduğu rijitlik değişimi ile yerinin saptanması mümkün olmuştur. Bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntem; hasar tespiti konusundaki etkinliğinin yanı sıra, oldukça az sayıda ivmeölçerin kullanılmasına izin verir. Diğer test yöntemleriyle kıyaslandığında daha kısa ve az sayıda kablo ile az kanallı bir veri toplama sistemi yeterli olmakta-

dır. Test sırasında köprüyü kullanıma kapatmadan uygulanabilmesi, emsallerine göre daha ekonomik bir test ekipmanına ve çok kısa sürede daha az sayıda test ekibi ile uygulanabilen bir test yöntemi olması nedeniyle; literatürde yeralan benzerlerine göre optimum bir nitelik taşımaktadır. Data toplama sitemleri kablolardan arındırılmaya çalışılmaktadır. Bu konudaki çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. Çevresel gürültülerden etkilenmeyen ve internet bağlantısının sorun yaratmayacağı ölçüm sistemlerinin gelişimiyle bu tür yöntemler gerçek zamanlı işlenip yapısal sağlık izlemesinde de kullanılması beklenebilir.

KAYNAKLAR

Actis RL, Dimarogonas AD, 1989. Non-Linear Effects due to Closing Cracks in Vibrating Beams, ASME Design Engineering Division Publication DE–Structural Vibration and Acoustics, 18: 99–104.

Alqayyim A, 2016. A vibratıon-based damage detection algorithm for bridge type structures, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. 132s.

Baruh, H, Ratan S, 1993. Damage Detection in Flexible Structures, Journal of Sound and Vibration, 166(1): 21–30.

Chopra AK, 2012. Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake engineering . 4th edition, Boston, USA. 992 p.

Doebling, SW, 1995. Measurement of Structural Flexibility Matrices for Experiments with Incomplete Reciprocity, University of Colorado, Boulder, CO, Department of Aerospace Engineering Sciences, Ph. D. Dissertation, 220 p.

Leis JW, 2011. Digital Signal Processing Using MATLAB for Student and Researchers. Hoboken New Jersey, USA. 386 p.

Koh CG, Tee KF, Quek ST, 2006. Condensed Model Identification and Recovery for Structural Damage Assessment. Journal of Structural Engineering ASCE, 132: 2018-2026.

Monson HH, 1996. Statistical Digital Signal Processing and Modeling. New York, USA. 622p.

Pokharkar PV, Shrikhande M, 2010. Structural Health Monitoring Via Stiffness Update. ISET Journal of Earthquake Technology, 47 (1): 47–60.

Richardson, MH, 1980. Detection of Damage in Structures from Changes in their Dynamic (Modal) Properties- A survey, NUREG/CR-1431, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. 266 p.

Rytter, A, 1993. Vibrational based inspection of civil engineering structures. Aalborg, Denmark, University of Aalborg, Doktora Tezi. 193 p.

Silva D, Clarence W, 2000. Vibration fundamentals and practice. Boca Raton, USA. 957 p.