



Tabakalı kompozit bir kiriş ve levhada hasar tespitinin model tabanlı yapı sağlığı izleme teknikleriyle belirlenmesi

Mahmut Pekedis*, Hasan Yıldız

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Kompozit yapılarıdaki hasar tanılamaları
- Nümerik yöntem sonuçlarının deneysel ölçüm verileriyle doğrulanması
- Nümerik veriler ile deneysel ölçümlerin, aralıklı düzgünleştirme metodu (ADM) ve birim şekil değiştirme enerjisi gibi algoritmalarda değerlendirilmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 31.10.2014

Kabul: 08.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.278438

Anahtar Kelimeler:

Yapı sağlığı izleme,
hasar teşhis algoritmaları,
kompozit yapılar,
delaminasyon

ÖZET

Bu çalışmada, model tabanlı hasar tespit tekniği algoritmaları, iç bölgelerinde delaminasyon içeren tabakalı kompozit kiriş ve levhaya uygulanmıştır. Başlangıçta, sağlıklı ve delaminasyon içeren tabakalı kompozit kiriş, deneysel olarak modal testler uygulanarak doğal frekanslar bulunmuştur. Daha sonra, sağlıklı ve hasarlı yapıya ilişkin ölçülen doğal frekanslar nümerik yöntem sonuçları ile doğrulanmıştır. Doğrulama işlemleri tamamlandıktan sonra, sonlu elemanlar yöntemi, delaminasyon içeren tabakalı kompozit bir kiriş ve levha üzerinde uygulanıp mod şekilleri çıkartılmıştır. Mod şekillerinden eğrilik yüzeyleri çıkartılmış ve daha sonra aralıklı düzgünleştirme metodu (ADM) ile birim şekil değiştirme enerjisinde (BŞDE) kullanılarak delaminasyonun olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Kompozit levhadaki hasar tespitleri iki farklı durum için değerlendirilmiştir. Birinci durum da, yapının başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor varsayımı ile tanılamalar yapılmıştır. Ancak bazen hasar tespiti yapılırken hasara uğramış yapının, hasara uğramadan önceki verileri bulunmayabilir. Bu amaçla, ikinci durumun değerlendirilmesinde hasarlı yapıya ait eğrilik modları, yüzey uydurma algoritmasıyla hasara uğramamış gibi kabul edilerek hasar tespitleri yapılmıştır. Hasar teşhisi için her iki algoritma her iki durum için değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, laboratuvar ortamında kompozit malzemelerden imal edilen kompozit kiriş ve levhanın iç bölgelerinde oluşan delaminasyonlar, deneysel veya nümerik yöntemlerden alınan verilerin model analiz tabanlı YSİ yaklaşımlarında kullanılmasıyla, tahribatsız bir şekilde tahmin edilebileceği kanaatine varılmıştır.

Damage diagnosis of a laminated composite beam and plate via model based structural health monitoring techniques

H I G H L I G H T S

- Damage diagnosis in composite structures
- Validation of experimental measurements with the results of numerical method
- Evaluation of the numerical data and experimental measurements in the algorithms such as gapped smooth method (GSM) and strain energy method (SEM)

Article Info

Received: 31.10.2014

Accepted: 08.09.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.278438

Keywords:

Structural health monitoring,
damage diagnosis
algorithms,
composite structures,
delamination

ABSTRACT

In this study, model based damage identification algorithms were applied for a delaminated composite beam and plate. Initially, natural frequencies of healthy and delaminated beam were measured via experimental modal analysis. Next, the natural frequencies obtained by experimental method were verified with the finite element analysis. Once the validation has been fulfilled, the next step was to apply the finite element analysis to extract the mode shapes. Then, the curvatures mode shapes were obtained from the mode shapes, and these parameters were used in the gapped smooth method (GSM) and strain energy method (SEM) to detect the location and size of the delamination. The damage diagnosis technique for composite plate was evaluated for two cases. In the first case, it was assumed that the initial health information of a structure is known. However, the information of an undamaged structure may not be available during the diagnosis process for some circumstances. Therefore, the diagnosis was conducted by evaluating the curvatures of damaged structure using surface fit techniques in order to predict the initial status for the second case. Both of the two damage detection algorithms were evaluated for these two cases. The results show that, the delamination of laminated composite beam and plate could be predicted non-destructively by employing the data obtained from experimental or numerical technique in model based SHM approach for laboratory conditions.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: mahmut.pekedis@ege.edu.tr / Tel: +90 232 311 4970

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemelerdeki hasarlar (delaminasyon, çatlak vs.) sıklıkla karşılaşıp zamanla yapının stabilitesini ve mukavemetini azaltıp uygulama esnasında çalışma verimliliğini düşürmektedirler. Burada, genel olarak hasar, mevcut sistemin çalışma performansını etkileyen kasıtlı veya kasıtsız olarak oluşan her türlü değişikliktir. Hasar, yapıya ilişkin malzeme, geometri veya sınır koşullarının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Çalışma şartlarındaki yapıların barındırdıkları hasarlar için önlem alınmaz ise zamanla bu hasarlar büyük facialara neden olabilirler. Dolayısıyla, uçak, inşaat ve makine mühendisliği yapılarının izlenilip hasar durumlarının belirlenmesi için geliştirilen her türlü strateji, algoritma ve paradigmalara yapı sağlığı izleme olarak (YSİ) olarak adlandırılır [1].

Hâlihazırda, yapı sağlığı izleme tekniklerinde, hasar tanınması için tersinir yöntemler, fizik kuram modelleri ve veri tabanlı YSİ olmak üzere üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Tersinir yöntem ve model tabanlı YSİ'de, yapı için, fizik kuramlarına bağlı matematiksel modeller geliştirilmesiyle yapılır. Burada, çözüm tekniği olarak, analitik formülasyonlar veya yaygın olarak katı cisimler mekaniğinde uygulanan sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Sisteme ilişkin model kurulduktan sonra, deneysel ölçümlerden alınan veriler sürekli olarak modelde değerlendirilip yapıya ilişkin sağlık teşhisi yapılır. Yapı sağlığı izleme teknikleri, son zamanlarda özellikle inşaat, makine ve havacılık endüstrisinin çalışma alanlarından birisi olmuştur [2, 3]. Bunun yanında, YSİ yapı güvenilirliğinin sağlanmasında erken safhada deformasyonları saptayıp sistem hakkında gerçek zamanlı bilgi verir [4]. YSİ'de kullanılan sensörler çok hassas algılama kapasitelerine sahip, küçük boyutlu, maliyetleri az ve kolay monte edilebilirlikleri gibi özelliklerinden dolayı uygulamaları ve gelişimleri yıldan yıla gittikçe artmaktadır [5].

Titreşim tabanlı hasar tespit tekniklerinde, sistem daha çok bütünlük açısından değerlendirilerek yapının herhangi bir bölgesinde hasar olup olmadığı araştırılır. Temel olarak hasar, sistemde rijitlik düşüşlerinin oluşmasına, bu rijitlik düşüşleri de yapının doğal frekansının değişmesine neden olur. Burada, yapının hasar durumu sistemdeki tek bir sensörden alınan verilerden anlaşılabilir. Dolayısıyla, titreşim tabanlı hasar tespit teknikleri daha çok global araçlar olarak kabul edilir. Yapının özellikleri, aktif modal testle çevresel yüklere kalan yapılarda ise operasyonel modal analiz tekniklerinin uygulanmasıyla belirlenebilir [6]. Bazı durumlarda yapıya ilişkin sadece doğal frekanslarının değerlendirilmesiyle yapıdaki yerel hasarlar belirlenemeyebilir. Bunun için, yapının mod şekillerinin incelenmesiyle lokal hasarlar tanınır. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi, deneysel olarak mod şekillerinin elde edilebilmesi için yapıya birçok sensör yerleştirilip alınan verilerle modal şekiller belirlenir. Bilindiği üzere, deformasyonlar yapının mekanik

karakteristikliğini değiştirir. Bu değişiklik yapıdaki eğrilik parametrelerinin de değişmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, değişen bu parametreler hasar bilgisinin tespit edilmesine olanak tanır [1, 7]. Literatür incelendiğinde dinamik tabanlı hasar tespit metotları kullanılarak lineer malzemeler üzerinde birçok çalışma yapıldığı görülmüştür [8]. Doebing ve arkadaşları, köprü yapılarını sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişler ve buldukları verileri hasar tespit algoritmalarında kullanıp hasar bölgesini araştırmışlardır [9]. Köprüyü başlangıçta hasarsız bir şekilde modellemişlerdir. Daha sonra köprüyü hasarlı bir şekilde modelleyip sonlu elemanlar yöntemiyle analizini yapmışlardır. Katılık, hasar indeksi ve stabilitedeki değişim gibi parametrelerle hasar bölgesini tayin etmişlerdir. Kim vd. çalışmalarında çeşitli hasar tekniklerini kullanmışlar ve buldukları verilere göre hasar indeks metodunu, kullandıkları tüm metotlar arasından en iyi ve güvenilir metot olduğunu bulmuşlardır. Doğal frekans ve mod şekline dayalı hasar tespit tekniklerini geliştirip hasar bölgesini ve boyutunu hesaplamışlardır. Bunun yanında sonlu elemanlar yöntemini uygulayarak eğrilik verilerini bulmuşlar ve bu verileri, hasar tespit algoritmalarında kullanarak deforme olmuş bölgeyi araştırmışlardır. Eğrilik parametrelerine dayalı hasar tespit algoritmalarının hasar bölgesini tam olarak, frekans tabanlı hasar tespit tekniğinin ise çok az hata payıyla tespit ettiğini belirtmişlerdir [10]. Bu tekniklerin kompozit malzemelerdeki uygulamalarına yönelik ise sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Hamey ve arkadaşları, kompozit yapılarda oluşturdukları çeşitli hasar konfigürasyonlarıyla deformasyon bölgesinin tespiti için birkaç algoritmayı değerlendirmişlerdir [11]. Zhang ve arkadaşları, titreşim tabanlı YSİ'de yaygın olarak uygulanan frekans değişimlerini kullanarak kompozit kirişlerde delaminasyon hasarını teşhis etmişlerdir [12]. Çalışmalarında, deneysel ve nümerik yöntemleri kullanıp, hasar teşhisinde ise grafiksel yaklaşımları uygulamışlardır. Aynı şekilde Garcia ve arkadaşları da kompozit levhalardaki hasar tanılamalarında titreşim tabanlı YSİ tekniklerinden yararlanmışlardır [13]. Çalışmalarında, titreşim veri ölçümlerini çok değişkenli asal değişkenler analiz yöntemi olan istatistiksel teknikle değerlendirerek hasar teşhisini yapmışlardır. Bunun yanında, Pekedis ve arkadaşları, civata esneme hasarının teşhisinde titreşim sensör ölçümlerine dayanan insan-makine etkileşimli bir YSİ paradigması sunmuşlardır [14]. Test ettikleri sistemin dinamik tepkilerini ölçmek ve verileri ön proseslerde kullanmak amacıyla kuleyi oluşturan elemanların değişik bölgelerine ivmeölçerler yerleştirmişlerdir. İvmeölçerlerden aldıkları verileri başlangıçta, ön işleme ve asal değişkenler analizi olan istatistiksel yöntemler ile değerlendirip haptik kodlar üretmişler ve daha sonra bunları, katılımcılar üzerinde fiziksel titreşim uyarısı oluşturacak şekilde aktifleştirmişlerdir. Sonunda, insanların bu uyarılardan lineer olmayan değişimleri algılama ve bunlardan da hasarı belirleyebilme düzeylerini test etmişlerdir. Alnefaie, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kompozit malzemelerdeki delaminasyon hasarını modellemiş ve delaminasyon hasarının doğal frekansı nasıl etkilediğini araştırmıştır [15].

Çalışmasının sonucunda da, doğal frekans değişimlerinden hasarın belirlenebileceğini tespit etmiştir. Hasardan dolayı kaynaklanan katılık değişimine bağlı olarak hasar bölgesinin araştırılması hakkında Pandey ve Biswabtan sonra birçok çalışma yapılmıştır [16]. Sampaio ve arkadaşları, eğrilik şekli ve frekans tepki fonksiyonu kullanarak yapının hasar durumunu izlemişlerdir. Eğrilik ve hasar indeks tespit parametreleriyle yapının durumunu belirlemişlerdir. Yapıdaki hasar azalımı, hasara uğramayan kısmının yüzdelik azalımı olarak modellemişlerdir. Eğrilikleri kullanarak hasarın olduğu bölgeyi değerlendirip yapısı hakkında başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [17]. Zhang ve Akhtan, düzgün yük metodu (DYM) adında yeni bir deformasyon metodu geliştirmişlerdir [18]. Bu metoda göre yapının, düzgün bir yüke maruz bırakıldığı kabul edilir. Wu ve Law DYM metodunu iki boyutlu yapılara uygulamışlardır [19]. DYM'nin hesaplanmasında yapıların kenar bölgelerinde oluşan etkileri azaltmak için merkezi farklar yöntemi yerine Chebyshev polinomlarını kullanmışlardır. Bu metodun hassasiyetinin belirlenmesi için değişik sınır koşullarında nümerik örnekler ele almışlar ve değerlendirmişlerdir. Sağlıklı yapıların modal parametrelerini, aralıklı düzgünleştirme metodu (ADM) ile yaklaşık olarak çözmüşler ve nümerik yöntemlerden aldıkları sonuçlar güncellendikçe DYM eğrilikleri de hassas bir şekilde güncellendiği ve böylece hasar teşhisinin yapılabilceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, ADM metodu DYM ile birlikte kullanılması durumunda yüksek ve başarılı bir şekilde hasarın olduğu bölgenin tayin edildiğini belirtmişlerdir. Esneklik yöntemi kullanarak hasar bölgesinin tayin edilmesi, Gao vd. tarafından önerilmiştir [20]. Bu metod hasar tespit vektörü (HTV) olarak adlandırılmıştır. Metod, HTV vektörünü belirleyip, sensörün yerleştirildiği bölgelerin statik kuvvetlere maruz kaldığı, hasara uğramış elemanlarda ise herhangi bir gerilmenin oluşmadığı kabulü ile tespit yapılır. Bu çalışmanın temel amacı, kompozit kiriş ve levhadaki delaminasyon bölgesini model tabanlı tahribatsız dinamik analiz teknikleriyle belirlemektir. Başlangıçta, hasara uğramış ve hasara uğramamış kompozit malzemeler için deneysel ve nümerik yöntemlerle modal analizler uygulanıp doğal frekans ve mod şekilleri bulunmuştur. Daha sonra, bulunan mod şekillerinden modal eğrilik parametreleri hesaplanmıştır. Bulunan parametreler aralıklı düzgünleştirme metodu (ADM) ve birim şekil değiştirme enerjisi (BŞDE) gibi algoritmalarda kullanılıp kompozit kiriş ve levhadaki delaminasyon bölgesi tespit edilmiştir.

2. HASAR TESPİT ALGORİTMALARI (DAMAGE DIAGNOSIS ALGORITHMS)

Kompozit kirişlerdeki hasar tayini için iki algoritma değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımlarda hasar bölgesinin tayini için temel parametre olarak eğrilik mod şekli kullanılır. Birinci yaklaşım olan ADM metodunda hasarın tüm yüzeyde düzgün dağıldığı kabul edilir [21]. BŞDE yaklaşımında ise hasardan kaynaklanan eğilme rijitliğinin değişmesi ve buna bağlı olarak mod şekillerinde oluşan değişimlerle hasar belirlenir.

2.1. Aralıklı Düzgünleştirme Metodu (Gapped Smoothing Method)

Uzun süre yük altında kalmış yapıların, hasara uğramadan öncesi ve sonrasına ait verileri belirlemek oldukça zordur. Bu veriler ADM tekniğiyle düzgünleştirilir. Kısacası, sağlıklı bir yapıya ait mod şekilleri düzgün bir yüzeye sahip oldukları kabul edilir. Bunun yanında hasara uğramış yapının mod şekillerini kullanarak interpolasyon yaklaşım tekniğiyle sağlıklı yapının mod şekilleri tahmin edilir. Eğrilik modu, Eş. 1 ile hesaplanır.

$$\kappa = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

Burada κ , i noktasında hesaplanan eğrilik mod şeklini, u_i , i düğüm noktasındaki yer değiştirmeyi, Δx ise i ile $i+1$ düğüm noktaları arasında ölçülen mesafeyi göstermektedir. Burada, n kirişin uzunluğu boyunca dağılmış düğüm sayısıdır. Bu çalışmada sağlıklı bir yapıya ait eğrilik, yüksek dereceden polinom olarak bir boyutlu koşullar için, Eş. 2 ile ifade edilir.

$$\kappa(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 \quad (2)$$

Burada c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 katsayıları, nümerik veya deneysel veriler üzerinden regresyon tekniği uygulanmasıyla bulunur. ADM metodunda, hasar parametresi, deforme olmuş yapıya ait ölçülen verilerin deforme olmamış yapıdan çıkarılmasıyla elde edilir ve bir boyutlu durumlar için Eş. 3 aşağıdaki gibi olur.

$$D_{ADM}(x) = [\kappa_{\text{Ölçülen}} - \kappa(x)]^2 \quad (3)$$

Yüksek dereceden polinom olarak iki boyutlu levha için,

$$D_{ADM}(x, y) = [\kappa_{\text{Ölçülen}}(x, y) - \kappa(x, y)]^2 \quad (4)$$

$$R(x, y) = \kappa_{\text{Ölçülen}}(x, y) - \kappa(x, y) \quad (5)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada, $R(x, y)$ artık polinom, $\kappa_{\text{Ölçülen}}(x, y)$ hasarlı yapının iki boyutta eğrilik mod numaralarını, $\kappa(x, y)$ ise yapıya ilişkin başlangıç sağlık koşullarını gösterir. Eş. 4 tekrar yazılırsa, Eş. 6 elde edilir.

$$D_{ADM}(x, y) = R(x, y)^2 \quad (6)$$

Bu çalışmada başlangıçta sağlıklı numune için $\kappa(x, y)$ değerleri hesaplanıp hasar tespitinde değerlendirilmiştir. YSİ'de, hasar tespiti yapılırken her zaman hasara uğramış yapının hasara uğramadan önceki verileri bulunmayabilir. Bu amaçla, çalışmada ikinci durumun değerlendirilmesinde hasarlı yapıya ait eğrilik modları, yüzey uydurma algoritmasıyla, hasara uğramamış gibi kabul edilir. Yani hasarlı yapının, $\kappa_{fi}(x, y)$ değerleri kullanılıp tespitler yapılmıştır. Bir başka deyişle, $\kappa(x, y)$ fonksiyonu $\kappa_{fi}(x, y)$

olur. Yüzey uydurma algoritmasında deforme olmuş yapı, dördüncü dereceden polinom olarak sağlıklı hale getirilmiş gibi kabul edilip, şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} K_{fit}(x, y) = & p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 \\ & + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y \\ & + p_{22}x^2y^2 + p_{13}xy^3 + p_{04}y^4 \end{aligned} \quad (7)$$

Burada, p katsayıları, nümerik veya deneysel veriler üzerinde yüzey uydurma algoritmaları uygulanmasıyla bulunur. Bunun yanında, çözüm tekniği olarak, destek vektör makineleri veya yapay sinir ağlarında uygulanan regresyon teknikleri de kullanılabilir.

2.2. Birim Şekil Değiştirme Enerjisi Metodu (Strain Energy Method)

Bu metotta, yapıda oluşan deformasyonların tayini için birim şekil değiştirme enerjisi metodundan yararlanılır.

Kiriş için şekil değiştirme enerjisi,

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (8)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada $(\partial^2 w / \partial x^2)$ kirişteki eğriliği yani (κ) 'yı temsil etmektedir. Eşitlik tekrar yazılırsa, Eş. 9 elde edilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EIK^2 dx \quad (9)$$

Bir boyutlu problemler için sonlu farklar yardımıyla, Eş. 1 tekrar aşağıdaki formatta yazılabilir (Eş. 10).

$$\kappa = \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (10)$$

Aynı şekilde w_i , i . düğüm noktasındaki yer değiştirmeyi, Δx ise i ile $i+1$ düğüm noktaları arasında ölçülen mesafeyi göstermektedir. Bu değer, analitik, nümerik veya deneysel olarak belirlenebilir. Bir boyutlu durumlar için birim şekil değiştirme enerjisi yaklaşımıyla Eş. 11 ile hasar belirlenebilir.

$$D_{BSDE}(x) = \left| \kappa_{Ölçülen}^2 - \kappa(x)^2 \right| \quad (11)$$

$\kappa(x)$, nümerik, analitik veya deneysel olarak Eş. 10'dan bulunabilir. Eğer yapının deformasyona uğramadan önceki durumu için κ değerleri bilinmiyorsa, eğri uydurma teknikleriyle, eğrideki lineer olmayan kısımlar düzleştirilerek hasara uğramamış gibi kabul edilebilir. Burada, bir boyutlu kiriş modeli için eğrilik, polinomal olarak eğri uydurma için Eş. 2 kullanılabilir. İki boyutlu levha problemlerinde ise Eş. 7 kullanılır. Burada κ hasar tespitinde kullanılabilir. İki boyutlu levha için birim şekil değiştirme enerjisi yaklaşımıyla hasar parametresi, Eş. 12 ile bulunur.

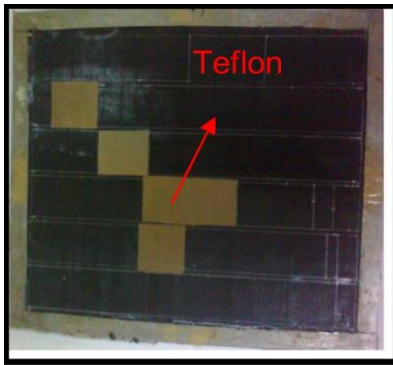
$$D_{BSDE}(x, y) = \left| \kappa_{Ölçülen}^2(x, y) - \kappa_{fit}^2(x, y) \right| \quad (12)$$

Burada $\kappa_{Ölçülen}(x, y)$, deneysel veya nümerik olarak bulunur. Eş. 5 ve Eş. 12'den Eş. 13 elde edilir.

$$D_{BSDE}(x, y) = \left| 2\kappa_{Ölçülen}(x, y)R(x, y) - R(x, y)^2 \right| \quad (13)$$

3. DENEY TASARIMI (EXPERIMENTAL SETUP)

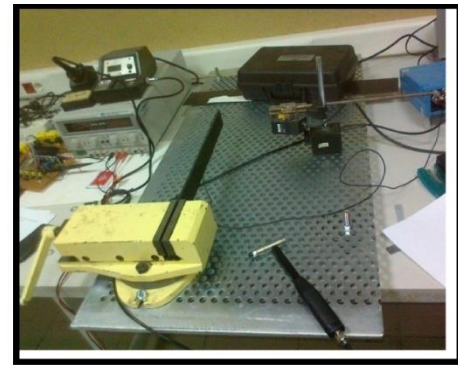
Kompozit kiriş ve levha, prepreg adı verilen tabakalardan üretilmiştir. Buradaki prepregin yapısında takviye elemanı olarak karbon fiber, matris elemanı olarak da termoset reçine mevcuttur. Başlangıçta levhayı oluşturan kompozit prepregler uygun bir şekilde kesilip 20 tabaka olacak şekilde $[(0/90)_5]_s$ üst üste sıralanmıştır (Şekil 1a). Sonra, 2 ile 3. tabaka arasında delaminasyon hasarını oluşturmak



a)



b)



c)

Şekil 1. Kompozit kiriş üretimi ve deneysel modal test a) Kompozit yapıda oluşturulan delaminasyon b) Sıcak pres c) Deneysel modal test

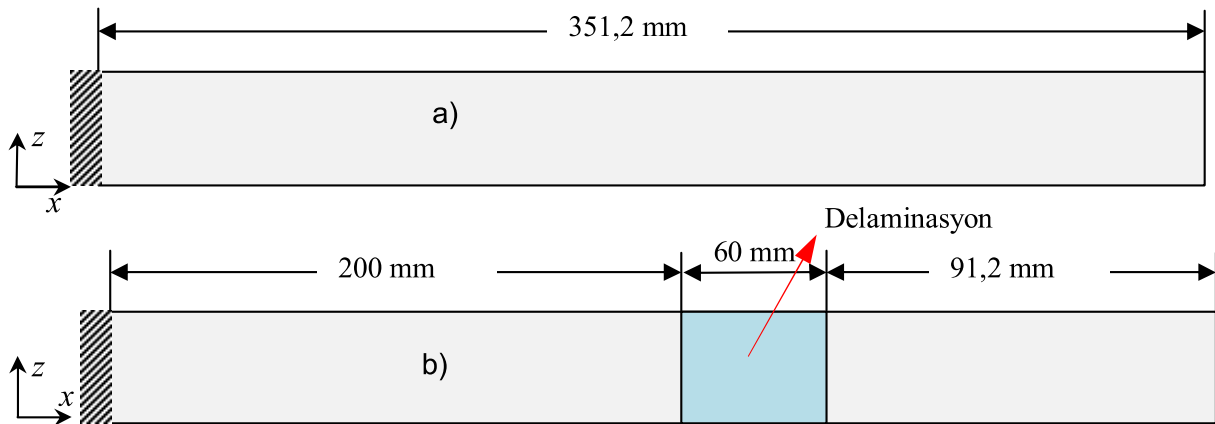
(Manufacturing of composite beam and experimental modal test a) Delamination in composite structure b) Hot press c) Experimental modal test)

için teflon yerleştirilmiştir. Daha sonra bu levhaya, 2 bar basınç altında ve 150°C sıcaklıkta, sıcak preste, 10 dk boyunca basınç uygulanmıştır. Basınç altındaki kompozit levhadaki sıcaklık iki adet sıcaklık probuyla izlenmiştir (Şekil 1b). Burada, seçilen basınç ve sıcaklık değerleri, prepreg tedarik firmasından temin edilmiştir. Kompozit levha, sıcak preste pişme sıcaklığına ulaştıktan sonra doğal olarak soğutulmuştur. Daha sonra, bu levha, testere ile kesilerek, uzunluğu 351,2 mm, genişliği 43 mm eninde, bir kiriş çıkartılmıştır. Burada, 20 tabakanın toplam kalınlığı 6,525 mm'dir. Bir sonraki aşama, laboratuvar ortamında test edilmeye hazır hale getirilen kompozit kirişin $x=280$ mm noktasında lazer yer değiştirme sensörü irtibatlandırılmıştır. Delaminasyon hasarı içeren tabakalı kompozit kiriş Şekil 1c'de verildiği gibi, sol ucu ankastre, sağ ucu ise (ön görünümünden bakıldığında) serbest olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneyde, çekiç ile ani kuvvet oluşturulmuş ve kirişin mesnetlendiği noktadan, 280 mm uzaklığa yerleştirilen lazer yer değiştirme sensörü ile kompozit kirişlerin salınımları alınmıştır (Şekil 1c). Burada, verilerin alınmasında NI 9234 tipinde veri alım cihazı ve verilerin işlenmesinde ise Labview yazılımı kullanılmıştır. 10 kHz'de 20000 örnekleme noktası ve 2 sn'de veri alınarak sağlıklı ve delaminasyon içeren kompozit kirişlerin doğal frekansları bulunmuştur.

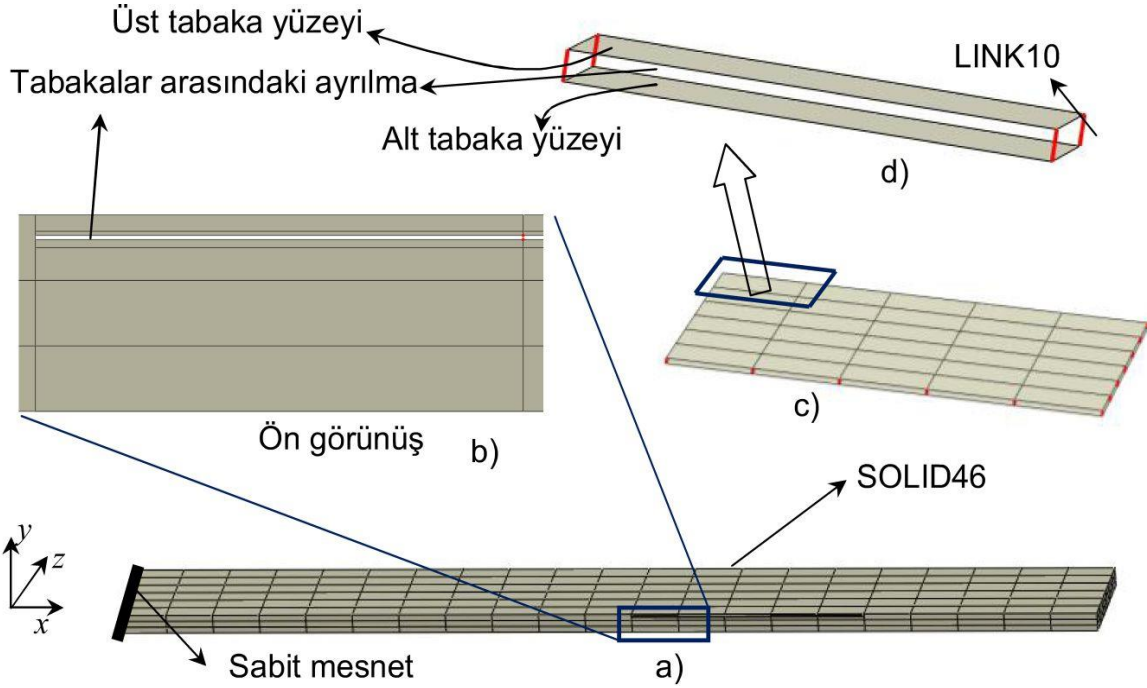
4. NÜMERİK ANALİZ (NUMERICAL ANALYSIS)

Kompozit kiriş ve levhanın dinamik davranışlarının incelenmesinde sayısal bir yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi kullanılıp, yöntem sonucu elde edilen veriler bahsedilen algoritmaların uygulanmasıyla hasar bölgesi tespit edilmeye çalışılmıştır. Kompozit kiriş ve levhanın modellenmesi ve analizi sürecinde ticari yazılım paketi olan ANSYS kullanılmıştır. Literatürde, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak delaminasyon hasarının modellenmesi, etkileşim [12, 22] ve bağlantı tipi [21, 23] elemanları ile modellendiği görülmüştür. Zhang ve arkadaşları, kabuk elemanları ile SOLID 185 elemanı

birlikte kullanarak modellemeyi yapmışlardır [12]. Çalışmalarında, delaminasyon bölgesindeki yüzeylerin düğümlerini serbest bırakmışlardır. Bazı çalışmalarda, bu serbest haldeki yüzey düğümlerinin iç içe girmelerini engellemek için (TARGE170/CONTACT173) etkileşim elemanlarının kullanıldığı görülmüştür [22, 24]. Sankar, ayrılma yüzeylerini kiriş elemanlarıyla modelleyerek delaminasyonu simüle etmiştir [25]. İki tabaka arasındaki ayrılma miktarı 0,02 ile 0,15 mm arasında değişen aralıklarla hasarın modellendiği belirtilmiştir [13, 15, 23]. SEY çözüm tekniğinde izlenen etkileşim modelleme tekniklerinin yapı mühendisliği uygulamalarına ilişkin olarak Fırat ve Eren, tarihi yığma yapılarıdaki kemer ile FPR (Fiber Reinforced Polymer) arasındaki bağlantıları makro modelleme yöntemlerine göre uygulamışlardır [26]. Çalışmalarında, harç ve yığma birimini homojen tek bir eleman olarak modellemişler ve çözümleme aşamasında da malzemeden kaynaklanan lineer olmayan etkileri işleme katarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yılmaz ve Bekiroğlu'nun panel bölgesinin güçlendirilmesi ilgili yaptıkları çalışmada ise kolon, kiriş, bulon ve levha gibi parçalar arasındaki temaslardan kaynaklanan lineer olmayan durumları dikkate almışlardır [27]. Çalışmalarında, etkileşim bölgelerindeki yüzeylerin düğümlerini serbest bırakmışlar ve etkileşim elemanları arasındaki sürtünmeyi de analizlere dâhil etmişlerdir. Delaminasyon içeren kompozit kirişe ilişkin olarak sonlu elemanlar ağının örülmesi iki şekilde yapılabilir. Birincisi tabaka arasındaki ayrılma, katı geometrisi içerisinde çatlak oluşturularak yapılır. Daha sonra, çatlak içeren yapı geometrisi üzerinde ağ örülür. İkincisi ise katı içerisinde herhangi bir boşluk oluşturmadan, katının direk düzgün elemanlara örülüp, daha sonra ayrılmanın olduğu tabakalarda yer alan elemanlar silinerek delaminasyon oluşturulur. Birinci yöntem için not edilmesi gereken önemli hususlardan birisi, çatlak veya boşluk içeren bir katının geometrisini düzgün bir şekilde tetrahedral elemanlarla ağını örmede çok sayıda elemanın kullanılması gerektiğidir. Bu da çözüm süresinin uzamasına neden



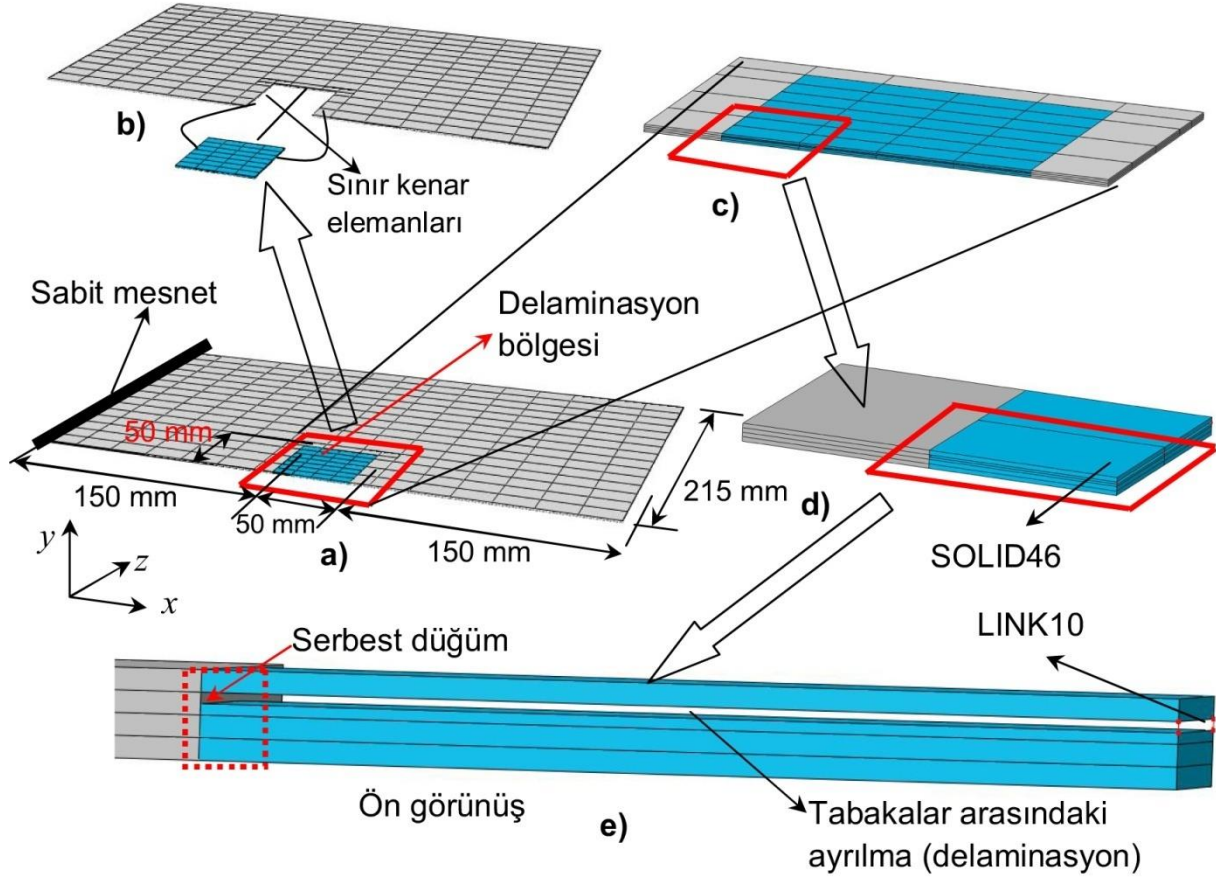
Şekil 2. Hasar belirleme prosesi için üretilen kompozit kiriş geometrisi a) Sağlıklı kiriş b) Delaminasyon hasarı içeren kiriş
(Composite beam geometry for damage detection process a) Healthy beam b) Delaminated beam)



Şekil 3. Kompozit kirişe ilişkin sonlu elemanlar modeli ve delaminasyon hasarının tabakalar arasında oluşturulması
a) Sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları b) Delaminasyon sınır düğümlerinin köşe yüzeyine bağlanması c) Ayrılma bölgesindeki elemanların alt ve üst yüzeyleri d) Alt ve üst yüzeyde yer alan yüzey düğümlerinin birleştirilmesi
(Finite element model of the composite beam and creating the delamination between the layers a) Finite element model and boundary conditions
b) Tying the delamination boundary nodes to the edge's surface c) Upper and lower surfaces of the elements in separation region
d) Tying the nodes of the lower and upper surfaces together)

olabilir. Bundan dolayı burada, sözü edilen ikinci yol tercih edilmiştir. Katı modellemede kullanılan dikdörtgen kirişin boyutları 351 mm x 43 mm x 6,525 mm şeklindedir (Şekil 2). Nümerik çözümde, tabaka oryantasyon açıları deneysel yöntemle aynı ve $[(0/90)_5]_s$ olacak şekilde modellenmiştir. Ön işlemler aşamasında, kirişin uzunluğu boyunca 21, genişliği boyunca 6, kalınlığı boyunca ise 3 eleman kullanılarak homojen bir şekilde modelin ağı örülmüştür. Katı modelden ağ örüldükten sonra, delaminasyon bölgesinin elemanları y ekseninde yoğunlaştırılmış ve deneysel hasarlı kompozit kirişteki gibi bunların 2. ile 3. tabaka arasında yer alan 0,135 mm kalınlığındaki elemanlar, ayrılmayı simüle etmek için silinmiştir. Bilindiği üzere, delaminasyon içeren tabakalar düzlem dışı yüklemelerde sadece basma yönünde direnç davranışı gösterirler. Çekme yönünde ise ayrılırlar. Bu amaçla bu davranışı simüle etmek için tek eksenli ve sadece basma yönünde davranış gösterebilen LINK10 elemanları kullanılmıştır. Bununla beraber, kullanılan LINK10 elemanının elastisite modülü basma yönündeki kompozit kiriş ile aynı olacak şekilde 7800 MPa, çekme yönünde ise 0 (ayrılmadan dolayı) olarak kabul edilmiştir. Burada, lineer olmayan tabaka ayrılma davranışları ihmal edilmiştir. Ayrılma davranışının gerçekleştiği tabakaların üst ve alt yüzey düğümleri birbirlerine 28 adet LINK10 (lateral yöndeki kenar düğümler hariç) elemanı ile bağlanmıştır. Delaminasyonunun olmadığı bölgelerin modellenmesinde ise tabakalı kompozitler için uygun olan SOLID 46 elemanı kullanılmıştır. Analiz, kompozit kirişin bir ucu ankastre

diğer ucu serbest sınır koşuluyla yapılmıştır (Şekil 3). İki boyutlu analizde, dikdörtgen kesitli ve 350 mm x 215 mm x 1,08 mm boyutlarında kompozit bir levha kullanılmıştır (Şekil 4). Kompozit kirişte olduğu gibi levhada da delaminasyon davranışının modellenmesi LINK elemanlarıyla yapılmıştır. Başlangıçta, 350 mm x 215 mm x 1,08 mm boyutlarındaki levhanın katı modeli oluşturulduktan sonra bu modelin uzunluğu ve genişliği boyunca 15, kalınlığı boyunca ise 4 eleman ile ağı örülmüştür. Levhanın katı modeli kullanılarak ağ örme işlemleri tamamlandıktan sonra bu katı model silinmiş ve bundan sonraki tüm operasyonlar elemanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Levha elemanları, delaminasyon bölgesinin sınır elemanlarını kapsamaları için $x = 7-10$ ile $z = 0-5$ düğüm noktaları arasındaki elemanlar ikiye bölünüp levhadaki toplam eleman sayısı artırılmıştır (Şekil 4a). Hasar delaminasyonu üstten 1 ile 2. tabaka arasında yer aldığından, üstten 2. tabakanın elemanları da y yönünde ikiye bölünmüştür (Şekil 4d). Daha sonra, tabakalar arasındaki ayrılma davranışını simüle etmek için üstten 2. tabakada yer alan ve 0,135 mm kalınlığındaki elemanlar silinmiştir (Şekil 4e). Elemanlar silindikten sonra, kalan serbest kenar düğümleri (Şekil 4e, kesikli kutu içerisinde verilmiş) Şekil 4b' de verildiği gibi diğer üç kenar yüzeyine düğüm-yüzey (nodes to surface) bağlantısı ile birleştirilmiştir. Kirişte olduğu gibi, levhada da tabaka ayrılmalarının gerçekleştiği alt ve üst yüzey düğümleri birbirlerine tek eksenli LINK10 elemanları ile bağlanmıştır. Alt ve üst yüzeyin her birinde eşit ve 21 adet düğüm noktası



Şekil 4. [(0/90)]s tabakalı kompozit levhaya ilişkin sonlu elemanlar modeli ve delaminasyon hasarının tabakalar arasında oluşurması a) Sonlu elemanlar ağı b) Delaminasyon sınır düğümlerinin köşe yüzeylerine bağlanması c) Delaminasyon bölgesindeki elemanların x ve z eksenlerinde yoğunlaştırılması d) Tabakaların SOLID46 elemanları ile modellenmesi e) Tek eksenli basma yönünde davranış gösteren LINK10 elemanları ve serbest sınır düğümlerinin iç kenar yüzeye birleştirilmesi

(Finite element model of the composite plate and creating the delamination between the layers a) Finite element mesh b) Tying the delamination boundary nodes to the edges' surface c) Refining the elements of delamination regions in x and z axis d) Modeling the layers using SOLID 46 elements e) LINK10 elements that shows behavior in uniaxial compression and combining the free boundary nodes to the inner edge surface)

Tablo 1. Tabakalı kompozit malzemenin özellikleri (Material properties of the laminated composite)

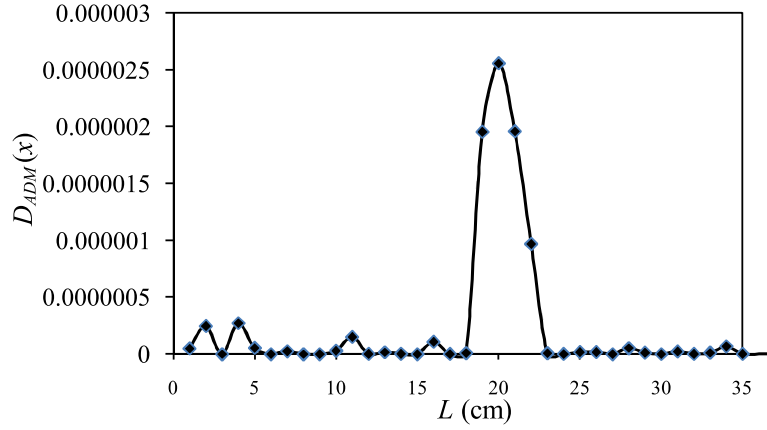
E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)
146700	7800	7800	0,29	0,29	0,3	4800	4800	2000

yer aldığından, uzunluğu 0,135 mm olan 21 adet tek eksenli LINK10 elemanı kullanılmıştır (Şekil 4e). Tabakalar simetrik olacak şekilde 4 tabakadan [0/90]s oryantasyon açılarıyla modellenmiştir. Kompozit kirişin modellenmesinde olduğu gibi, kompozit levhanın analizinde de, eleman tipi olarak SOLID 46 kullanılmıştır. Koşturmalarla kullanılan, kompozit malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

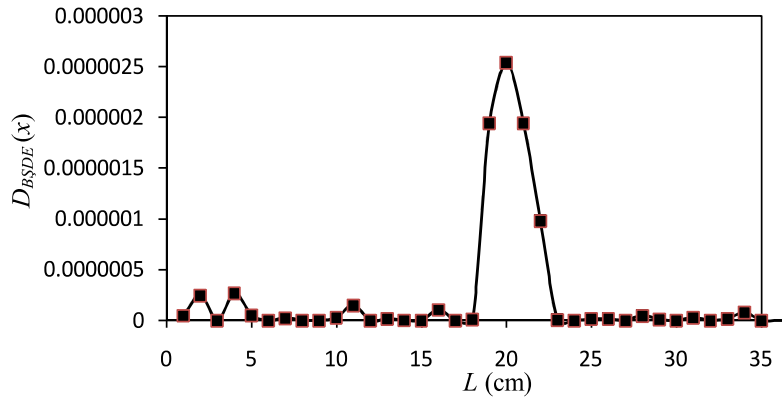
Burada, kullanılan kompozit malzemenin yoğunluğu 1364 kg/m³ tür. Kompozit levhada sınır koşulu, sadece bir kenarı ankastre diğer kenarları ise serbest kabulü yapılarak çözdürülmüştür. Ön işlemler aşaması tamamlanmasının akabinde, sağlıklı ve delaminasyon içeren kompozit kiriş ve levha için nümerik modal analizler gerçekleştirilmiştir.

5. KOMPOZİT BİR KİRİŞ VE LEVHA İÇİN ELDE EDİLEN HASAR TESPİT SONUÇLARI (DAMAGE DIAGNOSIS RESULTS OBTAINED FOR A COMPOSITE BEAM AND PLATE)

Deneyde, çekiçleme ile ani kuvvet oluşturulup ve kirişin mesnetlendiği noktadan, 280 mm uzaklığa yerleştirilen lazer yer değiştirme sensörü ile kompozit kirişin salınımları alınmıştır. Daha sonra, deneysel olarak kompozit kiriş için elde edilen veriler üzerinde, hızlı Fourier dönüşüm tekniğinin uygulanmasıyla, kirişin sağlıklı durumu için (delaminasyon olmadığı durumda) elde edilen doğal frekanslar, (64,08), (329,84) ve (396,43) Hz gibidir. Kirişin hasarlı olması durumunda (delaminasyon içerdiği durumda) ise elde edilen doğal frekanslar (41,86), (111,21) ve



Şekil 5. Kompozit kirişteki hasar tespitinin aralıklı düzgünleştirme metodu ile yapılması
(Damage detection in composite beam using gapped smoothing method)



Şekil 6. Kompozit kirişteki hasar tespitinin birim şekil değiştirme enerjisi ile yapılması
(Damage detection in composite beam using strain energy method)

(220,82) Hz olarak bulunmuştur. Daha sonra kompozit kirişte, deneysel olarak uygulanan hasar tespitinin doğruluğunu araştırmak için, nümerik yöntemle kiriş üzerinde modal analizler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanması sonucu, sağlıklı kompozit kiriş için elde edilen ilk üç doğal frekans sırasıyla (63,01), (329,96) ve (397,23) Hz gibidir. Aynı şekilde, kirişin hasarlı olması durumunda ise elde edilen (delaminasyon içerdiği durumda) doğal frekanslar ise (42,12), (113,11) ve (222,18) Hz şeklindedir. Her iki yöntemde de elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yapıda hasarın bulunması durumunda, doğal frekansların azaldığı söylenebilir. Deneysel olarak kompozit kiriş için elde edilen doğal frekanslar, nümerik yöntemin uygulanması ile elde edilen doğal frekanslarla karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyum içerisinde oldukları görüldükten sonra, analizler sadece nümerik yöntemle koşturularak, kiriş ve levha için ADM ve BŞDE ile hasar tespitleri yapılmıştır. Delaminasyon içeren kompozit kirişteki hasar tespitinde ADM VE BŞDE algoritmalarının uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 5-6'da verilmiştir. Burada, kompozit kirişte mevcut hasar bölgesi 200 mm ile 260 mm aralığında iken, tespit edilen bölge ise 180 mm ile 230 mm aralığındadır. Sonuçlar

incelendiğinde sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte hasar tespit algoritmaları uygulandığında hasar oluşan bölgeler hakkında fikir edinilebildiği görülmüştür. Bunun yanında, kompozit kirişteki delaminasyon bölgesinin belirlenmesinde ADM ve BŞDE algoritmalarının hasar tespitinde eşit hassasiyete sahip oldukları görülmüştür (Tablo 2).

Tablo 2. Kompozit kirişte mevcut olan ve tahmin edilen hasar bölgesinin yeri

(Actual and estimated damage in composite beam)

Hasar	Mevcut	ADM	BŞDE
Delaminasyon (mm)	(200-260)	(180-230)	(180-230)

Delaminasyon içeren kompozit levhada, nümerik yöntem ile modal analizler yapılmış, mod şekillerinin bulunmasının akabinde, mod şekillerinden eğrilik yüzeyleri çıkartılmış ve daha sonra (ADM) ile (BŞDE) hasar tespit algoritmalarında kullanılmasıyla hasarın olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Kompozit levhadaki hasar tespitleri iki farklı durum için değerlendirilmiştir. Birinci durum da, yapının başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor varsayımı ile tanılamalar yapılmıştır. Yöntem kısmında belirtildiği üzere, bazen,

hasar tespiti yapılırken hasara uğramış yapının hasara uğramadan önceki verileri bulunmayabilir. Bu kapsamda, ikinci durumun değerlendirilmesinde, yapının başlangıç koşullarının bulunmadığı varsayımı yapılarak hasar tespitleri yapılmıştır. Çözüm tekniği olarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılıp, kompozit levhadaki hasar tespitleri için modal analizler uygulanmış, sağlam ve delaminasyon içeren kompozit levha için elde edilen ilk dört doğal frekans Tablo 3'te verilmiştir. Burada, sağlıklı levha için elde edilen ilk dört doğal frekans, (3,47), (5,57), (21,77) ve (24,84) Hz olurken, yapısında delaminasyon olması durumunda ise, elde edilen ilk dört doğal frekans (3,45), (5,55), (21,54) ve (24,43) Hz şeklindedir. (Tablo 3). Delaminasyon içeren kompozit kirişteki doğal frekansların ile kompozit levhaya göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. Bu durum, muhtemel olarak delaminasyon alanının büyüklüğü ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. Kompozit levha için elde edilen doğal frekanslar
(Natural frequencies obtained for the composite plate)

No	Sağlam (Hz)	Hasarlı (Hz)
1	3,47	3,45
2	5,57	5,55
3	21,77	21,54
4	24,81	24,43

Kompozit levha için titreşim tabanlı YSİ ile yapılan hasar teşhisinde elde edilen doğal frekansların değişimleri bulunduktan sonra, sağlıklı ve hasarlı kompozit levha için mod şekilleri çıkartılmıştır. Daha sonra mod şekillerinden, eğrilik yüzeyleri bulunmuştur. Elde edilen eğrilik şekilleri, ADM ve BŞDE'de değerlendirilerek hasar tespitleri yapılmıştır. Hasar tespitinde iki durum değerlendirilmiştir.

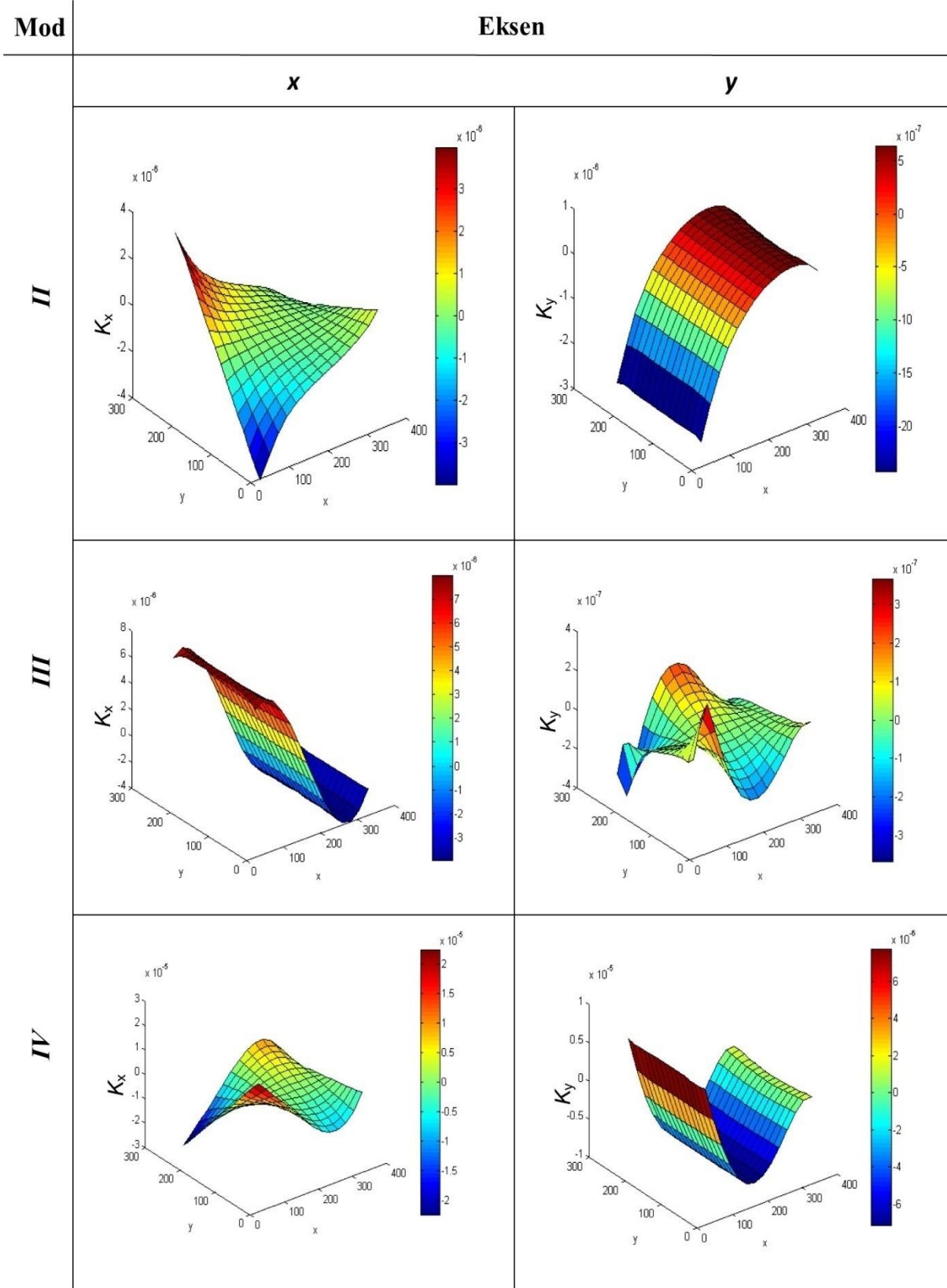
Birinci durumda, yapının başlangıç koşul verileri bilindiğinde, ikinci durumda ise, yapının başlangıç koşul verileri bilinmediği varsayımı yapılarak tanılamalar yapılmıştır. Modal analizler sonucu elde edilen mod eğrilik sonuçları Şekil 7 ve Şekil 8'de, ADM ve BŞDE'den elde edilen sonuçlar ise Şekil 9-12'de verilmiştir.

Burada, hasar tespit algoritmalarının değerlendirilmesinde ikinci, üçüncü ve dördüncü mod şekilleri göz önüne alınmıştır. Birinci modta, hem kiriş hem de levha için her üç eksende hasar tespit edilmemiştir. Hasar tespit algoritmalarının değerlendirilmesinde sonlu elemanlar yönteminden elde edilen veriler kullanılmıştır. Burada, not edilmesi gereken önemli bir husus, 2. 3. ve 4. mod numaralarına ilişkin elde edilen yer değiştirmeler levhanın en üst yüzeyine ait elemanların düğüm noktalarından okunmuştur. Bir başka deyişle, kirişin yüzeyi değerlendirilerek derinlik boyunca hasar tanılaması yapılır. Bu çalışmada her iki algoritma, her iki durum için değerlendirilmiştir. Bu amaçla, birinci durumun değerlendirilmesinde, mod şekillerinden x ve y eksenleri için türetilen 2. 3. ve 4. moda ilişkin eğrilik yüzeyleri Şekil 7'de verilmiştir. Burada, x ve y eksenleri, sırasıyla kirişin uzunluk ve genişliğini göstermektedir. z eksenine ise kiriş yüzeyindeki düğüm noktaları için hesap edilen eğrilik

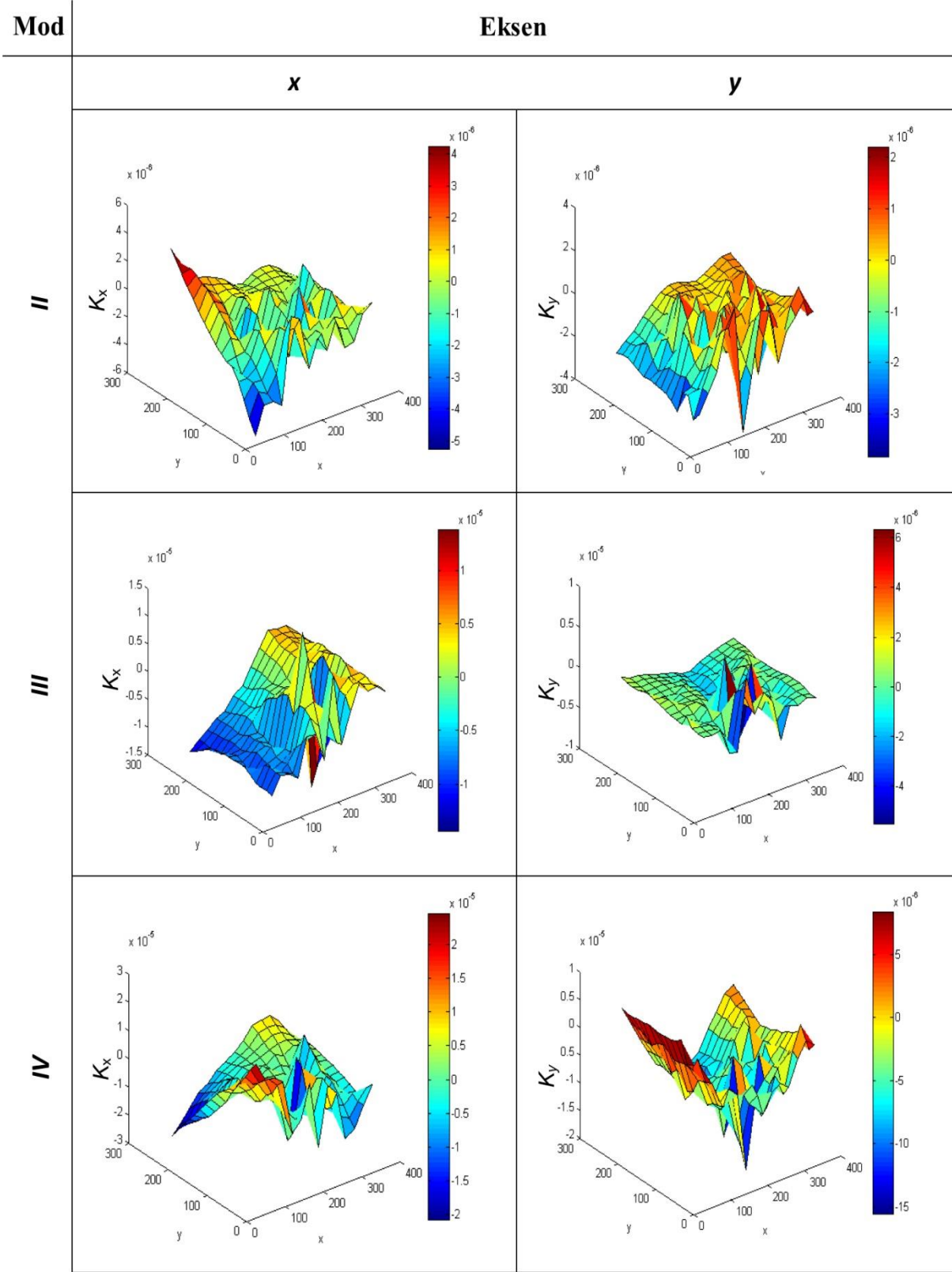
değerleridir. Aynı şekilde, renk çubuk ölçeği, eğrilik değerlerini göstermektedir. κ_x ve κ_y ise x ve y eksenleri için hesap edilen eğrilik değerleridir. İkinci durumun değerlendirilmesinde, hasar tespiti için yüzey uydurma algoritması kullanılarak elde edilen polinoma ilişkin katsayılar Tablo 4'te verilmiştir. Sağlıklı kompozit bir levha için 2. 3. ve 4. mod şekilleri için elde edilen yer değiştirmelere ilişkin eğrilik yüzeyleri Şekil 7'de verilmiştir. Burada, x ve y eksenleri için verilen eğrilik mod numaralarının, düzgün bir yüzeye sahip oldukları görülmüştür. 3. moda ilişkin y ekseninde sol alt ve üst kenarlarda diğerlerine nazaran daha keskin değişimler görülmüştür. Aynı şekilde, kompozit levhadaki mod numarasının artmasına bağlı olarak yüzeylerdeki kıvrımların arttığı görülmektedir. Hasar tipi olarak x ekseninde 150-200 mm ile y ekseninde 0-50 mm aralığında delaminasyon içeren bir levhada 2. 3. ve 4. mod şekilleri için elde edilen eğrilik yüzeyleri Şekil 8'de verilmiştir. Burada, x ve y eksenleri için verilen eğrilik modlarının, sağlıklı kirişe nazaran, düzgün olmayan yüzeyler elde edilmiştir. Referans olarak, sağlıklı levha alınıp delaminasyon içeren levha için elde edilen eğrilik yüzeylerini karşılaştırıldığında, delaminasyon içeren levhadaki düzgün olmayan şekillere dayanarak, levhada hasar olduğu anlaşılır. Ancak görsel olarak κ_x ve κ_y verilerinden tam olarak hasarın olduğu bölgeyi belirlemek zordur. Bu amaçla elde edilen veriler daha sonra, ADM ve BŞDE hasar tespit algoritmalarında değerlendirilerek hasar bölgesi araştırılmıştır. İyçayısında $x = 150-200$ mm ve $y = 0-50$ mm aralıklarında delaminasyon içeren kompozit bir levha için, nümerik yöntem uygulanarak eğrilik yüzeyleri bulunmuş ve bunların üzerinde aralıklı düzgülendirme algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen hasar tespit indeks sonuçları Şekil 9'da verilmiştir.

Analizler, hasarlı kompozit bir levhanın başlangıç koşulları biliniyor varsayımı yapılarak değerlendirilmiştir. Bir başka deyişle, Eş. 4'te verilen $\kappa(x,y)$ değişkeni, sağlıklı kompozit levhaya ilişkin eğrilikleri göstermektedir. ADM ile yapılan hasar tespitinde, 3. moda ilişkin verilen x ekseninin haricinde, özellikle hasar lokasyonlarında bazı keskin olarak artan yüzeyler elde edilmiştir. Bunun yanında, 3. mod y eksen verileri incelendiğinde ise sınır kenarlarında düzgün olmayan yüzeyler tespit edilmiştir. Aynı şekilde 1. durum için 2. 3. ve 4. modlara ilişkin, birim şekil değiştirme enerji algoritmasının uygulanmasıyla elde edilen hasar tespit indeks sonuçları Şekil 10'da verilmiştir.

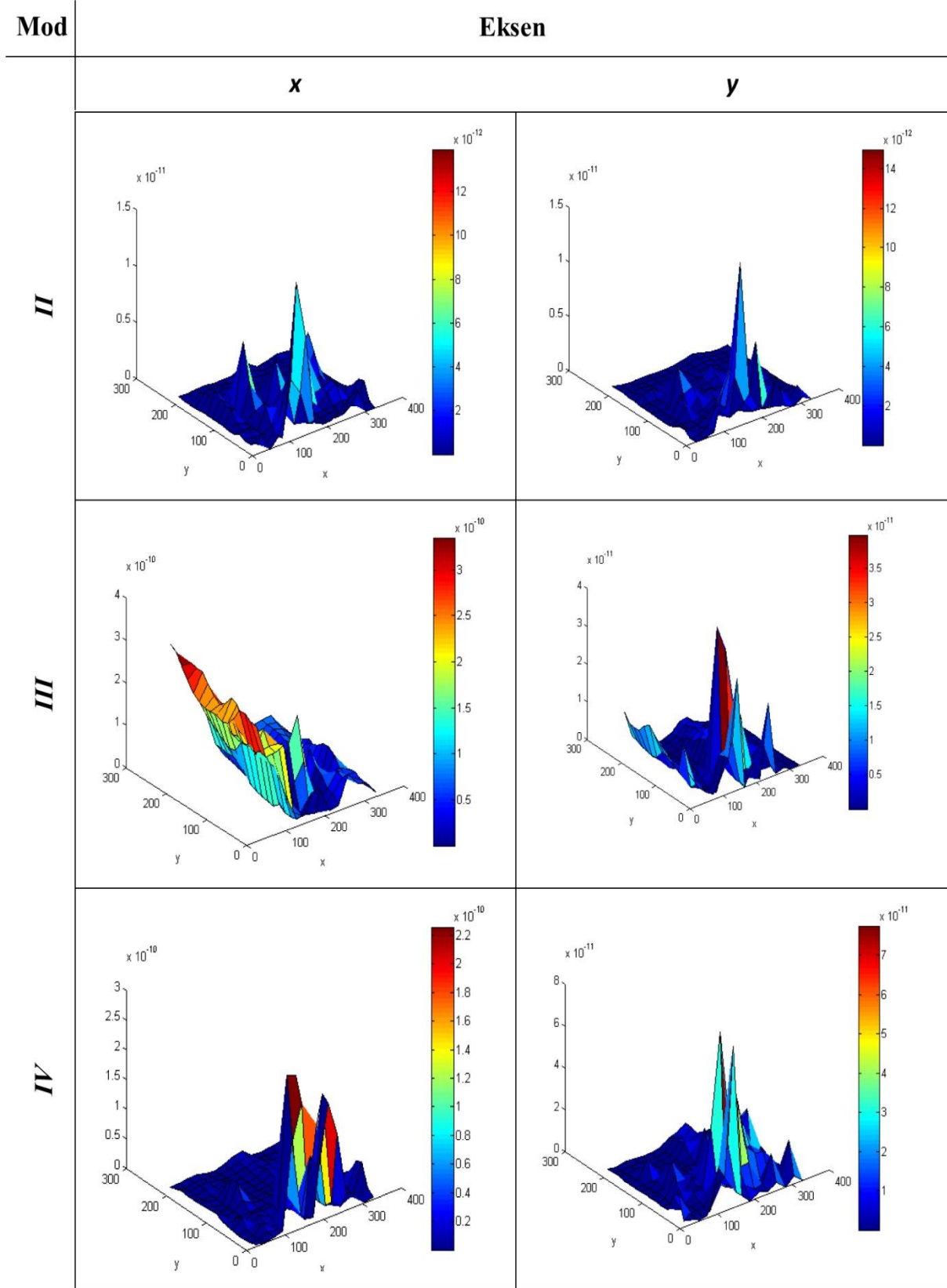
Burada da, başlangıçtaki yapının (sağlıklı durumda) verileri kullanılarak hasar tespitleri yapılmıştır. Şekil 10 incelendiğinde, özellikle hasar bölgelerinde, bazı mod numaralarında birer, bazılarında ise birden çok keskin yüzey artış değerleri görülmektedir. Önceki kısımlarda belirtildiği üzere, yapıya ilişkin başlangıç sağlık koşullarının bulunmadığı zamanlarda, regresyonlar analizleri yapılarak, yapının başlangıçtaki durumları tahmin edilir. Bir başka şekilde, deforme olmuş kompozit levha, yüzey uydurma algoritmasıyla değerlendirilip elde edilen polinom verileri, sağlıklı bir levhayı temsil etmektedir.



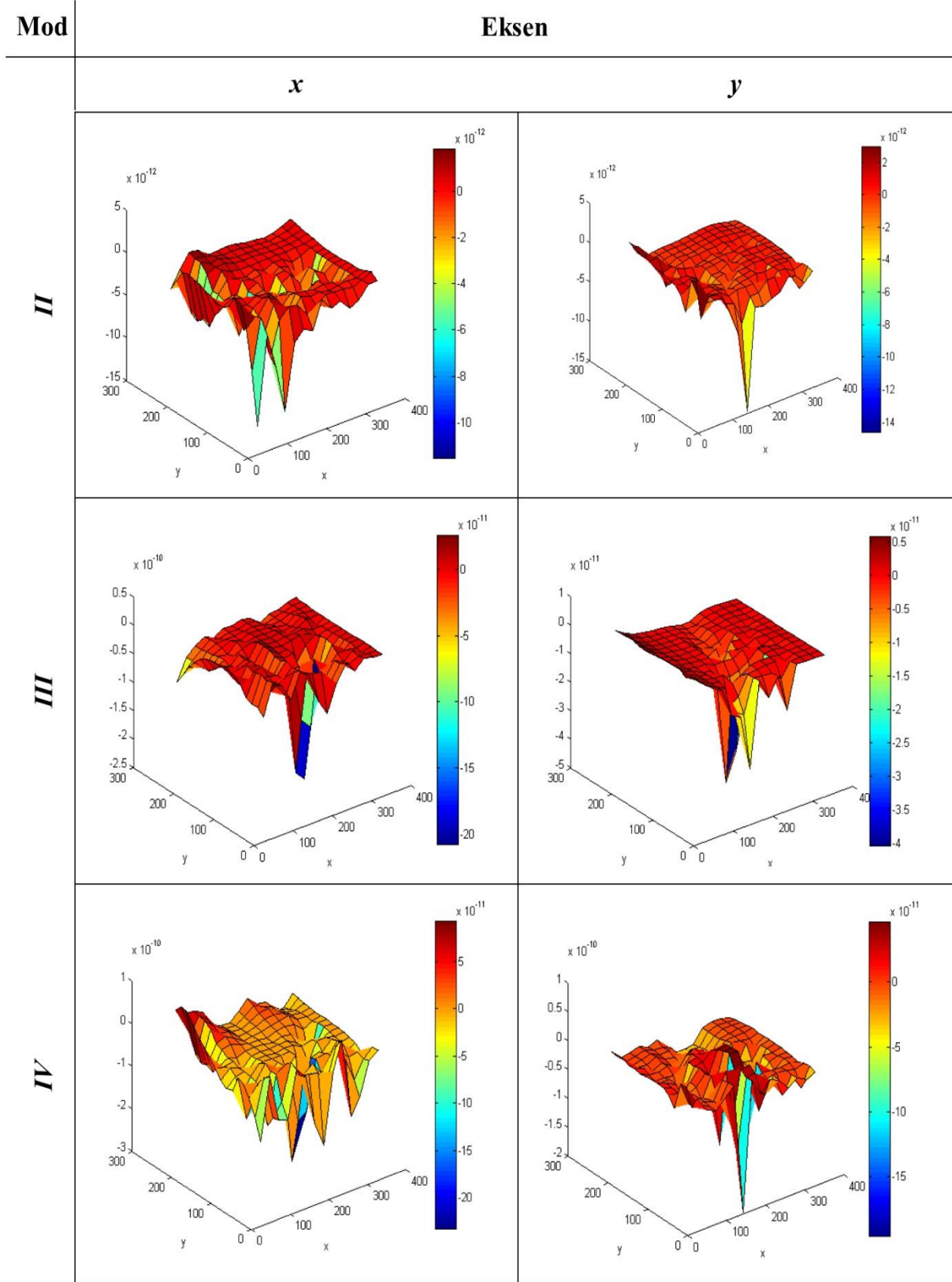
Şekil 7. Sağlam kompozit levha için elde edilen 2. 3. ve 4. eğrilik mod şekilleri
(2nd, 3rd and 4th curvature mode shapes obtained for the healthy composite plate)



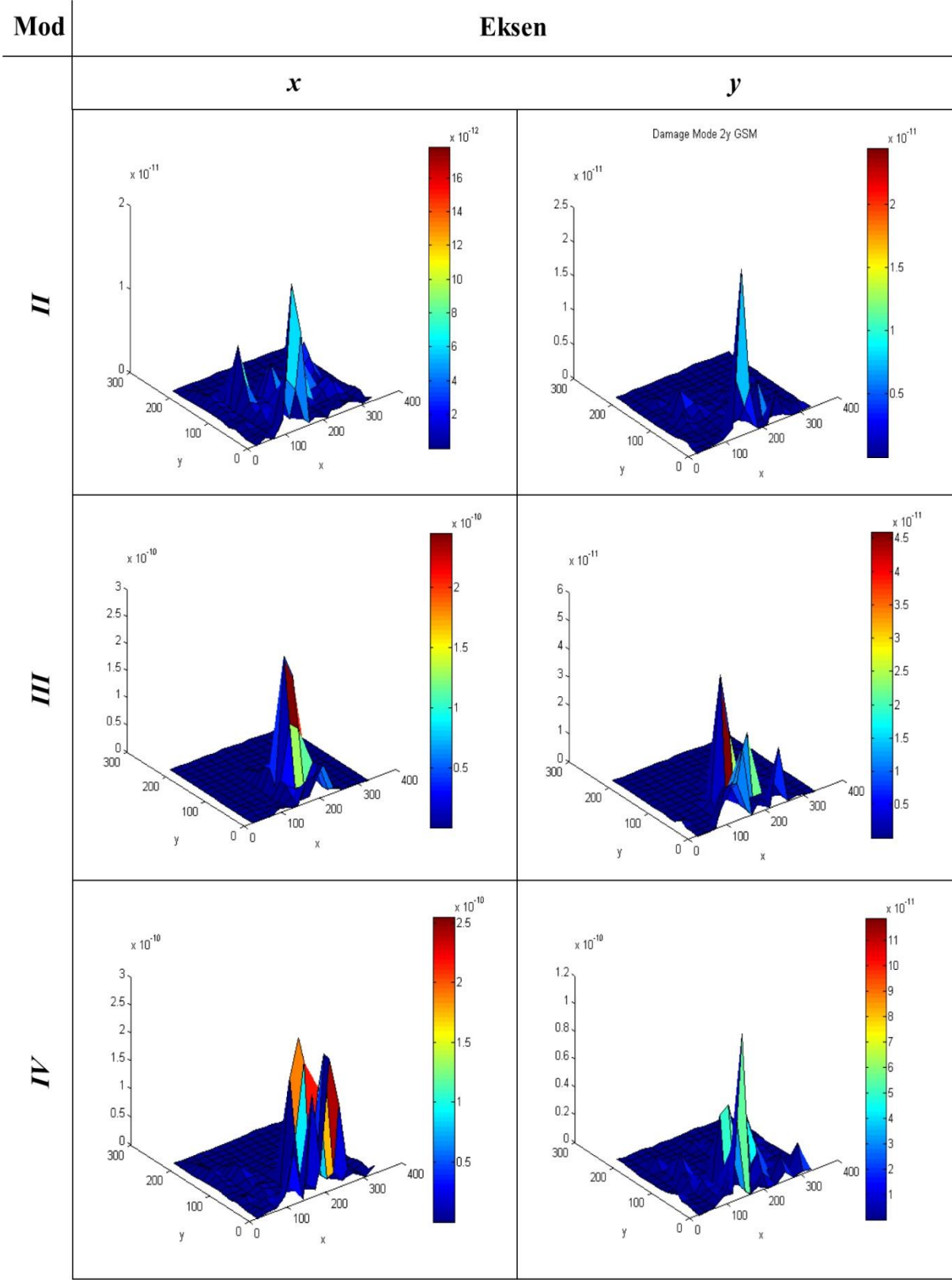
Şekil 8. Delaminasyon içeren levha için edilen 2. 3. ve 4. eğrilik mod şekilleri
(2nd, 3rd and 4th curvature mode shapes obtained the delaminated composite plate)



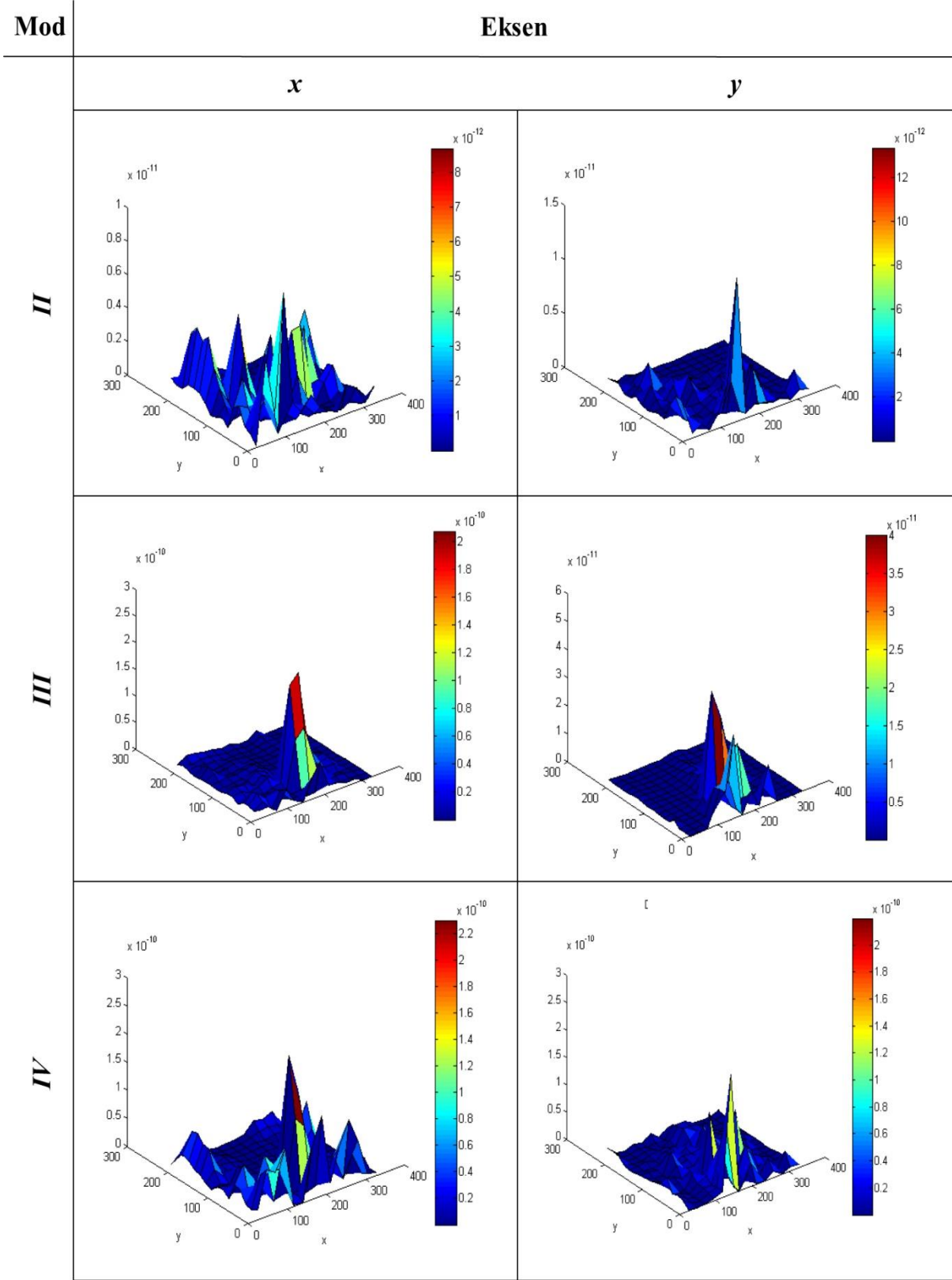
Şekil 9. Durum 1’de, 2. 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen ADM hasar tespit sonuçları
(2nd, 3rd and 4th mode shapes of GSM diagnosis results for case 1)



Şekil 10. Durum 1’de 2. 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen BŞDE hasar tespit sonuçları
(2nd, 3rd and 4th mode shapes of SEM diagnosis results for case 1)



Şekil 11. Durum 2’de 2. 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen ADM hasar tespit sonuçları
(2nd, 3rd and 4th mode shapes of GSM diagnosis results for case 2)



Şekil 12. Durum 2’de 2. 3. ve 4. mod şekilleri ile elde edilen BŞDE hasar tespit sonuçları
(2nd, 3rd and 4th mode shapes of SEM diagnosis results for case 2)

Tablo 4. Yüzey uydurma algoritması uygulanmasıyla elde edilen polinom katsayıları (%95 güvenirlilik aralığı)
(Polynomial coefficients obtained by using the surface fit algorithm) (95% confidence interval)

	Eğrilik Modu II			Eğrilik Modu III			Eğrilik Modu IV		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
P ₀₀	-7,183e-006	-3,56e-006	-0,0006077	-1,007e-005	-1,542e-007	-0,0009045	2,833e-005	9,242e-006	0,00255
P ₁₀	9,346e-008	6,783e-008	8,726e-006	3,66e-008	1,712e-008	8,719e-006	-1,422e-007	-1,758e-007	-5,337e-005
P ₀₁	9,019e-008	-2,407e-009	5,438e-006	3,203e-008	-1,522e-008	1,699e-006	-3,085e-007	6,179e-009	-2,002e-005
P ₂₀	-4,668e-010	-3,96e-010	-3,931e-008	2,004e-010	-2,712e-010	7,651e-008	-8,347e-010	3,749e-010	2,422e-007
P ₁₁	-8,953e-010	-1,072e-010	-8,615e-008	-1,066e-009	5,527e-011	1,043e-008	1,586e-009	1,737e-010	3,969e-007
P ₀₂	-3,97e-010	4,148e-011	7,582e-009	2,077e-010	3,502e-010	-3,152e-008	1,238e-009	1,482e-010	-8,383e-009
P ₃₀	9,772e-013	8,883e-013	7,077e-011	-6,897e-014	1,36e-012	-5,71e-010	4,908e-012	1,731e-012	-3,699e-010
P ₂₁	3,315e-012	7,846e-013	3,335e-010	4,441e-012	-4,135e-013	-9,869e-011	6,793e-013	-2,19e-012	-1,805e-009
P ₁₂	1,595e-012	-3,874e-013	3,335e-010	3,248e-012	-9,129e-013	1,313e-010	9,985e-015	-1,876e-012	4,893e-010
P ₀₃	1,581e-012	1,661e-013	-5,139e-011	-2,617e-012	-1,949e-012	1,071e-010	-7,4e-012	-1,243e-012	-1,033e-010
P ₄₀	-6,086e-016	-5,456e-016	-3,842e-014	-1,695e-015	-2,121e-015	8,649e-013	-5,906e-015	-4,341e-015	1,894e-013
P ₃₁	-4,687e-015	-1,669e-015	-4,219e-013	-4,659e-015	1,212e-015	1,846e-013	-9,363e-015	3,005e-015	2,126e-012
P ₂₂	-9,829e-016	6,432e-016	-1,147e-013	-9,339e-015	4,07e-016	-2,357e-013	-4,265e-016	7,684e-015	-4,907e-013
P ₁₃	-3,514e-015	1,104e-015	-6,011e-014	1,696e-015	2,613e-015	-1,119e-013	1,512e-015	1,381e-015	-9,011e-013
P ₀₄	-1,886e-015	-1,117e-015	8,152e-014	4,136e-015	3,387e-015	-1,419e-013	1,355e-014	3,576e-015	4,334e-013

Tablo 5. Kompozit levhada tahmin edilen delaminasyon bölgesinin yeri (Predicted delamination location in composite plate)

Durum	HTA	Mod II		Mod III		Mod IV	
		x	y	x	y	x	y
I	ADM	-	l=140-186 w=0-28	l=140-210 w=0-57	l=116-233 w=28-57	l=100-210 w=0-57	l=140-210 w=28-57
	BŞDE	-	l=140-186 w=0-14	l=140-210 w=0-57	l=140-233 w=28-57	-	l=140-210 w=0-57
II	ADM	-	l=140-186 w=0-14	l=110-210 w=14-57	l=90-233 w=28-57	l=140-233 w=0-57	l=140-233 w=28-57
	BŞDE	-	l=116-163 w=0-29	l=150-200 w=0-57	l=140-233 w=28-57	l=140-210 w=0-57	l=140-210 w=0-57

HTA: Hasar tespit algoritması, Mevcut delaminasyon bölgesi: l=150-200, w=0-50, Taralı alanlar: Hasarın belirlendiğini göstermektedir.

Böylece, Eş. 4'te verilen sağlıklı yapıya ilişkin $\kappa(x, y)$ değişkeni, Eş. 7' de verilen $\kappa_{fit}(x, y)$ fonksiyonunda değerlendirilmesiyle hasar bölgesi belirlenir. 2. durum için, 2. 3. ve 4. modlara ilişkin, aralıklı düzgünleştirme algoritmasının uygulanmasıyla elde edilen hasar tespit indeks sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Özellikle hasar bölgesinde bazı mod numaralarında birer, bazılarında ise birden çok keskin yüzey artış değerleri görülmektedir. Bunun yanında, 3. mod y eksen verileri incelendiğinde sınır kenarlarında düzgün olmayan yüzeyler görülmektedir. Son olarak, 2. durumda, hasar tespit değerlendirilmesi için 2, 3 ve 4. modlara ilişkin, birim şekil değiştirme enerjisi algoritmasının uygulanmasıyla yüzey boyunca elde edilen hasar tespit sonuçları Şekil 12'de verilmiştir. Bu kısımda da, başlangıçtaki yapının verileri kullanılmadan, yani Eş.

9'da verilen $\kappa_{fit}(x, y)$ kullanılarak hasar belirlenmiştir. Durum 2'de, BŞDE ile yapılan hasar tespitinde, 2. ve 4. moda ilişkin olarak verilen x yönündeki eğrilikler dikkate alındığında, hasarın haricindeki bölgelerde de keskin artış gösteren yüzeyler elde edilmiştir. Bu sonuçlar da hasar tanılamının zor olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada model titreşim tabanlı hasar tespit analiz teknikleri, yapısında hasar tipi olarak delaminasyon içeren bir kiriş ve levhaya uygulanarak hasar bölgesinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapı sağlığı izleme tekniklerinde, hasar tespiti için tersinir yöntemler, fizik kuram modelleri

ve veri tabanlı YSİ olmak üzere üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Tersinir yöntem ve model tabanlı YSİ'de, yapı için fizik kuramlarına bağlı matematiksel modeller geliştirilerek yapılır. Burada, çözüm tekniği olarak analitik formülasyonlar veya yaygın olarak katı cisimler mekaniğinde uygulanan sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Sisteme ilişkin model kurulduktan sonra, deneysel ölçümlerden alınan veriler sürekli olarak modelde değerlendirilip yapıya ilişkin sağlık teşhisi yapılır. Ancak bazı durumlarda, lineer olmayan davranış gösteren kompozit malzemelerde tabakalar arası kaymalar, mekanik sistemlerde oluşabilen civata gevşemesi veya rulmanlardaki bilyelerin kırılması sonucu oluşan hasar davranışları gibi matematiksel olarak modellenmesi zor olan hasarların model tabanlı YSİ yaklaşımlarıyla değerlendirmek zor olabilir. Bunun için, YSİ'de fiziksel kuramlar kullanılmadan direkt olarak ölçüm verilerinin istatistiksel olarak işlenmesine dayalı bir yöntem olan veri tabanlı YSİ tekniği, son zamanlarda model tabanlı tekniklere ek olarak kullanılmaktadır. Veri tabanlı YSİ'de incelenen sistemle ilgili oluşabilecek tüm sağlıklı ve hasarlı durum kombinasyonları bir etiketle ilişkilendirip, istatistiksel bir model kurulmasına dayalıdır. Daha sonra, bu model örgü tanıma tekniklerinde değerlendirilerek hasar tanınması yapılır. Bu çalışmada, model tabanlı YSİ tekniği, iç bölgelerinde delaminasyon oluşturulmuş tabakalı kompozit yapılara uygulanarak hasar bölgesinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Başlangıçta, delaminasyon oluşturulmuş tabakalı kompozit bir kirişe, deneysel olarak modal testler uygulanarak doğal frekansları bulunmuştur. Daha sonra, sağlıklı ve hasarlı kirişe ilişkin ölçülen doğal frekanslar, nümerik yöntem sonuçları ile karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür. Sonra, delaminasyon içeren tabakalı kompozit bir kiriş ve levha üzerinde sonlu elemanlar yöntemi uygulanıp mod şekilleri çıkartılmıştır. Mod şekillerinden eğrilik yüzeyleri çıkartılmış daha sonra (ADM) ve (BŞDE) gibi tekniklerde değerlendirilerek hasarın olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Düşük frekanslarında (1. mod) hem kiriş hem de levhadaki hasar tespit edilememiştir. Bu çalışmada, delaminasyon içeren kompozit kirişteki doğal frekansların, hasar içeren kompozit levhaya göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. Bu durum, delaminasyon alanının büyüklüğünden dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 2'de verilen kirişte delaminasyon hasarı kirişin tüm genişliğini (z eksen yönünde: %100) oluştururken, kompozit levhada ise (Şekil 4), sadece %23'lük (z ekseninde) bir kısmını oluşturmaktadır. Yüklere maruz bir yapıda delaminasyon miktarı arttıkça eğilme rijitliği düşer. Bu eğilme rijitlik düşüşleri de doğal frekansların düşmesine neden olur. Nitekim bu çalışmada, kompozit levha için tespit edilen çok az olan doğal frekans düşüşleri Alnefaie ve Qiaoa vd. yaptıkları araştırmaları örtüştüğü görülmüştür [15, 23]. Qiao vd., delaminasyon hasarının doğal frekanslara olan etkilerini incelemek için, sağlıklı ve genişliğin %33'ü delaminasyon barındıran kompozit levhaları deneysel ve nümerik olarak incelemiştir [23]. Nümerik sonuçlardan, sağlıklı levha için ilk 4 doğal frekansı, (11,71), (34,35), (67,47) ve (89) Hz şeklinde bulunmuşlardır. Delaminasyon

içeren levha için ise ilk 4 doğal frekansı, (11,68), (34,27), (69,35) ve (89,56) Hz olarak bulunmuşlardır. Aynı şekilde, nümerik simülasyonlarla yapılan başka bir çalışmada, delaminasyon alanının artışı doğal frekansı çok az dahi olsa düşürdüğü belirtilmiştir [15]. Her ne kadar yukarıda değinilen ve nümerik olarak yapılmış bazı çalışmalarda kompozit kiriş ve levhalardaki delaminasyon hasarı, doğal frekansı çok az dahi olsa azalttığı yönünde bulgular sunulmuş olsa bile, deneysel olarak yapılmış bazı çalışmalarda delaminasyonla birlikte doğal frekansın kısmi de olsa arttığı yönünde veriler sunulmuştur [12, 23]. Bu durumun, deneysel olarak iki tabaka arasında kalan teflondan dolayı kaynaklandığı yönünde çeşitli olası sebepler belirtilmiştir [12, 23]. Aynı şekilde deneysel olarak frekans ölçümlerinden kaynaklanan hassasiyetler, gerçek malzeme ile nümerik çözümü arasındaki malzeme modeli farklılığı, sınır koşul belirsizlikleri, nümerik yöntemde kullanılan algoritma, eleman tipi ve sayısının (SEY için) sonuçlar üzerinde etkili olacağı aşikârdır. Bunun yanında, gerçekte lineer olmayan davranış gösteren tabaka ayrılma davranışlarının modellenmesi zor olup, bunların nümerik çözücüye dâhil edilmemesi, sonuçların hassasiyetlerini değiştiren muhtemel sebepler arasında yer almaktadır. Bundan dolayı, burada not edilmesi gereken önemli hususlardan birisi, deneysel olarak kompozit yapılardaki lokal hasarları, titreşim tabanlı hasar tespit teknikleri uygulanıp ölçülen ilk birkaç doğal frekansla, hasarın belirlenmesinde bazen zorluklar yaşanabilir. Bunun yanında, titreşim tabanlı hasar tespit teknikleriyle lokal hasarların belirlenmesi için yapıyı yüksek frekanslarda değerlendirmek zordur [28-29]. Çünkü titreşim tabanlı hasar tespit tekniklerinde kullanılan sensörlerin ölçüm hassasiyet aralıkları sınırlı olduğundan yüksek frekanslara çıkılamamaktadır. Bunların üstesinden gelmek için bir başka deyişle yapıdaki küçük hasarların tespitinde dalga ilerlemelerinde dayalı ultrasonik YSİ sistemleri alternatif olarak kullanılabilir. Kompozit levhadaki hasar teşhisi, iki farklı durum için değerlendirilmiştir. Birinci durum da, yapının başlangıçtaki sağlık durumunun biliniyor varsayımı ile ikinci durumda ise başlangıç sağlık durumu bilinmeden tanımlar yapılmıştır. Hasar tespit algoritmalarının değerlendirilmesinde, sonlu elemanlar yönteminden elde edilen veriler kullanılmıştır. Burada not edilmesi gereken husus, 2. 3. ve 4. modlara ilişkin elde edilen yer değiştirmeler levhanın en üst yüzeyine ait elemanların düğüm noktalarından alınarak algoritmalarda değerlendirilmiştir. Bir başka şekilde, kirişin üst yüzeyi değerlendirilerek, derinlik boyunca hasar tanınması yapılmıştır. Burada, model tabanlı YSİ teknikleri kontrollü laboratuvar ortamında ve nispeten düzgün mühendislik yapılar için kullanıma elverişlidir. Çevresel operasyonel yüklere maruz kalan mühendislik yapılarını, bu yöntem ile değerlendirmek zor olabilir. Bu çalışmada kullanılan her iki algoritma her iki durum için değerlendirilmiştir. Hasar tespit sonucu elde edilen sonuçlar detaylı olarak Tablo 5'te verilmiş ve elde edilen genel sonuçlar; Delaminasyon içeren kompozit kirişteki doğal frekansların kompozit levhaya göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. Bu durumun delaminasyon alanının büyüklüğünden dolayı

olduğu öngörülmektedir. En iyi sonuçlar mod 3 ve mod 4'te elde edilmiştir. Aralıklı düzgünleştirme (ADM) algoritması ile birim şekil değiştirme enerjisi (BŞDE) tekniğinden elde edilen sonuçların yaklaşık olarak aynı hassasiyete sahip olduğu görülmüştür (Tablo 5). 3. ve 4. mod verilerinin ADM ve BŞDE'de uygulanmasıyla, yapının başlangıç durumuna ilişkin sağlık durumu bilinmeden hasarın tespit edilebileceği belirlenmiştir. Bu yöntemle hasarın olduğu bölgenin tespitinin yapılabilmesi için yapıya ilişkin mod şekillerinin bilinmesi gerekir. Yapının mod şekillerinin doğru bir şekilde bulunması için, yapının birçok bölgesine ivmeölçer yerleştirilmesi gerekir. Bunun yanında, karmaşık geometri yapılarıdaki mod şekillerinin bulunmasının akabinde, eğrilik şekillerini belirlemek zor olabilir. Bu gibi durumlarda, her ne kadar laboratuvar ortamında test edilen küçük boyutlu yapılarıdaki hasarları model tabanlı analiz teknikleriyle belirlenebilir de, büyük ve kompleks mühendislik yapılarında oluşabilecek küçük hasarları bu tekniklerle değerlendirmek elverişli olmayabilir. Böyle durumlarda, veri tabanlı (sensör verileri ile) tekniklerle yapının sağlık durumunu değerlendirmek daha avantajlı olabilir. Yapının sağlıklı durumuna ilişkin verilerin bulunmadığı zamanlarda, ilk durumunu tahmin etmek bir başka şekilde veri uydurma prosedürlerinin uygulanması gerektiği zamanlarda, radyal temel fonksiyonlar, destek vektör makineleri veya yapay sinir ağlarından yararlanılabilir. Sonuç olarak laboratuvar ortamında, kompozit malzemelerden imal edilen kompozit kiriş ve levhanın iç bölgelerinde oluşan delaminasyonlar deneysel veya nümerik yöntemlerden alınan verilerin, geleneksel model tabanlı analiz algoritmalarında kullanılmasıyla tahribatsız bir şekilde tahmin edilebileceği kanaatine varılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, yapı sağlığı izleme araştırmaları kapsamında, sağladıkları desteklerinden dolayı, Los Alamos Araştırma Laboratuvarından Dr. Charles R. Farrar'a, modal test kurulumunda, Yrd. Doç. Dr. Mehmet Sarıkanat ve Dr. Barış Oğuz Gürses'e, çalışmayı finanse eden, Yüksek Öğretim Kuruluna (YÖK) ve Ege Üniversitesi'ne (BAP, Proje No# 12-MÜH-046 & 13-MÜH-086) teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Farrar C.R., Worden K., Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective, John Wiley & Sons Ltd. First edition, Chichester, United Kingdom, 2013.
2. Moyo P., Brownjohn J.M.W., Suresh R., Tjin S.C., Development of fiber bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure, Eng. Struct., 27 (12), 1828-1834, 2005.
3. Mascarenas D., Choi Y., Kim H.C., Pekedis M., Yıldız H., Plont C.A., Brown M.C., Park G., Hahn H., Lee J.R., Farrar C.R., A vibro-haptic human-machine interface for structural health monitoring, The 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA., 1171-1178, September 10-12, 2013.
4. Ko J.M., Ni Y.Q., Technology developments in structural health monitoring of large scale bridges, Eng. Struct., 27 (12), 1715-1725, 2005.
5. Kessler S.S., Piezoelectric-Based in situ damage detection of composite materials for structural health monitoring systems, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2002.
6. Doebling S.W., Farrar, C.R., Prime M.B., A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods., Shock Vbr Dig, 20, 91-105, 1998.
7. Pekedis M., Mascerañas D., Turan G., Ceylan H., Ercan E., Farrar C.R., Yıldız H., Structural Health Monitoring via Human-Machine Interface, 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, 167-171, July 15-17, 2014.
8. Carden E.P., Fanning P., Vibration Based Condition Monitoring: A Review, Structural Health Monitoring, 3 (4), 355-77, 2004.
9. Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., Daniel W.S., Damage Identification and Health Monitoring of Structural And Mechanical Systems From Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", Los Alamos National Laboratory, Report No: LA-13070-MS, May, 1996.
10. Kim J.I., Ryu Y.S., Hyun M.C., Stubbs N., Damage identification in beam type structures; frequency based method v/s mode based method, Eng. Struct., 25 (1), 57-67, 2003.
11. Hamey C.S., Lestari W., Qiao P., Song G., Experimental damage identification of carbon/epoxy composite beam using curvature mode shapes, Structural Health Monitoring, 3 (4), 333-353, 2004.
12. Zhang Z., Shankar K., Morozov E.V., Tahtali M., Vibration-based delamination detection in composite beams through frequency changes, J. Vib. Control, 1 (17), May 20, 2014.
13. Garcia D., Palazzetti R., Trendafilova I., Fiorini C., Zucchelli A., Vibration-based delamination diagnosis and modelling for composite laminate plates, Compos. Struc., 130, 155-162, 2015.
14. Pekedis M., Mascerañas D., Turan G., Ercan E., Farrar C.R., Yıldız H., Structural health monitoring for bolt loosening via a non-invasive vibro-haptics human-machine cooperative interface, Smart Mater. Struct., 24, 085018 [20 pages], 2015.
15. Alnefaie K., Finite Element Modeling of composite plates with internal delamination, Compos. Struc., 90, 21-27, 2009.
16. Pandey A.K., Biswab, M., Damage detection in structures using changes in flexibility, J. Sound Vib., 169, 1, 3-17, 1991.
17. Sampaio R.P.L., Maia N.M.M., Silva J.M.M., Damage detection using frequency response function curvature method curvature method, J. Sound Vib., 226 (5), 1029-1042, 1999.

18. Zhang Z., Akhtan A.E., Application of modal flexibility and its derivatives in structural identification, *Research In Non-Destructive Evaluation*, 10, 43-61, 1998.
19. Wu D., Law, S.S., Damage localization in plate, structures from uniform load surface curvature, *J. Sound Vib.*, 276, (1-2), 227-244, 2003.
20. Gao Y., Spencer B.F., Bernal D., Experimental verification of the flexibility-based damage locating vector method, *J. Eng. Mech.*, 133 (10), 1043-1049, 2007.
21. Qiao P., Lestari W., Shah M., Wang J., Dynamics based damage detection of composite laminated beams using contact and noncontact measurement systems, *J. Compos. Mater.*, 41, (10), 1217-36, 2007.
22. Mujumdar P., Suryanarayan S., Flexural vibrations of beams with delamination, *J. Sound Vib.*, 125, 441-461, 1988.
23. Qiao P., Lu K., Lestari W., Wang J., Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates, *Compos. Struct.*, 80 (3), 409-428, 2007.
24. Grouve W.J.B., Warnet L, Boer Ad vd., delamination detection with fibre bragg gratings based on dynamic behaviour, *Composites Science and Technology*, (68), 2418-2424, 2008.
25. Sankar B.V., A finite element for modeling delaminations in composite beams, *Computer and Structures*, 38 (2), 239-46, 1991.
26. Fırat F.K., Eren A., Investigation of FRP effects on damaged arches in historical masonry structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 659-670, 2015.
27. Yılmaz O., Bekiroğlu S., The effect of reinforcing panel zone of bolted end plate column beam connections, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 241-253, 2016.
28. Gopalakrishnan S., Ruzzene M., Hanagad S., *Computational Techniques for Structural Health Monitoring*, Springer, London, 2011.
29. Pekedis M., Kompozit malzemeler için yapı izleme ve bakım sistemi, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.

