

AÇIK KESİTLİ BİR KİRİŞTE SÜREKLİ DALGACIK DÖNÜŞÜMÜYLE YAPISAL HASAR TEŞHİSİ

Hakan GÖKDAĞ, Osman KOPMAZ

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059/Görükle/Bursa

Geliş Tarihi : 30.04.2007

ÖZET

Bu çalışmada açık kesitli bir kirişin temel mod şekli sürekli dalgacık dönüşümü ile analiz edilerek hasar yeri ve derecesi belirlenmiştir. Hasar elastisite modülündeki azalma olarak modellenmiş, hasarlı kirişin mod şeklini belirlemek için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Seçilen hasar durumlarında frekans veya eğrilik değişimlerine dayalı klasik modal analiz metotlarının yetersizliği vurgulanmıştır. Özellikle gürültülü veriyi işlemede dalgacık analizinin eğrilikten daha başarılı olduğu gösterilmiştir. Böyle bir kirişte kesit simetrik olmadığından ölçülecek mod şekli ölçme elemanının kiriş eni doğrultusundaki konumuna büyük ölçüde bağlıdır. Dolayısıyla elde edilecek dalgacık katsayılarının hasara duyarlılığı da farklı olur. Bu çalışmada hasara daha duyarlı katsayıları elde etmek için doğru ölçüm noktaları örnek bir kiriş üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Açık kesitli kiriş, Dalgacık analizi, Hasar teşhisi, Kombine eğilme-burulma, Sonlu elemanlar metodu.

STRUCTURAL DAMAGE DETECTION IN AN OPEN CROSS SECTION BEAM USING CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

ABSTRACT

This paper is concerned with the determination of the damage location and extent of an open cross section beam by continuous wavelet transform on its first mode shape. To extract the mode shape, the finite element method is used, and the damage is modeled by a local decrease in the Young modulus of a beam element. The classic modal analysis techniques based on changes in frequency or mode shape curvature are demonstrated to be insufficient for the damage conditions considered. The technique of wavelet analysis is shown to be more effective than the curvature change method especially in the case of noisy data. Since the beam cross section is not symmetric, the mode shape to be measured is essentially dependent on the location of displacement transducer on the beam width, resulting that the sensitivity of wavelet coefficients to damage will be different. Therefore, in this study, it is also explained where the correct measurement locations must be to obtain the wavelet coefficients more sensitive to damage.

Key Words : Open cross section beam, Wavelet analysis, Damage detection, Coupled bending-torsion, Finite element method.

1. GİRİŞ

Yapılarda erken hasar teşhisi emniyet, kalite, maliyet gibi kavramlarla yakından ilgili olduğu için bu alanda çok sayıda bilimsel araştırma yapılmış, tahribatsız muayene konusunda birçok hasar teşhis metodu geliştirilmiştir. Bu metotların ortak özelliği; hasar sebebiyle yapı özelliklerinde meydana gelen değişimleri yapıya zarar vermeden hatta yapıyı bulunduğu ortamdan ayırmadan belirlemek ve

istenmeyen sonuçları meydana gelmeden engellemektir. Ultrasonik test, radyografi, akustik emisyon testi, titreşim temelli hasar teşhisi gibi yöntemler bu alandaki uygulamalara örnek olarak verilebilir (Cecchini, 2005). Söz konusu metotların genel olarak lokal ve global olarak sınıflandırıldığı bilinmektedir. Lokal yöntemlerden farklı olarak global metotlar, sadece yapının riskli bölgelerini değil, tüm yapıyı dikkate alarak hasar değerlendirmesi yaparlar. Global yöntemler sınıfında

yer alan titreşim-tabanlı metotların hasar teşhisi alanında oldukça umut verici sonuçlar verdiği görülmüş, bu alanda yapılan araştırmalar sonucunda geliştirilen metotlar kendi aralarında klasik ve modern ayrımına tabi tutulmuşlardır. Buna göre modern yöntemler nispeten evrenseldirler; incelenen yapıya daha az bağımlıdır, küçük boyutlu hasarları tespit etmede daha etkilidirler. Ayrıca, hızlı cevap verdikleri için online hasar teşhisi bakımından daha uygundur (Yan v.d., 2006). Modern yöntemler sınıfında yer alan metotlardan birisi de dalgacık analizi (DA)'dir.

Titreşim-tabanlı hasar teşhis yöntemleri, DA'nın özellikle sinyalde hasardan kaynaklanan tekilliği algılamaya kabiliyetinden yararlanır. İncelenen yapının malzeme özelliklerini, matematiksel modelini bilmeye ihtiyaç duymadan, sadece ölçülen mod şekillerini kullanarak hasar yeri ve mertebesini belirlemek DA ile mümkündür (Rucka ve Wild, 2006). Sürekli Dalgacık Dönüşümünde (SDD) konum-frekans penceresinin hem yerleşimi hem de kısa süreli Fourier Dönüşümünden farklı olarak genişliği hassas bir şekilde ayarlanabilir. Böylece modal veride hasardan kaynaklanan çok küçük değişimler algılanabilir (Chang ve Chen, 2003). Son on yıl içinde bu yöntemi kullanan çok sayıda hasar teşhis çalışması yayınlanmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

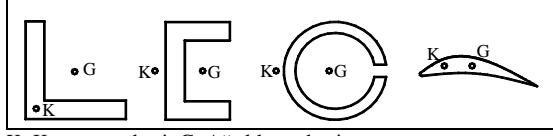
Wang ve Deng (1999) yüzeysel çatlak içeren bir kirişin statik ve dinamik sehim eğrilerinin, ortasında delik olan plağın düzlem gerilme halindeki şekil değiştirme fonksiyonlarının SDD si ile hasar yerini tespit etmişlerdir. Benzer bir çalışmada (Quek v.d., 2001) çatlak malzeme içinde ya da yüzeysel olması yahut çentik şeklinde olması durumundaki statik sehim eğrilerini kullanmışlardır. Bu çalışmalarda Gabor ve Haar dalgacıkları dikkate alınmıştır. Kirişte çentik veya çatlak şeklinde bir hasar meydana geldiğinde, bunun mertebesiyle orantılı olarak titreşim modlarında tekillik ortaya çıkar. (Hong v.d., 2002). Bu tekilliğin Lipschitz üsteli ile ilişkilendirilebileceğini ifade etmişlerdir. Çalışmada Lipschitz üstelinin mutlak değerinin hasar mertebesini gösterdiğine dikkat çekilmiştir. Benzer bir çalışmada (Douka v.d., 2003) mod şeklinin dalgacık katsayılarıyla Hoelder üsteli arasında bir bağıntının varlığını belirtmişler, DA'nın ölçüme karışan gürültü karşısında başarılı olduğunu deneysel ve sayısal sonuçlarla göstermişlerdir. Gürültülü veriyi analizde DA'nın klasik yöntemlere göre daha üstün olduğunu ifade eden (Gentile ve Messina, 2003) çok küçük hasar halinde bunun teşhisi için sadece ilk modla yetinilmemesini; daha yüksek modların dönüşümlerini de incelemek gerektiğini ifade etmektedirler. Metodun kiriş gibi basit yapılardan başka düzlem çerçeve şeklindeki

nispeten karmaşık yapılara da tatbik edilebileceği Ovanesova ve Suárez (2004) tarafından gösterilmiştir. Kirişte birden fazla hasar olması halinde dalgacık katsayıları ve hasar arasındaki ilişki farklı yöntemlerle ele alınmıştır (Loutridis v.d., 2004; Chang ve Chen, 2005). Boyuna titreşim yapan hasarlı çubuklarda DA ile hasar yeri ve şiddetini belirlemeye yönelik güncel çalışmalar da mevcuttur (Castro v.d., 2006; Castro v.d., 2006a). Plak türü yapılarda SDD ile hasar teşhisinin de başarıyla uygulandığını görüyoruz. Bu çalışmaların bazılarında hasar elastisite modülündeki azalma şeklinde (Chang ve Chen, 2004), bir kısmında çatlak (Douka v.d., 2004) ya da çentik (Rucka ve Wild, 2006) olarak modellenmiştir. Başka bir çalışmada çatlak ihtiva eden dönen bir kirişin temel modu Gabor dalgacıkları kullanılarak analiz edilmiş, mod verisine gürültü karışması halinde SDD nin performansı incelenmiştir (Chang ve Chen, 2004a).

Hasar teşhisinde mod şeklini veya belli bir andaki deplasman profilini kullanmak dışında başka yaklaşımlar da vardır. Örneğin, hareketli yük taşıyan bir yapının belli bir noktasından alınan zamana bağlı ivme veya yer değiştirme verisi de yapıda meydana gelen hasarın yeri ve şiddeti hakkında bilgi içerir. Bu noktada zarif bir uygulama Zhu ve Law (2006) tarafından yapılmıştır. Çalışmada, sabit hızlı düşey bir yük taşıyan kirişin orta noktasından alınan zamana bağlı veri DA ile analiz edilerek hasar teşhisi gerçekleştirilmiştir.

Mevcut çalışmada, yukarıda bahsedilenlerden farklı olarak, açık kesitli bir kirişte SDD ile hasar teşhisi incelenmektedir. Bu tür kirişlerde kesitin ağırlık merkezi ve kayma merkezi çakışık değildir, aralarında belli bir mesafe vardır (Şekil 1). Bu sebeple, simetri düzlemine dik doğrultuda zorlandıklarında eğilmeye birlikte burulma da meydana gelir. Uygulamada helikopter kanadı, kompresör ve türbin kanatçıkları bu şekilde modellenebilen kirişlerdir. Ayrıca, bir yükü bir yerden başka bir yere hızlı nakleden bir manipülatör uzvu da şayet simetri düzlemine dik doğrultuda eğilme söz konusu ise kombine eğilme burulma titreşimleri yapan bir kiriş gibi düşünülebilir. Bu tür kirişlerin dinamik davranışını inceleyen çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur (Jun v.d., 2004; Gökdağ ve Kopmaz, 2005). Öncelikle doğal frekans veya eğrilik değişimlerine dayalı klasik modal analiz yöntemlerinin yetersizliğine dikkat çekilerek DA'nın üstünlüğü belirtilmiştir. Daha sonra, böyle bir kirişte hasar elastisite modülündeki azalma olarak tanımlanarak farklı hasar durumlarına ait temel mod şekilleri SDD ile analiz edilmiş, hasar yeri ve derecesi belirlenmiştir. Ayrıca, hasar teşhisi açısından uygun dalgacık katsayılarını elde etmek için mod şeklinin kayma merkezine hangi

mesafeden ölçülmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.



K: Kayma merkezi; G: Ağırlık merkezi.

Şekil 1. Çeşitli kiriş kesitleri.

2. MATERYAL VE METOT

Kirişin herhangi bir mod şekil fonksiyonu $f(x)$ olmak üzere bunun SDD si

$$T_{a,b} = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi_{a,b}^*(x) dx \quad (1)$$

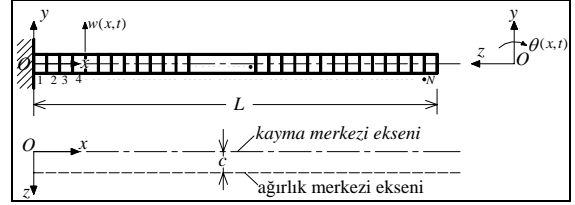
biçimindeki konvolüsyon integraliyle hesaplanır (Addison, 2002). Burada $T_{a,b}$ dönüşüm katsayılarını, a ve b sırasıyla ölçek ve öteleme ile ilgili pozitif reel sayıları, $\Psi_{a,b}(x)$ dalgacık fonksiyonunu, üst yıldız karmaşık eşleniği temsil etmektedirler. $\Psi_{a,b}(x)$, ana dalgacık fonksiyonu $\Psi(x)$ 'den $\Psi_{a,b}(x) = \Psi((x-b)/a)$ şeklinde türetilmiştir. Ana dalgacık fonksiyonu aşağıdaki şartları sağlamalıdır:

- Enerjisi sonludur: $E = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(x)|^2 dx < \infty$
- Kabul edilebilirlik şartını, $\int_{-\infty}^{\infty} f^{-1} |\hat{\Psi}(f)|^2 df < \infty$, sağlamalıdır ($\hat{\Psi}$ Ψ nin Fourier dönüşümüdür).
- Karmaşık dalgacıklar için ayrıca $\hat{\Psi}(f)$ reel değerli ve $f < 0$ için $\hat{\Psi}(f) = 0$ olmalıdır.

Bu şartları sağlayan dalgacık fonksiyonları kompakttır, yani sıfırdan farklı değerler aldıkları sonlu bir aralık vardır ve bu aralıkta dalgacık fonksiyonunun ortalama değeri sıfırdır. Dalgacıkların ölçek parametresi a ile genişletilip daraltılmaları ve öteleme parametresi b ile kaydırılmaları sayesinde $f(x)$ sinyalindeki süreksizlikler, ani değişim bölgeleri son derece hassas bir şekilde teşhis edilebilir. Öte yandan, $\int_{-\infty}^{\infty} x^k \Psi(x) dx = 0$, ($k=0,1,2,\dots,n-1$) şartını sağlayan bir $\Psi(x)$ dalgacığının n adet sıfırlanan momenti (SM) olduğu söylenir, yani bu dalgacık fonksiyonu ($n-1$). mertebeye kadar olan polinomlara diktir. Dolayısıyla, $f(x)$ fonksiyonunun yakın davranış sergilediği polinom bilinirse ona göre dalgacık

fonksiyonu seçilebilir, böylece $f(x)$ deki polinom tabiatlı olmayan –hasardan kaynaklanan– değişimler $T_{a,b}$ katsayılarına aktarılabilirler (Hong v.d., 2002; Douka v.d., 2003; Gentile ve Messina, 2003; Loutridis v.d., 2004; Rucka ve Wild, 2006).

Bu çalışmada dikkate alınan kiriş şematik olarak Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. N parçaya bölünmüş konsol kiriş.

Herhangi bir kesitin x-y düzlemindeki ötelemesi $w(x,t)$ ile, kayma merkezi etrafındaki burulma açısı $\theta(x,t)$ fonksiyonu ile, kayma ve ağırlık merkezlerinden geçen eksenler arasındaki mesafe de c ile gösterilmiştir. Serbest titreşim modlarını elde etmek için sonlu elemanlar metodu uygulanmıştır. Bu maksatla kiriş N elemana bölünmüş, her bir elemanın xy düzlemindeki ötelemesine ait şekil değiştirmesi kübik polinomlarla, x eksenindeki dönme açısı da $GJ\phi''(x) - EI\phi''''(x) = 0$ homojen burulma denkleminin çözümünden elde edilen ϕ fonksiyonuyla tanımlanmıştır. İfadede GJ üniform burulma direnci, EI çarpılma direncidir. Burada burulma şekil değiştirmesi için de kübik bir polinom önerilebilirdi. Ancak, gerçeğe çok yakın sonuçları daha az sayıda elemanla elde etmek için burulma denkleminin çözümünden bulunan fonksiyon kullanılmıştır. Buna göre herhangi bir i. elemanın sol (1) ve sağ (2) düğüm noktalarındaki öteleme ve dönmeyle ilgili bileşenler

$$\{u(t)\}_i = \{w_{i1}(t) \ \psi_{i1}(t) \ \theta_{i1}(t) \ \varphi_{i1}(t) \ w_{i2}(t) \ \psi_{i2}(t) \ \theta_{i2}(t) \ \varphi_{i2}(t)\}^T$$

sütun vektörü ile ifade edilebilir. Burada w ve θ sırasıyla ilgili düğüm noktasındaki öteleme ve burulma açısı, ψ , $\psi = dw/dx$ olarak tanımlı eğim açısı ve φ burulma açısının türevidir ($\varphi = d\theta/dx$). Her bir eleman için kinetik ve potansiyel enerji ifadeleri yazılarak eleman kütle ve katılık matrisleri elde edilir. Bunlardan yararlanılarak tüm sistemin kütle ve katılık matrisleri derlenir, böylece sadece konzervatif kuvvetler altında Lagrange hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki gibi yazılır:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{0\} \quad (2)$$

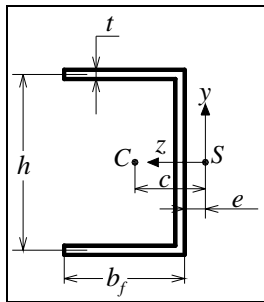
Eşitlikteki $[M]$ ve $[K]$ tüm sistemin kütle ve elastiklik matrisleri,

$$\{q(t)\} = \{w_{11}(t) \ \psi_{11}(t) \ \theta_{11}(t) \ \varphi_{11}(t), \dots, \\ w_{N2}(t) \ \psi_{N2}(t) \ \theta_{N2}(t) \ \varphi_{N2}(t)\}^T$$

tüm düğüm noktalarındaki zamana bağlı şekil değiştirme terimlerini içeren $4(N+1) \times 1$ boyutlu bir sütun vektörüdür. $\{q\} = \{Q\} \sin(\omega t)$ biçiminde harmonik çözüm önerildiğinde

$$([K] - \omega^2 [M])\{Q\} = \{0\} \quad (3)$$

özdeğer problemine ulaşılır. (3) özdeğer probleminin çözümünden i. doğal frekans (ω_i) ve mod şekli ($\{Q^{(i)}\}$) elde edilir. Bu özvektörün elemanlarıyla i. moddaki sehim ($Y^{(i)}$) ve burulma açısı ($\varphi^{(i)}$) fonksiyonları derlenebilir. Böyle bir kirişin deneysel modal analizinde $Y^{(i)}$ ve $\varphi^{(i)}$ den ziyade meselâ kiriş orta noktasının modlarını belirlemek daha kolaydır. Çünkü; $Y^{(i)}$ kiriş dışındaki bir eksenin modal fonksiyonu olduğundan transdüserin o eksen üzerinde konumlandırılması pratik olarak sorunludur. Ayrıca, birçok durumda açısal deformasyonu ölçmek oldukça zordur. Halbuki, teorik olarak $U^{(i)} = Y^{(i)} + (e + 0.5b_f)\varphi^{(i)}$ (e ve b_f için bkz. (Şekil 3)) biçiminde tanımlanan kiriş orta noktalarının modal şekli daha kolay ölçülebilir. Hasar yeri ve mertebesini tespit etmek için SDD de $f(x)$ fonksiyonu olarak işte bu mod fonksiyonları dikkate alınacaktır.



$t=2\text{mm}$, $h=50\text{mm}$, $b_f=40\text{mm}$, $c=16.4\text{mm}$, $e=2.7\text{mm}$, $L=1.5\text{m}$ (kiriş boyu), $I=2.0513 \times 10^{-11}\text{m}^6$ (çarpılma sabiti), $I_{zz}=1.1941 \times 10^{-7}\text{m}^4$ (z eksenine göre alan atalet momenti), $J=3.6768 \times 10^{-10}\text{m}^4$ (polar atalet momenti); Malzeme: Alüminyum 2024-T3; $E=7.31 \times 10^{10}\text{Nm}^{-2}$ (Elastisite modülü); $\rho=2770\text{kgm}^{-3}$ (yoğunluk); $\nu=0.33$ (Poisson oranı); $m=0.7224\text{kgm}^{-1}$ (birim boydaki kütle); $I_s=1.9556 \times 10^{-4}\text{kg.m}$ (kayma merkezinden geçen eksene göre birim boydaki kütle atalet momenti); C : Kütle merkezi, S : Kayma merkezi.

Şekil 3. Kiriş kesitinin geometrisi ve fiziksel özellikleri.

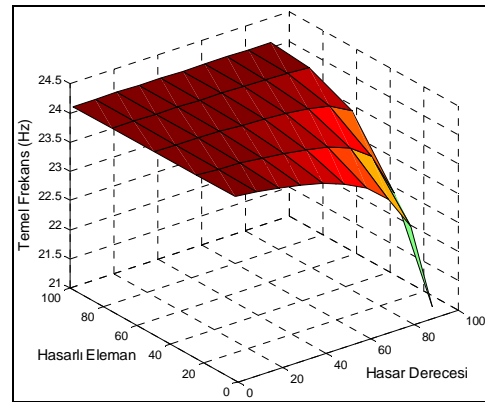
Yapıda oluşan hasar literatürde çatlak, çentik, elastisite modülünde veya yoğunluktaki azalma gibi farklı şekillerde modellenmektedir. Bu çalışmada hasarlı elemanın elastisite modülünde azalma meydana geldiği kabul edilmektedir.

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu kısımda sunulan tüm sayısal sonuçlar ve grafikler Şekil 3'deki kiriş verilerinin kullanılmasından elde edilmiştir. Sonlu eleman modeli eşit uzunluklu yüz kiriş parçasından ($N=100$) meydana gelmiştir.

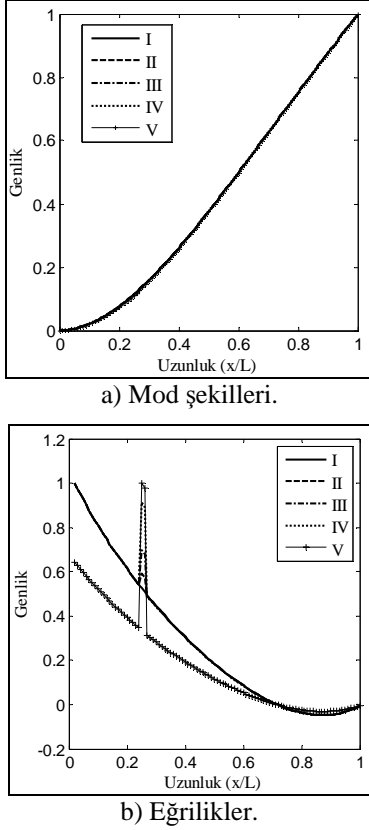
Bilindiği gibi titreşim tabanlı bir kısım hasar teşhis metotları, kolayca ölçülebildiğinden dolayı, doğal frekans değişimlerine dayanırlar. Ancak bu değişimler, özellikle büyük yapılarda, hasar derecesi yüksek olsa bile çok düşük mertebelerde olabilir (Kim v.d., 2003).

Öte yandan, sağlıklı bir hasar teşhisi için hasar sebebiyle doğal frekanslarda genellikle en az % 5'lik bir değişim olması gerekmektedir (Salawu, 1997). Kaldı ki % 5'lik değişim her zaman hasar olduğu anlamına gelmeyebilir; ölçüme karışan gürültü de bu mertebede hataya sebep olabilir. Ele alınan kirişte farklı hasar durumları ve yerleri için ilk dört doğal frekans incelendiğinde en büyük izafî değişimin temel frekansta meydana geldiği görülmüştür. Bu frekansın hasar yeri ve derecesiyle değişimi Şekil 4'de gösterilmiştir. Buna göre en büyük değişim % 12 civarında ve ankastre uç tarafında olmaktadır. Ancak, kirişin orta noktasında aynı hasar durumunda temel frekansta % 1.7'lik değişim meydana gelmektedir. Bu durumda frekans değişimine dayalı yöntemlerin bahsedilen hasar durumunda sağlıklı sonuç vermeyeceği anlaşılabilir.



Şekil 4. Birinci doğal frekansın hasar yeri ve derecesi ile değişimi. Hasar derecesi: Elastisite modülündeki azalma yüzdesi.

Titreşim temelli bir diğer gruptaki yöntemler hasarlı yapıya ait mod şekillerinin eğriliklerinden yararlanırlar. Eğrilikteki ani değişim hasar yerini ifade ettiği gibi bunun genliği de hasar derecesi ile orantılıdır (Alvandi ve Cremona, 2006). Şekil 5'de ankastre uca $0.25L$ mesafede değişik hasar dereceleri için birinci mod şekli ve eğrilikleri gösterilmiştir.

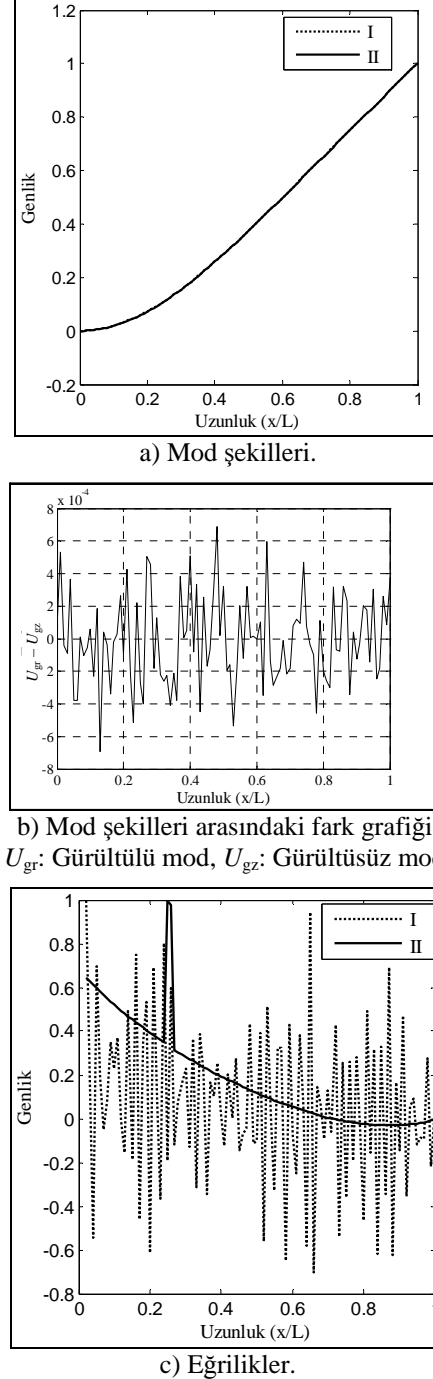


Şekil 5. Birinci mod şekli ve eğriliklerinin farklı hasar durumlarında değişimleri. I: $E_1=E$ (hasar yok), II: $E_2=0.8E$, III: $E_3=0.6E$, IV: $E_4=0.4E$, V: $E_5=0.2E$. Hasar yeri: $0.25L$. (Genlikler normlanmıştır).

Görüldüğü gibi farklı hasar dereceleri için mod şekilleri arasındaki fark oldukça küçüktür ve hasar yeri ile şiddetini belirlemede yetersizdir. Hâlbuki eğrilikteki ani değişim hasar yerini gösterdiği gibi bunun genliği de hasarın derecesi ile orantılıdır. Ancak, pratikte modların ölçülmesinde gürültü sebebiyle oluşan hata frekansların ölçülmesinde ortaya çıkan hatadan daha fazladır. Ölçüm verilerine gürültü karışığında eğrilik grafiği hasar hakkında sağlıklı bilgi veremez hale gelir. Bu durumu göstermek için konsol kirişin birinci mod fonksiyonuna $U = U_{hes} + E_p N_g \sigma(U_{hes})$ kuralına uygun olarak gürültü sinyali karıştırılmıştır (Zhu ve Law, 2006). Burada U_{hes} : gürültüsüz halde birinci mod fonksiyonu, U : gürültülü birinci mod fonksiyonu, E_p : gürültü düzeyi, N_g : ortalama değeri 0, standart

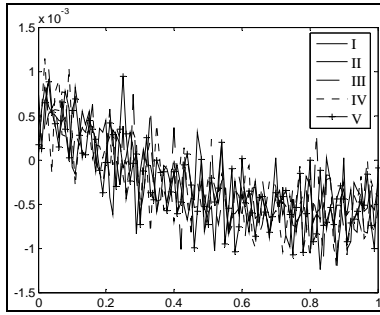
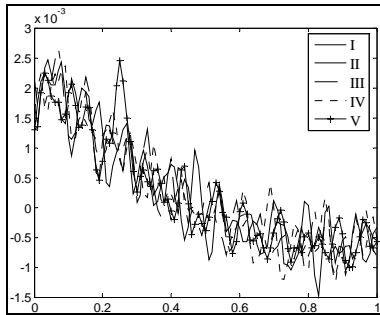
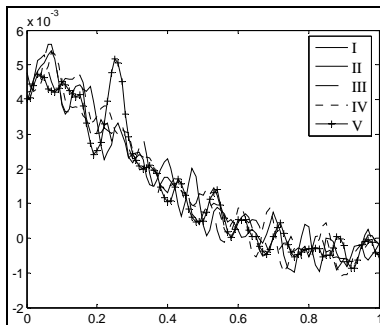
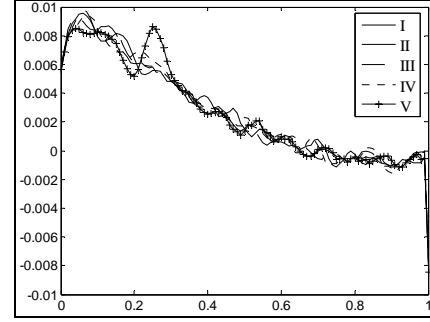
sapması 1 olan gürültü sinyali, $\sigma(U_{hes})$: gürültüsüz mod fonksiyonunun standart sapmasıdır.

% 80 hasarlı kirişin gürültülü ve gürültüsüz halde birinci mod şekilleri Şekil 6a'da, bunların arasındaki fark Şekil 6b'de, mod şekillerinin eğrilikleri de Şekil 6c'de gösterilmiştir.



Şekil 6. % 80 hasarlı kirişin gürültülü ve gürültüsüz hallerde birinci mod şekilleri ve eğrilikleri. I: Gürültülü, II: Gürültüsüz. Hasar yeri $0.25L$.

Grafikler incelendiğinde % 0.1 mertebesindeki bir gürültü düzeyi için eğrilik değişiminden hasar yeri ve şiddetini tespit etmenin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Hâlbuki aynı düzeyde gürültü içeren mod fonksiyonu DA ile işlendiğinde hasar hakkında daha fazla bilgi elde edilebilir. Bunu göstermek için Şekil 7'de değişik hasar derecelerinde SDD ile bulunan dalgacık katsayılarının farklı ölçeklerde değişimleri gösterilmiştir. a ölçek parametresinin 5, 7 ve 9 değerleri için grafiklerdeki belirgin tepe noktası hasar yerine işaret etmektedir. Küçük ölçek değerlerinde gürültünün baskın etkiye sahip olduğu, ölçek arttıkça hasar sebebiyle oluşan değişimin daha da belirginleştiği görülmektedir. Gürültü sinyali yüksek frekanslı değişim gösterdiğinden düşük ölçekli dalgacık katsayılarında bunun etkisi daha fazla olur, ama ölçek değeri arttıkça dalgacıkların genişliği de arttığından hesaplanan dalgacık katsayılarının gürültü sinyaline karşı duyarsızlaştığı görülmektedir (Gentile ve Messina, 2003).

a) $a = 3$ b) $a = 5$ c) $a = 7$ d) $a = 9$

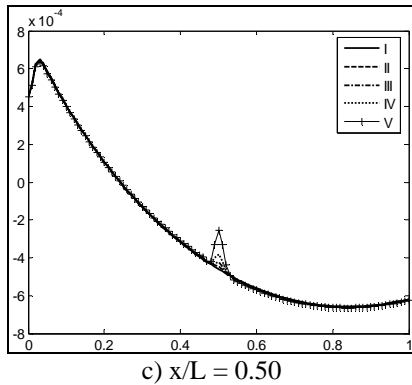
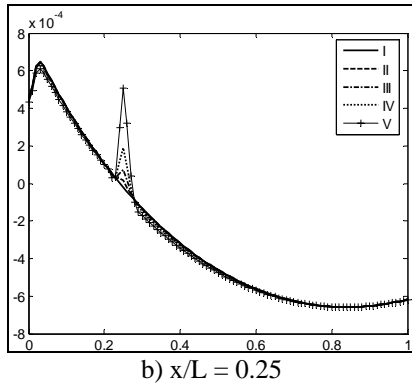
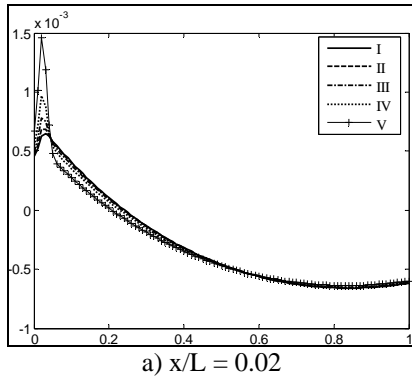
Şekil 7. $x=0.25L$ deki değişik hasar durumları için % 0.1 lik gürültü olması halinde dalgacık katsayılarının farklı ölçeklerdeki değişimleri. I: $E_1=E$ (hasar yok), II: $E_2=0.8E$, III: $E_3=0.6E$, IV: $E_4=0.4E$, V: $E_5=0.2E$. Yatay eksen uzunluk (x/L), dikey eksen boyutsuz $T_{a,b}$ katsayılarıdır.

Şekil 6c ile karşılaştırıldığında gürültülü veriden hasarla ilgili bilgi elde etmek noktasında DA'nın daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

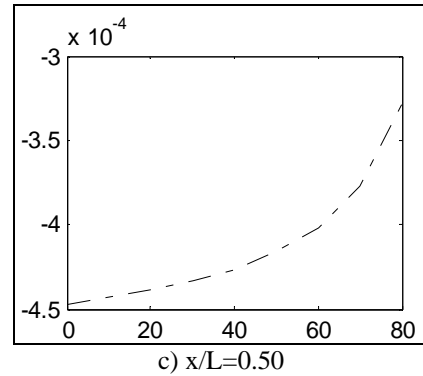
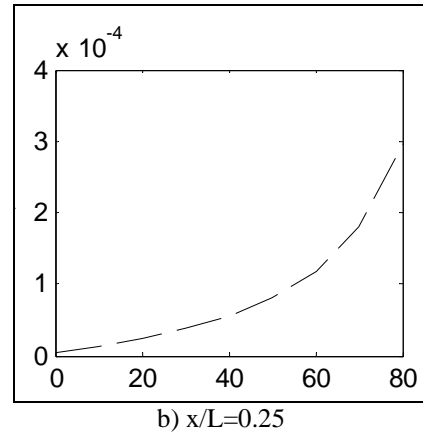
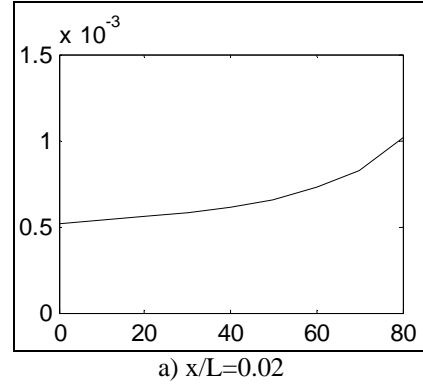
Hasarlı noktada dalgacık katsayılarının genliği ile hasar derecesi arasında ilişki olduğu bilinmektedir. Şekil 7'de gürültü sebebiyle tam olarak görülemeyen bu durum Şekil 8'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Üç farklı hasar yeri dikkate alınmış, her bir durumda hasarlı noktada dalgacık katsayılarının hasar derecesi ile değişimi gösterilmiştir. Mod fonksiyonunun sınırlarda süresiz olması dalgacık katsayılarının buralarda aşırı artışına sebep olur. Görsel açıdan hoş olmayan bu durum hasarın sınırlara yakın olması halinde algılanmasını engelleyebilir. Bu eksikliği gidermek için literatürde ekstrapolasyonla genişletme, sıfır değerler ekleme, sinyalin simetrisiyle genişletme, pencereleme gibi yaklaşımlar vardır (Rucka ve Wilde, 2006; Gentile ve Messina, 2003; Ovanosova ve Suárez, 2004; Chang ve Chen, 2005). Burada mod fonksiyonu ankastre uçtan geçen ordinat eksenine göre simetriği ile bu uçtan genişletilmiş, serbest uç tarafındaki son dört nokta ile bir kübik polinom uydurularak serbest uç beş noktayla genişletilmiştir. Ankastre ucun polinom uydurma yerine mod fonksiyonunun simetriği ile genişletilmesi sonucu dalgacık katsayılarındaki aşırı artışın daha az olduğu görülmüştür.

Farklı dalgacıklar, SM ve ölçek değerleri için yapılan denemeler sonunda Şekil 8'deki grafikler SM'si 2 olan "symlet" dalgacığı kullanılarak elde edilmiş, katsayıların $a=3$ ölçek değerindeki değişimleri gösterilmiştir. Görsel açıdan SM'si 2 olan Daubechies ve Gauss dalgacıklarıyla da buradakine yakın sonuçlar elde edilebilir. Grafikler incelendiğinde, hasar olan noktada hasar derecesi ile orantılı ani artışlar meydana geldiği, hasar serbest

uca yaklaştıkça aşırı artışların genliğinde de azalma olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi, aynı hasar derecesi için eğriliğin serbest uca yakın halde daha az olmasıdır. Katsayı genliklerinin hasar derecesi ile değişimleri de Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde hasar sebebiyle katsayı genliklerinde benzer bir değişim olduğu, bu değişimin de bir polinomu andırıldığı görülmektedir. Dolayısıyla, sayısal benzetimlerle önceden her nokta için değişik hasar durumlarına ait bilgiler elde edilirse, pratikteki bir hasar durumu bunlarla karşılaştırılarak yeri ve derecesi belirlenebilir.

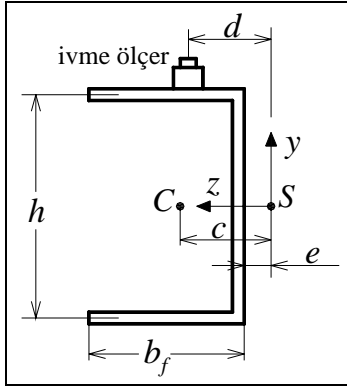


Şekil 8. Dalgacık katsayılarının hasar yeri ve derecesine göre değişimleri. I: $E_1=E$ (hasar yok), II: $E_2=0.8E$, III: $E_3=0.6E$, IV: $E_4=0.4E$, V: $E_5=0.2E$. Yatay eksen uzunluk (x/L), dikey eksen boyutsuz dalgacık katsayılarıdır ($T_{a,b}$). Ölçek parametresi $a=3$.

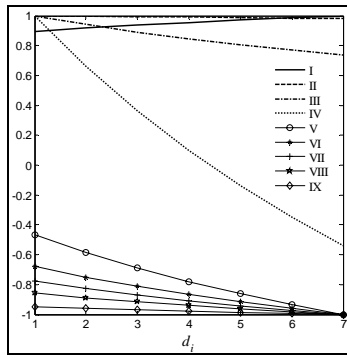


Şekil 9. Farklı noktalarda katsayı genliklerinin hasar derecesi ile değişimleri. Yatay eksen: Elastisite modülündeki azalma (%), Dikey eksen: Normlanmış $T_{a,b}$ katsayıları. Ölçek değeri $a=3$.

Normal kirişlerde mod şeklini ölçmek için yer değiştirme transdüserini (mesela ivme ölçeri) kiriş üzerinde herhangi bir yere konumlandırmak simetri sebebiyle mümkündür. Ancak, bu çalışmadaki gibi simetri düzlemine dik doğrultuda titreşimler yapan kirişlerde ölçüm sonunda elde edilecek mod şekilleri Şekil 10'daki d mesafesine de bağlıdır (herhangi bir moda $U^{(i)} = Y^{(i)} + d\varphi^{(i)}$). Dolayısıyla, aynı hasar derecesi için SDD katsayıları da farklı olurlar. Bu durumda hasar yeri ile ilgili olarak en uygun ölçüm noktası (d mesafesi) ne olmalıdır sorusu gündeme gelir. Şekil 11'de bu sorunun cevabı verilmiştir.



Şekil 10. Ölçme elemanı ve kayma merkezi arasındaki mesafe (d).



Şekil 11. Hasar yerlerinde d mesafesine bağlı olarak katsayı genliklerinin izafi değişimleri. Hasar yeri; I: 0.1L, II: 0.2L, III: 0.3L, IV: 0.4L, V: 0.5L, VI: 0.6L, VII: 0.7L, VIII: 0.8L, IX: 0.9L. Ölçüm noktaları; $d_i = e + i(b_f/8)$, $i=1,2,\dots,7$. Her konumda hasar derecesi elastisite modülünde %80 azalma olarak belirlenmiştir.

Buna göre I durumunda d mesafesi mümkün olduğunca fazla, III ve IV için olabildiğince az olmalıdır. Özellikle IV durumunda flanşın ortasından (Şekil 10'da $d = e + 0.5b_f$ mesafesi)

ölçüm yapmak hasar teşhisi açısından uygun değildir. II halinde ise katsayı genlikleri d mesafesinden neredeyse bağımsızdırlar. Hasar kirişin sağ yarısında ise (V,...,IX durumları) ölçümlerin mümkün olduğunca büyük d değerlerinden yapılması doğru olacaktır. Bununla birlikte II'ye benzer olarak IX durumunda da SDD katsayıları d den neredeyse bağımsızdırlar. Burada negatiflik SDD katsayılarının negatif olmasındandır, ama hasar yeri ve derecesini belirlemek açısından önemli olan mutlak değerlerdir. Pratikte hasarın nerede olduğu bilinmediği için ölçümün başlangıçta hangi d mesafesinde yapılacağı da belli değildir. Bu durumda farklı iki d mesafesinden alınan verilerle SDD katsayıları hesaplanıp bunların analiziyle hasar yeri önceden tespit edilebilir, hasara daha duyarlı SDD katsayılarını hesaplamak için uygun d

mesafesinden gerekiyorsa tekrar veri alınıp değerlendirilebilir. Uygulamada ölçüm verisine bir miktar gürültü sinyalinin de karıştığı düşünülürse bu tür kirişlerde sağlıklı ölçüm için bu hususa da dikkat etmek gerektiği anlaşılır. Çünkü hasar yeri ve derecesini belirlemek için hasara daha duyarlı katsayıları kullanmak gereklidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada tek simetri eksenli kesite sahip bir kirişin simetri düzlemine dik doğrultudaki eğilme titreşimlerine ait birinci mod şekli sonlu elemanlar metoduyla elde edilmiştir. Mod şeklini daha doğru belirlemek amacıyla sonlu elemanlar metodunda burulma şekil değiştirmesi için homojen burulma denkleminin çözümünden bulunan fonksiyon kullanılmıştır. Öncelikle, aynı hasar kiriş üzerinde farklı noktalarda oluştuğunda özellikle birinci doğal frekansın bundan farklı derecede etkilendiği gösterilmiştir. Buradan yola çıkarak frekans değişimlerine bağlı yöntemlerin yetersizliğine dikkat çekilmiştir. Seçilen kirişin orta noktasına ait birinci mod şekli SDD ile işlenerek dalgacık katsayıları elde edilmiş, değişik hasar durumları için bu katsayılardan hasar yeri ve derecesinin nasıl tespit edildiği gösterilmiştir. Ölçüme karışan gürültü karşısında SDD'nin ne derece etkili olduğunu anlamak için mod verisine normal dağılımlı yapay gürültü sinyali Zhu ve Law (2006) çalışmasındaki tanıma uygun olarak eklenmiştir. Bu halde SDD ile hesaplanan katsayılardan hasar yerinin belirlenebildiği, ama hasar derecesini tespit etmek noktasında metodun yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, eğrilik değişimine dayalı yöntemlere kıyasla SDD'nin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Çalışmada ortaya çıkan en önemli sonuç; böyle bir kirişte herhangi bir d mesafesinden ölçüm yapıp bununla elde edilen sonuçlarla yetinmemek gerektiğidir. Hasara daha duyarlı katsayılar elde etmek için uygun d mesafesi belirlenmeli, buradan yapılacak ölçümler dikkate alınmalıdır. Ölçümlere genellikle gürültü de karıştığından bu hususun önemi ortaya çıkmaktadır. Şekil 11'de verilen eğriler seçilen kirişin fiziksel özelliklerine bağlıdır; farklı özellikteki kirişler için sonuçlar bir miktar farklı olabilir. Ayrıca, birinci mod değil de daha yüksek mertebeden modlar dikkate alınırsa grafik tamamen değişebilir. Şu halde hasar teşhisi için daha yüksek modları incelemek gerektiğinde Şekil 11'deki grafiklerin ilgili mod şekli için tekrar elde edilmesi gerektiği açıktır. Çalışmadaki prosedür takip edilerek bu tür kirişler için önceden sayısal benzetimlerle veriler elde edilebilir. Bu veriler pratik ölçümlerden bulunan sonuçları daha iyi değerlendirmede yardımcı olabilirler.

5. KAYNAKLAR

- Addison, P. S. 2002. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance, IOP Publishing Ltd, Bristol.
- Alvandi, A. and Cremona, C. 2006. Assesment of Vibration-Based Damage Identification Techniques, *Journal of Sound and Vibration* 292, 179–202.
- Castro, E., Garcíá-Hernandez, M.T. and Gallego, A. 2006. Damage Detection in Rods by Means of the Wavelet Analysis of Vibrations: Influence of The Mode Order. *Journal of Sound and Vibration* 296, 1028–1038.
- Castro, E., Garcíá-Hernandez, M. T. and Gallego, A. 2006a. Defect Identification in Rods Subject to Forced Vibrations Using The Spatial Wavelet Transform. *Applied Acoustics*, doi: 0.1016/j.apacoust.2006.04.003.
- Cecchini, A. 2005. Damage Detection and Identification in Sandwich Composites Using Neural Networks. MsC Thesis, University of Puerto Rico.
- Chang, C. C. and Chen, L.W. 2003. Vibration Damage Detection of A Timoshenko Beam by Spatial Wavelet based approach. *Applied Acoustics* 64, 1217–1240.
- Chang, C.C. and Chen, L.W. 2004. Damage Detection of A Rectangular Plate by Spatial Wavelet Based Approach. *Applied Acoustics* 65, 819–832.
- Chang, C.C. and Chen, L.W. 2004a. Damage Detection of Cracked Thick Rotating Blades by A Spatial Wavelet Based Approach. *Applied Acoustics* 65, 1095–1111.
- Chang, C. C. and Chen, L.W. 2005. Detection of The Location and Size of Cracks in The Multiple Cracked Beam by Spatial Wavelet Based Approach. *Mechanical Systems and Signal Processing* 19, 139–155.
- Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. 2003. Crack Identifications in Beams Using Wavelet Analysis. *International Journal of Solids and Structures* 40, 3557–3569.
- Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. 2004. Crack Identification in Plates Using Wavelet Analysis. *Journal of Sound and Vibration* 270, 279–295.
- Gentile, A. and Messina, A. 2003. On the Continuous Wavelet Transforms Applied to Discrete Vibrational Data for Detecting Open Cracks in Damaged Beams. *International Journal of Solids and Structures* 40, 295–315.
- Gökdağ, H. and Kopmaz, O. 2005. Coupled Bending and Torsional Vibration of A Beam With In-Span and Tip Attachments. *Journal of Sound and Vibration* 287, 591–610.
- Hong, J.C., Kim, Y.Y., Lee, H.C. and Lee, Y.W. 2002. Damage Detection Using The Lipschitz Exponent Estimated by The Wavelet Transform: Applications to Vibration Modes of Beam. *International Journal of Solids and Structures* 39, 1803–1816.
- Jun, L., Rongying, S., Hongxing, H. and Xianding, J. 2004. Coupled Bending and Torsional Vibration of Axially Loaded Bernoulli-Euler Beams Including Warping Effects, *Applied Acoustics* 65, 153–170.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Stubbs, N. 2003. Damage Identification in Beam-Type Structures: Frequency-Based Method vs Mode-Shape-Based Method, *Engineering Structures* 25, 57–67.
- Loutridis, S., Douka, E. and Trochidis, A. 2004. Crack Identification in Double-Cracked Beams Using Wavelet Analysis. *Journal of Sound and Vibration* 277, 1025–1039.
- Ovanesoova, A.V. and Suárez, L.E. 2004. Applications of Wavelet Transforms to Damage Detection in Frame Structures. *Engineering Structures* 26, 39–49.
- Quek, S.T., Wang, Q., Zhang, L. and Ang, K.K. 2001. Sensitivity Analysis of Crack Detection in Beams by Wavelet Technique. *International Journal of Mechanical Sciences* 43, 2899–2910.
- Rucka, M. and Wilde, K. 2006. Application of Continuous Wavelet Transform in Vibration Based Damage Detection Method for Beams and Plates. *Journal of Sound and Vibration* 297, 536–550.
- Salawu, O.S. 1997. Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency: A Review, *Engineering Structures* 19, 718–723.
- Wang, Q. and Deng, X. 1999. Damage Detection With Spatial Wavelets. *International Journal of Solids and Structures* 36, 3443–3468.
- Yan, Y.J., Cheng, L., Wu, Z.Y. and Yam, L.H. 2006. Development in Vibration-Based Structural Damage Detection Technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, doi: 10.1016/j.ymsp.2006.10.002.
- Zhu, X.Q. and Law, S.S. 2006. Wavelet-Based Crack Identification of Bridge Beam From Operational Deflection Time History. *International Journal of Solids and Structures* 43, 2299–2317.