HASAR TANILAMASINDA İSTATİSTİKİ DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİNİN ZAMAN-FREKANS ORTAMINDA İRDELENMESİ

Ömer Fatih Sak[1] ve Kemal Beyen[2]

[1]*Doktora Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
Email: omerfatihsak@gmail.com
[2]*Prof. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
Email: kbeyen@kocaeli.edu.tr

ÖZET:

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar almış olan 6 katlı betonarme karkas yapının hasar almadan önceki analitik modeli, bir ve iki katlı hasar almamış planda benzer olan yapıların karakteristik özelliklerinden üretilmiştir. Üretilen analitik modele Kocaeli deprem kayıtları zaman tanım alanında uygulanarak elde edilen hasar dağılımı mevcut hasar rölevesiyle mukayese edilmiştir. Yapı parametreleri, eğilme momentine etki eden elastik modül, E, etkin kesit ataleti, I, ve birim hacim ağırlık gerektiği kadarıyla güncellenerek benzeşim gücü yükseltilmiştir. Bir ve iki katlı hasarsız yapıların çevrel titreşim kayıtları benzer klonlama uygulamasıyla 6 katlı betonarme yapının hasar öncesi çevrel titreşim tepkilerinin üretilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen hasarsız ve hasarlı yapı tepkileri zaman-frekans ortamında değerlendirilmiş ve istatistiki yöntemler uygulanarak hasar tespiti denenmiştir. Tutarlılığı gösterilmiş olan bu yöntem ile deprem (hasar) öncesi davranış bilgisi olmayan yapılar için analitik yöntemle elde edilen hasarsız tepki kayıtlarının hasar sonrası kayıtlarla kullanılmasına bir imkân vermiştir. Geleneksel yöntemler ile elde edilen sonuçların eksiğini kapatan bu analiz yöntemlerinin istatistiki değerlendirme algoritmalarıyla desteklenmesi hasar tanılama gücünü yükseltmiştir. Sahada yerinde ölçümlerden veya mevcudu yok ise benzeştirilmiş analitik modellerden hesaplanan sitasyoner ve doğrusal elastik olmayan tepkisel davranış verilerine zaman-frekans ortamında yürütülen analizler ile değişimlerin veya ilerleyen safhada gelişen hasarın izlenmesi ve durum tespiti hem pratik anlamda uygulanabilirlik açısından hem otomasyon bir işletme sistemi içinde izleme-değerlendirme yazılımları açısından etkili olarak kullanılabileceği kanaati oluşmuştur. Uygulamada, eleman içi gizli hasar durumunda veya hasar mahalline ulaşılamayan durumlarda bir yapı sağlığı izleme ağı içinden elde edilen verilerle dalgacık ve Hilbert-Huang analizleri gibi zaman-frekans alanında uygulamaların tutarlılığı ayrıca tartışılmıştır. Bu yöntemin yapı sağlığı izleme ağlarına entegre edilmesiyle uygulama sahasının genişleyeceği ve gelecek vadettiği anlaşılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Yapı Klonlama, Yapı Sağlığı İzleme, Dalgacık ve Hilbert-Huang Dönüşümü

STUDY ON STATISTICAL EVALUATION IN TIME-FREQUENCY DOMAIN FOR DAMAGE IDENTIFICATION

ABSTRACT:

The analytical model of the 6-story reinforced concrete (RC) bare frame structure, which received moderate damage during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake, was regenerated from the characteristic features of undamaged one and two story identical structures. Through the nonlinear time domain analysis, simulated damage pattern estimated for the 1999 Kocaeli earthquake was compared with the observed damage report. By modifying the important structural parameters like E and I for bending moment strength and mass density, level of coherence between actual and simulated damage patterns is improved. By cloning process, ambient response records of the one and two story undamaged structures were adopted to estimate ambient response of the elastic linear (undamaged) 6-story RC structure. For the working 6-story structure, undamaged and damaged structural

responses are employed for damage assessment in Time-Frequency domain by applying statistical techniques. With such a consistency, pre-earthquake (undamaged) vibration data can be estimated truly and it is used with post-earthquake (damaged) vibrations for comparative analysis in time-frequency domain. Adopting statistical evaluation algorithms, robustness of the damage identification is escalated through the time-frequency analysis, which compensates the lacks of the conventional damage identification techniques. For in-situ field tests or analytically simulated response data, which is either nonstationary or nonlinear, it becomes feasible for an effective damage detection in an automatic decision making process to track and decide a progressive failure at the earliest state On the other hand, in case of inaccessible damage or hidden cracks in the member core, using structural health monitored data pairs; results of the wavelet and Hilbert-Huang like analysis techniques in Time-Frequency domain are discussed. It is believed that these methods should be used in a complementary way to effectively and correctly assess the health condition of an engineering structure.

KEYWORDS: Structure Clonning, Structural Health Monitoring, Wavelet and Hilbert-Huang Transform

1. GİRİŞ

Deprem etkisiyle hasar almış ya da almakta olan yapılardan elde edilen sinyallerde durağan ve doğrusal olmayan özellikler mevcuttur. Bu tür sinyalleri çözümlemede Fourier dönüşümlerinin durağan ve doğrusal yapısı dolayısıyla yeterli ve gerçekçi sonuçlar elde edilememektedir. Fourier spektral analizi sadece durağan sinyaller için bir anlam taşımaktadır ve deprem hareketi durağan olmadığından bu tür sinyallerin Fourier spektral analizi zaman ve frekans üzerindeki enerji dağılımını yakalamada başarısız olmaktadır (Zhang ve diğ. 2003). Fourier dönüşümleri sinyalleri sinüs fonksiyonuyla alt sinyallere ayırmaktadır, bu fonksiyonun yapısal olarak sonsuza gitmesi ve frekansı değişken karakterdeki sinyalleri ayrıştırmada yetersiz kalması dolayısıyla yeni analiz araçlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu analiz araçlarından olan ve zaman-frekans ortamında kullanılan yöntemlerden başlıcaları dalgacık ve Hilbert-Huang dönüşümleridir. Dalgacık sınırlı süreli olan; ortalaması, başlangıç ve bitiş değeri sıfır olan dalga formlarına denilmektedir. Yapı sağlığında ve hasar tanılama çalışmalarında kullanılan dönüşümler ele alındığında zamana bağlı sinyallerde sabit frekansa sahip basit dalgalar için Fourier transformasyonları yeterli olmasına karşın gerçek ortamda frekans içeriği zamana bağlı olarak değişebilmekte ya da belirli bir an için titreşim, anomali ya da başka bir olay gerçekleşebilmektedir. Hilbert-Huang dönüşümü (HHD) ise ilk olarak 1998 yılında Norden E. Huang tarafından geliştirilmiştir. Bu dönüşüm herhangi bir alt sinyal kullanılmaksızın analiz edilen veriye uyarlanan ve her veride farklı alt fonksiyonlar üretilen adaptif ampirik bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir matematiksel denklemle ifade edilemediğinden teorik altyapısı henüz tamamlanamamıştır.

HHD, önümüzdeki birkaç yıl içinde yapıların yerinde izlenmesi için en çok kullanılan akıllı sinyal işleme sistemi haline gelebilir. Dalgacık dönüşümü günümüzde bazı araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır ancak HHD, durağan olmayan ve doğrusal olmayan verilerin analiz edilmesi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Son yıllarda sensör maliyetleri teknolojinin de gelişmesiyle birlikte yaygın olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Bundan otuz sene öncesinde bir yapı üzerinde sadece üç adet ivme ölçer kullanılmakta ve yeterli görülmekteydi. Şimdi ise maliyetlerinin düşmesiyle birlikte tek bir yapı üzerinde yüzlerce sensör yerleştirilebilmektedir.

Kocaeli ilinde, Gölcük ilçesinde yer alan altı katlı betonarme bir bina site içerisinde yer alan benzer yapılar arasından seçilmiştir. 17 Ağustos 1999 tarihinde gerçekleşen Kocaeli depreminde bu yapıda oluşan hasarlar saha ölçümleriyle tespit edilmiş, bitişiğindeki bir ve iki katlı hasarsız yapılar ise ayrıca incelenerek hasarlı yapının ilk halini tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu safhadaki yapı klonlama çalışmalarında modal parametreler referans alınmıştır. Sonrasında elde edilen analitik model üzerinden zaman-frekans alanında hasar tespit çalışmaları istatistiksel olarak çalışılmıştır.

2. GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Araştırmacıların bir çoğu yapı sağlığı izleme sistemlerini anomali tespiti bağlamında tanımlamışlardır. Bunlar zaman-frekans çözünürlüklerindeki tepe noktaları, ani sivriltiler, skalogramdaki düzensizlikler, enerji katsayılarındaki farklılıklar ve eşikleme parametreleri olabilmektedir.

Zaman tanım alanındaki titreşimlerden hasar tanılamaları yapan, mod şekli ve frekans gibi modal parametrelerin elde edildiği akıllı binalarda (Xu ve diğ., 2005) deprem sonrası durum tespiti amaçlanmaktadır. Lin ve diğ. (2005) Hilbert-Huang dönüşümünün (HHD) bir karşılaştırma binasındaki yapısal parametreleri tanımlamada kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca HHD'nin yapısal hasarların konumu ve mertebesinin tespitinde tutarlı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Jha ve diğ. (2005) HHD'yi çok katlı bir yapı için araştırmış ve temel sinyal altlıkları formlarındaki (IMF) süreksizliğin bir yapıdaki hasarlı bir olayın varlığını ve konumunu sürekli olarak izlediğini göstermişlerdir. Yu ve diğ. (2005), HHD'ye dayalı makaralı rulmanların arıza teşhisi için bir yöntem önermiştir. Yerel Hilbert marjinal spektrumu bir rulman yatağındaki arızaları teşhis etmek ve arıza modellerini belirlemek için kullanılmıştır. Zhang ve diğ. (2005) HHD'yi durağan olmayan titreşim kayıtlarından inşaat mühendisliği yapılarını etkileyen yapısal hasarları tanımlamak için kullanmışlardır. Peng ve diğ. (2005) rulmanların arıza teşhisi için sürekli dalgacık dönüşümü (CWT) ve HHD kullanmanın performanslarını karşılaştırmış ve geliştirilmiş bir HHD önerilmiştir. Dalgacık paketi dönüşümü, orijinal sinyali dar bant sinyalleri grubuna dönüştürmek için bir ön işlemci olarak kullanılmış ve daha sonra IMF'leri elde etmek için EMD kullanılmıştır. Sonuç olarak geliştirilmiş HHD'nin CWT'den daha iyi çözünürlük ve verimliliğe sahip olduğu bulunmuştur. Beata ve diğ. (2015) yapı üzerinde ilerleyen dalgalar üzerinden hasar tanılama çalışması yapmıştır. Yansıyan dalgaların enerjilerinin düşük olmasından hasarı tanımlamanın güçleşmesi neticesinde dalgacık analizleri kullanılmıştır. Hasar sonrasında oluşan yansıma dalgaları üzerinden tanılamayı gerçekleştirmek için Morlet dalgacıklarına dayalı sürekli dalgacık dönüşümü skalogramlarına bakılmıştır. Li ve diğ. (2015), bileşik köprülerde kesme konektörlerinin hasarını tespit etmek için yeni geliştirilen göreceli yer değiştirme sensörlerinden göreceli yer değiştirme ölçümlerini araştırmıştır. Sürekli Dalgacık dönüşümü ve Hilbert-Huang dönüşümü, ölçülen dinamik tepkileri analiz etmek ve hareketli yükler altında bileşik köprü modelinde kesme konektörlerinin hasarını tespit etmek için kullanılmıştır. Nümerik ve deneysel çalışmalar, bağıl yer değiştirme ve ivme ölçümlerinin, köprü hareket halindeki yükler altında kesme konektörlerinde hasar oluşumunun zamanını ve konumunu belirleyebildiğini göstermiştir. Sonuçlar, göreceli yer değiştirmenin bileşik köprülerin yapısal sağlık takibi için daha iyi bir tepki niceliği olduğunu göstermektedir. Ghazi ve diğ. (2015) hasar endeksi ve HHD kullanarak yeni bir hasar tespit algoritması önermiştir. Bu algoritmanın önemli yönleri, hasarın doğrusal ve doğrusal olmayan etkilerini ortaya çıkarmak ve hasar tespit olasılığını azaltmak için birkaç hasar endeksini birleştirmek için enerji tabanlı bir yöntem kullanmaktır. Yapısal tepkinin ham sinyalleri algoritmanın tek girdisidir ve geometri, yapılandırma ve yapının malzemesi hakkında hiçbir bilgiye ihtiyaç duyulmamıştır. Laboratuvar modeli yapısı üzerindeki deneyler, yapısal tepkide hasara bağlı doğrusal olmayan niteliklerin enerji tabanlı yöntemle etkili bir şekilde yakalandığını göstermiştir. Hilbert Huang dönüşümü, Fourier analizine kıyasla doğrusal olmayan şeyleri çıkarmada daha verimli ancak bununla birlikte hesaplama açısından yoğun bir işlem olarak görülmüştür. Beyen (2015a, 2015c) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar gören altı katlı betonarme yapıdan elde edilen verilerle frekans tanım alanı, zaman tanım alanı ve zaman-frekans tanım alanında olmak üzere üç ayrı yöntemle hasar tanılama çalışması yapmıştır. Bu araştırmada hareket noktasını oluşturan dalgacık güç spektrumu özellikleri, istatistiki tutarlılık ve çapraz korelasyon uygulamalarının yapı sağlığı çalışmalarında elde edilecek sonuçları güçlendirdiğini gösterilmiştir. Beyen (2015b) yapı analizinde sonsuz rijit diyafram plak davranış kabulünün hasarlı yapıda değişmekte ve farklı davranarak hasarlılığın ipuçlarını zaman-frekans alanında HHD analiziyle güçlü olarak verebildiğini göstermiştir. Döşemelerin düzlemlerinde ve düzleme dik yönde yapının hakim modlarıyla çok güçlü etkileşim içinde bulundukları anlaşılmıştır.

Wang ve diğ. (2016) dalgacık paket bileşenlerinin enerjileri üzerinden hasar tespiti ve konumunu belirlemek için modifiye dalgacık paket enerji derecesini (MWPER) geliştirmişlerdir. Bir deneysel çalışma üzerinden dalgacık paket enerji derecesi (WPER), MWPER ve uzama zaman eğrisinin zarf alanı (EASC) metotlarını kıyaslamışlardır. Sonuç olarak küçük hasarlarda MWPER metodunun diğer iki metoda göre daha duyarlı olduğunu göstermişlerdir. Kaloop ve diğ. (2016) analitik bir model üzerinden Daubhecies (DB10) dalgacığını kullanarak sürekli dalgacığın

toplam enerjisi ve ayrık dalgacığın dağılımları üzerinden mukayeseli olarak hasar tanılama çalışması yapmıştır. Sonuç olarak ayrık metodun sürekli olana göre daha belirgin olduğu ve hasar tespiti için daha uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır. Sonuçların saha ölçümlerinden elde edilen veriler üzerinden deneysel olarak da çalışılması gerektiği belirtilmiştir. Beyen (2015b) analitik ve deneysel sonuçları bire-bir ilişki içinde frekans ortamında transfer fonksiyonlarıyla değerlendirmiş ve gözlenen hata dağılımına katlar arası veya veri imkanı varsa kat içinde bakarak taşıyıcı duvar, duvar yükleri, basitleştirilmiş alansal yayılı yükler ve hasarlı eleman rijidliği için kullanılan plastik mafsal kabüllerinin düzeltilebileceğini belirtmiştir. Bu çalışmayla son teknolojik gelişmelerin ışığında izleme, saklama ve veri işlemede algoritmaların yüksek işlem hızında bilgisayarlarla uygulanabilirliği artarken uçak ve uzay araçlarında standart olarak uygulanan deneysel modal analiz (DMA) inşaat mühendisliği yapılarında da uygulanmaya başlandığı vurgulanmıştır.

3. YAPILARIN DAVRANIŞI VE DALGACIK DÖNÜŞÜMLERİYLE HASAR TANILAMA

Hasar anomalisini tespit edebilmek için zaman-frekans çözünürlüğünde yaygın olarak dalgacık dönüşümleri kullanılmaktadır. Dalgacık sınırılı süreli olan; ortalaması, başlangıç ve bitiş değeri sıfır olan dalga formlarına denilmektedir. Bilindiği gibi kısa süreli Fourier dönüşümleri de zaman frekans çözünürlüğü vermektedir ancak dalgacık dönüşümlerinden elde edilen çözünürlüklerde sabit bir şekil bulunmamaktadır. Düşük frekanslarda daha iyi frekans çözünürlüğü, yüksek frekanslarda ise daha iyi zaman çözünürlüğü vermektedir. Bu değişken çözünürlük bazı belirli sinyallerde düşük ve yüksek frekansların aynı anda zaman-frekans alanında birleştirilerek görülmesinde avantaj sağlamaktadır. Dalgacıklar düzensiz, sınırlı süreli ve asimetrik olduğundan anomali, titreşim ve sinyal içindeki olayları iyi tanımlamaktadırlar. Dalgacık analizine dayalı hasar tespit teknikleri iki farklı yaklaşıma dayanmaktadır. Bunlardan birincisi ayrık dalgacık dönüşümleridir. Bunlar sinyaldeki yaklaşım ve detay seviyelerindeki ani değişimleri tespit ederler. Detay ayrışımındaki ani sıçramalar yapısal hasarla ilişkili olabilmektedir. İkinci yaklaşım olarak sürekli dalgacık dönüşümleri tepki sinyalinin zaman frekans haritasını oluşturarak yapının doğal frekansındaki değişimleri tespit etmektedir. Genel olarak sürekli dalgacık dönüşümleri zaman-frekans analizleri için daha iyi olmakla birlikte ayrık dalgacıklar ayrıştırma, sıkıştırma ve özellik belirlemek için daha uygundur. Ancak dalgacık seçimi her zaman açık değildir. Grossman ve Morlet dalgacıkları en iyi bilinen sürekli dalgacıklardır. Daubechies dalgacıkları bilinen en iyi ortogonal dalgacıklardır. Biortogonal dalgacıklar (örn. Dual B-Dalgacıkları) ayrık dalgacıkların özel durumlarında kullanılır ve iki dalgacık setinden oluşur. Bunlardan birisi ayrıştırma diğeri yeniden inşa etme için kullanılmaktadır. Zaman alanında x(t) sinyalinin sürekli dalgacık dönüşümü (CWT) şöyle tanımlanmaktadır:

$$CWT(a,\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi(\frac{t-\tau}{a})dt \qquad (1)$$

Burada a ve τ değerleri sırasıyla wavelet fonksiyonunun ψ(t) ölçek ve yerdeğiştirme parametreleridir. Zaman alanındaki sinyal dalgacık dönüşümünün ölçeklenmiş ve yer değiştirmiş olan versiyonları ‘a’ ölçeğinde ve ‘τ’ ötelemesine göre çoğaltılmaktadır

Hilbert Huang Dönüşümü (HHD), özellikle doğrusal olmayan ve durağan olmayan verileri analiz etmek için tasarlanmıştır. Fourier ve dalgacık dönüşümlerine göre anlık frekansları ve genlikleri daha yerel olarak tanımlayabilmek için HHD tercih edilmektedir. Verilerin analizi için kullanılan HHD tekniği, ampirik mod ayrıştırma (EMD) olarak adlandırılan bir ayrıştırma algoritması ve Hilbert spektral analizi adı verilen bir spektral analiz aracı olmak üzere iki bileşenden oluşur. HHD, bir sinyalin salınan bileşenlerini, durağan olmayan veya doğrusal olmayan olsun, yerel olarak tanımlayabilir. İlk önce, EMD sinyali temel sinyal altlıkları formlarına (IMF) dönüştürülür ve sinyalde yer alan ölçek özelliklerini ileri sürer. İkinci bölümde Hilbert dönüşümü IMF'ye uygulanır ve her IMF için bir zaman-frekans gösterimi (Hilbert spektrumu) elde edilir. Yaklaşımın kısa özeti Beyen (2015b)’den kısa olarak aşağıya özeti aktarılmıştır. Gerçek sinyalin Hilbert dönüşümü değeri x (t) olarak tanımlanır.

$$H[x(t)] = x^* \frac{1}{\pi t} = y \tag{2}$$

ya da konvolüsyon tanımı kullanılırsa,

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} dt \tag{3}$$

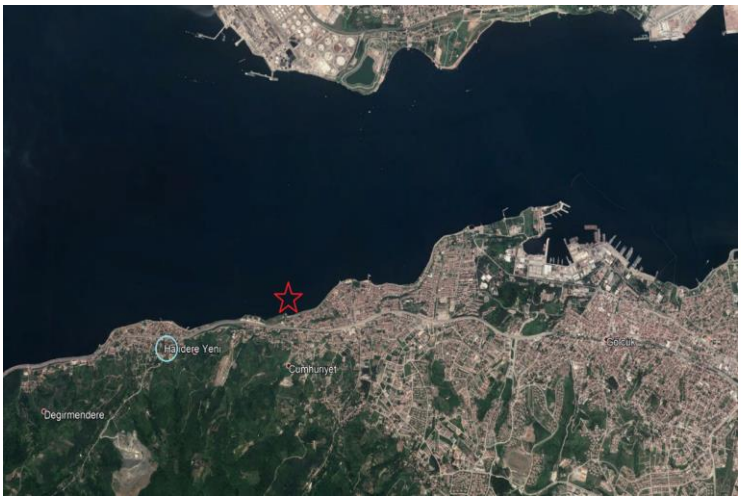
Bu fonksiyonda P Cauchy ana değerini göstermektedir. Fonksiyon y(t)'den analitik sinyal z(t)=x(t)+iy(t) ya da, in polar formda, z(t) = a(t)eiθ(t) denklemlerini tanımlamak mümkündür.

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2}\ , \theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \tag{4}$$

Burada a(t) anlık genlik ve θ(t) anlık faz fonksiyonudur. Anlık frekans ω(t) fazın anlık dönüşümünün türevi olarak tanımlanmıştır (Beyen, 2015b).

4. ANALİTİK MODELİ YAPI KLONLAMA METODUYLA OLUŞTURMA

Hasarlı altı katlı yapı yanında yer alan hasarsız iki katlı binadan elde edilecek yapı statik ve dinamik parametreleri hasarlı yapının hasar almadan (17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden) önceki durumunun modellemede güvenilir değerler olarak kullanılması istenmektedir. Elde edilecek bu değerler ile çalışılan mevcut yapının üstünde ölçülen davranışları aynı doğrulukta sonlu eleman modelinde temsil edilebilmesi için daha sonra deneysel ve analitik modellerin modal şekiller arası koralasyon teknikleriyle değerlendirme yapılacak ölçülen hata matrisinin minimize edilme teknikleri nümerik modele uygulanarak model kalibrasyonları tamamlanmış olacaktır.



Şekil 1. Test yapılan binaların İzmit Körfezi'ndeki konumu (Binalar mavi çembe ve deprem merkez üssü kırmızı yıldız)

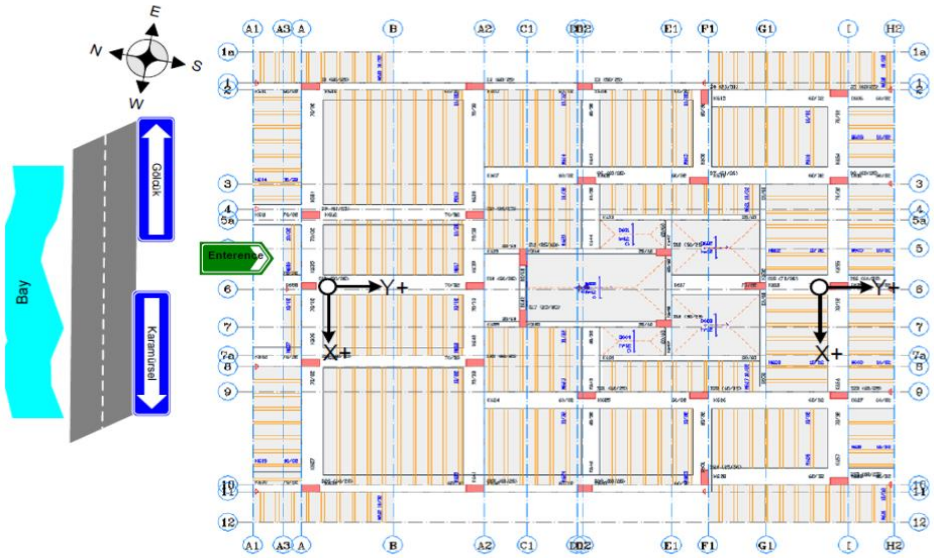


Şekil 2. Test yapılan binaların yerleşim planı

Kat planı Şekil 3'te gözükmektedir. Kolonlar 60/30, kirişler 25/50'dir. Kat yüksekliği 3m'dir. Beton sınıfı C20, demir sınıfı St420 olarak belirlenmiştir.

Tek katlı yapı Sonlu Eleman Paket programı (SAP2000NL, 2018) yardımıyla analitik olarak modellenmiş ve çevrel titreşimlerden gelen modal parametreler belirli bir yakınsaklıkta elde edilmesi için kalibre edilmiştir. Analitik model frekanslarıyla deneysel olarak hesaplanan parametreler uyumlu hale geldikten sonra yapı iki kata klonlanmış ve frekans mertebeleri mukayese edilmiştir. Analitik iki katlı yapı altı katlı yapıya klonlanarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi etkitilerek hasar analizi yapılacak ve mevcut

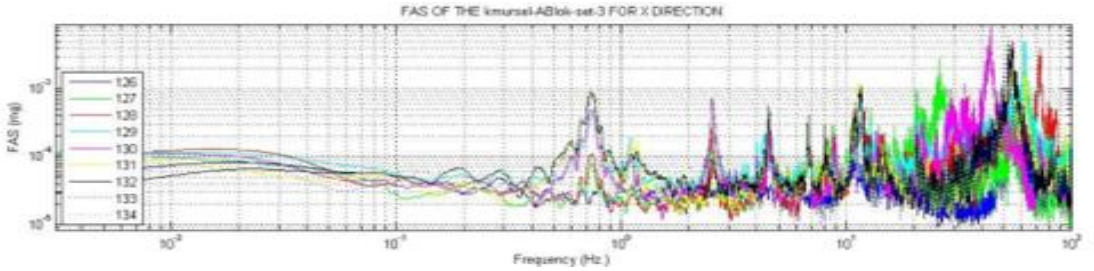
hasar durumuyla karşılaştırılarak gerçek yapıya ne kadar yakın bir model elde edildiği tartışılacaktır. Tablo 1.'de modelin kalibrasyon sonrası frekans bilgileri verilmiştir. Burada X yönlü frekans mertebesi 3. Sırada 0,919 Hz iken Y yönlü frekans 2. Sırada görülebileceği üzere 0,864 Hz mertebesindedir.



Şekil 3. Tipik kat planı

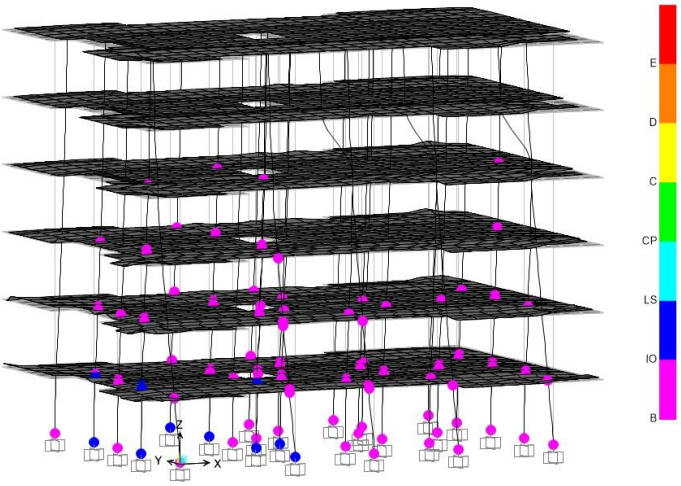
Tablo 1. Altı katlı yapının modal parametreleri

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	**StepType**	**StepNum**	**Period**	**Frequency**	**CircFreq**	**Eigenvalue**
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	1,219	0,820	5,153	26,556
MODAL	Mode	2 (Y)	1,157	0,864	5,432	29,503
MODAL	Mode	3 (X)	1,088	0,919	5,774	33,340



Şekil 4. Çevrel titreşim ölçümlerinden elde edilen istasyon kayıtlarının Fourier dönüşümlerinin X yönü için genlik-frekans içeriği

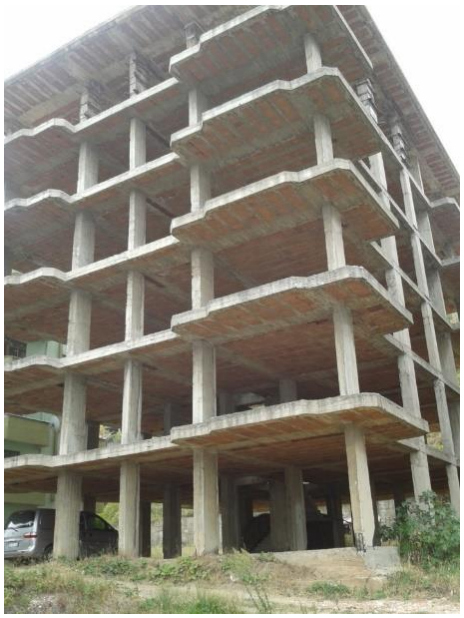
Zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan tepki analizi ile 17 Ağustos 1999 depreminin altı katlı binada gelişen hasar dağılımı Şekil 5.'te verilmiştir. Analitik olarak elde edilen model deprem sonrası hasar rölevesiyle karşılaştırılacak ve sonrasında hasar tahmini için bu model üzerinden deprem öncesi ve sonrası için üretilen mikrotremor kayıtlarına zaman-frekans alanında kullanılan dalgacık, Hilbert-Huang gibi dönüşümler uygulanacaktır. Sonuçlar istatistiksel olarak tartışılacaktır.



Şekil 5. Altı katlı analitik yapının deprem hasar dağılımı

4. MEVCUT HASAR RÖLÖVESİ

Binanın mevcut durumunda depremden sonra zemin kat kolonlarında mafsallaşma gözlemlenmiştir. 1. ve 2. kat kolonlarında (Bakınız Şekil 7a) ve merdiven kovasında çatlaklar (Bakınız Şekil 7b) gözlenmiştir. 3., 4., 5. ve 6. katlarda herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca zemin kat merdiven kovasını çevreleyen kirişlerde kolon birleşim noktalarında çatlaklar mevcuttur (Bakınız Şekil 7c).



Şekil 6. Bina genel görünümü

Şekil 7a.'da görülebileceği üzere zemin kat kolonlarda eğilme momentleri etkisinde oluşan mafsallaşma örnekleri tipik hasar resimleri olarak gösterilmiştir.



Şekil 7a. Zemin kat kolonda mafsallaşma



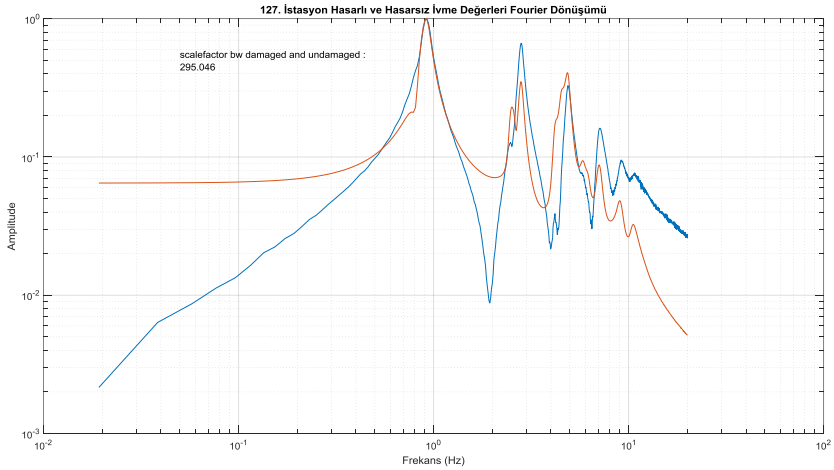
Şekil 7b.



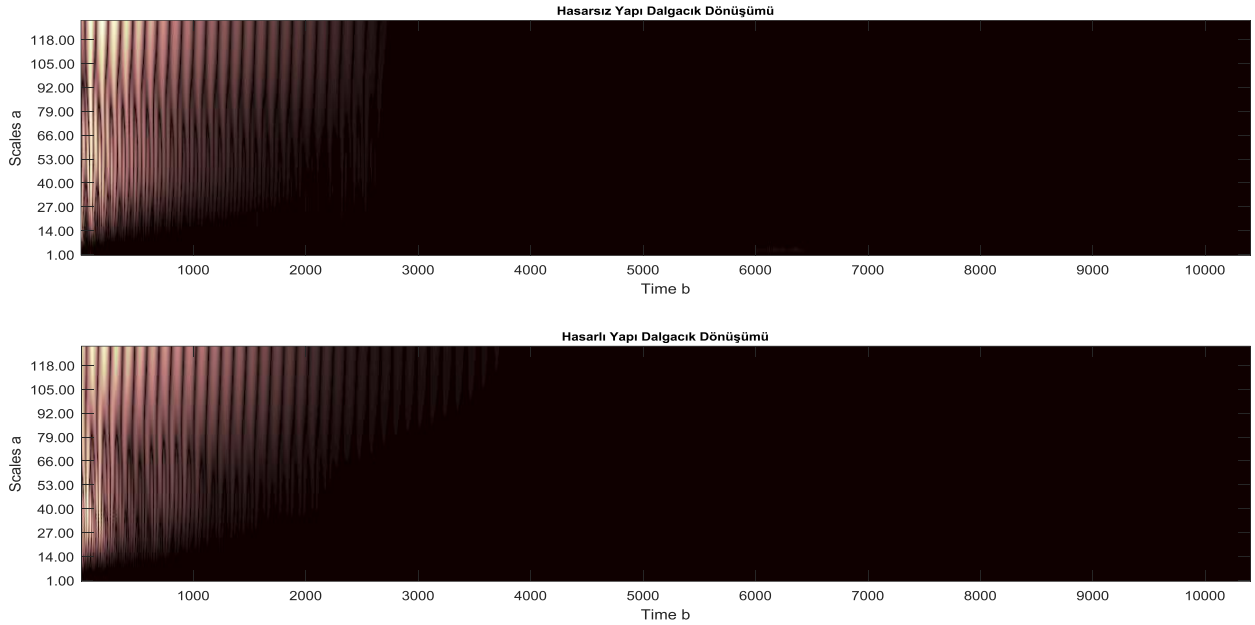
Şekil 7c.

5. ZAMAN-FREKANS ALANINDA HASAR TESPİT ÇALIŞMALARI

Mevcut hasar rölevesiyle analitik modele uygulanan doğrusal olmayan deprem analiz sonuçları birbiriyle uyumludur. Böylece analitik model üzerinden elde edilen deprem öncesi ve sonrası mikrotremor kayıtları hasar tespiti için veri olarak kullanılabilecektir. Bu veriler üzerinden zaman-frekans grafiklerinde anomali tespiti yapılarak yapısal hasar oluşumu hakkında bilgiye ulaşılmaya çalışılacaktır. X yönündeki mikrotremor kayıtları hasarlı ve hasarsız yapı için incelenecektir.

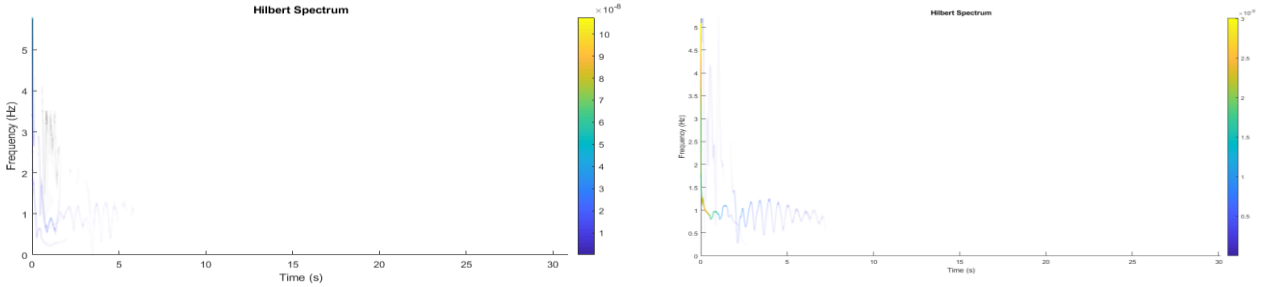


Şekil 8. Hasarlı (üstte - kırmızı) ve hasarsız (altta - mavi) yapının X yönlü Fourier dönüşümleri



Şekil 9. Hasarlı (altta) ve hasarsız (üstte) yapıların dalgacık dönüşümleri

Şekil 9.'da görüleceği üzere hasarlı ve hasarsız yapıda grafiksel olarak şiddet farklarına rastlanmaktadır.

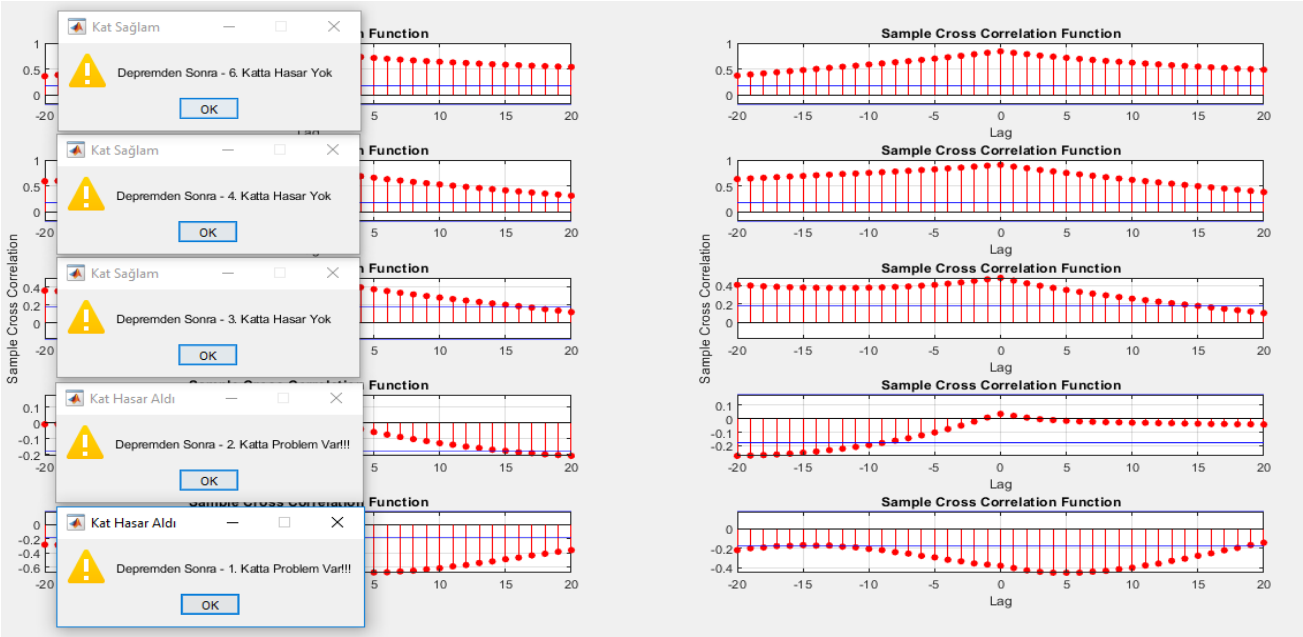


Şekil 10. Hasarlı (solda) ve hasarsız (sağda) yapıların Hilbert Huang dönüşümleri

Şekil 10.'da hasarlı ve hasarsız yapıda yapının sergileyebildiği frekans mühteviyatı zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu grafiklerden yapı hasar oluşumu hakkında karar verici bir mekanizma oluşturmak için istatistiksel yöntemler kullanılacaktır.

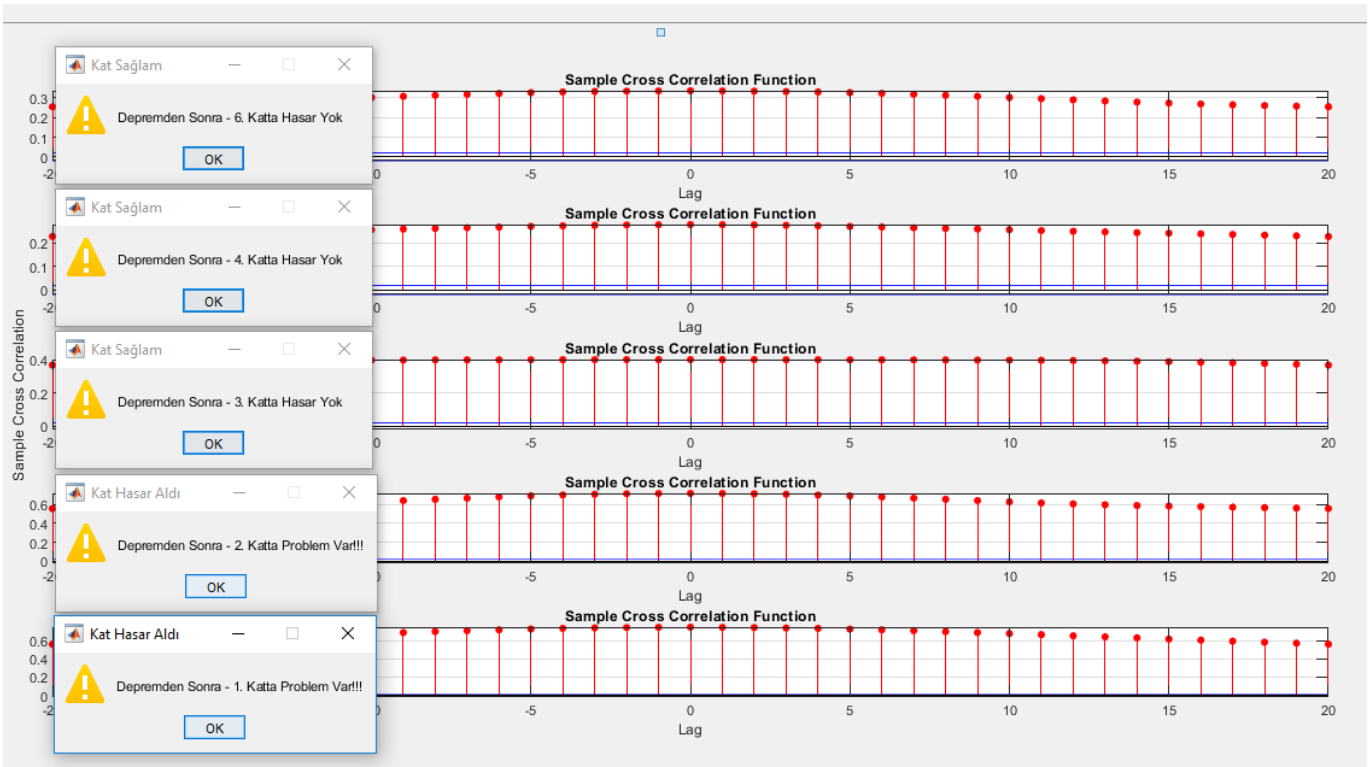
6. HASAR TESPİTİNDE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

Dalgacık katsayıları üzerinden belirli bir periyodun karşılıkları istatistiki koralasyon tekniği ve belirli bir sınır değerin altında uyarı vermesi için bir karar verici program yazılarak ara yüz olarak kullanıldığında Şekil 11.'deki gibi kat bazında uyarı vermektedir. Bu metot akıllı binalarda kat bazında hasarın tespit edilebilmesi için kullanılabilir.



Şekil 11. Dalgacık katsayıları üzerinden korelasyon ve otomasyon grafikleri

Hasarlı ve hasarsız kat sinyalleri üzerinden Hilbert Huang dönüşümüyle IMF'ler alındıktan sonra frekans alanına Fourier dönüşümüyle geçilir ve bu dönüşümler çapraz korelasyona otomasyon olarak girilebilir. Böylece Şekil 12.'de görüldüğü gibi kat bazında hasar tespiti yapılabilmektedir.



Şekil 12. Hilbert Huang dönüşümü IMF'lere Fourier uygulaması üzerinden korelasyon ve otomasyon grafikleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmamızda gösterildiği gibi dalgacık ve Hilbert-Huang dönüşümleri yapı hasarını yakalamada etkin bir metot olarak kullanılabilmektedir. Hasar gören elemanlarla hasar görmeyen elemanlar arasındaki farklar dalgacık spektrumlarındaki zamanla değişen frekans muhteviyatından, bölgesel enerji yoğunlaşmalarından ve yapı tepkilerinden elde edilen dalgacık katsayılarına uygulanan istatistiksel yöntemlerden elde edilebilmektedir. Bu farklar hasar oluşumunun konumu hakkında bilgi vermektedir. Dalgacık ve Hilbert-Huang dönüşümlerinin Fourier dönüşümlerine göre bir takım avantajları bulunmaktadır. Özellikle anomali tespiti bağlamında bu dönüşümlerle oldukça tutarlı sonuçlara ulaşılmaktadır. Güncellenen TBDY'nin ilgili bölümüne ya da Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği'ne yapı parametrelerinin anlık olarak izlenmesi ile ilgili hasar ölçeği ya da performans ölçeği tanımlamaları önerilebilir. Yapısal performansın, şekil değiştirmenin yanı sıra frekans değişimleri ile ilgili önerilebilecek ölçeklerle belirlenebilmesi için ilgili çalışmaların sayısı ve kapsamı arttırılabilir.

Böylece yapıları kontrol edecek olan deprem mühendislerinin iş tanımı ve yapı sağlığı takibi için yeni ve etkili bir hasar tanılama algoritması tarif edilebilir. Çalışılacak olan performans noktaları yapı türüne, yüksekliğine ve deprem bölgesine göre değişkenlik gösterecektir. Her yapı türü için analitik model üzerinden kritik performans seviyeleri tespit edilerek, yapı şekil değiştirmeleri ve ivme değerlerinin yanı sıra bu performans değeri de anlık olarak izlenebilir ve yapısal performansının kritik seviyeye ulaşması durumunda erken uyarı sistemleri geliştirilebilir.

8. TEŞEKKÜR

Çalışmamıza olan desteklerinden dolayı sayın Prof. Dr. Erdal Şafak ve Doç. Dr. Fuad Okay hocalarımıza teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Beata Zima, Magdalena Rucka (2015), Applicatıon of Wavelet Transform In Analysis Of Guided Wave Propagation Signals For Damage Detection In A Steel Plate, DIAGNOSTYKA, Vol. 16, No. 2

Beyen K., Dalgacık Spektrumlarının Yapı Sağlığı Durum Değerlendirme Çalışmalarında Önemi, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (3. TDMSK), İzmir, Türkiye, 14-16 Ekim 2015a.

Beyen K., Hasar Tanılama Analizlerinde Frekans-Zaman Çözümlemesi, 5. Uluslararası Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 2015b.

Beyen K., Hasar Tanılama Çalışmalarında Sinyal Analizi, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (3. TDMSK), İzmir, Türkiye, 14-16 Ekim 2015c.

Ghazi R. M. and Büyüköztürk O., Damage detection with small data set using energy-based nonlinear features, Struct. Control Health Monit. (2015), DOI: 10.1002/stc.

Jha R., Xu, S., and Ahmadi, G., "Health Monitoring of a Multi-Level Structure Based on Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis", Fifth International Workshop on Structural Health Monitoring (Editor: Fu-Kuo Chang), September 12–14, 2005, Stanford University, CA

Li J., Hao H., Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements, Mechanical Systems and Signal Processing 60-61 (2015) 124-150.

Lin S., Yang, J., and Zhou, L., "Damage identification of a benchmark building for structural health monitoring", Smart Materials and Structures 14, 2005, pp. 162- 169.

Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu, Damage Identification and Performance Assessment of Regular and Irregular Buildings Using Wavelet Transform Energy, Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering Volume 2016, Article ID 6027812, 11 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2016/6027812

Peng Z.K., Tse P.W., Chu F.L., A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: application to fault diagnosis for rolling bearing, Mech. Syst. Signal Process. 19 (2005) 974–988.

Wang H., and M. Noori and J. Zhang, A Wavelet-energy based damage identification method for steel bridges, Conference Paper, June 2016, DOI:10.1680/tfitsi.61279.429

Xu B., Wu Z., Yokoyama K., Harada T. and Chen G., A soft post-earthquake damage identification methodology using vibration time series, Smart Materials and Structures, DOI: 10.1088/er.964.

Yu D., Cheng J., and Yang Y., "Application of EMD method and Hilbert spectrum to the fault diagnosis of roller bearings", Mechanical Systems and Signal Processing 19, 2005, pp. 259-270.

Zhang R.R.C., S. Ma, E. Safak and S. Hartzell, Hilbert-Huang transform analysis of dynamic and earthquake motion recordings, Journal of Engineering Mechanics, 2003, ASCE.

Zhang R.R.C., King R., Olson L., Xu Y.L., Dynamic response of the Trinity River Bridge to controlled pile damage: modeling and experimental data and analysis comparing Fourier and Hilbert–Huang techniques, Journal of Sound and Vibration 285 (4–5) (2005) 1049–1070.