MODEL BİR YAPININ HASAR TANIMLAMASI VE MODEL-SARSICI ETKİLEŞİMİNİN AZALTILMASI İÇİN KULLANILAN OFFLİNE İTERASYON TEKNİĞİ

Ö. Özçelik[1], İ.S. Mısır[2] ve U. Yücel[3]

[1] *Yardımcı Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir*
[2] *Uzman Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir*
[3] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir*
Email: ozgur.ozcelik@deu.edu.tr; oozcelik4all@gmail.com

ÖZET:

Bu çalışmada elektro-dinamik bir sarsıcı üzerine yerleştirilmiş, alüminyum malzemesinden yapılmış üç katlı bir model yapının zemin kat rijitliği azaltılarak modele kontrollü olarak hasar verilecektir. Kat rijitliklerinin azaltılması, kata yerleştirilen diyagonallerin takılıp-sökülmesi ile gerçekleştirilecektir. Yapı modelinin modal parametreleri hasar verilmeden önce ve sonra EFDD ve SSI-COV operasyonel modal analiz teknikleri ile tahmin edilecektir. Tahmin edilen modal parametreler kullanılarak mod şekillerindeki değişimi kullanan hasar indeksi yöntemi ile katlarda meydana gelen hasarın yeri ve miktarı tahmin edilecektir. Çalışmanın bir başka yönü yapı modelini geniş bantlı girdi ile tahrik etmek amacıyla kullanılan sarsıcı ile model arasındaki etkileşimin modal parametrelerin tahminine etkisinin araştırılmasıdır. Etkileşimin azaltılması için kullanılan offline iterasyon kontrol tekniğinin etkinliği ve modal parametrelerin tahminini ne şekilde değiştirdiği incelenecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Sistem tanımlama, hasar tespit, model yapı, sarsma tablası, offline tuning.

1. GİRİŞ

Kuvvetli bir deprem, fırtına ya da benzeri doğal felaketlere veya şiddetli bir çarpışma, patlama gibi insan-kaynaklı hasar veren etkilere maruz yapıların hasar durumlarının güvenilir bir şekilde tespiti kritik bir önem taşımaktadır. Hasar, bir sistemin yapısal performansını etkileyen değişimler olarak tanımlanabilir. Titreşim tabanlı yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) yöntemlerinin temelinde hasarın yapının rijitlik, kütle veya enerji yutma özelliklerini değiştirdiği ve bunun da yapının ölçülebilen dinamik tepkisinde değişikliklere yol açtığı gerçeği yatmaktadır (Farrar and Lieven, 2007). Bu durumda yapıdan toplanan global titreşim verisi kullanılarak hasara hassas dinamik parametrelerin tahmini gerekmektedir. Dinamik parametrelerin titreşim tabanlı yöntemler ile tahmini son birkaç on yıl içerisinde artan bir ilgi görmektedir. Yapı sağlığının izlenmesi süreci, bir yapının sensörler kullanılarak sürekli ve/veya farklı zamanlarda izlenmesi, hasara hassas özelliklerin çıkarılarak yapının o andaki durumunun tespitini içermektedir. YSİ mevcut yapıların değerlendirilmesi, hasar tespiti, model kalibrasyonu, yapıların güçlendirme öncesi ve sonrası durumlarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilen önemli bir araç haline gelmiştir. Yapı sağlığının izlenmesi işlemlerinde kullanılan sistem tanımlama yöntemlerini girdi-çıktı ve sadece çıktı yöntemleri diye ikiye ayırmak mümkündür (Moaveni, 2007). İnşaat mühendisliği yapıları büyük ölçekli yapılar olduğundan, bu yapıları doğru bir şekilde ölçülebilen kuvvetler ile tahrik etmek pratik olmamaktadır. Bu durumda mikro tremor, trafik, rüzgâr, yapının normal kullanım durumundan doğan titreşimler gibi ortamsal titreşim etkilerini kullanmak tek yol olmaktadır. Bu nedenle, inşaat mühendisliği yapılarının modal parametrelerinin tahmininde sadece-çıktı yöntemleri de denilen operasyonel modal analiz yöntemlerini kullanmak daha uygun olmaktadır. Operasyonel modal analiz yöntemlerinde en sık karşılaşılan problemlerden biri ise ortamsal girdi sinyalinin geniş-spektrumlu olma zorunluluğunun ihlalidir

(Peeters and De Roeck, 2001). Geniş spektrumlu tahrik girdisi ortamsal titreşim ile gerçekleştirilebileceği gibi sarsma tablaları ve/veya farklı çalışma prensiplerine sahip sarsıcılar (eksantrik kütle, veya elektro-dinamik sarsıcılar vb.) kullanılarak da verilebilir. Bu durumda sarsıcı-numune etkileşimi probleminden dolayı girdi (tahrik) geniş spektrumlu olma özelliğini yitirmektedir. Bu da hem sistem hem de hasar tanımlama sonuçlarını etkilemektedir (Luco et al., 2010).

Hasar tanımlama yöntemleri gelişmişlik sırasıyla dört farklı seviyeye ayrılabilir. Bunlar (i) hasarın varlığını tespit eden yöntemler, (ii) hasarın yerini bulan yöntemler, (iii) hasarın miktarını bulan yöntemler ve (iv) hasar gören yapının kalan ömrünü (prognosis) tespit eden yöntemler. Birinci seviye yöntemler sadece hasarın varlığını tespit ederler, hasarın yeri ve miktarı bu yöntemler tarafından tespit edilemez. Hasarın yeri ikinci seviye yöntemler tarafından tespit edilebilir. Üçüncü seviye yöntemler hasarın hem yerini hem de miktarını tespit edebilmektedir. En son seviye olan dördüncü seviye yöntemler ise hasar gören yapının kalan ömrünü de tespit edebilmektedir (Park, 1997). Farklı gelişmişliklerde birçok hasar tespit yöntemi mevcuttur. Bu metinde yöntemler sadece isimleri ile anılmıştır. İlgili okuyucular gerekli ilk referanslara yönlendirilmişlerdir. Literatürde Bayes analizine, kontrol teorisine, hasar indeksine, modal şekil değiştirme enerjisine, sonlu elemanlar modeli güncellemesine dayalı hasar tanımlama yöntemleri bulunmaktadır (Sohn and Law, 1997; Chase et al., 2005; Stubbs et al., 1992; Shi and Law, 1998; Mottershead and Friswell, 1993). Literatürde yöntemler ile ilgili çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bu çalışmada ise hasar tespiti için ilk kez Stubbs vd. (1992) tarafından geliştirilen ve sonrasında birçok makalede güncellenen hasar indeksi yöntemi kullanılmıştır. Hasar indeksi yöntemi üçüncü seviye yöntemler kategorisine girmektedir ve yöntem ile ilgili ayrıntılar ileriki bölümlerde verilmiştir (Park et al., 2006).

Çalışmada elektro-dinamik bir sarsıcı tarafından oluşturulan geniş spektrumlu girdi sinyali ile tahrik edilen üç katlı model yapının birinci katına takılıp çıkarılabilen diyagonal çubuğun modal parametrelere etkisi sadece-çıktı sistem tanımlama yöntemleri olan EFDD ve SSI yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Daha sonra bu modal parametreler hasar indeksi yönteminde kullanılarak diyagonal çubuğun çıkarılması durumuna karşılık gelen hasar durumunun varlığı ve yeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu işleme paralel olarak numune-sarsıcı etkileşiminin sistem ve hasar tanımlama sonuçlarına etkileri araştırılmıştır. Numune-sarsıcı etkileşimi yörünge takip kontrol yöntemi olan offline iterasyon tekniği ile azaltılmaya çalışılmış ve offline iterasyon yapılmadan önce ve sonra elde edilen modal parametrelerde ve bu modal parametreler kullanılarak gerçekleştirilen hasar tanımlama sonuçlarında gerçekleşen değişimler incelenmiştir.

2. SADECE-ÇIKTI SİSTEM TANIMLAMA YÖNTEMLERİ

Bu bölümde çalışmada kullanılan ve geniş spektrumlu tahrik fonksiyonuna ihtiyaç duyan iki farklı sadece-çıktı sistem tanımlama yöntemine ilişkin kısa bir giriş sunulmaktadır.

2.1. Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)

EFDD yöntemi klasik frekans tanım alanı yöntemi olan "tepe seçme" (peak picking) yönteminin geliştirilmiş hali olarak bilinir. Klasik yöntemin birbirine yakın modların ayrıştırılması, frekansların tespitindeki çözünürlük etkisi ve sönüm oranlarının bulunması noktalarında eksiklikleri vardır (Farrar and James, 1997).

EFDD yönteminde ise çıktı verileri kullanılarak hesaplanan güç spektral yoğunluk matrisi (kesikli frekans değerlerinde) tekil değer dekompozisyonu (SVD) ile ayrıştırılmaktadır. Tahrik fonksiyonunun geniş bantlı, modların ortogonal ve dinamik sistemin düşük sönümlü olması durumunda SVD ile bulunan her bir oto-spektral yoğunluk fonksiyonu dinamik sistemin tek bir titreşim moduna karşılık gelmektedir. Mod şekilleri tekil vektörler kullanılarak bulunabilmektedir. Bahsi geçen şartların sağlanamaması durumunda ise sonuçlar yine de yeterli düzeyde doğru olmaktadır. EFDD'de doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları ters Fourier dönüşümü ile

zaman tanım alanına dönüştürülen tek serbestlik dereceli sistemlerin güç spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılarak elde edilmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonlarında oluşan spektral matris ise Welch-Bartlett yöntemi kullanılarak bulunabilmektedir (Bendat and Piersol, 1993). EFDD yöntemi ARTEMIS® operasyonel modal analiz paket programı içinde mevcuttur ve bu çalışmada kullanılmıştır.

2.2. Stochastic Subspace Identification Method (SSI)

Kovaryans Güdümlü SSI yöntemi 1970'lerde geliştirilen (Akaike, 1974) deterministik realizasyon teorisi ile yakından ilişkili olan stokastik realizasyon teorisine bağlı olarak geliştirilmiştir. Stokastik realizasyon teorisi, modal parametrelerin tahmininde kullanılan bir deterministik realizasyon yöntemi olan Eigensystem Realization Algoritması (ERA) gibi impuls tepki fonksiyonu (IRF) kullanmak yerine sadece-çıktı verisi kullanılarak bulunan kovaryans matrisini kullanmaktadır. Burada stokastik sürecin sıfır ortalamaya (merkezi değer) sahip istasyoner ve ergodik bir sinyal olduğu kabulü yapılmaktadır. Kovaryans değerleri/matrisi ergodik kabulü yapılan ölçüm verisinden elde edildikten sonra Toeplitz matrisleri kurulur. Blok Toeplitz matrislerinin dekompozisyonundan durum-uzay formunda (state-space form) sistem matrisleri elde edilir. Sistem matrisleri yardımıyla modal parametreler hesaplanır (Van Overschee and de Moor, 1996; Peeters and de Roeck, 2001; Zhang, 2005). SSI-COV yöntemi ARTEMIS® operasyonel modal analiz paket programı içinde mevcuttur ve bu çalışmada kullanılmıştır.

3. HASAR TESPİT YÖNTEMİ

Mevcut yapılardaki hasar tespiti konusu üzerinde son yıllarda birçok önemli çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yapı üzerinde herhangi bir tahribata neden olmayan (non-destructive) ve mevcut (hasarlı) yapı ile hasarsız yapı modal parametrelerindeki değişimleri kullanan hasar tespit yöntemleri geliştirilmiştir. Çalışmalarda "Hasar İndeksi Yöntemi" olarak da bilinen ve hasarın varlığı, yeri ve miktarını tespit edebilen üçüncü. seviye hasar tespit yöntemi kullanıldığından, metinde bu yönteme ayrıntılı olarak yer verilmiştir (Park et al., 2006).

3.1. Hasar İndeksi Yöntemi

Yöntem esas olarak elemanda meydana gelen hasarın eleman geometrisini değiştirmediği, sadece elastisite modülü üzerinde etkin olduğu kabulüne dayanır ve hasarlı ile hasarsız yapının mod şekillerindeki değişimleri kullanarak bir hasar indeksi hesaplar. Hasar indeksi formülasyonu *n* serbestlik derecesi olmak üzere aşağıda verilmiştir.

$$DI_{rj} = \frac{S_j}{S_j^*} = \left[\frac{(\boldsymbol{\varphi}_r^*)^T[\mathbf{K}_{j0}](\boldsymbol{\varphi}_r^*) + (\boldsymbol{\varphi}_r^*)^T[\mathbf{K}](\boldsymbol{\varphi}_r^*)}{(\boldsymbol{\varphi}_r)^T[\mathbf{K}_{j0}](\boldsymbol{\varphi}_r) + (\boldsymbol{\varphi}_r)^T[\mathbf{K}](\boldsymbol{\varphi}_r)} \right] \frac{(\boldsymbol{\varphi}_r)^T[\mathbf{K}](\boldsymbol{\varphi}_r)}{(\boldsymbol{\varphi}_r^*)^T[\mathbf{K}](\boldsymbol{\varphi}_r^*)} \qquad (1)$$

Bu denklemde *r*, *j* sırasıyla eleman ve mod numarasını, DI_{rj} hasar indeksini, S_j rijitlik parametresi, $\boldsymbol{\varphi}_r$ (*n x 1*) modal vektörü, $\mathbf{K}_{j0}$ (*n x n*) eleman rijitlik matrisinin sistem rijitlik matrisine olan katkısını, $\mathbf{K}$ (*n x n*) sistem rijitlik matrisini, '*' sembolü ise aynı parametrelerin hasarlı yapıdaki karşılıklarıdır.

Elde edilen hasar indeksi parametresi herhangi bir elemanın herhangi bir moduna karşılık gelen hasar durumu hakkında bilgi sağlar. Buna göre (i) $DI_{rj} \leq 1$ ise elemanda hasar yoktur, (ii) $DI_{rj} > 1$ ise eleman hasarlıdır, (iii) $DI_{rj} = \infty$ ise eleman rijitlik kapasitesini tamamen yitirmiştir denmektedir.

Denklem 1'e bakılacak olursa elemandaki hasar durumu, elemanın hasarsız rijitlik değerinin hasarlı rijitlik değerine oranı şeklinde ifade edilebilir. Buradan hareketle hasar miktarı parametresi elde edilebilir.

$$\alpha_{ij} = \frac{S_{ij}^{*} - S_{ij}}{S_{ij}} = \frac{1}{DI_{ij}} - 1 \tag{2}$$

Denklemde $a_{ij} = 0$ ise elemanda hasar yoktur, $a_{ij} < 0$ ise elemanda hasar mevcuttur, $a_{ij} = -1$ ise elemanda rijitlik kapasitesi tamamen yitirilmiştir. a_{ij} parametresinin -1 değerine yaklaşması, hasar miktarının arttığını göstermektedir.

4. OFFLİNE İTERASYON TEKNİĞİ

Sarsma tablası deneyleri, fiziksel modellerin doğal titreşim frekansları, mod şekilleri, sönüm oranları gibi lineer davranışlarına karşılık gelen modal parametreleri ile bu modellerin gerçekçi yer hareketleri altında (tarihsel ve/veya sentetik ivme kayıtları) oluşan atalet kuvvetlerine vermiş olduğu tepkilerin incelenmesi amacı ile kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Modal parametreler, NExT-ERA, EFDD ve SSI-COV gibi operasyonel modal analiz (sistem tanımlama) teknikleri kullanılarak tahmin edilebilir.

Küçük veya büyük sarsma tablası deneylerinde karşılaşılan en temel problemlerden biri yörünge takip problemidir (trajectory tracking). Yörünge takip işlemi, sarsma tablasının kendisine gönderilen sinyali takip edebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Problemin nedeni olarak sarsma tablasını oluşturan bileşenlerin karmaşıklığı, bu bileşenlerin birbiriyle olan etkileşimi ve numune-tabla etkileşimi örnek gösterilebilir. Yörünge takibi için PID tabanlı yer değiştirme kontrolü, adaptif kontrol, PID + feedforward etkili ve offline iterasyon tabanlı yöntemler kullanılmaktadır (Luco et al., 2010). Offline iterasyon tekniği "yörünge takip kontrol tekniği" olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmalarda offline iterasyon tekniğinin geniş bantlı beyaz gürültü (white noise) türünde rastgele sinyallerin takibinde gösterdiği performans araştırılmıştır.

Offline iterasyon tekniğinde ilk olarak sarsıcıya gönderilen girdi (input) sinyali ile sarsıcının dinamik özelliklerinin tersini yansıtan geri-transfer fonksiyonu (inverse transfer function) frekans tanım alanında çarpılarak yeni bir sinyal elde edilir. Elde edilen sinyal zaman tanım alanına dönüştürülerek değiştirilmiş input sinyali elde edilir (Twitchell and Symans, 2003). Değiştirilmiş input sinyali sarsıcıya gönderildiğinde sarsıcının ileri transfer fonksiyonu (forward transfer function) üzerinden geçerek input sinyali oluşumunu olumsuz yönde etkileyen ve ileri transfer fonksiyonu ile karakterize edilen dinamik özelliklerin kompanse edilmesi mümkün olmaktadır. Deneysel yolla tabla transfer fonksiyonun elde edilmesi için Welch yöntemi kullanılmıştır.

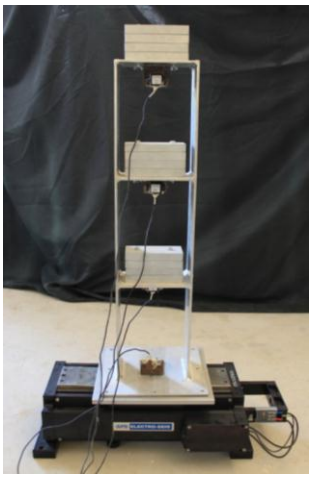
$$\hat{H}(j\omega) = \frac{P_{yx}(j\omega)}{P_{xx}(j\omega)} \tag{3}$$

Burada $j\omega = s$, $P_{yx}(j\omega)$ ve $P_{xx}(j\omega)$ ise sırasıyla Welch yöntemi ile hesaplanan auto- ve cross-spektral yoğunluk fonksiyonlarıdır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar

Deneylerde frekans bant aralığı 0-200 Hz olan, maksimum deplasman (peak to peak), hız ve kuvvet değerleri, sırasıyla 158 mm, 1000 mm/s ve 133 N, numune kütle kapasitesi sırasıyla yatay ve düşey eksenlerde olmak üzere, 23 kg ve 11 kg, numunenin bağlandığı tabla boyutları sırasıyla 254 mm x 254 mm olan tek eksenli (yatay veya düşey eksenlerde konfigüre edilebilen) tezgah üstü elektro-dinamik sarsıcı ve tabla üzerinde test edilmek üzere tasarlanan kat yüksekliği 25 cm, plan boyutları 15 cm x 10 cm, levha et kalınlığı 0.6 cm, çerçeve kütlesi 2.8 kg, katlardaki 4 kg'lık ek kütle birlikte toplam kütlesi 14.8 kg olan üç katlı tek açıklıklı alüminyum (E=70 GPa) çerçeve modeli kullanılmıştır. Kullanılan sarsma tablası ve üzerindeki model Şekil 1'de gösterilmiştir.

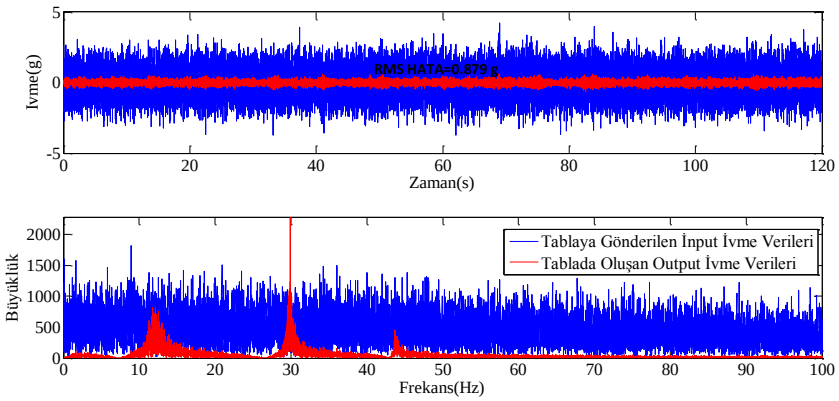


Şekil 1. Deneylerde kullanılan sarsma tablası ve üç katlı model.

Çalışmada ayrıca model çerçevenin dinamik tepkisini ölçmek üzere kat hizalarına yerleştirilmiş tek eksenli, ±4 g ölçüm aralığına sahip, 0-100 Hz frekans bant aralığında çalışabilen hafif kapasitif türde ivmeölçerler, sarsma tablası ve ivmeölçerlerin bağlandığı 68 pin soketli veri toplama kutusu, analog sinyalleri dijital, sarsma tablasına gönderilmek üzere oluşturulan dijital sinyalleri ise analog sinyallere dönüştüren 16 kanallı 24 bit çözünürlüğe sahip veri toplama kartı ve NI LabVIEW 2012 yazılımı kullanılmıştır.

5.2. Üzerinde Numune Bulunan Sarsma Tablası Deneylerinde Offline İterasyon Tekniği

Bu kapsamda sarsma tablasının üzerine kat seviyelerinde ivmeölçerler bulunan numune yerleştirilmiş ve numune tabanından tablaya bağlanmıştır. Numunenin tabanına da ivmeölçer yerleştirilerek sarsıcıya gönderilen ve numunenin tüm modlarını uyarabileceği ön görülen 0.1 - 100 Hz frekans bant aralığında ve 1.0 g RMS şiddetinde 120 saniye süreli beyaz gürültü sinyali kullanılmıştır. Sarsma tablasına gönderilen girdi (input) ivme verileri ile tabla üzerinde oluşan çıktı (output) ivme verilerinin zaman ve frekans tanım alanlarındaki görünümleri Şekil 2'de verilmiştir.

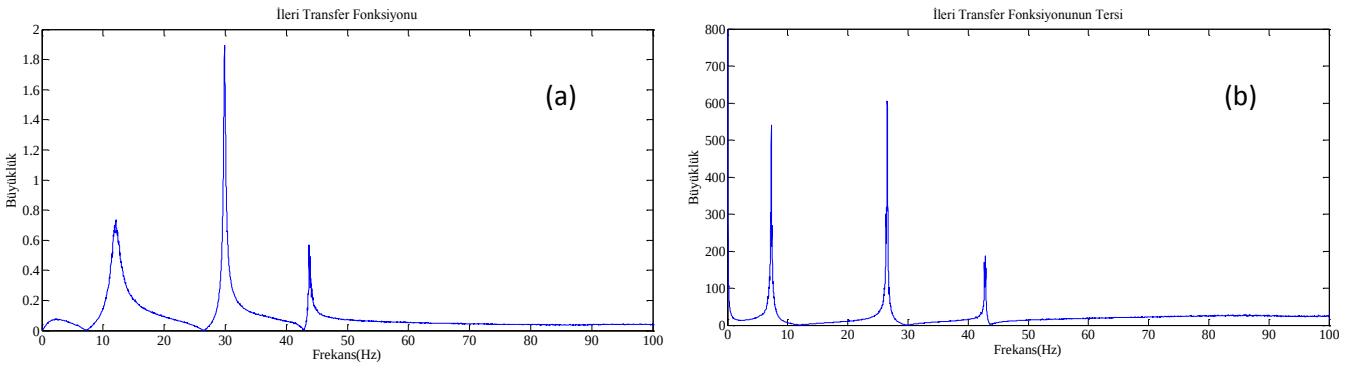


Şekil 2. Sarsma tablasına gönderilen input sinyali ile tablada oluşan sinyalinin (a) zaman tanım alanında (b) frekans tanım alanında görüntüsü (RMS Hata = 0.879g).

Şekil 2'de görüldüğü üzere sarsma tablasına gönderilen girdi sinyali ile tabla üzerinde oluşan çıktı sinyali birbiriyle örtüşmemektedir. Kısacası yörünge kontrol/takip problemi mevcuttur. Girdi ve çıktı sinyalleri arasında oluşan hata, hata sinyalinin $(X_{input} - X_{output})$ RMS değeri hesaplanarak (denklem 4) değeri 0.879 g olarak belirlenmiştir.

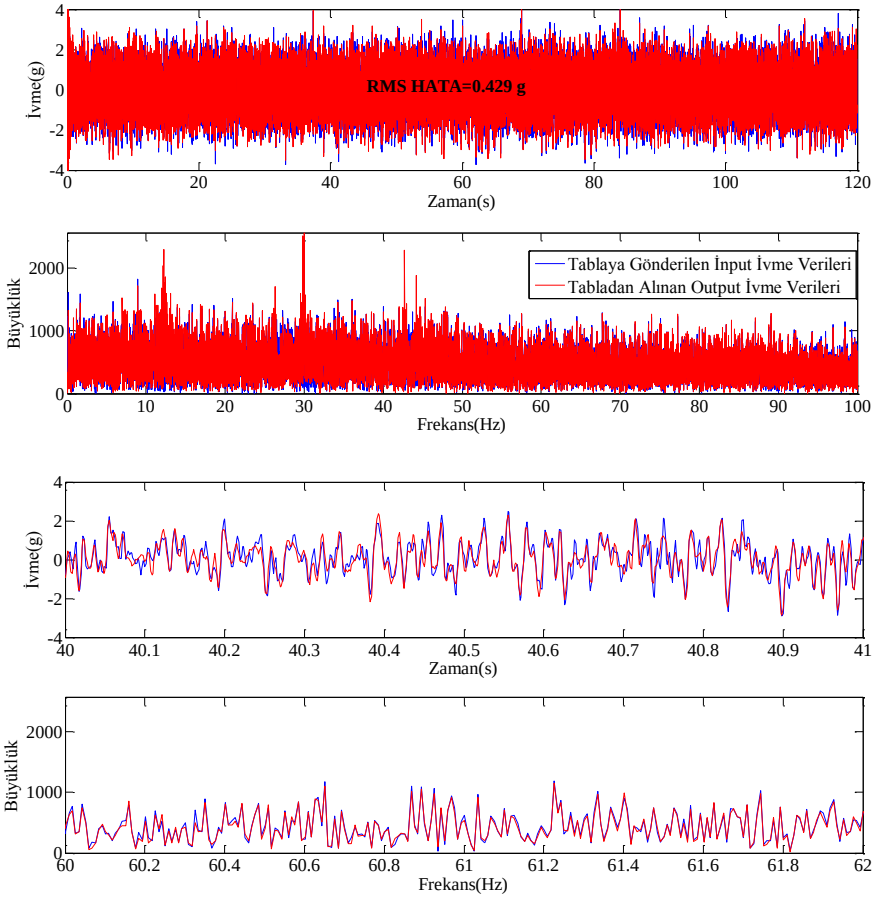
$$error_{RMS} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(x_{inp} - x_{out} \right)^2}{N} \right]^{1/2} \tag{4}$$

Hata ifadesinin sıfır değerine yakınlığı, karşılaştırılan iki sinyalin birbirlerine olan benzerliğini temsil etmektedir. Girdi ve çıktı sinyallerinin frekans tanım alanındaki karşılaştırmasında ise yaklaşık 12 Hz, 26 Hz ve 42 Hz civarlarında görülen tepeler numune-tabla etkileşiminin bir göstergesidir. Sarsma tablasının transfer fonksiyonlarına bakılarak da bu etkileşim görülebilir (Şekil 3a). İleri transfer fonksiyonunda yer alan tepe değerler numune tabla etkileşiminden kaynaklı oluşurken; bu fonksiyonun tersinde yer alan tepe değerler (Şekil 3b) ise (ileri transfer fonksiyonunda çukurlar) üç katlı numunenin doğal titreşim frekanslarına karşılık gelmektedir. Dikkat edilirse etkileşimden kaynaklı geniş spektrumlu beyaz gürültü sinyali (girdi) geniş spektrumlu olma özelliğini yitirmiştir.



Şekil 3. Sarsma tablasının (a) ileri transfer fonksiyonu (b) ileri transfer fonksiyonunun tersi.

Yörünge takip probleminin çözümü için offline iterasyon tekniği kullanılmış ve tekniğin ardından elde edilen sonuçlar Şekil 4'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere tekniğin ardından girdi ve çıktı sinyalleri hem genlik hem de frekans içeriği açısından birbirine çok daha yakın durumdadır. Offline iterasyon yapıldıktan sonra hesaplanan RMS hata değeri de (0.429g) bunu göstermektedir.



Şekil 4. Offline iterasyon tekniğinin ardından sarsma tablasına gönderilen girdi sinyali ile tablada çıktı oluşan sinyalinin (a) zaman tanım alanında, (b) frekans tanım alanında karşılaştırması ile (c) karşılaştırılan sinyalin detayı (RMS Hata = 0.429g).

5.2.1. Offline İterasyon Tekniğinin Modal Parametre Tahminine Etkisi

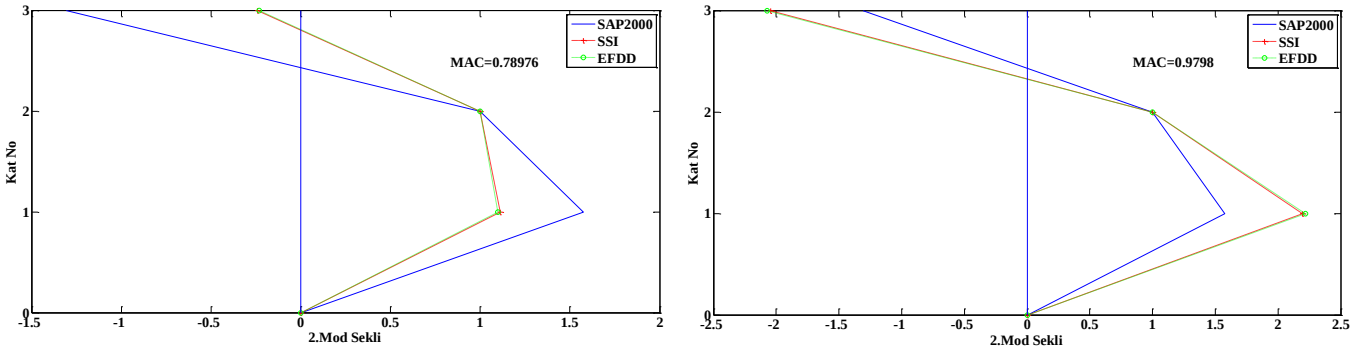
Offline İterasyon tekniği tabla üzerine yerleştirilen modellerin geniş spektrumlu sinyal ile tahrik edilmesini sağlamaktadır. Bu durumun modal parametrelerin tahmini üzerindeki etkisini incelemek amacı ile deneyler yapılmıştır. Üzerinde numune bulunan sarsma tablasına 0.1-100 Hz frekans bant aralığında ve 1.0 g RMS şiddetinde 120 saniye süreli beyaz gürültü sinyali gönderilmiş ve modelin kat tepkileri (ivme) hem teknik uygulanmadan önce hem de teknik uygulandıktan sonra olmak üzere kaydedilmiştir. Elde edilen kat tepkileri SSI ve EFDD operasyonel modal analiz teknikleri ile analiz edilerek numunenin modal parametreleri bulunmuştur. Tablo 1'de numunenin farklı yöntemlerle elde edilmiş modal parametreleri ile mod şekillerinin kıyaslaması için kullanılan Modal Assurance Criterion (MAC) değerleri verilmiştir (Allemang and Brown, 1992). Tabloda yer alan MAC değerleri SAP2000® programı ile bulunan mod şekilleri ile diğer yöntemlerden (SSI, EFDD) bulunan mod şekilleri arasında hesaplanmıştır. Burada model görece basit bir model olduğu için SAP modelinden elde edilen modal parametreler nominal değerler olarak kabul edilmiştir. MAC değerlerinin hesaplanması için kullanılan formül Denklem 5'de verilmiş olup, MAC'ın birim değere yakın olması mod şekillerinin birbirine benzer olduğunu göstermektedir.

$$MAC(\varphi_{SAP},\varphi_{EFDD,SSI}) = \frac{(\varphi_{SAP}^{T}\hat{\varphi}_{EFDD,SSI})^{2}}{(\varphi_{SAP}^{T}\varphi_{SAP})(\hat{\varphi}_{EFDD,SSI}^{T}\hat{\varphi}_{EFDD,SSI})} \quad (5)$$

Tablo 1. Offline iterasyon tekniğinin modal parametreler üzerindeki etkisi.

Yöntem	Offline İterasyon		1. Mod	2. Mod	3. Mod	MAC		
						1. Mod	2. Mod	3. Mod
SAP2000	-	Frekans (Hz)	8.004	24.907	41.075	-	-	-
		Sönüm (%)	-	-	-	-	-	-
SSI	***YOK***	Frekans (Hz)	11.92	29.98	43.80	0.9962	0.7898	0.9245
		Sönüm (%)	6.02	0.56	0.44			
SSI	***VAR***	Frekans (Hz)	7.19	26.66	42.79	0.9999	0.9798	0.9760
		Sönüm (%)	1.22	0.23	0.25			
EFDD	***YOK***	Frekans (Hz)	11.85	29.96	43.76	0.9948	0.7841	0.9142
		Sönüm (%)	5.92	0.64	0.66			
EFDD	***VAR***	Frekans (Hz)	7.20	26.66	42.77	0.9999	0.9786	0.9746
		Sönüm (%)	1.47	0.25	0.23			

Tablo 1 'den de görüldüğü üzere offline iterasyon durumunun modal parametrelerin tahmini üzerinde ciddi bir etkisi bulunmaktadır. Numune üzerinde yapılan darbe çekici ve numunenin üçüncü kattan çekilip bırakılması sureti ile gerçekleştirilen serbest titreşim deneylerinden elde edilen kat ivmelerinin analizi sonucu bulunan modal parametrelerin offline iterasyonlu durumdaki modal parametre değerleri ile uyumlu olması bu duruma karşılık gelen değerlerin doğruluğunu desteklemektedir. Şekil 5'te teknik uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra bulunan 2. mod şekilleri gösterilmektedir. Burada 2. mod şeklinin verilmesindeki temel amaç, MAC değerlerindeki en büyük değişimin bu mod değerinde görülmesidir.



Şekil 5. Numunenin ikinci moduna ait offline iterasyon tekniği (a) uygulanmadan ve (b) uygulandıktan sonra bulunan mod şekli.

5.3. Hasar Tespiti

Numune üzerinde hasar tespiti ve modal parametre tahmininin dolayısıyla offline iterasyon tekniğinin (geniş bantlı girdi sinyalinin tabla üzerinde oluşturulması durumunun) hasar tespiti üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, hasarsız numune durumunu temsil etmek üzere numunenin birinci katına karşılıklı olacak şekilde iki adet diyagonal yerleştirilmiştir. Diyagonal 23.5 cm uzunluğunda en kesit alanı 0.283 cm^2 ve elastisite modülü 7

GPa olan bir malzemeden yapılmış olup, yatayla 57 derecelik bir açı yapacak şekilde, Şekil 1'de gösterilen modelin birinci katına yerleştirilmiştir. Bu duruma karşılık gelen modelin ilk üç moduna ait titreşim frekansları sırasıyla 8.55 Hz, 36.01 Hz ve 58.56 Hz'dür. Dikkat edilirse model oldukça rijit bir hale gelmiştir. Mod şekilleri ise yer sıkıntısı nedeniyle burada verilmemiştir ancak diyagonalsiz duruma göre farklıdır. Hasarlı numune durumu ise diyagonallerin sökülmesi ile elde edilmiştir (bu duruma karşılık gelen modal parametreler bir önceki bölümde verilmiştir). Hasar tespitinde SSI yöntemi ile hesaplanan modal parametreler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2 'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Numunede hasar tespiti ve offline iterasyon tekniğinin etkisi.

		D_{ij}			α_{ij}		
		1.Mod	**2.Mod**	**3.Mod**	**1.Mod**	**2.Mod**	**3.Mod**
Offline İterasyon YOK	**1.Kat**	***1.402***	***1.772***	0.863	***-0.287***	***-0.436***	0.159
	2.Kat	0.834	0.791	1.081	0.199	0.264	-0.075
	3.Kat	0.838	0.693	***1.149***	0.193	0.443	***-0.129***
Offline İterasyon VAR	**1.Kat**	***1.459***	***1.517***	0.755	***-0.315***	***-0.341***	0.324
	2.Kat	0.789	0.954	***1.176***	0.268	0.048	***-0.149***
	3.Kat	0.826	0.701	***1.229***	0.210	0.427	***-0.187***

Tablodaki verilerden de anlaşıldığı üzere yöntem hasarlı katı (1. kat) belirleyebilmiştir. Elde edilen değerlerin incelenmesi ile birinci kat parametrelerinin 1'den büyük olduğu dolayısıyla hasarın bu katta gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, üçüncü modun üçüncü kat değerleri de 1'den büyük bulunmuştur. Yapılan simülasyon çalışmalarında sonuçların sensör sayısına oldukça hassas olduğunu, sensör sayısı arttıkça daha kesin sonuçların elde edildiği bulunmuştur. Deneysel çalışmada üç sensör kullanıldığı için üçüncü modun üçüncü katındaki hasarın bu nedenle oluştuğu düşünülmektedir. Ancak en büyük değişikliğin birinci katta oluştuğu sonuçlarda net olarak görülmektedir. Benzer yorumları α_{ij} parametresini inceleyerek de yapmak mümkündür. Ancak bu parametredeki değişimler rijitlik değerlerindeki mutlak değişimler olarak algılanmamalıdır. Offline iterasyon tekniğinin hasar parametrelerini etkilediği; ancak hasarın yerini bulma konusunda bir değişikliğe yol açmadığı gözlenmiştir.

6. SONUÇLAR

Çalışmada üç katlı model yapının birinci katına takılıp çıkarılabilen diyagonal çubuğun modal parametrelere etkisi sadece-çıktı sistem tanımlama yöntemleri olan EFDD ve SSI yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Daha sonra hasar indeksi yöntemi kullanılarak diyagonal çubuğun çıkarılması durumuna karşılık gelen hasar durumunun varlığı ve yeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Tüm bunlara paralel olarak numune-sarsıcı etkileşiminin sistem ve hasar tanımlama sonuçlarına etkileri araştırılmıştır. Numune-sarsıcı etkileşimi yörünge takip kontrol yöntemi olan offline iterasyon tekniği ile azaltılmaya çalışılmış, bu durumun modal parametrelerin tahminine etkisi ve bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilen hasar tanımlama sonuçlarında gerçekleşen değişimler incelenmiştir.

Yörünge takip problemi için kullanılan offline iterasyon tekniğinin geniş spektrumlu sinyallerin tabla üzerinde oluşturulması açısından etkinliği ortaya konmuştur. Girdi-çıktı takibi açısından offline iterasyon tekniğinin RMS hata değerlerini azalttığı net bir şekilde gösterilmiştir. Bu durumun sadece-çıktı yöntemleri ile yapılan modal parametre tahminini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Offline iterasyon yapılmadan tahmin edilen parametrelerin, özellikle doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları, hatalı olduğu bulunmuştur. Modelin birinci katına yerleştirilen diyagonal elemanların çıkarılması ile modelin zemin kat rijitliği azaltılarak hasarlı duruma karşılık gelen model "Hasar İndeksi Yöntemi" ile incelenerek hasar ve hasarın yeri tespit edilmiştir.

Offline iterasyon tekniği "Hasar İndeksi Yöntemi" sonuçlarını etkilemektedir; ancak bu etki hasarın yerini değiştirecek boyutlarda değildir.

TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmalar DEÜ BAP 2011.KB.FEN.020 ile TÜBİTAK 112M203 no'lu projelerden elde edilen destekler ile yürütülmektedir.

KAYNAKLAR

Akaike, H. (1974). Stochastic theory of minimal realization. *IEEE Trans. Automatic Control* **19:6,** 667-664.

Allemang, R.J., Brown, D.L. (1993). A correlation coefficient for modal vector analysis. *Proc. of First International Modal Analysis Conference, Society of Experimental Mechanics*, Bethel, Conn., p. 110-116.

Bendat, J.S., Piersol, A.G. (1993). Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis (2), John Wiley&Sons, USA.

Chase, J. G., Hwang, K. L., Barroso, L. R., and Mander, J. B. (2005). A simple LMS-based approach to the structural health monitoring benchmark problem. *Earthquake Engng Struct. Dyn*. **34:6,** 575-594.

Farrar, C.R., James, G.H. III. (1997). System identification from ambient vibration measurements on a bridge. *Journal of Sound and Vibration* **205:1,** 1-18.

Farrar, C.R., Lieven, N.A.J. (2007). Damage prognosis: the future of structural health monitoring. *Phil. Trans. R. Soc. A* **365,** 623–632.

Luco, E.J., Ozcelik, O., Conte, J.P. (2010). Acceleration tracking performance of the UCSD-NEES Shake Table. *Journal of Structural Engineering, ASCE* **136:5,** 481-490.

Moaveni, B. (2007). System identification of civil structures. Ph.D. Dissertation, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, CA.

Mottershead, J. E., and Friswell M. I. (1993). Model updating in structural dynamics: A Survey. *Journal of Sound and Vibration* **167:2,** 347-375.

Park, S. (1997). Development Of a Methodology to Continuously Monitor The Safety Of Complex Structures. Ph.D. Thesis, Texas A&M Univ., College Station, Tex.

Park, S., Bolton, R.W., Stubbs, N. (2006). Blind test results for nondestructive damage detection in a steel frame. *Journal of Structural Engineering* **132:5**, 800-809.

Peeters, B., and De Roeck, G. (2001). Stochastic system identification for operational modal analysis: A review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* **123:4,** 659-667.

Shi, Z. Y. and Law, S. S. (1998). Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of Sound and Vibration* **218:5,** 825-844.

Sohn, H., and Law, K. H. (1997). A Bayesian probabilistic approach for structure damage detection. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* **26,** 1259-1281.

Stubbs, N., Kim, J. T. (2002). Improved damage identification method based on modal information. *Journal of Sound and Vibration* **252:2,** 223-238.

Stubbs, N., Kim, J. T., and Tople, K. (1992). An efficient and robust algorithm for damage localization in offshore platforms. *Proc. of the ASCE Tenth Structures Congress* 543-546, San Antonio, Texas.

Stubbs, N., Park, S., Sikorsky, C., Choi, S. (2000). A global non-destructive damage assessment methodology for civil engineering structures. *International Journal of System Science* **31:11,** 1361-1373.

Van Overschee, P., and De Moor, B. (1996). Subspace Identification for Linear Systems: Theory-Implementation-Applications, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA.

Zhang, L., Wang, T., and Tamura, Y. (2005). Frequency-spatial domain decomposition technique with application to operatıonal modal analysis of civil engineering structures. *Proc. of the 1st Internatıonal Operatıonal Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.