



ISSN:1306-3111
e-Journal of New World Sciences Academy
2009, Volume: 4, Number: 3, Article Number: 1A0034

ENGINEERING SCIENCES

Received: November 2008
Accepted: June 2009
Series : 1A
ISSN : 1308-7231
© 2009 www.newwsa.com

**Carmen Amaddeo, Özgür Özçelik
Serkan Mısır, Serap Kahraman**
University "Mediterranea" of Reggio Calabria
Dokuz Eylül University
ozgur.ozcelik@deu.edu.tr
Reggio Calabria-Italy

DEPREM VERİLERİNİN YAPILARIN DİNAMİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANIMI

ÖZET

Özellikle Northridge (1994) depremi sonrasında, çelik moment-çerçeve yapıların kolon-kiriş birleşimlerinde gözlenen gevrek kırılmalardan dolayı, bu tip yapıların deprem performansı artan bir ilgiyle araştırılmaktadır. Kaliforniya Güçlü Hareket İzleme Programı (CSMIP) farklı tipte yapıların deprem sırasındaki davranışlarını aletsel olarak elde etmeye yönelik olarak çalışmaktadır. Sunulan çalışmada bu program çerçevesinde ivmeölçerler ile donatılmış ticari bir çelik yapı incelenmiştir. Altı katlı, çelik moment çerçevesi (SMRF) yapının dinamik karakteristikleri girdi-çıkıtı sistem tanılama yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Söz konusu yapının çeşitli depremler altındaki davranışı CSMIP tarafından kaydedilerek kullanıma sunulmuştur. İncelenen yapının, sistem tanılama yöntemleriyle belirlenen dinamik özellikleri, farklı depremler için bulunan spektral analiz sonuçları ile karşılaştırılarak yöntemin performansı sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Girdi-Çıkıtı Sistem Tanı(m)lama Yöntemleri, Yapı Dinamiği, Yapıların Enstrümantasyonu, Çelik Yapılar, Kuvvetli Yer Hareketi

IDENTIFICATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF STRUCTURES USING EARTHQUAKE DATA

ABSTRACT

The seismic performance of steel moment-framed buildings has been of particular interest after the 1994 Northridge earthquake because brittle fractures were discovered at the beam-column connection. This paper examines the problem of identifying the dynamic characteristics of an instrumented building using an input-output system identification method. The building studied was a six-story steel moment-resisting frame (SMRF) instrumented by the California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP). The building was shaken by several earthquakes and strong motion data of the building response was recorded during these earthquakes and were made available through SMIP. The identified modal properties of the structure were compared and verified with the spectral analysis of the response of the structure excited by three different earthquakes.

Keywords: Input-output System Identification Methods, Structural Dynamics, Instrumentation of Structures, Steel Moment Resisting Frames, Strong Ground Motion

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaliforniya Güçlü Hareket Aletsel İzleme Programı (California Strong Motion Instrumentation Program, CSMIP) farklı özellikte yapılara yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla, yapıların deprem altındaki dinamik davranışlarını izlemektedir. Gözden geçirilmiş deprem verilerine CSMIP'nin internet sitesinden de ulaşmak mümkündür (www.strongmotioncenter.org). Veri taban modern çelik binaların deprem etkisi altında dinamik davranışının incelenmesi için önemli bir olanak sunmaktadır. CSMIP veri tabanından 18 binanın, büyüklüğü 5.9M_L olan Whittier Narrow depremi (Ekim, 1987) sırasında kaydedilmiş kuvvetli hareket kayıtlarına ulaşmak mümkündür [1]. Büyüklüğü 5.8M_L olan Sierra Madre depremi (Haziran, 1991) sırasında 46 mühendislik yapısının kuvvetli hareket kayıtları alınmıştır. Bu yapıların 38 adedi ticari ve konut türü binadır [2]. Büyüklüğü 6.4M_L olan Northridge depremi (Ocak, 1994) öncesinde aynı bölgede CSMIP tarafından kuvvetli yer hareketi altındaki davranış kaydı yapılan mühendislik yapısı, 57 adedi ticari ve konut türü bina olmak üzere 77 adede yükseltilmiştir [3]. Bu binalardan sadece dört tanesi çelik moment çerçevesidir (SMRF). Bu çalışmada sunulan yapı altı katlı, taşıyıcı sistemi çelik moment çerçeve olan ticari bir yapıdır (Şekil 1).

Burbank'ta banka olarak hizmet veren binada bulunan CGS- 24370 CSMIP numaralı istasyon üç depremi de kaydetmiş olup, kuvvetli hareket kayıtlarına internet ortamından erişmek mümkündür. Yapının gözlenmiş depremler altında dinamik tepkisi doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar analizi [4], yapısal ve yapısal olmayan sismik performansı [5], itme analizi [6], genetik algoritma (GA) tekniği kullanılarak yapının tanımlanması, Wavelet analiz tekniği kullanılarak hasar değerlendirilmesi [7] gibi farklı yöntemlerle incelenmiştir.



Şekil 1. Burbank'taki altı katlı, çelik taşıyıcılı bina
(Figure 1. Burbank six story moment-resisting steel frame)

Bu çalışmada ise veri korelasyonlu öz sistem realizasyon algoritması (Eigensystem Realization Algorithm with Data Correlation, ERA/DC) ve Gözlemci/Kalman Filtresi (Observer Kalman Filter, OKID) yöntemi kullanılmıştır. Yöntem bir girdi-çıkı (input-output) sistem tanımlama yöntemi olarak tanımlanabilir. Yöntemin kullanımında zemin seviyesinden alınmış deprem kaydı girdi sinyali olarak değerlendirilmekte, ölçüm yapılan binaların dinamik karakteristikleri



(modal parametreleri) belirlenmektedir. OKID-ERA/DC güçlü ve etkin bir yöntemdir [8].

Algoritma esas olarak, incelenen yapının zamandan bağımsız doğrusal bir sistem (Linear Time Invariant, LTI) olduğu kabulüne dayanır. Bu kabul yaygın kullanılan birçok sistem tanılama yönteminde de yapılmaktadır. İncelenen yapının ele alındığı çeşitli çalışmalar, Sierra Madre depremi sırasında yapının doğrusal bölgede kaldığını göstermiştir [4, 5, 6, 7]. Bu nedenle yapının durum-uzay modelinin belirlenmesinde bu deprem kaydı kullanılmıştır. Bu tahmini model ile yapının Whittier Narrow ve Northridge depremleri altındaki davranışı modellenmiş (simülasyon), OKID-ERA/DC ile elde edilen dinamik parametreler, spektral analiz ve GA yöntemi ile elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Binalara yerleştirilmiş olan güçlü hareket gözleyebilen algılayıcılar (ivmeölçerler ve kayıt araçları) yardımıyla elde edilen veriler, yapıların dinamik parametrelerinin (doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmesi için kullanılabilir. Binalara yerleştirilmiş olan güçlü hareket gözleyebilen algılayıcılar (ivmeölçerler ve kayıt araçları) yardımıyla elde edilen veriler, yapıların dinamik parametrelerinin (doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmesi için kullanılabilir.

Bu çalışmada OKID-ERA/DC girdi-çıkıtlı sistem tanılama yöntemi ile altı katlı çelik taşıyıcı sistemli bir binanın deprem verileri kullanılarak dinamik parametrelerinin tahmini yapılmıştır. Ayrıca yapının indirgenmiş matematik modeli de bu işlem sonucunda elde edilmiştir. Sistem tanılama yöntemleri, mevcut binaların kalibre edilmiş sonlu elemanlar modellerinin elde edilmesinde kullanılabilir. Dolayısıyla, gelecekte olabilecek herhangi bir deprem hareketi altında binada oluşabilecek hasarın tahmini, birinci aşamasını sistem tanılama metodlarının oluşturduğu iki aşamalı hasar tespit metodlarıyla mümkün olabilecektir.

3. SİSTEM TANILAMA YÖNTEMİ (SYSTEM IDENTIFICATION METHOD)

Öz sistem realizasyon algoritması (ERA) ilk olarak Juang [9] tarafından binaların dinamik karakteristiklerinin ve doğrusal dinamik sistemlerin model boyutunun küçültülmesi için önerilmiştir. Yöntem, gürültü (noise) etkilerinin azaltılması amacıyla, veri korelasyonu eklenerek (ERA/DC) Juang [8] tarafından geliştirilmiştir. Gözlemci/Kalman Filtresi Sistem Tanılaması (OKID) yaklaşımı ise ilk olarak Phan [10] tarafından önerilmiştir. Sismik yükler altında, yüksek serbestlik dereceli yapısal sistemlerin dinamik karakterinin belirlenmesinde verilerin süzülmesi (Filtreleme-OKID) ve öz sistem tanılama algoritması (ERA/DC) birlikte kullanılmıştır.

Bilindiği gibi, N serbestlik dereceli doğrusal bir yapısal sistemin davranışı, ikinci dereceden bir vektör diferansiyel denklemiyle tanımlanabilir:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) = \mathbf{B} \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

İfadede \mathbf{x} , $\dot{\mathbf{x}}$, ve $\ddot{\mathbf{x}}$ terimleri sırasıyla sistemin rölatif düğüm nokta deplasmanı, hız ve ivme tepkilerini tanımlamaktadır. \mathbf{M} , \mathbf{C} ve \mathbf{K} ise sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri olarak tanımlanmalıdır. \mathbf{B} yük etki matrisi, $\mathbf{f}(t)$ ise deprem girdi vektörü olarak tanımlanmış olup, başlangıç değerleri $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ ve $\dot{\mathbf{x}}(0) = \dot{\mathbf{x}}_0$ olarak kabul edilmiştir.



4. OKID-ERA/DC YÖNTEMİ FORMÜLASYONU (FORMULATION OF OKID-ERA/DC METHOD)

Denklem (1)'de görülen ikinci dereceden matris diferansiyel denklem, kesikli zamanlı durum-uzay (discrete time state - space) formülasyonuna dönüştürülüp ifade edilebilir [11]:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k)$$

İfadelerde \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} ve \mathbf{D} ayrıık formdaki durum-uzay matrisleri, $\mathbf{x}(n \times 1)$ konum vektörü, $\mathbf{u}(r \times 1)$ yük fonksiyonu ve $\mathbf{y}(m \times 1)$, gözlenen serbestlik derecelerinin $t=k$ ($\square t$) anındaki tepkileridir ($k=1, \dots, N$).

Binanın kaydedilmiş girdi-çıkııı verileri OKID yöntemi ile süzülerek sistemin azaltılmış gözlemsel durum-uzay modeli kurulabilir. Elde edilen basitleştirilmiş model yardımıyla sistemin birim titreşim tepkisi (Markov parametreleri) elde edilebilir:

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{D}, \mathbf{Y}_1 = \mathbf{C}\mathbf{B}, \mathbf{Y}_2 = \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B}, \dots, \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}\mathbf{A}^{k-1}\mathbf{B} \quad (3)$$

OKID yönteminin kaydedilen sinyaller gürültü içerdiğinde veya taşıyıcı sistemin az miktarda doğrusal olmayan davranış göstermesi durumunda dahi sağlıklı çalıştığı bilinmektedir [12].

OKID yöntemi ile elde edilen \mathbf{Y}_i Markov parametreleri yardımıyla, sistemin durum-uzay modelinin elde edilmesi için kullanılacak Hankel matrisi oluşturulur:

$$\mathbf{H}(k-1) = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_k & \mathbf{Y}_{k+1} & \dots & \mathbf{Y}_{k+s-1} \\ \mathbf{Y}_{k+1} & \mathbf{Y}_{k+2} & \dots & \mathbf{Y}_{k+s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{k+s-1} & \mathbf{Y}_{k+s} & \dots & \mathbf{Y}_{k+2(s-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Verilerdeki gürültü etkisinin azaltılması için ERA'nın alternatif formülasyonu olan ERA/DC algoritması kullanılmaktadır. Algoritmada doğrudan gerçek tepki verisi (input) yerine, çıktıların (output) içsel bağımlılık (auto correlation) ve karşılıklı bağımlılık (cross correlation) katsayısı değerleri kullanılmaktadır [12]. Yöntem denklem (4)'de verilen matrisin, $k=1$ için çarpanlarına ayrılmasıyla başlatılır:

$$\mathbf{H}(0) = \mathbf{R}\mathbf{E}\mathbf{S}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_n & \mathbf{R}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}_n & 0 \\ 0 & \mathbf{\Sigma}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_n^T \\ \mathbf{S}_p^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bu işlem sonucunda elde edilen \mathbf{R} , $\mathbf{\Sigma}$ ve \mathbf{S} matrislerinde indisler seçilebilen en büyük öz değer (singular value) sayısı n , kalıntılar p olarak tanımlanmaktadır. İfade model derecesi dikkate alınarak, alt matrislere ayrılabilir:

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{R}_n \mathbf{\Sigma}_n^{1/2} \quad \text{ve} \quad \mathbf{H}_2 = \mathbf{\Sigma}_n^{1/2} \mathbf{S}_n^T \quad (6)$$

Matrislerin sol ve sağ pseudo-tersleri ise

$$\mathbf{H}_1^\dagger = \mathbf{\Sigma}_n^{-1/2} \mathbf{R}_n^T \quad \text{ve} \quad \mathbf{H}_2^\dagger = \mathbf{S}_n \mathbf{\Sigma}_n^{-1/2} \quad (7)$$

ifadesi ile belirlenebilecektir.

Sistemin çözümü için kullanılmak üzere, birim matris ve sıfır elemanlardan oluşan bir dönüşüm matrisine (\mathbf{E}) ihtiyaç duyulmaktadır. Dönüşüm matrisi, sıfır elemanlı matris (\mathbf{O}) ve birim matris (\mathbf{I}) olmak üzere, gözlem noktası (algılayıcı, sensör) sayılarına bağılı olarak:

$$\mathbf{E}_r^T = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & \mathbf{O}_r & \dots & \mathbf{O}_r \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$\mathbf{E}_m^T = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m & \mathbf{O}_m & \dots & \mathbf{O}_m \end{bmatrix} \quad (8b)$$

ifadeleriyle tanımlanmaktadır. r ve m indisleri, sırasıyla girdi ve çıktı noktalarını (algılayıcı) tanımlamaktadır.

Sistemin durum-uzay modeli ise tanılama algoritması kullanılarak



$$\mathbf{A} = \boldsymbol{\Sigma}_n^{-1/2} \mathbf{R}_n^T \mathbf{H}(1) \mathbf{S}_n \boldsymbol{\Sigma}_n^{-1/2}, \mathbf{B} = \boldsymbol{\Sigma}_n^{1/2} \mathbf{S}_n^T \mathbf{E}_r, \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{E}_m^T \mathbf{R}_n \boldsymbol{\Sigma}_n^{1/2}, \mathbf{D} = \mathbf{Y}_0$$

ifadeleri ile elde edilebilir.

Doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları gibi modal parametreler ise,

$$\omega_n = |\ln(\lambda_n / \Delta t)|$$

$$\zeta_n = -\cos(\text{angle}(\ln(\lambda_n))) \quad (10)$$

ifadeleri kullanılarak hesaplanır. İfadede bulunan λ_n , \mathbf{A} matrisinin n . öz değerini, Δt ise kesikleme aralığını tanımlamaktadır.

Öz değerler kullanılarak, sistemin titreşim mod şekilleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{C}\boldsymbol{\Psi} \quad (11)$$

$\boldsymbol{\Phi} \dots \boldsymbol{\Phi}$ matrisinin kolon bazında düzenlenmiş öz vektörlerini tanımlamaktadır.

Ölçümlerdeki gürültüden kaynaklı, dolayısıyla sisteme ait olmayan mod vektörlerini gerçek mod vektörlerinden ayırmak için iki farklı yöntem kullanılmaktadır [11]:

- Modal Genlik Uyumluluk (MAC)
- Mod Tekil Değeri (MSV)

MAC değeri tanılanan modelin öngörülen bir zaman aralığı için bir moduna ait anlık birim tepkisinden elde edilen vektörün, yine aynı moda ait tanılama için kullanılmış anlık birim tepkisinin skaler çarpımı ile bulunur:

$$MAC_i = \frac{|\bar{\mathbf{q}}_i \hat{\mathbf{q}}_i^*|}{(|\bar{\mathbf{q}}_i \bar{\mathbf{q}}_i^*| |\hat{\mathbf{q}}_i \hat{\mathbf{q}}_i^*|)^{1/2}} \quad (12)$$

İfadede, $\hat{\mathbf{q}}_i$ tanılanmış model kullanılarak bulunmuş i . modun tepkisidir. $\bar{\mathbf{q}}_i$ ise yine i . moda ait tanılama işlemi için kullanılmış aynı uzunluğa sahip bir vektördür ($i = 1, 2, \dots, n$). * işareti transpozisyon ve kompleks eşlenik (conjugate) operatörünü tanımlamaktadır.

Eğer iki vektör çakışıyorsa modal genlik uyumluluk (MAC) değeri birim değere eşit olacaktır. Bu durumda, modelin sistemin anlık tepkisini doğru şekilde ürettiği söylenebilir. Aksi durumda skaler çarpım kaydedilmiş veriyle tanılanmış model kullanılarak türetilmiş verinin arasındaki açının kosinüsünü verecektir.

Mod tekil değeri (MSV), tanılanmış sisteme ait modların sistemin anlık tepkisine olan katkısını bulmak için kullanılır. MSV değeri

$$MSV_i \approx \sqrt{\frac{|\hat{\mathbf{c}}_i \hat{\mathbf{b}}_i|}{(1 - |\hat{\lambda}_i|)}} \quad (13)$$

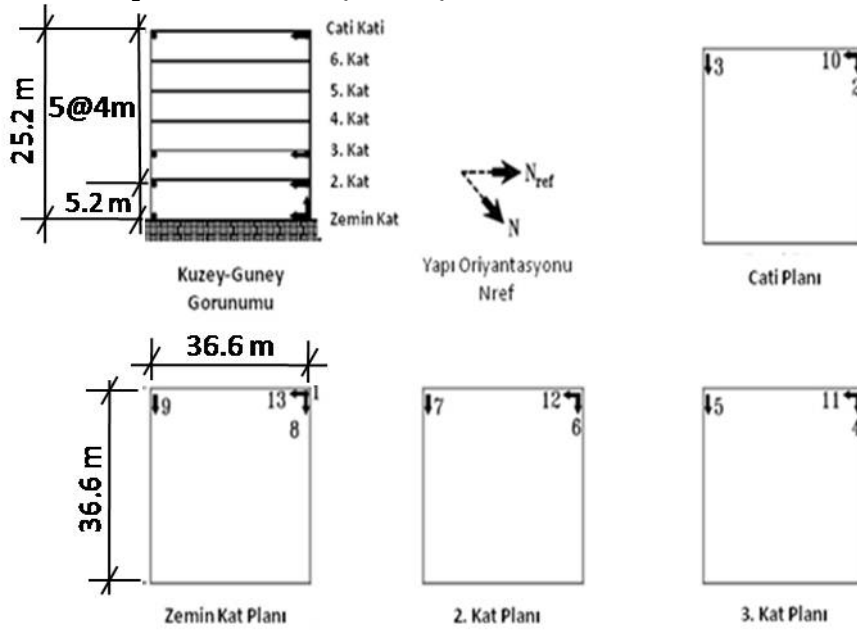
ifadesiyle hesaplanır. Burada $\hat{\mathbf{c}}_i$ and $\hat{\mathbf{b}}_i$ değerleri doğrudan anlık tepkilerle (Markov parametreleri) ilişkilidir [10].

ERA/DC temel olarak tanılanan sistemin anlık tepkisini, gerçek sistemin anlık tepkisine eşleştirmeye çalışır. Yüksek katkı oranlarına (büyük MSV değerleri) sahip modların, sistemin anlık tepkisine katkısı da büyük olacaktır. Böylece, söz konusu modun doğru tanılandığı da söylenebilir.

5. YAPI ÖZELLİKLERİ VE ALETSEL GÖZLEM DETAYLARI (BUILDING DESCRIPTION AND INSTRUMENTATION DETAILS)

Sunulan çalışmada tanılama sonuçları ele alınan yapı, 1977 yılında inşa edilmiş altı katlı çelik bir binadır. Amerika'nın Kaliforniya eyaletinde, Los Angeles şehrinin kuzey doğusundaki Burbank'ta bulunan bina, Whittier depreminin odağına 26 km, Northridge depreminin odağına ise 22 km uzaklıktadır.

Yapının taşıyıcı sistemi dış çevresine özel moment çerçeveler eklenmiş kaynaklı birleşimdir. Binanın yataydaki tüm rijitlik ve dayanımı, dış çerçeveye sağlanmaktadır. Döşeme sistemi, çelik ızgara (steel deck) ile takviye edilmiş betonarme ve hafif beton oluşmaktadır. Temel sistemi beton kesonlar içermektedir. Altı katlı bina; Kaliforniya Güçlü Hareket Aletsel İzleme Programı tarafından gözlem cihazlarıyla donatılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Burbank'ta bulunan altı katlı bina: basitleştirilmiş model ve sensör yerleşimi

(Figure 2. Burbank six-story building: simplified model and sensor locations)

Binada farklı katlara (zemin, 2, 3 ve 6) yerleştirilmiş toplam 13 ivmeölçer bulunmakta, merkezi bir veri kayıt cihazıyla izlenmektedir. Deprem davranışlarının aletsel gözlemi amacıyla her katın bir köşesine, birbirine dik iki doğrultuda yatay ivme değerlerini ölçebilmek için FBA-1 tipi (tek eksenli) iki adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bina burulma davranışını izleyebilmek için de diğer bir köşeye, algılayıcılardan birine paralel yatay bir ivmeölçer daha yerleştirilmiştir. Zemin seviyesine yerleştirilen bir adet FBA-3 tipi (üç eksenli) ivmeölçer ile ivmenin yatay ve düşey bileşenleri kaydedilmektedir. Yine zemin kata ilave edilen tek eksenli bir ivmeölçer kullanılarak ivmenin burulma bileşeni de gözlenmektedir. Toplanan veriler CSMIP [1, 2 ve 3] tarafından işlenmiş ve filtrelenmiştir.

6. TANILAMA SONUÇLARI (SYSTEM IDENTIFICATION RESULTS)

Yapının düşük dereceli durum-uzay modelinin bulunması ve dolayısı ile dinamik parametrelerinin belirlenmesi için Sierra Madre depremi gözlem değerleri kullanılmıştır. Tanılama işlemi için yapının

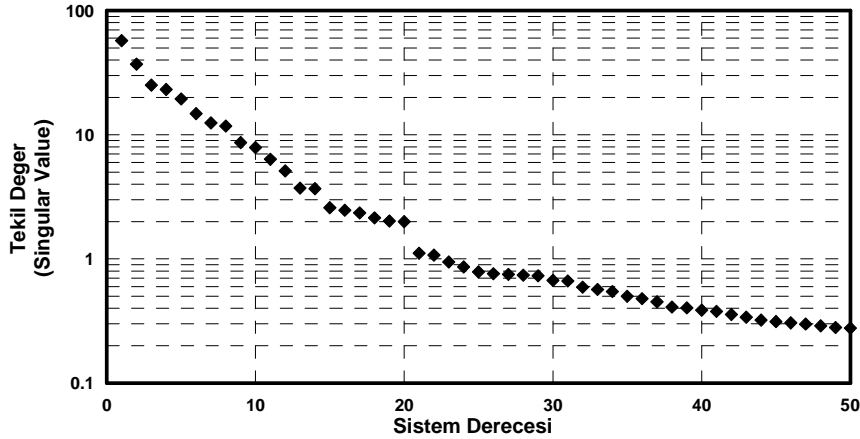


zemin kat tabanına yerleştirilen yatay ivmeölçerden alınan veriler girdi sinyalleri iki, üç ve altıncı katlarda bulunan ivmeölçerlerden alınan veriler ise çıktı sinyalleri olarak kullanılmıştır. Sierra Madre (1991) depremi düşük enerjili olduğundan, yapı bu deprem sırasında doğrusal sınırlar içinde davranmış ve bu sebeple bu kayıt, girdi-çıktı sistem tanılama yöntemi için kullanılabilmiştir.

Ölçülen değerlerde gürültü olmadığı zaman (ideal durum), sistem sorunsuz tanımlanabilmektedir. Sistemin sorunsuz tanımı p 'nin $m \times p > n$ ilişkisini sağlayan herhangi bir değeri için mümkün olmaktadır. Eşitsizlikte m çıktı sayısını (kullanılan algılayıcı sayısı), n durum vektörünü ve p ise yeterli uzunluktaki anlık tepki boyutunu tanımlanmaktadır.

Ölçümlerde gürültü olması durumunda (normal durum), p değerinin yeterli büyüklükte seçilmesi gerekir. Bir başka deyişle, dinamik modelin belirlenebilmesi için daha fazla veri noktası kullanılmalıdır.

Aşağıda sunulan sonuçlar için, p değeri 40 olarak seçilmiştir. Northridge depremi sırasında üçüncü kata yerleştirilen sensörler çalışmadığından, bu deprem hariç gözönüne alınan diğer depremlerde çıktı sayısı dokuzdur. Böylece, sistem derecesi (Hankel matrisinin boyutu) $p \times m = 360$ olmaktadır. Durum vektörünün boyutu Hankel matrisinin tekil değer dekompozisyonu (singular value decomposition, SVD) bulunup, tekil değerlerin sistem derecesinin bir fonksiyonu olarak çizilmesi ile (Şekil 3) bulunmuştur. Ani değişim dikkate alındığında, boyut (n) 20 olmaktadır.



Şekil 3. Hankel matrisinin tekil değer dekompozisyonu
(Figure 3. Singular value decomposition of Hankel matrix)

Binanın Sierra Madre, Whittier ve Northridge depremi için tahmin edilen dinamik karakteristiği Naeim [7] tarafından GA yöntemi ile belirlenen bina doğal periyodu ve sadece Northridge depremi için D'Amore-Astaneh [4] tarafından spektral analiz ile belirlenen titreşim periyotları Tablo 1'de verilmiştir. Deprem gözlemleri kullanılarak belirlenen frekanslar (ID kolonunda gösterilen değerler), önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur. İncelenen depremler kullanılarak bulunan periyotların Sierra Madre depremine kıyasla küçük artışlarının, binanın depremler sırasında uğradığı olası ufak hasarlara bağlı olduğu düşünülebilir.

OKID-ERA/DC yöntemi ile her bir mod için sönüm oranı (ξ) da tahmin edilmiştir. Tablo 1'de yer alan değerler, farklı deprem girdileri altında farklı sönüm oranlarını göstermektedir. Bu değerler inşaat mühendisliği yapıları için kabul edilebilir sınırlar arasında



değişmekle birlikte, sistem tanılama yöntemlerinin sönüm oranlarının tahmininde dikkatle kullanılması gerektiğinin de göstergesidir.

Tablo 2'de dört farklı deprem için MSV ve MAC değerleri görülmektedir. MAC değerleri bütün durumlar için 1 olduğundan kullanılan veri uzunluğu p 'nin yeterli büyüklükte olduğu söylenebilir.

Tanımlanan kompleks değerli mod şekilleri, kompleks düzlemde (polar çizim) de gösterilebilir (Şekil 4). Bu çizimlerdeki vektör indisleri, kanal numaralarını göstermektedir.

Mod şekillerinin polar çizimi, o moda ait sönüme ilişkin bilgi verir. Eğer bir mod vektörünün bileşenleri (polar çizimde gösterilen oklar) kompleks düzlemde üst üste çakışıyor ise bu mod klasik (orantılı) sönümlü, dağınık ise, o mod o derece klasik olmayan sönümlü olarak tanımlanır.

Sistemin durum-uzay modeli elde edildikten sonra bu modelin binanın farklı deprem girdileri altında gözlenen gerçek dinamik tepkisini ne düzeyde tahmin edebildiği incelenmiştir. Bina için ilk 20 sn için kaydedilmiş ve tanımlanan model kullanılarak tahmin edilmiş ivme değerleri Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 1. Naeim [7] ve D'Amore-Astaneh [4] tarafından raporlanan ve OKID-ERA/DC ile bulunan titreşim periyotları ve sönüm oranları (T [sn], ξ [%]).

(Table 1. Natural periods (T ,sec) and damping ratios (ξ , [%]) as reported by Naeim [7] and D'Amore-Astaneh [4] and as identified by OKID-ERA/DC)

Yön	Sierra Madre 1991			Whittier 1987			Northridge 1994			
	Periyot [sn]		ξ	Periyot [sn]		ξ	Periyot [sn]			ξ
	Naeim ⁷	ID	ID	Naeim ⁷	ID	ID	Naeim ⁷	D'Amore ⁴	ID	ID
K-G	1.27	1.28	4.20	1.28	1.27	2.81	1.38	1.36	1.38	3.01
	---	0.44	4.50	---	0.44	8.87	---	0.47	0.46	7.55
	---	0.25	6.80	---	---	---	---	0.25	0.27	4.40
D-B	1.27	1.25	3.10	1.24	1.23	3.92	1.39	1.33	1.36	3.88
	---	0.42	6.80	---	0.42	10.18	---	0.44	0.46	6.75
	---	0.24	7.60	---	0.23	8.50	---	0.24	0.24	6.67
Burulma	---	0.89	1.60	---	0.87	4.00	---	0.90	0.92	4.00
	---	0.31	2.85	---	0.31	3.40	---	0.32	0.33	6.00

Tablo 2. MAC ve MSV Değerleri
(Table 2. MAC and MSV values)

Yön	Sierra Madre 1991		Whittier 1987		Northridge 1994	
	MSV	MAC	MSV	MAC	MSV	MAC
K-G	0.88	1.00	0.86	1.00	0.81	1.00
	0.40	1.00	0.25	1.00	0.41	1.00
	0.16	1.00	---	---	0.04	1.00
D-B	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.23	1.00	0.37	1.00	0.08	1.00
	0.14	1.00	0.24	1.00	0.06	1.00
Burulma	0.78	1.00	0.86	1.00	0.35	1.00
	0.42	1.00	0.39	1.00	0.29	1.00

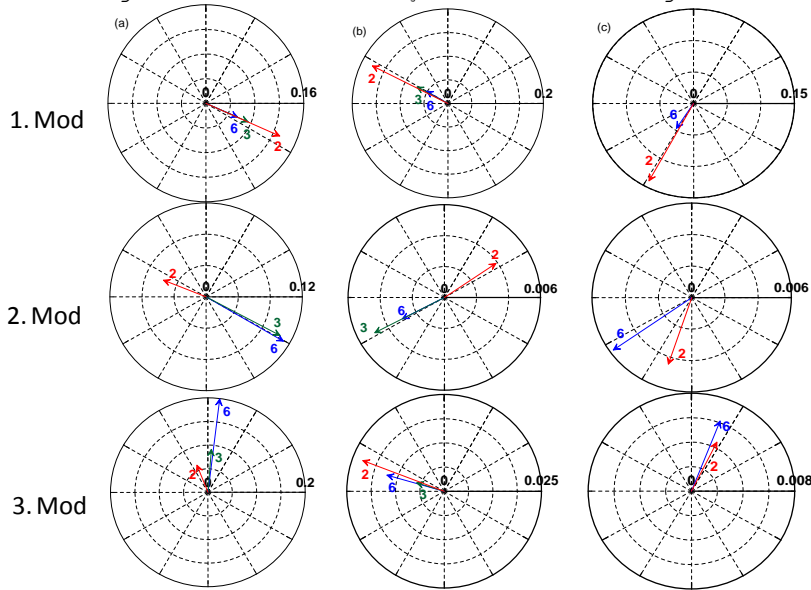
Kaydı alınmış ve model yardımıyla tahmin edilmiş ivme değerleri hem genel dalga formu hem de maksimum değerler açısından her üç deprem için de uyumludur. Bu çalışmada sonuçları verilmemiş olmakla birlikte, yerleştirilen diğer tüm algılayıcılar için de benzer sonuçlar görülmektedir.



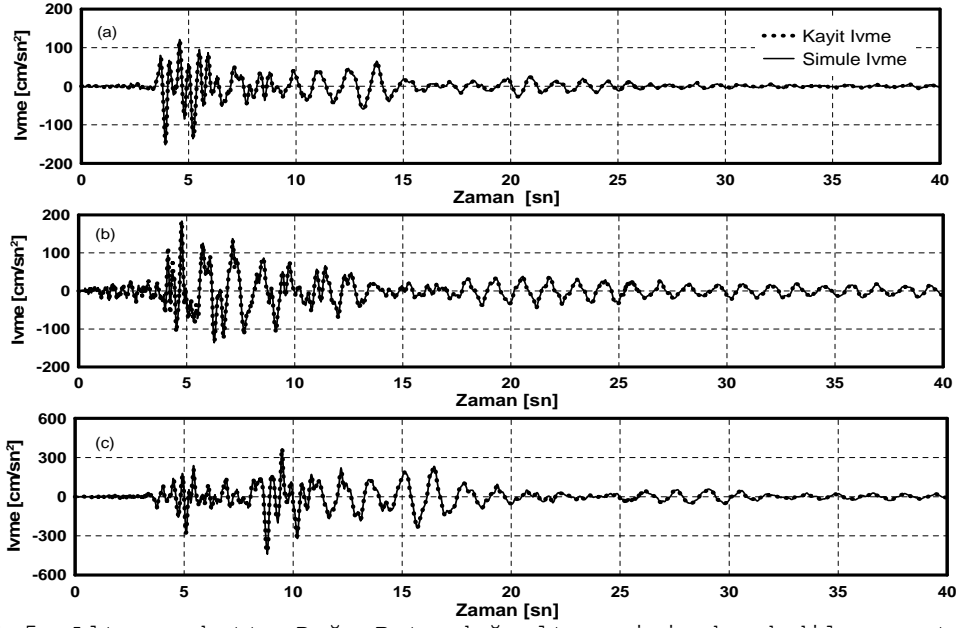
7. PERFORMANS ESASLI TASARIMA DAYALI HASAR TESPİTİ (PERFORMANCE BASED DAMAGE DETECTION)

Bir binanın performansının değerlendirilmesi ile ilgili en önemli parametre ölçülen veya hesaplanan kat ötelenme oranlarıdır. Bir yapının ötelenme değerlerine bağlı olarak performans ve hasar düzeyini tahmin etmek mümkündür [13]. Sünek davranış gösteren bir binanın artan yanal ötelenme altındaki davranışı yapıya uygulanan yanal kuvvetin yanal deformasyonunun bir fonksiyonu olarak şematik bir biçimde Şekil 6'da gösterilmiştir.

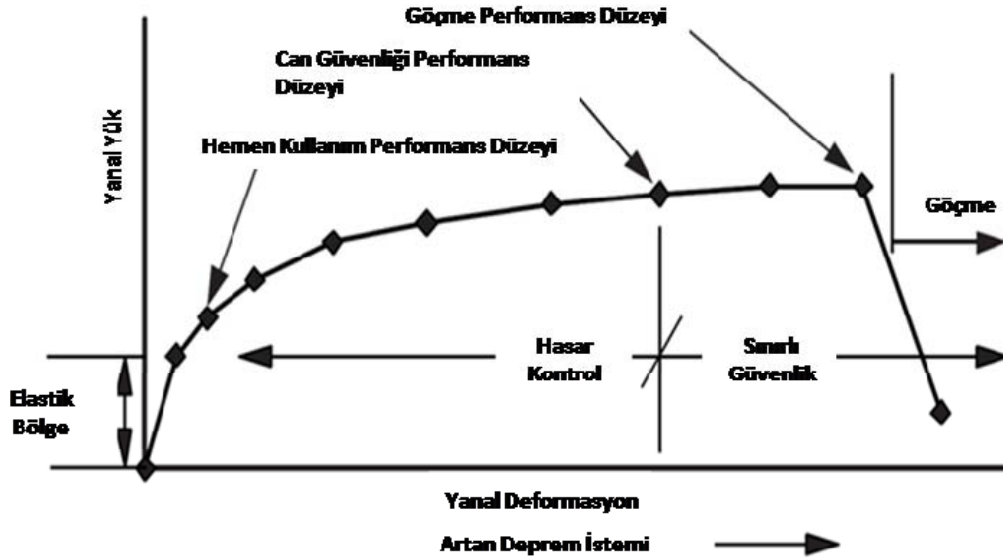
Çizim üzerinde farklı performans seviyelerine karşılık gelen üç ayrı nokta yapının hemen kullanım, can güvenliği ve göçme öncesi durumlarını belirtmektedir. Bir deprem sonrası yapıların anlık ve en büyük göreceli kat ötelenmeleri, sistem tanılama yöntemleri ile bulunmuş düşük boyutlu modeller kullanılarak hızlı bir şekilde tahmin edilebilir. Bu ötelenme değerleri, yapı performans değerlendirmesini otomatik hale getirebilen bir ölçü olarak kabul görmektedir.



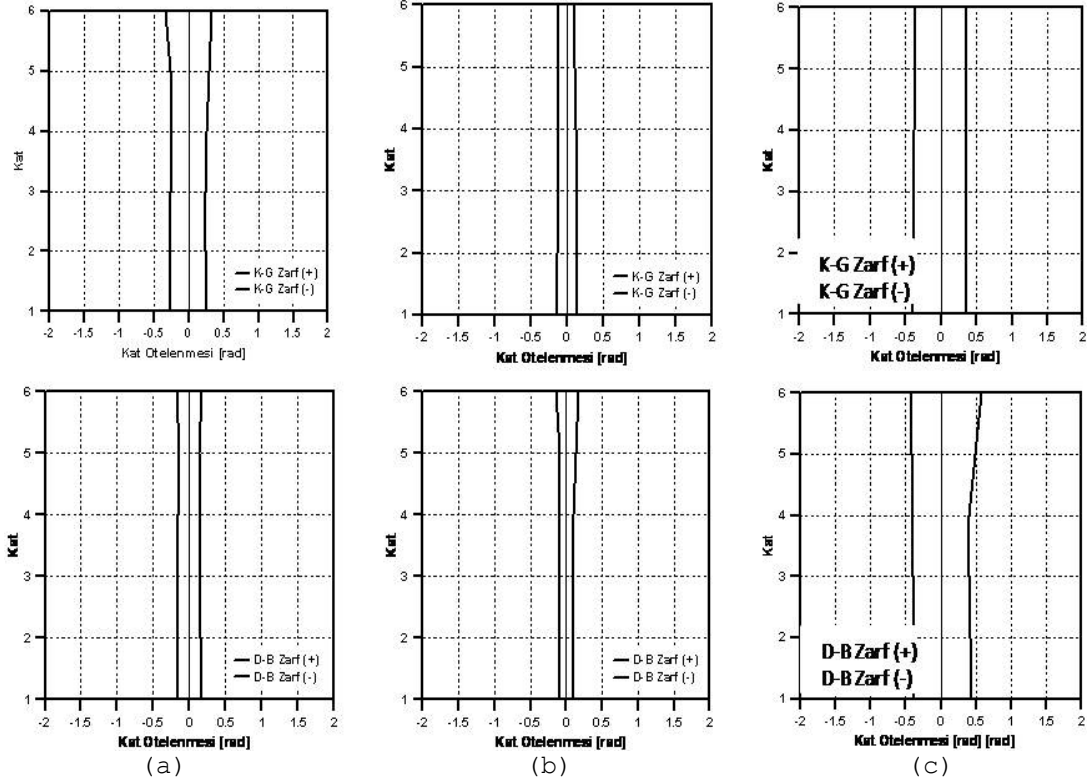
Şekil 4. İlk üç modun Doğu-Batı doğrultusu için kompleks mod şekillerinin kutupsal çizimi: (a) 1991 Sierra Madre; (b) 1989 Whittier Narrows; (c) 1994 Northridge depremleri
(Figure 4. Polar plot representation of the first three identified complex mode shapes along East-West direction using: (a) 1991 Sierra Madre; (b) 1989 Whittier Narrows; (c) 1994 Northridge earthquake records)



Şekil 5. Altıncı katta Doğu-Batı doğrultusu için kaydedilen ve tahmin edilen tepkilerinin karşılaştırılması: (a) 1991 Sierra Madre; (b) 1989 Whittier Narrows; (c) 1994 Northridge depremleri.
(Figure 5. Comparison of predicted vs. recorded time histories of the sixth story motion along East-West direction: (a) 1991 Sierra Madre; (b) 1989 Whittier Narrows; (c) 1994 Northridge earthquakes)



Şekil 6. Sünek yapılar için performans ve yapı deformasyon istemi
(Figure 6. Performance vs. deformation demand plot for ductile structures)



Şekil 7. Maksimum görelî kat ötelenme oranları: (a) 1987 Whittier Narrow; (b) 1991 Sierra Madre; (c) 1994 Northridge depremleri
(Figure 7. Maximum interstory drift ratios: (a) 1987 Whittier Narrow; (b) 1991 Sierra Madre; (c) 1994 Northridge earthquakes)

Şekil 7'de yapının benzetilmiş tepkileri dikkate alınarak belirlenmiş görelî kat ötelenmeleri verilmiştir. Bu değerlere göre, binanın Doğu-Batı ve Kuzey-Güney doğrultularındaki ötelenme istemleri hemen hemen aynıdır. Bu nedenle binanın her üç deprem için de aynı performansı göstereceği ve hasar görmeyeceği tahmin edilmektedir. Bu bilgi, herhangi bir deprem sonrası o depreme ait veri kullanılarak hızlıca elde edilebilir ve hasar gördüğü tahmin edilen binalara müdahale önceliği verilebilir.

8. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Binalara yerleştirilmiş olan güçlü hareket gözleyebilen algılayıcılar (ivmeölçerler ve kayıt araçları) yardımıyla elde edilen veriler, yapıların dinamik parametrelerinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Bu verilerle yapıların dinamik yükler altındaki (deprem, v.b.) tepkileri girdi-çıkıtı sistem tanılama yöntemleri kullanılarak belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada sonuçları sunulan yapı örneğinde görüldüğü üzere; OKID-ERA/DC girdi-çıkıtı sistem tanılama yöntemiyle belirlenen dinamik karakteristikler farklı çalışmalarla elde edilen sonuçlarla uyumludur. Sistem tanılama yöntemleri, mevcut binaların kalibre edilmiş sonlu elemanlar modellerinin elde edilmesinde kullanılabileceği gibi öngörülen azaltılmış model kullanılarak, farklı deprem kayıtları altındaki yapı tepkisinin simülasyonu da mümkündür. Dolayısıyla, öngörülen deprem hareketi altında binada oluşabilecek hasarın da tahmini mümkün olabilecektir.



Bu yöntemlerin kullanılabilmesi için ilk adım, aletsel gözlem istasyonlarının oluşturulmasıdır. Açıktır ki, yapılara yerleştirilen algılayıcı adedi arttırıldıkça, hasar tanılama yöntemlerinin güvenilirliği artacak, ancak gözlem maliyeti de yükselecektir. Dolayısıyla, ivmeölçerlerin bina içindeki yerleşimi, algılayıcı (ölçüm) maliyetiyle, sonuçların güvenilirliği arasında yapılacak eniyileme sonucunda belirlenmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazarlar güçlü hareket verilerini ve bina projesini araştırmacıların kullanımına açan Kaliforniya Güçlü Hareket Aletsel İzleme Programı'na ve makaleye katkılarından dolayı Prof.Dr. Türkay Baran'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Huang, M.J., Cao, T.Q. and Parke, D.L., and Shakal, A.F., (1989). Processed Strong-Motion Data from the Whittier Earthquake of October 1 1987, Report No. OSMS 89-03, California Dept. Conservation, Division of Mines and Geology, California.
2. Huang, M.J., Shakal, A., Darragh, R.B., Ventura, C., Cao, T., Sherburne, R., Fung, P., Wampole, J., DeLinsle, M., and Petersen, C., (1991). CSMIP Strong-Motion records from the Sierra Madre, California earthquake of June 1991, Report No. OSMS 91-03, California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, California.
3. Shakal, A., Huang, M., Darragh, R.B., Cao, T., Sherburne, R., Malhorta, P., Cramer, C., Sydnor, R., Graizer, V., Maldonado, G., Petersen, C., and Wampole, J., (1994). CSMIP Strong-Motion records from the Northridge, California earthquake of 17 January 1994, Report No. OSMS 94-07, California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, California.
4. D'Amore, E. and Astaneh-Asl, A., (1995). Seismic behavior of a six story instrumented building during 1987 and 1994 Northridge Earthquakes, Report No. UCB/CE-Steel 95/03, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
5. Naeim, F., (1998). Performance of 20 extensively-instrumented buildings during the 1994 Northridge earthquake, The Structural Design of Tall Building 7, 179-194.
6. Kim, S. and D'Amore, E., (1999). Push-over analysis procedure in earthquake engineering, Earthquake Spectra 15(3), 417-434.
7. Naeim, F., Hangie, S., Almoradi, A. and Miranda, E., (2005). Automated post-earthquake damage assessment and safety evaluation of instrumented buildings, JAMA Report No. 2005-10639, John A. Martin Associates, Research and Development Department, Los Angeles, CA.
8. Juang, J.N., Cooper, J.E., and Wright, J.R., (1988). An Eigensystem realization using data correlation and model reduction, Control Theory Advanced Technology 4(1), 5-14.
9. Juang, J.N. and Pappa, R.S., (1985). An Eigensystem realization algorithm for model parameter and model reduction, Journal of Guidance, Control and Dynamics 8(5), 620-627.
10. Phan, M., Horta, L.G., Juang, J.N., and Longman, R.W., (1993). Linear system identification via an asymptotically stable observer, J. Optim. Theory Appl. 79(1), 59-86.
11. Juang, J.N., (1994). System Realization Theory, In Applied System Identification, edited by Prentice Hall PTR.



12. Lus, H., Betti, R., and Longman, R. W., (1999). Identification of linear structural systems using earthquake induced vibration data, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 28(11), 1449-1467.
13. Applied Technology Council (ATC), (1997). FEMA 274: NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Prepared for the Building Seismic Safety Council, FEMA, Washington, D.C.