Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32:2 (2017) 403-415

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

# Titreşim verisiyle güncellenmiş sonlu eleman modeliyle hasar simulasyonu

Kemal Beyen*
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

## Ö N E Ç I K A N L A R

- Titreşim testleri ve sinyal analizleri
- Titreşim verileriyle mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının tanılanılması
- Sonlu eleman yapı modelinin güncellenmesi ve güncellenmiş yapının yönetmelik çerçevesinde hasar görebilirlik analizleri

Makale Bilgileri
Geliş: 29.02.2016
Kabul: 15.11.2016

DOI:
10.17341/gummfd.61874

Anahtar Kelimeler:
Yapı tanı,
model kalibrasyonu,
hasar simulasyonu,
comac,
imac

ÖZET

Yapısal hasarın tekrar nümerik olarak üretilmesi bu çalışmada hedeflenmiş, titreşim ölçümlerine uygulanan yapı tanılama analiz bulguları referans alınmış; güncelleme nümerik model sonuçlarına uygulanan MAC (Modal assurance Criterion), COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion) ve IMAC (Inverse Modal Assurance Criterion) ölçütlerinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiş; tutarlılığı yükseltilmiş modelin hasar görebilirliği TDY (Türk Deprem Yönetmeliği)'de önerilen EDİA (Eşdeğer deprem İtme Analizi), TMİA (Tek Mod İtme Analizi), ÇMİA (Çok Mod İtme Analizi) ve ZTAA (Zaman Tanım Alanında Analiz) metodlarıyla can güvenliği performans seviyesi için tanımlanan şiddetli deprem için araştırılmıştır. TMİA'de yapı bütününde ZTAA'de ise zemin kat sonuçlarında güncelleme yüksek katkı verirken, EDİA ve ÇMİA sonuçları çok değişmemiştir. Buna mukabil, 1. normal kat kolonlarında diğerlerinin yanısıra ÇMİA ve ZTAA sonuçları hasar rölövesiyle uyumlu hale gelmiştir. Analize katılan mod sayısı ve onların mod şekillerinin benzeşim potansiyeli ÇMİA sonuçlarını etkilemektedir. Örneğin ham nümerik modelin ÇMİA ve ZTAA sonuçları hasar beklenmeyen üst kat kolonlarını hasarlı verdirirken güncellenmiş model rölövedeki hasarsızlığı tekrar üretebilmektedir. Yöntemlerden TMİA'nin ve kısmende EDİA sonuçlarının yönetmelik önerisi hedef deplasman civarında yüklenilmesiyle hasar rölövesi tekrar üretilmektedir. Ayrıca tasarlananla biten inşaatın arasındaki farklar iskan verilmeden önce mevcudu tam yansıtan durum tespit tespit projesine ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Yeni yapının yerinde titreşim ölçüm sonuçlarıyla uyumlu güncellenmiş son projesi yapıların imalat açısından sertifikalanmasına ve sigorta uygulamalarına bilimsel ölçüt kazandıracaktır.

# Damage simulation by finite element updating using vibration characteristics

## H I G H L I G H T S

- Vibration test and signal analysis
- Identification of the dynamic characteristics of the engineering structures based on vibration data
- Upgrading numerical finite element model of the structure and damage assessment of the improved numerical model

Article Info
Received: 29.02.2016
Accepted: 15.11.2016

DOI:
10.17341/gummfd.61874

Keywords:
System identification,
model calibration,
damage simulation,
comac,
imac

ABSTRACT

This study aims to numerically regenerate and quantify the structural damage, findings of the structural identification of the ambient vibration data are used as a reference for the simulation studies. MAC (Modal assurance Criterion), COMAC (Coordinate Modal assurance Criterion) and IMAC (Inverse Modal assurance Criterion) methods were performed by monitoring the output sensivities. Finally, consistent model was considered for damage assesment based on EDİA (Equivalent earthquake Pushover Analysis), TMİA (Single Mode Pushover Analysis), ÇMİA (Multi Mode Pushover Analysis) and ZTAA (Time Domain Analysis) for life safety performance level for the target earthquake as defined in TDY (Turkish Earthquake Code). Contribution of the modification has been observed very well globally in the results of the TMİA and partially at the basement in ZTAA whereas the results of the EDİA and ÇMİA have not changed much. At the 1st story, ÇMİA and ZTAA gave damage distribution compatible to damage survey beside the other methods. Total number of the vibration modes to be taken into account in the analysis and their simulation potentials affect the results of the ÇMİA. Results of ÇMİA and ZTAA for the raw numerical model gave unexpected damage on the top story columns while the updated model is able to regenerate exact condition. Among the analysis methods, TMİA and in some way EDİA reproduce same member damage distribution under the target roof displacement as determined by the TDY. This study also shows that the final record reflecting the existing condition as built also offers possibilities for certification for construction quality and insurance practices.

*Sorumlu Yazar/Corresponding author: kbeyen@kocaeli.edu.tr / Tel: +90 262 303 3281

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1970' lerde başlayan ve günümüzde standartlaşmaya giden nümerik model güncelleme işlemi yapı ve malzeme davranışını doğru tanılamanın yanısıra sonuçların saha ile tutarlılığını yükseltmeyi amaçlar. 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 başlanmıştır. Bu süreç analizden yapı sağlığı izlemeye [1], durum tespitinden, hasar görebilirlik çalışmalarına [2] veya köprülerde yapı işletme güvenliği gibi farklı uygulama alanlarında yapı üzerinde yürütülen testlerin sürekli izlemeye dönüşmesiyle yaşanmaktadır [3]. 2007 Türk Deprem Yönetmeliği (TDY) [4] çerçevesinde güvenilirliği yükseltilmiş Sonlu Eleman (SE) modellerine farklı performans seviyelerinin karşılığı tanımlanmış farklı yük şartları için farklı yapı davranış benzeşim analizleri yürütme imkanı doğmuştur. Nümerik yapı modeli bir çok belirsizliği barındırmasına rağmen analiz sonuçları belirli bir tutarlılık sergileyebilir. Simulasyon çalışmalarında temelde iki belirsizlik kaynağıyla karşılaşıyoruz; (1) SE modelde tam tarifleyemediğimiz sınır şartları, malzeme/davranış bilgisi, imalat/işçilik kalitesi, yük, ısısal değişim, kimyasal etki ves. (2) Nümerik algoritmaların çözüm yakınsaklık derecesi, düşük mertebe analiz ve her şartda çözüm belirsizlikleridir. Deneysel modal analiz nümerik model tutarlılığını yükseltirken test düzeneği, tetikleme koşulları, sensör özellikleri, ağdaki sayısı ve konumu, veri kalitesi (sinyal-gürültü oranı), veri kayıt şartları, sinyal işleme ve sinyal analizi başka belirsizlikler üretebilmektedir. Sayılan farklı seviyelerdeki hata ve belirsizliklerin toplam etkisi benzeşim sonuçlarını etkileyebilmektedir. İlk 70'lerde deneysel elde edilen frekans tepki fonksiyonlarından çekilen mod ve mod şekillerini referans alan modal tutarlılık kriterleri bir istatistiki korelasyon uygulaması olarak başlamış ve mod gerçekleşme kriterinin (Modal Assurance Criteria-MAC) türevleri zamanla geliştirilmiştir.

Yapı tanı çalışmasında doğru kullanıldığı zaman çok güçlü bir tutarlılık indisi olan MAC değerinin sıfıra yaklaşması ortogonaliteyi (tutarsızlığı), bire yaklaşması benzerliği göstermektedir. MAC benzeri diğer yaklaşımlar çok kullanılmasa da literatürde örneğin Yun-Xin WU'nun [5] çalışmasında bulunabilir. Bu çalışmada TDY-2007'de [4] mevcut yapılar için önerilen hasar görebilirlik analizlerinin sonuçlarının hasar rölevesiyle tutarlılığında güncelleme etkisi ve sonuçların iyileşme gücü 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar alan yapılardan örnek uygulamalarla tartışılmıştır [6]. Yapı titreşim verilerinden tanılama teknikleriyle elde edilen yapı karekteristikleri (1) Nümerik modelin aslıyla uyumlu hale gertirilmesinde, (2) Yeni inşaatlarda biten inşaatın projeyle uyumunun ve imalat kalitesinin sertifikalanmasında ve (3) Sigorta uygulamalarının bilimsel ölçütler içinde gerçekleşmesinde kullanılabilir.

## 2. MODEL GÜNCELLEME (CALIBRATION OF THE NUMERICAL MODEL)

Yapısal izleme noktalarında kaydedilmiş çevrel ve yapay deprem titreşim kuvvetlerinin ürettiği tepki ölçümleri kullanılarak SE model davranışıyla karşılaştırılmasında; doğru test setinin kararlaştırılması, genel davranış karekteristiğini yansıtmayan anormal tepki hikayelerinin ayıklanması, doğru güncelleme parametresinin seçimi, doğru güncelleme algoritması, gerçek yapı davranışını yansıtmayan nümerik modelde geçerliliği tartışmalı basitleştirme ve kabüllerin kullanılmaması [17], doğru lokal serbestlikleri ve yönleri, doğru sınır şart (temel ve bitişik nizam) tanımları, kısa kolon, döşeme davranışları vesairenin gerçek koşullarda tanımlanması kalibrasyon işleminin verimini yükseltecektir [7]. SE model güncelleme işlemi yapı davranış bilgisinin özümsendiği bir mühendislik öngörüsüyle analiz sonuçlarının gözlemine bağlı olduğuna göre güncelleme algoritması değiştir-gözle çeviriminde etkin çalışma parametresinin alacağı değer hassaslığını verebilen [8] ve daha iyi yeni bir değeri tahmin edebilen yapıda olmalıdır [9]. Nümerik analiz sonuçlarıyla deney sonuçlarının verdiği mod şekilleri MAC veya benzerleriyle sınanarak benzeşim mertebesine ve gerekli kalibrasyona karar verilebilir.

Analitik ve deneysel sonuçları bire-bir ilişki içinde frekans ortamında transfer fonksiyonlarıyla değerlendirmek 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 kabülleri ves. düzeltilebilir. Güncellemede benzeme ölçütü olmadan başarı mertebesini dolayısiyle tutarlılığı değerlendirmemiz zordur. Güncellenen modelin sonuçlarının zaman ve frekans tanım alanında deneysel sonuçlarla mukayesesini teorik olarak açıklamak için yapısal sistemin hareket Eşitliğini yazarsak;

$$[M]\{\ddot{X}\}+[C]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=\{F(t)\} \tag{1}$$

Eş. 1'de [*M*], [*C*] ve [*K*] matrislerinin yapının yayılı veya yığılı modellenmesi durumuna uygun kütle, sönüm ve rijidlik değerleri olup tariflenen serbestlik için ivme, hız ve yerdeğiştirme çarpanlarıyla oluşturdukları bünye kuvvetleri toplamı dış kuvvet, $\{F(t)\}$'i dengelemektedir. Eş. 1 yığılı kütle için genelleştirilmiş modal ortamda Eş. 2 ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \ddots & & \\ & M & \\ & & \ddots \end{bmatrix}\{\ddot{w}\}+\begin{bmatrix} \ddots & & \\ & C & \\ & & \ddots \end{bmatrix}\{\dot{w}\}+\begin{bmatrix} \ddots & & \\ & K & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \tag{2}$$
$$\{w\}=[U]^T\{F\}$$

Genelleştirilmiş koordinat ortamında, diagonal matrisler modal kütle, modal sönüm ve modal rijitliği sırasıyla ifade

ederken matris çarpanları modal ivme $\{\ddot{w}\}$, modal hız $\{\dot{w}\}$, ve modal yerdeğiştirme $\{w\}$ vektörleridir. Modal kuvvetler serbestlik bileşenleri $[U]^T\{F\}$ koşullarında etkimektedir. Her modda hesaplanacak modal kuvvetin doğru ve yükün fiziki şartlarına uygun olması mod şekillerinin önemli olduğunu göstermektedir. Pratik mühendislik yaklaşımı içinde yapı hasar görebilirlik analizinin belirli doğrulukta örneğin ilk üç modunun nümerik analizde doğru frekans davranışları sergilemesinin yanısıra doğru mod şekilleriyle doğru tepkiler üretmesi güncelleme için hedeflenebilir. Deneysel ve analitik mod şekilleri arasında istatistiki korelasyon Eşitlikler 3 ve 4'de ifade edilen MAC tabanlı ölçütlerle izlenerek *i*'ninci katın modal davranışa katkısı yükseltilebilir [10].

$$MAC\left(\{\Phi_X\}_i,\{\Phi_A\}_j\right) = \frac{\left|\{\Phi_X\}_i^T\{\Phi_A\}_j\right|^2}{\left(\{\Phi_X\}_i^T\{\Phi_X\}_i\right)\left(\{\Phi_A\}_j^T\{\Phi_A\}_j\right)} \tag{3}$$

$$COMAC(i) = \frac{\left(\sum_{J=1}^{n_{CMP}}\left|(\Phi_A)_{ij}(\Phi_X)_{ij}\right|\right)^2}{\sum_{J=1}^{n_{CMP}}\left|(\Phi_A)_{ij}\right|^2\sum_{J=1}^{n_{CMP}}\left|(\Phi_X)_{ij}\right|^2} \tag{4}$$

Burada *X* indisi (eXperimental) deneysel titreşim mod indisini ve *A* indisi Analitik titreşim mod indisini gösterirken, MAC değerleri 0 ile ortogonal ve 1 ile tam benzerliği işaret etmektedir. Uyumsuzlukların modeldeki yerlerini veremeyen Eşitlik (3)'ün eksikliği *CO*-ordinate *MAC* (*COMAC*) ifadesiyle Eş. 4'de geliştirilmiştir[11]. *COMAC* ölçütü kat seviyesinde oluşan farklılıkları yakalayabilmekte olup inşaat mühendisliği alanında sınırlı cihaz ağıyla yapılan uygulamalar için yeterlidir. Burada $n_{CMP}$ ile doğrulatılacak mod şekil sayısı tanımlanabilmektedir. Mod şeklinin ilgili frekanstaki girdi modal kuvvetin değerini etkilediği ve mod şeklindeki küçük farklılıklara sağır kalmayacak hassaslıkta tepkilerin izlenerek güncelleme yapılmasını amaçlayan bir diğer yaklaşım ters mod gerçekleşme kriteridir (Inverse Modal Assurance Criterion - IMAC) [12]. Eş. 5 ile ifade edilen IMAC ölçütü modal yerdeğiştirmelerin tersini işleme alarak, ufak farkların tersinin vereceği büyük değerleri en küçük kareler kestirimi içinde minimize eder. IMAC ölçütünün alacağı 0 ve 1 arası değerler MAC gibi uyumun olmadığı şartlardan uyumun gerçekleştiği tutarlılığa doğru mod şekillerinin ilişkisini gösterir.

$$IMAC\left(\{\Phi_X\}_i,\{\Phi_A\}_j\right) = \frac{\left|\left(\{\Phi_X\}_i^{-1}\right)^T\left(\{\Phi_A\}_j\right)^{-1}\right|^2}{\left(\left(\{\Phi_X\}_i^{-1}\right)^T\left(\{\Phi_X\}_i\right)^{-1}\right)\left(\left(\{\Phi_X\}_j^{-1}\right)^T\left(\{\Phi_X\}_j\right)^{-1}\right)} \tag{5}$$

## 3. GÜNCELLEMEDE VERİMLİLİK DEĞERLENDİRMESİ
**(EVALUATION OF THE CALIBRATION EFFICIENCY)**

Yapının nümerik modeline doğru, hızlı ve verimli bir kalibrasyon uygulanabilmesi için ampirik değerlendirilmiş olan birim hacim özgül ağırlığı (kütle) ve elastik modül çalışma parametreleri olarak seçilebilir. Parametreye olan model hassaslığı elastik şartlarda modal frekans ve deformasyonlardan değerlendirilebilir. Verimli ve hızlı bir kalibrasyon için güncellemenin verimliliği örneğin seçilen doğal frekans ölçütü *x* parametresinin veya eğer birden çok seçilmişse *x* parametre vektörünün değerleri için göreceli hata $y_i(x)$, Eş. 6 bağıntısıyla ve standart sapma $s(x)$, Eş. 7 bağıntısıyla saha test değeri *(X)* ile FEM (*A)* çözümünün verdiği değerlerle izlenebilir. Burada $f_{Xi}$ ve $f_{Ai}$ *i*'ninci doğal frekansa ait saha testlerinin (çevrel, zorlama harmonik kuvvet) ve SE modelinin, ($i=1,2,..,M$) mod sayısı adedince değerleri olup güncelleme parametre vektörü *x* için hesaplanmıştır. MAC ilişkili verimlilik ölçütü ise nümerik çalışma sonucu elde edilen mod şekillerinin saha sonuçlarıyla doğrulatılması için yaygın kullanılan bir ölçüttür.

$$y_i(x) = \frac{\left|f_{Xi}(x) - f_{Ai}\right|}{f_{Ai}} x100 \;\; i = 1,2,..M \tag{6}$$

$$s(x) = \left[\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left(y_i(x) - \bar{y}(x)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \bar{y}(x) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} y_i(x) \tag{7}$$

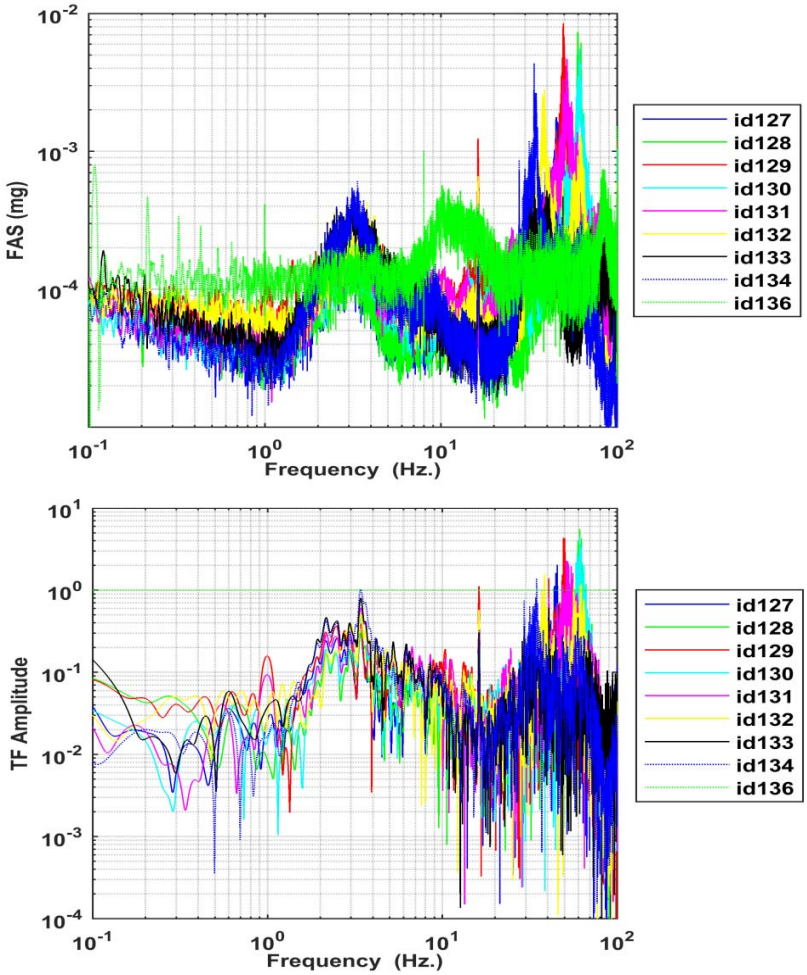
$$a_{ij} = \frac{(\varphi_{Xi}^T\varphi_{Aj})^2}{(\varphi_{Xi}^T\varphi_{Xi})(\varphi_{Aj}^T\varphi_{Aj})} \tag{8}$$

Burada $\phi_{Xi}$ *i*'ninci moda ait testlerden gelen mod şekli, $\phi_{Aj}$ ise *j*'ninci moda ait SE modelin verdiği mod şeklidir. Benzer şekilde bir eleman tasarım parametresini (veya çoksa oluşturulacak *x* vektörü) beraber kullanılarak, MAC'ın diyagonal ekseninde yer alan $a_{Xi}$ (testden gelen *i.* mod şeklinin kullanıldığı MAC değerleri) ve $a_{Ai}(x)$ (*x* parametreleri için güncellenen SEM'den gelen *i.* mod şeklinin kullanıldığı MAC değerleri) Eş. 8 ile MAC ölçütü göreceli hata $a_i(x)$, $a_{Xi}$ ve $a_{Ai}(x)$ bilgileri kullanılarak Eş. 9'da hesaplanabilir.

$$a_i(x) = \frac{a_{Ai}(x) - a_{Xi}}{a_{Xi}} \times 100 \qquad i = 1,2,3,..m \tag{9}$$

$$a_i'(x) = \frac{1 - a_{Ai}(x)}{a_{Ai}(x)} \times 100 \qquad i = 1,2,3,.,m \tag{10}$$

Eş. 9 MAC'ın iyileştirme ölçütü $a_i(x)$ $a_{Xi}$ değerini referans alarak göreceli hatayı hesaplarken geliştirilen Eş. 10, güncellenen modelin saha ile olan farklarının küçüldüğünü gösteren bir ölçüt değeri olan $a'_i(x)$ 'nü kullanır. Böylece




**Şekil 1.** Örnek yapı x yönü çevrel titreşim kayıtlarının FGS (üst) ve kat TF-x (alt)
(Fourier genlik spektrumları (FGS) (top) of the X component ambient vibration records for the test structure and x direction floor transfer function (TF-x) (bottom))

$a_i(x)$ 'in büyümesi veya $a'_i(x)$ 'in küçülmesi SE modelin mod şekillerinin yapı ölçümündeki dengine yakınsadığını gösterecektir [12].

## 4. GÜNCELLEME UYGULAMASI
**(A PRACTICE OF A STRUCTURAL CALIBRATION)**

TDY-2007'nin 7. bölümünde önerilen mevcut binaların performans değerlendirmesi yöntemleri TUBİTAK tarafından desteklenen 108M303 nolu proje [6] kapsamında çalışma izni alınan 15 betonarme (BA) bina için 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremiyle test edilmiştir. Mevcut binalarda çevrel ve yapay deprem şartlarında kaydedilen tepkilerden hesaplanan özgün modal bilgileri kullanılarak TDY'nin deprem hesabına ilişkin genel ilke ve kurallar bölümünde verilen madde 7.4 şartlarını sağlayan güncellenmiş SE modeli MAC, IMAC ve COMAC ölçütleri ve iteratif sonuçlarının sunduğu farkların küçültülmesiyle nümerik model kalibrasyonu tamamlanmıştır. Ayrıca uygulanan güncellemenin sonuçları iyileştirme mertebesi irdelenmiştir. Çalışmada mod benzeşimi; (1) Hakim frekanslarda tutarlılığı izleyerek güncelleme öncesiyle sonrası arasında değer değişiminin %5-%10 aralığında gerçekleşmesi, (2) Sönüm oranlarında değer değişiminin öncesiyle sonrası arasında %5'lerin altına inmesi ve (3) Mod şekilleriyle hesaplanan MAC değerlerinin %80-%90 aralığında veya üstünde bir tutarlılığa ulaşması yeterli görülmüştür. Uygulanan yapıların; (1) test verileriyle yapı tanılama analizleri, (2) deneysel modlarla güncellenmesi, (3) güncellemenin analiz sonuçlarını iyileştirmesi ve (4) hasar simulasyonlarındaki başarıları tartışılacaktır.

### *4.1. Bina Test Verilerinin Analizi*
*(Analysis Of The Building Test Data)*

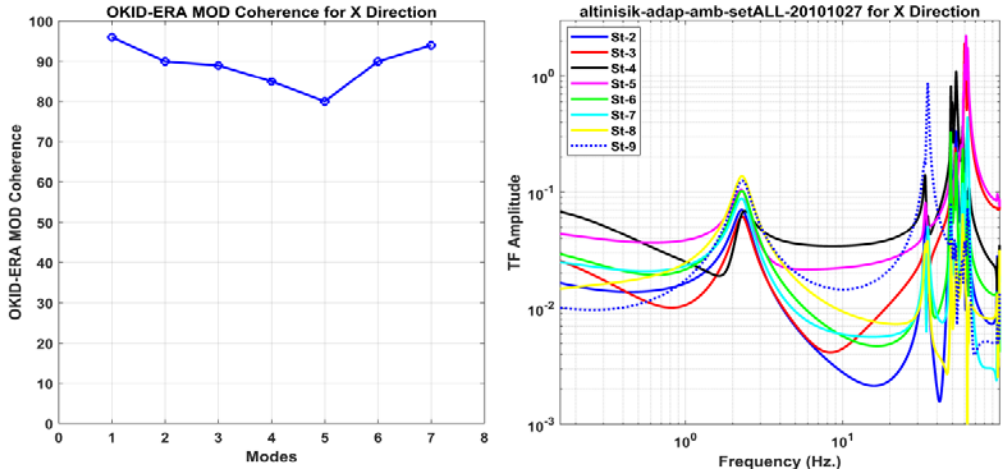
Yapı dinamik testleri yapısal noktalara kurulan AREL-DAC serisi üç bileşen ivme ölçerlerden oluşan kablosuz izleme ağı ve yazılımlardan oluşan yerli tasarım ve yerli üretim bir test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir [13]. Saha-zemin özelliklerini yansıtan mikrotremor kayıtları yapı-girdi verisi ve yapısal titreşimler ise yapı-çıktı verisi olarak eşzamanlı kaydedilmiş girdi-çıktı (G-Ç) veri çiftleri frekans ve zaman tanım alanında çözülmüştür. Zaman tanım alanında (parametrik) Gözlemci Kalman Tanılama–Eigen Özdeğer

Gerçelleşme Algoritması (Observer Kalman Identification-Eigen Realization Algorithm-OKID-ERA) Matlab'de[14] yazılarak yapıya uygulanmıştır. Saha girdisi ve yapısal noktaların tepki hikayelerinin frekans içeriği Fourier genlik spektrumları (FGS) Şekil 1 solda verilmiştir. Genel yapısal davranışa katkı vermeyen gürültü 0.2Hz-50Hz gibi uygun filtre eşik değerleriyle süzdürülüp FGS'nun seçilebilirliği yükseltilmiştir. Girdiye göre kat tepkilerini yansıtan transfer fonksiyonu (TF) ise Şekil 1 sağda çizilmiştir. Genel (global) tepkiyi kat serbestliklerinin ortak davranışıyla oluşan tepecik kümeleşmeleriyle açıklıyor ve hakim modlar olarak değerlendiriyoruz. Diğer taraftan parametrik analizden elde edilen transfer fonksiyonları aday modelin ayıklayabildiği hassaslık ve modal parametre tahmin kalitesini yansıtan modal tutarlılık ölçütü Şekil 2 solda verildiği gibi %80-%90 bandı ve üstünü gösteren mertebeler yeterli görülmüş ve hesaplanan x yönü kat transfer fonksiyonları Şekil 2 sağda çizilmiştir. Modal frekansların birbirine girmiş çatal tepecikleri yapının burulmayla etkileşimli davrandığını göstermektedir. Spektral ve parametrik analizde uyumluluk ve bilgi tamamlama özelliği Şekil 1 ve 2'de görülürken yöntemlerin verdiği transfer fonksiyonlarının benzer yapısal karakteristiği yansıtması deneysel yapı davranış bilgilerinin güvenilirliğinin göstergesidir. Bu bölümde çarpıcı sonuçların elde edildiği planda benzer olan Bina-1 (Ahmet Levent-A Zemin+6Normal kat) ve Bina-2 (Aydın Bak-2 Zemin+5Normal kat) çalışmaları tartışılmıştır [6].

### *4.2. Sonlu Eleman Modeli ve Güncelleme*
*(FE Model and Calibration)*

Bina-1'in proje özellikleri ve ulaşılan malzeme ve zemin rapor bilgileriyle ham analiz modeli bir SE programı (SAP2000) [15] yardımıyla kurulmuş ve uygulanacak güncellemelerle güvenilir yapı nümerik modelinin elde edilmesi amaçlanmıştır. TDY [4] planda ve düşeyde düzenli bir binanın döşemelerini rijit plak çalıştırırken iki yatay yerdeğiştirme ve burulma serbestliklerini göz önüne alır. Her bir yön için hesaba katılacak yeterli titreşim modu sayısını ise bina toplam kütlesinin %90 katılımıyla belirler. Yönetmelik kriterlerini sağlamayan mevcut yapı analiz modellerinin dinamik test sonuçlarıyla desteklenmesi gerçeğin yansıtılması açısından önemlidir. Çalışılan yapının dinamik testleri burulmalı yanal modlar verirken güncellenmiş model mod şekillerinin deneysel modlarla örtüşmesi beklenir. Burada saf ayrık modlu yapıdan daha karmaşık bir bina karakteristiğiyle karşılaşmamız MAC'ın ve katların mod şeklindeki yerini öne çıkaran COMAC'ın güncellemedeki önemini anlamamızı sağlamaktadır. Ham SE modal analizinin etkin kütle oranları değerlendirilerek yapı hakim modları Tablo 1'de, güncellenmiş model için ise Tablo 2'de deneysel hakim mod frekanslarıyla beraber yazılmıştır. Modal frekansların yaklaşıklığını mod şekillerinin katlar boyunca gerçekleşen MAC ölçütüyle verilen uyum içinde sağlaması güncellemede gelinen noktanın yeterli olduğunu göstermektedir. Tablo 1 ve 2'de yapının taşıyıcı sisteminin yanal modlarının saf olmadığını burulma etkisinde olduğunu taşıyıcı sistem özelliği olarak Şekil 1 ve 2'de deneysel FGS ve TF çizimlerinde birbirine girmiş çatal tepeciklerde gözlemlenmektedir. Örnek olarak x yönünün deneysel ve sayısal analiz modlarının istatistiki mukayesesi olan MAC değeri özellikle ilk 3 modda 1'e yakın değerlerle gerçekleşirken, kısmen de 4. modda tutarlılık ölçütü iyileştirilmiştir. Elastik modül ($E$) değerinde yapılan küçük ayarlamalarla tutarlılığın yükseldiği güncelleme öncesi ve sonrası MAC ve IMAC grafikleriyle Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 5'de x yönünde yapının sırasıyla ham ve güncellenmiş nümerik model modlarının COMAC dağılımı ve iyileştirilmeyle izlenen katların modlara verdiği katkıların yükseldiği görülmektedir. Şekil 3'de görülen düşük COMAC değerli katların rijidliklerine uygulanan küçük değer değişimleri kabül edilebilir MAC ve IMAC değerlerine model tutarlılığını ulaştırmıştır.

Mevcut yapının anatomisini yansıtan nümerik model için seçilen elastik modül ($E$) parametre değerinin doğru ve hızlı uygulanabilmesi Eş. 10'da verilen MAC verimlilik ölçütünün izlenmesiyle Bina-1 için Şekil 6'de görüldüğü gibi gerçekleşmiştir. Faktör $a'_i$ 'nün $E$ değerine hassaslığı sıçramalardan anlaşılırken, kalibrasyonda ardışık iki sonuç arası fark %2'ye kadar onuncu denemede küçülerek yeterli yakınsaklığa ulaşılmış ve 20MPa'dan başlayan değer denemeleri 18.4Mpa'da sonlandırılmıştır.



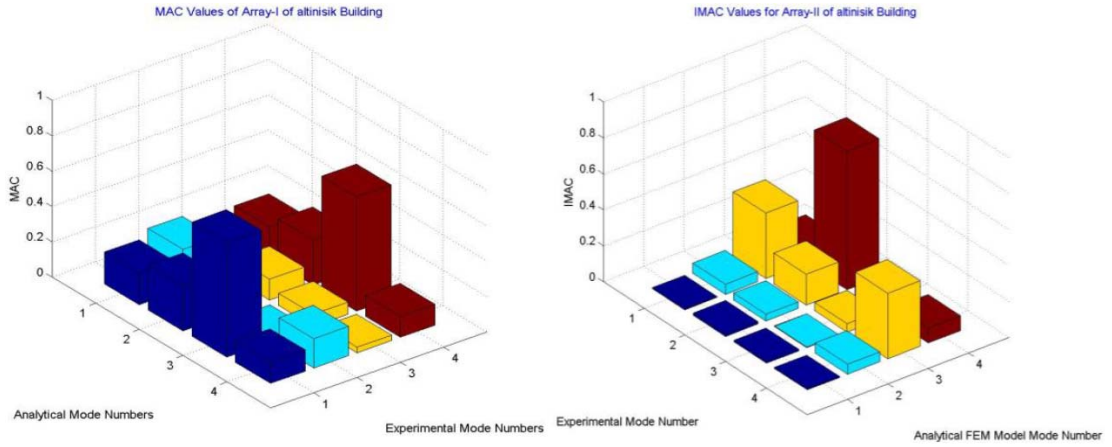

**Şekil 2.** Tahmin gücü (sol) x yönü çevrel titreşim analizi yapı TF (OKID-ERA) (sağ)
(Estimation sensitivity (left) TF(OKID-ERA) from ambient vibration analysis in x direction (right))

**Tablo 1.** Ham Nümerik Model Modal Analiz ve Deney Sonuçları
(Results of the Raw Model Modal Analysis and Experiments) [14]

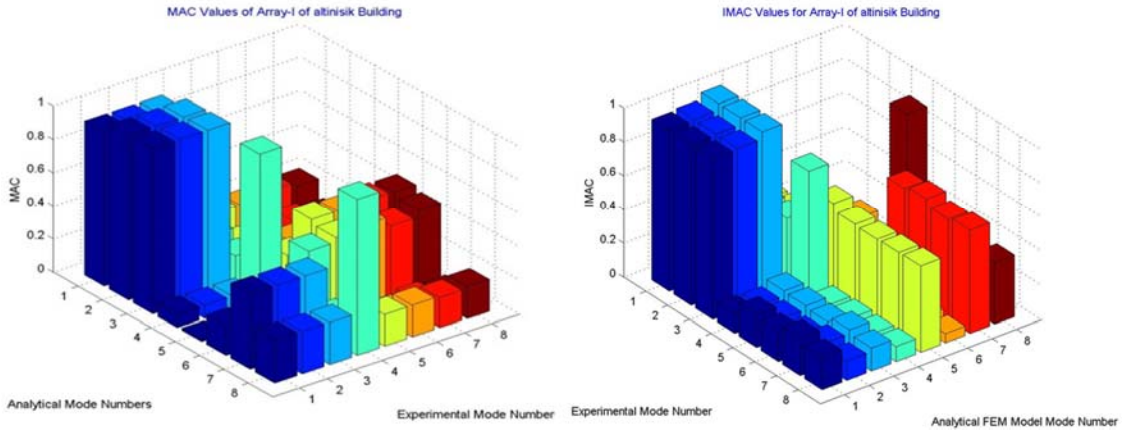
| Modal Kütle Katılım Oranları | | | | | | | | OKID-ERA | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Analiz Tipi | Analiz No | Periyod | Frekans | UX | UY | UZ | RZ | Frekans-X | Frekans-Y |
| | | Sn. | Hz. | Birimsiz | Birimsiz | Birimsiz | Birimsiz | Hz. | Hz. |
| Mode | 1 | 0,529831 | 1,8874 | 0,83787 | 1,54E-05 | 1,47E-08 | 0,16511 | 2,25 | |
| Mode | 2 | 0,45923 | 2,1776 | 0,00442 | 0,0272 | 9,69E-09 | 0,15166 | | |
| Mode | 3 | 0,435741 | 2,2949 | 6,81E-05 | 0,79368 | 2,73E-07 | 0,511 | | 2,35 |
| Mode | 4 | 0,175641 | 5,6934 | 0,09897 | 1,2E-06 | 1,72E-07 | 0,01978 | 5,72 | |
| Mode | 5 | 0,148377 | 6,7396 | 0,00041 | 0,00243 | 4,07E-08 | 0,02069 | | |
| Mode | 6 | 0,13938 | 7,1746 | 4,21E-06 | 0,10483 | 2,47E-06 | 0,06401 | | 7,78 |
| Mode | 7 | 0,104674 | 9,5534 | 0,03572 | 2,05E-07 | 1,78E-07 | 0,00723 | 9,87 | |
| Mode | 8 | 0,084904 | 11,778 | 0,00011 | 0,00055 | 2E-09 | 0,00895 | | |
| Mode | 9 | 0,078508 | 12,737 | 6,85E-07 | 0,04135 | 1,69E-06 | 0,02392 | | 13,1 |
| Mode | 10 | 0,074888 | 13,353 | 0,01682 | 3,8E-08 | 1,31E-06 | 0,00342 | 13,84 | |
| Mode | 11 | 0,061579 | 16,239 | 2,42E-06 | 1,52E-06 | 0,09993 | 1,04E-06 | | |
| Mode | 12 | 0,061266 | 16,322 | 3,9E-06 | 1,56E-06 | 0,10511 | 9,61E-06 | | |

**Tablo 2.** Güncellenmiş Nümerik Model Modal Analiz ve Deney Sonuçları
(Results of the Upgraded Model Modal Analysis and Experiments) [14]

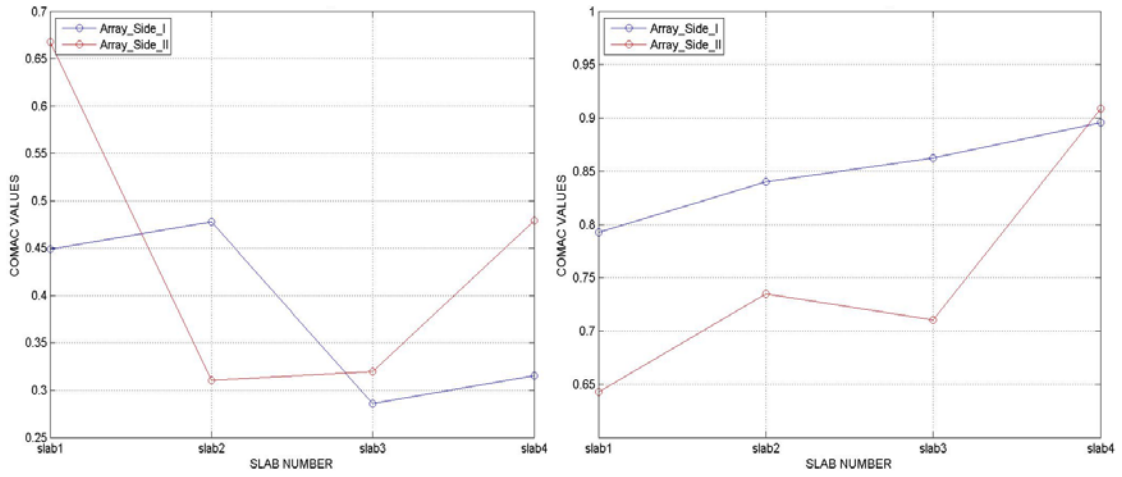
| Modal Kütle Katılım Oranları | | | | | | | | OKID-ERA | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Analiz Tipi | Analiz No | Peryiod | Frekans | UX | UY | UZ | RZ | Frekans-X | Frekans-Y |
| | | Sn. | Hz. | Birimsiz | Birimsiz | Birimsiz | Birimsiz | Hz. | Hz. |
| Mode | 1 | 0,465622 | 2,1477 | 0,60725 | 0,00216 | 2,713E-06 | 0,02426 | 2,25 | |
| Mode | 2 | 0,426673 | 2,3437 | 0,03405 | 0,74398 | 1,296E-07 | 0,16295 | | 2,35 |
| Mode | 3 | 0,414659 | 2,4116 | 0,20421 | 0,07413 | 3,923E-06 | 0,64312 | | |
| Mode | 4 | 0,153288 | 6,5237 | 0,0827 | 0,00011 | 1,427E-06 | 0,00538 | 5,72 | |
| Mode | 5 | 0,136745 | 7,3129 | 0,01014 | 0,05365 | 1,814E-06 | 3,101E-05 | | 7,78 |
| Mode | 6 | 0,134681 | 7,4249 | 0,00751 | 0,05436 | 2,03E-07 | 0,09896 | | |
| Mode | 7 | 0,091367 | 10,945 | 0,032 | 9,516E-06 | 2,19E-06 | 0,00309 | 9,87 | |
| Mode | 8 | 0,079074 | 12,646 | 0,00297 | 0,00202 | 1,889E-06 | 0,0086 | | |
| Mode | 9 | 0,076342 | 13,099 | 0,00009607 | 0,04009 | 9,948E-06 | 0,02796 | | 13,1 |
| Mode | 10 | 0,067762 | 14,758 | 0,01424 | 9,33E-07 | 1,208E-05 | 0,00158 | 13,84 | |
| Mode | 11 | 0,061024 | 16,387 | 3,499E-07 | 3,167E-05 | 0,13872 | 4,98E-07 | | |
| Mode | 12 | 0,060713 | 16,471 | 3,862E-08 | 2,765E-05 | 0,13485 | 5,015E-05 | | |




**Şekil 3.** X yönü ham nümerik model ve deneysel modların MAC ve IMAC ilişkisi
(MAC and IMAC results of the X direction raw model modal analysis and Experiments)




**Şekil 4.** X yönü güncellenmiş model ve deneysel modların MAC ve IMAC ilişkisi
(MAC and IMAC results of the X direction upgraded model modal analysis and experiments)



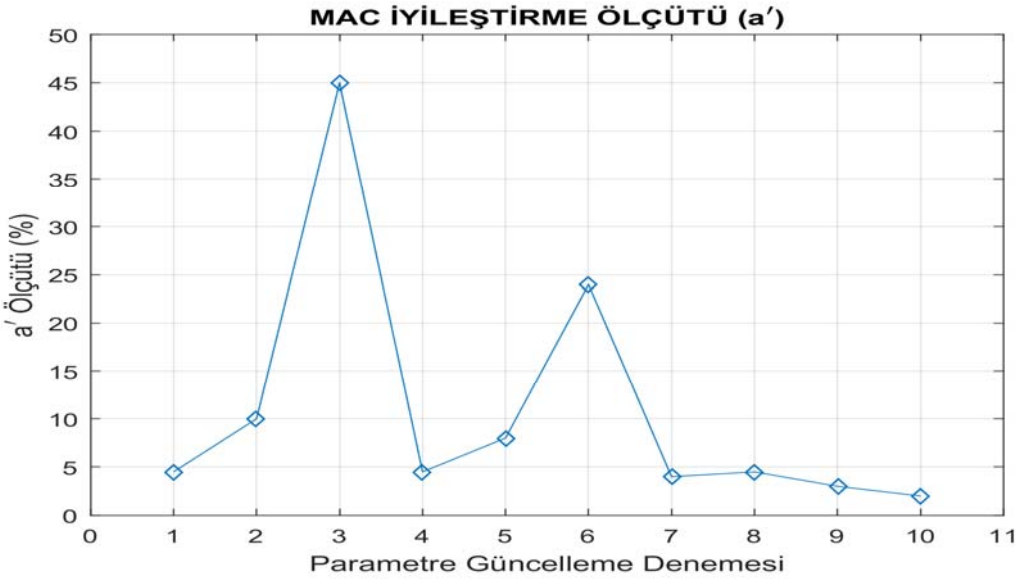

**Şekil 5.** X yönü ham (sol) ve güncellenmiş (sağ) nümerik modellerin COMAC dağılımı
(COMAC results of the X direction raw model analysis (left) and upgraded model analysis (right)).

### *4.3. Güncellenmiş Modelin Analiz Sonuçlarına Katkısı*
*(Contribution of The Model Calibration in FE Analysis)*

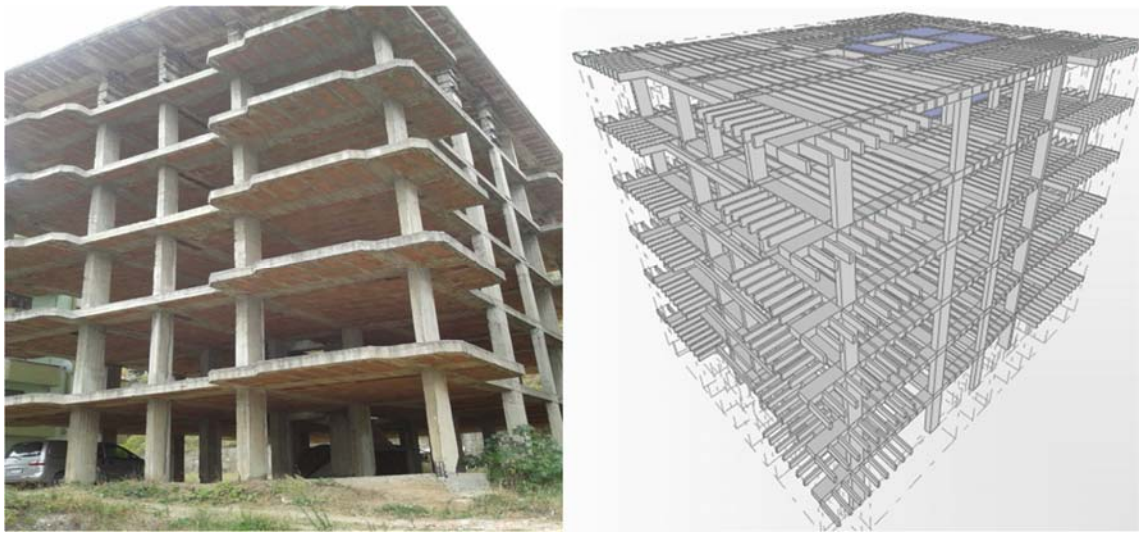
Proje [6] kapsamında test edilen yapılardan Bina-2 Şekil 7'de görüldüğü gibi nümerik model oluşturularak güncellenmiş ve TDY-2007'de [4] genel çerçevesi çizilen hasar görebilirlik analizlerinde kullanılmıştır. Bina üzerinde kaydedilen çevrel ve zorlama titreşim hikayeleri Şekil 8'de, yapısal titreşim sinyallerinin karakteristik spektrumları Şekil 9'da ve mod tahmin tutarlılık mertebeleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Çalışılan yapının ham nümerik modelinin barındırdığı belirsizliklerin neden olabileceği hataların minimize edildiği mod şekil uyumluluğunu gösteren MAC değerleri ise Şekil 11'de çizilmiştir. Kalibre edilmiş SE modelinin ve yapı üzerinden alınan kayıtların verdiği modal frekanslar ve mod şekillerinin uyumluluğu x ve y yönünde ilk 4 mod için en düşüğü %80 değer ile diagonal band üzerinde gerçekleştiği görülmektedir.

### *4.4. Hasar Benzeşiminde Güncelleme*
*(Calibration In Damage Simulation Studies)*

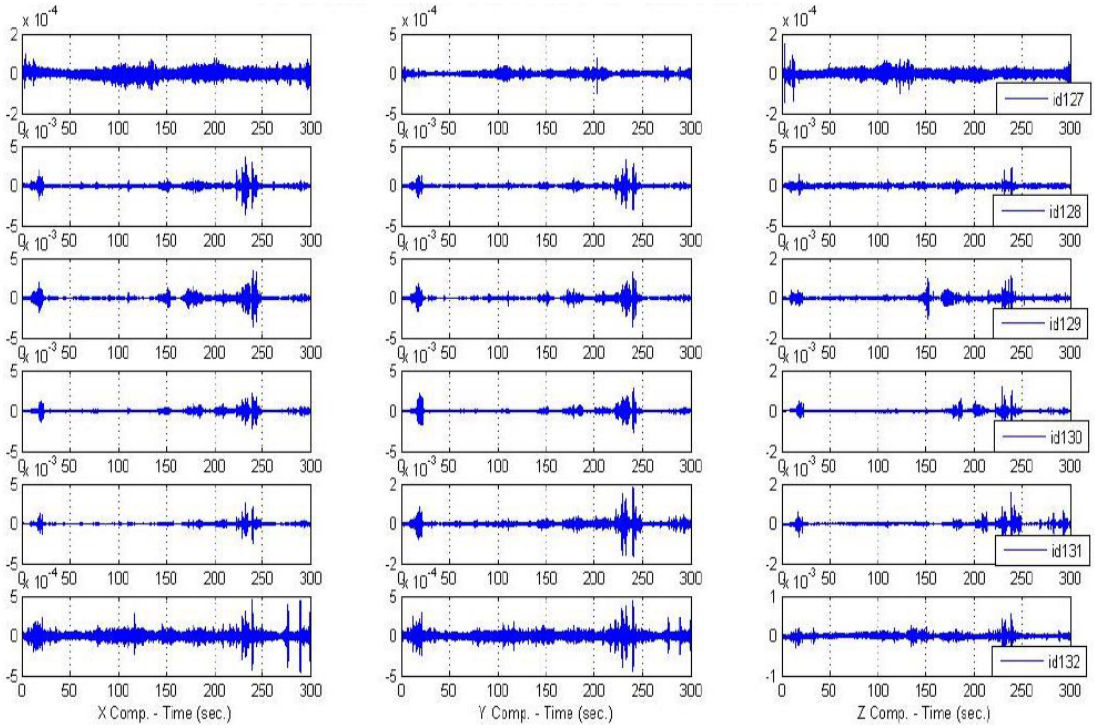
TDY-2007'de [4] mevcut binaların değerlendirilmesi için önerilen artımsal itme analizi doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde; (a) Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi (EDİA), (b) Artımsal tek mod itme analizi (TMİA), (c) Artımsal çok mod itme analizi (ÇMİA) ve (d) Zaman tanım alanında analiz (ZTAA) ile binanın can



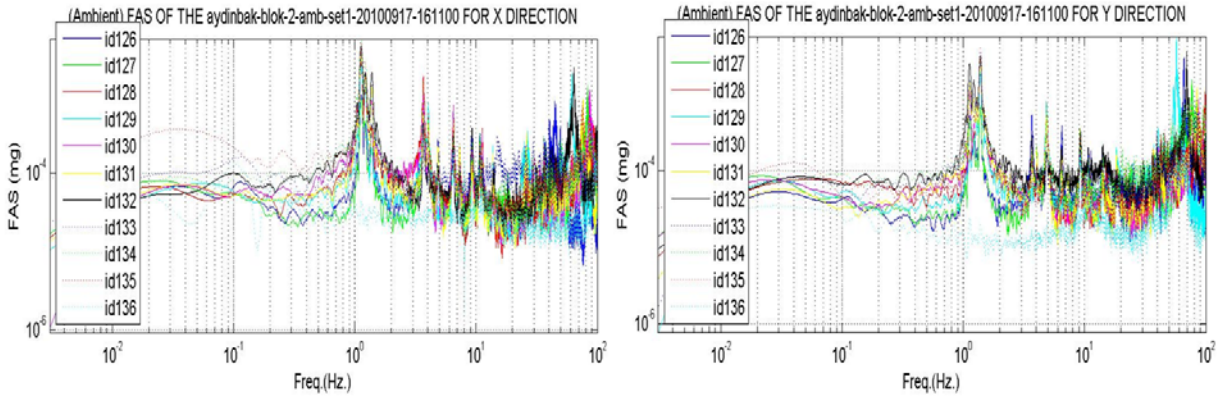

**Şekil 6.** Güncelleme denemelerinde çalışma parametresinin başarı ölçütü
(Improvement effects in MAC and IMAC results of the X direction raw model analysis and Experiments).



**Şekil 7.** Zemin + 5Nkat (Bina-2) BA karkas binanın resmi ve nümerik modeli
(Base + 5stories(Building-2) RC frame view and numerical finite element model) [16]

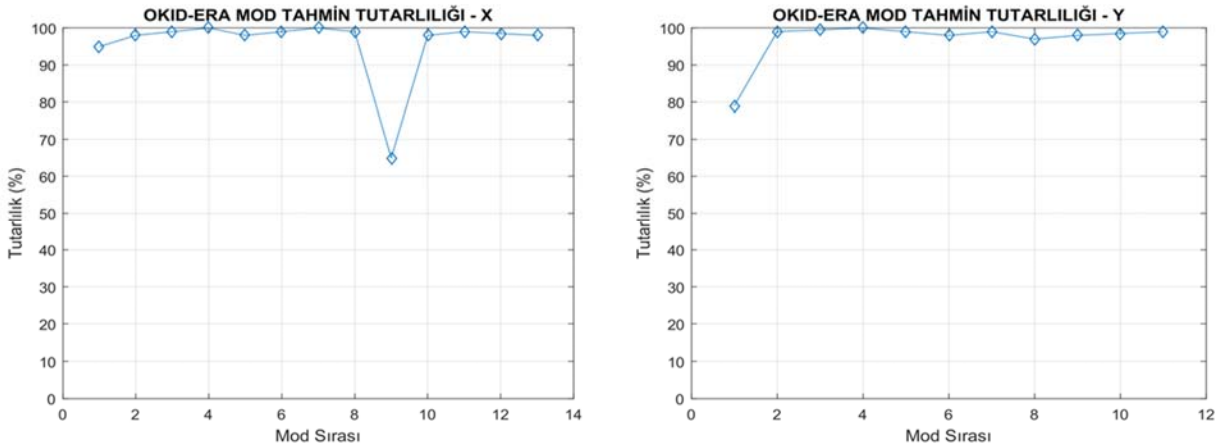



**Şekil 8.** Çevrel titreşimden kaynaklanan yapısal davranış noktası kayıtları (Structural response histories during ambient vibrations)

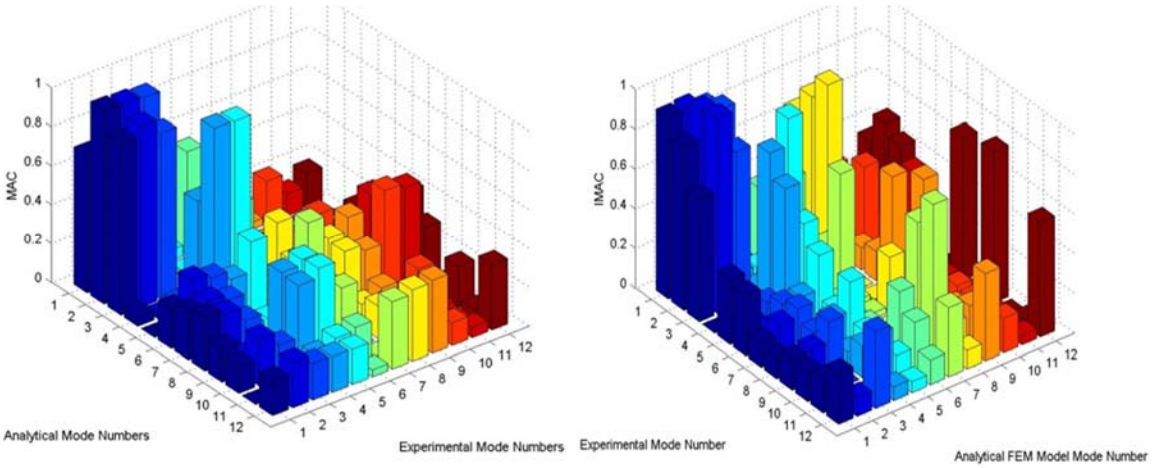



**Şekil 9.** Çalışılan binanın x (sol) ve y (sağ) yönü çevrel titreşimlerinin modal frekansları
(Fourier Amplitude Spectra of the ambient responses for the building under the study x direction (left) and y direction (right)).

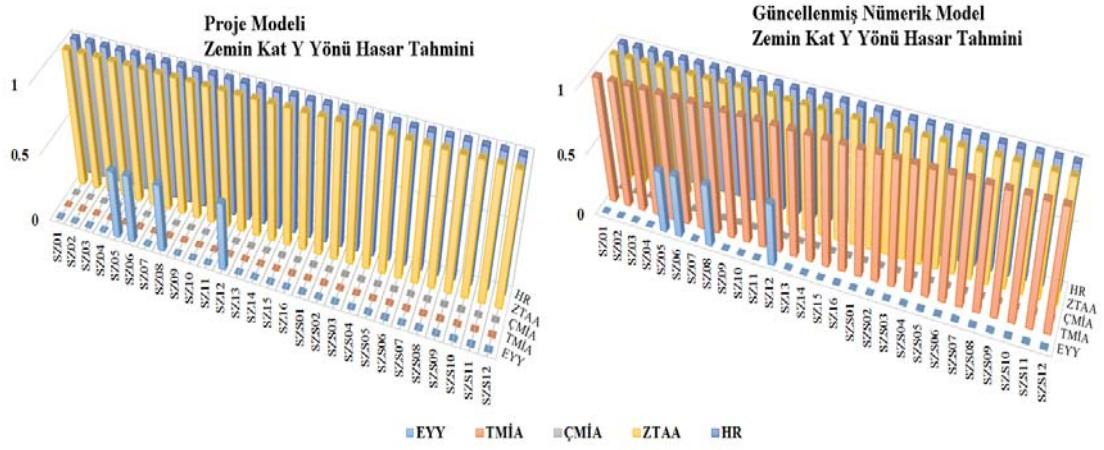
güvenliği performans seviyesi için tanımlanan şiddetli deprem için uygulanmış ve elde edilen plastik şekil değiştirme istemleri deprem sonrası tespit edilen eleman deformasyon verileriyle oluşturulan hasar rölövesi (HR) ile karşılaştırılmıştır. Analizler ham ve güncellenmiş nümerik model için yürütülmüş ve güncelleştirmenin etkisini gösteren tipik sonuçlar aşağıda tartışılmıştır. TDY'nin 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan şiddetli depremi can güvenliği performans seviyesi için spektral analizde ve Yarımca petrokimya tesislerinde (YPT) 200Hz'de (dt:0.005sn.) kaydedilmiş ana şok ise zemin şartlarının benzerliğinden dolayı işlem yapılmadan zaman tanım alanında girdi kuvvet olarak kullanılmıştır. Sonuçların kolay mukayese edilebilmesi için kapasiteyi karşılayan elastik tam plastik mafsallı çerçeve elemanların birleşim uçlarından biri hasar aldığında eleman hasarı %50 ikisi aldığında eleman hasarı %100 olarak değerlendirilip hasar röleveleriyle beraber analiz sonuçları ham nümerik model için şeklin solunda güncellenmiş nümerik model için ise sağında grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 12'de zemin kat kolonlarının y yönü için güncellemenin verdiği katkı TMİA'de yüksek olmasına rağmen, EDİA ve ÇMİA sonuçları güncellemeden etkilenmemiştir. ZTAA ise sonuçlardaki tutarlılık muhafaza edilmiştir. Şekil 13'de 1. normal kat kolonlarının x yönü için güncellemenin verdiği katkı ÇMİA'de ve ZTAA'de yüksek olmuş EDİA ve TMİA sonuçlarıyla beraber hasarsız kolonlar tekrar üretilmiştir. Şekil 14'de hasarsız olan aynı kat için bu defa y yönü sonuçları görülmektedir.



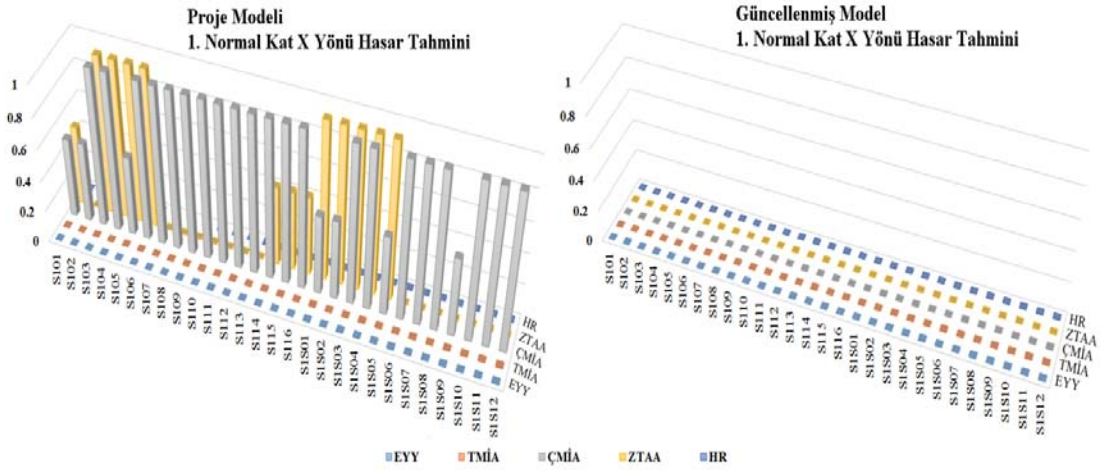

**Şekil 10.** X (sol) ve y (sağ) bileşenleri için modal tutarlılık oranlarının aday modlara göre dağılımı
(Modal assurance levels of the candidative modes for x (left) and y (right) components)



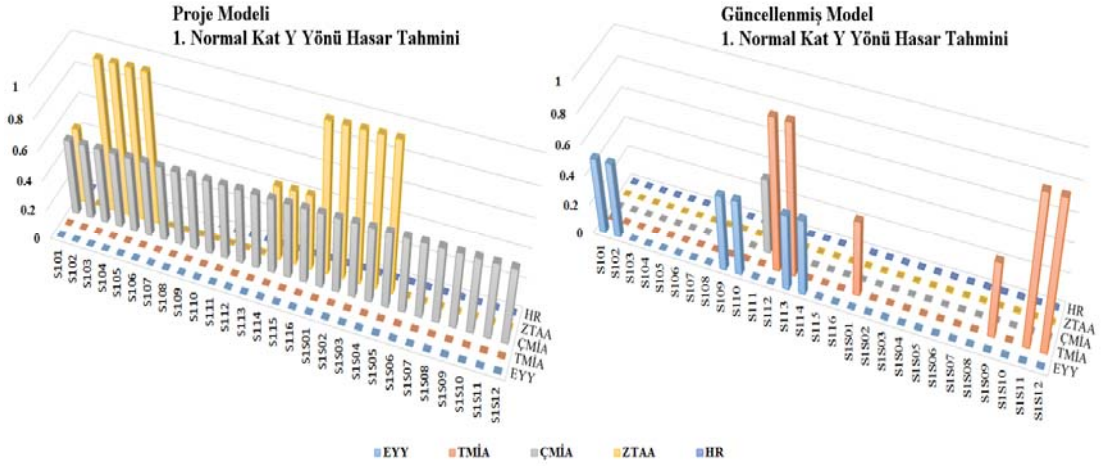

**Şekil 11.** X (sol) ve y (sağ) bileşenleri MAC oranlarının aday modlara göre dağılımı
(MAC value distribution of the candidative modes for x (left) and y (right) components)



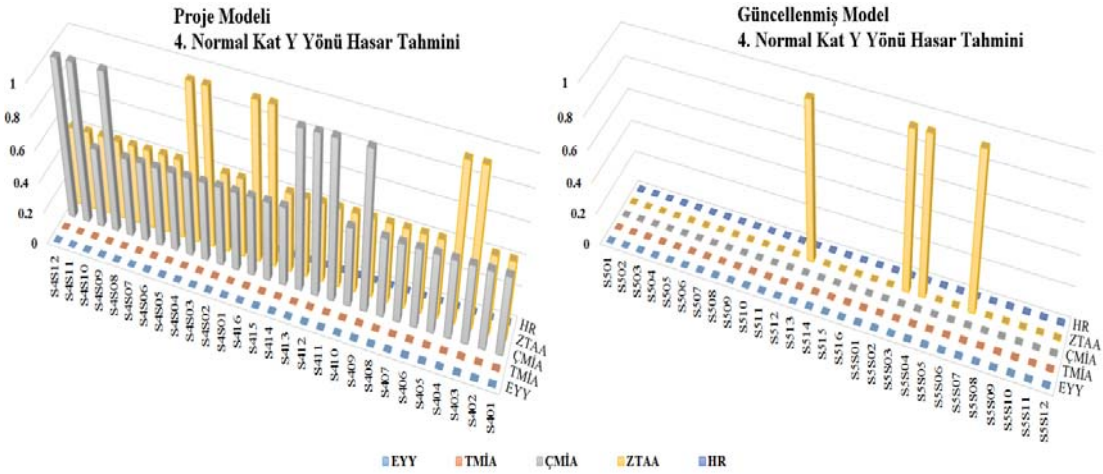

**Şekil 12.** Zemin kat, Y yönü için rölöveden ham (sol) ve güncellenmiş (sağ) nümerik model analiz sonuçları
(Results of the damage analysis for the basement in Y direction, inferred from project (left) and improved model (right))




**Şekil 13.** Birinci normal kat, X yönü için rölöveden ham (sol) ve güncellenmiş (sağ) nümerik model analiz sonuçları
(Results of the damage analysis for the first floor in X direction, inferred from project (left) and improved model (right))




**Şekil 14.** Birinci normal kat, Y yönü için rölöveden ham (sol) ve güncellenmiş (sağ) nümerik model analiz sonuçları
(Results of the damage analysis for the first floor in Y direction, inferred from project (left) and improved model (right))




**Şekil 15.** Dördüncü normal kat, Y yönü için rölöveden ham (sol) ve güncellenmiş (sağ) nümerik model analiz sonuçları
(Results of the damage analysis for the forth floor in Y direction, inferred from project (left) and improved model (right))

Ham nümerik model ÇMİA ve ZTAA yöntemleriyle büyük hasar verdirirken, güncellenmiş model ile bu iki yöntemin sonuçları hasar rölövesiyle uyumlu olarak hasarsız çıkmış, EDİA ve TMİA yöntemleri ise bir kaç elemanda hasar verdirdiği görülmüştür. Model güncelleme TDY önerisi doğrusal elastik olmayan statik itme analizlerinden bazısının sonuçlarını iyileştirirken bazısında kayda değer bir gelişme göstermemiş ve bazısında önemsiz bozulmaya Şekil 14'de olduğu gibi neden olmuştur. Bir diğer çarpıcı analiz özetinin yer aldığı Şekil 15'de binanın üst katlarında yapısal elemanlarda hasar beklenmemesine rağmen ÇMİA ve ZTAA yöntemleri soldaki ham nümerik model ile binanın 4. normal katında her kolon elemanında tek veya çift uçta hasar verdirirken sağdaki güncellenmiş model ile bütün metodlar hasarsız verirken sadece ZTAA bir kaç elemanda hasar üretmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Can güvenliği performans seviyesinde kullanılan tasarım depremi için TMİA'de yapı bütününde ZTAA'de ise zemin kat sonuçlarında güncelleme yüksek katkı verirken, EDİA ve ÇMİA sonuçları çok değişmemiştir. Buna mukabil, 1. normal kat kolonlarında diğer metodların yanısıra ÇMİA ve ZTAA sonuçları hasar rölövesiyle uyumlu hale gelmiştir. Ham nümerik modelin ÇMİA ve ZTAA sonuçları hasar beklenmeyen üst kat kolonlarını hasarlı verdirirken güncellenmiş SE modeli rölövedeki hasarsızlığı tekrar üretebilmiştir. Hesaba katılan mod sayısıyla mod şekillerinin benzeşim potansiyeli ÇMİA sonuçlarını etkilemiştir. Yöntemlerden TMİA ve kısmende EDİA sonuçları yönetmelik önerisi hedef deplasman civarında yüklenilmesiyle mevcut durum tekrar üretilmiştir. TDY'de mevcut yapı performansının çalışılmasında önerilen zayıflatılmış rijidlik yaklaşımı güncelleme paremetresinin rijidlik olarak seçilmesinde esin kaynağı olmuştur. Hasar ve hasarsızlık tutarsızlıkları göz önüne alındığında güncellemede rijidliğin yanısıra başka parametreler de düşünülmelidir. Doğrusal olmayan yapı davranışı ve kalıcı eleman hasarlarının çok modlu itme analizlerindeki geçerliliği tartışmalı basitleştirme ve linerite kabüllerinin hasar tahminindeki tutarsızlıkları artırdığı unutulmamalıdır.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Mevcut yapı anatomisinin tanılanmasına yönelik günümüz izleme teknolojilerinin sunduğu titreşim ölçümlerinin kullanıldığı yapı tanı analizleri yapı parametrelerini doğru değerlendirme ve nümerik modelleri rasyonel güncelleme imkanı vermektedir. Güncelleme katkısı binanın bazı katlarında bazı metodların sonuçlarında iyileştirme yaparken bazısında sonuçları değiştirmemiş bazılarında ise önemsiz mertebede bozmuştur.

Genelde sonuçların hasar rölövesiyle uyumlu veya mevcud duruma daha yakın hasar dağılımı çıkardığı görülmüştür. TDY'ne göre yapının hesaba katılan mod sayısıyla mod şekillerinin benzeşim potansiyeli ÇMİA sonuçlarını etkilemektedir. Yöntemlerden TMİA'nin ve kısmende EDİA sonuçları yönetmelik önerisi hedef deplasman civarında yüklenilmesiyle mevcut durum tekrar üretilmiştir. Hasar ve hasarsızlık tutarsızlıkları göz önüne alındığında güncellemede rijidliğin yanısıra başka parametreler de düşünülmelidir. Doğrusal olmayan yapı davranışı ve kalıcı eleman hasarlarının çok modlu itme analizlerindeki geçerliliği tartışmalı basitleştirme ve linerite kabüllerinin hasar tahminindeki tutarsızlıkları artırdığı unutulmamalıdır. Diğer taraftan, mevcut önemli yapıların hasarsız titreşim test sonuçlarının güncellemede efektif kullanılabilmesi yapı bilgi düzeyi yükselmiş analiz modellerinin güvenilirliğini artıracaktır. Güncelleme işlemi ve barındırdığı ihtimal hata ve belirsizliklerin iyi bilinmesi, analiz sonuçlarını doğru yorumlama hasasslığı kazandırır. Yapı tanılama sonuçları mevcut yapıların periyodik veya önemli bir deprem sonrası yapı sağlığı kontrollerinde durum analizlerine katkı vereceği gibi inşaatı henüz bitmiş yapıların iskan öncesi üretim kalitesine belge oluşturabilir ve sigortalama uygulamalarında bilimsel değerlendirme ölçütü olarak kullanılabilir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma kullanılan veriler Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 108M303 No'lu proje kapsamında izlenmiş ve derlenmiştir. Katkısından dolayı teşekkür ederim.

## SEMBOLLER (SYMBOLS)

| | |
|---|---|
| $a_{ij}$ | : MAC ilişkili verimlilik ölçütü |
| $a_{Xi}$ | : testden gelen *i.* mod şeklinin kullanıldığı MAC değeri |
| $a_{Ai}(x)$ | : *x* parametresiyle güncellenen SEM'in *i.* Modunun verdiği MAC değeri |
| $a_i(x)$ , $a'_i(x)$ | : x parametreleri değerlerinin verdiği MAC ölçütü için göreceli hatalar |
| $f_{Xi}$ , $f_{Ai}$ | : saha testlerinden ve FEM analizinden gelen *i*'ninci doğal frekanslar |
| $\{F(t)\}$, $\{F\}$ | : zamanla değişen dış kuvvet, modal kuvvet |
| [M], [C], [K] | : yayılı ve yığılı yapı kütle, sönüm ve rijidlik matrisleri |
| $y_i(x)$, $\bar{y}(x)$ | : i'ninci frekansın x parametre vektörü için göreceli hatası ve ortalaması |
| $[U]^T$ | : dış kuvvetin uygulanacağı serbestlik matrisi |
| $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{X\}$ | : ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörleri |
| $\{\ddot{w}\}$, $\{\dot{w}\}$, $\{w\}$ | : genelleştirilmiş modal ivme, modal hız ve modal yerdeğiştirme vektörleri |
| $\{\Phi_X\}_i$ $\{\Phi_A\}_j$ | : *i*' ninci modun deneysel mod şekli, *j*' ninci modun analitik mod şekli |
| $\phi_{Xi}$ , $\phi_{Aj}$ | : testlerden gelen *i*'ninci mod şekli, analitik modelin *j*'ninci mod şekli |

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

**1.** Sanayei M., Esfandiari A., Rahai A., Bakhtiari-Nejad F., Quasi-linear Sensitivity-based Structural Model Updating Using Experimental Transfer Functions,

Structural Health Monitoring, sagepub, 11, (6), 1-15, 2012.

**2.** Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Determination of the Effect on the Dynamic Behavior of Historical Masonry Mosques Reinforced Concrete Domes by Ambient Vibration Testing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31, (3), 621-630, 2016.

**3.** Stratt Reginald W., Bridge Management - A System Approach for Decision Making, School of Doctoral Studies (European Union) Journal, pages: 67-108, 2010.

**4.** TDY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, BİB, 2007.

**5.** John E.M., Link M., Friswell M.I., The Sensitivity Method in Finite Element Model Updating: A Tutorial, Mechanical Systems and Signal Processing, 25, 2275–2296, Elsevier, 2011.

**6.** Kutanis M., Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme Yöntemlerinin Deprem Sonrası Türkiye'de Gözlenen Yapı Performansları ile Karşılaştırılarak Geliştirilmesi, Proje No: 108M303, TUBİTAK, 2011.

**7.** Korkmaz A., Aktaş E., Probability Based Seismic Analysis for R/C Frame Structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 21, (1), 55-64, 2006.

**8.** Türker, T., Bayraktar, A., Vibration Based Damage Detection in a Scaled Reinforced Concrete Building by FE Model Updating, Computers and Concrete, 14 (1), 73-90, 2014.

**9.** Butt F., Omenzetter P., Seismic Response Trends Evaluation and Finite Element Model Calibration of an Instrumented RC Building Considering Soil-Structure Interaction and Non-Structural Components, Engineering Structures, 65, 111-123, 2014.

**10.** Allemang Randall J., The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse, Journal of Sound and Vibration, 14-21, August, 2003.

**11.** Figueiredo E., Park G., Figueiras J., Farrar C., Worden K., Structural Health Monitoring Algorithm Comparisons Using Standard Data Sets, Los Alamos National Laboratory, LA-14393, 2009.

**12.** Mitchell L.D., Increasing the Sensitivity of the Modal Assurance Criteria to Small Mode Shape Changes, International Modal Analysis Conferance, 64-69, 2001.

**13.** AREL Deprem İzleme Sistemleri, http://www.areldeprem.com.tr/tr/urunler, erişim: 2017.

**14.** Mathworks, Signal Processing Toolbox for Matlab, Release 2012b, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2013.

**15.** SAP2000 Nonlinear, V-16, Comp. & Struct. Inc., Berkeley, California, USA, 2015.

**16.** Sak Ö.F 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Almış Bir Binanın Yapı Tanılama Sonuçlarıyla Güncellenmiş Modelinin Analizi, Master Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.

**17.** Gerek E., Soyluk A., Investigation of Earthquake Resistance at Primary School Buildings in Turkey, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31, (3), 485-490, 2016.