MEVCUD YAPILAR, NÜMERİK MODELLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİ VE ANALİZ SONUÇLARINA ETKİLERİ

K. Beyen[1]

[1] *Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
Email: kbeyen@kocaeli.edu.tr

ÖZET:

Yapı hasarı yapı elemanlarının zamanla değişen statik ve/ya dinamik şartlar altında tasarım/imalat özelliklerindeki değişimlerin yapı toplam davranışında gösterdiği mukavemet eksilmelerinin/taşıma gücü aşılmalarının sonuçlarıdır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra bölgede yürütülen çalışmalar yapıların mevcut durumunun projesinde öngörülen tasarım performansını sağlayamadığı gibi, hasar alan/almayan bütün yapıların da yeniden tanılanması gerekliliğini göstermiştir. Bu çalışmada yapıların performansını analiz ederken ve değerlendirirken kullandığımız Sonlu Eleman Analizi (SEA) içinde çalıştığımız yapı fiziğinin karşılığı olan ve yapıyı tam temsil ettiğine inandığımız nümerik (analitik) SEA modelinin tartışmaya açık olan güvenilirliğini artırıcı bazı hususlara dikkat çekilecek ve nümerik model iyileştirme için yapı üzerinde izlenen çevrel ve zorlama kuvvetler altında gösterdiği karekteristik davranışlar referans alınarak temsil gücü yüksek güvenilirlikte güncelleme (kalibrasyon) yöntemleri gerekçeleriyle tartışılacak ve örnekleri sizlerle paylaşılacaktır. Yapıların denetim ve ruhsatlandırılmasına yeni bir tanım getirilmesi ve tasarıma uyan imalat kalitesinin sertifikalandırılmasının artık çok gerekli bir ihtiyaç olduğu bu çalışmada anlaşılmıştır. Bu son ruhsatlandırma işlemi yapıların bitmiş haldeki son durumunu (performansını) ve yapısal karekteristiğini yansıtacak proje-hesap tespit/tadilat belgesi niteliğinde olacaktır. Gelecekte olabilecek bir depremin yapıda neleri değiştirebileceği, dolayısiyle hasar mertebe değerlendirmesi (sigortacılık açısından, güçlendirme açısından, ves.) son bilinenin performansın referans alınmasıyla yanıltıcı değerlendirmelerin ötesinde daha bilimsel ölçütler içinde değerlendirilme imkanı gerçekleşecektir. Yapı durum tespiti daha sonra izlenecek yapı sağlığı izleme algoritmalarına güvenilir temel referans bilgi olarak da çok önemli katkı verecektir.

ANAHTAR KELİMELER: Nümerik model güvenilirliği, model kalibrasyonu, çevrel titreşim, zorlama titreşim, modal analiz, modal gerçekleşme kriteri (MAC).

1. GİRİŞ

1.1. Geçmişden Günümüze Model Güncelleme

Modelleme sürecinde kullanılan yapı geometrisi, yapısal malzeme bilgileri ve analiz içindeki bilinmeyenlerin veya belirsizliklerin giderilmesi için yapılan güncellemenin (kalibrasyonun) analitik sonuçları iyileştirdiğini 1970lerle başlayan ama 1990larda çok güçlü olarak kullanılan deneysel modal analiz (DMA – Experimental Modal Analysis (EMA)) çalışmalarının mekanik ve uzay taşıtlarında uygulanmaya başlanmasıyla önem kazandığını ve gelişimini devam ettirdiğini görüyoruz. 1990larla başlayan benzeşim (simulasyon) çalışmaları içinde model güncelleme teknolojileri (test cihaz ve düzenekleriyle, analiz metodlarıyla) bir standart araç olarak yer almış ve model tutarlılığının değerlendirilmesi – geliştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. İnşaat mühendisliği içinde ilk çıkış şartlarında olduğu gibi yapı test prototiplerini üretme ve test kuvvet uygulaması ve deprem gibi dinamik kuvvetlerin doğal ve rassallık özelliklerini bire bir üretme güçlüğünden dolayı yapı dinamik testleri biraz farklı istikamette gelişmiştir. Bu süreç mevcud mühendislik yapılarının (bina, köprü, viyadük, ves.) analizlerinde (yapı sağlığı izleme, durum tespiti, hasar görebilirlik çalışmaları içinde) özellikle saha testlerinde önemli uygulama imkanları bulmuştur. Güncellenmiş güvenilirliği yüksek nümerik model ile sanal şartların en

önemli ayağı olan test objesi birebir üretilmiş, gelecekte karşılaşılma ihtimali olan farklı yük şartları için tekrarlanabilecek sayısız farklı testi (simulasyona) yürütme imkanı oluşmuştur. Yapı testleri dışında diğer önemli uygulamalar olarak hasar tanılama çalışmalarını (Doebling ve diğ. 1998) ve örneğin köprü işletme güvenliği (Hearn 1998, Hawk ve Small 1998) gibi yapı sağlığı/işletme izlemeleri inşaat mühendisliği içinde gelişen alanlar olarak sayılabilir. İnşaat mühendisliği betonarme köprü modeli taşıyıcı sistem güncelleme uygulamalarının araştırılmasını (Cantieni, 1996 ve Pavic vd., 1998) görmekteyiz. Kablolu köprüler gibi daha kompleks yapılar için model güncelleme tabanlı yapı sağlığı izleme çalışmaları şu an için ölçme ağları ve veri toplama sistemlerinin eş zamanlı çok sayılı izleme noktasından toplanan anlık verilerin yönetimi, analizi ve sonuçlarının anlık değerlendirilerek yapı durumu hakkında anlık kararları kapsayan bir canlı yapı sağlığı oluşturulması önümüzde duran çözülmesi gereken gerçek inşaat mühendisliği problemidir. Yapı SEModeli güncelleme algoritmaları basit bina türü yapılar için bazı akademik ve ticari sonlu eleman paket programlarında yer almıştır (ANSYS - SAS, 1997 ve LUSAS, 2001).

1.2. Test ve Simulasyonlardaki Belirsizlikler

Simulasyon çalışmalarında temelde iki belirsizlik kaynağıyla karşılaşıyoruz. Birincisi, modelimizde fizik yasalarıyla tariflemediğimiz veya tarifleyemediğimiz hususlar, ikincisi nümerik algoritmalarda henüz bilgimiz dışında olan tanımlanmamış veya basitleştirmelerin getirdiği yuvarlamaların neticesinde oluşan belirsizliklerdir. Fiziki belirsizliklere esasen sınır şartları ve dolayısiyle etkilediği başlangıç şartları, yetersiz malzeme/davranış bilgisi, geometrik bilgi eksikliği, yük/yükleme şartları, işletme/iklimsel değişimlerin neden olduğu ilave etkiler, ve kimyasal etkiler neden olabilmektedir. Diğer taraftan; kullanılan teorik modelin yetersizliği, matematik modelin her şartda doğru sonuç verememesi, küçük hesaplama elemanı hataları, kullanılan küçük deformasyon teorisi, nümerik denklem çözüm yaklaşımlarının hataları, program kullanıcı hataları ve amprik yöntemlere dayanan yetersiz yönetmelik yuvarlamaları nümerik belirsizliklere neden olabilmektedir. Sayılan bu etkenlerin bir kaçının olması ve maruz kalınma sıklığına bağlı olarak belirsizlikler oluşmaktadır. Yukarıda sayılan değişik ve farklı seviyelerdeki hata ve belirsizlik kaynaklarının toplam etkisi SE modelinin sonuçlarını tartışılır hale getirmektedir. Model tutarlılığının yükseltilmesi için örneğin bir mevcud yapıda ilave ölçümlerin yapılması kaçınılmazdır. Yapı üzerinde yürütülecek dinamik veya statik testler de, neticede sınırlı imkanlarla ve sınırlı bilgi düzeyiyle uygulandığından kendi içinde başka belirsizlik kaynaklarını barındıracağı açıktır. Bunları kabaca sıralayacak olursak; (a) Test mantığına ve dolayısiyle düzeneğine bağlı hatalar, (b) Cihaz/cihaz ağı kapasitesi, (c) Veri kaydetme şartları, (d) Eksik sinyal işleme, (e) Sinyal analizinde yetersiz analiz algoritmaları yapı üzerinde yürütülecek test ve sonuçlarında belirsizlikler barındırabilmektedir. . Belirsizlik kaynaklarının sayıları bir test türünden diğerine değişsede, örneğin çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan deneysel modal analiz içinde hedeflenen modal parametre tahmini ve ihtimal bir depreme cevap olacak yapısal tepki davranışı için yukarıda saydığımız belirsizlik kaynaklarının tamamı ihtimal dahilindedir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Tarihsel gelişimi içinde bindokuzyüzyetmişlerde ilk kullanılmaya başlanan referans bilgi modal şekiller olmuş, deneysel elde edilen frekans tepki fonksiyonlarından çekilen mod ve mod şekillerinin tutarlılığını değerlendirmek amacıyla modal tutarlılık kriterleri bir istatistiki koralasyon uygulamasıyla başlamış ve buradan kök bulan mod gerçekleşme kriterinin (modal assurance critera – MAC) çok farklı türevleri zamanla karşılaşılan problemlere göre önerilmiş ve kullanılmıştır. Modal tutarlılığın ölçüsü olan mod gerçekleşme kriteri (modal assurance critera – MAC) istatistikte kullanılan uyumluluk (coherence) benzeri bir kriter olup doğru kullanıldığı zaman çok güçlü bir tutarlılık indisi olmakla beraber, yersiz ve yanlış kullanıldığı zaman yanlış değerlendirmelere kullanıcıyı götürebilmektedir. Bu çalışmada MAC ve diğer benzerlerinden önemlileri açıklanacak ve yapı üzerinde alınan ölçümlerle yürütülen tanılama çalışmalarının sonuçları model güncelleme çalışma örneği olarak sunulacaktır.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra bölgede yürütülen çalışmalar yapıların mevcut durumunun projesinde öngörülen tasarım performansını sağlayamadığı gibi, hasar alan/almayan bütün yapıların da yeniden

tanılanması gerekliliğini göstermiştir. Bu çalışmada mevcut yapıların performansını analiz ederken ve değerlendirirken kullandığımız Sonlu Eleman Analizi (SEA) içinde çalıştığımız yapı fiziğinin karşılığı olan ve yapıyı tam temsil ettiğine inandığımız nümerik (analitik) modelin tartışmaya açık olan güvenilirliğini artırıcı bazı hususlara dikkat çekilecek ve nümerik model iyileştirme için yapı üzerinde izlenen çevrel ve zorlama kuvvetler altında gösterdiği karekteristik davranışlar referans alınarak temsil gücü yüksek güvenilirlikte elde edilmiş nümerik modellerin sonuçları nasıl iyileştirdiği gösterilecektir.

2. MODEL GÜNCELLEME

2.1. Titreşim Testleri ve Yapı Davranışı

Mühendislik yapıları genelde yapı özellikleri göz önüne alınarak, serbest titreşim testlerine veya zorlama kuvvetler altında titreşim testlerine tabi tutulabilir. Yapısal noktalardan alınacak kayıtlar, tek seri dinamik yük hikayesi kaydı ve/veya toplam (çoklu seri) dinamik yük hikayesi kayıt şartlarında gerçekleşebilmektedir. Çalışılan yapı üzerinde kaydedilmiş veriler işlenerek Sonlu Eleman Modellerinin (SEModel) uygun bir kalibrasyon yöntemiyle güncellenmesi mümkündür. Güncelleme uygulanırken referans davranış verisi, güncellenecek parametrelerin doğru seçimi ve model kalibrasyon işlemi sonuç modeli etkilemektedir (Brownjohn and Xia 1999). Yapısal sistemin hareket denklemini yazarsak;

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

[M], [C] ve [K] matrislerinin yapının yayılı veya yığılı modellenmesi durumuna uygun kütle, sönüm ve rijidlik değerlerini ilgili ilişki ve serbestlik içinde tutuklarını, sırasıyla ivme, hız ve yerdeğiştirme çarpanlarıyla oluşturdukları kuvvetlerle dış kuvveti dengelediklerini, yığılı kütle için genelleştirilmiş modal ortamda yazılırsa;

$$\left[\overline{M}\right]_{diag}\{\ddot{z}\}+\left[\overline{C}\right]_{diag}\{\dot{z}\}+\left[\overline{K}\right]_{diag}\{z\}=[U]^T\{F\} \tag{2}$$

şeklini alır. Burada, diagonal matrisler modal kütle, modal sönüm ve modal rijitliği yine sırasıyla modal ivme, modal hız ve modal yerdeğiştirme ile modal iç kuvvetlere dönüştürmektedir. Sağdaki modal kuvvet ise modal vektörün transpozesiyle karşılığı olan bileşenlerine göre her modda etkimektedir. Denklem (2)'den anlaşılacağı gibi mod şekillerinin önemi her modda hesaplanacak modal yerdeğiştirmenin dolayısiyle modal kuvvetin doğru ve yükün fiziki şartlarına uygun olmasıyla anlaşılabilmektedir. Dolayısiyle güncellemede mod şeklini kabül edilebilir yakınsaklıkta ve tepkiyi de doğru verdirtecek tutarlılıkta olması yeterli olacaktır.

2.2. Model Güncelleme Aşamaları

SE model güncelleme yapı davranış bilgisi ve teorik sonuçların tekrar gözlemlenmesine bağlı olduğu gerçeği göz önünde tutulursa güncellemenin bir değişim-uygula ve etki-gözle çevirimi içinde yapılacağını anlayabiliyoruz. Güncelleme işlemine başlamadan önce (1) test verisinin kararlaştırılması, (2) yapısal tepki kayıtlarının değerlendirilmesi, izlenecek parametre seçimi, ve (3) kalibrasyon için nümerik yöntemin seçimi çok önemlidir. Nümerik yönteme karar verebilmek için ise izlenecek parametrenin hassaslık analizleri ve parametre değerinin bir sonraki adım için tahmin gücü göz önünde tutulur. Adımları açarsak; (1) SE analizlerinden gelecek mod şekilleri, modal frekanslar, modal sönümler ves. ile test verilerinden işlenmiş sonuçların aynı ortamda değerlendirilmesi gerekliliği yeni bir program/yazılımına ihtiyaç göstermektedir. Bu yazılım/tablo işlem ortamında uygulanacak nümerik güncelleme sonuçlarının tutarlılık tahkiklerini ve bu tutarlılığı yükselten izlenen parametrenin yeni değerleriyle SE modele atanmasını izlenebilir açıklık ve hızla yapılması önemlidir. (2) SE modelini oluşturan yapı global rijitlik matrisi, mod şekilleri, Frekans-Tepki-Fonksiyonları (FTF) ve davranış şekilleri ayrı bir dosyada saklanmalı ve test verilerinden elde edilen benzer çıktılarla mukayese için

kullanılmalıdır. SE yazılımı güncelleme opsiyonu altında ilgilenilen parametrelerle ilgili yeni değerler girilerek hassaslık mertebelerine bakılarak, tekrarlı analizlerle yeni güncellenmiş sonuçların deney sonuçlarıyla çapraz doğrulatmayla izlenecek iyileştirmeler sonuç almayı sağlayacaktır. (3) Model güncellemenin başarısı yeterli test verisine ve tüm frekansları kapsayan yelpazede iyi bir test örneklemesine, yapısal davranışa katkı veren (sensöre) gözleme bağlı olarak değişir. Dolayısıyla eldeki proje dökümanları, malzeme raporları, zemin raporları ves. ile yeterli olmayan ama yapı davranışını kafi güvenilirlikte veren SE nümerik model analizinin verdiği önemli mod şekillerinden yola çıkarak izleme/sensör noktaları kararlaştırılabilir ve alınacak ölçümlerle sınanabilir. Konumlandırmada yönelim hataları varsa, temel eksen düzeltmeleri yapılarak konumu düzeltilmiş kayıtlarla ortogonalite analizleri daha gerçekçi ve yapısal karekteristikleri doğrulatan değerlere ulaşılabilir. Gerçek test verileriyle çalışmadan önce sanal ortamda uygulanmak üzere örneğin çevrel titreşim girdi kayıtlarıyla SE modeli test edilebilir. Tepki hikayelerinin dinamik karekteristik özellikleriyle deneysel kayıtların dinamik karekteristik özellikleri frekans tanım alanında ve frekans-zaman tanım alanında mukayese edebilir. Sonuçları güncelleme için temel etkin yapısal/dinamik parametrenin kararlaştırılmasına katkı verecektir. Bir sonraki adımda doğrusal elastik olmayan analizlere yönelik geometrik modellemenin ötesinde malzeme davranışı ve hiperstatikliğin yapıya kazandırdığı özelliklerin nümerik modele kazandırılabilmesi için gerçek zorlama kuvvet uygulanmış test data (linear veya nonlinear (geometrik ve malzeme) davranış şartlarında) kayıtları ve SE model tepki hikayeleri (Zaman Tanım Alan Analizlerinden (ZTAA) elde edilerek) hesaplanacak dinamik karekteristik özellikler mukayese edilebilir.

3. KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

Deneysel ve nümerik veriler kullanılarak, mod gerçekleşme kriteri çerçevesinde iki vektör serisinin veya bileşenlerinin benzerliğini ve tutarlılığını lineer ilişkiyi kullanarak kritik eden literatürde izlenen metodlar aşağıda sıralanmıştır (Yun-Xin, 1999). (1) (İstatistiki olarak) ağırlıklı modal analiz kriteri (Weighted Modal Analysis Criteria – WMAC), (2) Kısmi modal analiz kriteri (Partial Modal Analysis Criterion - PMAC), (3) Mod gerçekleşme kiterinin karekökü (Modal Assurance Criterion Square Root - MACSR), (4) Ölçeklendirilmiş mod gerçekleşme kriteri (Scaled Modal Assurance Criterion - SMAC), (5) Mütekabil (karşıt denk) vektör kullanılarak mod gerçekleştirme kriteri (Modal Assurance Criterion Using Reciprocal Vectors - MACRV), (6) Frekans ölçekli mod gerçekleştirme kriteri (Modal Assurance Criterion with Frequency Scales (FMAC), (7) Koordinat tabanlı mod gerçekleşme kiriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion - COMAC), (8) Geliştirilmiş Koordinat tabanlı mod gerçekleşme kiriteri (The Enhanced Coordinate Modal Assurance Criterion - ECOMAC), (9) Karşılıklı örtüşme kriteri (Mutual Correspondence Criterion - MCC), (10) Mod düzeltme katsayısı (Modal Correlation Coefficient - MCC), (11) Ters mod gerçekleşme kriteri (Inverse Modal Assurance Criterion - IMAC), (12) Frekans tepki tutarlılık kriteri (Frequency Response Assurance Criterion - FRAC), (13) Kompleks eşleştirme katsayısı (Complex Correlation Coefficient - CCF), (13) Frekans tanım alanında tutarlılık kriteri (Frequency Domain Assurance Criterion - FDAC), (14) Koordinat ortogonalite kontrolü (Coordinate Orthogonality Check (CORTHOG).

4. ‘ MAC ’ ÖLÇÜTÜ, UYGULAMA VE HASSASLIKLAR

Doğrulatma (birbirine benzeme) ölçütü olarak MAC’ın analitik ve modal mod şekillerinin tutarlılığında kullanılmasının yanısıra zayıf ve kuvvetli zorlama tepkilerini aynı gözlem noktaları için zaman tanım alanında ve frekans tanım alanında inceleyen, frekans değer değişimlerinin ve mod şekil değişimlerinin kullanıldığı yapı hasar çalışmalarıda bir diğer uygulama alanıdır. Burada, mod şekillerinin benzer ve doğru olmasına rağmen, girdi spektrumunda gözlenecek değişen frekansla değişen girdi genlikleri, tepki genliklerini de değiştirdiğini ve sonuç ilişkinin doğrusal olmamasınında ihtimal dahilinde olduğu unutulmamalıdır. Yani, sadece istatistiki modal şekil tutarlılığı bizi yanlış yorumlara götürebilir. Yapı modelinde güncelleme için seçilecek parametrelerdeki

değişimler mod şeklini benzetme uğruna yapı davranışını bozmamalıdır. Bu amaçla ileri modlarda çok daha dikkatli olunması gerektiğini unutmamalıyız. Güncellenen yapının MAC değerinin %100 tutarlılığını gösteren 1'e yaklaşması durumunda yapı analitik modelinin çok doğru sonuçlar vereceği beklentisi her durumda doğru çıkmayacaktır. Güncellenen modelin sonuçlarının mutlaka zaman ve frekans tanım alanında deneysel sonuçlarla mukayesesi gerekmektedir. Yapı performansını en doğru yansıtacak bir parametre güncellemesinin mod şeklini kabül edilebilir yakınsaklıkta ve tepkiyi de doğru verdirtecek tutarlılıkta olması gerekmektedir. Bu safhada hiçbir modelin mükemmel olamayacağını, deneysel ölçümün ise çok sayıda set ile analizlerde sınandığında aynı yapının aynı yük değerleri ve fakat kontrolümüz dışında kaotik ortamın sunduğu değişen davranış şartları altında her sefer aynı benzer mükemmellikte davranış sergilemeyeceğini bilmeliyiz. Keza yönetmelik önerisi tasarım yükleride benzer varyasyonları içlerinde tutarlar. Dolayısiyle, MAC değerinin pratik mühendislik yaklaşımı içinde kabül edilebilir değer bandına karar verilererek, örneğin ilk iki modunun nümerik analizde doğru frekans davranışları sergilemesinin yanısıra doğru mod şekillerini vermesi yeterlidir, gibi güncelleme için hedef seçilebilir. Bunları veren MAC değeri, çalışma için hedef MAC değeri olabilir.

4.1. Nümerik Modelin Tanılama Sonuçlarıyla Kalibrasyon Çalışmaları

Tarihsel gelişiminde ilk uyarlamalarda, kütle, sönüm ve rijidlik değerlerindeki belirsizlikleri veya rassal değer salınımlarını gidermek için küçük değişimlere müsaade edilirdi. Yapı dinamiği açısından, modifikasyonlar Eigen özdeğer denklemleri içerisinde tekrar aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Bu tanım ile *fiziki bilgiden nümerik modele, sonrasında modal model eve daha sonrada tepkisel davranış modeline* doğru bir güncelleme seyri gerçekleşecektir.

$$\left[\left([K]+[\Delta K]\right)-\omega^{*2}\left([M]+[\Delta M]\right)\right]\{\mu\}=\{0\} \tag{3a}$$

$$\{\mu\}=[\phi]\{\eta\} \tag{3b}$$

$$\left[\left([K]+\Delta[K]\right)-\omega^{*2}\left([M]+\Delta[M]\right)\right][\phi]\{\eta\}=\{0\} \tag{3c}$$

veya

$$\left[\left[K^{*}\right]-\omega^{*2}\left[M^{*}\right]\right]\{\eta\}=\{0\} \tag{3d}$$

Burada,

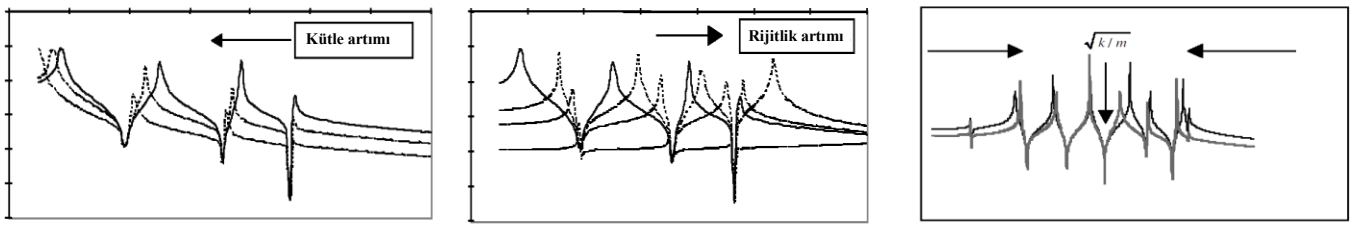
$$\left[K^{*}\right]=\left[\omega_r^2\right]+[\phi]^T[\Delta K][\phi]$$

$$\left[M^{*}\right]=[I]+[\phi]^T[\Delta M][\phi]$$

Modifiye edilmemiş modların linear kombinasyonundan kalibre edilmiş yapı modu oluşturulduğundan, {μ}=[Φ]{η} ifadesi bir linear kombinasyonu içinde tutabilmektedir. Bağıntı (3b), (3a) denklemine konulursa (3c) ifadesiyle yeni bir Eigen özdeğer denklemi ve kapalı formu ise (3d)'de tekrar ifade edilebilecektir. Bu haliyle, Denklem (3d) yapının ilk tanımlanan kütle ve rijidlik matrislerini aslında kalibrasyon için temel referans almadığını göstermektedir. Bu ise kütle ve rijidlik matrislerinin elde olmadığı ama deneysel verilerden elde edilen mod şeklinin ([Φ]) elde olduğu yapılar için bu ifadenin kullanılabileceğini göstermektedir. Dolayısiyle, herhangi bir yapısal değişiklik ([ΔM] ve [ΔK]) durumunda, Denklem (3c) ile yapıyı gerçekte değiştirmeden dinamik davranış karekteristiği elde edilebilir.

Model güncelleme işlemini burulmasız tek yatay serbestlliği olan ayrık kütle ve yay ilişkisi içinde bir konsol sistemin üstünde denersek rijidlik [ΔK] ve kütle [ΔM] değişimlerinin etkisini frekans tepki fonksiyonunda görebiliriz. Çok serbestliği (ÇSD) olan sistemlere bunun dikkatli uygulanmasıyla deneysel mod şekillerine yansıyan model iyileştirmeler elde edebimekteyiz. Küçük değişikliklerin ÇSD sistemin bir çok serbestliğini etkilediğinin bilincinde olmalıyız. Şekil 1(a)' da, konsol serbest ucunda bulunan yığılı kütlenin küçük [ΔM] kadar artırılmasıyla karekteristik yanal serbestliğin üreteceği tepeciklerin sola doğru modal frekansları küçülttüğünü, vadi frekansların değişmediğini, Şekil 1(b)' de ise kütle sabit kalırken artırılan [ΔK] benzer

şekilde sadece modal frekansları büyüttüğünü, Şekil 1(c)'de iki serbestlik dereceli bir sisteme (2SDS'e) uygulandığında ise $(K/M)^{1/2}$ ile hesaplanan doğal frekansdan küçük olan frekansların büyüdüğü buna mukabil büyük olanların küçüldüğü görülmüştür (Ram ve Blech, 1991).



Şekil 1. (a) Kütle, (b) rijitlik (c) ÇSD sistemde artımların modal frekansı etkilemesi,(Jimin, 2000)

4.2. Nümerik Model Kalibrasyonu

Deneysel (eXperimental) ve Analitik modellerin modal şekilleri arası istatistiki koralasyon (Allemang and Brown, 1982) bilgisini kullanırsak Denklem (4)'ü koordinatları da dikkate alırsak Denklem (5)'i ifade edebiliriz.

$$MAC(\{\Phi_X\}_i,\{\Phi_A\}_j)=\frac{\left|\{\Phi_X\}_i^T\{\Phi_A\}_j\right|^2}{\left(\{\Phi_X\}_i^T\{\Phi_X^*\}_i\right)\left(\{\Phi_A\}_j^T\{\Phi_A^*\}_j\right)}; \tag{4}$$

$$COMAC(i)=\frac{\left(\sum_{J=1}^{n_{CMP}}\left|(\Phi_A)_{ij}(\Phi_X^*)_{ij}\right|\right)^2}{\sum_{J=1}^{n_{CMP}}\left|(\Phi_A)_{ij}\right|^2\sum_{J=1}^{n_{CMP}}\left|(\Phi_X)_{ij}\right|^2} \tag{5}$$

Denklem (4) ve (5)'de ***X*** indisi (e**X**perimental), deneysel titreşim mod indisini ve ***A*** indisi **A**nalitik titreşim mod indisini göstermektedir. Denklem (4) ile farklılıkların yapının hangi katında bulunduğu bilgisine ulaşılması imkansızdır. Bu eksikliği gidermek amacıyla ***CO***-ordinate ***MAC*** (***COMAC***) Denklem (5)' deki ifadesiyle geliştirilmiştir (Lieven and Ewins (1988)). Denklem (5)'de $\boldsymbol{n_{CMP}}$ ile doğrulatılacak mod şekil sayısı tanımlanabilmektedir. ***COMAC*** değerlendirmesi kat seviyesinde farklılıkları yakalayabilmesine rağmen lokasyon bilgisi eksiktir. Örneğin küçük hasar şartlarında, ***i***ninci mod şeklinin ***j***ninci serbestlik derecesinin ***p***ninci ve ***q***uncu serbestlik derecelerine intisab eden lokal rijidlik değişimine hassaslığını (Vanhonacker(1980), Maia and Silva (1997a) ve Parloo et al. (2003)) de Denklem (6) ile ifade etmeye çalışmışlardır.

$$\frac{\partial\phi_{ji}}{\partial k_{pq}}=\left(\phi_{pi}-\phi_{qi}\right)\sum_{r=1,r\neq i}^{n}\frac{1}{\lambda_r-\lambda_i}\frac{\phi_{pr}-\phi_{qr}}{a_r}\phi_{jr} \tag{6}$$

Burada, $\boldsymbol{\lambda_r}$ sistemin pol (tepecik) kök değerini ve $\boldsymbol{a_r}$ ölçeklendirme faktör değerlerini tutmaktadır.

4.3. Güncellemede Verimlilik Değerlendirmesi

Yapının nümerik modeline doğru, hızlı ve verimli bir kalibrasyon uygulanabilmesi için kütle ve elastik modül çalışma parametreleri olarak seçilebilir. Parametreye olan model hassaslığı elastik şartlarda modal frekans ve deformasyonlarından değerlendirilebilir. Verimli ve hızlı bir kalibrasyon için iki tane yöntem ile model

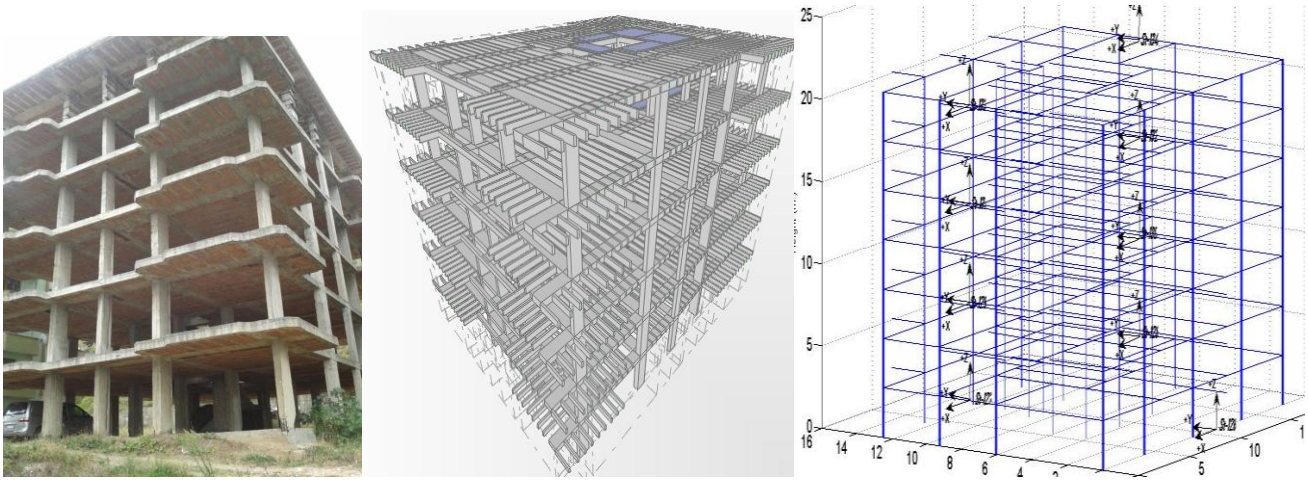
güncellemedeki verimlilik izlenebilir. Bunlar doğal frekans değerleri ve ardışık iki mod gerçekleşme kriteri (MAC) değerleri arasındaki farkın küçülmesi kullanılarak güncellemenin verimliliği ve hassaslığı izlenebilir.

5. UYGULAMA ÖRNEĞİ

Serbest titreşim veya zorlama altında tek dinamik yük ve değişik serilerden veya toplamından oluşan dinamik yük şartlarında davranışları izlenecek çalışma yapısının model kalibrasyonlarında analizden elde edilen karekteristik modal bilgiler kullanılmıştır. Çalışılan mevcut yapının üstünde ölçülen davranışların benzerinin aynı doğrulukta sonlu eleman modelinde elde edilebilmesi için deneysel ve analitik modellerin modal şekiller arası korelasyon teknikleri, örneğin, *MAC* değerlendirmesi ve rijitlik hata matrisinin minimize edilme teknikleriyle nümerik model kalibrasyonları tamamlanmıştır. TDY (2007)' de verilen 7.4.5, 7.4.6 ve 7.4.7 şartlarını sağlayan analitik model daha sonra hasar görebilirlik analizlerinde kullanılmış ve model güncelleme analiz sonuçlarının tutarlılığını artırmıştır.

5.1. Çalışma Binası

2007 yılında yürürlüğe giren Türkiye Deprem Yönetmeliği'nin 7. bölümü mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi'ne ayrılmıştır. Yönetmeliğin önerdiği yöntemlerin sınanması amacıyla TUBİTAK tarafından desteklenen 108M303 nolu proje (Kutanis, vd., 2011) kapsamında 17 Ağustos 1999 depreminde binaların gösterdiği performans düzeylerinin, yönetmelik çerçevesinde değerlendirilmesi amacıyla bir çok binada saha testleri yürütülmüş ve oluşturulan nümerik modelleri güncellenmiştir. Çalışılan betonarme binalardan birisi olan Aydın Bak binası konut amacıyla apartman olarak tasarlanmış, bölme duvarları henüz örülmemişken depreme maruz kalmıştır. Şekil 2'de zemin + 5 normal kat boş karkas çerçeve yapı'nın resmi ve güncellenecek sonlu eleman modeli ve üzerinde izlenen yapısal noktalar bileşenleriyle gösterilmiştir. Proje bilgileriyle oluşturulan SEModeli eleman birleşim noktası ve mesnet güncellemeleriyle mod şekilleri belirli bir tutarlılığa ulaşmış, bir sonraki adımda malzeme özeliğini yansıtan mukavemet testleri referans alınarak *E* değerleriyle dolayısiyle rijidlik değerleriyle model kalibrasyonu yürütülmüştür.

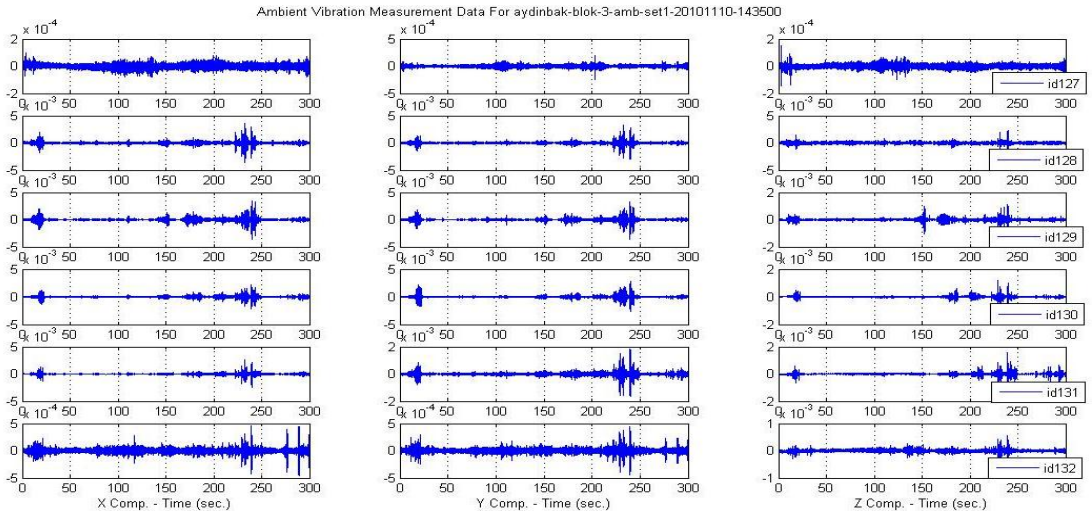


Şekil 2. Zemin + 5 normal kat betonarme karkas bina, nümerik modeli ve tipik yapısal izleme ağı (Sak, 2013)

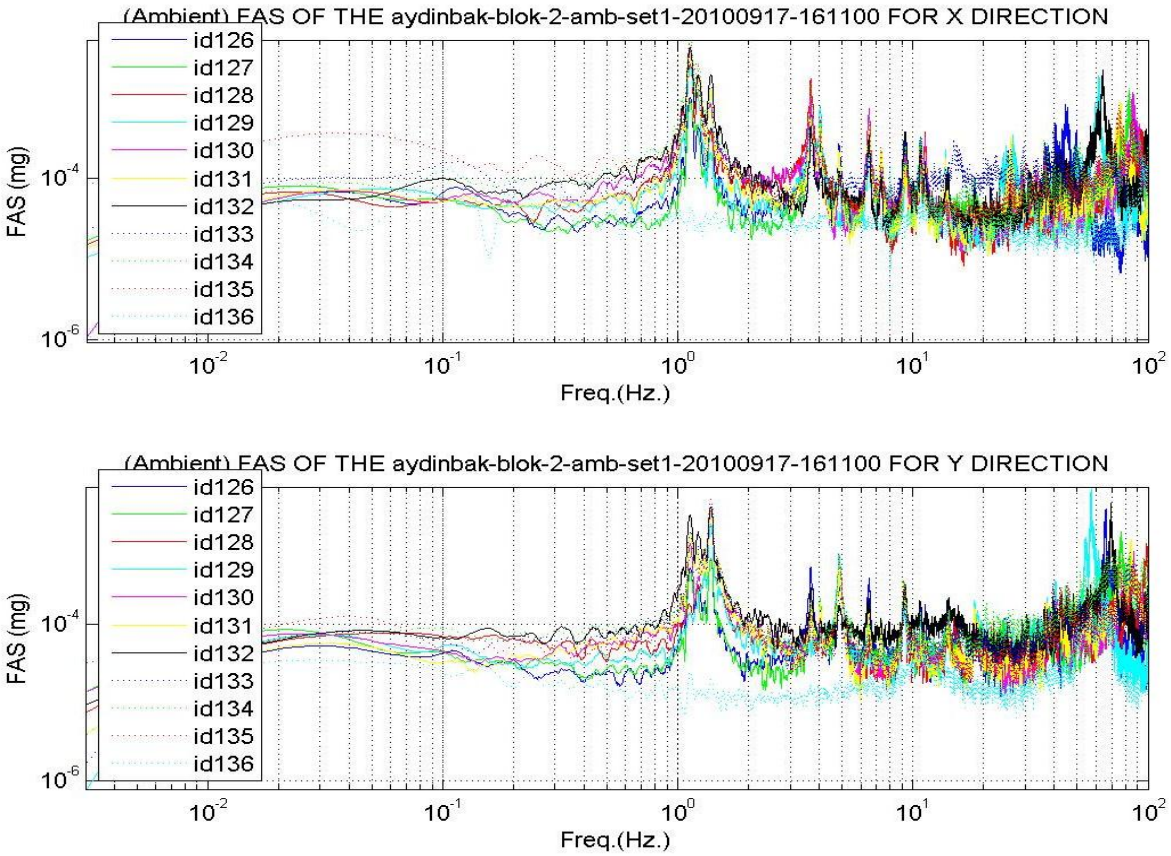
5.2. Çevrel/Zorlama Titreşim Testleri

Çevrel titreşim ölçümlerinde yerli üretim AREL ivme ölçer cihazları (Kemal vd., 2011) yapısal noktalara konumlandırılarak yapısal titreşimler izlenmiş ve Şekil 3'de verilene benzer yapı davranış setleri kaydedilmiştir (Beyen, 2011). Alınan yapısal titreşim verilerinin ileri sinyal işleme teknikleriyle değerlendirilmesinden sonra

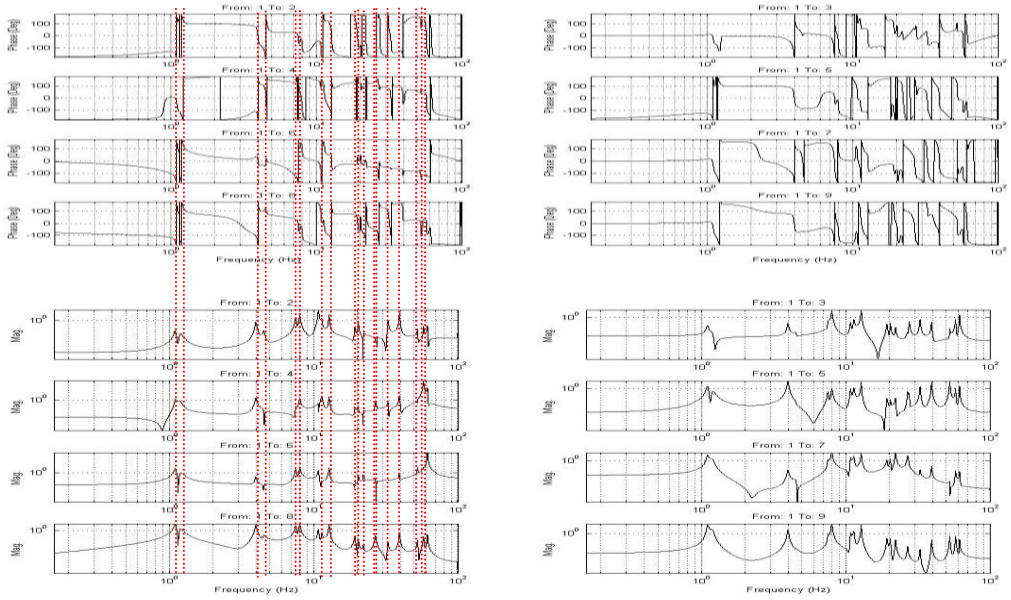
Şekil 4' de görülen spektral ve Şekil 5' de görülen parametrik farklı tanılama yöntemleriyle benzer karakteristik yapı değerlerinin elde edilmesi saha verilerinin tutarlılığının yanısıra elde edilen yapı davranış bilgilerinin de güvenilir olduğunu göstermiştir (Beyen, 2011). Mevcut yapının doğru karekteristik özellikleri yönetmelikte önerilen hasar görebilirlik analizlerinde kullanılmıştır. Çalışılan yapının ham nümerik modelinin barındırdığı belirsizliklerin neden olabileceği yanılmaların minimize edildiği bu safhadan sonra yöntemlerin tutarlılık seviyelerinin tartışılması daha gerçek bir bakış kazandırmıştır. Mod şekil uyumluluğunun değerleri Şekil 6'da x ve y yönleri için grafiğin yatay ekseninde mod sayısı, düşey ekseninde de uyumluluk yüzde değerleri gelecek şekilde çizilmiştir. Testlerle elde edilen malzeme E modül değerleri kullanılarak kalibre edilen SE modelinin ve yapı üzerinden alınan kayıtların verdiği modal frekanslar ve mod şekillerinin uyumluluğu y yönünde ilk 7 mod için, x yönü için ise ilk 8 mod için %100' e yakın gerçekleşmektedir. Y yönünde 6. mod uyumluluğu %83'e düşse dahi kabül edilebilir bir yaklaşım içinde ilk 3 modda %95 kütle katılımın gerçekleştiği bir yapı için ulaşılan uyumluluk Şekil 7'de çizilen MAC değerleriyle diagonal band üzerindeki %100'e ulaşan çubuk değerleriyle yeterli olduğunu göstermektedir. Şekil 8'de projeden alınan değerlerle oluşturulan ham modelin ve kalibre edilmiş SE modelinin çok modlu statik itme (ÇMSİ) analizi sonunda yığılı plastik uçlarla yapısal hasar görebileceği kabül edilmiş elemanlardaki hasar dağılımının tipik bir örneği y yönü için gösterilmiştir. Şekil 9 ve 10'da tipik bir sonuç olarak y yönü için sırasıyla zemin ve 1. kattaki kolonların yönetmeliğin önerdiği yöntemlerle yürütülen analizler sonucunda verdiği hasar dağılımlarının hasar rölövesiyle mukayesesi çizilmiştir. Yöntemlerin hasarı tahmin etmedeki tutarlılığının model kalibrasyonuyla bir çok düşey elemanda yükseldiğini görüyoruz.



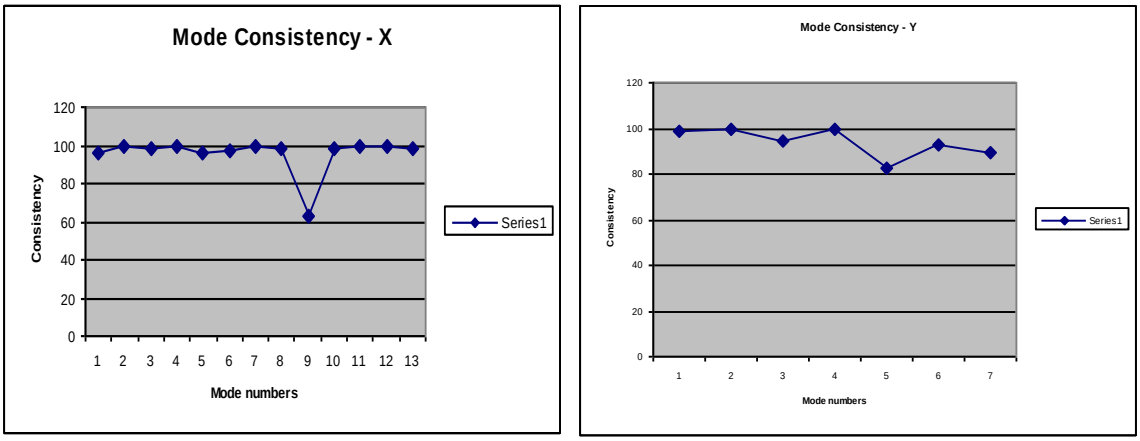
Şekil 3. Çevrel titreşimden kaynaklanan yapısal davranış noktası kayıtları (Beyen, 2011)



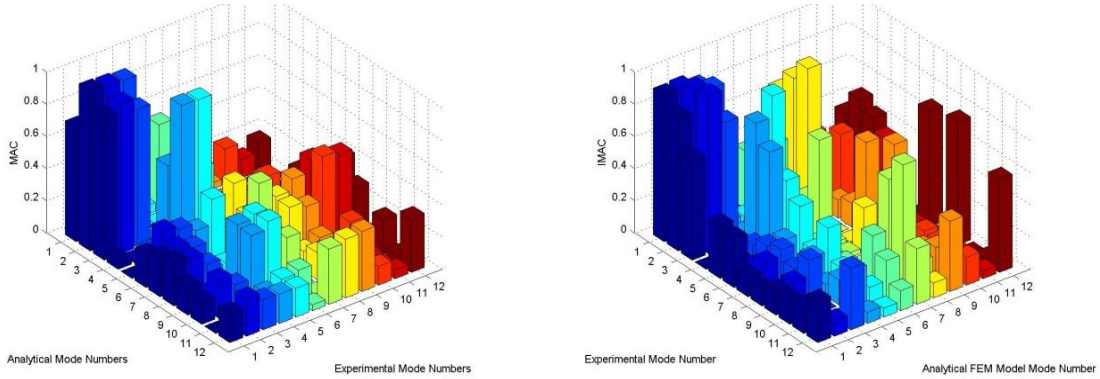
Şekil 4. Rijid plak çalışan kat döşemelerinin temsil ettiği yığılı kütle modeli modal frekansları (Beyen, 2011)



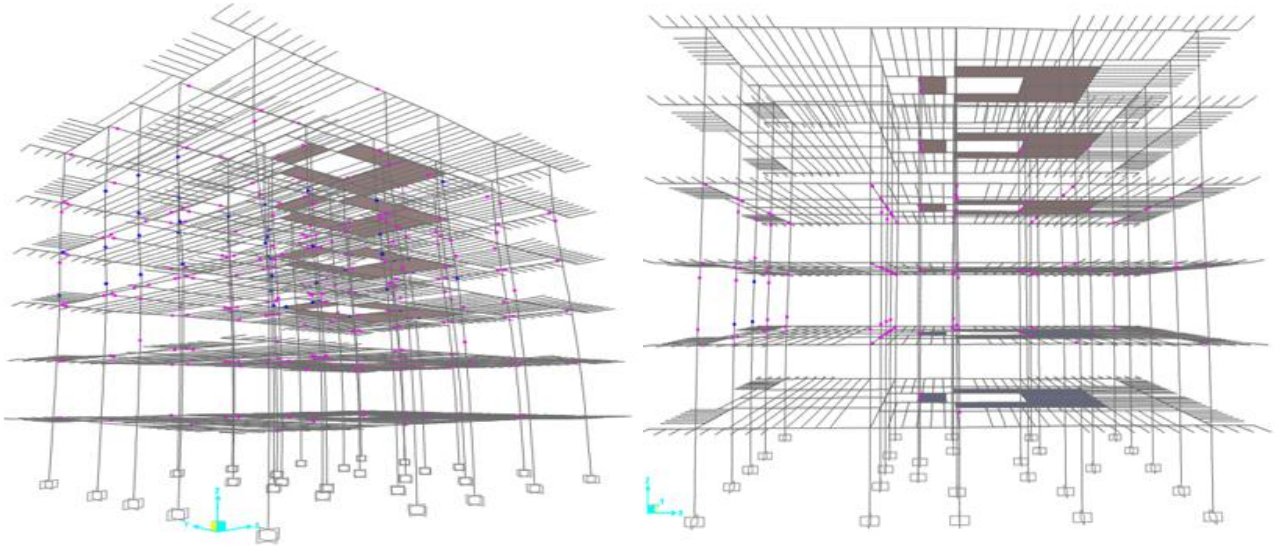
Şekil 5. Parametrik analiz sonucu yapı modal frekansları ve faz hikayeleri sol x yönü sağ y yönü (Beyen, 2011)



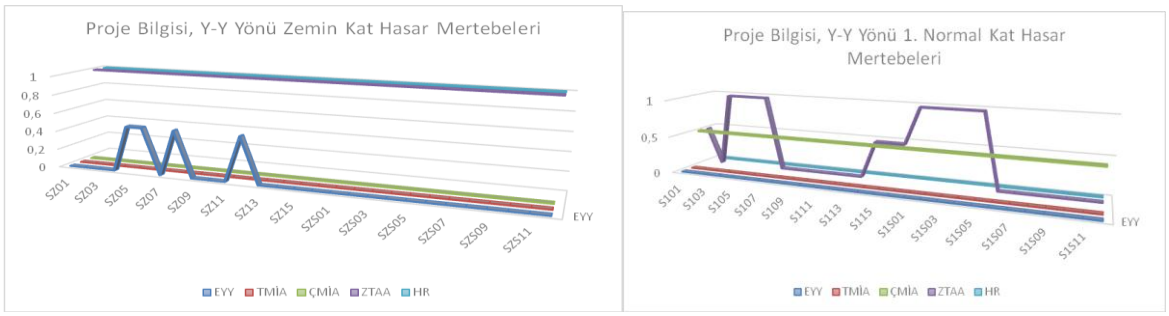
Şekil 6. X ve y bileşenleri için modal tutarlılık oranlarının aday modlara göre dağılımı



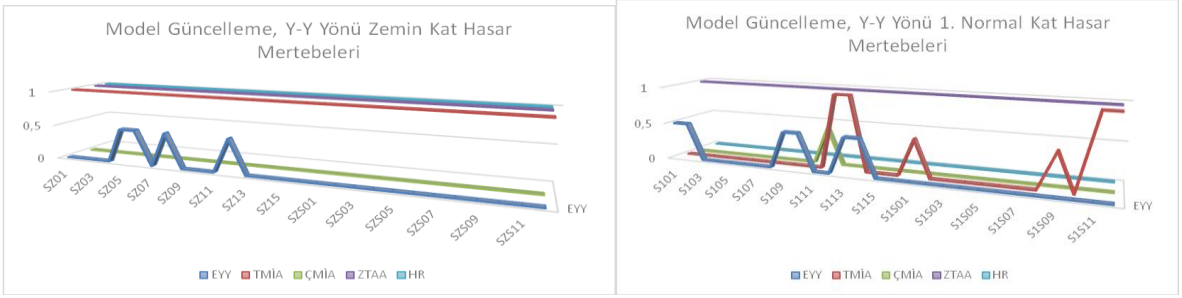
Şekil 7. X ve y bileşenleri için modal tutarlılık oranlarının aday modlara göre tipik dağılımı



Şekil 8. Solda, proje bilgilerinin ürettiği ÇMSİ analizi sonucu Y yönündeki mafsallaşma, sağda ise güncellenmiş model sonuçları (Ömer Sak, 2013)



Şekil 9. Proje Bilgisiyle, Y-Y yönü zemin kat ve 1. Kat kolon hasar mertebeleri



Şekil 10. Güncellenmiş model ile, Y-Y yönü zemin kat ve 1. Kat kolon hasar mertebeleri

6. SONUÇLAR

Mod gerçekleşme veya tutarlılık kriterlerinin ağırlıklı olarak üstünde durulduğu modal model güncelleme ve türevleri zamanla geliştirilmiş olduğunu kısacana gördük. Güncellemenin verimliliğini artırmak ve değişimlerin neleri etkilediğini değerlendirmemiz açısından oldukça önemli bir referans ölçü olarak biz mühendislerin parametrik değerlerin doğru ve uygun olanını seçmemiz ve güncellemede kullanmamıza katkı veren MAC ile ilgili uygulama sonuçları bu çalışmada örneklenmiştir. Yanlış kullanımı ve yanlış yorumları yapı malzeme, yük ve davranış bilgisi ışığında ayrıcana açıklamaya çalıştık.

Yapı tanı tekniklerinden elde edilen sonuçlarla nümerik modellerin kalibre edilmesi, elde edilen sonuçları daha doğru değerlendirme fırsatı vermekte olup yönetmelik çerçevesinde önerilen değerlendirme analizlerinin hasar rölöveleriyle yapılan kıyaslardan, yönetmeliğin hasarı tahmin etmedeki tutarlılığının model kalibrasyonuyla yükseldiği anlaşılmıştır.

Mevcut yapıların durum analizleri, inşaatı henüz bitmiş yapıların iskan öncesi üretim kalitesi ve son durum tespiti için yapısal karekteristiğini belgeleyecek ve gelecekteki tetkikler için kullanılacak yapı SE modeli proje dökümanı olarak referans alınmasıyla yanıltıcı sonuçlara mani olunduğu gibi yapı sağlığı izleme çalışmalarında daha bilimsel ölçütler içinde değerlendirilme imkanı gerçekleşecektir.

KAYNAKLAR

R.J. Allemang. Investigation of SomeMultiple Input/Output Frequency Response Function Experimental Modal Analysis Techniques. PhD thesis, University of Cincinnati, 1980.

Friswell, M. L., and J. E. Mottershead, Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.

N. Lieven and D. Ewins. Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (comac). In Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference, pages 605–609, Kissimmee, Florida, 1988.

Stefan Lammens. Frequency Response Based Validation of Dynamic Structural Finite Element Models. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 1995

Yun-Xin WU, sensitivity-based Finite Element Model Updating Methods With Application to Electronic Equipments, PhD. Thesis, Facult´e Polytechnique de Mons, Belgium, 1999.

Jimin He, Structural Modification, doi: 10.1098/rsta.2000.0720, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2001 **359**, 187-204

N. M. M. Maia and J. M. M. Silva , Modal Analysis Identification Techniques, doi: 10.1098/rsta.2000.0712, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2001 **359**, 29-40

Lin Xiankun, Zhang Lingmi, Guo Qintao and Zhang Yufeng, Dynamic Finite Element Model Updating of Prestressed Concrete Continuous Box-girder Bridge, Earthq Eng & Eng Vib (2009) 8: 399-407.

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

Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007

Beyen K., Kutanis M., Bal İ. E., 2011, 'Yeni yönetmeliğin sunduğu doğrusal elastik olmayan statik analiz yönteminden elde edilen yapı tepkilerindeki belirsizlikler', 7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.

Beyen K., Kutanis M., Bal İ. E., 2011, 'Çevrel ve zorlama kuvvet titreşimleri altında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar almış binaların yapı tanı çalışmaları', 7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.

Ömer Fatih Sak, 2013, '17 ağustos 1999 kocaeli depreminde hasar almış bir binanın yapı tanılama sonuçlarıyla güncellenmiş modelinin analitik analizi', yüksek lisans tezi, FBE, Kocaeli Üniversitesi.

Kemal Beyen, Mustafa Kutanis, H. Özver Tanöz, Doğan Başkan, 2011, 'Yapı sağlığı izleme ve yapı tanı çalışmaları için akıllı aktarma protokollu kablosuz sensör ağı', 7. Ulusal deprem mühendisliği konferansı, İstanbul, Türkiye