Yüksek Yapıların Dinamik Karekteristiğinin Tanılanılmasında Rüzgâr, Çevrel ve Deprem Kuvvetlerinin Etkisi

Kemal Beyen

Dr. Deprem Müh., İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe, Kocaeli, Türkiye
Email: kbeyen@kocaeli.edu.tr

Özet

Yapıların zamanla değişen farklı yüklere karşı sergiledikleri dinamik tepkiler yapı karekteristiği tanılama çalışmalarının temel verileridir. Kontrol dışı doğada çeşitli tetikleyici mekanizmalar ile gelişen kuvvetli yer hareketi, rüzgâr veya mikrotremor hareketleri yapılarda farklı tepki titreşimleri üretir. Yapı dinamiği çerçevesinde tetikleyici girdi kuvvetler ile yapıların ürettiği karşıt tepkiler ölçülebilir kinematik değişkenler olup, bu veri çiftleri yapı tanılama analizlerinde kullanılır. Kontrol edilemeyen fakat ölçülebilen sismik kuvvetlerin neden olduğu örneğin kuvvetli yer hareketi kütleye etkiyen kuvvetler olup etkidikleri yönde neden olacakları geniş frekans yelpazesine yayılmış yapısal titreşim tepkileri sayesinde etkin parametreler ölçüm noktalarında tahmin edilebilmektedir. Yapının kuvvetli yer hareketi gibi sismik kuvvetlere yakalanma sıklığı, yıl boyu etkin olan rüzgâr (fırtına) şartlarından çok düşüktür. Yüksek yapıların fırtına tepkileri bu sebeple depreme göre daha çok önem kazanmaktadır. Ayrıca yaşam konforuna tehdit oluşturmaları bir diğer çözümlenmesi gereken problemdir. Rüzgâr yükleri 1 Hz.'in altında düşük frekans özelliğiyle yüksek yapı ve büyük açıklıklı esnek köprüler gibi yapılarda etkileri izlenebilmekte ama yüksek frekanslarda etkileri kaybolmaktadır. Bu çalışmada, girdi kuvvetleri seti zayıf, kuvvetli, yakın ve uzak kaynak alanları olan değişik deprem kayıtları, fırtına kayıtları ve metro içi dinamit patlatma kayıtlarından oluşmuştur. Yapı üzerinde kurulu yapı sağlığı izleme ağı ile girdiler ve yapısal tepkiler kayıt altına alınmış ve girdi-çıktı veri setleri olarak kullanılmıştır. Tanılama çalışmalarında klasik frekans tanım alanında güç spektrumu (PSD) ve ihtimal yoğunluk fonksiyonlarıyla (PDF) ve zaman tanım alanında Gözlemci/Kalman tanılama süzgeçleriyle uygulanan Eigen öz değer gerçekleşme algoritmaları (OKID-ERA)'nın sonuçları tartışılmıştır. Frekans muhteviyatının zamanla değişimi ve veri setlerinin stasyoner özellik göstermeme ihtimali dikkate alınarak ayrıca zaman-frekans tanım alanında dalgacık analizi (wavelet) ve Hilbert-Huang dönüşümleriyle (HHT) mevcut yapının farklı dinamik girdi kuvvetlere gösterdiği davranışlar ve hakim karekteristiği tartışılmıştır. Çalışılan yüksek yapıda rüzgâr şartlarında izlenen etkin frekans bandında yüksek yapının simetrik ve simetrik olmayan modları kayıtlarda izlenmiştir. Gauss normal dağılımı sergileyen geniş bir frekans yelpazesinde yapıyı etkileyen çevrel titreşimlerin tepki kayıtlarında ise yapının önemli hakim modları yeterli doğrulukta tanılanmıştır. DB yönünde yapının doğal hakim frekanslarını 0.25Hz, 0.9Hz; KG yönünde 0.4Hz, 1.4Hz ve yaklaşık 3Hz'lerde global tepki tepelerinin bütün kayıt istasyonlarında ortak harekete iştirak ettikleri izlenmiştir. Etkiyen bütün bu doğal kuvvetlerin genelde doğada olduğu gibi birbirlerinin alternatifi olmadığı, çalışılan mühendislik yapısının dinamik özelliklerinin tam anlaşılmasında birbirlerinin zayıf ve duyarsız kaldıkları frekans bandlarının davranış bilglerini tamamladıkları görülmektedir. Ayrıca, bir yüksek yapı üzerinde kurulu yapı sağlığı izleme ağından elde edilen veri setlerinden elde edilen sonuçların periyodik takibi yapıda olabilecek anomalilerin tesbiti için önemli bir arşiv oluşturmaktadır. Yapı tanılama çalışmasıyla elde edilen gerçek yapısal dinamik özellikler ve yapı sağlığının mevcut durumu ileri analizler için güvenilirliği yüksek sayısal yapı modellerini oluşturmanın yolunu açmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çevrel Tepki, Rüzgâr Tepkisi, Deprem Tepkisi, Yüksek Yapı, Yapı Tanılama.

1. Giriş

Yapılar hizmet ömrü içinde zamanla değişen farklı işletme, iklimsel (fırtına, rüzgâr, ısı, kar ve yağmur yağış şartları), coğrafik (heyelan, yerel ve uzak depremler, tektonik kuvvetler, yeraltı akarsuları, sahil-dalga şartları) ve insan kültürünün ürettiği (trafik, endüstriyel ve kültürel, ves.) yüklere maruz kalırlar.

Farklılıklar içeren dinamik yük zaman hikayelerine karşı yapıların sergiledikleri dinamik tepkiler yapı karekteristiği tanılama çalışmalarının temel verilerini oluşturur. Doğada tektonik şartlarla şekillenen tetikleyici mekanizmaların ürettiği kuvvetli yer hareketi ve küçük yer titreşimleri (mikrotremor) yapılarda farklı tepkisel titreşimler üretir. Çok sık gelişen fırtına-rüzgâr kaynaklı yapı hareketleri sürekli etkiyen tasarım kuvvetleri olup (Yüksek Yapı Yönetmeliği) tanılama çalışmalarında dikkate alınabilir. Genel olarak rüzgâr etkisinde yapı hareketleri iki kaynakdan tetiklenir. Birincisi, statik süregelen (sustained) davranış olup oturanlar tarafından algılanmayan fakat yapı ötelenmesinde tasarım aşamasında dikkate alınan bir rüzgâr etkisidir (Beyen, K., 2017a). İkincisi ise zaman ile değişen titreşimler veya rezonansa yaklaşan yapısal titreşimler olup insanı rahatsız eden fırtına etkisinde davranışlardır (Beyen, K., 2017a). Kontrol edilemeyen fakat ölçülebilen sismik kuvvetlerin neden olduğu örneğin kuvvetli yer hareketi kütleye etkiyen kuvvetler olup etkidikleri yönde neden olacakları geniş frekans yelpazesine yayılmış yapısal titreşim tepkileri sayesinde etkin parametreler ölçüm noktalarında tahmin edilebilmektedir. Yapının kuvvetli yer hareketi gibi sismik kuvvetlere yakalanma sıklığı, yıl boyu etkin olan rüzgâr (fırtına) şartlarından çok düşüktür. Yüksek yapıların fırtına tepkileri bu sebeple depreme göre daha çok önem kazanmaktadır. Örneğin rüzgâr yükleri 1 Hz.'in altında düşük frekans özelliğiyle yüksek yapı ve büyük açıklıklı esnek köprüler gibi mühendislik yapılarında etkileri izlenebilmekte ama yüksek frekanslarda etkileri kaybolmaktadır. Diğer taraftan çevrel titreşimler Gauss normal dağılımı sergileyen geniş bir frekans yelpazesinde yapıyı etkilemektedir. Çevrel titreşim tepki kayıtları yapının önemli hakim modlarını yeterli doğrulukta verebilmektedir. Etkiyen bütün bu doğal kuvvetlerin genelde olduğu gibi birbirlerinin alternatifi olmadığı, çalışılan mühendislik yapısının dinamik özelliklerinin tam anlaşılmasında birbirlerinin zayıf ve duyarsız kaldıkları frekans bandlarının davranış bilglerini tamamladıkları görülmektedir.

Günümüzün izleme teknolojileri ve hesaplama mekaniği uygulamalarının bilgisayar hızlarıyla yükselmesi sayısal sinyal analiz algoritmalarındaki gelişmeler güçlü ve etkili yapısal tanılama uygulamalarına imkan vermiş, yeni nesil sensörler, veri toplama ağ düzenekleri ve sinyal işleme tekniklerindeki değişik algoritmaların uygulanabilirliği artırmıştır. Günümüzde tanılamanın temeli olan lineer elastik algoritmaların yanısıra geliştirilmiş elasto-plastik algoritmaların sayısal laboratuar olarak bilgisayar yazılım platformlarında uygulanması mümkün hale gelmiştir. Lineer elastik davranışı tanılama gücü konvansiyonel yöntem olan temelde Fourier dönüşümü üzerine oturan spektral analiz yöntemleriyle gerçekleştirilebilmektedir. Frekans tanım alanında elde edilen yapısal davranış bilgilerinin zamana bağlı değişiminin ihmal edilmesi ve tam bilinmeyen dinamik ve mekanik özellikler olan kütle, rijidlik ve sönümün sabit değerlerinin operasyonel şartlarda (yapı sağlığı ağlarıyla uzun süreli izlenmesi) yapıya özgün zamanla değişen hikayeleriyle beraber tanılanması çok karmaşık bir problem olup ileri mertebede çok boyutlu analizleri kaçınılmaz kılmaktadır. Frekans tanım alanında güç spektrumu (PSD) ve ihtimal yoğunluk fonksiyonlarıyla (PDF), zaman tanım alanında Gözlemci/Kalman tanılama süzgeçleriyle uygulanan Eigen öz değer gerçekleşme algoritmasıyla (OKID-ERA) (Phan, 1997) ve zaman-frekans tanım alanında dalgacık analizi (wavelet) ve Hilbert-Huang dönüşümleriyle (HHT) (Beyen, K., 2015) mevcut yapı karekteristiği tespit edilebilmektedir. Yapı tanılama çalışmasıyla elde edilen gerçek yapısal dinamik özellikler ve yapı sağlığının mevcut durumu ileri analizler için kullanılarak güvenilirlik seviyesi yüksek kalibre edilmiş (yapı üstü ölçümlerle elde edilen davranış sayısal modelle örtüştürülerek sağlaması yapılmış) sayısal yapı modelleri sonraki senaryo benzeşim çalışmalarıyla farklı yük şartlarında ortaya çıkacak davranışın tahmin güvenilirliğini yükseltmiştir (Beyen, K., 2017b). Örnek uygulamalar olarak mevcut bir yapıda hasar tahmini ve durum değerlendirmesi veya tasarlanan yapının imalat öncesi tasarım aşamasında ve imalattan sonrası yapı nümerik modelinin elde edilen saha bilgileriyle güncellenmesi sonuçlarda tutarlılığı yükselteceği gibi (olabilecek bir ihtimal depreme, imalatın projeyle uyumluluğuna, sigorta bedeli olarak yapının değerlendirilmesi ve benzeri) değerlendirmelere önemli katkı verecektir. Bu çalışmada Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsünün yürüttüğü bir yüksek yapı izleme ağından elde edilen değişik dinamik tepki setleriyle tanılama çalışması frekans tanım alanında, zaman tanım alanında ve frekans-zaman tanım alanında olmak üzere üç ayrı yöntemle yürütülmüş, sonuçları tartışılmıştır.

2. Zaman tanım alanında analiz

İnşaat mühendisliği günlük uygulama pratiği olarak proje ve tasarım parametreleri (TBDY, 2018) üzerinden bir sonlu eleman analiz programıyla kurulan nümerik yapı modeli yapı modlarını, modal frekansları, modal sönüm yüzdelerini ve mod şekillerini mühendislik parameterinin değerlerindeki belirsizliklere bağlı olarak tartışmalı sonuçlar verebilmektedir. Oysa deneysel modal analiz yapıdan kaydedilen giriş-çıkış (GÇ) sinyal çiftlerini kullanarak parametrik modele tahmin algoritmalarını uygulayarak belirli bir tutarlılık çerçevesinde yapı doğal modlarını, mod şekillerini, modal frekans, faz ve sönümleri hesaplayabilir. Otomatik regrasyon modelleri (AR) veya geri beslemeli (ekstra girdili) otomatik regrasyon modelleri (ARX) ve benzeri diğer model algoritmaları yapı tanılama analizlerinde kullanılmaktadır. Aday modeller tek girdi-tek çıktı (TGTÇ) (single input-single output – SISO) yaklaşımıyla kat döşemelerini sonsuz rijid plak kabül eden her kat kütlesinin kendi döşeme düzleminde yanal rijitliğiyle orantılı yığılı kütleyle davrandığı dolayısiyle yapı rijitlik matrisinde sadece diagonal terimlerle tek yatay kat serbestliklerini kullanan ve katlar arası etkileşimin olmadığı dinamik davranış üretir. Diğeri ise katlar arası etkileşimin dikkate alındığı yığılı kütle davranışını çok giriş-çok çıkış (ÇGÇÇ), (multi input-multi output (MIMO)) yaklaşımı içinde çözmeye çalışır. İkinci modelde rijitlik matrisinde diagonal eksen terimleriyle diagonal dışındaki terimlerde işleme katılarak yığılı kat kütlelerinin alt ve üst kat rijitlikleriyle etkileşim içinde bir sistem davranışı sergilerler. Teorik olarak gç GÇ ilişki (transfer) fonksiyonları kesirli polinom setleriyle tariflenmiş nümerik davranış modelleridir. Uzay-durum (State-Space) ortamında GÇ ilişkisinin tanımlandığı bir diferansiyel denklemin lineer çözümü kendi özgün algoritması içinde ÇGÇÇ problem tipleri için elverişlidir ve sistemin transfer fonksiyonunun diferansiyel denkleminden elde edilmesi matris-lineer cebir yapısını kullandığı için daha kolay olmakla beraber matris yapı içinde sistem dinamiğini görmek mümkün değildir.

2.1 Transfer fonksiyonu algoritması

Klasik yaklaşım içinde transfer fonksiyon çözümlemesi bu sebepten daha çok tercih edilir. Sistemde örneğin *i.*ninci gözlem noktasına giriş (*x*) ve çıkış (*y*) veri setleri arasındaki ilişkinin yapının dinamik özellikleriyle şekillendiği düşünülür ve basit TGTÇ davranış modeli zaman tanım alanında lineer şartlarda sabit a_i ve b_i süzgeç katsayılarından oluşan Denk. 1 ile tarif edilebilir (Bendat, 1990).

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \cdots + a_m y(t-m) = b_0 + b_1 x(t-1) + b_2 x(t-2) + \cdots + b_n x(t-n) \quad (1)$$

Doğrusal olmayan ilişkide ise katsayılar yapının sönüm ve modal kütle katılım oranlarıyla ilişkili olarak zamanla adaptif olarak değişecektir. Denk. 1'den çıkartılacak GÇ ilişkisi bir sistemin karekteristik davranışı olup sistem mühendislik yapısı olarak değerlendirilirse, yapıların davranışı giren sinyallere karşı oluşturdukları tepkilerin (çıkış) ilişkisiyle tarif edilebileceğinden GÇ ilişki fonksiyonu yapının karekteristik davranışını veren transfer fonksiyonu olacaktır. Denk. 1'in Fourier dönüşümü alınarak düzenlenirse çıkış $Y(\omega)$ ile giriş $X(\omega)$ arası ilişkiyi veren transfer fonksiyonu H(ω) Denk. 2'deki gibi tanımlanabilir (Bendat, 1990, Beyen, K., 2017b).

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \cdots + b_n Z^{-n}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \cdots + a_m Z^{-m}}; \qquad Z = e^{-i\omega t} \quad (2)$$

2.2 Gözlemci Kalman süzgeciyle Eigen sistem gerçekleşme algoritması

Eigen sistem gerçekleşme algoritması (Eigensystem Realization Algorithm, ERA) Gözlemci Kalman Filtresiyle (Observer Kalman Filter, OKID) (Juang vd., 1985) beraber kullanılarak GÇ modeli tanımlanacak olursa, ölçüm yapılan binaların dinamik karakteristikleri bulunabilmektedir. Yük etki vektörü B ile yönlendirilen zaman bağımlı dış kuvvet *f(t)*'ye karşı sistemin sırasıyla göreceli yer değiştirme $x(t)$, hız $\dot{x}(t)$ ve ivme $\ddot{x}(t)$ değişkenlerinin sırasıyla rijitlik *K*, sönüm *C* ve kütle *M* matrisleriyle oluşturdukları etkin kuvvetlerin dengesi *n* serbestlikli bir yapısal sistemin diferansiyel hareket denklemini oluşturur.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Bf(t) \tag{3}$$

İkinci dereceden olan Denk. 3, Denk. 4'de verilen uzay-durum yapısı içinde 1. dereceye indirgenerek konum vektörü *x(n,1),* yük fonksiyonu *u(r,1)*, yapısal nokta tepkisi *y(m,1) t=k.dt* zaman anları için Denk. 4 ile hesaplanabilir. İfadelerdeki A, B C ve D sayısal ayrık uzay-durum matrisleridir.

$$x(k+1)=Ax(k)+Bu(k) \qquad y(k)=Cx(k)+Du(k) \tag{4}$$

Yapının GÇ verileri OKID filitresiyle süzülerek derecesi indirgenmiş uzay-durum modelinin birim itkiye (impulse) verdiği tepkiler olan Markov zinciri $Y_o=D$, $Y_1= CB$, $Y_2= CAB$, $Y_k = CA^{k-1} B$ hesaplanarak Henkel matrisi kurulabilir.

$$H(k-1) = \begin{bmatrix} Y_k & Y_{k+1} & ..... & Y_{k+\beta-1} \\ Y_{k+1} & Y_{k+2} & ..... & Y_{k+\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k+\alpha-1} & Y_{k+\alpha} & ..... & Y_{k+\alpha+\beta-2} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Henkel matris gözlem matrisi P_α kontrol matrisi Q_β ve A matrisi olarak k=1 için üç ayrı alt matrise tekil değer ayrıştırmasıyla (singular value decomposition) Denk. 6 elde edilebilir.

$$H(k)= P_\alpha \, A^k \, Q_\beta \tag{6}$$

Burada, $P_\alpha = \begin{bmatrix} C & CA & CA^2 & ..... & CA^{\alpha-1} \end{bmatrix}^T$ ve $Q_\beta = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & ..... & A^{\beta-1}B \end{bmatrix}$, k indisi 1'e eşitlendiği zaman, $H(0) = R\sum S^T$ yeni bir tanımla sistemin Markov parametreleri en küçük dereceyle gerçekleşme şartını sağlayan Denk. 7 ile ifade edilebilir;

$$Y_k = E_m^T R_n \sum_n^{1/2} \left[\sum_n^{-1/2} R_n^T H(1) S_n \sum_n^{-1/2} \right]^{k-1} \sum_n^{1/2} S_n^T E_r \tag{7}$$

Burada, $E_m^T = \begin{bmatrix} I_m & O_m & .... & O_m \end{bmatrix}$ ve $E_r^T = \begin{bmatrix} I_m & O_r & .... & O_r \end{bmatrix}$ *m* adet çıkış ve *r* giriş şartlarında *n*'inci dereceden matrislerdir. OKID ile tahmin edilen Markov parametre setiyle mukayese edilirse Denk. 8 elde edilir.

$$\hat{C} = E_m^T R_n \sum_n^{1/2}, \qquad \hat{A} = \left[\sum_n^{-1/2} R_n^T H(1) S_n \sum_n^{-1/2} \right], \qquad \hat{B} = \sum_n^{1/2} S_n^T E_r, \qquad D = Y_0 \tag{8}$$

Sayısal ayrık yapının eşdeğeri sürekli zaman ortamı mekaniğine Denk. 9 ile çevrilebilir kompleks Eigen değerleri $(\lambda_1, \ \lambda_2, \ .., \ \lambda_i, \ .., \ \lambda_n)$ ve Eigen vektörleri $(\psi_1, \ \psi_2, \ .., \ \psi_i, \ .., \ \psi_n)$ A_c' den hesaplanabilir.

$$A_c = \ln\left(\frac{\hat{A}}{dt}\right) \tag{9}$$

Modal açısal frekans ve modal sönüm oranları Eigen değerlerinden Denk. 10a ve 10b yardımıyla hesaplanabilir.

$$\lambda_i = -\xi_i\omega_i \pm i\omega_i\sqrt{1-\xi_i^2} \longrightarrow \lambda_i = \gamma_i \pm i\beta_i \quad \text{(10a)} \qquad \omega_i = \sqrt{\gamma_i^2 + \beta_i^2} \ \text{ ve } \ \xi_i = \frac{-\gamma_i}{\sqrt{\gamma_i^2 + \beta_i^2}} \quad \text{(10b)}$$

Modal genlikler ve mod şekilleri sırasıyla $\psi^{-1}B$ ve $C\psi$ matris çarpımları kullanılarak yapısal gözlem noktaları için hesaplanır. Modal parametrelerin tutarlılığı ve doğruluğu istatistiki tutarlılık

algoritmalarıyla yükseltilebilmektedir. Zaman tanım alanında analizlerin önemli gelişmelerinden biri olan OKID-ERA'nın teorik altyapısı, matematiği ve algoritmanın detaylı anlatımı Juang (1994)'de bulunmaktadır.

3. Frekans tanım alanında analiz

Çevrel gürültü veya zorlama girdi kuvvet zaman hikayesi *x(t),* +/- sonsuzluk içinde etkidiği kabül edilerek zaman tanım alanından frekans tanım alanına Denk. 11 kullanılarak Fourier dönüşümü (FD) yapılabilir. FD'ü ayrıştırılmış alt Sinüs hiperbolik fonksiyonlarının toplamını frekans ve genlik eksenlerinde grafik olarak verebilmektedir (Beyen, K., 2017a; Beyen, K., 2017b).

$$\mathcal{X}(\omega) = \mathcal{F}[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t}dt \tag{11}$$

Girdi kuvvete karşı gelişen yapısal tepki hikayesini *y(t)* ve Fourier dönüşümünü $Y(\omega)$ ile gösterecek olursak GÇ ilişkisiyle tarif edilebilecek transfer fonksiyonu Denk. 12 ile tanımlanabilir. Benzer şekilde zaman tanım alanında hesaplanan oto-korelasyonun Denk. 13a Fourier dönüşümü alınarak Denk. 13b oto-spektrumu ve benzer şekilde çapraz ve güç spektrumları Denklem 13c ve 13d ile hesaplanarak girdi ve çıktı arasında var olan zayıf ilişkiler transfer fonksiyonlarının içinde baskın hale getirilebilir. Dahası Denk. 12 şartları uygulanarak giriş ve çıkışın oto ve çapraz yoğunluk spektrumları kullanılarak örneğin sadece girdi kuvvetin elde olduğu durumlarda yapıya özgün elde edilmiş transfer fonksiyonuyla yapının tepki, oto ve çapraz spektrumları Denk. 13e, 13f ve 13g ile hesaplanabilir. Bu tanımlar kullanılarak sinyal çiftinin istatistiki tutarlılığı Denk. 13h'deki gibi hesaplanabilir (Beyen, K., 2017a,b ve 2015).

$$H(\omega) = Y(\omega)/\mathcal{X}(\omega) \tag{12}$$

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{+T/2} \mathcal{X}(t)\mathcal{X}(t+\tau)dt \tag{13a}$$

$$S_{xx}(\omega) = \mathcal{F}[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{13b}$$

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{+T/2} \mathcal{X}(t)Y(t+\tau)dt \tag{13c}$$

$$S_{xy}(\omega) = \mathcal{F}\big[R_{xy}(\tau)\big] = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{13d}$$

$S_{yy}(\omega)=|H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega)$ (13e) $S_{xy}(\omega)=|H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega)$ (13f) $S_{yy}(\omega)=|H(\omega)|^2 S_{yx}(\omega)$ (13g)

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \tag{13h}$$

4. Zaman-Frekans uzayında analiz

4.1 Dalgacık dönüşümü

Yapı tepkilerinin zaman hikâyesi zamanla değişen bazı yapısal parametre değerlerini vermekte öteyandan kaydın Fourier dönüşümünden elde edilen spektrumlar ise davranış karekteristiğini frekans tanım alanında vermektedir. Zamanda izlenen parametrelerin frekans yelpazesi içindeki değişimleri veya mod, modal frekans, modal sönüm ve faz gibi frekans parametrelerinin zamanla değişimi ancak ihtiyacı karşılayacak olan yeni bir fonksiyon tanımlanmasıyla gerçekleşmiştir. Bu yeni tanımlama hem zaman hemde frekans boyutunda bir fonksiyon *F(t,f)* olmalıdır. Denklem 14a'da genel olarak verilen zaman-frekans ilişkisi pencereleme işlemini yapabilen bir kernel fonksiyonuyla $\emptyset(\theta,\tau)$ farklı zaman-frekans bölgelerinde farklı enerji seviyelerinin bulunmasını amaçlar (Beyen, K., 2015).

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \emptyset(\theta,\tau)x^*\left(u-\frac{\tau}{2}\right)x\left(u+\frac{\tau}{2}\right)e^{-2\pi(\theta t+f\tau-\theta u)}du\,d\tau\,d\theta \quad (14a)$$

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (14b)$$

Zaman-frekans boyutunda sistemin mevcut enerjisinin zaman-frekans düzleminde dağılımını yüksek tutarlılıkla tahmin etmek ve belirsizliği azaltmak için farklı metodlar geliştirilmiştir. Belirsizlik teoreminde açıklandığı gibi frekansta yüksek çözünürlük sağlanırken aynı anda zamanda da yüksek çözünürlük gerçekleşememektedir (Beyen, 2015). Denk. 14a'da $\emptyset(\theta,\tau)$ fonksiyonu hem frekansın (ölçeğin) hemde zamanın τ bir fonksiyonu olan değişik taban (temel) dalga fonksiyonları olabilir. Burada $0<\theta<1$ şartlarında çok dar bir band oluşturan θ incelenecek sinyalin yüksek frekansına denk gelirken ($\theta \gg 1$) birden çok büyük değeri ise çok geniş pencerede bulunan çok düşük frekans bileşenine denk gelmektedir. İncelenen sinyalin yapısına uygun ana fonksiyonun seçimi ve zaman-frekans hassaslığının optimize edilmesiyle incelenecek sinyalin alt bileşenlere ayrıştırılmasında tutarlılık yükselmektedir. Temel dalgacığın fekans boyutuna değişen *a* ölçeği değerleri ve konumlarına değişen *b* değerleri verip integrallerden kurtarırsak sadece zaman boyunca tek integrele indirgenen Denk 14b ile bir *f(t)* sinyali kompleks eşleniği olan dalgacık fonksiyonu φ^*((t-b)/a) ile zamanda sürekli dalgacık dönüşümü (continuous wavelet transform CWT) gerçekleştirilebilir.

4.2 Hilbert-Huang Dönüşümü (HHD)

Hilbert tarafından önerilen dönüşüm, *1/(πt)* ile tanımlanmış bir zaman süzgeçiyle sinyal *x(t)*'nin evrişiminden (convolution) elde edilen $\hat{x}(t)$ ile dinamik olayların *Y(t)= x(t) +* $j\hat{x}(t)$ analitiği mümkün olmuştur. Huang'ın (1998) önerdiği bir ön ayrıştırma işlemiyle durağan olmayan sinyallerin çalışılması gerçekleşmiş ve uygulama sahası genişlemiştir. Ampirik alt fonksiyon ayrışımıyla (EMD) ilk olarak sinyalden farklı baskın frekansların domine ettiği özgün alt fonksiyon (Intrinsic Mode Function (IMF)) bileşenleri ayrıştırılır. Sinyal alt verilerinin (IMF bileşenlerinin) ve artık verinin toplamı Denk. 15 ile gösterilebilir. X(t) analiz edilen veriyi, $\boldsymbol{r_n}$, $\boldsymbol{n}$ yineleme sonucu geride kalan veriyi ve $\boldsymbol{c_j}$ ise $\boldsymbol{j}$'ninci alt veriyi ifade etmektedir.

$$X(t)=r_n+\sum_{j=1}^{n}c_j \quad (15)$$

Denk. 16 ile ayrıştırılmış guruba Hilbert Dönüşümü (HD) uygulanarak davranış verilerinin zamanla değişen genlik, frekans ve faz bilgilerinin Denk. 17 ile izlenmesiyle bir çok dinamik problem anlaşılabilmiştir (Huang vd., 1998).

$$Y_j(t)=\frac{1}{\pi}PV\int_{-\infty}^{\infty}\frac{c_j(\tau)}{t-\tau}d\tau \quad (16)$$

Analitik sinyal $Z_j(t)$; $$Z_j(t)=X_j(t)+iY_j(t)=a_j(t)e^{i\boldsymbol{\theta}_j(t)} \quad (17a)$$

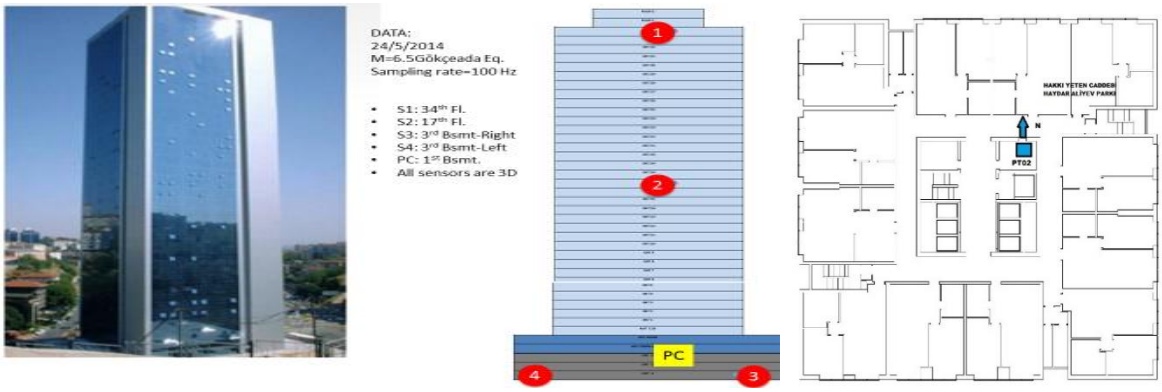
$Z_j(t)$'nin anlık genliği; $$a_j(t)=\sqrt{X_j^2(t)+Y_j^2(t)} \quad (17b)$$

$Z_j(t)$'nin anlık frekansı; $$\theta_j(t)=arctan\frac{Y_j(t)}{X_j(t)} \quad w_j(t)=\frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad f(t)=\frac{1}{2\pi}\frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad (17c)$$

5. Çalışma yapısı izleme ağı ve verileri

Çalışılan bina betonarme (BA) çerçeveli tüp sistem olup, dışında bulunan çerçeve elemanlar rüzgâr etkilerinin önemli bir kısmını ve düşey yükleri karşılarken merkezde bulunan BA perdeler eğilme ve kayma kuvvetlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Yapısal hareket serbestlikleri ise kat döşeme düzleminde iki ortagonal yatay yer değiştirme ve düşey eksen etrafında burulmadır. Yapı boy görünümü ve izleme ağı konum ve yönleriyle beraber kat planları Şekil 1'de gösterilmiştir. Konut amaçlı tasarlanmış olan kule yapı toplam yüksekliği 152 metredir. Çalışılan yapı üzerine serili 3 eksenli 4 adet ivme ölçerden oluşan gözlem ağı Şekil 1'de boyuna çizimde ve kat planlarında

gösterilmiştir. Kaydedilen deprem, patlatma, çevrel titreşimler ve fırtınanın tetiklediği yapısal titreşimlerin ivme-zaman hikâyeleri bodrum, 17. ve 34. Katlar seviyesinde kaydedilmiştir.



Şekil 1. Yapı genel görünümü (sol), boy ve normal kat planında cihaz konumları.

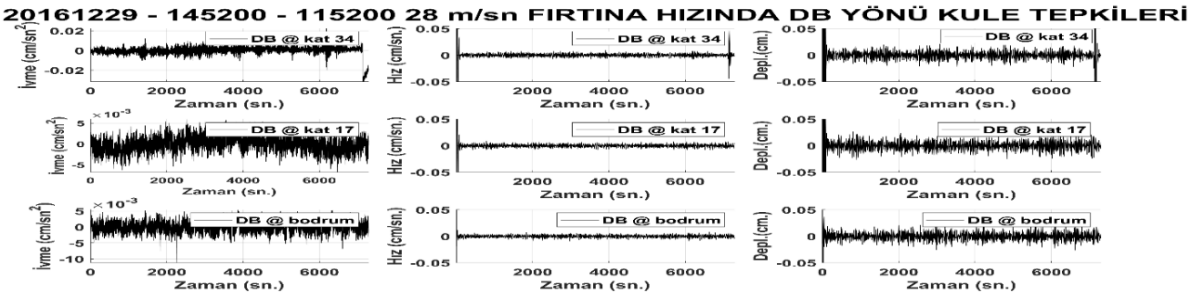
Fırtına kaynaklı yapısal ivme kayıtlarının yanısıra Çizelge 1'de görüldüğü gibi son yıllarda oluşmuş bölgesel depremler ve bir yerel patlatma kaydı bu çalışmada yapı davranışının anlaşılması için kullanılmıştır. Hızı (100Km/saat) 28m/sn'yi bulan fırtına kaynaklı yapı titreşimlerinin DB yönü kat-34, kat-17 ve bodrumda kaydedilmiş yaklaşık 2 saat süreli tipik ivme, hız ve deplasman kayıtları Şekil 2'de ve tipik bir yakın alan deprem kaydı ivme, hız ve deplasman zaman geçmişi olarak Şekil 3'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yüksek yapının kaydettiği depremler ve patlatma

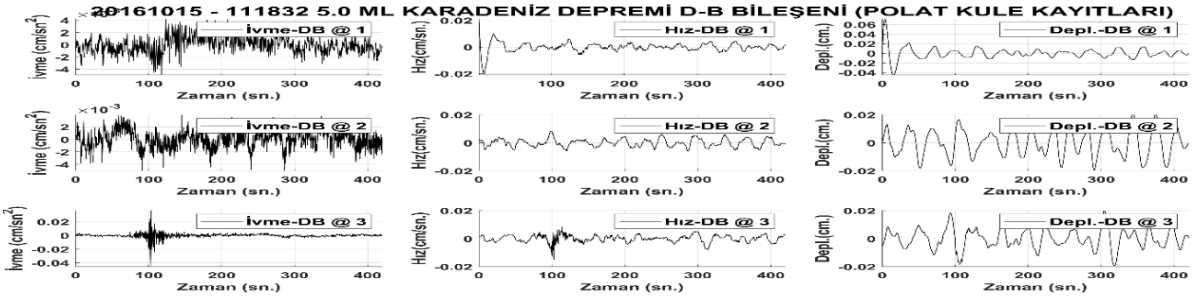
TARİH	ZAMAN (UTC)	ENLEM	BOYLAM	DERİNLİK	DEPREM BÜYÜKLÜĞÜ			YER
	(Uluslararası)			(km)	ML	MD	Mw	
20130730	05:33:08	40,304	25,7803	9,8	5,3			Kaleköy-Gökçeada
20131124	19:49:37	40,784	31,876	8	4,8			Ulumescit (Bolu)
20131127	04:13:37	40,851	27,9198	9,6	4,7			Marmara E. açıkları
20141122	19:14:15	45,742	27,2147	27,9	5,6			Romanya
20150416	19:07:43	35,075	26,9095	22,1	6,1			Girit adasi açıkları
20160601	21:14:10	40,8582	28,2177	13,2	3,3		3	Silivri açıkları
20160607	04:09:45	40,2627	29,1460	11,5	4,6		4	Gürsu –Bursa
20160615	05:20:57	40,8627	28,2198	8,9	3,3		3	Silivri açıkları İstanbul
20160924	23:11:18	45,7470	26,6192	103,8	5,8			Romanya
20161015	08:18:32	42,2063	30,7133	11,4	5,0		5	Karadeniz
20161210	19:29:00							Beşiktaş Patlatma
20161228	23:20:57	45,3533	26,5457	49,7	5,9			Romanya

6. Yapının dinamik özelliklerini tanılama çalışması

Eşzamanlı alınmış titreşim sinyallerinden oluşan yapı sağlığı izleme kayıtları önemli yapısal davranış bilgilerini tutmakta ve uygun tanılama algoritmalarıyla zaman ve frekans ortamında yapıya özgün dinamik değerler elde edilebilmektedir. Yukarıda özetlenen metodlar matlab (2019) platformunda

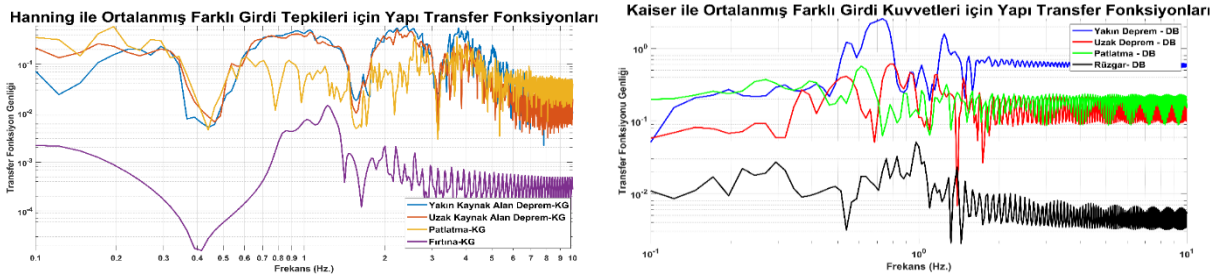


Şekil 2. Fırtına şartlarında karekteristik kule yapı ivme tepki hikâyeleri

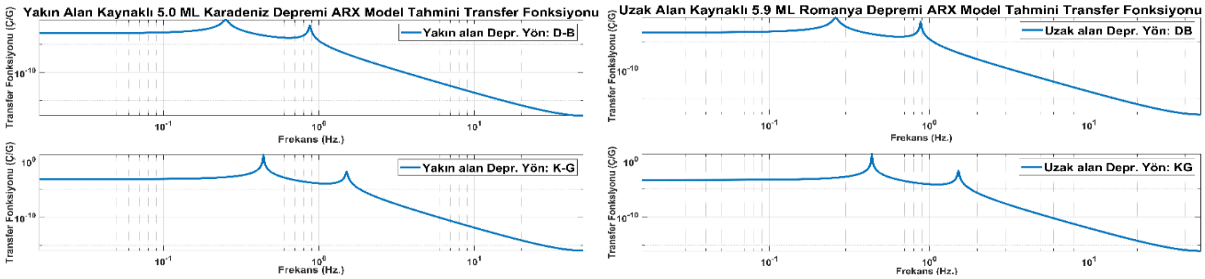


Şekil 3. 2016-10-15 tarihinde kaydedilmiş olan 5.0ML Karadeniz depremi DB yönü ivme, hız ve deplasman geçmişinin Kat 34, Kat 17 ve Bodrum katındaki davranışı.

gerçekleştirilmiş olan makro yazılımlarla çözülmüş ve tipik örneklerle yapı tanılama sonuçları kısaca tartışılmıştır. Sinyal analizlerinde genel yapısal davranışın anlaşılmasına katkı vermeyen gürültü 0.05Hz öncesi ve 50 Hz Nyquist frekansı sonrası ham veriden süzdürülerek yapı tanılama çalışılmıştır. Çevrel titreşim altında lineer elastik davranış sergileyen yapı çerçevesiyle eş zamanlı yapı temelinden (Bodrum kat istasyonu) alınan yapı girdi kayıt çiftleri kullanılarak klasik Fourier dönüşüm tabanlı güç spektrumlarıyla KG yönü için yakın ve uzak depremler, patlatma ve fırtına gibi değişik girdi kuvvet tepki kayıtları kullanılarak güç spektrumları yardımıyla transfer fonksiyonları (TF) hesaplanmış ve Şekil 4a'da görüldüğü gibi Hanning penceresi uygulanarak ortalanmıştır. KG yönü için tepe frekanslarından yapısal modları sırasıyla yaklaşık 0.25 Hz., 0.8 Hz. - 1.2 Hz. bandı, 2.5 Hz. ve 4 Hz. olarak geniş frekans band yapısı içinde tespit edilebilmektedir. DB yönü için tipik bir örnek oluşturması için bu defa Kaiser penceresiyle yumuşatılmış TF Şekil 4b' de çizilmiştir. DB yönünde 0.25 Hz. ve yaklaşık 0.8 Hz. ve 1.5 Hz olarak farklı girdi tepkilerinin ortak tepe frekansları olarak seçilebilmektedir. Şekil 5'de KG ve DB yönleri için ML 5.0 20161228 Karadeniz depremi tepki kayıtları kullanılarak geriden beslemeli otomatik regrasyon (ARX) parametrik model üzerinden TF tahmini yapılmıştır. DB yönünde 0.25 Hz. ve yaklaşık 0.9 Hz., KG yönü için yaklaşık 0.42 Hz. ve 1.6 Hz. 'lerde yapısal tepkiler ortaya çıkmıştır. Polinomlarla



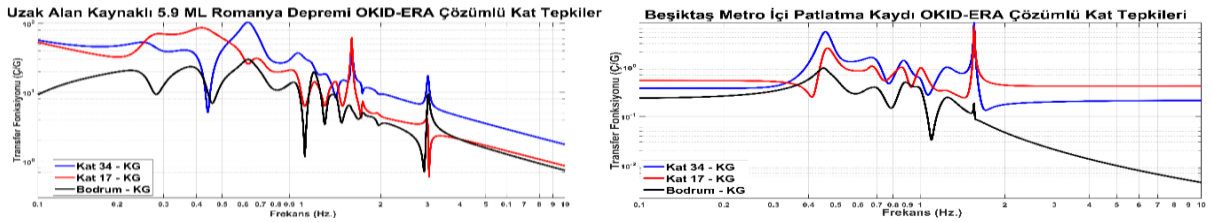
Şekil 4. Farklı girdi kaynak tepkileri Kat34 KG yönü için Hanning ile ortalanmış TF (sol), DB yönü için Kaiser penceresiyle ile ortalanmış TF (sağ).



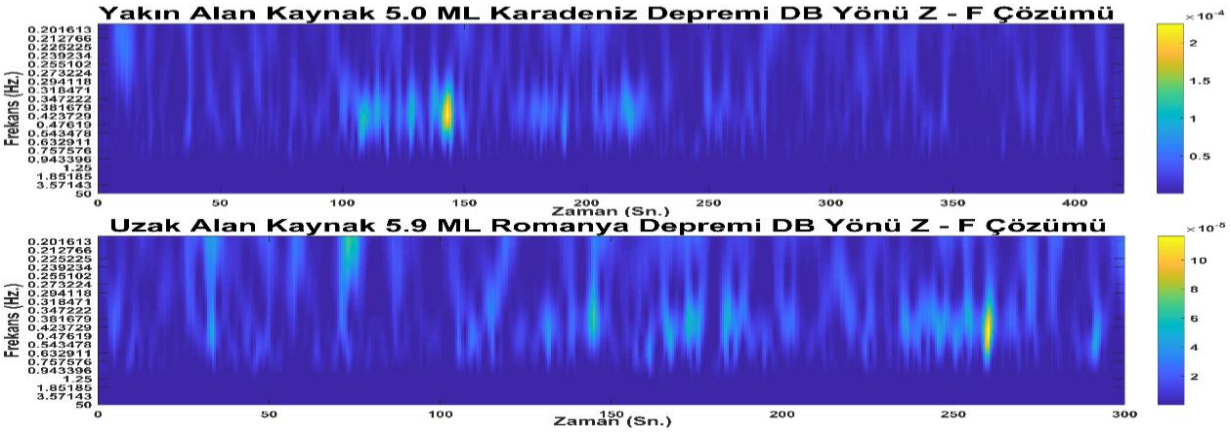
Şekil 5. DB ve KG yönleri için 5.0 ML Karadeniz ve 5.9 ML Romanya depremleri tepki kayıtları ARX parametrik model transfer fonksiyon tahmini yakın alan (sol) ve uzak alan (sağ) depremleri.

ifade edilen parametrik model ileri mod tahmini ve tutarlılığın artması için ve model derecesi (seviyesi) yükseltilebilir. Uzay-durum ortamında gözlemci Kalman süzgeçleriyle Eigen özdeğer gerçekleşme algoritması (OKID-ERA) uygulanarak ML 5.9 20161228 Romanya deprem tepkilerine göre KG yön için TF tahmini Şekil 6 solda ve patlatma tepkilerine göre ise sağda TF tahmini verilmiştir. Seçilen tepe

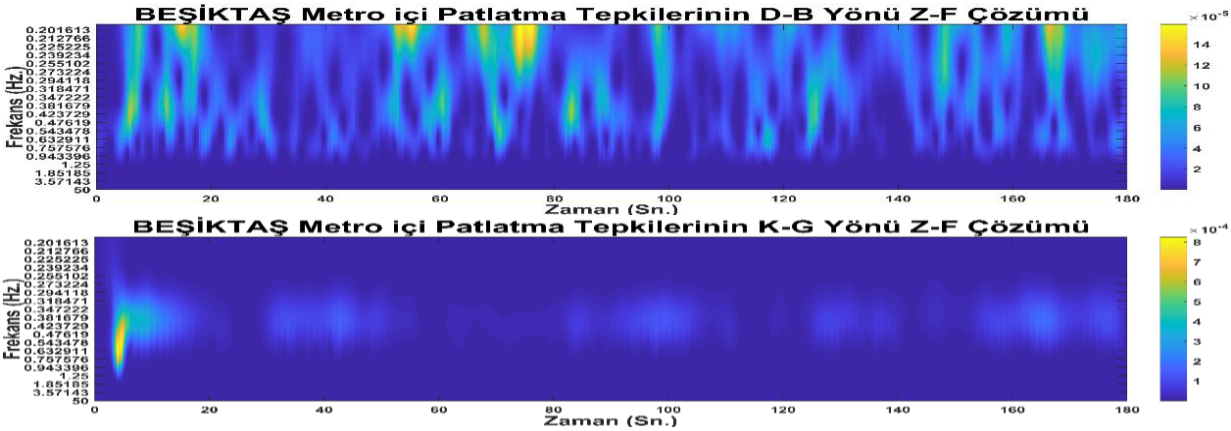
frekanslar sırasıyla 0.25 Hz., 0.42 Hz., 0.61 Hz., 1 Hz. 1.6 Hz. ve 3.1 Hz.'ler olup yapı tepkileri KG yönü için elde edilmiştir. Patlatma girdileri örneğin 3 Hz.'lik yapı tepkisi üretememiştir. Dinamik davranışı tam bilinmeyen bir yüksek yapıda kaydedilmiş titreşim sinyalleriyle yürütülen analizlerde yakın ortak sonuçlar sağlanmıştır. DB yönünde yapının doğal hakim frekanslarını 0.25Hz, 0.9Hz; KG yönünde 0.4Hz, 1.4Hz ve yaklaşık 3Hz'lerde global tepki tepelerinin bütün kayıt istasyonlarında ortak harekete iştirak ettikleri söylenebilir. Ayrıca Şekil 7'de verilen grafiklerde ise uygun ana dalgacık ailesi kullanılarak wavelet analizleri yürütülmüştür. Şekil 8'de verilen patlatma tepkilerinin dalgacık analiz sonuçları KG'de patlamanın ilk tepkiyi yaklaşık 4. saniyede 0.43 Hz- 0.75 Hz. bandında yapı tepkiler geliştirdiği sonrasında 0.42 Hz. frekans merkezli düşük enerjili dalga cephelerinin 180 saniyelik kayıt içinde paket yayılım etkisiyle P dalgası formunda seyahat ettiği; DB yönünde 0.22 Hz. ve 0.4 Hz.'de tepeler üreten KG'e dik kayma dalgası formunda deplasmanlar olduğu izlenmektedir. Şekil 9 Hilbert-Huang Transformu (HHT) ML 3.8 büyüklüğünde Karaburun Arnavutköy İstanbul depreminin sonuçlarıdır. Zaman ekseninde frekans değişkenliği uzak, yakın depremlerde, patlatma kayıtlarında ve fırtına şartlarında stasyoner lineer özellik gösterdiği anlaşılmaktadır.



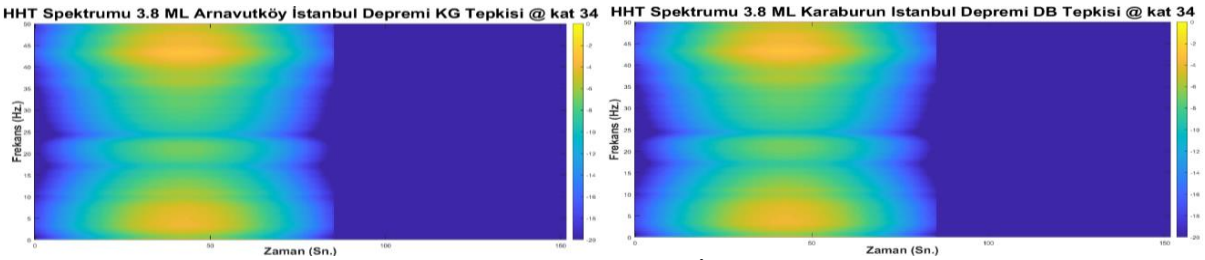
Şekil 6. Uzay-durum ortamında gözlemci Kalman süzgeçleriyle Eigen gerçekleşme algoritması (OKID-ERA) uygulanarak 5.9 ML Romanya depremi (sol) ve patlatma (sağ) tepkilerine göre TF tahmini.



Şekil 7. Yakın alan kaynaklı Karadeniz 5.0 ML (üst) ve Uzak alan kaynaklı Romanya 5.9 ML (alt) depremlerinin DB Yönü tepkilerinin Dalgacık Dönüşümlü Z-F spektrumları.



Şekil 8. Beşiktaş metro inşaatı patlatma tepkilerinin DB (üst) KG (alt) yönler için Sürekli Dalgacık Dönüşümlü zaman-frekans (Z-F) güç spektrumları.



Şekil 9. KG (sol) ve DB (sağ) yönleri 3.8 ML Arnavutköy-İst. depremi kat34 tepki HHT Spektrumu

7. Sonuçlar

Bu çalışmada; incelenen yüksek yapı üzerinde kurulu yapı sağlığı izleme ağı değişik kaynakların girdi kuvvetlerine yapının verdiği tepkileri yapı tanılama çalışmalarında kullanarak yapı karekteristik özelliklerini değişik yöntemlerle tahminini özetlenmiştir. Girdi kuvvetleri oluşturan veri seti zayıf, kuvvetli, yakın ve uzak kaynak alanları olan değişik deprem kayıtları, fırtına kayıtları ve metro içi dinamit patlatma kaydı ve yapı tepkilerinin izlendiği istasyon kayıtlarından oluşmaktadır. DB yönünde yapının doğal hakim frekanslarını 0.25Hz, 0.9Hz; KG yönünde 0.4Hz, 1.4Hz ve yaklaşık 3Hz'lerde global tepki tepelerinin bütün kayıt istasyonlarında ortak harekete iştirak ettikleri söylenebilir. Etkiyen bütün bu doğal kuvvetlerin genelde doğada olduğu gibi birbirlerinin alternatifi olmadığı, çalışılan mühendislik yapısının dinamik özelliklerinin tam anlaşılmasında birbirlerinin zayıf ve duyarsız kaldıkları frekans bandlarının davranış bilglerini tamamladıkları görülmektedir. Ayrıca, bir yüksek yapı üzerinde kurulu yapı sağlığı izleme ağından elde edilen veri setlerinden elde edilen sonuçların periyodik takibi yapıda olabilecek anomalilerin tesbiti için önemli bir arşiv oluşturmaktadır.

8. Teşekkür

Çalışmada kulanılan yapı sağlığı izleme kayıtları Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Bölümü hocalarımız sayın Prof. Dr. Erdal Şafak ve sayın Prof. Dr. Eser Çaktı tarafından verilmiştir. Müteşekkirim. Destekleri için teşekkür ediyorum.

Kaynaklar

Beyen, K., 2017a, 'Deprem ve Çevrel Titreşimler Etkisinde Yüksek Binalarda İnsanın Algısı ve Komfor Kalitesinin Değerlendirilmesi', 4. UDMSK, 11-13 Ekim, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Beyen K., 2017b, 'Titreşim Verisiyle Güncellenmiş Sonlu Eleman Modeliyle Hasar Simülasyonu', Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32:2 403-415.

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

Bendat JullusS., 1990, Nonlinear system analysis and identification from random data. Wiley-Interscience; 1990.

Huang, N., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N-C, Tung, C. C., Liu, H., 1998, 'The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis', https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193

Juang J-N, Pappa RS., 1985, An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 1985;8(5):620–7.

Juang J-N., 1994, Applied System Identification. Englewood Cliffs (NJ 07632): Prentice Hall, Inc.; 1994.

MATLAB 2019a: The MathWorks Inc., Natick, MA (2019)

Phan MQ., 1997, Observer/Kalman filter identification (OKID): step-bystep guide and references. In: A Matlab-based system identification software package. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University; 1997.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (TBDY-2018), 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.