

YAPI TİTREŞİMLERİNİN İZLENMESİ: NEDİR, NEDEN YAPILIR, NASIL YAPILIR, VE NE ELDE EDİLİR?

STRUCTURAL MONITORING: WHAT IS IT, WHY IS IT DONE, HOW IS IT DONE, AND WHAT IS IT WORTH?

Erdal ŞAFAK¹

ÖZET

Elektronik ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yapıların deprem altındaki dinamik davranışlarını yapıya kurulan izleme sistemleri vasıtasıyla incelemeyi laboratuvar ve analitik yöntemlere karşı hem daha ekonomik hem de daha doğru sonuçlar veren bir alternatif haline getirmektedir. Bu konudaki en büyük gelişmeler deprem mühendisliği alanında olmaktadır. Bugün deprem bölgelerinde enstrümantasyon edilmiş yüzlerce bina gerçek bir arazi laboratuvarı oluşturmakta ve her depremde binlerce sayıda benzeri olmayan datalar sağlamaktadır. Bu makalede deprem mühendisliğinde kullanılan yapı izleme sistemlerinin amacı ve kullanılan yöntemler kısaca anlatılmıştır. Makalenin ilk bölümünde izleme sistemlerinde kullanılan sensörlerin yapı içinde nasıl yerleştirileceği konusu ele alınmakta, daha sonra kaydedilen datanın nasıl analiz edileceği konusunda basit yöntemler anlatılmaktadır. Yapı izleme sistemlerinin pratikte kullanılmasındaki en önemli adım alınan kayıtların doğru olarak analiz edilmesidir. Bu konu genelde deprem ve yapı mühendislerinin uzmanlık alanı dışında olduğu için birçok data yeterince analiz edilememektedir. Bu makalede anlatılan basit yöntemler sadece Fourier transformu ve bant-geçişli filtrelemeyi gerektirdiğinden konunun uzmanı olmayan kişiler tarafından da rahatlıkla kullanılabilir. Bu yöntemlerle yapının modal karakteristikleri (periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları), yapıdaki burulma ve salınım titreşimlerinin genlik ve periyotları, ve yapıda yapı-zemin etkileşiminin olup olmadığı ve varsa mertebesi kolaylıkla tayin edilebilir. Makalede metodların ana hatları teorik detaya girmeden ve basitleştirilerek verilmiştir. Daha detaylı bilgiler verilen referanslarda bulunabilir.

Anahtar Kelimeler: Yapı izlenmesi, yapı dinamiği, deprem, enstrümantasyon, data analizi.

ABSTRACT

Rapid developments in electronics and computer technologies made structural instrumentation a feasible alternative to laboratory testing and analytical approaches when studying seismic response of structures. The biggest developments in this area have been in earthquake engineering. Today, hundreds of instrumented buildings in seismically active regions provide a real field laboratory, providing thousands of records during earthquakes. In this paper, the objectives of structural monitoring systems are outlined, and current approaches used in earthquake engineering are discussed. The paper first deals with the placement of sensors in a structure with , then several simple techniques for data analysis are introduced. In practical applications, the most important component of structural monitoring is accurate data analysis. Since this is a subject outside the domain of expertise of structural and earthquake engineers, a lot of such data sets are not being adequately analyzed. Simple analysis methods suggested in the paper require the utilization of Fourier transforms and band-pass filters only, so that they can easily be used by non experts. With the methods given, the modal characteristics of the structure (e.g., modal frequencies, mode shapes, damping ratios), the amplitudes and periods of torsional and rocking vibrations, and the

¹ Profesör, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul;
erdal.safak@boun.edu.tr

presence and the magnitude of soil-structure interaction can easily be determined. The methods are presented in a simplified way without the theoretical details. Further details can be found in the references given.

Keywords: Structural monitoring, structural dynamics, earthquakes, instrumentation, data analysis.

GİRİŞ

Son yirmi yıl içinde elektronik ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yapı mühendisliğinde de önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Bu değişikliklerin en çarpıcı örneklerinden birisi yapıların dinamik davranışlarının incelenmesi konusunda izlenen yöntemlerdir. Eskiden laboratuvar testleri veya analitik yöntemlerle çözülmekte olan birçok problem bugün gerçek yapılara kurulan izleme sistemleri sayesinde çok daha doğru olarak çözülebilmektedir.

Bu konudaki en büyük gelişmeler deprem mühendisliği alanındadır. Yapıların deprem altındaki dinamik davranışları genelde analitik modeller veya sarsma masaları üzerine kurulan küçük ölçekli model yapılar vasıtasıyla araştırılmaktaydı. Günümüzde üzerlerine aletler yerleştirilmiş deprem bölgelerindeki yüzlerce yapıdan alınan deprem dataları yapıların deprem davranışı konusunda çok daha gerçekçi bilgiler vermektedir.

Gerçek yapılardan alınan deprem dataları laboratuvar deneylerinden alınan dataları geçersiz kılan değil fakat tamamlayan datalar olarak görülmelidir. Modelleme ve ölçeklemeden doğan hatalara ilave olarak laboratuvar testlerinin en büyük dezavantajı temel etrafındaki zemin yer değiştirmelerinin deprem davranışına etkisinin (yapı-zemin etkileşiminin) testler sırasında göz önüne alınmamasıdır. Gerçek binalardan alınan deprem dataları yapı-zemin etkileşiminin, özellikle yumuşak zeminlere oturan ağır yapılarda, çok büyük bir faktör olduğunu göstermektedir. İzleme sistemleri sayesinde yapıların deprem davranışları, yapı-zemin etkileşimi de dahil, çok daha doğru bir şekilde izlenebilmektedir. Buna karşılık laboratuvar deneyleri çok daha kontrollü bir ortamda yapılan, istenildiği zaman yapılabilen, istenildiği kadar tekrar edilebilen, ve yapı deplasmanlarının lineer sınırın ötesinde istenildiği kadar artırılabilirdiği deneyler olduğu için önemlidir.

İzleme sistemlerinden alınan datalar öncelikle yapının dizaynı ve analitik modellenmesi sırasında kullanılan dinamik parametrelerin (örneğin, periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları gibi) doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılır. Ayrıca data sayesinde yapının elastik ve inelastik davranışlarını, yapı-zemin etkileşiminin mertebelerini, burulma ve salınım titreşimlerinin genlik ve periyotlarını, yapıda gözle görülemeyen hasarların olup olmadığını tayin etmek mümkün olabilir. Bu bilgilerin tayin edilebilmesindeki en önemli faktör deprem hareketinin büyüklüğüdür. Deprem ne kadar büyükse yapı deplasmanları da o kadar olacak, ve dolayısıyla datalardan çıkarılacak bilgi de o kadar çok olacaktır.

Yapıların dinamik hareketlerinin izlenmesindeki en son uygulama Yapı Sağlığı İzlemesi (*Structural Health Monitoring*) olarak adlandırılan gerçek zamanlı izleme sistemleridir. Bu sistemlerde yapının hareketleri gerçek zamanlı ve sürekli olarak sürekli izlenir, ve kayıtlar da yine gerçek zamanlı olarak analiz edilir. Bu sistemlerde amaç yapının dinamik özelliklerinde olan her türlü değişikliği anında tespit edip bunun yapı için bir tehlike oluşturup oluşturmadığına karar vermektir. Dinamik özelliklerdeki değişiklikler deprem, fırtına, patlama gibi aşırı yüklerin oluşturduğu ani hasarlar nedeniyle olabildiği gibi, yapıda normal kullanımdan doğan aşınmaların zamanla birikmesiyle oluşan hasarlar nedeniyle de olabilir. Yapı Sağlığı İzlemesi başlıbaşına ayrı bir konu olduğu için bu makalede ele alınmayacaktır. Bu konuyla ilgili detay ve referanslar Şafak (2004, 2005) ve Şafak vd. (2007) de bulunabilir.

Yapı izleme sistemlerinin pratikte uygulanmasında en önemli konu alınan kayıtların doğru bir şekilde analizi ve datada saklı bilgilerin optimum şekilde açığa çıkarılmasıdır. Bu konular yapı mühendisliğinden çok elektrik ve sistem mühendisliğinin konuları olduğu için deprem mühendisliği literatüründe bir çok yanlış veya eksik data analizi içeren makalelere rastlamak mümkündür. Bu makalede yapı izleme sistemlerinin ve data analiz yöntemlerinin ana hatları özet olarak anlatılmak üzere, ve uygulama ile ilgili bazı örnekler verilmektedir. Konu ile ilgili daha detaylı bilgiler verilen referanslarda bulunabilir (örn. Ljung, 1987; Şafak, 1988, 2001).

AMAÇ VE YÖNTEMLER

Yukarıda da belirtildiği gibi yapı izleme sistemlerinin ana amaçları yapının dinamik ve statik hareketlerini kaydetmek, bu davranışı kontrol eden parametrelerin sayısal değerlerini kayıtlardan hesaplamak, ve bu parametrelerdeki değişiklikleri ve bu değişikliklerin yerlerini ve nedenlerini tayin etmektir. Bu bilgiler daha sonra mevcut yapı dizayn ve analiz metotlarının doğruluğunun kontrolünde, yapı yönetmeliklerinin iyileştirilmesinde, yeni yapı tamir ve takviye metotlarının geliştirilmesinde, ve yapılardaki hasarın yer ve büyüklüğünün tespitinde kullanılır.

Deprem mühendisliğinde kullanılan yapı izleme sistemlerindeki standard uygulama yapıya beklenen ana hareket birleşenlerini tayin etmeye yeter sayıda ve konumda ivme ölçerler koymak ve bunları senkronize olarak merkezi bir kayıt sistemine bağlamak olarak özetlenebilir.

Gerekli sensörlerin sayısı ve konumu ölçülecek hareketin iki veya üç boyutlu olmasına bağlı olarak değişir. Rijid bir kütlenin düzlemde veya uzayda yaptığı yer değiştirmeleri tarif eden koordinat transformasyonu denklemlerini yazarak gerekli sensör sayısını ve konumu belirlemek mümkündür. İki boyutlu (bir düzlem içinde) olan bir hareket iki öteleme ve bir dönme ile tanımlanabilir. Dolayısıyla, böyle bir hareketi olan rijid bir yapıda (örneğin kayma duvarlı ve rijid kat döşemeli bir binanın katları) bu üç bilinmeyi tayin edebilmek için en az üç ölçmeye ihtiyaç vardır. Rijid hareket denklemlerindeki öteleme ve dönmelerin tekil olarak çözülebilmesi için üç ölçmenin aşağıdaki şartları sağlaması gerekir:

1. Ölçmeler en az iki değişik noktada yapılmalıdır.
2. Ölçmelerin doğrultularının üçü de birbirine paralel olmamalıdır.
3. Ölçmelerin doğrultularının üçü de tek bir noktada kesişmemelidir.

Benzer şekilde, üç boyutlu (uzayda) bir hareket üç öteleme ve üç dönme ile tanımlanabilir. Böyle bir hareketi olan rijid bir yapıda (örneğin asma köprü tabliyelerini oluşturan parçalar) bu altı bilinmeyi tayin edebilmek için en az altı ölçmeye ihtiyaç vardır. Rijid hareket denklemlerindeki öteleme ve dönmelerin tekil olarak çözülebilmesi için altı ölçmenin aşağıdaki şartları sağlaması gerekir:

1. Ölçmeler en az üç değişik noktada yapılmalıdır.
2. Ölçmelerin yapıldığı noktalar bir doğru üzerinde olmamalıdır.
3. Ölçmelerin doğrultularının altısı da birbirine paralel olmamalıdır.
4. Ölçmelerin doğrultularının altısı da tek bir noktada kesişmemelidir.

Yukarıdaki koşullar yapı hareketinin rijid bir kütle hareketi olduğu varsayımına dayanmaktadır. Esnek yapılar için yapıyı her biri rijid kabul edilebilecek küçük parçalar halinde düşünmek, ve bu koşulları her bir parça için uygulamak gerekir. Örneğin, çok katlı bir bina enek bir yapıdır, fakat binanın kat döşemeleri yatay düzlemde hareket eden rijid parçalar olarak düşünülebilir. Dolayısıyla, binanın her katında yukarıda belirtildiği şekilde üç ölçme yapar ve her kattaki ölçmeleri simultane kaydederek bütün binanın davranışını ölçmüş oluruz.

Esnek yapılarda sensörler kabul edilen rijid parçaların hareketlerini ölçecek şekilde, ve mümkünse birden fazla parça için ortak ölçme yapacak şekilde yerleştirilir. Bina tipi yapılar için sensörlerin yerleri ve sayısı konusunda aşağıda genel kurallar verilebilir:

1. İlk grup sensörler binanın çatı katına konulmalıdır.
2. İkinci grup sensörler binanın temel üstüne (zemin veya bodrum katı) konulmalıdır.
3. Üçüncü grup sensörler binada rijitliğin ve kütlenin değiştiği noktalara konulmalıdır.
4. Daha sonraki sensör grupları binanın serbest titreşim modlarının maksimum olacağını tahmin ettiğimiz noktalara konulmalıdır.

Her grupta ne kadar sensör olacağı binanın beklenen davranışına göre değişir. Örneğin sadece yatay titreşimlerin beklendiği bir binada her kata üç sensör yeterlidir. Eğer yatay harekete ilave olarak salınım tipi (temel etrafındaki rijid yapı dönmeleri - *rocking motions*) hareketler de bekleniyorsa temele üç yataya ilave olarak üç de düşey sensör koymak gerekir.

DATA ANALİZİ

Aletlerden alınan kayıtların analiz edilmeden önce data prosesi denilen bir data temizleme işleminden geçirilmesi gerekir. Bu işlem analizi kolaylaştırdığı gibi analiz sonuçlarındaki hata oranlarını da azaltır. Deprem kayıtları için data prosesi aşağıdaki adımları kapsar:

1. Datadaki ortalama değerlerin ve lineer hataların ayıklanması (base-line correction).
2. Kayıtlarda gürültünün fazla olduğu çok düşük ve çok yüksek frekanslı kısımların filtre edilmesi.
3. Yapıda mevcut en yüksek frekans değerleri göz önüne alınarak gerekirse kayıtlardaki örnekleme aralığının yükseltilmesi (decimation).
4. Eğer sensörlerden alınan kayıtlar senkronize değilse analitik yöntemler kullanarak kayıtların senkronize edilmesi.

Verilen bir kayıttan çıkarılabilecek frekansların en küçük aralığı, Δf , ve en yüksek frekans değeri, f_N , kayıtın uzunluğu ve örnekleme aralığı ile ilgilidir ve aşağıdaki formüllerle belirlenir:

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t}, \quad f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1)$$

Denklemlerde N kayıttaki toplam nokta sayısını ve Δt de kayıtın örnekleme aralığını gösterir. Literatürde Δf frekans çözünürlüğü (*frequency resolution*) ve f_N de Nyquist frekansı (*Nyquist frequency*) olarak adlandırılır. Bu denklemlere göre N -nokta uzunluğunda ve Δt örnekleme aralığında bir kayıta birbirine Δf den daha yakın iki frekansı birbirinden ayırmak mümkün olmadığı gibi f_N den daha büyük frekansları görebilmek de mümkün değildir.

Bir dinamik sistemden elde edilen kayıtların analiz edilerek sistemin mekanik karakteristiklerinin bulunması konusu ile ilgilenen bilim dalı Sistem Tanımlanması (*System Identification*) olarak adlandırılır. Bu konuda literatürde onlarca kitap ve yüzlerce makale bulmak mümkündür (örn., Ljung, 1987; Södersström and Stoica, 1989; Juang, 1993). Sistem Tanımlaması için tavsiye edilen metotlar da en basitinden en komplikesine kadar çok geniş bir spektrumu kapsar. Bu konu genelde yapı mühendislerinin uzmanlık alanına girmediği için bu makede sadece basit sistem tanımlama yöntemleri verilecektir. Verilecek yöntemler sadece Fourier transformu ve band-geçişli (*band-pass*) filtre uygulamalarını gerektirir.

Yapının dinamik davranışı ile ilgili ana parametrelerinin kayıttan nasıl elde edileceği aşağıda her bir parametre için özet olarak verilmiştir.

Modal Frekanslar

Yapının modal frekanslarını bulmanın en basit yolu proses edilmiş datanın Fourier transformunu almaktır. Fourier transformu esas olarak datanın sonlu sayıda sinüs eğrisinin genliklerini değiştirerek ve birbirine göre kaydırarak toplanmasına eşdeğer hale getirme işlemidir. N noktalı ve Δt örnekleme aralıklı bir data için Fourier transformundaki frekans eksenini aşağıdaki frekans değerlerinden oluşur:

$$f_k = \frac{k-1}{N \cdot \Delta t}, \quad k = 1, \dots, N/2 + 1 \quad (2)$$

Fourier transformunda genliğin maksimum olduğu frekanslar yapının modal frekanslarının gösterir.

Genelde her kayıt hem yapıyla ilgili olmayan dış nedenlerin, hem de sensör ve kayıt sistemindeki elektronik ve mekanik parçaların yarattığı yapıya ait olmayan ve gürültü olarak adlandırılan bir miktar istenmeyen sinyalleri içinde bulundurur. Genelde bu istenmeyen sinyaller geniş bir frekans bandını kapsar ve Fourier transformunda bir çok yapıyla alakası olmayan suni maksimumların oluşmasına sebep olur. Bu maksimumların yapının tabii frekanslarından oluşan maksimumlara etkisini azaltmak için Fourier transformları simetrik kayıcı pencereler kullanılarak

düzleştirilir. Kayıcı pencerenin işlevi her hangi bir frekanstaki Fourier genlik değerini o frekans civarındaki genliklerin ağırlıklı ortalaması cinsinden yenide hesaplamak olara özetlenebilir. Matematik olarak bu aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\bar{A}_f = \sum_{k=1}^{2m+1} W_k \cdot A_{f-m-1+k} \quad (3)$$

\bar{A}_f ve A_f düzleştirilmiş ve orjinal Fourier genliklerini, W ise $2m+1$ uzunluğundaki simetrik düzleştirme penceresini gösterir.

Kayıcı pencereler gürültüden olan maksimumların Fourier transformundaki etkisini azaltır ve yapının modlarından doğan gerçek maksimumların daha net olarak tanımlanabilmesini sağlar. Düzleştirme pencerelerinin seçiminde en önemli parametre pencere uzunluğudur. Çok kısa pencereler görüntü etkisini yeterince azaltmazken, çok uzun pencereler gürültünün yanı sıra yapının bazı modlarını da elimine edebilir. Optimum pencere uzunluğunu bulmak için basit bir yöntem Fourier genlik spektrumunun karesinin altındaki alanı hesaplamak ve bunun pencere uzunluğu ile değişimini izlemektir (Şafak, 1997). Genelde pencere uzunluğu arttıkça alanın değeri küçülür. Alandaki pencere uzunluğu ile düşüşü çizdiğimizde düşüş hızının ilk başlarda çok dik olduğunu, pencere uzunluğu arttıkça düzleştiğini görürüz. Bu eğrinin eğiminin en fazla değiştiği noktaya karşı gelen pencere uzunluğu optimum pencere uzunluğu olarak alınabilir.

Mod Şekilleri

Çok serbestlik dereceli ve elastik bir yapının dinamik hareketi yapının serbestlik derecesine eşit sayıdaki tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik hareketlerinin toplamı olarak ifade edilebilir. Tek serbestlik dereceli sistemler yapının modları olarak adlandırılır ve karakteristikleri yapının modal analizi sonucu bulunur. Datanın Fourier genlik spektrumu vasıtasıyla bulunan hakim frekansları yapıyı oluşturan tek serbestlik dereceli sistemlerin frekansları, yani yapının modal frekanslarıdır.

Mod şekilleri yapının her modal frekansta hangi geometrik konumda titreştiğini gösterir. Eğer yapıdaki sönüm yapının kütle ve/veya rijitliği ile lineer olarak orantılı ise yapının modal frekansları ve mod şekilleri nümerik olarak reel değerler cinsinden bulunabilir. Aksi taktirde modal frekanslar ve mod şekilleri ancak kompleks değerler cinsinden ifade edilebilir. Orantılı sönüme sahip bir yapıda eğer herhangi bir mod şekli başlangıç deplasmanı olarak verilirse, yapı bu şekli hiç bozmadan ve bütün noktalarda aynı oranda azalarak, duruncaya kadar titreşir.

Herhangi bir moda karşı gelen mod şeklini bulmak için yapının kayıtları bu modu tanımlayan frekans etrafında dar bantlı bir filtre kullanılarak filtre edilir. Filtre sonucu elde edilen sinyal frekansı modal frekansa eşit ve genliği zamanla değişen bir sinüs eğrisidir. Filtre ederken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta kayıttaki faz karakteristiklerini değiştirmemektir. Bunun için ya fazı sıfır olan filtreler kullanmak (örneğin Ormsby filtreleri) gerekir, veya fazı sıfır değilse (örneğin Butterworth filtreleri) filtrelemeyi kaydı bir normal bir de tersten koyarak iki defa yapmak gerekir. Eğer sistemde orantılı sönüm varsa, filtrelenmiş datalar (sinüzoidler) alt alta çizildiğinde maksimum ve minimumların bütün noktalarda aynı zamanda oluşması gerekir. Aksi taktirde sönümün orantılı olmadığı ortaya çıkar. Genelde çok esnek yapılarda (örneğin gökdelenler, asma köprü tabliyeleri gibi) orantılı sönüm görülmez. Filtrelenmiş datadaki sinüzoidlerin genlikleri ölçme noktalarındaki mod şeklinin genliğini verir. Metodun gerçek bir bina datasına uygulanması Şafak (1993) da bulunabilir.

Sönüm Oranları

Modal sönüm oranları her moda karşı gelen filtrelenmiş kayıtları kullanarak tayin edilebilir. Genelde sönüm çok nonlineer bir parametredir ve yapıya gelen deprem yükünün frekans karakteristikleri ve yapının deplasmanları ile değişir. Bu nedenle kaydın kuvvetli titreşim kısmını kullanarak modal sönüm hesaplamak uygun değildir ve stabil bir değer elde etmek zordur. Modal sönümü stabil olarak elde etmek için datanın kuyruk kısmını, yani deprem sona erdikten sonraki

serbest titreşimleri gösteren kısmını kullanmak daha uygundur. Bu kısımdaki maksimumların azalma oranının kullanarak modal sönümü hesaplayabiliriz. Birbirine komşu iki maksimumu kullanarak ($n=1$, birinci denklem), veya birbirinden n maksimum uzaklıktaki maksimumları kullanarak modal sönüm aşağıdaki denklemlerden biriyle hesaplayabiliriz:

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \ln_e \left(\frac{P_k}{P_{k+1}} \right) = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx \xi \quad (4)$$

$$\frac{1}{2\pi n} \cdot \ln_e \left(\frac{P_k}{P_{k+1}} \right) = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx \xi$$

Bir başka yöntem, modal davranışı gösteren filtrelenmiş datanın Fourier spektrumunda maksimum genliğin genişliğini kullanmaktır. Eğer f_0 modal frekansı, ve f_1 ve f_2 genliğin 0.707 oranında azaldığı genliğe karşı gelen f_0 nun altında ve üstündeki frekansları gösterirse, modal sönüm aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (5)$$

Gürültünün yüksek olduğu küçük deprem, rüzgar, veya gelişi güzel titreşim dataları için sönüm hesaplarını yaparken orjinal kayıtlar yerine kayıtların oto-korelasyon fonksiyonlarını kullanmak daha doğru sonuçlar verebilir. Oto-korelasyon fonksiyonunun tanımı aşağıdaki denkleme verilmiştir.

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) \cdot x(t - \tau) \quad (6)$$

Burulma Titreşimleri

Yapılardaki burulma tipi titreşimler genelde birbirine paralel iki doğrusal sensör datalarının farklarını alarak incelenir. Örneğin, çok katlı binalarda kat döşemesi kenarlarına konulan iki yatay sensörün kaydettiği hareketler arasındaki fark o kattaki burulma titreşimlerinin kaydı olarak düşünülebilir. Burulma titreşimlerinin özellikleri bu fark sinyalinin analizi sonucu elde edilir.

Kayıtlardaki gürültü burulma titreşimlerinin analizinde önemli bir sorun olabilir. Genelde, iki gürültülü sinyalin farkını aldığımızda farktaki gürültü oranı orjinal sinyallerdeki gürültü oranlarından çok daha fazladır. Eğer burulmanın hesaplandığı iki yatay sensördeki gürültü fazla ise bunların arasındaki farkta, yani burulma sinyalinde, gürültü daha da fazla olacağı için bu sinyalden hesaplanan yapının burulma özellikleri doğru olmayabilir. Gürültü etkisini azaltmak için önce burulma titreşimlerinin frekansı yatay sensör datalarının Fourier genlik spectrumunu kullanarak tayin edilmeli, ve sonra yatay kayıtlar burulma frekansı etrafında dar bir bant kullanarak filtre edilmelidir. Burulma titreşimlerinin genlikleri filtre edilmiş kayıtları kullanarak hesaplanmalıdır.

Bir başka problem, burulma titreşimlerinin yatay titreşimlere hangi oranda katkı sağladığının hesaplanmasıdır. Bu burulma titreşimlerinin dönme merkezinin yerinin tespitini gerektirir. Eğer $x(t)$ yatay sensör kaydını, $\theta(t)$ de hesaplanan burulma titreşimi kaydını gösterirse, dönme merkezinin yatay sensörden uzaklığı, c , aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$c = \frac{\sum_t x(t) \cdot \theta(t)}{\sum_t \theta^2(t)} \quad (7)$$

Bu değer en az üç yatay sensör kullanarak hesaplanırsa elde edilen c değerlerinin kesim noktası dönme merkezinin yerini verir. Burulma titreşimlerinin tanımlanması ile ilgili daha fazla detay Şafak ve Çelebi (1990a, 1990b) de verilmiştir.

Salınım Titreşimleri

Salınım titreşimleri binanın temel etrafında rijid bir cisim şeklinde yaptığı titreşimlerdir. Salınım titreşimlerinin analizi temel plakasında en az üç noktada düşey yönde titreşim kaydı almayı gerektirir. Salınım titreşimlerinin datası düşey kayıtların farkını alarak hesapla bulunur. Yatay titreşim kayıtlarıyla karşılaştırıldığında, düşey titreşim kayıtları genelde genliği düşük, gürültü seviyesi yüksek kayıtlardır. Dolayısıyla analiz sırasında yukarıda burulma titreşimleri için belirtilen filtreleme yöntemleri salınım titreşimleri için de aynen kullanılmalıdır. Bina tipi yapılar için analiz sırasında yapılması gerekli bir ilave kontrol da temeldeki düşey titreşim kayıtlarından hesaplanan salınım frekansının özellikle yukarı katlardaki yatay titreşim kayıtlarında da mevcut olduğunu göstermektedir. Aksi taktirde hesaplanan frekans salınım frekansını değil temel plakasının deformasyonundan doğan düşey hareketin frekansını gösteriyor demektir. Salınım titreşimlerinin tanımlanması ile ilgili bir örnek Şafak ve Çelebi (1991) de verilmiştir.

Yapı-Zemin Etkileşimi

Yapıların deprem davranışını etkileyen önemli bir faktör yapı-zemin etkileşimidir. Yapı-zemin etkileşimi deprem sırasında temel etrafındaki zeminin esnekliğinin yapı titreşimlerine olan katkısıdır. Özellikle yumuşak zeminlere oturan ağır yapılarda yapı-zemin etkileşimi yapının deprem davranışını belirleyen önemli bir faktördür.

Yapı-zemin etkileşimi olmayan durumla karşılaştırıldığında (örneğin, kaya tabakası üzerine oturan yapı) yapı-zemin etkileşimi yapının ana frekansını küçültür, yapıdaki sönümü artırır, ve yapıya etkileyen deprem hareketindeki yüksek frekanslı dalgaları filtre eder.

Deprem kayıtlarını kullanarak yapı-zemin etkileşiminin var olup olmadığını anlamak için önce yapının rijid temelli, yani yapı-zemin etkileşimi olmadığı zamandaki frekansını hesaplamamız gerekir. Bina tipi yapılar için bu frekans binanın tepesindeki (veya tepeye yakın bir kattaki) yatay sensör kaydının Fourier genlik spektrumunun temel seviyesindeki yatay sensör kaydının Fourier genlik spektrumuna bölünmesiyle görülebilir. Spektraların oranı binanın rijid temelli olması halinde, temelden çatıya olan transfer fonksiyonunu verir. Bu transfer fonksiyonun gösterdiği rezonans frekanslar rijid temel durumundaki modal frekanslardır. Buna karşılık, bina tepesindeki kaydın Fourier genlik spektrumundaki rezonans frekanslar binanın gerçek durumuna ait, yani varsa yapı-zemin iletişimini de içine alan, modal frekansları gösterir. Eğer bu frekanslar temelden çatıya olan transfer fonksiyonunun frekansları ile çakışmıyorsa (özellikle en düşük frekansta) yapı-zemin etkileşimi yoktur. Eğer çakışmıyorsa, yani bina tepesindeki kaydın Fourier genlik spektrumunun gösterdiği en düşük hakim frekans transfer fonksiyonunun gösterdiği en düşük hakim frekanstan düşükse, yapıda yapı-zemin etkileşimi var demektir. Salınım titreşimlerinin tanımlanması ile ilgili daha detaylı bilgi Şafak (1995) da bulunabilir.

DİĞER METOTLAR

Yukarıda verilen metotlar data analizi konusundaki en basit yöntemlerdir. Daha kompleks metotlar uygulanmadan önce data her zaman önce bu basit metotları kullanarak analiz edilmelidir. Metotların kompleksitesi arttıkça kayıtlardaki gürültüden ve nümerik hatalardan dolayı yanlış

sonuçlara varma ihtimali de artar. Yukarıdaki basit yöntemler data analizi sonucu beklenen değerlerin mertebesi konusunda ilk bilgiyi verdiği için önemlidir.

Daha ileri ve kompleks data analiz metotları ile ilgili geniş bilgi literatürde mevcuttur. Bu metotların büyük bir kısmı ayrık-zamanlı dijital filtreleme (*discrete-time filters*) ve en-küçük-kareler yaklaşımına (*least-squares approximation*) dayanır. Konuyla ilgili detay Şafak (1989a, 1989b, 1991) de bulunabilir.

Bina tipi yapılar için son yıllarda tavsiye edilen yeni bir sistem tanımlama metodu deprem dalgalarının bina içinde yayılma özelliklerini esas alır. Bu metotta yapının karakteristikleri modal frekanslar ve mod şekilleri yerine dalgaların bina içinde yayılma hızı, ve kat seviyelerindeki yansıma ve geçiş katsayıları cinsinden hesaplanır. Bu karakteristiklerdeki değişimler binada hasar olasılığının bir göstergesi olarak alınır. Konuyla ilgili daha fazla detay Safak (1999) ve Snider ve Şafak (2006) da bulunabilir.

SONUÇ

Kompüter ve enstrümantasyon teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yapıların deprem altındaki dinamik davranışlarını yapıya kurulan izleme sistemleri vasıtasıyla incelemeyi laboratuvar ve analitik yöntemlere karşı kabul edilebilir bir alternatif haline getirmiştir. Bu makelede deprem mühendisliğinde kullanılan yapı izleme sistemlerinin amacı, uygulanması, ve data analiz yöntemleri teorik detaya girmeden basitleştirilerek verilmiştir. Yapı izleme sistemlerinin pratikte kullanılmasındaki en önemli adım alınan kayıtların doğru olarak analiz edilmesidir. Bu makalede verilen yöntemler sadece Fourier transformu ve bant-geçişli filtrelemeyi gerektirdiğinden konunun uzmanı olmayan kimseler tarafından da rahatlıkla kullanılabilir. Bu yöntemlerle yapının modal karakteristikleri (periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları), yapıdaki burulma ve salınım titreşimlerinin genlik ve periyotları, ve yapıda yapı-zemin etkileşiminin olup olmadığı ve varsa mertebesi kolaylıkla tayin edilebilir.

KAYNAKLAR

- Juang, J.-N. (1993). *Applied System Identification*, Prentice-Hall Inc., New York.
- Ljung, L. (1987). *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall Inc., New York.
- Şafak, E. (1988). Analysis of recordings in structural engineering: Adaptive filtering, prediction, and control, *Open-File Report 88-647*, U. S. Geological Survey, Menlo Park, California.
- Şafak, E. (1989a). Adaptive modeling, identification, and control of dynamic structural systems: Part I-Theory, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.115, No.11, November 1989, pp.2386-2405.
- Şafak, E. (1989b). Adaptive modeling, identification, and control of dynamic structural systems: Part II-Applications, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.115, No.11, November 1989, pp.2406-2426.
- Şafak, E. and M. Çelebi (1990a). Method to estimate center of rigidity of a building using vibration recordings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.116, No.1, 1990, pp.85-97.
- Şafak, E. and M. Çelebi (1990b). New techniques in record analyses: Torsional vibrations, Proceedings of the Fourth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, May 20-24, 1990, Palm Springs, California, Vol.2, pp.411-420.
- Şafak, E. (1991). Identification of linear structures using discrete-time filters, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, No.10, October 1991, pp.3046-3085.
- Şafak, E. and M. Çelebi (1991). Analyses of recorded responses of two high-rise buildings during the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989, *Bulletin of Seismological Society of America*, Special Issue on the 1989 Loma Prieta, California, earthquake and its effects, October 1991, pp.2087-2110.
- Şafak, E. (1993). Response of a 42-story steel-frame building to the Ms=7.1 Loma Prieta Earthquake, *Engineering Structures*, Vol.15, No.6, pp.403-421.
- Şafak, E. (1995). Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recordings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No.5, May 1995, pp.899-906.
- Şafak, E. (1997). Models and methods to characterize site amplification from a pair of records, *Earthquake Spectra*, EERI, Vol.13, No.1, pp.97-129.

- Şafak, E. (1999). Wave propagation formulation of seismic response of multi-story buildings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp.426-437.
- Şafak, E. (2001). Analysis of earthquake records from structures: An overview, in *Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures* (Eds. M. Erdik, et al.), Kluwer Academic Publishers, 2001, pp.91-107.
- Şafak, E. (2005). Damage detection in multi-story buildings by real-time vibration monitoring (*invited paper*), *Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford University, Stanford, California, 12-14 September 2005.
- Şafak, E., Durukal, E., Erdik, M. (2007). Structural health monitoring of historical structures and new techniques for data analysis, *Proceedings, IOMAC 2007 (International Modal Analysis Conference)*, Kopenhag, Denmark, 30 April - 2 May 2007.
- Snieder, R. and E. Şafak (2006). Extracting the building response using interferometric imaging; theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 586-598.

