



Structural Health Monitoring of a Tall Building Before, During and After Earthquake

Emre Aytulun¹ and Serdar Soyoz¹

¹ Bogazici University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 34342 Bebek, Istanbul, Turkey
ORCID: 0000-0001-6444-8267, 0000-0002-5502-6545

Keywords

Structural Health Monitoring (SHM), Tall Buildings, Dynamic Properties, Condition Assessment, Software Development

Highlights

- * SHM systems enable to assess current performance of buildings quickly, remotely and objectively
- * The software developed in this article has been used under real earthquake
- * The dynamic properties of the building with SHM system were investigated before, during and after the earthquake

Acknowledgements

Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), Administrations of the 3 tall buildings in Istanbul.

Aim

Identifying dynamic properties of a tall building before, during and after an earthquake with in-house software.

Location

Study area is located in Istanbul, Turkey.

Methods

Interactive real-time monitoring and condition assessment of tall buildings.

Results

Structural Health Monitoring (SHM) system was installed on a tall building and a new software was developed. This software is able to gather data remotely and analyse data automatically. Furthermore, the software was used on three high-rise buildings in Istanbul during the M_w 5.7 Silivri earthquake occurred on September 26, 2019.

Supporting Institutions

AFAD-UDAP-G-17-01

How to cite

Aytulun E., Soyoz E., 2020. Structural Health Monitoring of a Tall Building Before, During and After Earthquake, Turk. J. Earthq. Res. 2 (1), 61-75, <https://doi.org/10.46464/tdad.735239>

Manuscript

Research Article

Received: 10.05.2020

Revised: 18.06.2020

Accepted: 21.06.2020

Printed: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.735239

Corresponding Author

Serdar Soyoz

Email: serdar.soyoz@boun.edu.tr

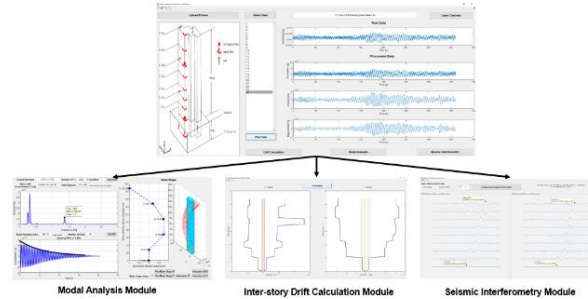


Figure
User interface of developed in-house software



Deprem Öncesi, Sırası ve Sonrasında Bir Yüksek Binaların Yapı Sağlığının İzlenmesi

Emre Aytulun¹ ve Serdar Soyöz¹

¹ Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34342 Bebek, İstanbul, Türkiye
ORCID: 0000-0001-6444-8267, 0000-0002-5502-6545

ÖZET

İstanbul gibi depremselliğin yüksek olduğu bölgelerde yüksek binaların deprem sonrasında durumunun belirlenmesi gereklidir. Günümüzde deprem sonrası hasar tespiti genellikle görsel değerlendirmeler ile yapılır. Ancak yapıların durumunun hızlı, uzaktan ve güvenilir şekilde belirlenmesi hem ekonomik hem de toplum güvenliği açısından önemlidir. Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sayesinde binaların mevcut durumları, dinamik özelliklerindeki değişimler, göreceli kat ötelemeleri ve dalga yayılım hızı kontrol edilerek hızlı, uzaktan ve objektif bir şekilde yapılabilir. Bu sebeplerden dolayı YSİ'nin, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği uyarınca yüksek binalarda uygulanması zorunlu hale getirilmiştir. UDAP kapsamında ikinci yazarın yürütücülüğünde gerçekleştirilen proje kapsamında yüksek binalarda YSİ yönergesi hazırlanmış, örnek bina kurulumu gerçekleştirilmiş ve yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım veriyi düzenli olarak alıp otomatik olarak analiz edebilme yeteneğindedir. Geliştirilen yazılım İstanbul'daki üç yüksek binada 26 Eylül 2019 tarihinde gerçekleşen 5.7 büyüklüğündeki deprem sırasında kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler

Yapı Sağlığı İzleme, Yüksek Binalar, Dinamik Özellikler, Durum Değerlendirme, Yazılım Geliştirme

Öne Çıkanlar

- * YSİ sistemi sayesinde yapıların durum değerlendirmesi hızlı, uzaktan ve objektif şekilde yapılabilir
- * Bu makale kapsamında geliştirilen yazılım gerçek deprem altında kullanılmıştır
- * YSİ sistemi bulunan binanın deprem öncesi, sırası ve sonrası dinamik özellikleri incelenmiştir

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 10.05.2020
Düzeltilme: 18.06.2020
Kabul: 21.06.2020
Basım: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.735239

Sorumlu yazar

Serdar Soyöz
Eposta:
serdar.soyoz@boun.edu.tr

Structural Health Monitoring of a Tall Building Before, During and After Earthquake

Emre Aytulun¹ and Serdar Soyöz¹

¹ Bogazici University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 34342 Bebek, Istanbul, Turkey
ORCID: 0000-0001-6444-8267, 0000-0002-5502-6545

ABSTRACT

In seismically prone areas, such as Istanbul, it is important to assess the condition of tall buildings after an earthquake. In the current state-of-the-practice, condition assessment is conducted by visual inspection; however, inspecting buildings in a rapid, remote and objective fashion is vital due to economic and public safety reasons. On the other hand, Structural Health Monitoring (SHM) systems can help us to assess current condition of buildings in rapid, remote and objective fashion by tracking changes in dynamic properties of structure, interstory drift ratios and wave propagation speed/time. SHM systems are mandatory to be installed on tall buildings per current Turkish Earthquake Code because of motivations mentioned above. Within the framework of the UDAP project supervised by the second author, SHM guideline was prepared for tall buildings, SHM system was installed on a tall building and a new software was developed. This software is able to gather data remotely and analyse data automatically. Furthermore, the software was used during the 5.7 magnitude earthquake on September 26, 2019 on three high-rise buildings in Istanbul.

Keywords

Structural Health Monitoring, Tall Buildings, Dynamic Properties, Condition Assessment, Software Development

Highlights

- * SHM systems enable to assess current performance of buildings quickly, remotely and objectively
- * The software developed in this article has been used under real earthquake
- * The dynamic properties of the building with SHM system were investigated before, during and after the earthquake

Manuscript

Research Article

Received: 10.05.2020
Revised: 18.06.2020
Accepted: 21.06.2020
Printed: 30.06.2020

DOI

10.46464/tdad.735239

Corresponding Author

Serdar Soyöz
Email:
serdar.soyoz@boun.edu.tr

1. GİRİŞ

Yüksek binalar, ekonominin ve nüfusun hızla büyüdüğü şehirlerde vazgeçilmez çözümler olmaktadır. Teknolojideki gelişmelere paralel olarak ülkemizde, özellikle de İstanbul'da, yüksek bina sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Ancak bu tür yapıların depreme karşı güvenilirliğinin belirlenmesi ve İstanbul gibi yüksek deprem tehlikesi altındaki bölgelerde olası bir depremden sonra bu yapıların güvenilir şekilde durum değerlendirmesinin yapılması kamu güvenliği açısından çok önemlidir. Günümüzde deprem sonrası hasar tespiti genellikle görsel değerlendirmelerle yapılmaktadır. Ancak yapıların durumunun hızlı ve zamanında belirlenmesi hem ekonomik hem de toplum güvenliği açısından oldukça önemlidir. Örneğin 1994 yılında A.B.D.'de meydana gelen Northridge Depremi sonrasında binalarda herhangi bir hasar olup olmadığının belirlenmesi uzun süreler aldığı için yüksek ofis binaları kapalı kalmış ve ciddi maddi kayıplar yaşanmıştır.

Yapısal Sağlık İzleme (YSİ), deprem öncesi, sırası ve sonrası yapıların mevcut performansının hızlı, uzaktan ve objektif olarak değerlendirilmesini sağlar. YSİ binaya yerleştirilen veri toplama sistemleri ve ivmeölçerlerden oluşmaktadır. Yapıdan toplanan ivme ölçümlerinin analizi sonucunda binanın modal periyot, şekil ve sönümlenme katsayısı gibi dinamik özellikleri belirlenebilir. Bu özellikler kullanılarak hem deprem sonrası binada hasar olup olmadığı belirlenebilir hem de tasarım aşamasında yapılan varsayımlar kontrol edilebilir. Bu nedenlerden dolayı YSİ sistemlerinin binaların dinamik davranışını anlamada ve yapısal hasar tespitinde önemli katkı sağladığı için başta Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) olmak üzere birçok yönetmelikte zorunlu hale getirilmiştir. Ayrıca, son yıllarda özellikle Hong Kong, Çin ve Japonya'da sayıları artan çok yüksek (>300 m.) binaların sadece deprem değil rüzgâr ve normal kullanım sırasındaki davranışını incelemek adına da YSİ sistemleri kurulmaktadır.

Son yıllarda veri toplama cihazlarında, sensörlerde ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan gelişmelerin YSİ sistemlerinin hem içeriğinde hem de güvenilirliğinde büyük bir ilerlemeye yol açması nedeniyle, özellikle yüksek binalarda olmak üzere birçok yapıda YSİ sistemleri kurulmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, depremler ve şiddetli rüzgârlar gibi etkiler altında yapıların dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik bir dizi çalışmayı mümkün kılmıştır. Aşağıdaki paragrafta, esas olarak yüksek binaların izlenmesi ile ilgili literatür özetlenmiştir.

Brownjohn ve diğ. (2000) bir yüksek binanın analitik modellerinin sonuçlarını mod frekansları ve mod şekilleri açısından deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Satake ve diğ. (2003) titreşim verilerini kullanarak binaların sönüm oranlarını tahmin etmiş ve sonuçları literatürde önerilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Celebi ve diğ. (2004) 24 katlı binayı gerçek zamanlı olarak izlemek için yazılımlar geliştirmişlerdir. Yazılım, önceden belirlenmiş eşik seviyeleri aşıldığında bir alarm verecek şekilde programlanmıştır. Kohler ve diğ. (2005) California Üniversitesi kampüsünde yer alan 17 katlı binanın deprem öncesinde, sırasında ve sonrasında dinamik özelliklerini tespit ederek meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Titreşim verilerinin analizi, deprem sırasında yapının modal frekanslarının azaldığını ve deprem sonrasında ise birkaç dakika içinde deprem öncesi seviyesine geri döndüğünü göstermiştir. Naeim ve diğ. (2006) Fourier dönüşümlerini kullanarak yapıların dinamik özelliklerini belirleyen ve yapının göstermiş olduğu tepkilerden deplasman ve kat öteleme değerlerini hesaplayan yazılım geliştirmişlerdir. Bunlara ek olarak, sensör bulunan katlar arasındaki kat öteleme oranları doğrusal ve kübik enterpolasyon teknikleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Celebi (2008) bir yüksek bina için gerçek zamanlı izleme yazılımı geliştirmiştir. Yazılımda, kaydedilen ivme verilerinin integrali hesaplanarak sensör bulunan katlar arasındaki kat öteleme oranları otomatik olarak hesaplanmaktadır ve bunlar; önceden belirlenmiş eşik değerlerini aştığında yazılım farklı seviyelerde uyarılar vermektedir. Buna ek olarak, yazılım durum değerlendirmesi için yapı boyunca ilerleyen dalganın hızını hesaplayabilmektedir. Moaveni ve diğ. (2009), hasar almış bir yapının numerik modelinde sayısal olarak tanımlanmış hasarın doğru tanımlanması için sonlu eleman modeli güncellemesi metodunu kullanmışlardır. Yuen ve Kuok (2010), sıcaklık ve bağıl nem gibi ortam etkilerini değerlendirmek ve anlamak için bir yıl

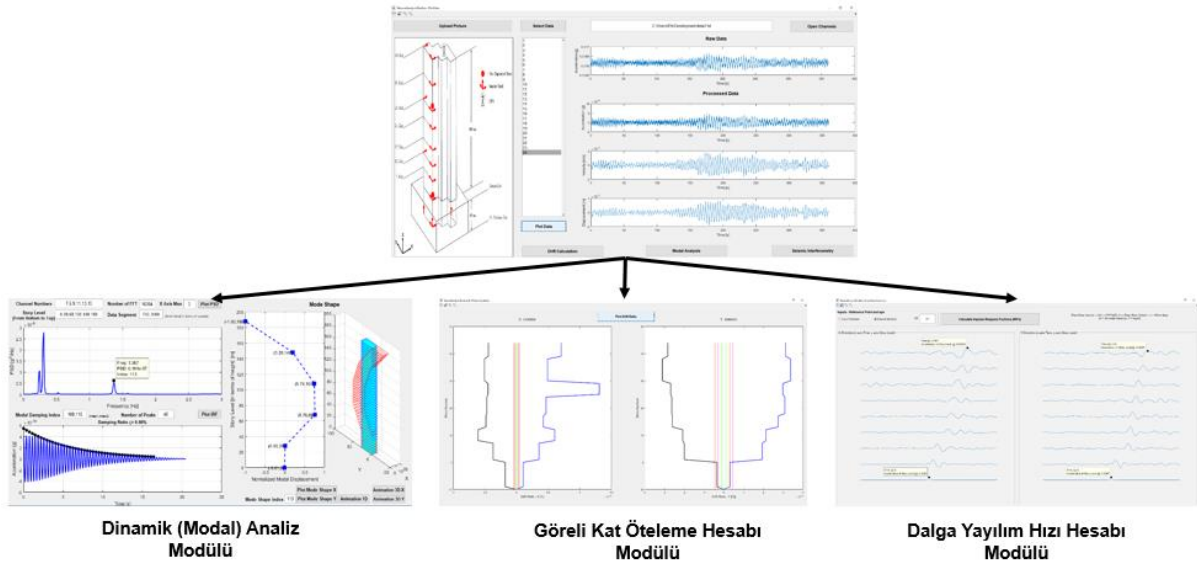
boyunca 18 katlı bir binanın ortam titreşim verilerini analiz ederek yapının dinamik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Saito ve diğ. (2012) Japonya'daki depremlerin farklı şehirlerde bulunan yüksek binalar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sistem tanımlama sonuçlarına göre deprem sırasında, betonarme yapıların ilk mod frekansları azalmasına rağmen ilk mod sönümlenme oranları artmıştır. Celebi ve diğ. (2013) ana şok etkisinden sonra yüksek bir binanın düşük genlik tepkisini analiz etmişlerdir. En dikkat çekici sonuçlardan biri, yapının doğal frekanslarının rijit dönme hareketinden etkilenmesidir. Ayrıca, sistem tanımlama tekniklerinden belirlenen dinamik özellikler ile yapının sonlu eleman modelinden belirlenenler arasında uyum elde edilmiştir. He ve Li (2014) Muifa Tayfunu sırasında çatı seviyesinde konumlandırılmış aktif ayarlı kütle sönümlenme sistemine sahip Şangay Dünya Finans Merkezi'nin dinamik özelliklerini tanımlamışlardır. Rüzgâr etkisi altında kaydedilen titreşim verileri kullanılarak elde edilen yapısal tanımlama sonuçlarına göre, rüzgâr kuvveti arttıkça yapının doğal frekansları azalmaktadır. Celebi ve diğ. (2014) MIT kampüsünde bulunan 21 katlı (20 normal kat ve bir bodrum kat) 87.3 m yüksekliğindeki binanın dinamik özelliklerini belirlemek için düşük genlikli ortam verilerini analiz etmişlerdir. Yapının asimetrik perde duvarlara sahip olmasından ve çatısına asimetrik olarak ağır ekipman yerleştirilmesinden dolayı araştırmacılar yapının burulma modlarına ayrı önem vermişlerdir. Ayrıca yapının rijit dönme hareketi, bodrum seviyesinde bulunan sensörler tarafından ölçülen ortam tepkileri kullanılarak analiz edilmiştir. Uebayashi ve diğ. (2015) bir yapının performansının, doğrusal olmayan tepki analizlerine gerek kalmadan, maksimum tepki ve katlar arası maksimum öteleme oranları elde edilerek değerlendirilebileceğini öne sürmüştür. Bu amaçla, rijitlik azalması ve katlar arası maksimum öteleme oranını hesaplamak için ortam titreşim kayıtları kullanılarak basit denklemler geliştirilmiştir. Zhang ve diğ. (2016), bir yüksek binanın inşaat sırasındaki dinamik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Çalışma, modal frekansların kat sayısından, sıcaklık ve nemdeki değişikliklerden etkilendiğini göstermiştir. Celebi ve diğ. (2016) Tohoku depremi öncesinde, sırasında ve sonrasında 37 katlı yüksek bir binanın dinamik tepkisini incelemişlerdir. Güçlü yer hareketleri sırasında yüksek binanın frekanslarının azaldığı ve ivme seviyesi ile frekans arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varmışlardır. Astorga ve diğ. (2017) doğal frekansların değişimi ile katlar arası ötelenme oranları arasındaki korelasyonun, şiddetli bir yer hareketinden sonra yapısal hasarı ölçmek için kullanılabilirliğini öne sürmüşlerdir. Bu amaçla, araştırmacılar Japonya'daki 24 tane binanın kuvvetli yer hareketi altında dinamik tepkilerini analiz etmişlerdir. Kashima (2017) şiddetli bir depremin yapılar üzerindeki etkilerini anlamak ve hangi etkilerin zamanla yapıların dinamik özelliklerini değiştirdiğini gözlemlemek için Japonya'daki Tohoku Depremi altında dört tane yüksek çelik binanın dinamik özelliklerini incelemiştir. Yapının periyotlarındaki değişimi etkili bir şekilde değerlendirmek amacıyla, tepki genliği ile yapının periyotları arasındaki ilişki regresyon analizi ile oluşturulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, İstanbul'daki üç yüksek bina, bu makalenin ikinci yazarı tarafından yönetilen araştırma ekibi ile sürekli olarak takip edilmektedir. Üçüncü bina, "Yüksek Binalarda Kurulacak Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Standardının Belirlenmesi ve İstanbul Örnek Uygulaması" başlıklı proje çerçevesinde Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından finanse edilmiştir. Bu çalışmalar çerçevesinde yüksek binalar için YSİ sisteminden gelen verilerin otomatik transferini, arşivlenmesini, gerçek zamanlı dinamik analizini yaparak yapının mevcut durumunu yapı ve deprem mühendisliği açısından değerlendiren bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, titreşim verileri kullanılarak hesaplanan mühendislik parametrelerini önceden belirlenmiş eşik değerleri ile karşılaştırarak uyarı mesajı verebilmektedir. Binalardan alınan titreşimlerin analizinden yapıların modal değerleri (periyotları, şekilleri ve sönümlenme katsayısı), katlar arası öteleme oranları ve dalga yayılım hızları bulunmaktadır. Bu değerlerin düzenli takip edilmesiyle, hem yapıların güvenliği deprem öncesinde kontrol altında tutulmaktadır hem de olası bir deprem sırasında yapının mevcut durumu belirlenmektedir. Bu sayede sosyo-ekonomik değerleri çok yüksek olan bu tür yapıların deprem güvenliği kontrol edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, AFAD desteği ile YSİ sistemi kurulumu yapılan binadan iki aylık kesintisiz titreşim verisi kayıt edilerek veri arşivi oluşturulmuş ve bu kayıtlar analiz edilerek binanın dinamik özelliklerindeki

değişimler incelenmiştir. Ayrıca yapıların titreşim kayıtlarını düzenli olarak kaydeden YSİ sistemleri sayesinde 26 Eylül 2019'da Marmara Denizi'nde meydana gelen 5.7 büyüklüğünde deprem, geliştirilen yazılım ile izlenen üç yüksek bina tarafından kaydedilmiştir. Titreşim kayıtlarının analizinden elde edilen sonuçlar ışığında tüm binaların beklendiği gibi davrandığı ve herhangi bir yapısal olumsuzluk taşımadıkları görülmüştür.

2. YAZILIM GELİŞTİRME

Bu çalışmada, YSİ sistemi kurulumu yapılan bir binadan uzaktan ve otomatik olarak veri transferini gerçekleştiren ve toplanan bu verinin otomatik olarak analizini yapan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, YSİ sistemi tarafından kaydedilen titreşim verisini gerçek zamanlı ve/veya etkileşimli olarak frekans uzayında ve/veya zaman uzayında analiz ederek yapının dinamik özelliklerini (modal frekanslar, mod şekilleri ve mod sönümlenme oranları) elde etmektedir. Bunun yanı sıra, kaydedilen titreşim verilerinin integralinden filtreleme metotları kullanılarak sensör bulunan katların deplasman değerleri hesaplanmakta ve bu değerler kullanılarak doğrusal interpolasyon tekniği ile sensör bulunmayan katların deplasman değerleri tahmin edilerek katlar arası öteleme oranları hızlı bir şekilde elde edilmektedir. Ayrıca yazılım, olası bir deprem sırasında kaydedilen verilerin analizi ile yapının dalga yayılım profilini oluşturarak yapı boyunca dalga yayılım hızı/süresini hesaplayabilmektedir.



Şekil 1: Yazılım arayüzü - etkileşimli analiz modülü

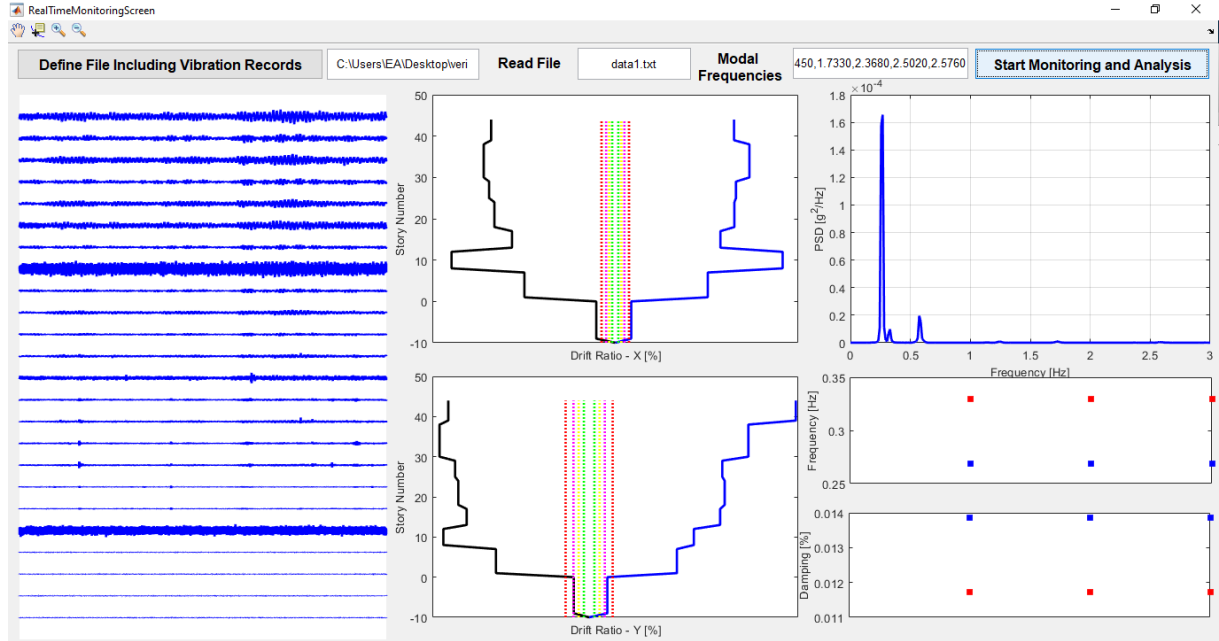
2.1) Etkileşimli Analiz Modülü

Yazılımın bu modülü (Şekil 1) daha önceden kaydedilmiş verinin yazılıma tanımlanarak gerekli görülen analizlerin kullanıcıyla etkileşimli olarak yapılmasını sağlamaktadır. Modülün ilk kısmında, yazılıma tanımlanan titreşim kaydının içerisindeki salt verinin zaman uzayındaki grafiği oluşturulabilmektedir. Bazı durumlarda, ivmeölçer titreşim kayıtlarında sensör kaynaklı ve ortam koşullarının etkisi ile bozulmalar meydana gelebilmektedir. Yazılım, bu bozulmaları ortadan kaldırmak için ve işlenmiş ivme verisinin integrasyonu ile daha güvenilir hız ve deplasman verisini elde etmek için belirli filtreleme metotları kullanmaktadır. Bu modülün altında üç farklı alt modül bulunmaktadır. Bu modüller sırasıyla seçilen titreşim verisini kullanarak; yapının sistem tanımlamasını, katlar arası öteleme oranı hesabını ve yapıdaki dalga yayılım hızlarının hesabını yapmaktadır.

Dinamik (Modal) analiz modülünde, binadan YSİ sistemi ile alınan ivme verilerinin modal analizi frekans uzayında ve/veya zaman uzayında yapılarak yapının dinamik özellikleri (modal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönümlenme oranları) belirlenmektedir. Ayrıca bu alt modülde, yapının eğilme ve burulma mod şekilleri hem iki boyutlu hem de üç boyutlu ortamlarda gösterilmekte ve bu şekillerin animasyonlarının yapılmasına olanak sağlanmaktadır.

Görelî kat öteleme hesabı modülünde, kaydedilen titreşim verisinden çeşitli filtreleme yöntemleri kullanılarak integrasyon yoluyla elde edilen deplasman değerlerinden katlar arası öteleme oranları hesaplanmaktadır. Bu kısımdaki önemli noktalardan birisi, yazılımın hesaplama yaparken rijit dönme etkisinin katların deplasmanları üzerindeki etkisini, en alt bodrum katta düşey yönde konumlandırılan sensörlerden gelen verileri kullanarak belirleyebilmesidir. Diğer önemli nokta ise, yazılımın sensör bulunmayan katlardaki deplasman değerlerini, sensör bulunan katların deplasman değerlerini kullanarak doğrusal interpolasyon yöntemi ile tahmin edebilmesidir (Naeim ve diğ. 2006, Kaya ve diğ. 2015). Doğrusal interpolasyon yönteminden makul bir tahminde bulunabilmek için, her kat seviyesine olmasa da, mod şekillerinin eğim işaretinin değiştiği düşünülen kat seviyelerine bir sensör yerleştirilmelidir. Bu, doğrusal interpolasyon yönteminin sensör bulunmayan katlardaki deplasman değerlerini daha iyi bir tahmin etmesinin en önemli şartıdır.

Dalga yayılım hesabı modülünde, yapıda her bir doğrultuda sensör bulunan katların titreşim verisi, seçilen bir referans noktası sayesinde çapraz ilişki ve ters evrişim metotlarıyla ayrıştırılarak yapıdaki dalga yayılım formu oluşturulmaktadır. Daha sonra, her iki doğrultu için oluşturulmuş dalga yayılım formlarından yapının dalga yayılım hızı/süresi hesaplanmaktadır.



Şekil 2: Yazılım arayüzü - gerçek zamanlı izleme modülü

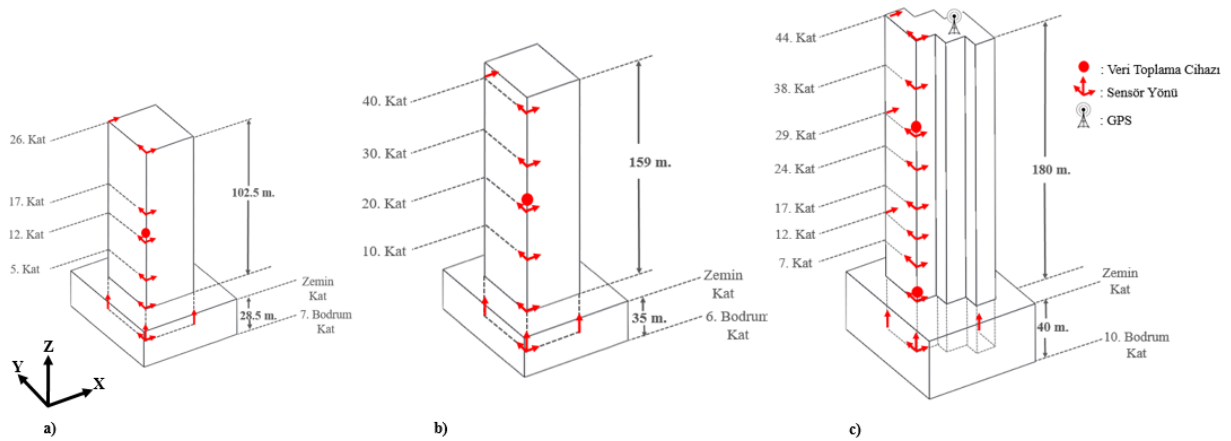
2.2) Gerçek Zamanlı İzleme Modülü

Yazılımın bu modülünde (Şekil 2), YSİ sistemi tarafından kaydedilen titreşim verisi gerçek zamanlı analiz edilerek yapının dinamik özellikleri (modal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönümlenme oranları) elde edilmektedir. Bunun yanı sıra, kaydedilen titreşim verilerinin integralinden güvenilir filtreleme metotları (Safak ve diğ. 2010) kullanılarak sensör bulunan

katların deplasman değerleri hesaplanmakta ve bu değerler kullanılarak doğrusal interpolasyon tekniği ile sensör bulunmayan katların deplasman değerleri tahmin edilerek katlar arası öteleme oranları hızlı bir şekilde elde edilmektedir. Ayrıca, olası bir deprem sırasında dalga yayılım formları oluşturularak yapıdaki dalga yayılım hızı/süresi tahmin edilebilmektedir. Yazılım, hesaplanan katlar arası öteleme oranlarını ve dalga yayılım hızı/süresini önceden tanımlanan limit değerler ile kıyaslayarak olası bir deprem sonrası yapının mevcut durumu ile ilgili güvenilir ve hızlı şekilde farklı seviyelerde uyarı mesajları verilebilmektedir. Bunlara ek olarak, hesaplanan tüm veriler (modal frekanslar, mod şekilleri, mod sönümlenme oranları, katlar arası öteleme oranları ve dalga yayılım hızı/süresi) arka planda kayıt altına alınarak veri arşivi oluşturulmaktadır.

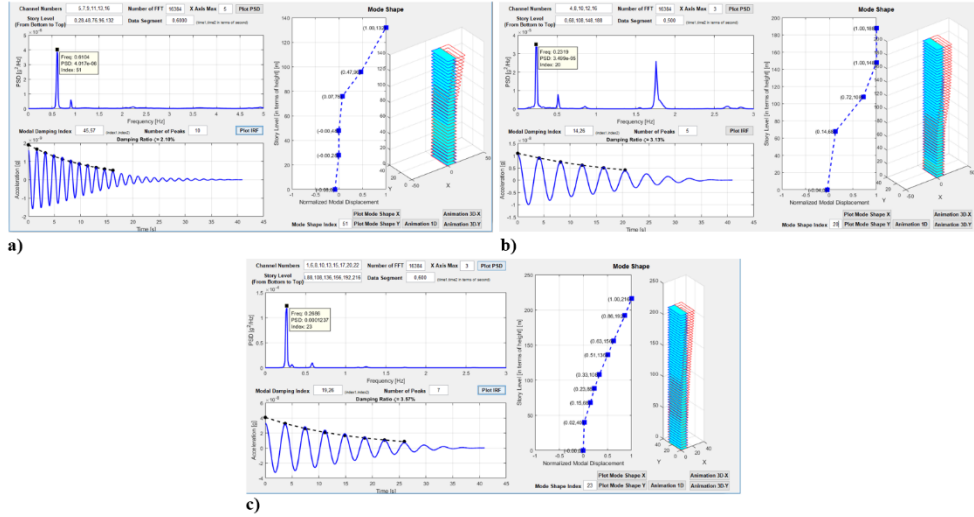
3. YÜKSEK BİNALARDA YSİ SİSTEMLERİ

Binaların yükseklik sınıflarını belirlemede binaların türünün ve işlevlerinin de önemi olmasına rağmen, bu çalışmada 70 m - 300 m arasında yüksekliğe sahip binalar yüksek bina olarak ifade edilmiştir. Yüksekliği 300 m'den daha fazla olan binalar çok yüksek bina olarak tanımlanmıştır. Bu çerçevede, İstanbul'un en önemli iş merkezlerinin birinde bulunan üç yüksek binaya YSİ sistemleri kurulmuştur ve araştırma ekibimiz tarafından gerçek zamanlı izlemeleri yapılmaktadır. Bu binalar, her yükseklik aralığındaki yapıların temel dinamik özelliklerini temsil etmek üzere özellikle farklı yükseklikte seçilmiştir. Binaların genel özellikleri ve YSİ sistemi planları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Yüksek katlı yapılar a) Bina 1 b) Bina 2 c) Bina 3

Binaların titreşim verilerini kaydetmek için ivmeölçerler, yapıların merkezine yakın bir konuma hem x hem de y yönlerine yerleştirilmiştir. Ayrıca, burulma modlarını tanımlamak için en üst katlarda ve belirli orta katlarda merkezden uzak noktalara ek ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Ayrıca, tüm binalarda rijit dönme hareketini tespit etmek için en alt bodrum katlarda ek, düşey doğrultuda ivmeölçerler kullanılmıştır. Tüm binalarda titreşim verileri 200 Hz frekansında sürekli olarak toplanmakta ve her gün otomatik olarak analiz edilerek sonuçlar raporlanmaktadır. Şekil 4 ve Tablo 1, ortam koşulları altında üç yüksek bina için Frekans Uzaklığında Ayrıştırma Metodu kullanılarak (Brincker ve diğ. 2001) elde edilen sistem tanımlama sonuçlarını göstermektedir.



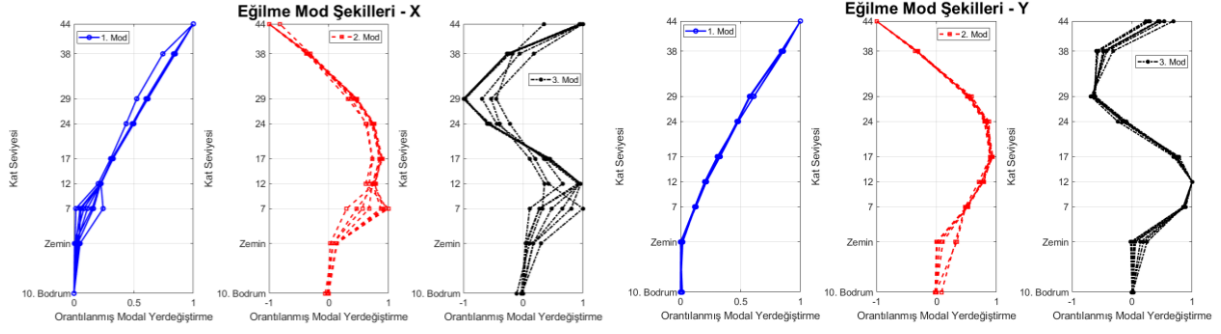
Şekil 4: Yapıların birinci eğilme modu dinamik özellikleri a) Bina 1 b) Bina 2 c) Bina 3

Tablo 1: Yapıların dinamik özellikleri

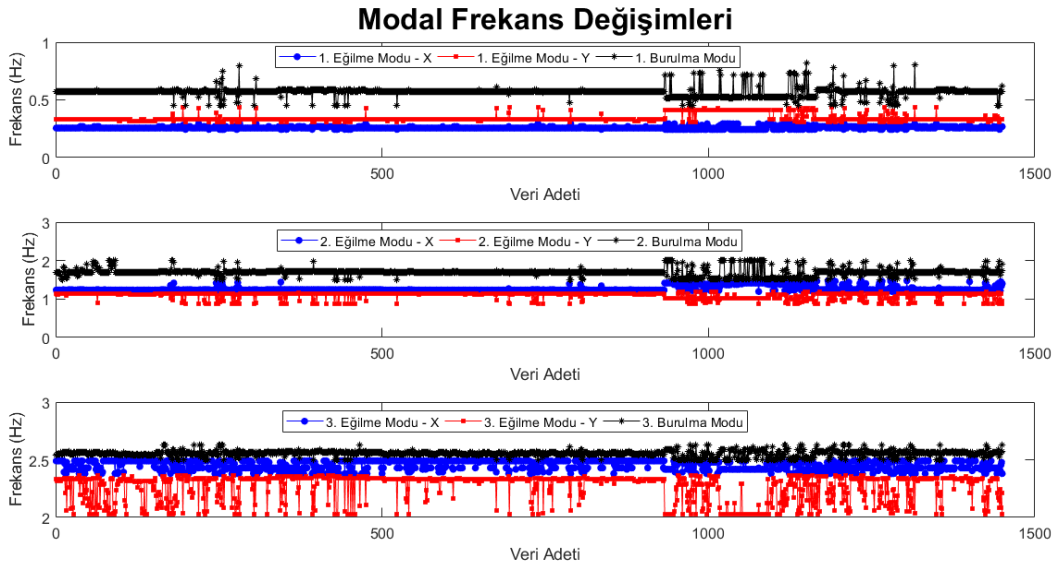
| Bina 1 | | | Bina 2 | | | Bina 3 | | |
|-------------|---------------|-----------|-------------|---------------|-----------|-------------|---------------|-----------|
| Mod | ω (Hz) | ξ (%) | Mod | ω (Hz) | ξ (%) | Mod | ω (Hz) | ξ (%) |
| X-1. Eğilme | 0.60 | 2.10 | X-1. Eğilme | 0.23 | 3.13 | X-1. Eğilme | 0.27 | 3.54 |
| Y-1. Eğilme | 0.61 | 2.34 | Y-1. Eğilme | 0.29 | 3.12 | Y-1. Eğilme | 0.33 | 2.40 |
| 1. Burulma | 0.88 | 1.48 | 1. Burulma | 0.51 | 2.01 | 1. Burulma | 0.58 | 1.98 |
| Y-2. Eğilme | 2.11 | 1.70 | X-2. Eğilme | 0.86 | 1.83 | Y-2. Eğilme | 1.15 | 1.25 |
| X-2. Eğilme | 2.16 | 1.41 | Y-2. Eğilme | 1.36 | 1.01 | X-2. Eğilme | 1.25 | 1.33 |
| 2. Burulma | 2.53 | 0.71 | 2. Burulma | 1.55 | 1.08 | 2. Burulma | 1.71 | 0.90 |
| Y-3. Eğilme | 3.42 | 2.74 | X-3. Eğilme | 1.76 | 0.96 | Y-3. Eğilme | 2.36 | 0.77 |
| X-3. Eğilme | 3.75 | 1.64 | Y-3. Eğilme | 2.67 | 1.00 | X-3. Eğilme | 2.43 | 1.37 |
| 3. Burulma | 4.24 | 0.46 | 3. Burulma | 2.83 | 0.95 | 3. Burulma | 2.58 | 1.21 |

4. BINA 3 İÇİN VERİ TABANI OLUŞTURULMASI

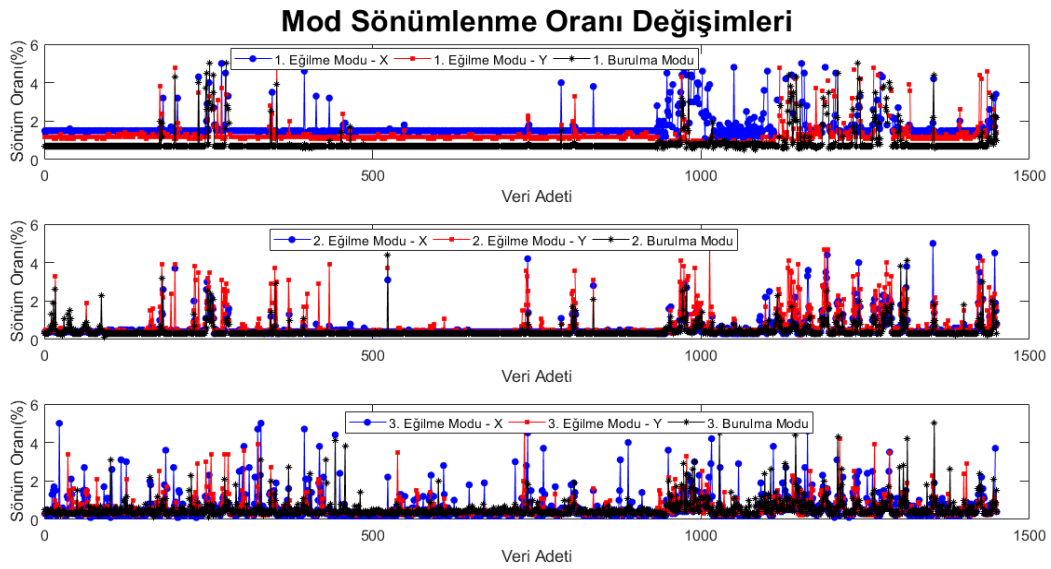
YSİ sistemi kurulan binadan kesintisiz olarak 2019 yılının ortalarından itibaren titreşim verisi alınmaya başlanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, binadan iki aylık (07/08/2019-07/10/2019) kesintisiz titreşim verisi kayıt edilerek veri arşivi oluşturulmuş ve bu kayıtlar analiz edilerek binanın dinamik özelliklerindeki (mod şekilleri, modal frekanslar, mod sönümlenme oranları) değişimler incelenmiştir (Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7).



Şekil 5: Eğilme mod şekilleri değişimi



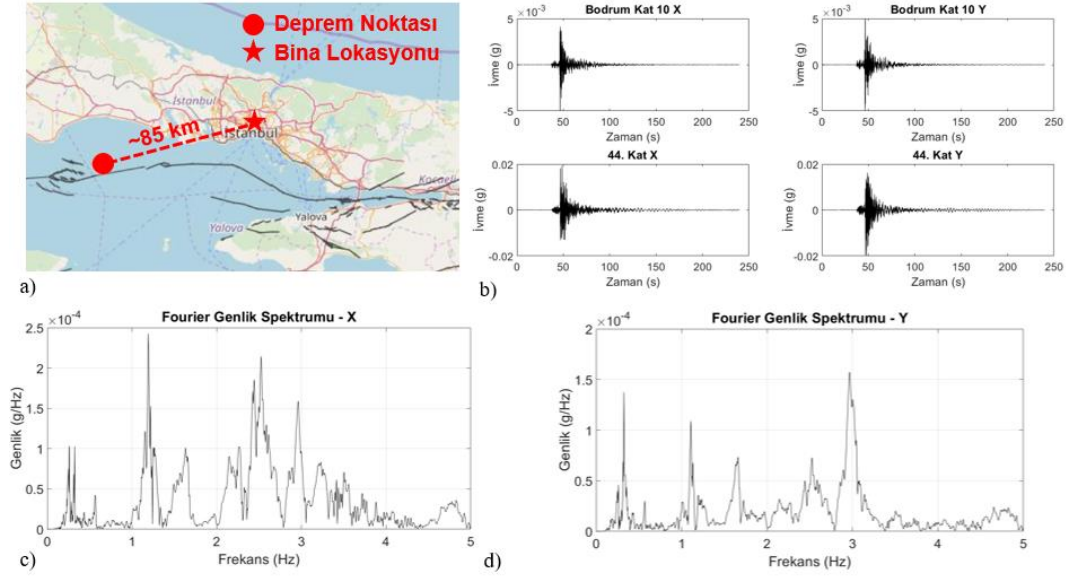
Şekil 6: Modal frekans değişimi



Şekil 7: Mod sönümlenme oranı değişimi

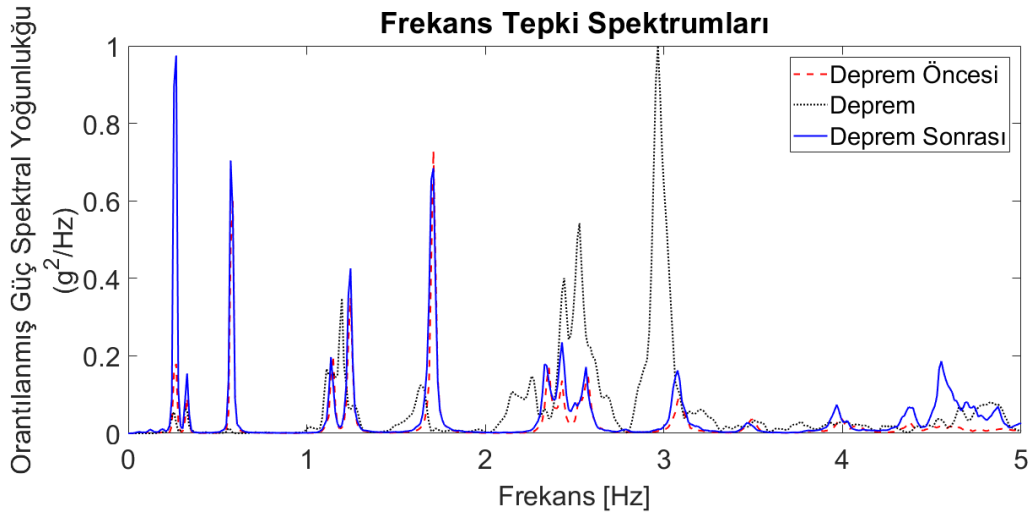
5. BİNA 3 DEPREM DAVRANIŞI

2019 senesi ortalarında aktif hale getirilerek düzenli veri toplanan YSİ sistemi sayesinde, yapının 26 Eylül 2019 tarihinde 5.7 büyüklüğündeki Marmara Denizi depremi altındaki tepkisi kaydedilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8: a) Deprem noktası ve bina lokasyonu b) Binadan alınan deprem kayıtları c) Fourier genlik spektrumu – X bodrum kat 10 d) Fourier genlik spektrumu – Y bodrum kat 10

Bu deprem altında yapının dinamik özellikleri tarafımızca geliştirilen yazılım kullanılarak depremi öncesi, sırası ve sonrasında elde edilmiştir (Şekil 9, Tablo 2).



Şekil 9: Deprem öncesi, sırası ve sonrası yapının frekanslarındaki değişimler

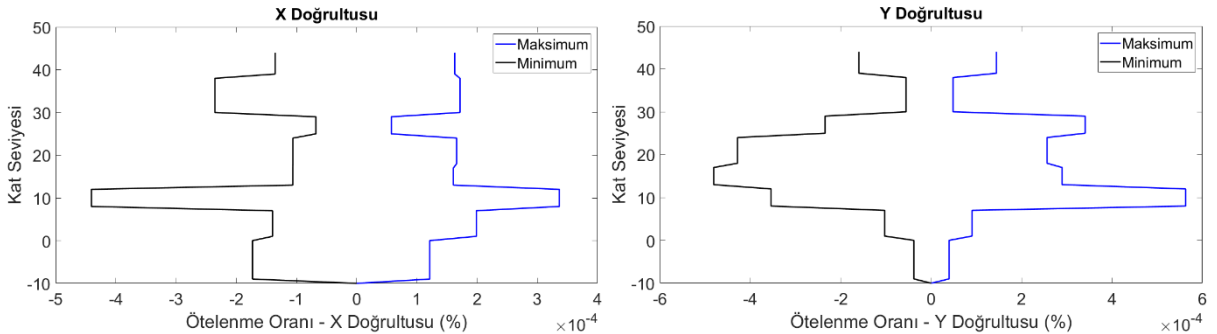
Tablo 2: Deprem öncesi, sırası ve sonrası yapının frekanslarındaki değişimler

| | | Deprem öncesi | Deprem | Deprem sonrası |
|------|-----------------------|---------------|---------|----------------|
| i | X Yönü 1. Eğilme Modu | 0.27 Hz | 0.27 Hz | 0.27 Hz |
| ii | Y Yönü 1. Eğilme Modu | 0.33 Hz | 0.33 Hz | 0.33 Hz |
| ii | Burulma 1. Modu | 0.58 Hz | 0.56 Hz | 0.57 Hz |
| iv | Y Yönü 2. Eğilme Modu | 1.15 Hz | 1.11 Hz | 1.14 Hz |
| v | X Yönü 2. Eğilme Modu | 1.25 Hz | 1.20 Hz | 1.25 Hz |
| vi | Burulma 2. Modu | 1.71 Hz | 1.64 Hz | 1.71 Hz |
| vii | Y Yönü 3. Eğilme Modu | 2.36 Hz | 2.26 Hz | 2.33 Hz |
| viii | X Yönü 3. Eğilme Modu | 2.43 Hz | 2.44 Hz | 2.43 Hz |
| ix | Burulma 3. Modu | 2.58 Hz | 2.53 Hz | 2.56 Hz |

Deprem öncesinde ve deprem sonrasında normal ortam koşulları altında kaydedilen titreşim verilerinin genlikleri deprem sırasında kaydedilen titreşim verilerinin genliklerine göre çok daha düşük değerlerde olduğu için frekans uzayında veri analizleri sonucunda deprem sırasında kaydedilen verinin Güç Spektral Yoğunluğu (g^2/Hz) değerleri, deprem öncesi ve sonrası verilerinin Güç Spektral Yoğunluğu (g^2/Hz) değerlerinden beklenildiği gibi daha büyük çıkmaktadır. Bu yüzden frekans değişimlerinin daha iyi takip edilebilmesi için Güç Spektral Yoğunluğu (g^2/Hz) değerleri Şekil 9'da orantılanarak gösterilmiştir.

Deprem baskın frekans aralığı 1-3 Hz arasında olduğundan, deprem sırasında yapının ikinci ve üçüncü eğilme ve burulma mod frekansları deprem öncesi ortam titreşim kayıtlarının analizden elde edilen mod frekanslarından genellikle daha küçüktür. Deprem sonrası ise bu değerler deprem öncesi değerlere tekrar ulaşmıştır. Bu tablodaki bu tür değişimler ortam titreşimleri altında sıcaklık, nem ve rüzgâr etkileri sonucunda da gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, Şekil 6'da da görebileceği gibi normal ortam koşullarında yapının mod frekanslarında görülen dalgalanmalar deprem sırasında gözlemlenen değişimlerden daha fazladır. Dolayısıyla binada yapısal olarak herhangi bir sorun olmadığı belirlenmiştir.

Yapının deprem etkisi altında, maksimum ve minimum katlar arası ötelenme oranları doğrusal interpolasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Katlar arası ötelenme oranları hesaplanırken rijit kütle hareketinin görelî yer değiştirmeler üzerindeki etkisi, 10. bodrum kattaki düşey doğrultuda konumlandırılmış sensörler ile kaydedilen titreşim verileri kullanılarak çıkarılmıştır (Şekil 10).



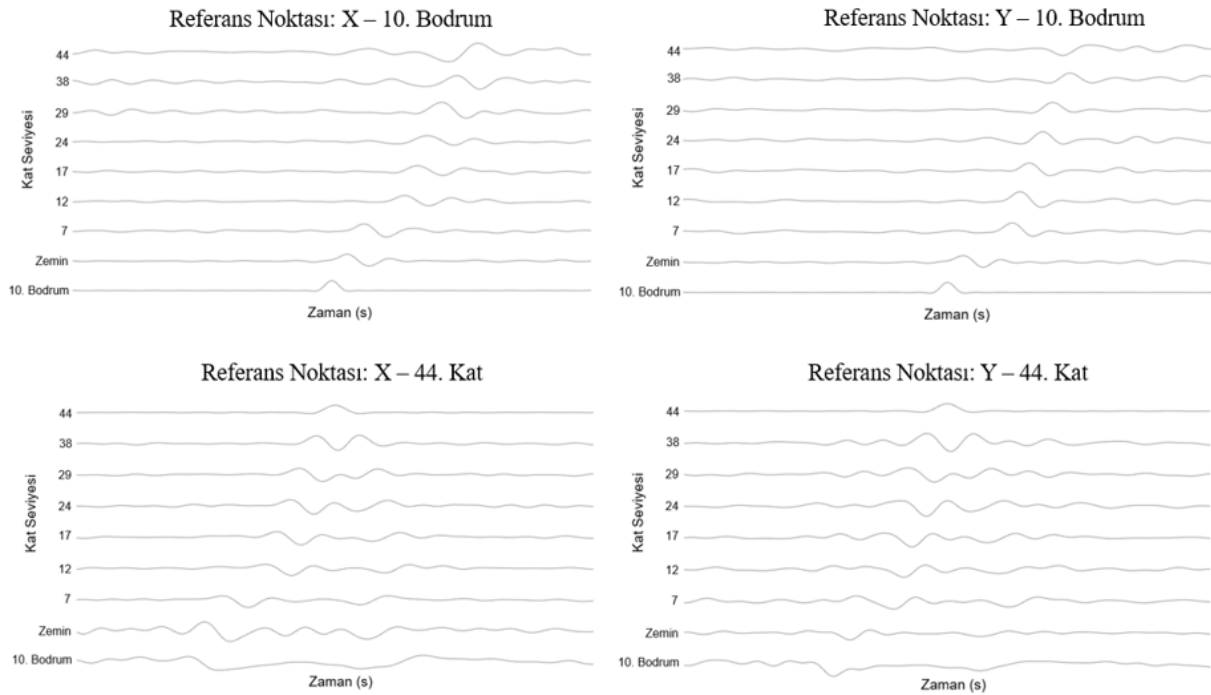
Şekil 10: Katlar arası ötelenme oranları

Bunun yanında deprem sırasında binadaki dalga yayılım hızı, sismik interferometri metodu kullanılarak elde edilmiştir (Snieder ve Safak 2006, Mordret ve diğ. 2017).

$$D_{U_n}(z, z_0, t) = F^{-1} \left(\frac{U_n(z, \omega) * U_n^*(z_0, \omega)}{|U_n(z_0, \omega)|^2 + eps * (|U_n(z_0, \omega)|^2)} \right) \quad (1)$$

Bu denklemde $U_n(z, \omega)$ zaman uzayında alınan verinin frekans uzayına çevrilmiş halini, $U_n^*(z, \omega)$ ise zaman uzayında alınan verinin frekans uzayına çevrilmiş halinin eşleniğini temsil eder. z kullanılan noktaları (katlardaki sensörleri) temsil eder. z_0 ise seçilen referans noktasını temsil eder. eps stabilizasyonu sağlayan bir parametredir. [0 1] arasında bir değer kabul edilir.

Bu yöntem sırasında hem bodrum kattaki ivmeölçerler hem de 44. kattaki ivme-ölçerler referans noktası kabul edilerek X doğrultusu ve Y doğrultusu için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Aşağıdaki şekillerde M=5.7 depremi sırasında binadaki dalga yayılım profilleri her iki doğrultu için de verilmiştir.



Şekil 11: Dalga yayılım profilleri

Yukarıdaki şekilden (Şekil 11) dalga yayılım formunun eğiminin zemin ile 12.kat seviyesi arasında değiştiği açıkça görülebilmektedir. Bunun ana nedeni bodrum katların bitip normal katların başladığı kısımda yapının rijitliğinde ani değişiklik meydana gelmesidir. Tablo 3'de farklı referans noktaları kullanılarak her iki doğrultu için hesaplanan dalga yayılım hızları gösterilmiştir.

Tablo 3: Dalga yayılım hızları

| Referans Noktası | X - Doğrultusu | Y- Doğrultusu |
|------------------|----------------------|----------------------|
| 10. Bodrum | 216m./0.565s.=382m/s | 216m./0.540s.=400m/s |
| 44. Kat | 216m./0.570s.=379m/s | 216m./0.520s.=415m/s |

Yukarıda elde edilen sonuçlar, sistem tanımlamadan elde edilen sonuçlar ile uyum göstermiştir. Y doğrultusunun 1.mod frekansı X doğrultusunun 1.mod frekansından daha büyüktür. Bu durum Y doğrultusunun, X doğrultusuna göre daha rijit davrandığını göstermiştir. Bu yüzden de Y doğrultusunda, deprem etkisi ile oluşan sismik dalgalar daha hızlı hareket etmişlerdir.

6. SONUÇ

Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sayesinde binaların deprem sonrası durum tespiti hızlı, uzaktan ve objektif bir şekilde yapılabilmektedir. Yapıdan toplanan ivme ölçümlerinin analizi sonucunda binanın modal periyot, şekil ve sönümlenme katsayısı gibi dinamik özellikleri elde edilebilmektedir. Ayrıca görel kat öteleme ve dalga yayılma hızı/süresi gibi değerler de hesaplanabilmektedir. Bu özellikler kullanılarak deprem öncesi, sırası ve/veya sonrası binanın mevcut durumu hızlı bir şekilde belirlenebilmektedir.

Özellikle İstanbul'da çok sayıda yüksek bina bulunmaktadır. Bu yapıların durumunun depremlerden sonra hızlı ve objektif bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bu çalışma kapsamında, İstanbul'da bulunan üç yüksek binaya YSİ sistemleri kurulmuştur. Bunun yanı sıra, YSİ sistemleri ile kaydedilen titreşim verilerinin analizi için bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, veriyi düzenli olarak alıp otomatik olarak analiz edebilme yeteneğindedir. Programın gerçekleştirdiği analizler modal değerlerin elde edilmesi, görel kat ötelenmelerinin bulunması ve dalga yayılma hızlarının/sürelerinin hesaplanmasını içermektedir. Elde edilen değerler veri tabanına otomatik olarak kaydedilmektedir. Ayrıca belirli eşik değerinin üzerindeki hareketlerde elde edilen sonuçlar belirlenen e-posta adreslerine gönderilebilmektedir.

Binalardan alınan titreşim verilerinin analizinden yapıların modal değerleri (periyotları, şekilleri ve sönümlenme katsayıları) bulunmuştur. Bu değerler düzenli olarak izlenmiş ve modal değerler için veri tabanı oluşturulmuştur. Ayrıca, YSİ sistemleri sayesinde çalışma kapsamındaki üç binanın 6 Eylül 2019'da Marmara Denizi'nde meydana gelen 5.7 büyüklüğünde deprem altındaki titreşim verileri analiz edilerek deprem öncesi, sırası ve sonrasındaki dinamik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Bu çalışmada sadece AFAD desteği ile YSİ sistemi kurulumu yapılan binanın deprem altındaki titreşim verilerinin analiz sonuçları sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, "Yüksek Binalarda Kurulacak Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Standardının Belirlenmesi ve İstanbul Örnek Uygulaması (UDAP-G-17-01)" başlıklı proje altında Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) kapsamında Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından finanse edilmiştir. Çalışmada bahsedilen üç binanın yönetimine, YSİ kurulumu sırasında gösterdikleri anlayış için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Astorga A., Guegen P., Kashima T., 2017. Nonlinear elasticity in buildings: a prospective way to monitor structural health, X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2017, p:10-13 September, Rome, Italy.

Brincker R., Zhang L., Andersen P., 2001. Modal identification of output – only systems using frequency domain decomposition, *Smart Materials and Structures* 10, 441-445.

Brownjohn J.M.W., Pan T.C., Deng X.Y., 2000. Correlating dynamic characteristics from field measurements and numerical analysis of a high-rise building, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 29, 523-543.

Celebi M., 2008. Real-time monitoring of drift for occupancy resumption, 14th World Conference on Earthquake Engineering, p:12-17 October, Beijing, China.

Celebi M., Sanli A., Sinclair M., 2004. Real-time seismic monitoring needs of a building owner and the solution: a cooperative effort, *Earthquake Spectra* 20 (2), 333-346.

Celebi M., Sereci M., Boroschek R., 2013. Identifying the dynamic characteristics of a dual core-wall and frame building in Chile using aftershocks of the 27 February 2010 (Mw=8.8) Maule, Chile, Earthquake. *Earthquake Spectra* 29 (4), 1233-1254.

Celebi M., Toksoz N., Buyukozturk O., 2014. Rocking behavior of an instrumented unique building on the MIT Campus identified from ambient shaking data, *Earthquake Spectra* 30 (2), 705-720.

Celebi M., Kashima T., Ghahari S.F., Farid S., 2016. Responses of a tall building with US Code-type instrumentation in Tokyo, Japan, to events before, during, and after the Tohoku Earthquake of 11 March 2011, *Earthquake Spectra* 32 (1), 497-522.

He Y.C., Li Q., 2014. Dynamic responses of a 492-m-high tall building with active tuned mass damping system during a typhoon, *Structural Control and Health Monitoring* 21, 705-720.

Kashima T., 2017. Study on changes in dynamic characteristics of high-rise steel-framed buildings based on strong motion data. X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2017, p:10-13 September, Rome, Italy.

Kaya Y., Kocakaplan S., Safak E., 2015. System identification and model calibration of multi-story buildings through estimation of vibration time histories at non-instrumented floors, *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, 3301-3323.

Kohler M.D., Davis P.M., Safak E., 2005. Earthquake and ambient vibration monitoring of the steel-frame UCLA Factor Building, *Earthquake Spectra* 21, 715-736.

Moaveni B., Conte J.P., Hemez F.M., 2009. Uncertainty and sensitivity analysis of damage identification results obtained using finite element model updating, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 24, 320-334.

Mordret A., Sun H., Prieto G. A., Toksoz M. N., Buyukozturk O., 2017. Continuous Monitoring of High-Rise Buildings Using Seismic Interferometry, *Bull. Soc. Am.* 107, 2759-2773.

Naeim F., Lee H., Hagie S., Bhatia H., Alimoradi A., Miranda E., 2006. Three-dimensional analysis, real-time visualization and automated post-earthquake damage assessment of buildings, *Structural Design of Tall and Special Buildings* 15, 105-138.

Safak E., Cakti E., Kaya Y., 2010. Recent developments in structural health monitoring and data analysis. *Earthquake Engineering In Europe*, Springer, London, pp 331–355

Saito T., Morita K., Kashima T., Hasegawa T., 2012. Performance of high-rise buildings during the 2011 Great East Japan Earthquake, 15th World Conference on Earthquake Engineering, p:24-28 September, Lisbon, Portugal.

Satake N., Suda K., Arakawa T., Sasaki A., Tamura Y., 2003. Damping evaluation using full-scale data of buildings in Japan, *Journal of Structural Engineering ASCE* 129 (4), 470-477.

Snieder R., Safak E., 2006. Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96, 586-598.

Uebayashi H., Nagano M., Hida T., Tanuma T., Yasui M., Saka S., 2015. Evaluation of the structural damage of high-rise reinforced concrete buildings using ambient vibrations recorded before and after damage, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 45, 213-228

Yuen K.V., Kuok S.C., 2010. Ambient interference in long-term monitoring of buildings, *Engineering Structures* 32, 2379-2386.

Zhang F.L., Xiong H.B., Shi W.X., Ou X., 2016. Structural health monitoring of Shanghai Tower during different stages using a Bayesian approach, *Structural Control and Health Monitoring* 23, 1366-1384.