

DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASINDA BİR BİNANIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

S. Soyöz¹, E. Taciroğlu², K. Orakçal¹ ve H. Luş³

¹ Yard. Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

² Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, University of California Los Angeles

³ Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

Email: serdar.soyoz@boun.edu.tr

ÖZET:

Boğaziçi Üniversitesi Kuzey Kampüsü'nde bulunan Eğitim Teknolojileri B Blok (ET-B) binası depreme karşı güçlendirilmesi sırasında yapının dinamik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Ortamsal ve zorlanmış titreşim deneyleriyle binanın doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Depreme karşı güçlendirme çalışmaları, binanın taşıyıcı sistemine perde duvarlar eklenmesi ve mevcut kolonların mantolanması olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Haziran 2010 tarihinden itibaren bina üzerinde çeşitli bölgelere ivme ölçerler yerleştirilmiş ve binadaki ortamsal titreşimler aralıklı olarak kaydedilmiştir. Güçlendirmenin yapılabilmesi için öncelikle taşıyıcı olmayan tuğla duvarlar yıkılmıştır. Yıkım sürecinde kaydedilen ortamsal titreşimlerin analizi sonucunda, binanın dinamik rijitliği ile ilişkili olan modal frekans değerlerinin % 11 azaldığı görülmüştür. Bu değişim yapıların modellenmesinde genellikle göz önüne alınmayan taşıyıcı olmayan duvarların binanın doğal frekansına etkisini göstermektedir. Bina üzerinde güçlendirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra kaydedilen ortamsal titreşimlerin analizi sonucunda ise modal frekans değerlerinin güçlendirme sonrasında % 96 arttığı görülmüştür. Bina üzerinde yapılan güçlendirme çalışmaları göz önüne alındığında bu artış beklenen yöndedir. Modal sönüm oranlarının uygulanan kuvvete bağlı olarak değişimini belirlemek için eksantrik kütleli sallama aygıtı kullanılarak zorlanmış titreşim testleri yapılmıştır. Bu aygıt farklı dışmerkezlikte ve frekansta dönebilen kütlelerden oluşmaktadır. Bu iki parametreye bağlı olarak uygulanan kuvvet değiştirilebilir. Zorlanmış titreşim testlerinden modal sönüm oranlarının uygulanan kuvvete bağlı olarak arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar binanın periyot tahmini ve modellenmesi dolayısıyla deprem performansının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

ANAHTAR KELİMELER : Deneysel modal analiz, zorlanmış titreşim deneyi, depreme karşı güçlendirme

1. GİRİŞ

Yapı sağlığı izlemesinin başlıca amacı olası bir hasarın varlığını, boyutunu ve yerini tespit etmektir. Bunlara bağlı olarak ta bir sonraki aşamada yapının güvenilirliği tespit edilebilir. Sistem tanılama ya frekans ya da zaman uzayında gerçekleştirilebilir. Bu alanda özellikle son yıllarda artan çalışmalar mevcuttur (Beck ve Jennings, 1980, Safak, 1989, Safak, 1991, Ghanem ve Shinozuka, 1995, Doebling vd., 1996, Lus vd., 2001, Kohler vd., 2005, Yu vd., 2007, Soyöz ve Feng, 2009, Soyöz ve Feng, 2010). İnşaat mühendisliğinde kompleks yapılar söz konusu olduğu için genellikle modal tanılamamanın ötesine geçmek zordur. Ayrıca sistem tanılama sonuçlarının çevresel ve zemin-yapı etkileşimi gibi etkenlere bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. İnşaat mühendisliğinde sistem tanılamayla ilgili bir diğer zorluk ise yapıların nadiren dizayn depremlerine maruz kalması dolayısıyla gerçekçi senaryolar altında yapı davranışının gözlenememesidir. Bu durum özellikle modal

sönümlenme oranları için geçerlidir çünkü modal sönümlenme oranlarının yapıya etkiyen kuvvetlerin büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği bilinmektedir.

Bütün bu kısıtlamalara rağmen sistem tanılama sonlu elemanlar modelinin güncellenmesi gibi önemli roller oynayabilir. Bu güncelleme sonrasındaki yapı davranışı, güncellenmemiş modelden elde edilen davranışa kıyasla ciddi farklılıklar gösterebilir. Dolayısıyla yapının deprem davranışının güncellenmiş modelle elde edilmesi daha güvenilir sonuçlar verecektir. Türkiye’de yapı stoğu ciddi oranda sünek olmayan yapılardan oluşmaktadır. Sünek olmayan yapıların üzerine gelecek deprem yükleri yapının hasar görmemiş halinden elde edilen modal özellikleriyle bağlantılıdır. Bu çalışmada, bir binanın dinamik özellikleri depreme karşı yapılan güçlendirme öncesi ve sonrasında incelenmiştir. Ortamsal titreşimler kullanılarak ve deneysel modal analiziyle yapının modal frekans ve şekilleri elde edilmiştir. Güçlendirme sırasında yıkılan bölme duvarların binanın rijitliğiyle ilgili olan modal frekans değerini düşürdüğü gözlenmiştir. Bölme duvarlar genellikle binaların sonlu elemanlar modellenmesinde göz önüne alınmaz. Bu varsayımın yapıya etkiyecek deprem kuvvetini değiştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapıların deprem altındaki performans değerlendirmesi lineer olmayan dinamik analiz yöntemiyle yapılırken modal sönümlenme oranları deprem şiddetinden bağımsız olarak %5 olarak düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan zorlanmış titreşim deneylerinde bina üzerindeki kuvvet artırıldığında modal sönümlenme değerinin de arttığı ve bu artışın doğrusal olduğu gözlenmiştir.

2. ORTAMSAL TİTREŞİM DENEYLERİ

Deprem güçlendirmesi sırasında bina boşaltılmış ve mimarı elemanlar kaldırılmıştır. Ayrıca kolonlar mantolanacağı için bölme duvarların bir kısmı yıkılmış ve kolonlar soyulmuştur. Ortamsal titreşim deneyleri tüm gün boyunca devam etmiştir. Titreşim kaynakları binada çalışan işçiler ve yakın mesafedeki trafikten kaynaklanmıştır. Şekil 1 binanın güçlendirme öncesi ve sonrasındaki durumunu göstermektedir.



Şekil 1 Güçlendirme öncesi ve sonrasında ET-B binası

2.1. Modal Tanılama Yöntemi

Modal parametreler Frekans Uzayında Ayrıştırma yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemle ilgili detaylı bilgi farklı kaynaklarda bulunabilir (Otte vd., 1990 ve Brinker vd., 2001). Bu metodun en önemli özelliği sadece sistem çıkanları hakkındaki bilgiyi kullanarak yani sistem girenleri hakkında bilgiye ihtiyaç duymadan sistem özelliklerini (modal değerleri) bulabilmesidir. Bu yöntem ayrıca birbirine yakın olan modları da güvenilir bir şekilde belirleyebilmektedir (Otte vd., 1990). Bu yöntemde tekil değer ayrıştırması kullanarak bina davranışı $y(t)$ 'nin spektral yoğunluk matrisi olan $S_{YY}(w)$ şu şekilde ayrıştırılır:

$$S_{YY}(w) = U(w) \cdot \Sigma(w) \cdot U^H(w) \quad (1)$$

Bu denklemde $\Sigma(w)$ =tekil değerlerin köşegen matrisi; $U(w)$ = tekil değerlerin uniter matrisi; ve H karmaşık eşlenik ve devriğidir.

Brinker vd. (2001) tarafından gösterilmiştir ki yapı geniş bantlı titreşim kaynaklarına maruz kaldığında $\Sigma(w)$ her bir modun tek dereceli bir sistem olarak düşünülmesiyle elde edilen güç spektrumu; $U(w)$ ise bu moda karşılık gelen şekilleri ifade etmektedir.

Titreşim verileri 200 Hz'de toplanmıştır. Hanning penceleri kullanılarak sızıntıların olması engellenmiştir. Veriler pencerelere bölünmüş ve her bir veri %50 üst üste gelecek şekilde incelenmiş ve frekans uzayında ortalamaları alınarak daha güvenilir ve temiz sonuçlar elde edilmiştir.

2.2. Binanın Enstrümantasyonu

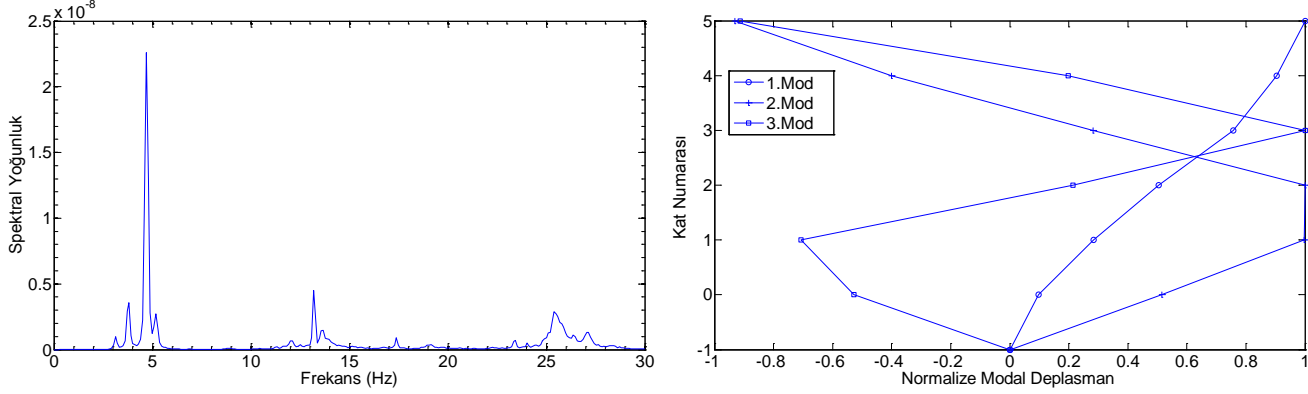
Kinematics model ivme ölçerler (ES-T) ve veri toplama (Q330) sistemleri kullanılmıştır. Veriler 24 kanal olarak toplanmıştır. ES-T tipi ivme ölçerler $10^{-8}g$ mertebesinde olan çok düşük seviyedeki titreşimleri hissedebilirler. Q330 veri toplama sistemleri sinyal iyileştirme devreleri, 24 bit A/D çeviricileri, farklı kanalları senkronize etmek için GPS donanımlarına sahiptir. İvme ölçerler her kata ve kat içerisinde de iki farklı noktaya yerleştirilmiştir. Şekil 2 binada ivme ölçerlerin kolonların yakınına yerleştirilmiş durumunu göstermektedir.



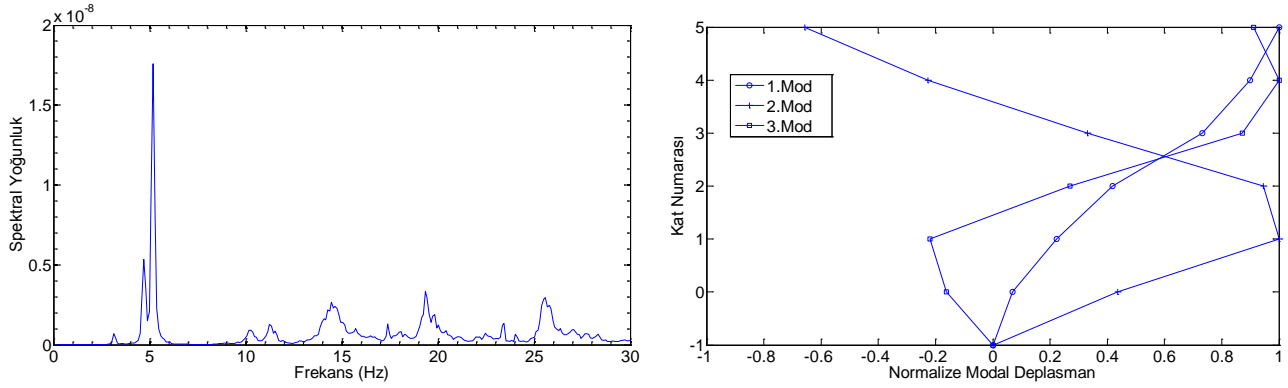
Şekil 2 Bina üzerinde ivme ölçerler

3. MODAL TANILAMA SONUÇLARI

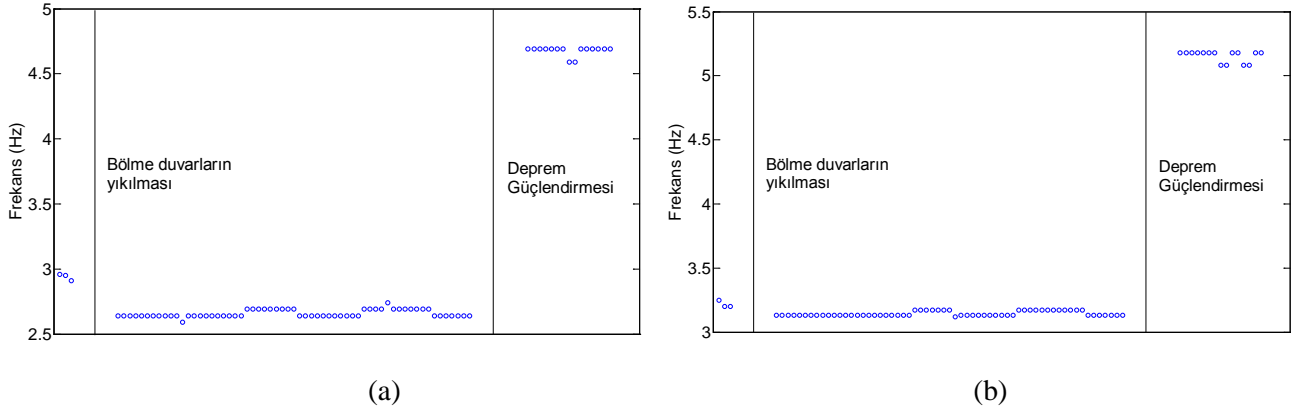
Şekil 3 ve Şekil 4 binanın güçlendirme sonrasında elde edilen modal frekans değerlerini ve şekillerini göstermektedir. Şekil 5 ise iki yöndeki birinci eğilme modu frekansının zaman içinde değişimini göstermektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi bölme duvarların yıkılması modal frekans değerlerinin %11 azalmasına; depreme karşı yapılan güçlendirme çalışmaları ise modal frekans değerlerinin %96 artmasına sebep olmuştur.



Şekil 3 Doğu - Batı yönündeki modal frekanslar ve şekiller



Şekil 4 Kuzey -Güney yönündeki modal frekanslar ve şekiller



Şekil 5 D-B (a) ve K-G (b) birinci eğilme modu frekansın zaman içinde değişimi

5. ZORLANMIŞ TİTREŞİM DENEYLERİ

5.1. Eksantrik Kütleli Sallama Aygıtı

Eksantrik kütleli sallama aygıtları yapılara sinusoidal kuvvetler uygularlar. Yapının uygulanan bu kuvvet etkisi altındaki davranışı veri toplama sistemleriyle kaydedilebilir ve daha sonra da yapının modal değerleri belirlenebilir. Şekil 6 deneylerde kullanılan sallama aygıtını göstermektedir. Bu aygıt taşıyıcı çelik çerçevenin üzerine oturtulmuş 6 adet kütlelen ve bunları taşıyan milden oluşmaktadır. Toplam ağırlığı 350 kg'dır. Kütleler mil etrafında birbirine ters yönlerde dönerek yapıya düşey ekseninde kuvvet uygular. Bu kuvvet kütlelerin dışmerkezliğine ve dönme hızına bağlı olarak değişir. Dışmerkezliği 18kg.m'dir ve bu değer %0 ve %100 arasında değiştirilebilir. Uygulanan en büyük kuvvet 88 kN ile sınırlıdır. Sallama aygıtı 1-25 Hz frekans aralığında çalışmaktadır.



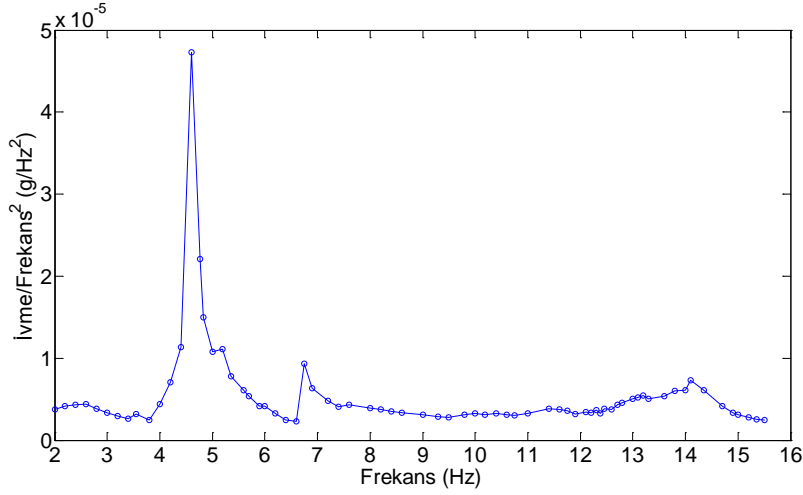
Şekil 6 Eksantrik kütleli sallama aygıtı

Tablo 1 Sallama aygıtı tarafından farklı dışmerkezlikte ve frekansta uygulanan kuvvet

Dışmerkezlik (%)	Frekans (Hz)	Kuvvet (kN)
25	4.5	3.70
50	4.5	7.39
75	4.5	11.1
25	6.5	7.71
50	6.5	15.4
75	6.5	23.1

5.2. Sistem Tanılama Sonuçları

Şekil 7 zorlanmış titreşim deneylerinden elde edilen frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Ölçülen ivmenin frekansın karesiyle normalize edilmiş değerleri her bir modun rezonans bölgeleri etrafında ki dinamik yükseltme oranını temsil eder.

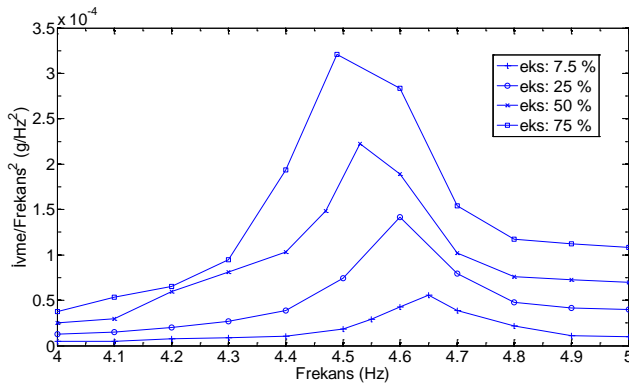


Şekil 7 Zorlanmış titreşim deneylerinden elde edilen frekans davranış fonksiyonu

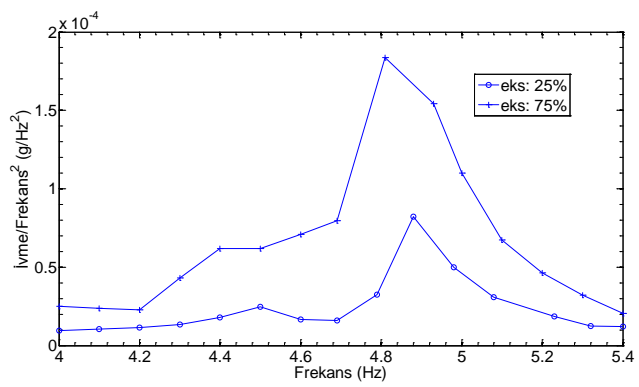
Şekil 8 ilk iki mod için zorlanmış titreşim deneylerinden elde edilen frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Modal sönümlenme oranları aşağıdaki bağıntıyla belirlenmiştir. Daha detaylı bilgiler Chopra (2001) tarafından verilmiştir.

$$2\xi\omega_n = \omega_a - \omega_b \quad (2)$$
$$\omega_{a,b} = \omega_n / \sqrt{2}$$

burada ω_n yapının doğal frekansı,
 ξ modal sönümlenme oranıdır.



(a)



(b)

Şekil 8 1. (a) ve 2. (b) mod için frekans davranış fonksiyonu

Tablo 2 ve Tablo 3 zorlanmış titreşim deneyleri sırasında ilk iki modal frekansın ve sönümlenme değerinin değişimini göstermektedir. Zorlanmış titreşim deneyleri modal sönümlenme oranlarının artan kuvvete bağlı olarak değişimini incelemek için yapılmıştır. Aşağıdaki tablolardan görüldüğü gibi modal sönümlenme oranları artan kuvvetle beraber artmaktadır ve bu artış lineer bir eğilim sergilemektedir.

Tablo 2 Zorlanmış titreşim deneylerinde birinci modal değerlerin değişimi

Üst Kat İvme (% g)	Frekans (Hz)	Sönümlenme (%)
1.2	4.65	1.1
3.0	4.60	1.3
4.5	4.53	1.8
6.5	4.49	2.3

Tablo 3 Zorlanmış titreşim deneylerinde ikinci modal değerlerin değişimi

Üst Kat İvme (% g)	Frekans (Hz)	Sönümlenme (%)
2.0	4.88	1.1
4.3	4.81	2.3

6. SONUÇ

Depreme karşı güçlendirilen bir binanın dinamik özelliklerini belirlemek için ortamsal ve zorlanmış titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Depreme karşı güçlendirme çalışmaları, binanın taşıyıcı sistemine perde duvarlar eklenmesi ve mevcut kolonların mantolanması olarak gerçekleştirilmiştir. Depreme karşı güçlendirmelerin yapılabilmesi için öncelikle taşıyıcı olmayan tuğla duvarlar yıkılmıştır. Ortamsal titreşim deneyleriyle binanın doğal frekansları, ve mod şekilleri belirlenmiştir. Modal sönüm oranlarının uygulanan kuvvete bağlı olarak değişimini belirlemek için sallama aygıtı kullanılarak zorlanmış titreşim deneyler yapılmıştır. Bu aygıt farklı dışmerkezlikte ve frekansta dönebilen kütlelerden oluşmaktadır. Bu iki parametreye bağlı olarak yapıya uygulanan kuvvet değiştirilebilir. Aşağıda bu deneyler sonucunda elde edilen çıkarımlar özetlenmiştir.

- Bölme duvarların yıkılması sürecinde kaydedilen ortamsal titreşimlerin analizi sonucunda, binanın dinamik rijitliği ile ilişkili olan modal frekans değerlerinin % 11 azaldığı görülmüştür. Binanın birinci eğilme modu frekansı 2,98 Hz'den 2,64 Hz'e inmiştir. Bu değişim yapıların modellenmesinde genellikle göz önüne alınmayan taşıyıcı olmayan duvarların binanın doğal frekansına etkisini göstermektedir.
- Bina üzerinde güçlendirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra kaydedilen ortamsal titreşimlerin analizi sonucunda ise modal frekans değerlerinin güçlendirme sonrasında % 96 arttığı görülmüştür. Binanın birinci eğilme modu frekansı 2,64 Hz'den 5,18 Hz'e çıkmıştır. Bina üzerinde yapılan güçlendirme çalışmaları göz önüne alındığında bu artış beklenen yöndedir.
- Zorlanmış titreşim testlerinden modal sönüm oranlarının uygulanan kuvvete bağlı olarak arttığı görülmüştür ve bu artışın lineer olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada anlatıldığı gibi deneysel modal analiz yöntemleriyle yapının gerçek modal özellikleri belirlenebilir. Sönümlenme oranının ortamsal değil zorlanmış titreşim deneylerinden belirlenmesi önemlidir. Belirlenen modal özellikler ışığında yapının maruz kalacağı deprem yükleri daha güvenilir şekilde tahmin edilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Boğaziçi Üniversitesi BAP 5343 no'lu projenin desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Beck, J.L. ve Jennings, P.C. (1980). Structural Identification Using Linear Models and Earthquake Records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **8:2**, 145-160.
- Brinker, R., Zhang, L. ve Andersen, P. (2001). Modal Identification of Output-Only System Using Frequency Domain Decomposition. *Smart Materials and Structures* **10:3**, 441-455.
- Chopra, A.K. (2001) Dynamics of Structure, Prentice Hall, New Jersey.
- Doebbling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. ve Shevitz, D.W. (1996). Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. *Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS*
- Ghanem, R. ve Shinozuka, M. (1995). Structural System Identification: Theory and Experimental Verification. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* **121:2**, 255-273.
- Kohler, M.D., Davis, P.M. ve Safak, E. (2005). Earthquake and Ambient Vibration Monitoring of the Steel-Frame UCLA Factor Building. *Earthquake Spectra*, **21:3**, 715-736.
- Lus, H., Betti, R. ve Longman, R.W. (1999). Identification of Linear Structural Systems Using Earthquake Induced Vibration Data. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **28**, 1449-1467.
- Otte, D., Ponsele, P.V.D. ve Leuridan, J. (1990). Operational Shapes Estimation as a Function of Dynamic Loads. *Proceedings of 8th International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics*. Orlando, FL, 413-421.
- Safak, E. (1989). Adaptive Modeling, Identification and Control of Dynamic Structural Systems: Theory and Applications. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* **115:11**, 2386-2426.
- Safak, E. (1991). Identification of Linear Structures Using Discrete-Time Filters. *Journal of Structural Engineering, ASCE* **17:10**, 3064-3085.
- Soyoz, S., ve Feng, M.Q. (2009). Long-term Monitoring and Identification of Bridge Structural Parameters. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **24:2**, 82-92.
- Soyoz, S., Feng, M.Q. ve Shinozuka, M. (2010). Structural Reliability Estimation with Vibration-based Identified Parameters. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* **136:1**, 100-106.
- Yu, E., Taciroglu, E. ve Wallace, J.W. (2007). Parameter identification of framed structures using an improved finite element model updating method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **36**: 619-660.