

Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi

Alemdar BAYRAKTAR*

Temel TÜRKER**

Ahmet Can ALTUNIŞIK***

Barış SEVİM****

Abdurrahman ŞAHİN*****

D. Mehmet ÖZCAN*****

ÖZ

Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları, her bir yapı için karakteristik özelliğe sahip dinamik parametreler kullanılarak belirlenmektedir. Bu parametreler yapının mevcut yapısal özelliklerine, malzeme özelliklerine, sınır şartlarına ve hasar durumuna bağlı olarak elde edilmektedir. Bina türü yapılar dikkate alındığında, binanın inşaa aşamalarına bağlı olarak dinamik parametrelerin değişim gösterdiği bilinmektedir. Bu çalışmada, farklı inşaa aşamalarındaki üç betonarme binanın dinamik parametreleri deneysel ölçüm yöntemiyle elde edilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlerden binaların mevcut durumları için doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Binaların birinci doğal frekansları standartlarda kullanılan yaklaşık yöntemlerle hesaplanmış, ölçülen ve hesaplanan frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, incelenen binaların doğal titreşim frekansları ve mod şekilleri mevcut durum için elde edilmiş ve beklenen modal davranışın elde edildiği görülmüştür. Ayrıca binaların ölçülen birinci frekanslarının hesaplanan değerlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik davranış, modal parametreler, operasyonel modal analiz

ABSTRACT

Determination of Dynamic Parameters of Buildings by Operational Modal Analysis

Dynamic behavior of structures depends on dynamic characteristics of structures. The dynamic characteristics are determined according to the structural properties, material properties, boundary conditions and damage cases of the structure. It is known that the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 13.03.2009 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2010 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - alemdar@ktu.edu.tr

** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - temelturker@ktu.edu.tr

*** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - ahmetcan8284@hotmail.com

**** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - bsevim18@hotmail.com

***** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - abdurrahmansahin@hotmail.com

***** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - dmehmetozcan@hotmail.com

dynamic characteristics of buildings vary depending on the construction stages. In this study, the dynamic characteristics of three buildings having different level of construction are determined using experimental measurements. The natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios of these buildings are extracted from the measured data. Also, the first natural frequencies of these building are calculated using empirical relationships. The measured and calculated values of the first natural frequencies are compared for each building. It is observed from the study that the predicted dynamic behaviors of these buildings are attained from experimental measurements, and the first measured natural frequencies of these buildings are greater than the calculated frequencies.

Keywords: Dynamic behavior, modal parameters, operational modal analysis

1. GİRİŞ

Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları birçok belirsizliği içermektedir. Dinamik yüklerdeki belirsizliklerin yanı sıra dinamik davranışı etkileyen parametrelerdeki belirsizlikler, yapı dinamik davranışının gerçekçi olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranının mevcut yapının özelliklerini yansıtacak şekilde deneysel yöntemler ile belirlenebilmesi, yapı dinamik davranışının daha gerçekçi elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

Yapı dinamik karakteristikleri, oluşturulan analitik modellerin doğruluğunun kontrolü ve yapıya etkiyecek deprem kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Yapının birinci periyot değerine bağlı olarak basitleştirilmiş yaklaşımlar kullanılarak dinamik analizler de yapılmaktadır [1]. Ayrıca yapının modal davranışına bakılarak rijitlik dağılımı ve burulma düzensizliği olup olmadığı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı dinamik karakteristiklerin yapılar üzerinde titreşim testleri yapılmak suretiyle gerçekçi olarak belirlenmesi oldukça önemlidir.

Geçmiş demiryolu raylarındaki hasarların çekiç darbeleriyle oluşturulan titreşimlerin dinlenilerek belirlenmesine dayalı olan deneysel modal analiz yöntemi, günümüzde yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Bu yöntemin esası, yapıya uygulanan bir etki altında yapının göstermiş olduğu tepkilerin ölçülmesine dayanmaktadır. Ölçülen etki ve tepki sinyalleri arasında tanımlanan fonksiyon her bir yapı için karakteristik özellikte olan dinamik parametreleri içermektedir. Bu yöntem makine parçalarının titreşim analizleri, uçaklardaki titreşim problemlerinin belirlenmesi, yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi gibi birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 3]. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve elektronik imkanlar sayesinde deneysel ölçümlerde takip edilen yöntemler de geliştirilmiştir. Özellikle titreşimlere maruz büyük mühendislik yapılarının ölçümlerinde bir titreştirici kullanmak yerine yapıdaki mevcut titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılabilme imkanı oluşmuştur [4-8].

Bu çalışmada, betonarme binaların dinamik parametreleri farklı binalar üzerinde farklı inşaat durumları için operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Dört katlı karkas bina, altı katlı tuğlalı bina ve beş katlı tamamlanmış bina üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Doğal frekanslar ve mod şekilleri dikkate alınarak bina davranışları değerlendirilmeye çalışılmıştır. Çalışmadan, inşaat aşamasına bağlı olarak doğal frekansların değişim aralığı ve

frekanslar arasındaki değişim oranları belirlenmiştir. Ayrıca modal davranışlar incelenerek binaların rijitlik dağılımları ve burulma düzensizlikleri değerlendirilmiştir.

2. BİNA DİNAMİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

2.1. Teorik Yöntemler

Binaların dinamik parametreleri analitik modeller ya da yaklaşık yöntemler kullanılarak belirlenebilmektedir. Analitik modelleme amacıyla kullanılan birçok program mevcuttur. Ayrıca birçok yapı standardında yapıların birinci frekans değerinin belirlenmesine yönelik yaklaşık bağıntılar mevcuttur.

Standartlarda tanımlanan kurallara göre inşa edilen binalar için birinci periyot değeri bina boyutlarına bağlı olarak tanımlanabilmektedir. Bu yaklaşık bağıntılardan Türk Deprem Yönetmeliği'nde [1] bodrum kat hariç kat sayısının 13'ten az olduğu binalarda birinci doğal periyodun $0.1 \cdot \text{kat sayısı}$ değerinden daha büyük olamayacağı belirtilmektedir. Periyot için diğer bir bağıntı, bina türü ve toplam yüksekliğe bağlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [9].

$$T = C_t (H_n)^{3/4} \quad (1)$$

Burada, C_t bina taşıyıcı sistemine bağlı olarak belirlenen bir katsayıyı ve H_n bina toplam yüksekliğini göstermektedir. Bu katsayı, çelik çerçeve sistemlerde 0.08-0.085, betonarme çerçeve ya da dışmerkez çaprazlı çelik perdelerden oluşan binalarda 0.07-0.073, diğer tür binaların için ise 0.05 olarak alınabilmektedir.

Binaların doğal frekansları analitik modeller oluşturulmak suretiyle de belirlenebilmektedir. Analitik modelleme sayesinde hem doğal frekanslar hem de mod şekilleri elde edilebilmekte ve binanın dinamik davranışı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Standartlara göre inşa edilmiş düzgün geometriye sahip binalarda modal davranışın, birinci ve ikinci modda bina rijitliğine bağlı olarak enine ve boyuna doğrultuda öteleme ve üçüncü modda ise burulma olması beklenilmektedir.

Çok serbestlik dereceli bir sisteme ait hareket denkleminin çözümünden doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmektedir. Çok serbestlik dereceli sönümsüz bir sistem için hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir. Burada $[M]$ ve $[K]$ kütle ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{f(t)\}$ sırasıyla ivme, yerdeğiştirme ve kuvvet vektörlerini göstermektedir. Yapının serbest titreşim yaptığı düşünüldüğünde hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{0\} \quad (3)$$

halini alır. Bu denklemden yapıya ait özdeğer denklemi,

$$\det[[K] - \omega^2 [M]] = 0 \quad (4)$$

olarak elde edilir. Bu denklemin çözümünden serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal frekans elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır [10].

2.2. Deneysel Yöntemler

Yapılar üzerinde titreşimlerden oluşan tepkilerin ölçülmesi ve ölçüm verilerinden yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler deneysel modal analiz yöntemleri olarak bilinmektedir. Bu yöntemlerde yapılar ya bilinen bir kuvvetle titreştirilmekte ya da çevresel titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılabilmektedir. Ölçümlerde kullanılan titreşim kuvvetinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak, deneysel modal analiz ve operasyonel modal analiz üzere iki yöntem mevcuttur.

2.2.1. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Bu yöntemde yapıları titreştirmek amacıyla uygulanan kuvvetin genliği ve zamanla değişimi bilinmektedir. Uygulanan kuvvet etkisindeki yapı, mevcut sınır şartları, malzeme özellikleri ve varsa hasar durumuna bağlı olarak titreşim hareketi sergilemektedir. Yapıya uygulanan kuvvet, çekicinin başlığına yerleştirilen kuvvetölçer yardımıyla; yapının titreşim tepkileri ise yapıya bağlanan ivmeölçerler yardımıyla ölçüm süresi boyunca ölçülerek kayıt edilirler. Zaman ortamında kayıt edilen sinyallerden farklı yöntemler kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilir.

Çok serbestlik dereceli bir sisteme ait hareket denkleminin çözümünde yapının tepki modelini oluşturmak için yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştirildiği varsayıldığında, hareket denklemi

$$([K] - \omega^2 [M])\{X\}e^{i\omega t} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (5)$$

şeklinde düzenlenir. Bu ifadeden frekans davranış fonksiyonu $H(\omega)$,

$$\{X\} = ([K] - \omega^2 [M])^{-1} \{F\} \quad (6)$$

$$[H(\omega)] = \frac{\{X\}}{\{F\}} \quad (7)$$

olarak elde edilir.

Bu yöntem, yapıları titreştirmekte kuvvet çekiçleri yaygın olarak kullanıldığından dolayı çekiç testi olarak da bilinmektedir [2]. Deneysel modal analiz yöntemi makine parçalarının titreşim analizlerinde, inşaat mühendisliği ile ilgili yapıların laboratuvar modellerinin titreşimlerinin incelenmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [11, 12].

2.2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Büyük mühendislik yapılarının deprem, rüzgar, taşıt ve insan hareketleri, makine titreşimleri gibi genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinmeyen titreştiriciler tarafından tetiklendiği bilinmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve elektronik imkanlar, titreşimlere maruz mühendislik yapılarının ölçümlerinde bir titreştirici kullanmak yerine yapıdaki mevcut titreşimleri dikkate alarak ölçüm yapılabilmesi mümkün kılmaktadır. Bu yöntem, ölçümlerde çevresel titreşimler kullanıldığından dolayı çevresel titreşim testi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki fonksiyonları arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, $[G_{xx}(\omega)]$ ve $[G_{yy}(\omega)]$ etki ve tepki sinyallerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonlarını, $[H(\omega)]$ ise frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Bu ifadedeki * ve T fonksiyonların eşlenik ve transpozisini göstermektedir. Bu bağıntıda etkinin beyaz gürültü olduğu varsayılarak etki sinyaline ait spektral yoğunluk fonksiyonu sabit alınmıştır. Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrık değerler olarak,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (9)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; U_i , u_{ij} tekil vektörlerinden (mod vektörlerinden) oluşan birim matrisi, S_i , s_{ij} tekil değerlerden (özdeğerlerden) oluşan diyagonal matrisi göstermektedir [13].

Operasyonel modal analiz yönteminde yapıyı titreştirmek amacıyla uygulanan kuvvetin genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinemediğinden dolayı, ölçümler yapının ölçüm yapılan frekans aralığında tahrik edilmesini temin edebilecek kadar uzun süreli alınmalıdır. Ölçümlerde sadece yapıya ait tepkiler zaman ortamında belirli noktalardan ölçülmekte ve farklı yöntemler kullanılarak yapı dinamik parametreleri elde edilmektedir. Birçok binanın, köprünün, barajın dinamik karakteristikleri operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [14-18].

3. MODAL PARAMETRELERİN ELDE EDİLMESİ

Operasyonel modal analiz yönteminde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler frekans ortamında ayrışım (FOA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleridir.

Frekans Ortamında Ayrışım Yöntemi (FOA)

Frekans ortamında ayrışım yöntemi, her bir modu birbirinden bağımsız tek serbestlik dereceli sistem olarak varsayıp bir ayrışım yapılması mantığına dayanmaktadır [13]. Bu

Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz ...

işlem spektral yoğunluk matrislerinin ayrıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Spektral yoğunluk fonksiyonları ise tek serbestlik dereceli sistemlerin oto-spektral yoğunluk fonksiyonlarından elde edilen tekil değerleri ve vektörleri içermektedir. Bu tekil değerler yapı frekanslarını, tekil vektörler ise mod şekillerini temsil etmektedir. Frekans ortamında ayrışım yönteminde takip edilen işlem adımları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Ölçüm verilerinden spektral yoğunluk fonksiyonlarının elde edilmesi,
- Spektral yoğunluk fonksiyonlarında tekil değer ayrıştırma işleminin gerçekleştirilmesi,
- Eğer çoklu ölçüm söz konusu ise tekil değerlerin ortalamasının alınması,
- Spektral yoğunluk fonksiyonundan tekil değerlerin seçilmesi,
- Doğal titreşim frekanslarının, mod şekillerinin ve sönüm oranının elde edilmesi.

Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi (SAB)

Stokastik altalan belirleme yöntemi doğrudan zaman ortamında kayıt edilmiş verilerden modal parametrelerin elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Dolayısıyla verilerin spektrumlara dönüştürülmesine gerek duyulmamaktadır. Bu yöntem, güçlü sayısal teknikler kullanarak ölçüm verilerinden konum alan matrislerini belirlemektedir. Yapının matematiksel modelinin oluşturulmasıyla modal parametreler elde edilebilmektedir [19, 20].

4. İNCELENEN BİNALAR

Bu çalışmada, farklı inşa aşamalarındaki betonarme binaların dinamik parametreleri operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Karkas, tuğlalı ve tamamlanmış betonarme binalar üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiş ve her bir binanın doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

4.1. Karkas Bina

Bina yaklaşık 20 yıl önce inşa edilmiş ve betonarme karkas taşıyıcı sisteme sahiptir. 350m² taban alanına sahip olan dört katlı betonarme binanın zemin katı güney yönde kısmen, kuzey yönde ise tamamen toprak ile temas halindedir. Binanın hiçbir katında tuğla duvar mevcut değildir. Şekil 1'de karkas binanın kuzey ve güney yönlerden görünüşleri verilmektedir.

Trabzon'un Akçaabat ilçesinde bulunan bina, yoğun trafiğe sahip sahil yoluna yaklaşık 10m mesafededir. Bu nedenle taşıt titreşimlerine oldukça maruzdur. Bina üzerinde yapılan ölçümlerde taşıt titreşimlerinden dolayı binada oluşan tepkiler ölçülmüştür.

A. BAYRAKTAR, T. TÜRKER, A. C. ALTUNIŞIK, B. SEVİM, A. ŞAHİN, D.M. ÖZCAN



Şekil 1. Karkas binanın güney ve kuzey yönlerden görünüşleri.

4.2. Tuğlalı Bina

Altı katlı betonarme bina halen inşa halinde olup, normal kat tuğlalarının örülü olduğu durumda ölçüm yapılmıştır. 220m² taban alanına sahip bina, Şekil 2'den görüldüğü üzere zemin katta batı cephesindeki binaya bitişiktir.



Şekil 2. Tuğlalı binanın farklı yönlerden görünüşleri.

Trabzon'un Akçaabat ilçesinde bulunan binanın hemen yakınında şehir içi trafik yoğunluğuna sahip bir cadde bulunmaktadır. Bu nedenle bina nispeten taşıt titreşimlerine maruzdur. Bina üzerinde yapılan ölçümlerde taşıt titreşimlerinden ve diğer çevresel titreşimlerden dolayı binada oluşan tepkiler ölçülmüştür.

4.3. Tamamlanmış Bina

İnşası tamamen bitirilmiş ve aktif olarak kullanılan okul binası üzerinde ölçümler alınmıştır. Bir bodrum ve dört normal kattan oluşan okul binası 840m² taban alanına

sahiptir (Şekil 3). Betonarme karkas taşıyıcı sisteme sahip okul binasında boyuna doğrultuda betonarme perde elemanlar da mevcuttur.



Şekil 3. Tamamlanmış binanın görünüşleri.

Trabzon'un Akçaabat ilçesi Söğütlü beldesinde bulunan okul binası üzerindeki ölçümlerde taşıt titreşimlerinden ve diğer çevresel titreşimlerden yararlanılmıştır.

5. DENEYSEL ÖLÇÜMLER

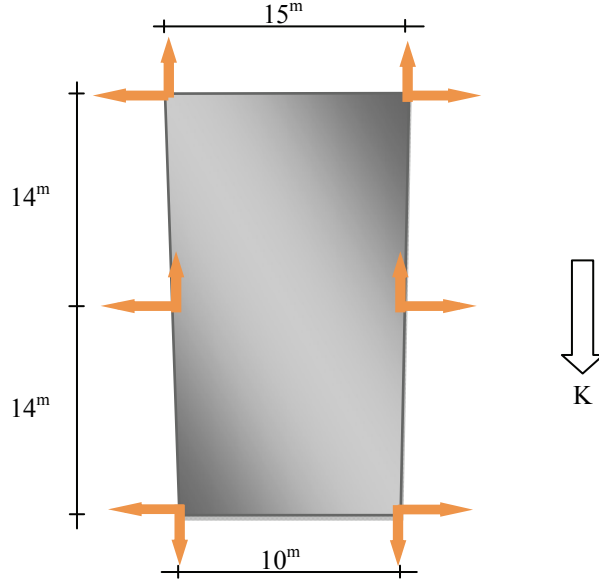
Binalar üzerindeki ölçümler operasyonel modal analiz yöntemiyle gerek taşıt gerekse rüzgar titreşimleri gibi çevresel etkilerden yararlanılarak yapılmıştır. Ölçümler genellikle binaların en üst katlarında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde binaların titreşimlerini ölçmek amacıyla tek eksenli sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerler ölçüm yapılan katta köşe ve orta noktalara yakın kolonlara enine ve boyuna doğrultularda bağlanmıştır. Binaların frekans değerleri değişiklik gösterse de ilk beş frekans değerlerinin 0-12.5Hz frekans aralığında elde edilebileceği düşünüldüğünden bu frekans aralığında ölçüm yapılmıştır. Binalardaki ölçümlerde hassas titreşim ölçümlerinde kullanılan B&K8340 tipinde sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. Ölçümlerden alınan titreşim sinyalleri B&K3500 tipindeki veri toplama ünitesi aracılığıyla taşınabilir bilgisayara aktarılmıştır.

5.1. Dört Katlı Karkas Binanın Ölçümü

Dört katlı karkas bina üzerindeki ölçümlerde taşıt titreşimlerinin binada oluşturduğu tepkiler ivmeölçerler yardımıyla ölçülmüştür. Bina üzerindeki ölçümlerde enine doğrultuda köşe noktalardan ve boyuna doğrultuda orta noktalardan olmak üzere toplam altı noktadan ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te karkas binanın ölçümünde kullanılan ivmeölçer düzeni görülmektedir.

İvmeölçerler ölçüm yapılan kattaki kolonların döşemeye yakın kısımlardaki yüzeylerine Şekil 4'te gösterilen yönlerde bağlanmıştır (Şekil 5). Böylece kat seviyesindeki hareket elde edilmeye çalışılmıştır. Ölçülen titreşim sinyalleri Şekil 6'da görülen veri toplama ünitesi aracılığıyla taşınabilir bilgisayara aktarılmıştır.

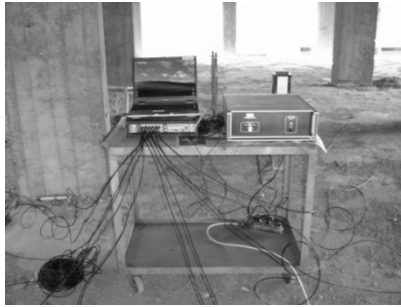
A. BAYRAKTAR, T. TÜRKER, A. C. ALTUNIŞIK, B. SEVİM, A. ŞAHİN, D.M. ÖZCAN



Şekil 4. Dört katlı karkas binada ivmeölçer yerleşim düzeni.



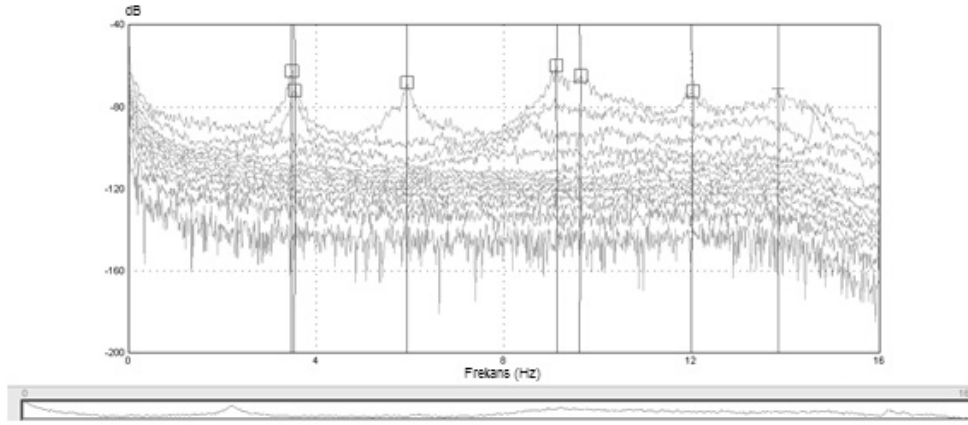
Şekil 5. Dört katlı karkas binanın ölçümünde kullanılan ivmeölçerler.



Şekil 6. Ölçümde kullanılan veri toplama ünitesi.

Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz ...

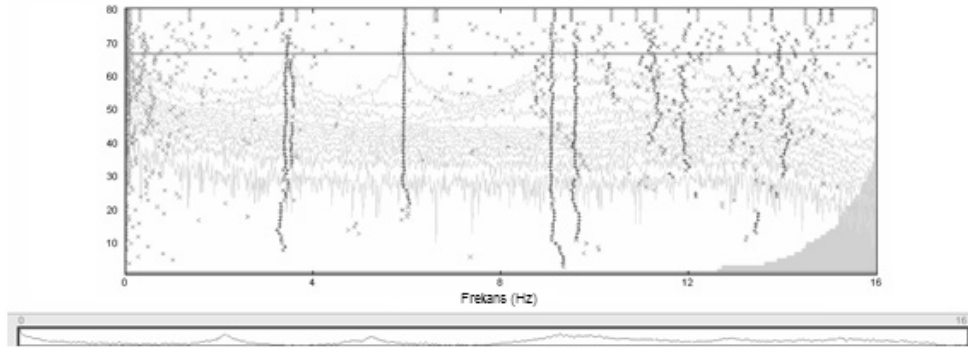
Ölçümden elde edilen sinyaller sinyal işleme sürecinden geçirildikten sonra Operasyonel Modal Analiz [21] programına aktarılmıştır. Operasyonel modal analiz programında frekans ortamında ayrışım (FOA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak karkas binaya ait modal parametreler elde edilmiştir. Frekans ortamında ayrışım (FOA) yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7’de verilmektedir.



Şekil 7. Karkas binaya ait spektral yoğunluk fonksiyonu.

Bu grafikteki tepe değerler binanın titreşim rezonanslarını ve her bir rezonansa ait frekans değeri binanın doğal titreşim frekansını göstermektedir. Tepe değerlere ait frekans değerleri kullanılarak farklı yöntemlerle binaya ait modal sönüm oranları elde edilmektedir [22]. Binanın modal davranışı temsil eden mod şekilleri ise her bir tepe değere ait fonksiyonun reel kısımlarından elde edilmektedir.

Stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak elde edilen kararlılık fonksiyonu ise Şekil 8’de verilmektedir.



Şekil 8. Karkas binaya ait kararlılık fonksiyonu.

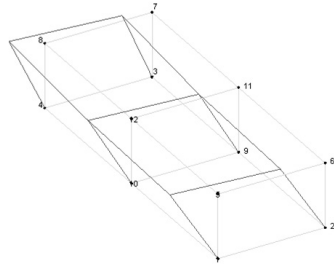
A. BAYRAKTAR, T. TÜRKER, A. C. ALTUNIŞIK, B. SEVİM, A. ŞAHİN, D.M. ÖZCAN

Kararlılık fonksiyonu rezonans etkisinin tekrarlılığının göstergesidir. Diğer bir ifade ile, ölçüm süresince etkiyen titreşimlerin binayı rezonans frekansında uyardığını göstermektedir. Şekil 7-8'den görüldüğü üzere, seçilen frekans aralığında binanın ilk yedi frekans değeri elde edilebilmiştir.

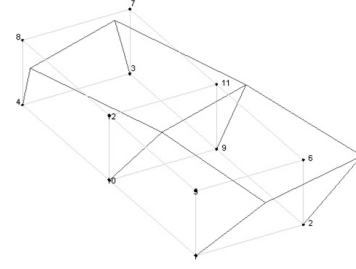
Frekans ortamında ayrışım (FOA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak elde edilen frekans ve sönüm değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Karkas binanın doğal titreşim frekansları ve modal sönüm oranları.

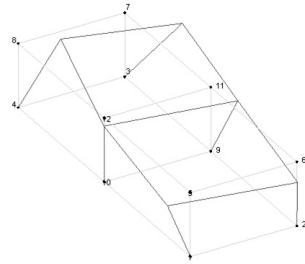
Mod	Doğal Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)
	FOA	SAB	
1	3.472	3.451	0.845
2	3.539	---	0.518
3	5.943	5.934	0.772
4	9.135	9.095	0.090
5	9.614	9.594	1.551



Birinci öteleme modu



İkinci öteleme modu



Birinci burulma modu

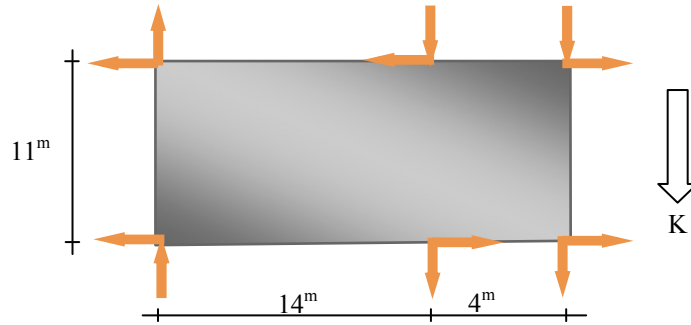
Şekil 9. Karkas binanın deneysel ölçümden elde edilen mod şekilleri.

Yaklaşık bağıntılar kullanılarak dört katlı betonarme bir bina için birinci frekans değerinin 2.1-2.5Hz aralığında olabileceği hesaplanmıştır. Deneysel ölçülen frekans değerleri ile karşılaştırıldığında, yaklaşık bağıntılar ile hesaplanan frekans değerinin oldukça küçük olduğu görülmektedir. Karkas binanın ölçümünden elde edilen mod şekilleri Şekil 9’da verilmektedir.

Ölçülen binanın ilk iki modunun sırasıyla enine doğrultuda öteleme ve boyuna doğrultuda öteleme, üçüncü modun ise burulma modu olduğu görülmektedir. Boyuna öteleme modunun diyagonal doğrultusuna kaymış olması binada bir dışmerkezlilik olabileceğini göstermektedir. Binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise, binanın birinci modunun enine doğrultuda olması bu doğrultudaki rijitliğin daha az olduğunun bir göstergesidir.

5.2. Altı Katlı Tuğlalı Binanın Ölçümü

Halen inşa halinde olan binadan farklı aşamalarda ölçümler alınmıştır. Fakat bu çalışmada, binanın normal katlarının tuğla örülmesi durumu için gerçekleştirilen ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Ölçümler genellikle rüzgarlı hava şartlarında yapıldığından, bina üzerindeki ölçümlerde taşıt titreşimlerinin yanı sıra rüzgar titreşimlerinden de yararlanılmıştır. Şekil 10’da görüldüğü üzere bina üzerindeki ölçümler enine doğrultuda köşe noktalardan ve boyuna doğrultuda orta noktalardan olmak üzere toplam altı noktadan gerçekleştirilmiştir.



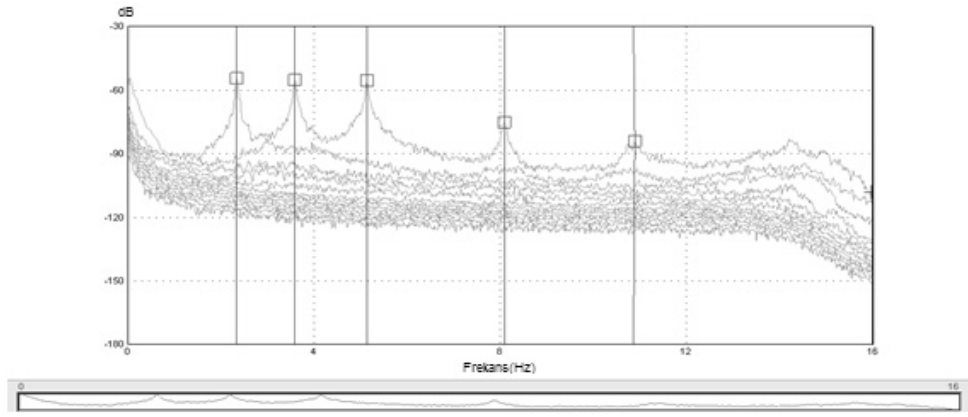
Şekil 10. Altı katlı tuğlalı binada ivmeölçer yerleşim düzeni.



Şekil 11. Altı katlı tuğlalı binanın ölçümünde kullanılan ivmeölçerler.

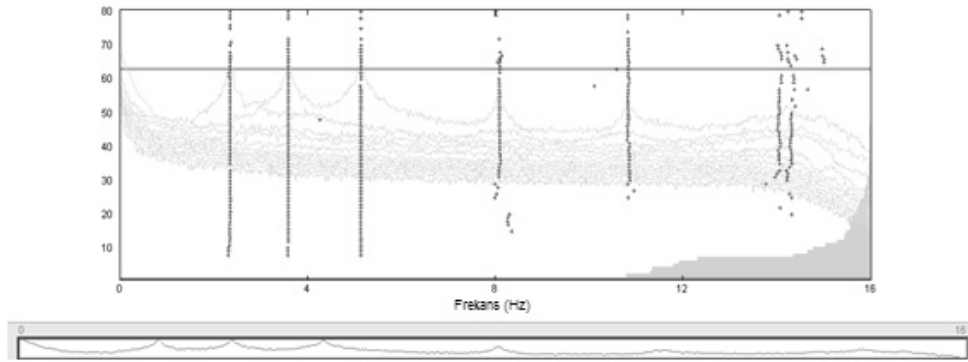
Şekil 10'daki mesafeler ivmeölçerler arası göstermektedir. İvmeölçerler ölçüm yapılan noktalarındaki kolonların döşemeye yakın yüzeylerine Şekil 11'de gösterilen yönlerde bağlanmıştır.

Ölçüm sırasında binanın titreşim tepkileri ivmeölçerler yardımıyla ölçülmüş ve veri toplama ünitesi yardımıyla taşınabilir bilgisayara aktarılmıştır. Ölçümden sonra elde edilen kayıtlar değerlendirilmiş ve tuğlalı binanın modal parametreleri elde edilmiştir. Frekans ortamında ayrışım (FOA) yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12. Tuğlalı binaya ait spektral yoğunluk fonksiyonu.

Stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak elde edilen kararlılık fonksiyonu ise Şekil 13'te verilmektedir.



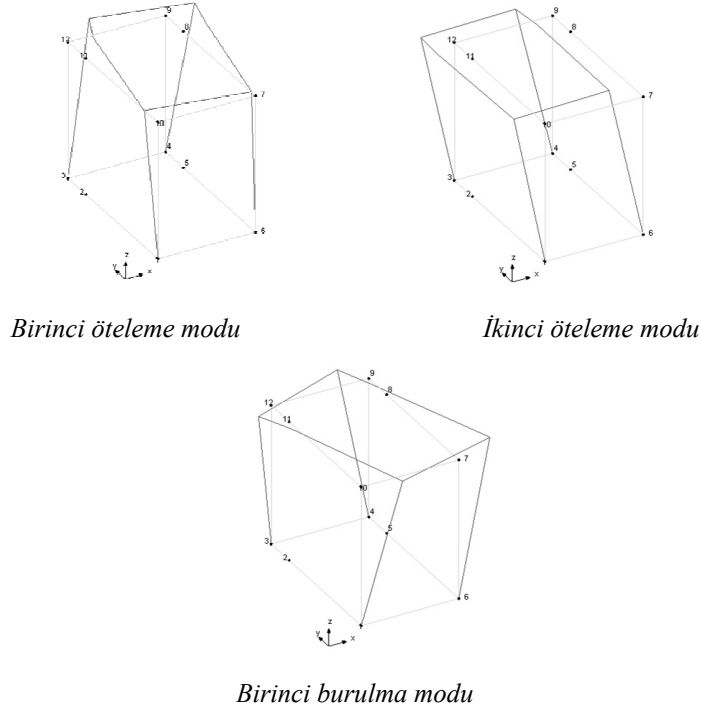
Şekil 13. Tuğlalı binaya ait kararlılık fonksiyonu.

Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz ...

Spektral yoğunluk ve kararlılık fonksiyonlarından da görüldüğü üzere, seçilen frekans aralığında binanın ilk altı frekansı elde edilebilmiştir. Frekans ortamında ayrışım (FOA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak elde edilen frekans ve sönüm değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Tuğlalı binanın doğal titreşim frekansları ve modal sönüm oranları.

Mod	Doğal Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)
	FOA	SAB	
1	2.348	2.351	0.752
2	3.594	3.593	0.574
3	5.139	5.143	0.459
4	8.086	8.097	0.497
5	10.860	10.840	1.067



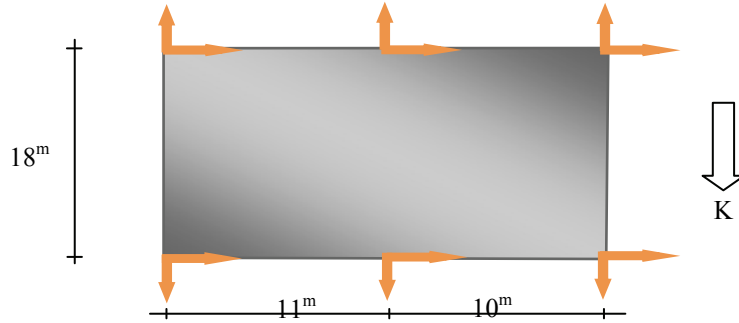
Şekil 14. Tuğlalı binanın deneysel ölçümlerinden elde edilen mod şekilleri.

Yaklaşık bağıntılar kullanılarak altı katlı betonarme bir bina için birinci frekans değerinin 1.1-1.7Hz aralığında olabileceği hesaplanmıştır. Deneysel ölçülen frekans değerleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık bağıntılar ile hesaplanan frekans değerinin oldukça küçük olduğu görülmektedir. Tuğlalı binanın ölçümünden elde edilen mod şekilleri ise Şekil 14’te verilmektedir.

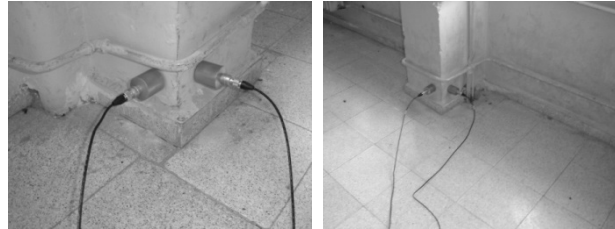
Ölçülen binanın ilk iki modunun sırasıyla boyuna doğrultuda öteleme ve enine doğrultuda öteleme, üçüncü modun ise burulma modu olduğu görülmektedir. Boyuna öteleme modunun diyagonal doğrultusuna kaymış olduğu görülmektedir. Bu olay yapıda burulma düzensizliği olabileceğini göstermektedir. Binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise boyuna doğrultudaki rijitliğin daha az olduğu görülmektedir.

5.3. Beş Katlı Tamamlanmış Binanın Ölçümü

Bina üzerindeki ölçümler çevresel titreşim etkileri altında gerçekleştirilmiştir. Bina üzerindeki ölçümler diğer ölçümlerde olduğu gibi toplam altı noktadan gerçekleştirilmiştir (Şekil 15). İvmeölçerler ölçüm yapılan katta kolonların döşemeye kısımlarına Şekil 16’da gösterilen yönlerde bağlanmıştır.



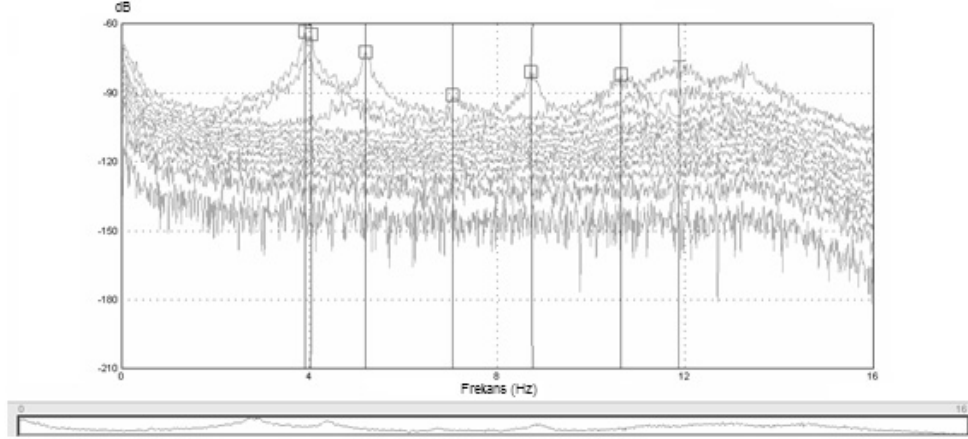
Şekil 15. Beş katlı tamamlanmış binada ivmeölçer yerleşim düzeni.



Şekil 16. Beş katlı tamamlanmış binanın ölçümünde kullanılan ivmeölçerler.

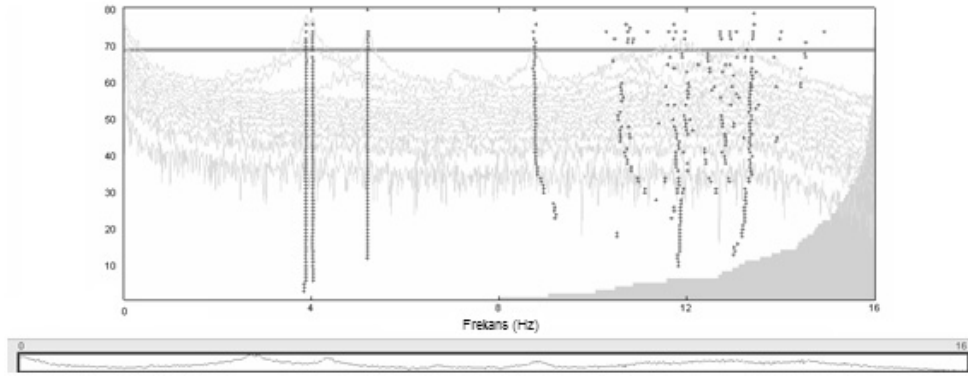
Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz ...

Frekans ortamında ayırışım (FOA) yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 17'de verilmektedir.



Şekil 17. Tamamlanmış binaya ait spektral yoğunluk fonksiyonu.

Stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak elde edilen kararlılık fonksiyonu ise Şekil 18'de verilmektedir.



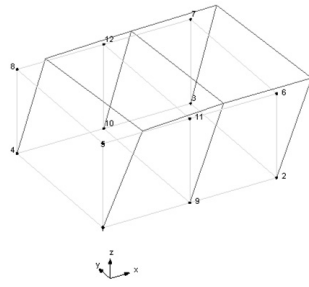
Şekil 18. Tamamlanmış binaya ait kararlılık fonksiyonu.

Spektral yoğunluk ve kararlılık fonksiyonlarından da görüldüğü üzere, seçilen frekans aralığında binanın ilk yedi frekans değeri elde edilebilmiştir. Frekans ortamında ayırışım (FOA) ve stokastik altalan belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak elde edilen frekans ve sönüm değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

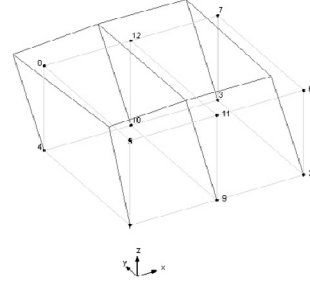
Tablo 3. Tamamlanmış binanın doğal titreşim frekansları ve modal sönüm oranları.

Mod	Doğal Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)
	FOA	SAB	
1	3.902	3.897	0.889
2	4.033	4.036	0.819
3	5.205	5.204	1.076
4	7.051	---	0.430
5	8.751	8.767	0.989

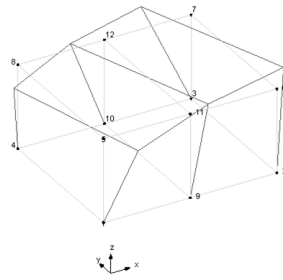
Beş katlı bir bina için yaklaşık bağıntılar ile hesaplanan birinci frekans değerinin 1.9-2.5Hz aralığında olabileceği hesaplanmıştır. Deneysel ölçülen frekans değerleri ile karşılaştırıldığında, yaklaşık bağıntılar ile hesaplanan frekans değerinin oldukça küçük olduğu görülmektedir. Ölçümlerden elde edilen mod şekilleri ise Şekil 19’da verilmektedir.



Birinci öteleme modu



İkinci öteleme modu



Birinci burulma modu

Şekil 19. Tamamlanmış binanın deneysel ölçümlerinden elde edilen mod şekilleri.

Ölçülen binanın ilk iki modunun sırasıyla boyuna doğrultuda öteleme ve enine doğrultuda öteleme, üçüncü modun ise burulma modu olduğu görülmektedir. Binanın enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri değerlendirildiğinde ise boyuna doğrultudaki rijitliğin daha az olduğu görülmektedir.

6. DEĞERLENDİRMELER

İncelenen farklı inşaa aşamalarındaki üç farklı betonarme binanın dinamik karakteristikleri deneysel ölçüm yöntemiyle belirlenmiştir. Binaların doğal frekansları ve modal sönüm oranları her bir titreşim modu için elde edilmiştir. Ayrıca binaların modal davranışı belirleyebilmek amacıyla her bir binanın ilk üç mod şekli elde edilmiştir. Ölçülen binaların birinci doğal frekans değerleri standartlarda verilen yaklaşık hesap yöntemleri ile hesaplanmıştır.

Her bir binadan deneysel ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ve birinci frekans değeri baz alınarak hesaplanan doğal frekanslardaki değişimin oranı Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Binalar doğal titreşim frekansları ve frekanslardaki değişim oranları.

Mod	Bina Türü					
	Karkas Bina		Tuğlalı Bina		Tamamlanmış Bina	
	Frekans (Hz)	Değişim (%)	Frekans (Hz)	Değişim (%)	Frekans (Hz)	Değişim (%)
1	3.472	1.000	2.348	1.000	3.902	1.000
2	3.539	1.019	3.594	1.530	4.033	1.034
3	5.943	1.712	5.139	2.189	5.205	1.334
4	9.135	2.631	8.086	3.444	7.051	1.807
5	9.614	2.769	10.860	4.625	8.751	2.242

Deneysel ölçümlerden elde edilen ilk beş doğal titreşim frekansları incelendiğinde, genellikle ilk iki frekansın birbirine yakın değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Frekans değerlerinin yakınlığı, binaların enine ve boyuna doğrultulardaki rijitliklerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Üçüncü frekans değeri dikkate alındığında ise birinci frekans değerinin yaklaşık 1.75 katı değerinde olduğu görülmüştür. Standartlarda verilen yaklaşık bağıntılar ile hesaplanan birinci frekans değerlerinin, mevcut binaların birinci titreşim frekans değerinden yaklaşık %30 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ölçülen değerlerin yaklaşık bağıntılarla hesaplanan değerden daha büyük olmasında, ölçümü gerçekleştirilen binaların diğer binalar ve zeminle etkileşim içerisinde olmasının

A. BAYRAKTAR, T. TÜRKER, A. C. ALTUNIŞIK, B. SEVİM, A. ŞAHİN, D.M. ÖZCAN

oluşturduğu ekstra rijitlik ile binalardaki tuğla ve sıvanın oluşturduğu rijitlik artışının etkili olduğu düşünülmektedir.

Binaların modal davranışları dikkate alındığında ise, ilk iki modun binanın enine ya da boyuna doğrultudaki rijitliğine bağlı olarak öteleme hareketleri ve üçüncü modun ise burulma modu olduğu görülmüştür. Bu durum öngörülen bina davranışının nispeten sağlandığını göstermektedir. Karkas ve tuğlalı binalarda ölçülen mod şekilleri değerlendirildiğinde, boyuna öteleme modlarının diyagonal doğrultusunda kaydığı belirlenmiştir. Bunun sebebinin boyuna doğrultuda rijitlik dağılımındaki düzensizlik olduğu düşünülmektedir.

7. SONUÇLAR

Karkas, tuğlalı ve tamamlanmış binalar üzerinde operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmadan,

- Binaların ilk beş doğal titreşim frekansları incelendiğinde, genellikle ilk iki frekans değerinin birbirine yakın değerlere sahip olduğu, üçüncü frekansın ise birinci frekans değerinin yaklaşık 1.75 katı değerinde olduğu,
- İlk iki frekans değerlerinin yakın olmasının, binaların enine ve boyuna doğrultulardaki rijitliklerinin birbirine yakınlığının bir göstergesi olduğu,
- Yaklaşık bağıntılar kullanılarak hesaplanan birinci frekans değerinin binanın gerçek frekans değerinden yaklaşık %30 oranında daha düşük olduğu,
- Binaların modal davranışları dikkate alındığında, ilk iki modun binanın enine ya da boyuna doğrultudaki rijitliğine bağlı olarak öteleme hareketleri, üçüncü modun ise burulma hareketi olduğu

belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan deneysel modal analiz yöntemiyle binalar üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla,

- Binaların farklı inşa ve kullanım aşamalarında dinamik karakteristiklerin nasıl değişim gösterdiğinin kolaylıkla belirlenebileceği,
- Deprem yüklerine göre yapılacak güçlendirme çalışmalarında, binalarda burulma düzensizliği olup olmadığının belirlenebileceği,
- Binaların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla oluşturulacak analitik modellerin binanın mevcut durumu için gerçekleştirilecek ölçümlerden elde edilecek sonuçlara göre iyileştirilebileceği,
- Binaların hasar durumlarının bina üzerinde hasarsız ve hasarlı durumlar için gerçekleştirilecek ölçüm sonuçlarına göre değerlendirilebileceği,

düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 106M038 numaralı TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi ve 2005.112.001.1 numaralı Karadeniz Teknik Üniversitesi Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Türkiye, 2007.
- [2] Ewins, D. J., Modal Testing: Theory and Practice. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [3] Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., Theoretical and Experimental Modal Analysis. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1997.
- [4] Roeck, G. D., Peeters, B., Ren, W. X., Benchmark Study on System Identification Through Ambient Vibration Measurements. Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 1106-1112, 2000.
- [5] Ventura, C., Laverick, B., Brincker, R., Andersen, P., Comparison of Dynamic Characteristics of Two Instrumented Tall Buildings. In Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC), Kissimmee, Florida, 2003.
- [6] Cantieni, R., Experimental Methods used in System Identification of Civil Engineering Structures. In Proceedings of 1st Int Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark, 249-260, 2005.
- [7] Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A. C., Determination of Dynamic Characteristics of Turkish Style Minarets by Analytical and Experimental Modal Analyses. International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering-AESE, Antalya, Turkey, 185-194, 2007.
- [8] Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T., Adanur, S., Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway Bridges using Modal Testing. 8th International Congress in Advances in Civil Engineering, Famagusta, North-Cyprus, 2008.
- [9] UBC, Uniform Building Code, Volume 2. Structural Engineering Design Provision, USA, 1997.
- [10] Petyt, M., Introduction to Finite Element Vibration Analysis. Cambridge University Pres, Cambridge, 1990.
- [11] Türker, T., Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2005.
- [12] Bayraktar, A., Türker, T., Finite Element Modeling and Experimental Modal Testing of Steel Structures. The 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC2005), Copenhagen, Denmark, 2005.

A. BAYRAKTAR, T. TÜRKER, A. C. ALTUNIŞIK, B. SEVİM, A. ŞAHİN, D.M. ÖZCAN

- [13] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., Output-only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition. in: Proceedings of the ISMA25 Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium; 2000.
- [14] Bernardeschi, K., Padovani, C., Pasquinelli, G., Numerical Modelling of the Structural Behaviour of Buti's Bell Tower. *Journal of Cultural Heritage*, 5, 371–378, 2004.
- [15] Michel, C., Gueguen, P., Dynamic Behaviour of the First Instrumented Building in France: The Grenoble City Hall. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 2006.
- [16] Gentile, C., Saisi, A., Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment. *Construction and Building Materials*, 21, 1311-1321, 2007.
- [17] Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T., Tarihi Yığıma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1*, Ankara, Türkiye, 415-428, 2007.
- [18] Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A. C., Yıldırım, F., Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-tower via Ambient Vibration Test. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2009 (kabul edildi).
- [19] Van Overschee, P., De Moor, B., *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [20] Peeters, B., *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. PhD Thesis, K.U. Leuven, Belgium, 2000.
- [21] OMA, *Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S*, Denmark, 2006.
- [22] Brincker, R., Ventura, C. E., Andersen, P., Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition. In: *Proceedings of 19th Int. Modal Analysis Conference (IMAC)*, Orlando, FL, USA, 2001.