

DETERMINING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF STRUCTURES AND UPDATING OF THEIR FINITE ELEMENT MODELS USING ENVIRONMENTAL VIBRATION DATA

ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK YAPILARIN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN GÜNCELLEŞTİRİLMESİ

Musa YETKİN^a, Yusuf CALAYIR^b ve Hakan ERKEK^c

^a Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, E-posta: musayetkin@firat.edu.tr

^b Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, E-posta: ycalayir@firat.edu.tr

^c Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye, E-posta: hakanerkek@osmaniye.edu.tr

Özet

Binalar, köprüler ve barajlar gibi birçok mühendislik yapıları işlevleri gereği bulundukları bölgedeki toplumların sosyal ve iktisadi hayatlarında büyük bir öneme sahiptirler. Bu yapıların uzun süreli hizmet verebilmeleri, bunların dinamik davranışlarının iyi bilinmesine, gerektiğinde onarım ve güçlendirilmelerinin yapılmasına bağlıdır. Yapıların dinamik karakteristikleri ya da modal parametreleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları), dinamik davranışlarını belirlemede/tahmin etmede önemli araçlardır. Günümüzde teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak yapıların dinamik karakteristikleri belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada; Elazığ ili Doğukent mahallesinde betonarme olarak inşa edilen Karabulut Sitesi A bloğunun çevresel titreşim verileri kullanılarak dinamik karakteristikleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmiş ve yapının sonlu eleman modeli güncelleştirilmesi yapılmıştır. Önce proje verileri kullanılarak başlangıç analitik modeli oluşturulmuş ve buna bağlı olarak yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile yapının gerçek dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel yöntem çözümleri karşılaştırılarak, yapının sonlu eleman modeli güncelleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Betonarme Yapı, Dinamik Karakteristikler, Çevresel Titreşim Verileri ve Sonlu Eleman Modeli Güncellenmesi

Abstract

Many engineering structures such as buildings, bridges and dams have a great importance for social and economical lives of the societies living nearby due to their functionalities. The long-term usage of these structures depends on knowing dynamic behaviours of these structures sufficiently well, and their repair & retrofit when needed. Dynamic characteristics or modal parameters of structures (natural frequencies, mode shapes and damping ratios) are important means to determine/estimate their dynamic behaviors. Currently, theoretical and experimental methods are used to determine such dynamic characteristics of structures.

In this study, the dynamic characteristics of Karabulut Apartments A Block, built as reinforced concrete in the Doğukent neighborhood in Elazığ, are determined by use of environmental vibration data. Then, finite element model of this building is updated. Initial analytical model of the building is first created by using project data and dynamic characteristics of the building are determined based on it. Next, real dynamic characteristics of the building are experimentally obtained by using Operational Modal Analysis Method. The analytical model of the building is updated by comparing the results of numerical and experimental methods.

Keywords: Reinforced Concrete Structure, Dynamic Characteristics, Environmental Vibration Data and Updated Finite Element Model.

1. Giriş

Teknolojinin hızlı ilerleyişi, gelişen bilgi ve bu sayede üretilen elektronik cihazlar canlı varlıkların davranışlarının kolayca gözlenmesine imkân sağladığı gibi, yapıların davranışlarının da gözlenmesine imkân sağlamaktadır [1]. Sismik düzeydeki titreşimleri ölçme yeteneğine sahip olan ivmeölçerler yardımıyla alınan ivme sinyallerinin analiz edilmesi ve elde edilen sonuçların farklı durumlar için karşılaştırılması ile yapının davranışında herhangi bir değişiklik olup olmadığı belirlenebilmektedir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntem Deneysel Modal Analiz yöntemidir [2]. Birçok mühendislik dalında uygulama alanı olan deneysel modal analiz çalışmalarının temelleri 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Bu yıllarda demiryolu raylarındaki hasarları belirleyebilmek amacıyla balyozlarla raylara vurularak oluşturulan titreşimlerin gözlemlenmesi, uçaklardaki titreşimin doğru olarak belirlenmesi gibi çalışmalarla dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesi metodunun temelleri atılmıştır. O zamanlar, dinamik kuvvetleri ölçen dönüştürücüler basit seviyelerde olduğundan, çoğunlukla pratik olmayan ve zaman alan analog yaklaşımlar kullanılırken, 1960'lı yıllarda sayısal bilgisayarların ve Hızlı Fourier Dönüşümlerinin geliştirilmesi ile deneysel modal analizin modern çağı başlamıştır [3].

2. Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Yapılar deprem, rüzgâr, trafik yükü gibi çeşitli dinamik etkilere maruz kalmaktadır. Yapıların dinamik yükler etkisi altında ayakta kalabilmeleri için çeşitli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Uygun tedbirlerin alınması mevcut yapıların dinamik davranışlarının iyi bilinmesine bağlıdır. Yapının dinamik karakteristikleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) mod birleştirme yöntemi ile dinamik davranışı belirlemede kullanılırken, aynı zamanda analitik modelin doğruluğunun kontrolünde de yardımcı olmaktadır. Yapıların projelerinden elde edilen bilgilerin yanı sıra arazi üzerinde yapılan ölçümler dikkate alınarak; malzeme özellikleri, sınır şartları ve eleman boyutları belirlenip; bu bilgiler yardımıyla oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal analizleri neticesinde dinamik karakteristikler analitik olarak bulunmaktadır. Dikkate alınan bu karakteristikler, yapıdaki çatlama, yorulma, mesnet çökmesi ve inşaat sırasındaki işçilik hataları gibi nedenlerden dolayı beklenen değerlerinden uzaklaşmış olabilmektedir [4]. Analitik yöntemler yardımıyla bulunan dinamik karakteristikler, yapıların deprem davranışlarını belirlerken doğru olmayan analiz sonuçları vereceği düşünülmektedir. Deneysel yöntemler ise yapının mevcut durumu üzerine uygulandığından, elde edilen dinamik karakteristikler yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır. Analitik çözümlerin deneysel yöntemler kullanılarak doğrulanması ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilecektir [5].

Yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel ölçümlere dayanarak belirlenmesi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, betonarme ve yığma olarak inşa edilen konut, cami, minare, köprü, kilise, kule vb. birçok yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir [6-12].

3. Deneysel Yöntem

Titreşim, yapıların başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler altındaki davranışlarıdır. Temel olarak, serbest ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki tür titreşim bulunmaktadır [13]. Serbest titreşim, yapıdaki başlangıç şartları altında oluşurken, bu titreşim yapıdaki sönümün etkisiyle bir süre sonra sonlanır. Bu tür titreşimde, temel frekans en küçük frekans olup, genellikle yapıdaki en etkili frekanstır. Eğer yapıya dışardan bir yük uygulanırsa bu titreşimin adı zorlanmış titreşim olur. Dış yükün sürekli etkimesi durumunda yapıda titreşim olmaya devam eder. [14]. Burada titreşimin bilinip bilinmemesine göre kullanılacak yöntem değişmektedir. Yapıya uygulanan titreşimin sayısal değeri biliniyorsa Geleneksel Modal Analiz yöntemi, titreşimin sayısal değeri bilinmiyor ve yapı çevresel etkilerin (deprem, rüzgâr, trafik, yaya yükü, vs.) altında titreşiyorsa Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılmaktadır. Genel olarak deneysel modal analiz yönteminin avantajı yapıya yıkıcı etki bırakmamasıdır. Büyük hacimli yapılar için OMA yönteminin geleneksel modal analiz yöntemine göre avantajı ise, yapay tahrik için pahalı cihazlar gerektirmeyişidir [15].

4. Ölçüm Araçları

Gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü kullanılmıştır (Şekil 1). Bu cihazın veri toplama ünitesi 16 kanallı ivmeölçer giriş devresine, ayrıca zorlanmış titreşim testlerinde darbe çekicinden gelen etki sinyallerini belirlemek için kuvvet sensörü girişine sahiptir. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörüne ait bazı teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü

Tablo 1. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü’nün Bazı Özellikleri [16]

Giriş Sayısı	16
DC Kanallar	4 Blok
Filtreleme	Mevcut
Çıkış	DC 40 kHz- $\pm 10V$ aralığı
Harici hard disk	60 Gb
Ağırlık	5.2 kg
Boyutlar (w,h,d)	114 x 280 x 350 mm

Ölçümlerde KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmış olup, bu ivmeölçerlerin dış görünüşü Şekil 2’de, teknik özellikleri ise Tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçer [17]

Tablo 2. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçere ait bazı özellikler [18]

Model	KB12VD
Frekans Aralığı (Hz)	0.08-260
Hassasiyet (mV/g)	10000
Maksimum İvme (g)	± 0.6
Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	-20 ile +80 arası
Ağırlık (gram)	150
Yükseklik (mm)	37
Çap (mm)	48

Tablo 2’deki özellikler, kullanılan ivmeölçerlerin ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını, yerçekimi ivmesiyle orantılı olarak üretebileceği elektrik gücünü, elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ölçebileceği ivme genliği aralığını, sağlıklı sinyal

üretebileceği maksimum ve minimum ortam sıcaklığını göstermektedir.

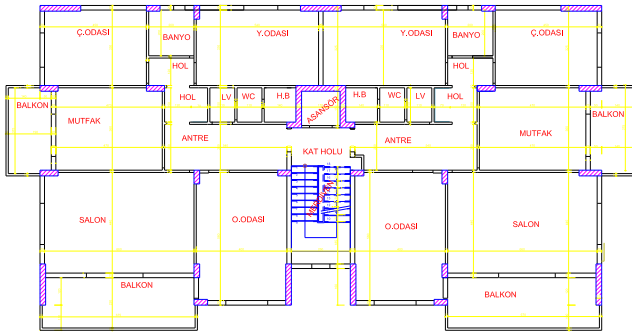
Ölçüm işleminde önemli olan diğer bir husus ivmeölçerlerin bağlandığı yer ve bağlanma şeklidir. İvmeölçerleri ölçülecek sisteme tuttururken vidalı, yapışkanlı vb. birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Her bir tutturma yönteminin avantaj ve dezavantajları vardır. Bu yüzden, ölçülecek yapı ve kullanılacak ivmeölçer türüne göre uygun bağlantı düzeni oluşturulmalıdır [14].

5. Sayısal Uygulama

Bu çalışma kapsamında, Elazığ ili Doğukent Mahallesi Ada:1771 Parsel: 17 üzerine Bodrum+5 kat ve her katta 2 daire olarak iki blok halinde inşa edilen, Karabulut sitesinin A bloğunun (Şekil 3-4) teorik ve deneysel analizleri yapılmıştır.



Şekil 3. Karabulut Sitesi A Blok



Şekil 4. Karabulut Sitesi A Blok Normal kat mimari planı

5.1. Teorik Analizler

5.1.1. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Seçilen betonarme yapının analitik modeli SAP2000 sonlu eleman paket programı ile oluşturulmuştur. Sistemdeki kolonlar ve kirişler çubuk (frame) elemanlarla, perdeler kabuk (shell) elemanlarla modellenmiştir. Döşemeler rijit diyafram olarak kabul edilmiştir. Başlangıç analitik modelde beton sınıfı, proje beton sınıfı ile aynı olarak C20 alınmıştır. Duvarların yapı davranışını etkilediği düşünülerek, bu elemanların etkisi eşdeğer diyagonal basınç çubuklarıyla yapının sonlu eleman modelinde dikkate alınmıştır. Doğrusal titreşim analizinde yapının simetrisine uygun olarak bu eşdeğer diyagonal çubuklar yerleştirilmiştir (Şekil 5).

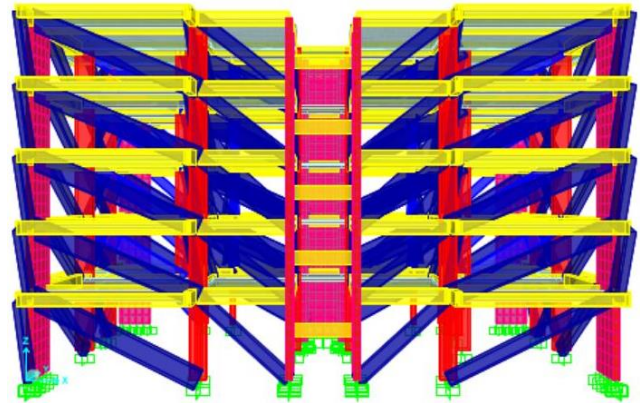
Eşdeğer diyagonal basınç çubuklarının modellenmesiyle ilgili pek çok çalışma yapılmıştır [19-24]. Bu çalışmada diyagonal basınç çubukları 2007 Deprem Yönetmeliğinin öngördüğü şekilde modellenmiştir. Söz konusu çubukların elastisite modülü 5000 MPa ve birim hacim ağırlığı $1,5 \times 10^{-5}$ MPa olarak kabul edilmiştir. Duvar kalınlığı projedeki haliyle dış ve iç duvarlar için sırasıyla 25 ile 15 cm alınmıştır. Çubuk genişliği 2007 Deprem Yönetmeliğinin [25] önerisi doğrultusunda

$$a_{\text{duvar}} = 0.175 (\lambda_{\text{duvar}} h_k)^{-0.4} r_{\text{duvar}} \quad (1)$$

denklemleri elde edilmiştir. Burada a_{duvar} çubuk genişliğini (mm), h_k kolon boyunu (mm), r_{duvar} dolgu duvar köşegen uzunluğunu (mm) temsil etmektedir. λ_{duvar} katsayısı ise

$$\lambda_{\text{duvar}} = \left[\frac{E_{\text{duvar}} t_{\text{duvar}} \sin 2\theta}{E_c I_c h_{\text{duvar}}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

eşitliği ile verilmektedir [25]. Burada E_{duvar} ve E_c dolgu duvar ve çerçeve betonu elastisite modüllerini, t_{duvar} ve h_{duvar} dolgu duvar kalınlığı ve yüksekliğini (mm), I_c kolon atalet momentini (mm⁴) ve θ ise ilgili köşegenin yatay ile yaptığı açığı göstermektedir.



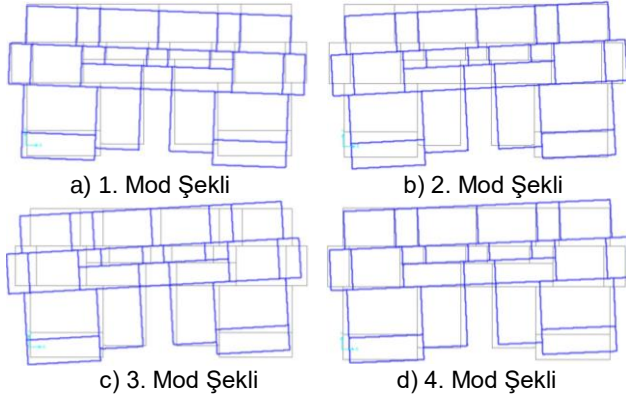
Şekil 5. Yapının sonlu eleman modeli

5.1.2. Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Başlangıç analitik modeli kullanılarak yapılan modal analizden elde edilen ilk dört frekans ve bu frekanslara ait mod şekilleri sırasıyla Tablo 3 ve Şekil 6'da sunulmuştur.

Tablo 3. Başlangıç analitik modele ait ilk dört frekans

Frekans Numarası	Frekans Değeri (Hz)
1	2,9
2	3,01
3	3,71
4	8,93



Şekil 6. Başlangıç analitik modeli kullanılarak elde edilen ilk dört mod şekli

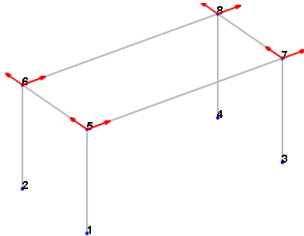
5.2. Deneysel Analizler

5.2.1. Deneysel Modelin Oluşturulması

Yapının deneysel ölçümlerinde OMA yöntemi uygulanmıştır. Ölçümler yapının sadece 4. katında yapılmıştır. Bu katta ölçüm yerleri döşeme üzerinde binanın dört köşesine yakın noktalar olarak seçilmiştir. Her bir noktaya “x” ve “y” yönlerinde olmak üzere iki ivmeölçer yerleştirilerek, toplamda 8 adet ivmeölçer kullanılarak referanssız ölçüm gerçekleştirilmiştir. KB12VD tipi ivmeölçerler çelik bir levhaya, levha da yapıya dübelleri yardımıyla tutturularak ölçümler yapılmıştır (Şekil 7). Referanssız ölçümdeki ivmeölçer düzeni Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 7. Levha yardımıyla yapıya tutturulan KB12VD tipi ivmeölçerler

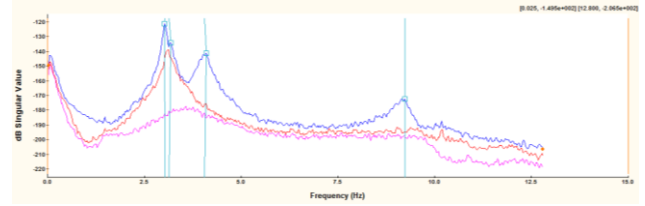


Şekil 8. Referanssız ölçümdeki ivmeölçer düzeni

5.2.2. Ölçümün Gerçekleştirilmesi

Yapının ön testleri (sonlu eleman modeli çözümleri ve yerinde geniş frekans aralığına bağlı ölçümler) yapıldıktan sonra, ölçüm frekans aralığı ve süresi vs. parametreleri belirlenmiştir. Ölçümlerden bulunan ham sinyaller işlenerek Modal Gösterge Fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu fonksiyon

yardımlarıyla frekanslar seçilmiş ve mod şekilleri elde edilmiştir (Şekil 9-10).



Şekil 9. Modal gösterge fonksiyonundan seçilen frekanslar



Analitik ve deneysel modların birbiri ile uygunluğu Modal Güvence Kriteri (MGK) olarak adlandırılan bir kriterle kontrol edilmektedir. Bu kriter [14],

$$MGK(\psi_a, \psi_d) = \frac{|\psi_a^T \psi_d|^2}{(\psi_a^T \psi_a)(\psi_d^T \psi_d)} \quad (3)$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır. Burada ψ_a analitik ve ψ_d deneysel mod şeklini ifade etmektedir. Analitik ve deneysel mod şekilleri birebir aynı ise MGK değeri 1 olmalı, farklı ise bu değer 1’den küçük olmalıdır.

Başlangıç analitik model çözümleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında (Tablo 4); frekans değerleri arasında büyük oranda yaklaşıklık olmasına rağmen, mod şekillerinin birbiriyle uyuşmadığı MGK değerlerinden görülmektedir. Bu sebeple başlangıç analitik modelin güncellenmesi gerekmektedir. Tablo 4’de frekansa bağlı deneysel sönüm oranları da verilmiştir.

Tablo 4. Başlangıç analitik model çözümleri ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Frekans Numarası	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)	Deneysel Sönüm Oranları (%)	Yaklaşıklık (%)	MGK (%)
1	2,9	3,03	1,42	95,710	36,740
2	3,01	3,13	2,41	96,166	11,740
3	3,71	4,05	3,10	91,605	77,740
4	8,93	9,22	2,52	96,855	71,360

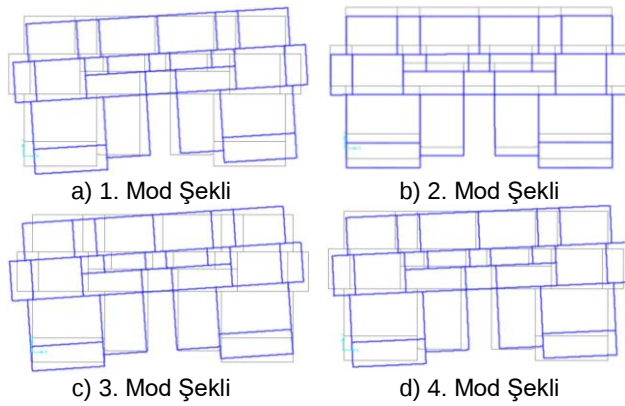
5.3. Analitik Modelin Güncelleştirilmesi

Bir önceki kısımda başlangıç analitik modele ait frekans değerlerinin deneysel sonuçlara yakın olmasına rağmen, mod şekillerinin farklı çıkması özellikle 1. ve 2. modların

çok farklı olması yapı başlangıç modelinin güncelleştirilme gerekliliğini ortaya koymuştur. Henüz kullanımda olmayan yapının kütlesi büyük ölçüde bellidir. Yapının rijitliğinde belirsizlik daha çok söz konusudur. Rijitliği etkileyen faktörler; beton sınıfı, eleman boyutları ve sınır şartları olarak sıralanabilir. Burada beton malzemesi sınıfının güncelleştirilmesi yapılmıştır.

Yapıdan imalat sırasında alınan küp numuneler üzerinde yapılan deneyler, dökülen beton sınıfının C25 olduğunu göstermiştir. Bu yüzden başlangıç analitik modeldeki beton malzeme özelliği C25 olarak değiştirilerek model güncellenmiştir.

Güncellenmiş analitik modelin modal analizi gerçekleştirilmiş, elde edilen ilk dört frekansa ait mod şekilleri Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Güncellenmiş analitik modeli kullanarak elde edilen ilk dört mod şekli

Güncellenmiş analitik model çözümleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında (Tablo 5); frekans değerleri başlangıç analitik model çözümlerine göre deneysel sonuçlara daha fazla yaklaşmıştır. Analitik ve deneysel mod şekillerinin birbiriyle uyduğu modların MGK değerlerinden açıkça görülmektedir.

Tablo 5. Güncellenmiş analitik model çözümleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması

Frekans Numarası	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)	Yaklaşıklık (%)	MGK (%)
1	2,95	3,03	97,360	94,339
2	3,05	3,13	97,444	96,498
3	3,76	4,05	92,840	93,405
4	9,07	9,22	98,373	91,130

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında betonarme bir yapının Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapının analitik modeli SAP2000 sonlu eleman paket programı ile oluşturulup, malzeme parametrelerinin belirlenmesinde proje verileri baz alınmıştır. Analitik modelin modal analizi yapılarak dinamik karakteristikler bulunmuş, ilk dört frekans 2,9-8,93Hz aralığında elde edilmiştir.

Deneysel ölçümler için OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü kullanılmıştır. İlk dört frekans 3,03-9,22Hz aralığında ve bu frekanslara ait sönüm oranları %1,42-3,10 aralığında bulunmuştur.

Başlangıç analitik model çözümleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında; frekans değerleri arasında büyük oranda yaklaşıklık olmasına rağmen, mod şekillerinin birbiriyle uyummadığı modların MGK değerlerinden görülmüştür.

Yapının kütlesi büyük ölçüde belli olduğundan, rijitliğinde belirsizlik daha çok söz konusudur. Rijitliği etkileyen faktörler; beton sınıfı, eleman boyutları ve sınır şartları olarak sıralanabilir. Yapıdan imalat sırasında alınan küp numunelerin deney sonuçlarına bağlı olarak, beton malzemesi sınıfının C25 olduğu görülerek beton sınıfı güncelleştirilmesi yapılmıştır. Güncellenmiş modelin modal analiz çözümlerinden ilk dört frekans 2,95-9,07Hz aralığında elde edilmiştir.

Güncellenmiş analitik model ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ilk dört frekansa ait değerler ile mod şekilleri arasında büyük bir uyum olduğu görülmüştür. Frekans değerleri arasındaki yaklaşıklık %92,840-98,373 arasında belirlenmiştir. Mod şekillerine ait MGK değerleri %91,130-96,498 arasında hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen OMA yöntemiyle çeşitli yapılarda olduğu gibi betonarme yapılarda da deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilebileceği ve gerçek yapıları en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modellerinin oluşturulabileceği uygulamalı olarak gösterilmiştir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Rainieri, C., and Fabbrocino, G., Operational modal analysis for the characterization of heritage structures, Geofizika, 28.1: 109-126, 2011.
- [2] Türker, T., Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
- [3] Şahin, A., Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD - ModalCAD – FemUP, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
- [4] Turan, F.N., Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.
- [5] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., ve Birinci F., Tarihi Yapıların Deprem Güvenliklerinin

- Tahribatsız Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, İMO İstanbul, cilt.98, ss.10-20, 2010.
- [6] Ventura, C., Brinker, R., Dascotte, E., and Anderson, P., FEM Updating of the Heritage Court Building Structure, Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference, pp. 324-330, Kissimmee, 2001.
- [7] Boru, E.O., ve Kutanis, M., Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi, SAÜ Fen Bil Dergisi, ISSN:1301-4048, Cilt. 19, pp. 59-66, 2015.
- [8] Cunha, A., Caetano, E., Brincker, R., and Andersen, P., Identification from the Natural Response of Vasco da Gama Bridge, Proc. 22nd Int. Modal Analysis Conference, Dearborn, USA, 2004.
- [9] Azenha, M., Magalhaes, F., Faria, R., and Cunha, A., Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration, Cement and Concrete Research, 40, pp. 1096-1105, 2010.
- [10] Soyoz, S., Taciroglu, E., Orakcal, K., Nigbor, R., Skolnik, D., Lus, H., and Safak, E., Ambient and Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building before and after Its Seismic Retrofitting, J. Struct. Eng. 139, SPECIAL ISSUE: Real-World Applications for Structural Identification and Health Monitoring Methodologies, 1741–1752, 2013.
- [11] Hashim, H., Ibrahim, Z., and Abdul Razak, H., Dynamic characteristics and model updating of damaged slab from ambient vibration measurements, Measurement, Volume 46, Issue 4, pp. 1371-1378, 2013.
- [12] Ramos, J.L.F., Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Dissertation, Minho University, Portugal, 2007.
- [13] Heerah, A.R.P., Field Investigation of Fundamental Frequency of Bridges Using Ambient Vibration Measurements, Master of Engineering, McGill University Montreal, Canada, 2009.
- [14] Ewins, D.J., Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [15] Mendes, P., Baptista, M.A., Agostinho, L., Lagomarsino, S., and Costav, J.P., Structural and dynamic analysis of N. Sra. do Carmo church, Proceedings EUROSDYN2005, Structural Dynamics, 311-318, Lagos Portugal, 2005.
- [16] URL-1, http://marmatek.com/urunler/oros_or36_analizor/. 17 Aralık 2015.
- [17] URL-2, http://marmatek.com/wp-content/uploads/2014/03/MMF_KB12-KB12VD-KS48C_Datasheet.pdf. 17 Aralık 2015.
- [18] URL-3, http://marmatek.com/urunler/mmf_kb12vd-sismik-ivme_sensoru/. 17 Aralık 2015.
- [19] Akyürek, O., Tekeli, H., ve Demir, F., Betonarme Bina Performansına Dolgu Duvarların Etkisi, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 11-15 Mayıs 2015.
- [20] Köse, M.M., ve Karşlıoğlu, Ö., Dolgu Duvarların Bina Doğal Modal Periyot Ve Mod Şekline Olan Etkileri, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim 2007.
- [21] Aldemir, A., Erberik, M.A., ve Sucuoğlu, H., Tuğla Yığma Duvarlar İçin Performansa Dayalı Bir Değerlendirme Yöntemi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.
- [22] Yakut, A., Binici, B., Demirel, O.İ., ve Özcebe, G., Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi, Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay, Türkiye, 25-27 Eylül 2013.
- [23] Beklen, C., Binalarda Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2009.
- [24] Öktem, O., Betonarme Çerçeve Sistemlerin Lineer Olmayan Hesabı Ve Dolgu Duvarların Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [25] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, 2007.