

SÜLEYMANİYE CAMİİ'NİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SÜLEYMANİYE MOSQUE BY ANALITICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Ahmet Selahiye¹, M. Nuray Aydınolu², Mustafa Erdik²,

SUMMARY

In the first stage of a research project on the identification of the structural configuration, earthquake response and performance of the historic Süleymaniye Mosque, natural frequencies and mode shapes of the structure are determined by both ambient vibration tests and finite element analysis. The same dynamic characteristics are further obtained by processing a small intensity earthquake data recorded in 1994 by nine strong motion accelerographs installed in the mosque. A satisfactory correlation is observed between experimental and analytical results.

ÖZET

Tarihi Süleymaniye Camii'nin yapısal sisteminin tanımlanması, deprem davranışı ve performansının belirlenmesine yönelik araştırma projesinin ilk adımı olarak, hem çevrel titreşim deneyleri ile ve hem de üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile yapının doğal titreşim frekansları ve modları elde edilmiştir. Aynı dinamik özellikler, camiye yerleştirilen dokuz adet kuvvetli yer hareketi kaydedicisi tarafından 1994 yılında kaydedilen küçük şiddetli bir depremin kayıtlarından yararlanılarak tekrar bulunmuştur. Deneysel ve analitik olarak elde edilen sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

GİRİŞ

Süleymaniye Camii, 1549 - 1557 yılları arasında, devrin büyük Türk mimar - mühendisi Mimar Sinan tarafından ünlü Osmanlı padişahı Kanuni Sultan Süleyman adına inşa edilmiştir. Osmanlı mimarisinin baş eserlerinden biri olarak kabul edilen Süleymaniye Camii, tarih boyunca depreme karşı dayanımı bakımından üstün bir performans göstermiş ve günümüze kadar pek çok şiddetli depremi herhangi önemli bir hasar görmeksizin başarı ile atlattır.

¹ Deprem Yük. Müh., Aslan Çimento, Beşiktaş, İstanbul

² Prof Dr., Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul

Osmanlı-Türk mühendisliğinin bu büyük eserinin dinamik davranışının belirlenmesi doğrultusunda yapılan çalışmaların çok sınırlı olduğunu (Arioğlu ve Anadol, 1973) ve bu alanda araştırmacıların Süleymaniye'ye hakettiği ilgiyi göstermediğini belirtmek gerekir. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nce önemli tarihsel eserler için Ayasofya projesi ile başlatılan araştırma etkinlikleri çerçevesinde, bu çalışmada Süleymaniye Camii'nin yapısal sisteminin tanımlanması, deprem davranışının ve performansının belirlenmesine yönelik ilk adım olarak, yapının dinamik karakteristiklerinin deneysel ve analitik olarak saptanması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, caminin taşıyıcı sisteminin tanımlanmasına ilişkin geometrik çalışmalardan sonra, doğal titreşim frekansları üç ayrı aşamada değişik yöntemlerle elde edilmiştir. Birinci aşamada "çevrel titreşim deneyleri"nden yararlanılmış, ikinci aşamada üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile yapının serbest titreşim analizi yapılmış, üçüncü aşamada ise 28 Mayıs 1994'te meydana gelen küçük şiddetli bir depremin kayıtları analiz edilmiştir. (Selahiye, 1994)

SÜLEYMANİYE CAMİİ'NİN YAPISAL SİSTEMİ

Çok amaçlı Süleymaniye Külliyesi'nin ana yapısı olan Süleymaniye Camii'nin planı dikdörtgen şeklinde olup kenar boyutları Kabe ekseni doğrultusunda 61 m, buna dik doğrultuda ise 73 m'dir (Bkz. Şekil 1,2). Cami, Kabe doğrultusunu tanımlayan kuzey-güney eksenine göre tam simetrik olup bu eksene dik doğu-batı eksenine göre de simetriğe yakındır. Caminin tam ortasındaki ana kubbenin çapı 26.2 m ve tabandan yüksekliği 49.5 m'dir.

Ana kubbe, plandaki izdüşümleri bir dikdörtgen oluşturan dört ana kemer aracılığı ile düşey yükleri dört adet fil ayağına aktarmaktadır. Kemerlerin ayaklara bağlantı noktalarının tabandan yüksekliği 32 m'dir.

Minber-giriş kapısı doğrultusunda, güney ve kuzey kemerlerinin dışında kalan hacım, iki adet yarım kubbe ile örtülmekte, yarım kubbeler de her iki yanlarından ikişer adet daha küçük boyutlu yarım kubbeler (exedra domes) tarafından mesnetlenmekte ve hep birlikte yüklerini dış duvara bağlı cephe ayaklarına aktarmaktadır. Bu yarım kubbelere ek olarak, mimber üzerinde daha da küçük boyutlu dekoratif bir yarım kubbe yer almaktadır. Bu yarım kubbeler sistemi, ana eksen doğrultusunda caminin derinliğini ve iç hacmini arttırdığı gibi, aynı zamanda ana kubbeyi taşıyan güney ve kuzey kemerlerine yatay doğrultuda mesnet oluşturma işlevini görmektedir.

Minber-giriş kapısı doğrultusuna dik doğrultudaki doğu ve batı kemerleri ise yatay doğrultuda mesnetlenmediklerinden, yatay rijitliklerini arttırmak amacı ile bu kemerlerin genişlikleri, kuzey ve güney kemerlerine göre daha büyük tutulmuş ve bu nedenle kemerler cephe dışına taşırılmışlardır. Bu genişlik artışının yarattığı mimari etki, dışta düzenlenen basamaklı form ile dengelenmiştir.

Doğu ve batıda, doğu ve batı kemerlerinin dışında kalan cami hacmü, üçer adet küçük çaplı kubbe ile örtülmüştür. Bu kubbeler, doğu-batı doğrultusunda düzenlenen küçük kemerlere oturmakta, bu kemerler içte tabandan yüksekliği 10 m olan dairesel mermer kolonlara, dışta ise cephe duvarının parçalarını oluşturan ayakçıklara mesnetlenmektedir.

Köşegen doğrultularda, fil ayaklarının dışında kalan hacımların örtülmesi için de yine küçük çaplı kubbeler kullanılmıştır. Bu kubbelerin içten mesnetlendiği kemerler, her iki

doğrultuda aynı zamanda fil ayaklarının alt seviyede yatay mesnetleri olarak kullanıldığından, çift kemer olarak düzenlenmişlerdir.

DOĞAL TİTREŞİM FREKANSLARININ ÇEVREL TİTREŞİM DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

Süleymaniye Camii'nde Ağustos 1993'te yapılan çevrel titreşim deneylerinin amacı, hassas sismometreler ile alınan çevrel titreşim kayıtlarından yararlanılarak, cami yapısal sisteminin temel dinamik karakteristiklerinden birini oluşturan doğal titreşim frekanslarının saptanmasıdır.

Çalışmada toplam sekiz sismometre (Kinematics SS-1 Ranger), iki sinyal koşullandırıcı (SC -1 Kinematics), bir analog-sayısal dönüştürücü (Metabyte DAS-16) ve bir diz-üstü bilgisayar kullanılmıştır.

Yerinde yapılan deneme kaydı ve kalibrasyon kayıtlarını takiben, deneylerde kullanılacak sekiz sismometrenin dördü kemerlerin fil ayaklarına mesnetlendiği noktalara, diğer dördü ise kemerlerin tepe noktalarına yerleştirilmiştir.(Bkz. Şekil 1.)

Yapı taşıyıcı sisteminin, mümkün olabilecek bütün temel titreşim modlarına karşı gelen doğal titreşim frekanslarının saptanması amaçlandığından, sismometrelerin doğrultuları bakımından, Şekil 2,3,4,5,6'da gösterilen beş ayrı deney düzeneği planlanmış ve uygulanmıştır.

Çevrel titreşim deneylerinde elde edilen titreşim kayıtlarından (tipik kayıt için bkz. Şekil 7) yararlanılarak yapının doğal titreşim frekanslarının saptanması için Spektral Analiz Yöntemleri kullanılmıştır. Doğal titreşim frekanslarının elde edilmesi için kullanılan bu çalışmada başlıca spektral fonksiyonlar, Spektral Güç Yoğunluğu Fonksiyonu, Çapraz Korelasyon (Cross-Correlation) Fonksiyonu ve Uyuşum (Coherence) Fonksiyonu'dur. (Bendat & Piersol, 1980). Bu fonksiyonların, yukarıda tanımlanan deney düzeneklerinde elde edilen kayıtlar için uygun şekilde hesaplanması ile yapının çeşitli titreşim modlarına karşı gelen doğal titreşim frekansları elde edilmiştir. Örnek olarak, ikinci titreşim modunu tanımlayan spektral güç yoğunluğu fonksiyonlarının grafik olarak değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen doğal titreşim frekansları aşağıda özetlenmiştir:

| | |
|---|-------------------|
| 1. Titreşim Modu (kuzey-güney doğrultusunda yatay öteleme modu) | : $f_1 = 3.38$ Hz |
| 2. Titreşim Modu (doğu-batı doğrultusunda yatay öteleme modu) | : $f_2 = 3.44$ Hz |
| 3. Titreşim Modu (burulma modu) | : $f_3 = 4.26$ Hz |
| 4. Titreşim Modu (köşegen doğrultularda açılma-kapanma modu) | : $f_4 = 4.71$ Hz |
| 5. Titreşim Modu (doğu-batı ve kuzey-güney doğrultularında açılma-kapanma modu) | : $f_5 = 5.85$ Hz |
| 6. Düşey titreşim modu | : $f_D = 9.60$ Hz |

DOĞAL TİTREŞİM MOD VE FREKANSLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

Süleymaniye Camii'nin doğal titreşim frekanslarının analitik olarak hesaplanabilmesi için, caminin taşıyıcı sistemi tümü ile üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak idealleştirilmiş ve serbest titreşim (özdeğer) analizi yapılarak doğal titreşim modları ile

bunlara karşı gelen doğal titreşim frekansları sayısal olarak elde edilmiştir. Üç boyutlu sistem idealleştirilmesinde ve serbest titreşim analizinin yapılmasında LUSAS (FEA, 1994) adlı bilgisayar yazılımından yararlanılmıştır. Süleymaniye Camii'nin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli üç boyutlu "solid" ve kabuk (shell) sonlu elemanlarından oluşmaktadır. Toplam sonlu eleman sayısı 2625'tir.

Yapılan serbest titreşim (özdeğer) analizi sonucunda elde edilen yanal ötelenme ve burulma modlarına ait grafik sonuçlar ile bunlara karşı gelen doğal titreşim frekansları Şekil 9,10,11'de verilmiştir. Hesaplanan frekanslar, düşey titreşim modu hariç aşağıda özetlenmiştir:

- | | |
|---|-------------------|
| 1. Titreşim Modu (kuzey-güney doğrultusunda yatay öteleme modu) | : $f_1 = 3.26$ Hz |
| 2. Titreşim Modu (doğu-batı doğrultusunda yatay öteleme modu) | : $f_2 = 3.65$ Hz |
| 3. Titreşim Modu (burulma modu) | : $f_3 = 4.58$ Hz |
| 4. Titreşim Modu (köşegen doğrultularda açılma-kapanma modu) | : $f_4 = 5.21$ Hz |
| 5. Titreşim Modu (doğu-batı ve kuzey-güney doğrultularında açılma-kapanma modu) | : $f_5 = 5.35$ Hz |

Bu frekansların, çevrel titreşim deneylerinden bulunan frekanslara çok yakın olduğu görülmektedir. Aradaki küçük farkların, bu denli büyük ve karmaşık bir taşıyıcı sistem ve bu sisteme ait sonlu elemanlar modelinin karmaşıklığı gözönüne alındığında, kabul edilebilir mertebede olduğu söylenebilir.

DOĞAL TİTREŞİM FREKANSLARININ GERÇEK DEPREM KAYITLARINDAN YARARLANILARAK BELİRLENİLMESİ

Süleymaniye Camii'nin gerçek depremler altında performansının sürekli olarak gözlenmesi ve izlenmesi amacı ile, 1994 yılı başında camiye dokuz adet kuvvetli yer hareketi kaydedicisi yerleştirilmiştir. İki yatay ve düşey olmak üzere üç deprem bileşeni için aynı anda kayıt alabilen kaydedicilerin biri cami dışında bahçe zeminine, diğer sekiz kaydedicinin dördü fil ayaklarının tepelerine ve diğer dördü ise ana kemerlerin tepe noktalarına konulmuştur (Bkz. Şekil 12).

İstanbul'da 28 Mayıs 1994 tarihinde meydana gelen çok düşük şiddetli deprem, bu cihazların caminin içine yerleştirilen sekizi tarafından kaydedilmiş, ancak bahçe zeminine yerleştirilen cihaz, tetiklenemediği için kayıt alamamıştır. Örnek olarak güney kemerinin tepesine konulan cihazın kuzey-güney doğrultusunda kaydettiği deprem kaydı Şekil 13'te verilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde, Süleymaniye Camii'nin doğal titreşim frekansları bu kez de kaydedilmiş gerçek deprem kayıtlarından yararlanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak çok düşük sinyal/gürültü oranları nedeni ile ilk üç doğal titreşim modu (iki yatay öteleme modu ve burulma modu) ile düşey titreşim moduna ait frekanslar elde edilebilmiştir. Spektral analiz sonucunda (örnek olarak birinci titreşim modu için bkz. Şekil 14) doğal titreşim frekansları aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

- | | |
|---|-------------------|
| 1. Titreşim Modu (kuzey-güney doğrultusunda yatay öteleme modu) | : $f_1 = 3.38$ Hz |
| 2. Titreşim Modu (doğu-batı doğrultusunda yatay öteleme modu) | : $f_2 = 3.42$ Hz |
| 3. Titreşim Modu (burulma modu) | : $f_3 = 4.30$ Hz |
| 4. Düşey titreşim modu | : $f_0 = 9.60$ Hz |

Görüldüğü gibi, elde edilen doğal titreşim frekansları, bazı küçük farklar dışında, çevrel titreşim deneylerinden elde edilen frekanslarla aynıdır. Bu sonuç, gerek yapılan çevrel titreşim deneylerinin ve gerekse uygulanan analiz yönteminin sağlığı hakkında iyi bir fikir vermektedir.

SONUÇLAR

Süleymaniye Camii'nin yapısal sisteminin tanımlanması, deprem davranışı ve performansının belirlenmesine yönelik ilk adım olarak, yapının temel dinamik karakteristikleri olan doğal titreşim frekansları, hem deneysel hem de analitik olarak elde edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında doğal frekanslar, camide yapılan çevrel titreşim deneylerinden elde edilen kayıtların işlenmesi sonucunda bulunmuştur. İkinci aşamada ise, Süleymaniye Camii'nin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kurulmuş ve bu model üzerinde yapılan serbest titreşim analizleri ile doğal titreşim modları ve bu modlara karşı gelen doğal titreşim frekansları analitik olarak hesaplanmıştır. İki seri sonuç arasındaki farklar kabul edilebilir mertebede olmuştur.

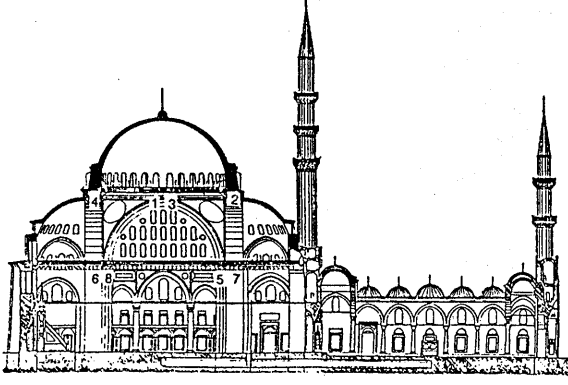
Nihayet, Süleymaniye Camii'ne 1994 yılı başlarında yerleştirilmiş bulunan dokuz adet kuvvetli yer hareketi kaydedicisi ile 28 Mayıs 1992'de meydana gelen küçük şiddetli bir depremin üç bileşeni de kaydedilmiş ve bu deprem kayıtlarından yararlanılarak hesaplanan doğal titreşim frekansları ile, daha önce gerek deneysel ve gerekse analitik olarak elde edilmiş bulunan frekans değerleri bir kez daha doğrulanmıştır.

TEŞEKKÜR

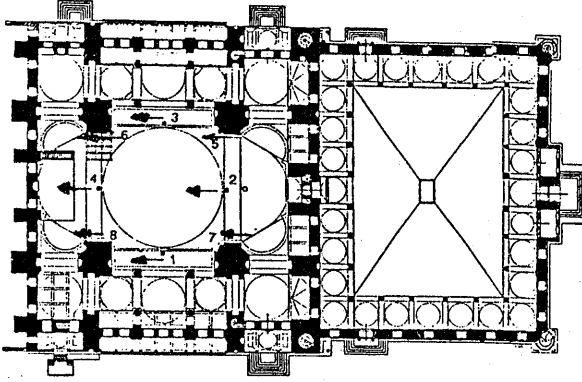
Bu çalışma, Devlet Planlama Teşkilatı tarafından desteklenen "Süleymaniye Camii'nin Yapısal Sisteminin Tanımlanması, Deprem Davranışı ve Performansının Belirlenmesi" başlıklı araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen İstanbul Vakıflar Bölge Müdürlüğü'ne ve cami görevlilerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

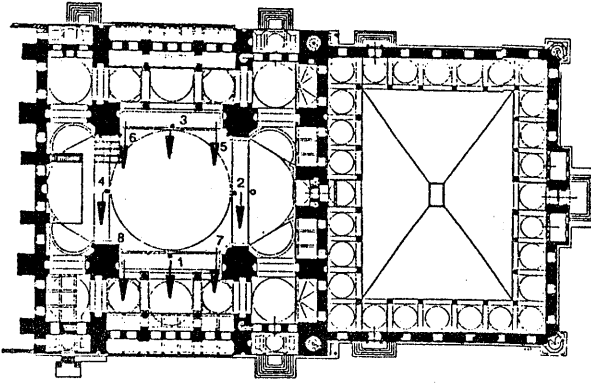
1. Arioğlu, E. ve K. Anadol (1973), "On the Earthquake Resistance of the Süleymaniye Mosque (İstanbul) in the Historical Perspective. (1557-1973)", Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Roma, 1973. Paper no 289, Session 6C
2. Bendat J.S. and A.G. Piersol (1980), "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons.
3. FEA Ltd. (1994), "LUSAS Finite Element System" User Manual, Version 11.
4. Selahiye, A. (1994), "A Study on the Identification of Natural Vibration Frequencies of the Süleymaniye Mosque", Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı.



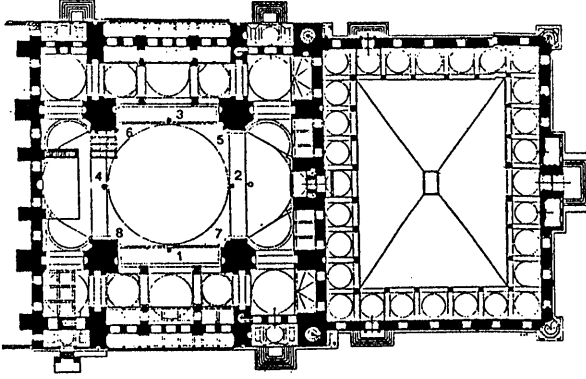
Şekil 1. Çevrel titreşim deneylerinde sismometrelerin konumları



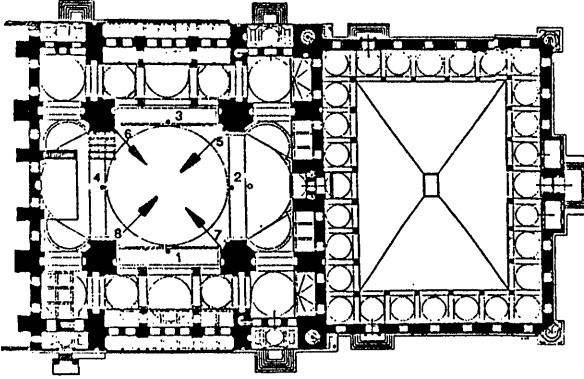
Şekil 2. Çevrel titreşim deney düzeneği 1: Sismometre konumları ve yönleri



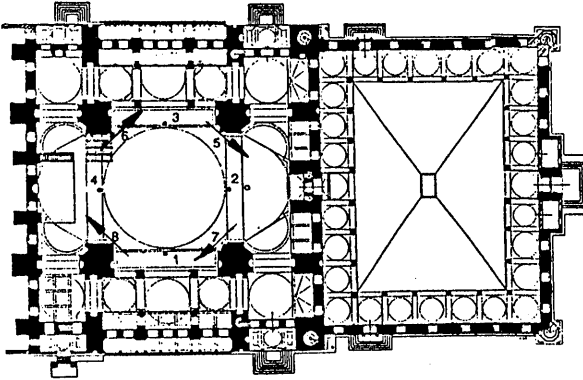
Şekil 3. Çevrel titreşim deney düzeneği 2: Sismometre konumları ve yönleri



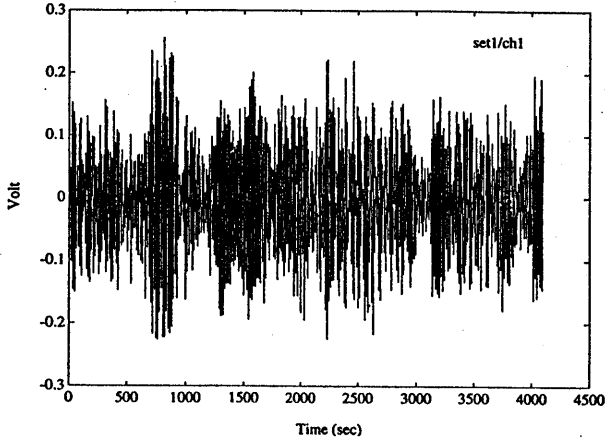
Şekil 4. Çevrel titreşim deney düzeneği 3: Sismometre konumları ve yönleri



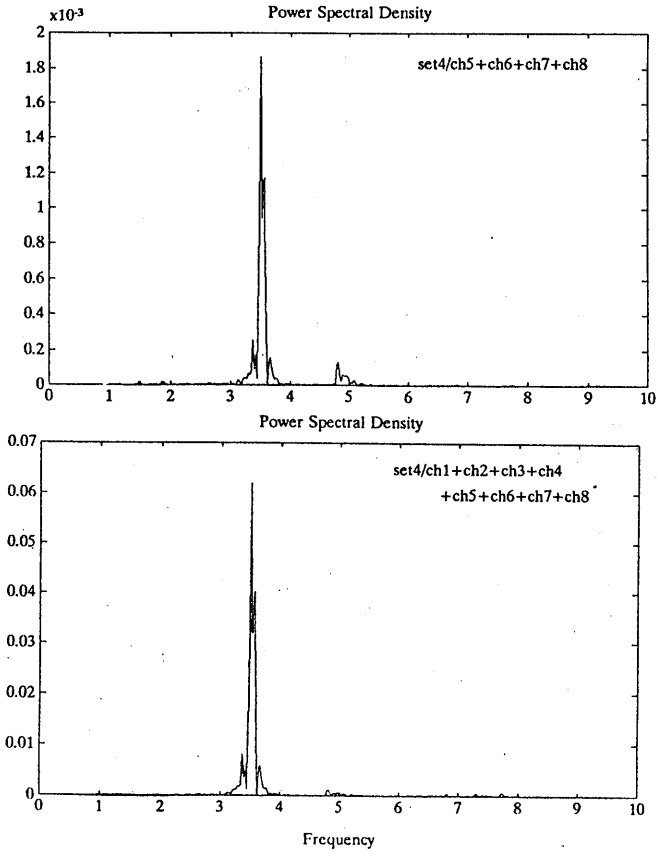
Şekil 5. Çevrel titreşim deney düzeneği 4: Sismometre konumları ve yönleri



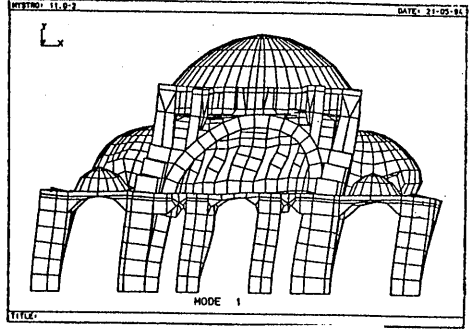
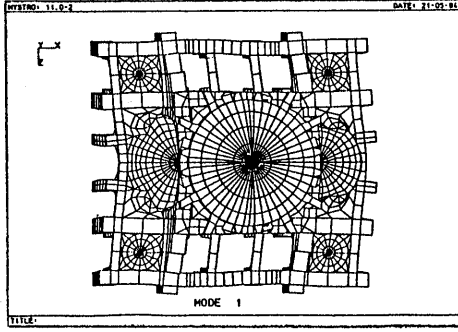
Şekil 6. Çevrel titreşim deney düzeneği 5: Sismometre konumları ve yönleri



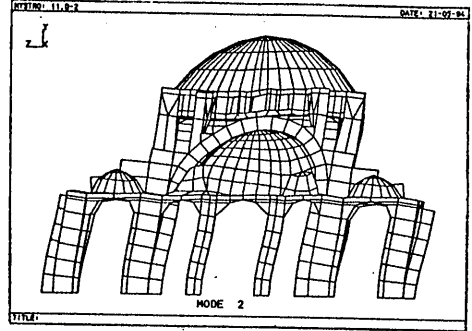
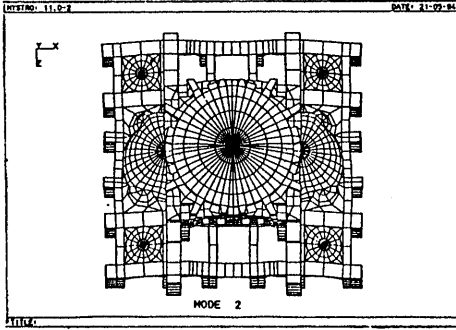
Şekil 7. Çevrel titreşim deneylerinde elde edilen tipik ham kayıt



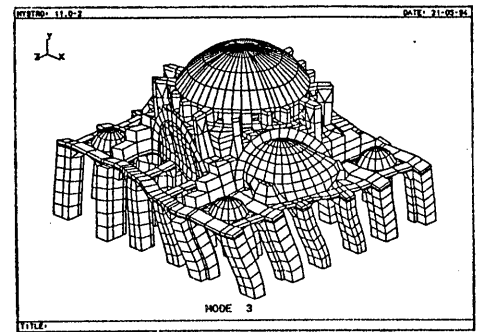
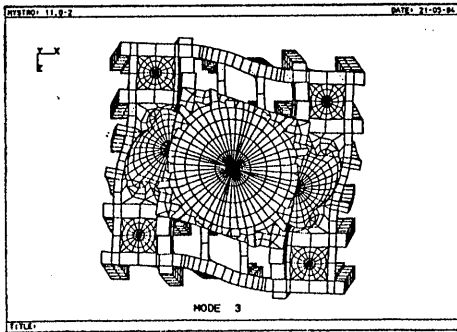
Şekil 8. İkinci titreşim modu için spektral güç yoğunluk fonksiyonu



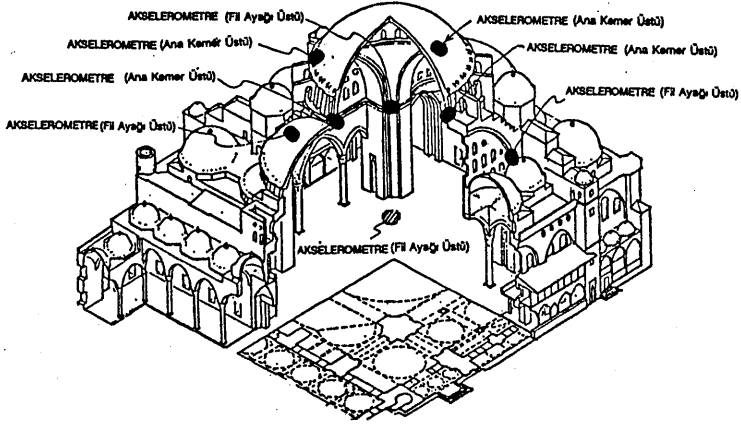
Şekil 9. Özdeğer analizi, 1. mod şekli (3.26 Hz), kuzey-güney doğrultusunda yukarıdan ve yandan görünüş



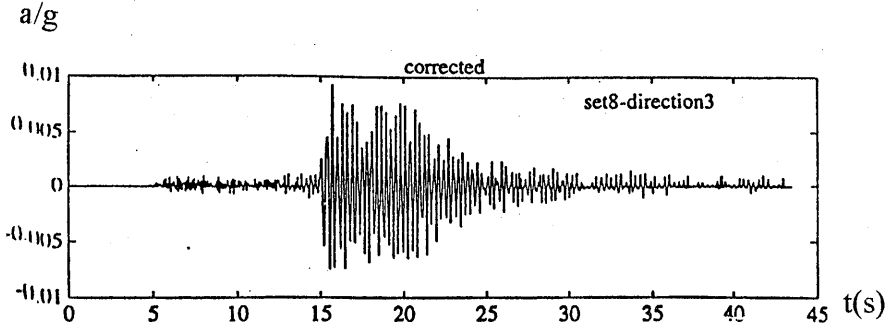
Şekil 10. Özdeğer analizi, 2. mod şekli (3.65 Hz), doğu-batı doğrultusunda yukarıdan ve yandan Görünüş



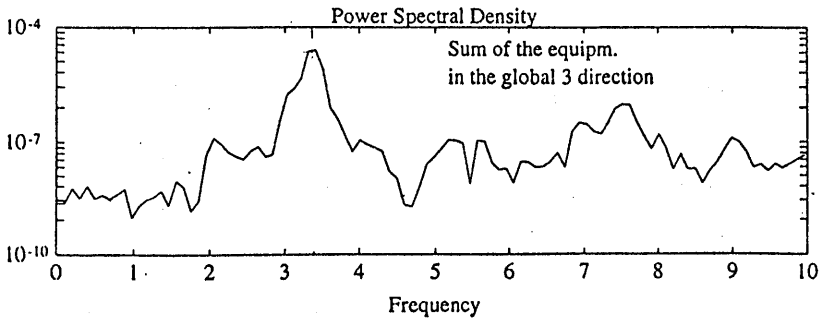
Şekil 11. Özdeğer analizi, 3. mod şekli (4.58 Hz), burulma modu yukarıdan ve perspektif Görünüş



Şekil 12. Süleymaniye Camii'ne yerleştirilen kuvvetli yer hareketi kaydedicileri



Şekil 13. Güney kemeri tepesinde 28 Mayıs 1994 tarihinde kaydedilen depremin kuzey-güney bileşenine ait kayıt.



Şekil 14. 28 Mayıs 1994 tarihli kaydın 1. titreşim modu için spektral güç yoğunluk fonksiyonu.