

AYASOFYA'NIN DEPREM DAVRANIŞI

EARTHQUAKE RESPONSE OF AYA SOFYA

Mustafa Erdik,¹ Eser Durukal²

SUMMARY

To study the response of Ayasofya a numerical model for dynamic analysis is created and calibrated to give similar mode shapes and frequencies as obtained from ambient vibration surveys. The records from the accelerometer network installed, obtained from the March 22, 1992 Karacabey earthquake, are used to evaluate the actual dynamic behavior of Ayasofya. The accelerations recorded at the ground level and a simulated earthquake are applied as input to the numerical model and the response is investigated. The empirical and analytical results are compared to identify the structural system and to create a realistic numerical model.

ÖZET

Aya Sofya'nın deprem yükleri altındaki davranışını incelemek üzere dinamik analiz amaçlı olarak yapının sonlu eleman modeli yaratılmış ve model, yapıda gerçekleştirilen çevrel titreşim deneyleri sonuçları çerçevesinde kalibre edilmiştir. 22 Mart 1992 Karacabey depremi Aya Sofya'daki akselerometre şebekesi tarafından kaydedilmiştir. Bu kayıtlar Aya Sofya'nın gerçek dinamik davranışını belirlemede önemli ipuçları vermişlerdir. Zemin seviyesinde alınan ivme kaydı ve benzeşimi yapılan diğer bir deprem hareketi modele uygulanarak yapının deprem davranışı araştırılmıştır. Aya Sofya'nın yapısal sistemini tanımlamak ve gelecekteki deprem güvenilirliği çalışmaları için gerçekçi bir model yaratmak amacıyla, binanın analitik ve ampirik davranışı ile ilgili veriler karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Yaklaşık 15 yüzyıldır ayakta duran ve yapılışından itibaren 8 yüzyıl süre ile dünyanın en büyük kubbeli mekanı olan Ayasofya Müzesi, tarihinde birçok depreme maruz kalmış, ana kubbesi bir defa tamamen, iki defa kısmen yeniden inşa edilmiş ve taşıyıcı yapısı çeşitli dönemlerde tamir ve takviye görmüştür. Yapıda bugün malzeme özelliklerinden, inşaat hızından (70 ay) ve geçmiş depremlerin etkilerinden kaynaklanmış izleri ve büyük deformasyonları görmek mümkündür.

1 Prof.Dr., B.Ü.,Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

2 Araş.Gör.,B.Ü.,Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Boğaziçi ve Princeton Üniversiteleri tarafından Kültür Bakanlığı ve ABD Milli Bilim Vakfı'nın desteği ile yürütülmekte olan proje kapsamında Ayasofya Müze binasının yapısal sistemi, dinamik özellikleri ve deprem performansı incelenmekte ve bu performansı arttırıcı tedbirler belirlenmektedir.

Ayasofya'da ana taşıyıcı elemanlar esas itibariyle 4 ana ayak, 4 ikincil ayak, 4 ana kemer, ana kubbe ve 2 yarı-kubbeden oluşmaktadır. Yapıda ikincil taşıyıcı sistemi istinat kuleleri, doğu ve batıdaki yarı-kubbelerin iki yanında yer alan 4 eksedre kubbesi ve bunları destekleyen kolonlar, doğu tarafındaki mihrab kubbesi ve kolonları, ve kuzey ve güney ana-kemerlerinin altındaki tempan duvarlarla bunları tutan kolonlar oluşturmaktadır (Şekil 1). Yapı malzemeleri taş, tuğla ve harçtır. Ana, ikincil ve destek ayaklar, kemerlerin başlangıç seviyesine kadar taş bloklardan oluşmaktadır. Tüm kemerler ve kubbeler tuğla ve harçtan inşa edilmiştir.

YAPININ STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Ayasofya'nın bu çalışmada temel alınan nümerik modeli SAP90 [4] yapısal analiz programına dayalı olarak hazırlanmıştır. Ayasofya sonlu eleman modeli 363 çerçeve elemanı, 720 kabuk elemanı ve 2826 katı cisim elemanından yararlanılarak yapılmıştır. Tanımlanan 5000'e yakın düğüm noktası yaklaşık 17000 serbestlik dereceli bir sistem yaratmıştır (Şekil 2). Model, özellikle temel derinliği ve sınır şartlarının ayarlanması ile istenilen dinamik özellikleri (çevrel titreşim deney sonuçları) verecek şekilde kalibre edilmiştir [2].

Yapının zati ağırlığı altındaki doğrusal analizi yapıda gözlenen deformasyonlara karakter olarak uygun sonuçlar vermekle birlikte, mertebe olarak milimetre seviyesinde kalmaktadır (Şekil 3). Bu durum analizin lineer niteliğinden kaynaklanmakta olup, yapıdaki uzun vadeli lineer olmayan etkenlerce oluşturulan büyük deformasyonları yansıtmaması doğaldır. Doğru ve batı yarım kubbeleri doğu ve batı ana kemerlerinin üzerine yüklenmekte, ana kubbe ise kuzey ve güney ana kemerlerini dışarıya doğru itmektedir. Bu durum daha önce bir çok araştırmacı tarafından ileri sürülen, ana kubbenin yarattığı radyal kuvvetlerin doğu ve batı yarım kubbeleri tarafından taşındığı iddialarını çürütmektedir. Yapıda, zati ağırlık altında oluşan gerilmeler genelde önemli değildir. Ana kubbenin pandantifler istikametindeki kesitlerinde 40 kPa büyüklüğünde çekme gerilmeleri mevcuttur. Bu durum ana kubbe tabanının farklı yanal rijitliklerdeki ana kemerlerin üzerine oturmasından kaynaklanmaktadır. Benzer çekme gerilmeleri doğu ve batı yarım kubbelerinde de görülmektedir.

Geliştirilmiş sonlu eleman modeline uygulanan özdeğer analizi neticesinde elde edilen yapı titreşim modları ile ilgili bilgiler ilk dört mod için Tablo 1'de ve Şekil 4'de sunulmuştur. Görülebileceği gibi burada sunulan teorik sonuçlar, çevrel titreşim deneylerinden elde edilen deneysel sonuçlarla uyum içindedir.

TABLO 1
ÖZDEĞER ANALİZİ SONUÇLARI

- 1.Mod (1.90Hz) Doğu-Batı doğrultusunda yanal titreşim.
- 2.Mod (2.30Hz) Kuzey-Güney doğrultusunda yanal titreşim.
- 3.Mod (2.40Hz) Burulmalı titreşim.
- 4.Mod (3.58Hz) Çapraz sıkışma ve uzama içeren titreşim.

Erdik ve diğerleri [1] tarafından Ayasofya'nın yaklaşık 20km güneyinde meydana gelecek aletsel büyüklüğü $M_s=7$ olan bir deprem tanımlanmıştır. Ortalama her 100 yılda bir meydana gelme ihtimali bulunan bu depremin Ayasofya'da yaratacağı pik ivme 0.40g olarak belirlenmiştir. Bu tasarım depremine dayalı olarak yapılan analizler zati ağırlık analizi sonuçları ile birleştirilmiş, yapının kritik konumlarındaki gerilmeler hesaplanmış ve emniyetleri tahkik edilmiştir. Ayasofya'nın inşaatında kullanılan malzemenin emniyet ve taşıma gücü gerilmeleri harç tarafından kontrol edilmektedir. Bu gerilmelerin nokta bazında hassas olarak ölçülmeleri için kritik konumlardan çeşitli örnekler alınmış olup incelenmektedir. Doğrudan çekme ve basınç gerilmesine maruz kesitlerdeki tahkikler için: Çekme emniyet gerilmesi=150 kPa; Basınç emniyet gerilmesi=750 kPa; Eğilmeden kaynaklanan çekme ve basınç gerilmesine maruz kesitlerdeki tahkikler için ise: Çekme emniyet gerilmesi=300 kPa; ve Basınç emniyet gerilmesi=750 kPa olarak alınabilir [1]. Bu gerilmelerle ilgili taşıma gücü değerleri emniyet gerilmelerinin 2 (iki) katı olarak kabul edilebilir. Deprem etkisi altında yukarıda incelediğimiz elemanlardaki çekme gerilmeleri, belirlenen taşıma gücü gerilmelerini; ana kemerlerin üst konumlarında ve doğu ve batı yarım kubbelerinin ana kemerlere bakan kesimlerinde aşmaktadır. Bu durumda ana kemerlerin üst kesitleri ve doğu ve batı yarım kubbelerinin ana kemerlere bakan kesimleri yapıda deprem açısından en kritik konumlar olarak ortaya çıkmaktadır.

ÇEVREL TİTREŞİM DENEYLERİ

Ayasofya'nın taşıyıcı yapısını tanımlamak ve deprem davranışını belirlemek amacıyla 15 seri dinamik ölçüm deneyi gerçekleştirilmiş ve çevrel unsurlardan kaynaklanan titreşimler kayıt edilerek incelenmiştir. Çevrel titreşim deneyleri ile yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi deprem mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Deneylerde 4 adet sismometre, 1 adet 4 kanallı sinyal denetleyicisine bağlı olarak kullanılmış; denetleyiciden elde edilen analog sinyaller ise bir portatif bilgisayar içerisine yerleştirilmiş analog-dijital çevirici kullanılarak sayısallaştırılmış ve veriler manyetik ortama doğrudan kaydedilmiştir. Deneyle ilgili detaylı bilgi [1] ve [2] nolu referanslarda

sunulmuştur. Çevrel titreşim deneyleri sonucunda elde edilen ve deprem mühendisliği açısından önemli ilk dört titreşim modu ile ilgili bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur.

TABLO 2
ÇEVREL TİTREŞİM DENEYLERİNDEN ELDE EDİLEN
MODAL TİTREŞİM FREKANS VE ŞEKİLLERİ

- 1.Mod (1.85 Hz) Doğu-Batı doğrultusunda yanal titreşim.
- 2.Mod (2.10 Hz) Kuzey-Güney doğrultusunda yanal titreşim.
- 3.Mod (2.35 Hz) Doğu-Batı doğrultusunda yanal-burulmalı titreşim.
- 4.Mod (2.50 Hz) Kuzey-Güney doğrultusunda yanal-burulmalı titreşim.

AYASOFYA'DA ELDE EDİLEN KUVVETLİ YER HAREKETİ KAYITLARI, DEĞERLENDİRME VE TRANSFER FONKSİYONLARI

Deprem analizinde kullanılan analitik yaklaşımların irdelenmesi ve yapıda bir deprem sırasında meydana gelecek gerçek zorlanmaların tespiti amacı ile yapıya 1991 yılı Ağustos ayında bir akselerometre (ivme-ölçer) şebekesi yerleştirilmiştir. Bu şebekede yer alan 9 adet üç-bileşenli ivme ölçer biriminin konumları, numaraları ve akselerometre bileşenlerinin yönleri Şekil 1'de verilmiştir. 1. istasyon Ayasofya'nın zemin döşemesinde, 2, 3, 4 ve 5. istasyonlar birinci korniş seviyesinde, 6, 7, 8, ve 9. istasyonlar da ana kubbe eteğindeki balkon seviyesinde yer almaktadır.

22 Mart 1992 tarihinde yerel saatle 18:52'de Karacabey'de meydana gelen deprem Ayasofya Müzesine yerleştirilmiş bulunan akselerometreler tarafından kaydedilmiştir. Kandilli Rasathanesi depremin aletsel büyüklüğünü $ML=4.8$, derinliğini 17.5km ve merkez koordinatlarını $40^{\circ}.12$ -kuzey ve $28^{\circ}.21$ -doğu olarak vermiştir. Depremi merkezi Ayasofya'nın yaklaşık 100km güneyindedir. Şekil 5'da örnek olarak 4. istasyondaki düzeltilmiş ivme, hız ve deplasman kayıtları sunulmuştur.

Alınan deprem kayıtları yapının genellikle Y-yönünde, X-yönünden daha hareketli olduğunu göstermektedir. Birinci korniş seviyesindeki ana kemer mesnetlerinin birleşim noktaları deprem sırasında eş fazlı olarak fakat değişik genliklerle hareket etmektedirler. Güney ve batı ana kemer mesnetlerinin birleşim noktasında bulunan 4. istasyondaki Y-yönündeki deprem hareketi aynı seviyedeki diğer istasyonların (2, 3, ve 5) aynı yöndeki hareketinin yaklaşık iki katıdır. Bu istasyonun (4.) X-yönündeki hareketi de, Y-yönündeki kadar olmamakla beraber, aynı seviyedeki diğer istasyonların hareketlerinden fazladır. 4. istasyondaki bu anomalinin: (1) Yapının güney-batısındaki payandaların yapısal durumu; (2) Güney-batı ayağındaki mikro-çatlamaların varlığı; (3) Bu istasyonun üzerinde bulunduğu korniş konsol taşlarındaki oynamalar ve/veya (4) güney-batı ayağı ve temelini diğerlerinden daha değişik

olması durumu ile ilgili olabileceği düşünülebilir. Bir diğer etken de güney-batı ayağı temeline etkiyen deprem hareketinin diğer ayaklara etkiyen hareketten farklı olma ihtimalidir.

Ana kubbe eteği balkonunda ana kemerlerin tepe noktaları üzerinde yer alan istasyonlarda (6, 7, 8, 9) elde edilmiş olan kayıtlar zaman ve frekans tanım alanı özellikleri açısından birbirlerine çok benzemektedir. Bu durum yapının bu seviyesinde rijit cisim hareketine benzer bir davranışın meydana geldiğini göstermektedir. Güney ve batı ana kemerlerinin tepe noktalarında bulunan istasyonlarda gözlenen bir miktar daha büyük genlikli hareketler, daha önce bahsedilmiş olan istasyon 4'deki hareket düzeyinin daha yukarıdaki komşu istasyonlara yansımaları olarak açıklanabilir.

Yapının dinamik davranışının daha iyi anlaşılması için her bir istasyondaki hareketle Ayasofya zemin istasyonu (1) hareketi arasındaki transfer fonksiyonlarının yatay yönler için elde edilmesi gerekir. Birinci korniş ve ana kubbe eteği arasındaki transfer fonksiyonları da bu iki seviye arasındaki dinamik davranışları belirleyecektir. Bu fonksiyonlar girdi hareketin etkilerini elimine ederek sadece yapının zati dinamik davranışı hakkında çok değerli bilgiler sağlamaktadır. Kayıtların spektral analizi neticesinde elde edilen sonuçların transfer fonksiyonları ile birlikte değerlendirilmesinden Tablo 3'de verilmiş olan modal titreşim özellikleri elde edilebilir.

TABLO 3
TRANSFER FONKSİYONLARINDAN ELDE EDİLEN
MODAL TİTREŞİM FREKANS VE ŞEKİLLERİ

- 1.Mod (1.62 Hz) Doğu-Batı doğrultusunda yanal titreşim.
- 2.Mod (1.85 Hz) Kuzey-Güney doğrultusunda yanal titreşim.
- 3.Mod (2.05 Hz) Doğu-Batı yanal titreşimi (Kubbe seviyesinde büyük genlikler)
- 4.Mod (2.35 Hz) Burulmalı Titreşim.
- 5.Mod (3.05 Hz) Bağlantılı Kuzey-Güney yanal-burulmalı titreşim.

Daha önce gerçekleştirilmiş olan çevrel titreşim deneylerinde ilk iki modal titreşim frekansı sırasıyla 1.85 ve 2.10 Hz olarak tayin edilmiş bulunmaktadır. Deprem verileri ve ilgili transfer fonksiyonlarından elde edilen ilk iki mod titreşim değerleri ise 1.62 Hz ve 1.85 Hz olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum deprem sırasında, çevrel titreşim seviyesine kıyasla, modal titreşim frekanslarının yaklaşık %12, yapı rijitliklerinin ise yaklaşık %23 oranında azaldığını göstermektedir. Deprem mühendisliği bu tip olayların kuvvetli depremler sırasında olabileceğini belgelemiş olmakla beraber, Ayasofya'da kaydedilmiş olan deprem gibi zayıf depremlerde bu durumun ortaya çıkması enteresandır. Bu, büyük bir ihtimalle, ayaklarda kullanılan harç malzemesindeki bozulmadan ve/veya mikro-çatlamlardan kaynaklanmaktadır. Bu olayın böyle küçük bir depremde gözlenmiş olması yapıdaki malzemenin

doğrusal davranmama özelliğinin analizlerde mutlaka göz önüne alınması gereğini vurgulamaktadır. İlk iki modal titreşim frekansındaki bu değişikliğin yapıda kalıcı olup olmadığının anlaşılması için yeni bir seri çevrel titreşim ölçümlerinin alınmasında fayda mülâhaza edilmektedir.

DEPREM DAVRANIŞININ ANALİZİ

Ayasofya zemin düşmesinde kuzey-batı ayağının yanında alınmış olan deprem kaydı (1. istasyon) geliştirilmiş bulunan sonlu eleman modelinde girdi deprem hareketi olarak kullanılarak yapının bu depreme göstereceği davranış teorik olarak hesaplanabilir. Bulunacak teorik sonuçlarla elde edilmiş bulunan deprem kayıtlarının karşılaştırılması ile kullanılan sonlu eleman modelinin ve analitik yöntemin doğruluğu direkt olarak sınanabilir. Şekil 6'da sonlu eleman modelinde 4. istasyonu temsil eden düğüm noktasında yukarda açıklanan analiz sonucu elde edilen ivme ve deplasman eğrileri verilmiştir. Şekil 5'da sunulmuş olan gerçek deprem kayıtları ile yukarıdaki şekilde sunulan analitik hareketler karşılaştırıldığında ivme ve deplasmanlar için zaman tanım alanındaki özelliklerin birbirine çok benzediği görülebilir. Bu bulgu, kullanılan sonlu eleman modelini ve analitik hesap yöntemini doğrulamaktadır. Gerek model ve gerekse gerçek yapı Y-yönünde daha büyük genlikli davranış göstermektedir. Sonlu eleman modelindeki simetri ve ayak temellerine uygulanan senkronize deprem hareketi verilen bir seviyede aynı yönde farklı hareketlerin oluşmasına müsaade etmemektedir. Gerçek yapıdaki kısmi asimetrisi ise aynı seviyede kaydedilen deprem hareketleri arasında aynı yönde bir miktar farklılaşmaya yol açmaktadır. Keza kullanılan sonlu eleman modelinde payandaların ihmal edilmiş olması, 4. istasyonda görülen hareket farklılaşmasının analitik sonuçlara yansımaları engellemiştir. Genelde, kullanılan modeldeki X-yönündeki rijitliğin, gerçek yapı rijitliğinin biraz altında olduğu gözlenmektedir. Ancak bu fark sonuçları etkileyebilecek mahiyette değildir.

SONUÇ

Sonlu eleman modelinin lineer analizi sayesinde Ayasofya'nın genel yapısal özellikleri ve yapısal elemanları arasındaki etkileşim belirlenmiştir. Lineer deformasyonlar, beklendiği gibi, gerçek yapıda ölçülenlerden önemli oranda azdır. Lineer olmayan analizler gerçek deformasyonları, bunların hangi oranda yapının statik davranışından kaynaklandığını ve ne ölçüde geçmiş depremlerden etkilendiğini ortaya çıkaracaktır. Modelin dinamik analizinin çevrel titreşim deneyleri ve deprem kayıtları sonuçlarıyla uyum içinde olması nümerik model çalışmalarının bu tip araştırmalarda önemli bir yeri olduğunu kanıtlamaktadır.

Çevrel titreşim deneyleri ve deprem verilerinin analizi, yapının küçük bir

depremde dahi lineer olmayan tepkiler verdiğini göstermiştir. Her iki analiz de yapıda ilk modlarda yatay hareketlerin hakim olduğunu, burulmalı hareketlerinse daha yüksek modlarda görüldüğünü ortaya çıkarmıştır. Deprem esnasında yapı genelindeki mikro-çatlamalar verilerde modal frekanslarda azalma şeklinde kendini göstermiştir. Bunun yapının dinamik parametrelerinde kalıcı değişikliklere yol açıp açmadığı yapılacak ikinci bir seri çevrel titreşim deneyi sonucunda anlaşılabilir.

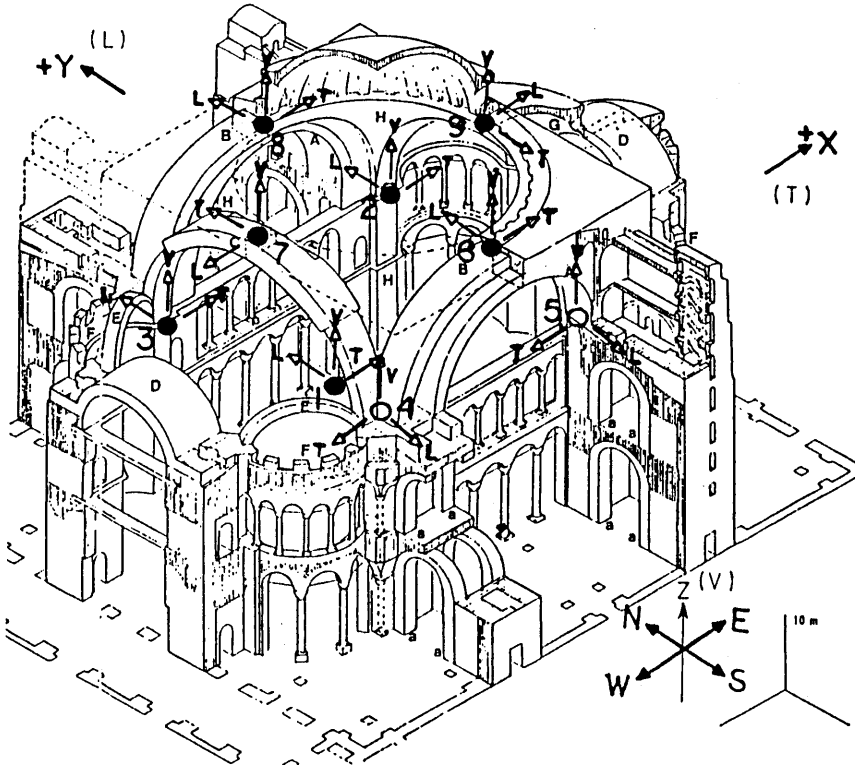
Yapılan zati ağırlık ve deprem yükü analizleri sonucunda ana kemerlerin üst kesitleri ve doğu ve batı yarım kubbelerinin ana kemerlere bakan kesimleri yapıda deprem açısından en kritik konumlar ortaya çıkmaktadır. Ana kemerlerin üst konumlarında ve doğu ve batı yarım kubbelerinin ana kemerlere bakan kesimlerindeki gerilmeler belirlenen taşıma gücü gerilmelerini aşmaktadır. Bu durumda, D2 depremi etkisinde doğu ve batı yarım kubbelerinin ana kemerlerden ayrılarak göçmesi ve doğu ve batı ana kemerlerle ana kubbenin bu kemerlerle temasta olan konumlarında önemli hasarların meydana gelmesi beklenebilir.

Yapının zati ağırlığı altında anakubbenin pendentifler istikametindeki kesitlerinde çekme gerilmeleri mevcuttur. Bu durum anakubbe tabanının farklı yanal rijitliklerdeki ana kemerlerin üzerine oturmasından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar bu gerilmeler küçük ise de konumları kubbenin daha önce tamir gören ek yerlerine rastlamakta ve oluşabilecek kılcal çatlaklar vasıtasıyla su sızması ihtimallerini arttırmaktadır.

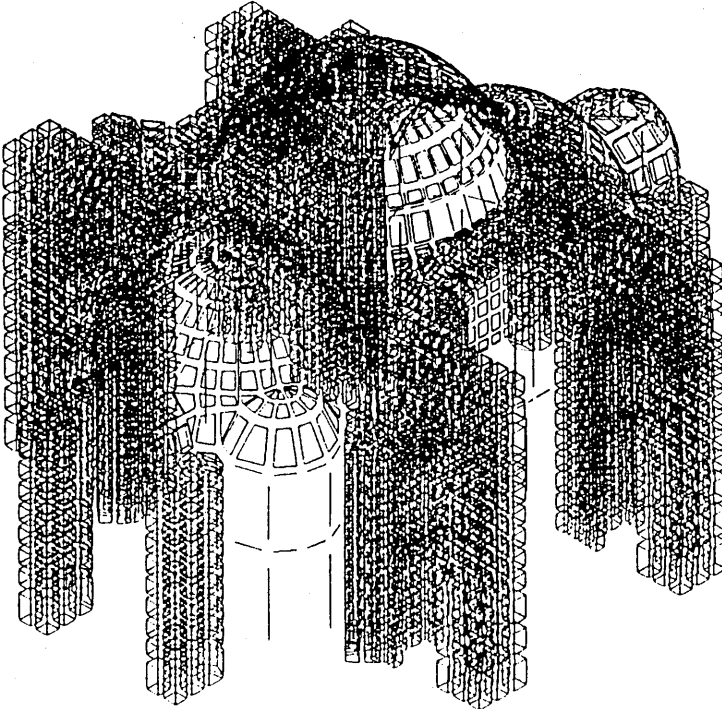
Güney batı ayağındaki yüksek genlikli hareketler ise daha güçlü bir depremde batı ana kemerinin zarar görmesine neden olabilir.

KAYNAKLAR

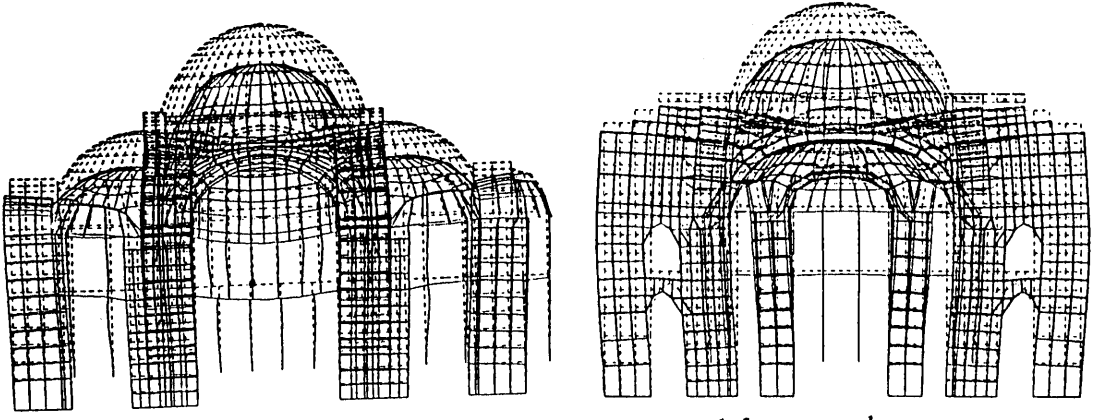
- 1.Erdik ve diğerleri (1991), İstanbul Ayasofya Müzesi Yapısal Sisteminin Belirlenmesi ve Deprem Güvenliğinin Sağlanmasına Yönelik Tedbirlerin Tesbiti- Üçüncü Aşama Raporu, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- 2.Durukal, E. (1992), Ayasofya'nın Yapısal Tanımlaması ve Sismik Güvenliğinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul (İngilizce).
- 3.Kato, S., Hidaka, K. ve Aoki, T. (1986), "Tarihi Kargir Yapılarda Analitik Çalışmalar Floransa'daki Santa Maria del Fiore'nin Kubbesi", Kabuklar, Membranlar ve Uzay Kafesleri,Bildiriler, IASS Symposium, Osaka, Vol.1, Ed. Heki K., Elsevier.
- 4.Wilson, E.L. ve Habibullah, A. (1989), SAP90-Yapıların Statik ve Dinamik Sonlu Eleman Analizi İçin Bir Seri Bilgisayar Programı, Kullanıcı Kılavuzu, Computers & Structures Inc., Berkeley, revised ed. (İngilizce).



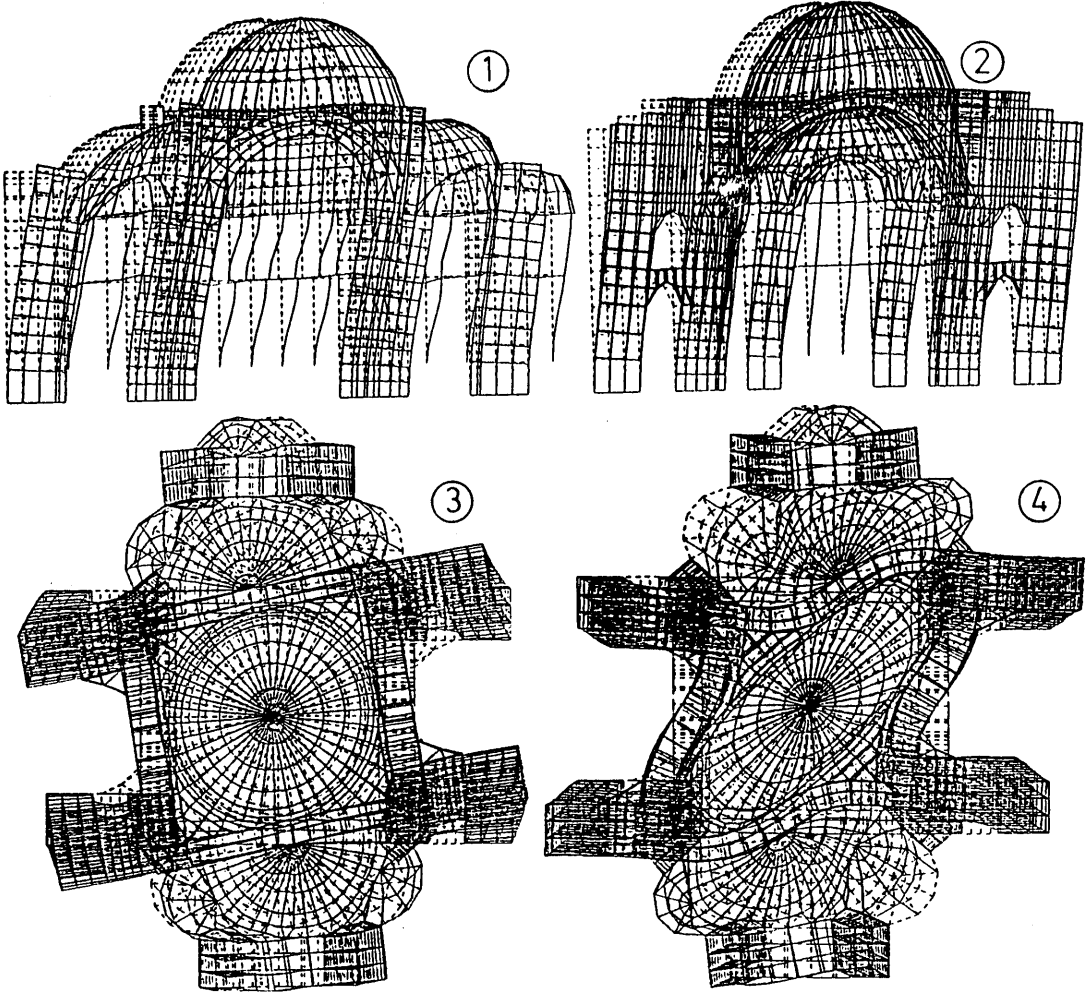
Şekil 1. AyaSofya'nın izometrik görünümü ve akselerometre şebekesinin konumu.



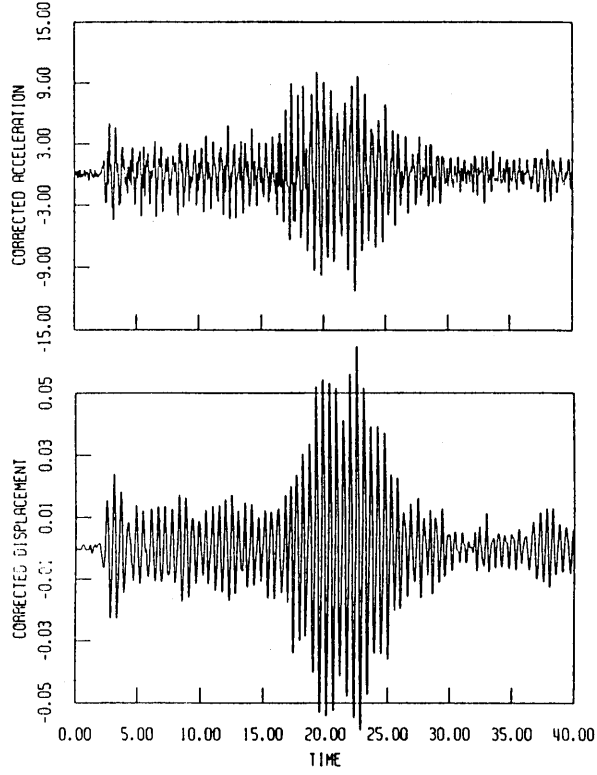
Şekil 2. Ayasofya'nın sonlu eleman modeli.



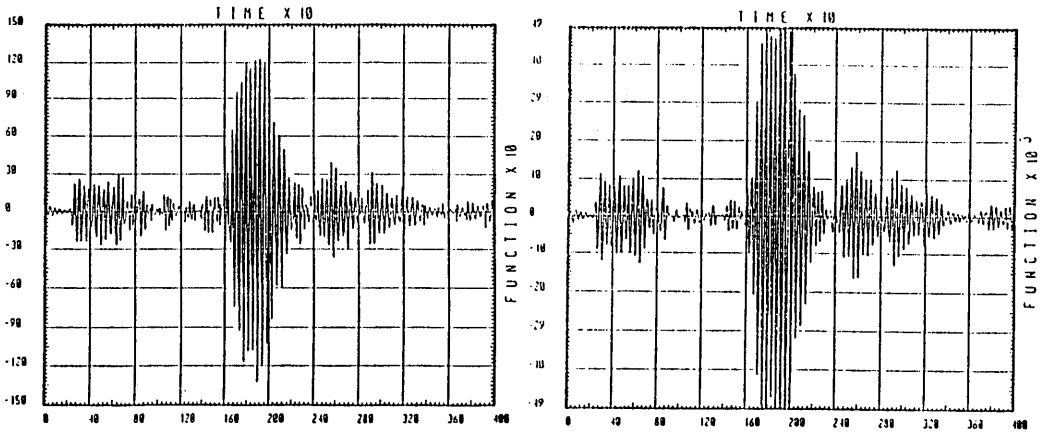
Şekil 3. Ayasofya'da zati ağırlık altında oluşan deformasyonlar.



Şekil 4. Ayasofya'nın ilk dört doğal titreşim mod şekilleri.



Şekil 5. Ayasofya Akselerometre Şebekesi 4.istasyonuna ait düzeltilmiş ivme ve deplasman kayıtları.



Şekil 6. Sonlu eleman modelinde 4. istasyonu temsil eden düğüm noktasında elde edilen analitik ivme ve deplasmanlar.