

Tarihi Yapı Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yöntem Önerisi: Lala Paşa Camii Örneği

İrfan KOCAMAN¹

Dilek OKUYUCU²

İlker KAZAZ³

ÖZ

Sismik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden birisi olan Anadolu yarımadası pek çok medeniyetin izlerini taşıyan tarihi yığma yapılara ev sahipliği yapmaktadır. Mimari kültür mirasımızın depremlerin yıkıcı etkilerinden korunabilmesi için bu yapıların dinamik davranışları gerçekçi yaklaşımlarla belirlenmelidir. Yığma yapılarda malzeme mekanik özelliklerinin tespitindeki zorluk ve belirsizlikler bilgisayar ortamında kurgulanan yapısal modelleri her zaman sorgulanır kılmaktadır. Bu çalışmada Erzurum il merkezinde yer alan Lala Mustafa Paşa Camii'nin taşıyıcı eleman malzeme özelliklerini belirlemek için literatürde mevcut yığma malzeme modelleri incelenerek teorik bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak teorik modal analizi, Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle de deneysel modal analizi gerçekleştirilmiştir. Teorik ve deneysel olarak belirlenen modal parametreler irdelenerek yapının malzeme özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonlu eleman modelinde, 1992 Erzincan Depremi ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde yapının göçme mekanizması araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Malzeme özellikleri, tarihi yığma cami, operasyonel modal analizi, sonlu eleman modeli, dinamik karakteristik, Lala Mustafa Paşa Camii.

ABSTRACT

Determination of Material Properties of Historical Masonry Structures with Dynamic Parameters: Lala Pasha Mosque Example

Being one of the most active seismic zones of the earth; Anatolian peninsula hosts historic masonry structures which carry traces of numbers of civilizations. Dynamic behavior of these

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30.10.2017 günü ulaşmıştır. 16.05.2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.347739>

1 Erzurum Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum - irfan.kocaman@erzurum.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1774-7114>

2 Erzurum Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum - okuyucu@erzurum.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-7694-9405>

3 Erzurum Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum - ilkerkazaz@erzurum.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-3885-1885>

structures should be estimated with realistic approaches in order to protect our architectural historic heritage from destructive effects of earthquakes. Difficulties and uncertainties in determination of mechanical properties of masonry structures make their computer models questionable. In this study, a theoretical approach is presented for determination of material properties for structural elements of Lala Mustafa Pasha Mosque located in Erzurum. Theoretical modal analysis was realized over finite element model of the structure; experimental modal analysis was realized by operational modal analysis method. Material properties of the structure were finally defined by evaluating theoretical and experimental modal parameters. Collapse mechanism of the structure was investigated by realizing dynamic analysis of finite element model using 1992 Erzincan earthquake acceleration records.

Keywords: Material properties, historical masonry mosque, operational modal analysis, finite element model, dynamic characteristics, Lala Mustafa Pasha Mosque.

1. GİRİŞ

Tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması modern toplumların en önemli sorumluluklarından birisidir. Kültürel mirasımızın önemli unsurları olan bu yapılar aynı zamanda turizme de ciddi katkılar sunmaktadır. Tarihi yapıların deprem, trafik, rüzgâr vb. gibi dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesi önemli bir husustur. Yapıda oluşmuş veya oluşabilecek hasarların tespiti, koruyucu ya da onarıcı önemlerin alınması gerekmektedir.

Tarihi yapıların yapısal davranışlarının belirlenmesi için birçok araştırmacı farklı yapılar üzerinde deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Durukal vd. [1] çalışmalarında İstanbul'da bulunan en önemli iki tarihi yapıdan Ayasofya ve Sultanahmet Camii'lerinin 1999 Kocaeli ve Düzce deprem kayıtlarını kullanarak dinamik davranışlarını belirlenmişlerdir. Gentile ve Saisi, [2] tarihi Monza Katedrali'nin 74m uzunluğunda 1.4m kalınlığında duvarlara sahip çan kulesinin çevresel titreşim testi ile hasar durumunu irdelemişlerdir. Bayraktar vd. [3] tarihi yığma minarelerin deneysel ve teorik modal analizlerini gerçekleştirmiş; deneysel modal analiz sonrası malzeme özelliklerini kalibre ederek deneysel ve teorik modal parametrelerini karşılaştırmaya çalışmışlardır. Bayraktar vd. [4] çalışmalarında tarihi Trabzon Ayasofya Camii'nin minaresi üzerinde deneysel titreşim testi ile çalışmalar yaparak minarenin dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Ramos vd. [5] çalışmalarında tarihi Mogadouro saat kulesinin ve Jeronimos Manastır Kilisesi' nin modal analizlerini deneysel ve teorik olarak gerçekleştirmişleridir. Her iki yapının da sonlu eleman modellerini oluşturarak deneysel modal analiz sonuçlarına göre sonlu eleman modelini kalibre etmişlerdir. Yapıların hasar durumlarını ve yapılacak müdahaleleri belirlemek için deneysel modal analiz ve sonlu eleman modeli yöntemlerinin beraber işlediği durumlarda oldukça doğru sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Şeker [6] doktora tezinde Mimar Sinan Camii'nin statik ve dinamik yükler altında davranışlarını teorik olarak irdelemiştir. Mimar Sinan strüktürü yapıların benzer özellikler gösterdiğini öne sürmüştür. Mustafaraj ve Yardım [7] çalışmalarında tarihi Naziresha Camisi'ni ele almışlardır. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak deprem analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapıda var olan çatlaklar ile deprem analizi sonucunda oluşabilecek hasar karşılaştırılarak, yapıdaki çatlaklara neden olan etkenler irdelemiştir. Şeker vd. [8] tarihi Kara Mustafa Paşa

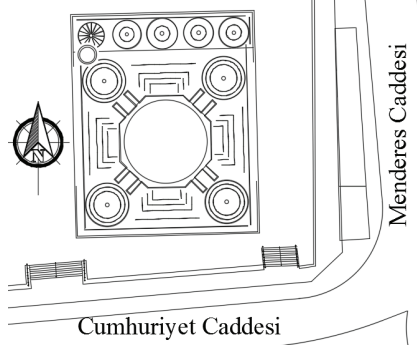
Camisi'nin sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Model üzerinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirerek, yapının deprem davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Köseoğlu ve Canbay [9] çalışmalarında tarihi Cenabı Ahmet Paşa Camisi'ni ele almışlardır. Yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve çevresel yükler altında yapının davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapıda oluşan çatlakların sebepleri belirlenmiş ve onarım önerileri sunulmuştur. Boru ve Kutanis [10] çalışmalarında mevcut bir betonarme binanın dinamik parametreleri teorik ve deneysel modal analiz yöntemleri ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmışlardır. Sonlu eleman modelini güncelleyerek yapı rijitliğindeki değişimlerle deneysel ve teorik modal parametreleri yakınsamışlardır. Operasyonel Modal Analiz yönteminin, yapıların modal parametrelerinin belirlenmesi için oldukça etkin bir yol olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalık vd. [11] çalışmalarında tarihi Dürbinar Camisi'nin restorasyon öncesi ve sonrası durumlarında deneysel modal analizini gerçekleştirmişlerdir. 18. yüzyılda inşa edilen caminin mod şekilleri ve malzeme özellikleri deneysel modal analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Çakır vd. [12] çalışmalarında yığma kemerleri ele almışlardır. Modelleri, mekanik özelliklerini deneysel olarak belirlenen tuğla ve Horasan harcından oluşturmuşlardır. Laboratuvar ortamında modelledikleri yığma kemerleri farklı kompoze malzemelerle güçlendirerek deneysel modal analiz yöntemiyle mod şekilleri ve modal frekanslar gibi dinamik karakteristikleri belirlemişlerdir. Güçlendirme öncesi ve sonrası modal özelliklerdeki değişikliği belirleyerek, sonlu eleman modelleri ile teorik çözümler yapmışlardır. Deneysel ve teorik modal analiz değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu göstermişlerdir. Çalışmada yığma kemerlerin modal parametrelerinin belirlenmesinde deneysel modal analiz yöntemi ile teorik modal analiz yönteminin birbiri ile etkin şekilde çalıştığını göstermişlerdir. Torres vd. [13] çalışmaların Şili'de bulunan Santiago Metropol Katedrali'nin deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarını irdelenmişlerdir. Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenen deneysel modal frekansları referans olarak malzeme özelliklerini değiştirmek suretiyle yapının sonlu eleman modelinin kalibrasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Yapılan çoğu çalışmada ele alınan tarihi yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve deneysel modal analiz sonuçları kullanılarak sonlu eleman modelleri kalibre edilmiştir. Ancak deneysel modal analiz uygulaması hem testlerin yapılma aşamasında oluşabilecek hatalar hem de deney düzeneğinin tedarik sorunları sebebiyle her bir yapı için gerçekleştirilmesi oldukça zahmetli ve pahalı bir işlem olabilmektedir. Deneysel modal analiz çalışması esasen tarihi yığma yapıların malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ve analitik modele uygulanmasındaki hataların giderilmesi adına yapılmaktadır.

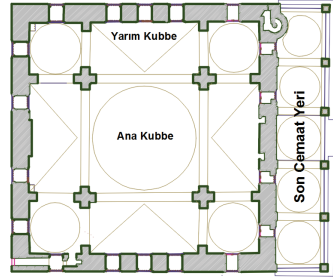
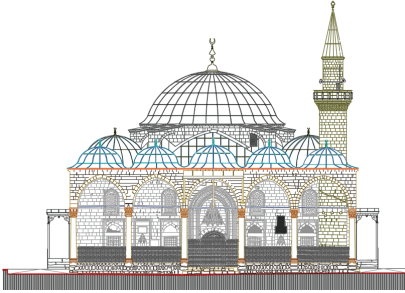
Bu çalışmada tarihi Erzurum Lala Paşa Cami ele alınmıştır. Çalışma kapsamında literatür ışığında, hasarsız deneyler de kullanılarak yapının her bir yapı elemanı için malzeme özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen malzeme özellikleri ile yapının teorik modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonrasında yapının dinamik karakteristikleri deneysel olarak Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle de belirlenerek teorik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde malzeme özelliklerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin doğruluğu ve kullanılabilirliği irdelenmiştir. Yapının gerçek davranışını yansıttığı kabul edilen sonlu eleman modeli ile 1992 Erzincan depremi yer hareketleri kullanılarak iki yönlü deprem analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının Erzincan gibi şiddetli bir deprem anında göçme mekanizması irdelenmiştir.

2. ERZURUM LALA PAŞA CAMİ

Lala Paşa Cami Erzurum şehir merkezinde Cumhuriyet Caddesi'nde bulunmaktadır. Batısında Yakutiye Medresesi, doğu ve güneyinde şehrin önemli trafik yollarından ikisi bulunmaktadır (Şekil 1). Yapı Erzurum'da inşa edilmiş ilk Osmanlı eseridir ve günümüzde Vakıflar Erzurum Bölge Müdürlüğü'nün sorumluluğundadır. 16. yüzyılda Erzurum valisi Lala Mustafa Paşa tarafından, Gürcistan ve Kıbrıs fatihi olarak da bilinir, yaptırılmıştır. Mimar Sinan caminin mimarı/mühendisidir [14]. Cami başlangıçta külliye, saray, hamam, şadırvan ve mektep olarak inşa edilmiştir. Ancak zamanla saray, şadırvan ve mektep yok olmuş sadece Lala Paşa Camisi ve hamamı günümüze ulaşabilmiştir [15].



Şekil 1 - Erzurum Lala Paşa Cami ve vaziyet planı



Şekil 2 - Lala Paşa Cami Kuzey cephe görünüşü ve -0.90m kotunda planı [17]

Lala Paşa Cami, Mimar Sinan eserlerinden olan İstanbul Şehzade Cami, Gebze Çoban Mustafa Paşa Cami, Payas Sokullu Sarı Selim Cami gibi kare planlı ve merkez kubbeli camiler grubuna girmektedir. Caminin orta kısmında yer alan dört adet sekizgen taş kolon üzerinde ana kubbe bulunmaktadır. Bu ana kubbe dört yandan yarım kubbeler ve payandalarla desteklenmiştir [16]. Ana kubbe 13m çapında, 17.45m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları (son cemaat yeri hariç) 26m x 26m'dir. Son cemaat yeri ise 26m x 5m'dir. Son cemaat yeri 6 kolon ve 5 küçük kubbeyle

meydana gelmektedir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 180cm'dir. Dört taraftaki duvarlar, çatı seviyesine kadar yükselmiştir. Caminin, doğu ve batı yüzeylerinde 4 aşağıda ve 5 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde aşağıda ve yukarıda 4'er pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise aşağıda ve yukarıda 4 pencere boşluğu ve aşağıda 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer tam ve yarım kubbeleri taşımaktadır. Caminin minaresi ise camiye birleşik şekilde güney-batı kısmına konumlandırılmıştır. Yapıda kullanılan taşların aynı formasyonda olduğu gözlemlenmiştir. Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre yapı, taşıyıcı elemanlarda malzeme değişikliği yapılan bir restorasyon geçirmemiştir. Ancak yapının üst pencere kenarlarından çatı kısmına doğru giden hat boyunca taşların, duvarın diğer kısımlarındaki taşlar farklı renkte olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum yapının kayıt dışı bir müdahaleye maruz kaldığını göstermektedir. Şekil 2'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1. Taşın, Harcın ve Moloz Dolgunun Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça karmaşık olabilmektedir. Yapının yıllar boyunca farklı çevresel etkilere maruz kalması, malzemenin tabii özelliğinin farklı görünmesi, aynı ocaktan çıkmasına rağmen farklı numunelerin farklı dayanımlar göstermesi, rüzgar ya da güneşin hakim olduğu cephede mekanik yüklere maruz kalması, tarihi yapılarla malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorluğuna birkaç örnektir.

Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre eser üzerinde malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu yapıların öneminden dolayı tahribatlı yöntemlerle malzeme özelliklerinin belirlenmesi çok fazla tercih edilmemektedir. Bu sebeple taş ve harç dayanımı, literatür taraması ve hasarsız yöntemler yardımıyla belirlenmiştir.

Horasan harcı üzerinde önceki çalışmalarda yapılan deneylerden basınç dayanımının 5.5MPa, birim hacim ağırlığının $17,6\text{kN/m}^3$ olduğu kabul edilmiştir [19]. Çekme dayanımı ise basınç dayanımının yaklaşık %5'i mertebesinde (0.3MPa) belirlenmiştir. Caminin duvarlarında kullanılan dolgu malzemesinin basınç dayanımı ise literatür çalışmaları yardımıyla belirlenmiştir. Osmanlı dönemi eserlerinden olan İstanbul Fatih Camisi dolgu malzemesinin basınç dayanımları 3.3, 3.1 ve 2.6MPa (ortalama 3.0MPa) olarak bulunmuştur [20]. Belirtilen çalışmalar ve sonuçlardan yola çıkarak, bu çalışmada, Erzurum Lala Paşa Camisi'nin kesme taş dayanımı (f_b) 25.6 MPa, moloz dolgu dayanımı (f_r) 3.0MPa, harç dayanımı (f_m) 5.5MPa olarak kabul edilmiştir.

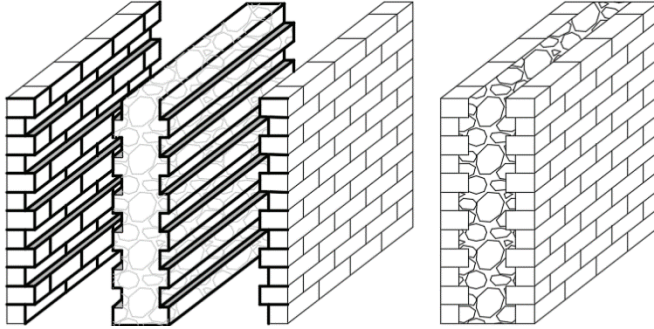
Mimar Sinan strüktüründe kullanılan taş genellikle traverten veya kumtaşından oluşur. Taş malzeme için birim basınç dayanımı 35MPa, birim hacim ağırlığı 26.5kN/m^3 'tür [18]. Lala Paşa Camii'nin taş dayanımını belirlemek için hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt sertlik çekici kullanılarak ortalama bir sertlik değeri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 1'de verilmiştir. Sertlik ölçümü sonucunda kesme taş kısmında dayanım 25.6MPa olarak belirlenmiştir. Tabloda f_b , taşın basınç dayanımını temsil etmektedir.

Tablo 1 - Lala Paşa Camisi Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonuçları

Schmidt Sertlik Deneyi Sonuçları					
Geri Vurma Değeri	f_b (N/mm ²)	Geri Vurma Değeri	f_b (N/mm ²)	Geri Vurma Değeri	f_b (N/mm ²)
34	29	26	18	31	26
34	29	29	24	27	18
27	18	29	24	29	24
31	26	33	28	39	42
28	24	26	18	33	28
37	18	44	51	34	29
30	26	31	26	31	26
34	29	26	18	Ortalama: 25.6 ± 7.76 MPa	

3.2. Duvarların Basınç Dayanımlarının ve Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi

Osmanlı döneminde Mimar Sinan'ın yapmış olduğu eserlere bakıldığında, eserler arasında birçok benzerlik görülebilmektedir. Bu benzerlik sadece mimari özellikler değil, yapım teknikleri ve malzeme açısından da belirgin durumdadır. Erzurum Lala Paşa Camii; kubbelerin yükünü taşıyan dış duvarları, “üç yapraklı duvar” olarak adlandırılan iki kesme taş duvarın arasında, harç, moloz vb. bağlayıcılar bulunan dolgu duvar tekniğiyle inşa edilmiştir (Şekil 3). Bu tip duvarların basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin belirlenmesi için, önce ayrı ayrı kesme taş duvar dayanımı ve dolgu duvar dayanımının belirlenmesi gerekmektedir [20].



Dış Duvar + Moloz Dolgu + Dış Duvar = Üç Yapraklı Duvar

Şekil 3 - Üç yapraklı duvar tipi

3.2.1. Dış Duvarın Dayanımının Belirlenmesi

Duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesi farklı parametrelere bağlıdır. Duvarın yapım tekniği, yapımında kullanılan taşın, tuğlanın, harcın vb. malzemelerin mekanik özellikleri,

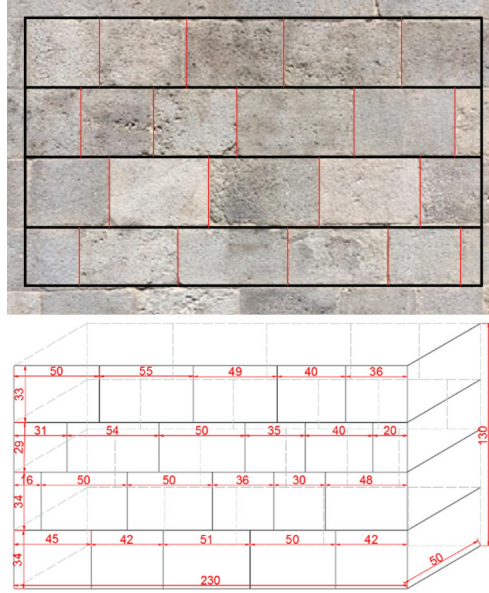
duvarın boyutları bu parametrelerin birkaçıdır. Yapılan çalışmalarda, malzeme özellikleri bilinen duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesi için farklı bağlantılar önerilmiştir.

İlk olarak malzeme dayanımı bilinen tek yapraklı duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Tsoutrelis ve Exadaktylos [21] Denklem 1-2'yi önermektedir. Tsoutrelis ve Exadaktylos çalışmalarında yöresel bir mermer çeşidi kullanarak kaya blokları arasındaki süreksizliklerden (derzler) kaynaklanacak basınç dayanımı farklılıklarını deneysel olarak incelemişler ve teorik bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım, kuru derzli yığma duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesinde etkilidir.

$$f_k = e^{-0.3117 \times L \times f} \times f_b \quad (1)$$

$$L = \sqrt[3]{l \times h \times t} \quad (2)$$

Bu denklemde f_k , duvar karma basınç dayanımı; f_b taşın basınç dayanımı; l , h , t sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği, kalınlığı ve f çatlak yoğunluğunu temsil etmektedir. Çatlak yoğunluğu duvarı oluşturan taşların bütün boyutlarda sürekliliği bozan yüzeylerinin toplam alanının duvarın hacmine bölümüdür (m^2/m^3). Bu denklem ışığında Lala Paşa Camisi'nden alınan temsili duvar örgüsü ve taş boyutları görüntüsüne bağlı olarak (Şekil 4), çatlak yoğunluğu $4.26 m^2/m^3$ ve taş duvar basınç dayanımı ise $5.63 MPa$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4 - Yapıda elastik modülün hesaplanmasında temel alınan duvar elemanı ve çatlak yoğunluğu faktörü hesaplamasında kullanılan yatay ve düşey süreksizlik yüzeyleri

İkinci olarak taş ve bağlayıcı harçla inşa edilen duvarlarda basınç dayanımının belirlenmesi için Tomazeviç [22] Denklem 3'ü önermektedir.

$$f_k = 0.5 \times f_b^{0.65} \times f_m^{0.25} \quad (3)$$

Bu denklemde, f_k , duvarın basınç dayanımı, f_b , taşın basınç dayanımı ve f_m harcın basınç dayanımıdır. Bu bilgiler ışığında taş duvar dayanımı bu duvar dayanımı 6.3MPa olarak elde edilir.

Ancak Tsoutrelis ve Exadaktylos tarafından önerilen bağıntı, Lala Paşa Camii'nde mevcut harçsız kuru duvarların davranışını belirlemesine daha uygun olduğu için kesme taş duvarın basınç dayanımı 5.63 MPa olarak alınmıştır.

3.2.2. Üç Yapraklı Duvarın Dayanımının Belirlenmesi

Yığma duvarların dayanımlarının ve elastisite modüllerinin belirlenmesi için literatürde birçok analitik yaklaşım bulunmaktadır. Ancak üç yapraklı duvarların dayanımının analitik olarak belirlenmesi birçok değişkene bağlı olması ampirik önerileri kısıtlamaktadır. Binda vd. [23] üç yapraklı duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Denklem 4'ü önermektedir.

$$f_k = \frac{2t_e}{2t_e + t_i} \times f_e \times \theta_e + \frac{t_i}{2t_e + t_i} \times f_i \times \theta_i \quad (4)$$

Bu denklemde $f_e=f_k$ ve $f_i=f_r$ olacak şekilde, sırasıyla dış ve iç duvarın basınç dayanımları, t_e ve t_i sırasıyla dış ve iç duvarın kalınlıkları ve θ_e ve θ_i ise sırasıyla dış ve iç duvarın doğruluk faktörüdür. Doğruluk faktörü iç ve dış duvarın üç yapraklı duvar dayanımına katkı katsayısıdır. Bu değerleri Binda vd. (2006) $\theta_e=0.7$ ve $\theta_i=1.3$ olarak önermiştir.

Basınç dayanımı bilinen yığma duvarların Elastisite modülüne geçiş parametresi Tomazevic [22] tarafından 200-1000 arasında olduğu belirlenmiştir. Basınç dayanımından elastisite modülüne geçiş olarak Avrupa Birliği Standartları [24] Denklem 5'i önermektedir.

$$E = 1000f_k \quad (5)$$

Bu bilgiler ışığında üç yapraklı duvarın basınç dayanımı 3.92MPa, bu duvarların elastisite modülü ise 3920MPa olarak elde edilir.

3.3. Fil Ayaklarının, Kubbelerin ve Kemerlerin Dayanımlarının Belirlenmesi

Eserde merkez kubbeyi taşıyan fil ayaklarını ve kemerleri oluşturan taşların basınç dayanımları, duvarları oluşturan taşlarla (25.6 MPa) aynı kabul edilmiştir. Fil ayaklarının ve kemerlerin dayanımları Bölüm 3.2.1'de elde edilen dış duvar dayanımıyla (5.63 MPa) aynı alınmıştır. Literatüre bakıldığında kubbe kısımlarının elastisite modülleri için kullanılan değer ortalama 3000 MPa olarak önerilmektedir [6-8]. Bu sebeple hem literatür ışığında hem de Denklem 1 ve Denklem 5 yardımıyla fil ayakları, kemerler ve kubbelerin dayanımları Tablo 2'de verildiği gibi kabul edilmiştir.

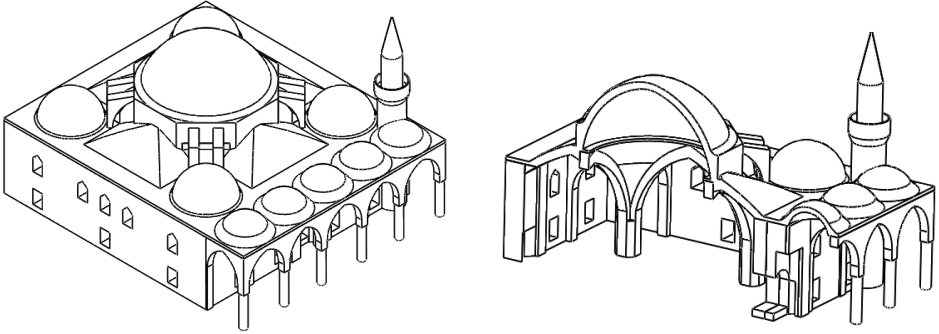
Görüldüğü gibi tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi fazla sayıda belirsizlik içermektedir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için farklı varsayımlar, kabuller ve analitik öneriler dikkate alınarak, yukarıdaki yöntem önerilmiş ve malzeme parametreleri belirlenmiştir. Erzurum Lala Paşa Cami malzeme özellikleri Tablo 2’de verildiği gibi kabul edilmiş ve analizler bu değerlere göre yapılmıştır.

Tablo 2 - Erzurum Lala Paşa Camisinin malzeme özellikleri

Cami Bölümü	Elastisite Modülü, MPa	Basınç Dayanımı, MPa	Çekme Dayanımı, MPa
Duvarlar	3920	3.92	0.3
Fil Ayakları ve Kemerler	5630	5.63	0.3
Kubbeler	3000	3.00	0.3

4. SONLU ELEMAN MODELİ

Cami gibi farklı yapısal taşıyıcı formların iç içe kullanıldığı yığma yapıların hesap modellerinin klasik elemanlarla oluşturulması ve davranışlarının belirlenmesi zor olabilmektedir. Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri, geleneksel yapıların taşıyıcı sistemlerinden oldukça farklıdır. Mimari detaylarından kaynaklanan karmaşıklık, bu yapıların modellenmesinde sorunlar çıkarmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin ve yazılımların gelişmesi, yığma yapıların davranışlarının üç boyutlu modellenerek belirlenmesine olumlu katkı sağlamıştır. Karmaşık mimarili camiler, hamamlar, köprüler ve birçok yığma yapının modellenmesi imkânli hale gelmiştir.

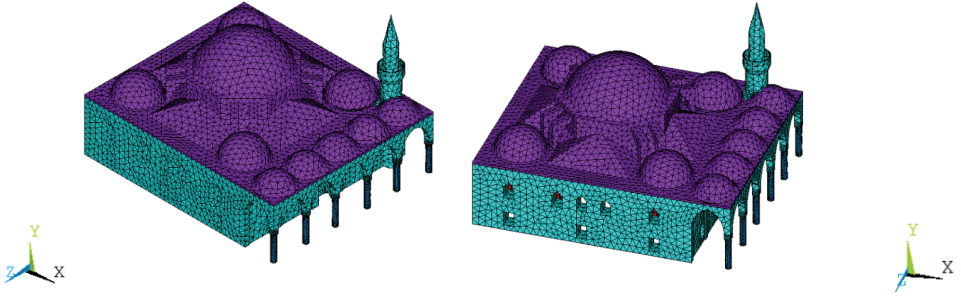


Şekil 5 - Lala Paşa Camiinin katı modeli

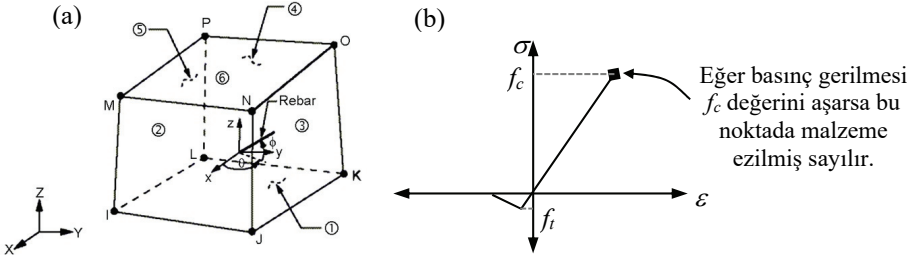
Bu çalışmada yapısal davranışa etki etmediği düşünülen mimari ince unsurlar modellenmemiş, göz ardı edilmiştir. Şekil 5’te görüldüğü gibi Lala Paşa Camisi, SolidWorks [25] yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan model ANSYS APDL [26]

yazılımına aktarılmış ve sonuçta 17860 düğüm noktalı ve 66521 sonlu elemanlı model elde edilmiştir (Şekil 6).

ANSYS modelinde SOLID65 elemanı kullanılmıştır. SOLID65 elemanı, her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşan bir elemandır. Bu 3D katı eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, basınç gerilmelerinde ezilme özelliklerine ve plastik şekil değiştirme yeteneğine sahiptir. Kullanılan malzeme izotropik olarak tanımlanmıştır. Geometri, düğüm yerleri ve koordinat sistemi Şekil 7a'da verilmiştir.



Şekil 6 - Lala Paşa Camii' nin sonlu elemanlar modeli



Şekil 7 - (a) SOLID65 elemanı geometrisi [26]
(b) ANSYS'de Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu [27]

Malzeme modeli olarak beş parametrelili Willam-Warnke modeli kullanılmıştır [27]. Bu modelde taşın çekme (f_t) ve basınç dayanımları (f_c) kullanılarak malzemenin göçme yüzeyi oluşturulur. Yığma malzemesi homojenize kabul edilerek, Willam-Warnke modeline göre tanımlanan göçme yüzeyi içerisinde kalan gerilme durumunda malzemenin elastik davrandığı, çatlama veya ezilme durumlarında ilgili elemanlarda sistem direngenliğine verilen katkı sıfıra yakın olacak şekilde eleman davranış değiştirilir. Sargısız beton ve taş-toprak yığma gibi malzemelerde bu model yeterli olurken malzemenin en büyük gerilmeye ulaştıktan sonra sergileyeceği dayanımda yumuşama tam olarak modellenemez. Bundan dolayı Willam-Warnke modeli programda mevcut plastisite modellerinden birisiyle birlikte kullanılarak ezilme davranışı daha gerçekçi modellenebilir. Ancak yığma yapı hesaplamalarında basınç altında ezilmeden ziyade malzemenin çekme dayanımının çok düşük olmasından dolayı (ihmal edilebilir) birimler arasında ayrışma problemi ortaya

çıkacağından, Willam-Warnke modelinin kendi başına kullanımının yeterli olacağı düşünülmüştür. Bir eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 7b’de verilmiştir. Bu şekilde Tablo 2’de verilen çekme ve basınç dayanımları modelin davranışını belirler.

5. MODAL ANALİZ

Bilgisayar ortamında oluşturulan sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri, yapıya verilecek tahribattan dolayı deneysel olarak belirlenemediği durumlarda, dinamik deneysel ölçümler ile kalibre edilmelidir. Bu kalibrasyon işlemi tayin edilen malzeme mekanik özelliklerinin yapı dinamik özelliklerini verecek şekilde değiştirilmesiyle yapılmaktadır. Bu amaçla öncelikle model üzerinde teorik modal analizler yapılarak yapının dinamik davranış parametreleri belirlenmiş; sonrasında deneysel modal analiz yapılarak söz konusu parametreler elde edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma detayları bu bölümde sunulmaktadır.

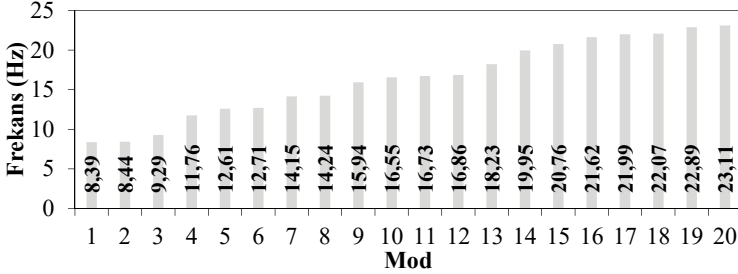
5.1. Teorik Modal Analiz

Lala Paşa Camii’nin yapısal çözümlerinde öncelikle modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenmiştir. Çözümler 20 mod için yapılmış ve yapının hakim ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Yapının modları belirlenirken, ilk iki mod minarenin hakim modu çıkmıştır. Bu iki mod şekli, yapının bütünü temsil etmeyen lokal modlar olduğu için dikkate alınmamıştır. Aşağıda Tablo 3’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen hakim ilk altı moda ait frekans ve kütle katılım oranları, Şekil 8’de tüm modlara ait frekans değerleri ve Şekil 9’da ilk altı moda ait şekil değiştirme hali gösterilmektedir. Yapının toplam kütlesi 5679 ton olarak hesaplanmıştır.

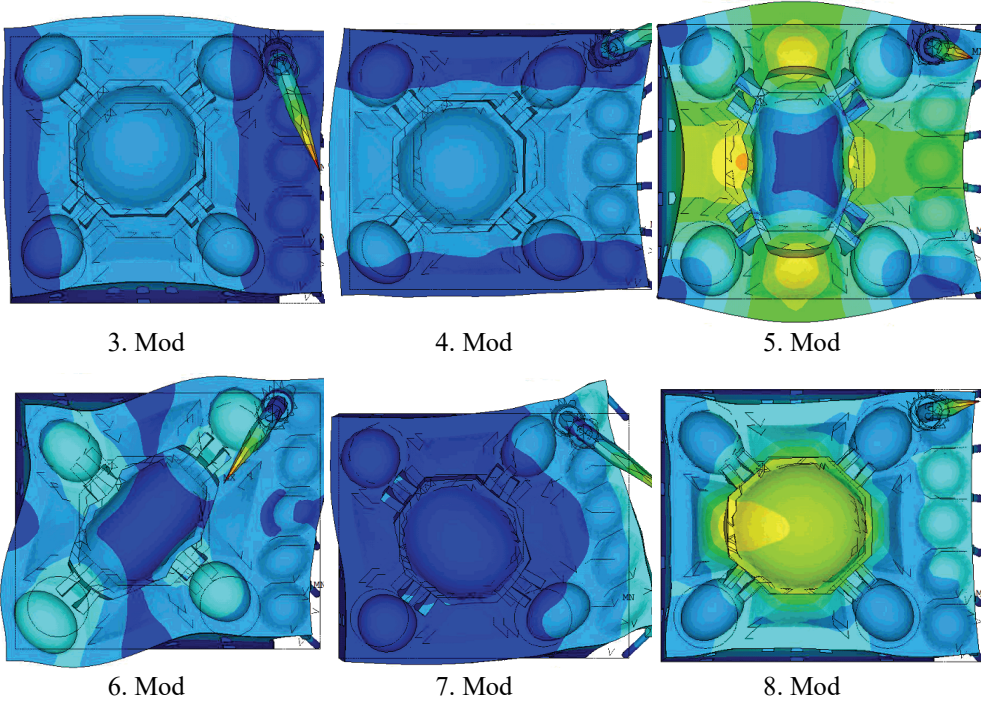
Tablo 3 - Lala Paşa Cami’nin dikkate alınan hakim altı moduna ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)	Küt. Kat. Oranı (x doğ.-yatay)	Küt. Kat. Oranı (y doğ.-düşey)	Küt. Kat. Oranı (z doğ.-yatay)	Küt. Kat. Oranı (y dönme)
3	8.44	0.06	0.48E-5	0.56	0.49
4	8.50	0.55	0.79E-4	0.06	0.57
5	9.30	0.57E-3	0.25E-4	0.36E-4	0.57
6	11.74	0.25E-4	0.30E-3	0.84E-3	0.58
7	12.55	0.13E-3	0.97E-4	0.14E-1	0.83
8	12.70	0.44E-4	0.16	0.41E-4	0.84

Modelin mod şekillerine bakıldığında yapının 3. modu doğu-batı (z doğrultusu) doğrultusunda enine ve burulma, 4. modu kuzey-güney (x doğrultusu) doğrultusunda enine ve burulma, 5. mod ve üstü modlar burulma ve 8. mod düşey ve burulma modudur. Mod şekilleri, yapının deformasyonunu belirleyen salınım şekilleridir. Bu salınımlar gözlemlendiğinde, deprem sırasında son cemaat yeri, ana kubbe ve minarenin zorlanacağı söylenebilir. Ayrıca doğu-batı doğrultusunda duvarlar ve özellikle son cemaat yerinin mesnetlendiği kuzey cephesindeki duvarda, düzlem dışı hareketlilik sebebiyle hasar gözlemlenebilir.



Şekil 8 - Lala Paşa Cami'nin ilk 20 moda ait frekans değerleri



Şekil 9 - Lala Paşa Cami'nin hakim ilk altı moda ait deformasyon şekilleri

5.2. Deneysel Modal Analiz

Bu çalışmada Lala Mustafa Paşa Camii' nin deneysel olarak dinamik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılmıştır. Operasyonel modal analiz yöntemi yapıların doğal frekans, mod şekli ve sönüm gibi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Yapıların deprem, rüzgar, taşıt ve insan hareketleri, makine titreşimleri gibi genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinmeyen titreştiriciler tarafından tetiklendiği bilinmektedir. Operasyonel modal analiz yöntemi girdi olarak trafik, dalga, rüzgâr ve sismik etki gibi çevresel etkileri kullanmaktadır. Gelişen teknoloji, çevresel etkiler altında yapıda oluşan titreşimlerin kayıt altına alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu yöntem, gerçek servis şartları altında dinamik karakteristiklerin belirlenmesine imkân vermesi, ölçüm esnasında yapının kullanımını kesintiye uğratmaması, hızlı ve ucuz olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. [28]

Operasyonel modal analiz 1990'ların başından beri inşaat mühendisliği alanında ilgi gören bir yöntem olup köprülere, kulelere binalara ve deniz aşırı platformlara uygulanmıştır [29]. Söz konusu yöntemin tarihi yapılara uygulandığı pek çok çalışma vardır [2-5]. Bu çalışmalarda genel olarak incelenen yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel ve teorik olarak belirlenmesi ve kıyaslanması amaçlanmıştır.

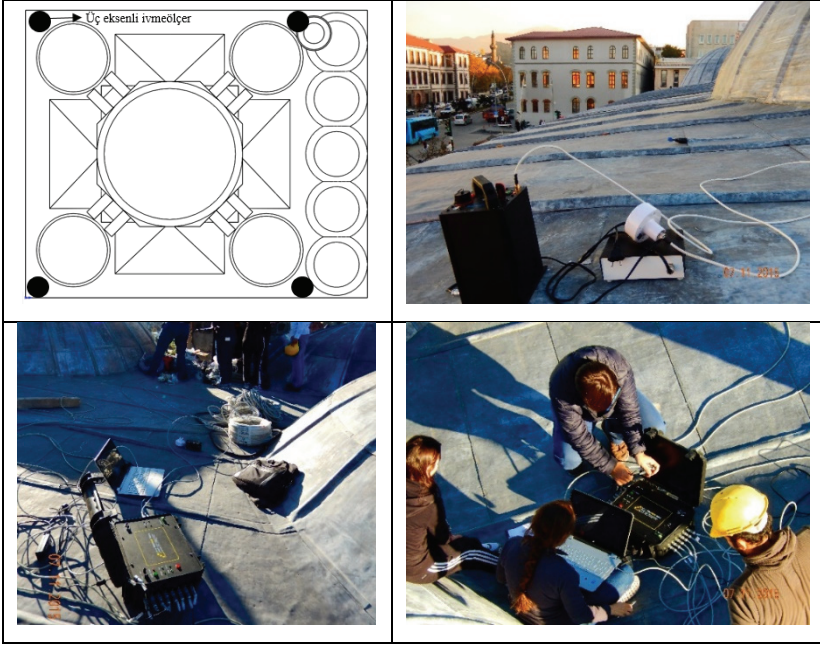
Operasyonel modal analiz çalışmasının ilk basamağı teorik modal analiz çalışmasından elde edilen mod şekilleri dikkate alınarak titreşim kayıt noktalarının belirlenmesi ve ivme kayıtlarının alınmasıdır. Bu yöntemde yapıyı titreştirmek amacıyla uygulanan kuvvetin genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinemediğinden dolayı, ölçümlerin yapının ölçüm yapılan frekans aralığında tahrik edilmesini temin edebilecek kadar uzun süreli alınması esastır. Operasyonel modal analizde veri işleme yöntemleri zaman alanında ve frekans alanında frekans yöntemleri diye kategorize edilebilir. Frekans alanında ayrıştırma (FFD) tekniği frekans alanında çalışan bir tekniktir ve çalışmada bu metod kullanılmıştır. Bu yöntemde tepkinin güç yoğunluğu fonksiyonu (PSD) hesaplanır ve sistemin ölçeksiz mod şekillerini de içeren modal parametrelerini belirlemek için tekil değer ayrışımı gerçekleştirilir. Bilinmeyen etki ve ölçülen tepkiler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilir [30,31].

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (6)$$

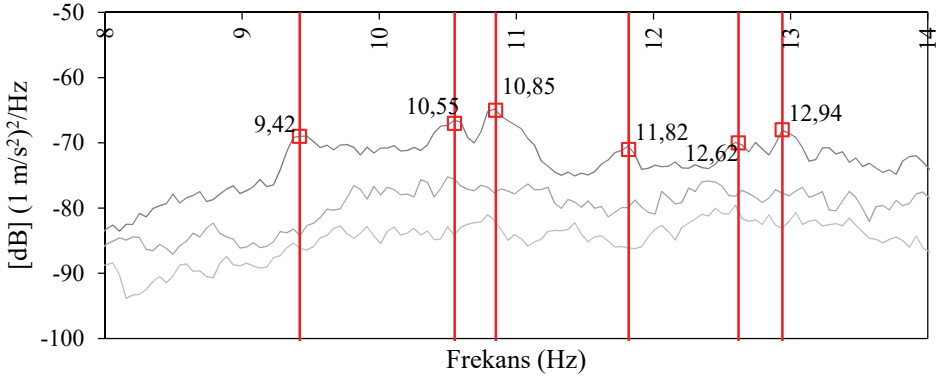
Denklemden, $[G_{xx}(\omega)]$ ve $[G_{yy}(\omega)]$ etki ve tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonlarını, $[H(\omega)]$ ise frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Ayrıca denklemden * ve T sırasıyla fonksiyonun kompleks eşleniğini ve transpozunu göstermektedir. Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrık değerler olarak,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (7)$$

Burada, U_i , u_{ij} tekil vektörlerden (mod vektörlerinden) oluşan birim matrisi, S_i ise s_{ij} tekil değerlerden (öz değerlerden) oluşan diyagonal matrisi göstermektedir [32].



Şekil 10 - Lala Paşa Cami titreşim ölçüm krokisi ve ölçüm görüntüleri



Şekil 11 - Lala Paşa Cami GFOAY ile elde edilen tekil değerler

Ölçümler sırasında 4 adet üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Yapı dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için yapının tepkileri yatay ve düşey yönlere uygun yerlere yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla belirlenmiştir. İvmeölçerlerin yerleri Şekil 10'da gösterilmektedir. Dinamik karakteristikler Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrışma Yönteminden (GFOAY) her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilir.

GFOAY için bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler Şekil 11’de doğal frekans değerleri ise Tablo 4’de verilmiştir. Elde edilen veriler ARTEMIS Modal Pro [33] yazılımı yardımıyla işlenerek yapının deneysel modal karakteristikleri belirlenmiştir.

Tablo 4’de gösterildiği gibi yukarıda teorik modal analiz sonucu elde edilen yapı frekansları ile Operasyonel Modal Analizle belirlenen yapının deneysel frekansları arasındaki fark en fazla %19.4, en az %0.6’dır. Bu değerler malzeme özelliklerinin belirlenmesinin oldukça zor olan tarihi yapılarda kabul edilebilir seviyelerdedir [34]. Bu sebeple önerilen yöntemle belirlenen malzeme özelliklerinde herhangi bir kalibrasyon yapmaksızın oluşturulan sonlu eleman modelinin yapının gerçek davranışını yansıtacağı kabul edilmiştir. Bu kabul ile yapının deprem analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4 - Deneysel ve teorik frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	Teorik Frekans (Hz)	Deneysel Frekans (Hz)	Fark (%)
3	8.44	9.42	10.4
4	8.5	10.55	19.4
5	9.3	10.85	14.3
6	11.74	11.82	0.7
7	12.55	12.62	0.6
8	12.7	12.94	1.9

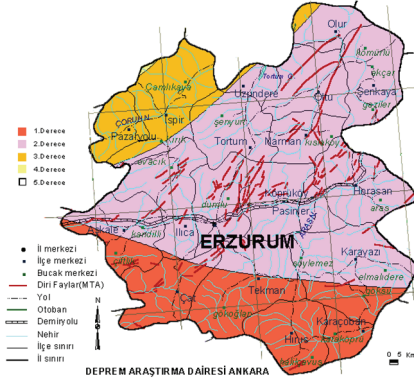
6. DEPREM YÜKLERİ ALTINDA ANALİZ

Doğu Anadolu Bölgesi bulunduğu konum sebebiyle tarih boyunca birçok büyük ve küçük depreme maruz kalmıştır. Tarihi kaynaklara bakıldığında 1790, 1843, 1850, 1852, 1859, 1868 yıllarında can ve mal kaybına neden olmuş depremler görülmektedir. 1900 yılından günümüze kadar meydana gelen büyük depremler; 1924 Horasan M6.8, 1946 Hınıs M5.9, 1952 Hasankale M5.8, 1966 Hınıs-Varto M6.8, 1983 Erzurum-Kars M6.9, 1984 Balkaya-Şenkaya M6.4, 1999 Şenkaya M5.1 ve 2004 Aşkale M5.6 olarak sıralanabilir [35]. Vakıflar Erzurum Bölge Müdürlüğü’nden alınan bilgiye göre, yapı belirtilen bu depremler esnasında herhangi bir ciddi hasar almamıştır. Bu çalışmada Lala Paşa Camii’nin dinamik çözümlemesi zaman tanım alanı hesap yöntemiyle, 13 Mart 1992 tarihinde Erzincan’da meydana gelen 6.8 büyüklüğündeki depremin doğu-batı ve kuzey-güney ivme bileşenleri ve ivme spektrumu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 13). 1992 Erzincan depremi büyüklüğünde bir depremin yapının bulunduğu alanda meydana gelmesi ön görülmemektedir. Ancak bu çalışmada yapının olası bir depremde sismik performansından ziyade, yapı belirtilen malzeme özellikleri kullanılarak göstereceği yıkılma mekanizmasının belirlenmesi hedeflendiği için 1992 Erzincan deprem kaydı gibi yapılar üzerinde yüksek süneklik talebi oluşturacak bir depremin kullanılmasına karar verilmiştir.

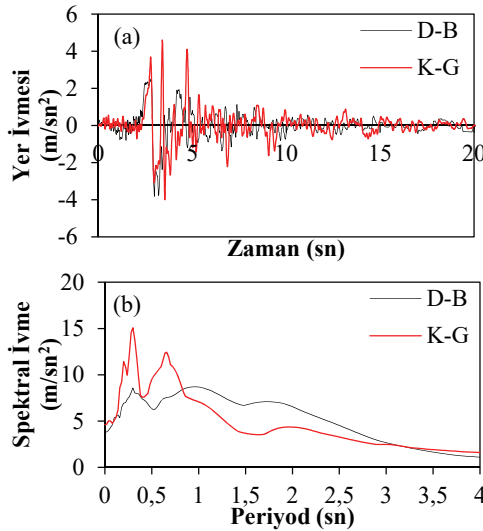
Doğrusal olamayan dinamik analizler efektif deprem yükü konsepti üzerinden gerçekleştirilmiştir [36]. Dinamik davranış, yer ivmesi değerleri yapı üzerinde tüm düğüm noktalarına etkileyen bir ivme alanı oluşturacak şekilde uygulanarak ve malzemenin doğrusal

olmayan davranışı dikkate alınarak Denklem 8'in çözümüyle hesaplanmıştır. Yapıda %3'lük bir sönüm Rayleigh sönüm modeli kullanılarak uygulanmıştır ($[C] = \alpha[M] + \beta[K]$). Burada $[C]$ sönüm matrisi, $[M]$ kütle matrisi, $[K]$ rijitlik matrisi, α ve β ise etkin iki moda ve bu modlardaki sönümlere bağlı olarak belirlenen katsayılardır. Dinamik analizlerde malzeme için doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanıldığında sönüm için yüksek değerlerin kullanılması gerekmektedir.

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = -[M] \cdot \{\ddot{u}_g(t)\} \quad (8)$$

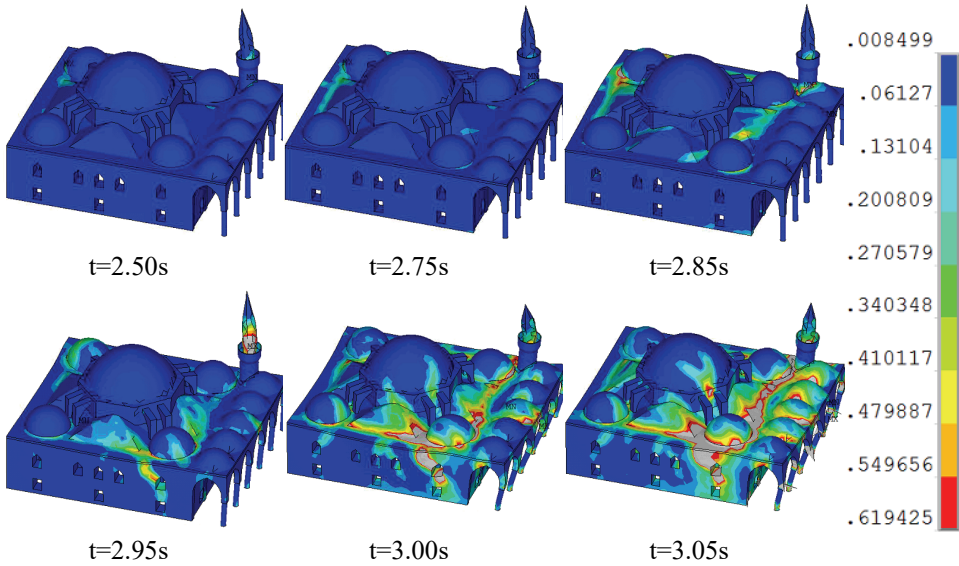


Şekil 12 - Erzurum İli Deprem Haritası [37]



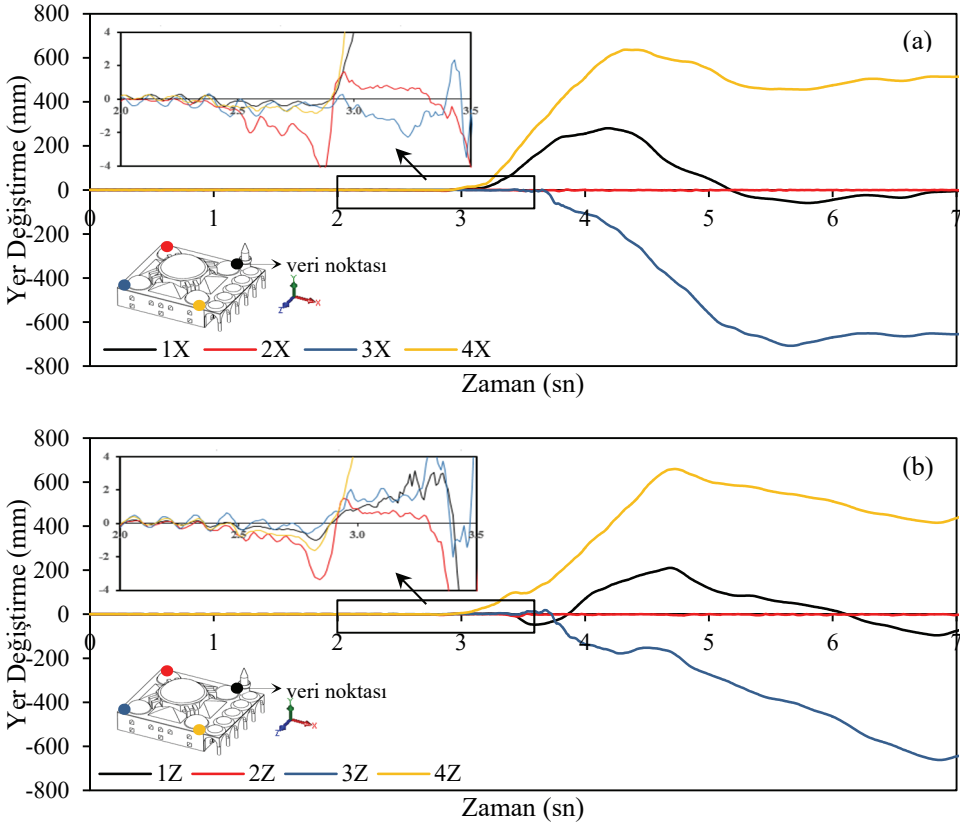
Şekil 13 - (a) Erzincan depremi D-B ve K-G ivme bileşenleri; (b) Erzincan depremi D-B ve K-G ivme spektrumları

Dinamik analiz sonucunda yapıda oluşan çekme asal birim şekil değiştirmeleri (çatlak ve ayrılma bölgeleri) Şekil 14’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.50’nci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler gözle görülemeyen mikro çatlaklara sebep olmaktadır. 0.1-0.3mm arasında olan bu mikro çatlaklar literatürde taşıyıcı sisteme ve yapının kullanımına etkisi olmayan çatlaklar olarak tanımlanır [38]. Önerilen sınırlara göre bu çatlak genişlikleri kabul edilir seviyededir, ancak yapının kuzeybatısında bulunan küçük kubbe çevresinde ve minarenin şerefe kısmında çatlaklar yoğunlaşmıştır. 2.75’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında yapı mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2.85’inci saniyede, yapının minaresi şerefe ve duvar üst noktası seviyesinde aşırı şekil değiştirmeye maruz kaldığı için minarenin göçmesine sebep olacak çatlaklar meydana gelmiş ve minarenin göçme bölgesine geçtiği değerlendirilmiştir. Yine bu zaman diliminde yapı ile son cemaat yerinin mesnetlendiği bölgelerde çekme birim şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı görülmektedir. 2.95’inci saniyede yapının doğu kısmında bulunan yarım kubbenin mesnet bölgesinden pencere boşluğuna doğru bir hat şeklinde ilerleyen geniş hasar çatlakları meydana gelmiştir [38]. 3.00’üncü saniyede, yapının son cemaat yerinde büyük çatlaklardan dolayı göçme meydana geleceği değerlendirilmektedir. Doğru kısmında pencere boşluğuna doğru oluşan çatlak hattı, doğu taşıyıcı duvarının göçmesine sebep olmuştur. Yine bu zaman diliminde yapının hemen her yerinde ciddi çatlaklar oluşmuştur. 3.05’inci saniyede, yapının ana kubbesinde, küçük kubbelerinde, pencere boşluklarının çevrelerinde çatlaklar oluşmuş ve yapının güneybatı köşesi hariç tamamen göçmüş olabileceği belirlenmiştir.



Şekil 14 - Dinamik analiz sırasında meydana gelen çekme asal birim şekil değiştirmeleri

Şekil 15'de yapının kare planı oluşturan dış duvarların (son cemaat yeri hariç) üst köşelerinde zamana bağlı hesaplanan x ve z yatay yönlerindeki yer değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Yapının güneybatı kısmı (2 nolu veri noktası) hariç diğer kısımlarda oluşan yer değiştirmeler, yapının dinamik yük nedeniyle göçtüğünü göstermektedir. 2 nolu veri noktasında göçme meydana gelmemesinin muhtemel sebebinin analizlerde kullanılan deprem bileşenlerinin uygulanış yönüyle alakalı olduğu değerlendirilmektedir. Şekil 14a'da gösterilen iki yer ivmesi bileşenin etkin bileşesi model üzerinde 2-4 diyagonalı doğrultusunda (yani güneybatı-kuzeydoğu istikametinde) en büyük değerini almaktadır ve yaklaşık olarak 1.1 saniye periyotlu ve 6.1 m/s^2 genliğinde sinüzoidal bir atım şeklinde etkimektedir. Bu istikamette bu atıma bağlı olarak hesaplanan en büyük yer hızı 1.95 m/s olmaktadır. Elde edilen değer, Erzincan depreminin yıkıcı şiddetini göstermektedir. Bu değer büyük depremlerde yakın sahada gözlemlenen, oldukça yüksek bir yer hızına tekabül etmektedir. Belirtilen atım etkisinde 2 numaralı köşe önce basınç sonra çekmeye maruz kalırken, 4 numaralı köşede önce çekme sonra basınç gerilmeleri meydana gelmektedir. Çekme etkisinde oluşan çatlaklar sonucu 4 nolu köşeye birleşen duvarlarda rijitlik kaybı meydana gelmekte ve izleyen çevrimde basınç ve kesme kuvvetleri etkisiyle bu bölgede ağır hasar ortaya çıkmaktadır (Şekil 17, $t=2.95\text{-}3.00$ saniyeler).



Şekil 15 - Dinamik analizde yapının köşelerinde oluşan yer değiştirmeler (mm), (a) x doğrultusu; (b) z doğrultusu

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik [39] Bölüm 5.4.4.'te, planda birbirine dik doğrultuların her biri boyunca uzanan taşıyıcı duvarların, pencere ve kapı boşlukları sayılmaksızın toplam uzunluğunun brüt kat alanına oranı (l_d/A) $0.2I$ m/m^2 'den daha az olmayacaktır hükmüne istinaden, yapılan hesaplamalarda l_d/A oranı x ve z yönlerinde 0.077 bulunmuştur. Hesaplanan oranlar 0.2 değerinden düşüktür. Yapının x ve z yönlerinde duvar alanlarının yapının toplam alanına oranları her iki yönde de %14'tür. Bu oran yönetmelikte minimum duvar kalınlığı 0.5m olarak varsayılarak %10 olarak önerilmektedir. Görüldüğü gibi, yapının duvar kalınlığının fazla olması yapının ele alınan dinamik yükler karşısında yeterli dayanıma ulaşmasına yardımcı olmamıştır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 16. yüzyılda inşa edilmiş Erzurum Lala Paşa Camii'nin tüm taşıyıcı elemanlarının malzeme özellikleri önerilen yöntemle belirlenmiştir. Yapının sonlu eleman modelinde bu değerleri kullanarak teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapının deneysel modal analizi Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yapının hakim altı modu belirlenmiştir. Bu hakim altı mod için teorik ve deneysel veriler arasında en az %0.6, en fazla %19.4'lük fark olduğu belirlenmiştir. Kullanılan malzeme modelinin tarihi yapılarda çatlama ve ezilme davranışının modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği ve bu tür yapılarda oluşabilecek göçme mekanizmalarını ortaya çıkarabileceği gösterilmiştir.

Dinamik yüklerin uygulandığı deprem analizi sonucunda, yapıda öncelikle minarede, son cemaat yerinde, küçük kubbelerde ve nihayetinde yapının tamamında ciddi hasarlar meydana geldiği belirlenmiştir. Elde edilen veriler, yapının 1992 Erzincan Depremine benzer bir yer hareketi etkisinde göçeceği yönündedir.

Bu çalışmada tek bir yığma yapı için elde edilmiş bu sonuçların güvenle uygulanabilmesi için daha çok ve farklı geometrik özellikte yığma yapı kullanılarak benzer çalışmaların sayısı artırılmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, 1001-114M280 kod nolu TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Durukal, E., Cimilli S., Erdik M., Dynamic Response of Two Historical Monuments In İstanbul Deduced From The Recordings of Kocaeli and Duzce Earthquakes, Bulletin of The Seismological Society of America, 93(2), 694-712, 2003.
- [2] 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.

- [3] Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M., Çoşkun, N., Modal Analysis, Experimental Validation, and Calibration of A Historical Masonry Minaret. *Journal of Testing and Evaluation*, 36(6), 516-24, 2008.
- [4] 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*, 28 (1), 37-47, 2009.
- [5] Ramos, L.F., Marques, L., Lourenço, P.B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., Roque, J., Monitoring Historical Masonry Structures With Operational Modal Analysis: Two Case Studies, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 1291-1305, 2010.
- [6] Şeker, B.Ş., Mimar Sinan Camilerinin Statik ve Dinamik Yükler Etkisinde Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2011.
- [7] Mustafaraj, E., Yardım, Y., Conditional Assessment of Historical Structures: Earthquake Performance of Naziresha Mosque, *International Students Conference of Civil Engineering*, Tirana, Albania, 2012.
- [8] Şeker, B.Ş., Doğangün, A., Çakır, F., Merzifonlu Kara Mustafa Paşa Cami Taşıyıcı Sistemi Üzerine İrdeleme, *SDU International Technologic Science*, 5, 112-120, 2013.
- [9] Koseoglu, G.C., Canbay, E., Assessment and Rehabilitation of The Damaged Historic Cenabı Ahmet Pasha Mosque, *Engineering Failure Analysis*, 57, 389-398, 2015.
- [10] Boru, E.O., Kutanis, M., Çevrel Titreşim Kayıtları Kullanılarak Yapı Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi, *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 19(1), 59-66, 2015.
- [11] Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., Betonarme Kubbeli Taş Yığma Duvarlı Camilerin Dinamik Davranışına Etkisinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle İncelenmesi, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 621-630, 2016.
- [12] Cakir, F., Uysal, H., Acar, V., Experimental Modal Analysis of Masonry Arches Strengthened With Graphene Nanoplatelets Reinforced Prepreg Composites, *Measurement*, 90, 233-241, 2016.
- [13] Torres, W., Almazán, J.L., Sandoval, C., Boroscchek, R., Operational Modal Analysis and FE Model Updating of The Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile, *Engineering Structures*, 143, 169-188, 2017.
- [14] Yenişehirlioğlu, F., Madran, E., Mimar Sinan Yapıları. Türk Tarih Kurumu Basım Evi, Ankara, 1989.
- [15] Gündoğdu H., Erzurum: History and Civilization. Writers Union of Turkey, Erzurum 2011 Series -1, Ankara-Turkey, 2011.
- [16] Konyalı I.H., History of Erzurum With Monuments and Inscription. Ercan Matbaası, Istanbul, Turkey, 1960.
- [17] Bozal M., Erzurum Lala Paşa Cami Rölöve Restorasyon Restitüsyon Projesi, Envar Mimarlık, Ankara, 2015.
- [18] Çamlıbel, N., Sinan Mimarlığında Yapı Strüktürünün Analitik İncelenmesi. Doçentlik Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.

- [19] Bayülke, N., Yığma Yapılar, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı- Afet İşleri Genel Müdürlüğü. Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1992.
- [20] Demir C., Ilki A., Characterization of Materials Used In The Multi-Leaf Masonry Walls of Monumental Structures In İstanbul, Turkey. *Construction and Building Materials*, 64, 398-413, 2014.
- [21] Tsoutrelis C.E. ve Exadaktylos G.E., Effect of Rock Discontinuities on Certain Rock Strength and Fracture Energy Parameters Under Uniaxial Compression, *Geotech Geol Eng*, 11(2), 81-105, 1993.
- [22] Tomazevic M., *Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings*, Singapore: Imperial College Press, 268, 1999.
- [23] Binda L., Pina-Henriques J., Anzani A., Fontana A., Lourenco P.B., A Contribution For The Understanding of Load-Transfer Mechanisms In Multi-Leaf Masonry Walls: Testing and Modelling, *Engineering Structure*. 28(8), 1132-1148, 2006.
- [24] Eurocode 6: Design of Masonry Structures. Part 1.1: General Rules For Reinforced and Unreinforced Masonry Structures, European Committee For Standardization, ENV 1996-1-1:1995, 1995.
- [25] Solidworks, Modeling Software, 2013.
- [26] ANSYS V.16.0, Swanson Analysis System, 2015.
- [27] Willam K.J. and Warnke E.D., Constitutive Model For The Triaxial Behavior of Concrete, International Association For Bridge and Structural Engineering, 19, 1975.
- [28] Rainieri, C. and Fabbrocino, G., Operational Modal Analysis for the Characterization of Heritage Structures, *GEOFIZIKA* , 28, pp.109-126, 2011.
- [29] Zhang, L., Brincker, R., Andersen, P., An Overview of Operational Modal Analysis:Major Development and Issues, Proc. Of the International Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 26-27, April, 2005.
- [30] Bendat, J.S. and Piersol, A.G., *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons, 1986.
- [31] Brincker, R., Zhang, L., Andersen P., Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. Proceedings 18th International Modal Analysis, Texas, USA, 625-630, 2000.
- [32] 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.
- [33] Svibs. ARTEMIS, Ambient Response Testing and Modal Identification Software, Versiyon Modal 5.1, 2016.
- [34] Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim, B., Türker T., Akköse, M., Çoşkun, N., Modal Analysis, Experimental Validation, and Calibration of a Historical Masonry Minaret, *Journal of Testing and Evaluation*, 36(6), 2008.

- [35] Erzurum Çevre Durum Raporu, Erzurum Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Erzurum, 2011.
- [36] Kazaz İ., Yakut A., Gülkan P., Numerical Simulation of Dynamic Shear Wall Tests: A Benchmark Study, *Computers & Structures*, 84(8-9), 549-562, 2006.
- [37] T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Sayısal Veriler, <Http://Kyh.Deprem.Gov.Tr/Ftpt.Htm> Erişim Tarihi Ocak 30, 2013.
- [38] Bayülke, N., Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi. İnşaat Mühendisliği Odası İzmir Şubesi, 15, 1999.
- [39] T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”. Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2007.