

TARİHİ YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞINI BELİRLEMEK İÇİN SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ

Hüsnü CAN^a ve Ali İhsan ÜNAY^b

^aGazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^bGazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Ankara, Türkiye

husnucan@gazi.edu.tr, unav@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 20.10.2011; Kabul/Accepted: 19.12.2011)

ÖZET

Tarihi binalar ve anıtlar zaman içinde aşınır ya da doğal afetler sonucunda ağır hasar görür. Mimarlık, restorasyon, mimarlık tarihi ve mühendislik disiplinleri bu hasarların önlenmesi ve onarılması için tek başına yeterli değildir. Bu disiplinlerin kendi alanlarında çok ayrıntılı ve uzmanlaşmış çalışma ve araştırma yöntemleri vardır. Ancak tarihi yapıların ve anıtların sağlıklı bir şekilde korunması için, bu alanda çalışan ve farklı disiplinlerden gelen uzmanların, korunacak binaların ve anıtların yapısal davranışının temel ilkelerini bilinmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bu alanda çalışan disiplinler arasındaki işbirliğinin yeterli düzeyde olmaması koruma çabalarının ciddi bir şekilde engellenmesine neden olmaktadır. Bu makale, yapı mühendisleri tarafından geliştirilen sayısal modellerin ve yapılan hesapların mimarlar, restorasyon uzmanları ve mimarlık tarihçileri tarafından da kolaylıkla anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tarihi binalar, Sayısal analiz, Sonlu elemanlar modeli, Yapısal performans

NUMERICAL ANALYSIS TOOLS TO DETERMINE EARTHQUAKE BEHAVIOR OF HISTORICAL STRUCTURES

ABSTRACT

Historical monuments erode either slowly by the decay of time or swiftly by the stroke of natural disasters. No single discipline, whether they are architectural historians, architects or structural engineers can prevent this destruction by themselves. It should be recognized that these disciplines all have very elaborate and specialized working and research methods of their own. Any lack of cooperation between these disciplines will seriously hinder the preservation efforts. It is crucial for a healthy preservation process that architects and architectural historians have a very basic level of information about the structural behavior of historical buildings. This is the only way they can suggest preservation methods that will not damage the historical and artistic qualities of the building. The aim of this paper is to clarify the structural behavior of historical buildings and render the numerical analyses methods easily understandable for architects and architectural historians.

Keywords: Historical buildings, Numerical analysis, Finite element modeling, Structural performance

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihi yapıların sayısal modellemesi ve yapısal analizi son dönemlerde artan bir hızla ilgi odağı olmuştur. Konuyla ilgili bir çok bilimsel araştırma yapılmakta, çeşitli kuramlar üretilmektedir. Tarihi binaların yapısal analizi, yeni yapıların taşıyıcı sistem elemanlarının tasarlanması için yapılan hesaplardan çoğu zaman farklılık göstermektedir. Tarihi binaların yapısal analizi, taşıyıcı sistem elemanlarının kendi

ağırlığı, rüzgar, deprem, zemin oturmaları ve kullanım sırasında ortaya çıkan çeşitli yük veya fiziksel dış etkiler sonucunda oluşan gerilmeler ve iç kuvvetlerin hesaplanması amacıyla yapılır.

Bu hesaplar sonucunda elde edilen gerilmeler ve iç kuvvetler, taşıyıcı sistem elemanları için belirlenen taşıma gücü veya sınır gerilme değerleriyle karşılaştırılır. Bu tür hesap ve karşılaştırmalara doğrusal elastik yaklaşım denir. Ancak, yığma taş ve

tuğla örgü sistemiyle inşa edilen yapıların taşıyıcı sistem elemanları doğrusal elastik malzeme davranışı sergilemez. Malzemenin doğrusal olmayan özelliklerini dikkate alarak işlem yapan hesap yöntemleri de vardır. Bu hesap yöntemleri doğrusal elastik hesap yöntemlerine göre hem çok daha fazla zaman alır, hem de malzeme özellikleri tanımlanırken yapılan kabullerde oluşabilecek küçük hatalar iterasyonlar sırasında hatanın daha da büyümesine neden olur [1,2].

Doğru ve güvenilir bir yapısal analiz için binanın geçmişi araştırmak çok önemlidir. Binanın tarihi boyunca hangi tür yüklerin etkisi altında kaldığı ve taşıyıcı sistemini oluşturan yapı malzemelerinin mekanik ve dayanım özellikleri ile ilgili belirsizlik, yapısal analiz sonucunda tarih binanın strüktürel performansı hakkında elde edilen sonuçların güvenilirliğini azaltır. Parametrik analiz yöntemi ile varsayım dayalı yükleme koşulları ve malzemelerin değişken dayanım değerleri, yukarıda sözü edilen veri eksikliklerinden kaynaklanan olumsuzlukları biraz düzeltir. Hesap sonuçlarına göre yapının davranışı ve strüktürel performansı hakkında verilen kararlar, ancak yapıda gözlenen hasar, şekil değiştirme ve çatlakların işaretleriyle çakışıyorsa geçerlilik kazanır.

Kültürel miras ve tarihi yapılar, mimarlık, mühendislik, restorasyon, sanat tarihi ve arkeoloji gibi farklı bilim dallarının ilgi alanına girmektedir. Kültür mirasının ve tarihi yapıların korunmasıyla ilgili her disiplinin kendine özgü araştırma ve uygulama yöntemi vardır. Ancak tarihi yapıların korunmasının kusursuz bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, ilgili bütün disiplinlerin bir birleriyle bağlantılı çalışması gereklidir.

Tarihi yapıların mühendislik hesaplarıyla ilgili karmaşık denklemler ve matematiksel fonksiyonlar konu ile ilgili diğer disiplinler tarafından güçlük yorumlanmaktadır. Bu makalede, özellikle mimar, restorasyon uzmanı, sanat tarihçisi ve arkeologlar için tarihi binaların ve anıtların yapısal davranışını ve performansını belirlemek için yapılan hesapların nasıl yorumlanacağı konusunda temel bilgiler anlatılmıştır [3].

Tarihi binaların ve anıtların yapısal davranışı ve performansını belirlemek için yapılan hesaplarda bir çok kriter aynı anda göz önüne alınır. Öncelikle yapının geometrik formu, yapım malzemeleri, etki eden yükler ve yükleme koşulları, temel ve zemin durumu ayrıntılı olarak araştırılmalıdır. Bu yüzden klasik mühendislik hesaplarıyla kesin ve doğru bir sonuç elde etmek kolay değildir.

Tarihi binaların taşıyıcı sistemi genellikle çok karmaşık ve üç boyutlu geometriye sahiptir. Bu da basit mekanik ilkeleri ve taşıyıcı sistem elemanlarının temel yapısal davranış prensipleriyle yapının strüktürel davranışının belirlenmesini zorlaştırır.

Tarihi binanın mevcut yapısal performansını belirlemek amacıyla yapılan hesaplar için en elverişli yöntem sayısal çözümlerdir. Bilgisayar yazılımlarındaki gelişmeler, çok kısa bir sürede oldukça kapsamlı analiz modellerinin bile statik, dinamik, doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan analizlerinin gerçekleştirilmesini sağlamıştır [4].

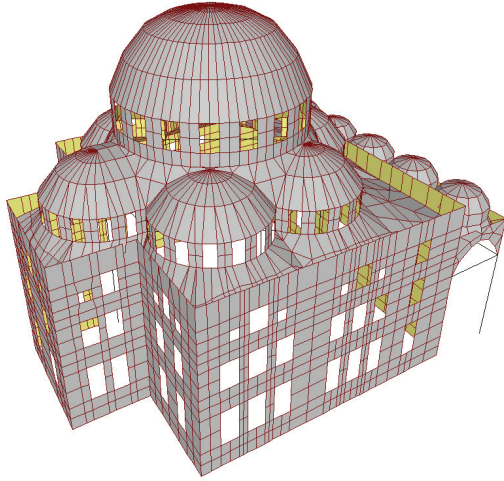
Tarihi binaların ve anıtların yapısal davranışı ve performansını sayısal hesap yöntemleriyle üç aşamada belirlenir. Öncelikle yapının matematiksel hesap modeli hazırlanır. Daha sonra uygun bir analiz yöntemiyle belirlenen yükler ve diğer etkilere karşı sayısal çözümleme gerçekleştirilir. Binanın yapısal davranışının ve performansının belirlenmesindeki en önemli adım hesap sonuçlarının değerlendirilmesidir. Bu aşamada yapılan yorumların mühendislik dışındaki diğer disiplinler tarafından da kolaylıkla anlaşılabilmesi sağlıklı bir değerlendirme için çok önemlidir.

2. SAYISAL MODELLEME (NUMERICAL MODELING)

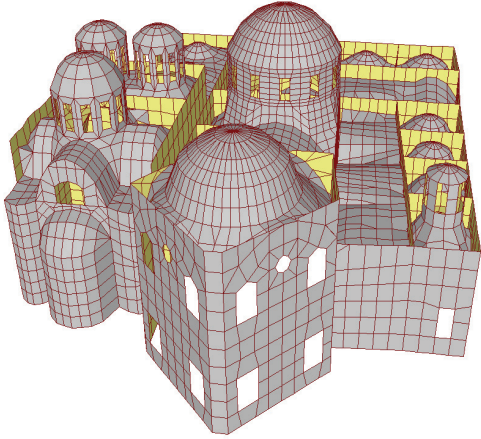
Tarihi binaların ve anıtların yapısal analizlerinin en önemli aşaması sayısal modellemedir. Sayısal modelleme, farklı malzemelerden üretilmiş ve değişken kesit geometrisine sahip taşıyıcı sistem elemanlarının mekaniğin temel kurallarına göre doğru ve uyumlu bir şekilde matematiksel terimlere dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Sıradışı yapı biçimlerini dışarıda tutacak olursak, çağdaş yapı sistemlerini oluşturan taşıyıcı sistem elemanlarının kesit geometrisinin ve boyutlarının belirlenmesinde yapı mekaniğinin temel prensiplerinin ön gördüğü yük aktarma düzeninin önemli bir yeri olduğu söylenebilir. Ancak bunu tarihi binaların taşıyıcı sistemleri için geçerli değildir.

Tarihi binaların ve anıtların yapısal analizi için genellikle sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılır. Bu hesap yöntemi, yapının tamamı ya da belirli bir bölümünün sayısal modelinin hazırlanmasıyla başlar. Bu işleme yapının ayrıştırılması denir. Ayrıştırma sırasında yapı, hesap yönteminin amacına uygun şekilde ve sayıda elemanlara ayrılır. Bu aşamada yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem elemanlarının da daha küçük parçalara ayrılarak tanımlanması gerekebilir [5,6].

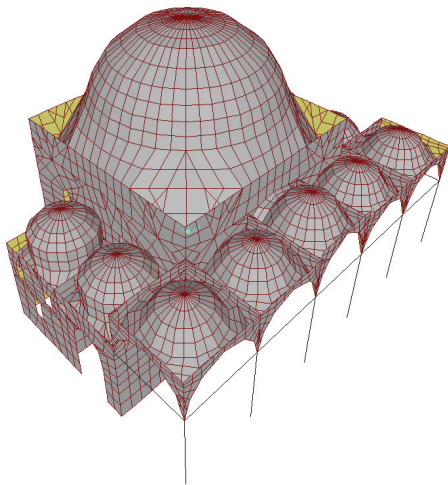
Yapının geometrik boyutlarını, mesnetlerin ve taşıyıcı sistem elemanlarının birleşim noktalarının hareket yeteneklerini ve serbestlik derecesini, yapı üzerine etki eden yükleri göz önüne alarak, yapının tanımlanması işlemine sayısal modelleme ya da matematiksel modelleme denir. Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'de, sırasıyla Hekimoğlu Alipaşa Camisi, İstanbul Fethiye Camisi (Pammakaritos Kilisesi) ve Davutpaşa Camisi'nin deprem dayanımını incelemek için hazırlanan sayısal modeller gösterilmiştir.



Şekil 1. Hekimoğlu Alipaşa Camisi'nin sonlu elemanlar modeli (Finite Element Model of Hekimoğlu Alipaşa Mosque)



Şekil 2. İstanbul Fethiye Camisi (Pammakaritos Kilisesi) sonlu elemanlar modeli (Finite Element Model of Pammakaritos Church)



Şekil 3. Davutpaşa Camisi sonlu elemanlar modeli (Finite Element Model of Davutpaşa Mosque)

Sayısal modellemenin amacı, yapının tamamının, belli bir bölümünün ya da taşıyıcı sistem elemanlarının çeşitli yük veya çevresel etkiler altında gerçek davranışının belirlenmesini sağlamaktır. Tarihi yapıların ve anıtların taşıyıcı sistemi çoğunlukla çok karmaşıktır. Bu nedenle, yapıyı modellemek için bir çok sadeleştirmenin yapılması zorunludur. Yalın ve basit bir model elde etmek için, taşıyıcı sistem elemanlarını oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri de doğru bir şekilde tanımlanmalıdır [7].

Doğru bir sayısal modellemenin temel prensipleri şöyledir:

- En doğru sonucu veren model her zaman en basit olanıdır. Hesapların amacı ve kapsamı dışına çıkan daha detaylı ve karmaşık modellerden kaçınılmalıdır.

- Sayısal modeldeki elemanların boyut ve şekline karar verirken, hesap için gerekli olan bütün strüktürel etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, bir kemerin yapısal analizinde eğer burulma momentinden dolayı oluşan şekil değiştirmenin değeri hesaplanacaksa, modelde kemeri tanımlayan eleman aksel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti hesaplanacak şekilde belirlenmeli ve kesit özellikleri bu değerlerin sonuçlarını verecek şekilde tanımlanmalıdır.

- Yapının tamamını kapsayan büyük bir modelin bir bölümünü ayırarak yapılan model, o bölümün ya da taşıyıcı sistem elemanının ayrıntılı davranışını incelemeye yeterli olmamaktadır. Ayrıntılı davranış için sınır koşullarını ve bağlantı şekillerini doğru bir şekilde tanımlayan modeller gereklidir.

- Yapının tamamının göreceli olarak daha az hassas bir şekilde modellenmesine "makro model", yapının strüktürel açıdan daha kritik davranış gösteren bölümlerinin ayrıntılı modellenmesine "mikro model" denir.

Sonlu Elemanlar Modeli olarak da adlandırılan sayısal model, yapının tamamının davranışını yansıtmak için sonlu elemanların bir araya getirilmesiyle elde edilir. Sonlu elemanlar analizinde öncelikle modeli oluşturan elemanların bireysel davranışı, sonra da sayısal modelin tamamının davranışı önemlidir [8].

2.1. Malzeme Davranışı (Material Behavior)

Yapı malzemesinin mekanik özellikleri hakkında yapılan kabuller, diferansiyel eleman olarak da bilinen, malzemenin çok küçük bir parçasının davranışına göre belirlenir. Diferansiyel eleman malzeme modelini oluşturur. Malzeme modelinde, yapı malzemesinin gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri göz önüne alınır. Kusursuz bir sayısal model oluşturmak için malzeme davranışı ve

elemanların bireysel davranışının çok iyi etüdü edilmesi şarttır.

Sayısal modelleme sırasında yapının taşıyıcı sistem elemanlarının malzemesinin davranışını tanımlayabilmek için öncelikle “elastisite” ve “plastisite” terimlerinin anlamını bilmek gerekir. Elastisite, malzemelerin üzerine uygulanan yüklerin geri çekilmesi sonucunda orjinal şekline dönebilme özelliğidir. Plastisite ise, malzeme üzerine etki eden yükler kaldırıldığında malzemenin eski şeklini alamaması özelliğidir.

Doğrusal analiz veya malzemenin doğrusal elastik davranışı, taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen şekil değiştirmenin sadece uygulanan yükün şiddeti ilgili olduğu anlamına gelir. Yüklemin herhangi bir aşamasında, taşıyıcı sistem elemanında oluşan şekil değiştirmenin niteliği, yükleniyor olması veya yükünün boşaltılıyor olması ile ilgili değildir. Doğrusal elastisite özelliği, yapısal analiz sırasında en çok kullanılan malzeme modelidir ve aşağıdaki kabullere dayanır:

1. Gerilmenin şiddeti arttıkça, bunun sonucunda ortaya çıkan birim şekil değiştirme miktarı da doğrusal oranda artar.
2. Gerilmenin şiddeti azaldıkça, birim şekil değiştirme miktarı da aynı doğrusal oranda azalır.
3. Malzeme homojen ve sürekli dir.

Birçok malzeme için küçük gerilme değerlerinde doğrusal gerilme-birim şekil değiştirme kabulü geçerlidir. Malzemenin sürekliliğinin göz önüne alınması, modelin tipine ve analizin amacına bağlıdır. Örneğin, beton tamamiyle sürekli bir malzeme özelliği sergilerken, yığma taş veya tuğla örgü sistemiyle üretilen taşıyıcı sistem elemanlarını oluşturan malzeme süreklilik özelliği göstermez [9].

2.2. Sayısal Modellemede Kullanılan Sonlu Elemanların Davranışı (Behavior of Finite Element in Numerical Modeling)

Tarihi yapıların çoğu kubbe ve tonoz gibi eğrisel yüzeylere sahip masif taşıyıcı sistem elemanlarından oluşmuştur. Sayısal çözümleme yöntemiyle yapılan hesaplarla güvenilir sonuçlar elde edebilmek için sade ve düzgün bir sonlu elemanlar örüntüsünün oluşturulması gereklidir. Sayısal modelde kullanılan elemanların bireysel davranışı, hesapların güvenilir sonuçlar vermesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Ancak sayısal modeli (sonlu elemanlar modeli) oluşturan bireysel sonlu elemanın modelde doğru bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Sonlu eleman analizlerinde genellikle aşağıda geometrik özellikleri tanımlanan bireysel eleman tipleri kullanılmaktadır [10].

Çubuk veya Kiriş Elemanı: Bu eleman tipi her iki eksen etrafında eğilme ve kayma şekil değiştirmesi, aksel ve burulma şekil değiştirmesi özelliği gösteren, çizgisel eleman tipidir. Genel bir çubuk elemanın altı serbestlik derecesi vardır. Yapısal analiz için hazırlanan sayısal modellerde, düğüm noktalarının koordinatları global koordinat eksenini olarak bilinen genel bir koordinat eksenine göre tanımlanır. Sonlu elemanların ise yerel koordinat eksenini olarak bilinen kendi koordinat sistemi vardır.

Genel Kabuk Elemanı: Kabuk ya da plak elemanları, kabukların, plakların, duvarların ve herhangi bir uzaysal formun yapısal analizinde kullanılır. Kabuk veya plak elemanları genellikle kendilerine üçgen veya dörtgen görünüm veren, üç ya da dört düğüm noktasının birleştirilmesiyle oluşturulurlar. Yapılacak hesabın cinsine göre sayısal modellerde her düğüm noktasında dört serbestlik derecesi vardır. Kabuk ve plak elemanlarda da hesaplar sonucunda elde edilen iç kuvvetlerin ve gerilmelerin tanımlanabilmesi için yerel eksenler vardır. Yerel eksenler genellikle düğüm noktalarının yazılış sırasına göre belirlenir.

Üç Boyutlu Katı Eleman: Üç boyutlu katı elemanlar görünümünden dolayı “tuğla” eleman olarak da bilinirler. Genellikle sekiz düğüm noktasının birleştirilmesiyle oluşan üç boyutlu katı elemanlarda yapısal analiz sonunda, altı serbestlik derecesi olan her düğüm noktasında global eksenler doğrultusunda gerilme ve şekil değiştirme sonuçları elde edilir. Masif, üç-boyutlu kütsel yapıların ve taşıyıcı sistem elemanlarının modellenmesinde kullanılırlar.

3. SAYISAL MODELLEME İÇİN BAZI TEMEL KABULLER (BASIC ASSUMPTIONS IN NUMERICAL MODELING)

Gelişmiş bilgisayar analizi teknikleriyle taş ve tuğla yığma taşıyıcı sistem elemanlarının kendi düzlemi içindeki davranışını araştırmak için bir çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar sırasında karşılaşılan önemli sorun, sayısal modelde malzemenin mekanik özelliklerini tam olarak yansıtan bir modeli oluşturmanın zorluğudur. Yığma yapı elemanları genellikle, izotropik doğrusal elastik malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak modellenirler.

Bir çok araştırmacı tarihi binaların ve anıtların yapısal analizinde elastik modeller kullanmıştır. Ancak, elastik malzeme özellikleri kullanılarak, geometrik doğrusal olmayan analiz yöntemleri geliştirmek de mümkündür. Geometrik doğrusal olmayan analiz yöntemleri, modelde çekme gerilmeleri oluşan bölgelerin sürekliliğini bozarak, adım adım çatlakları gözleyerek, birini izleyen bir dizi analizi kapsar. Bu çok uzun süren ve çatlak desenlerinin doğru bir şekilde seçilmesini gerektiren bir işlemdir [11].

Tarihi yapıların sayısal modellemesi sırasında birçok kriterin göz önüne alınması gereklidir. Yığma yapı

elemanlarının gerçek davranışını gözlemleyebilmek için, değişik modelleme yöntemleri vardır. Pratikte, yığma yapıların analizi için üç değişik yaklaşım vardır.

İlk yaklaşım doğrusal elastik modelleme tekniğidir ve yapının tamamının hiç bir çatlak ya da süreksizlik olmaksızın bütün olarak davrandığı kabulüne dayanır. Çekme kuvvetleri ve gerilmelerin olduğu alanların çatlamadığı ve çekme gerilmelerini almadığı kabul edilir.

İkinci yaklaşım yığma yapı malzemesinin çekme gerilmeleri olmaksızın strüktürel varlığını sürdürebildiği varsayımına dayanarak, modern tasarım kuramlarıyla uyumludur. Bu yaklaşımdaki sayısal model ilk yaklaşıma göre daha karmaşıktır. Analizler sırasında çekme gerilmelerinin olduğu bölgeler modeldeki süreksizliklerle tanımlanır. Bunu gerçekleştirmek için ard arda bir çok analiz yapılması gerekir ve her analizde süreksizlik çatlağın konumuna göre yeniden modellenir. Bazı doğrusal elastik olamayan analiz yapan bilgisayar programları bu tür analizler için çatlakları modellemede özel boşluk elemanı kullanılmasını sağlamaktadır. Boşluk elemanları sadece basınç gerilmelerini iletirken, çekme gerilmelerini iletmezler. Bu modelleme tekniği aynı işlevi yapan yay elemanlarıyla da yapılabilir.

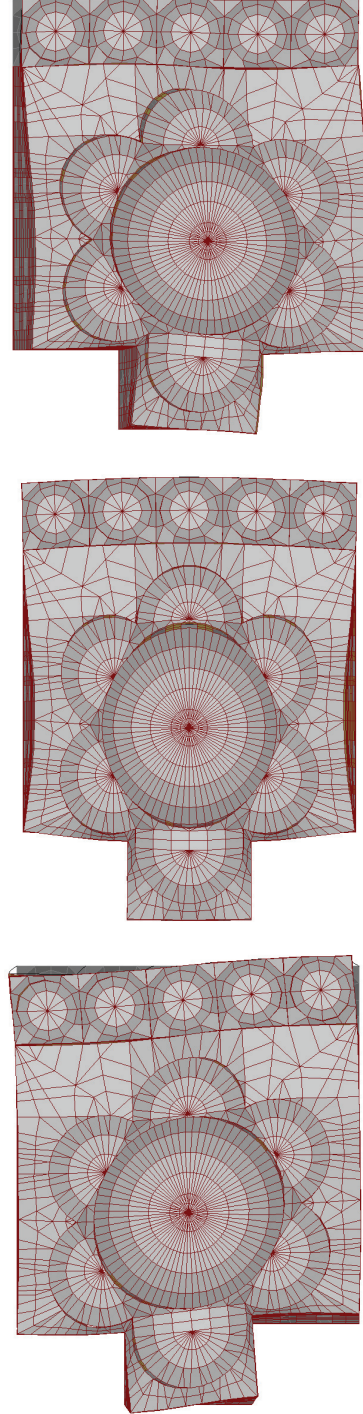
Üçüncü yaklaşımda ise, hesabı yapılacak olan yapıda veya elemanda çekme gerilmelerine karşı, harç birleşim yerleri gibi zayıf olduğu bilinen bölgeler daha ayrıntılı bir şekilde modellenir. Taş, tuğla ve harç gerçek malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak modellenir.

Yığma yapı elemanlarının analizi için çeşitli modelleme teknikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Farklı modelleme tekniklerine göre yapılan hesaplarla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, yapının tamamı göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlarda büyük farklar olmadığı görülmüştür. Ancak, modelleme sırasında yapılan kabullere bağlı olarak, bireysel elemanlarda elde edilen iç kuvvetlerde önemli farklılıklar gözlenmiştir. Buradan çıkan sonuç, yapısal analizin neyi amaçladığının kesin olarak belirlenmesinin önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Böylece sayısal modelin, yapısal analizin asıl amacına göre bazı kabuller yapılarak hazırlanması gerekmektedir [12].

4. HESAP SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (INTERPRETATIONS OF ANALYSIS RESULTS)

Hesap sonuçlarının iyi bir şekilde düzenlenmesi, elde edilen sonuçların doğru değerlendirilmesi ve yorumlanmasına yardımcı olacaktır. Bir tarihi yapı için hazırlanan orta büyüklükte bir sonlu elemanlar modeli binlerce serbestlik derecesi içerir. Bütün sonuçları aynı anda tek bir dosyada incelemek

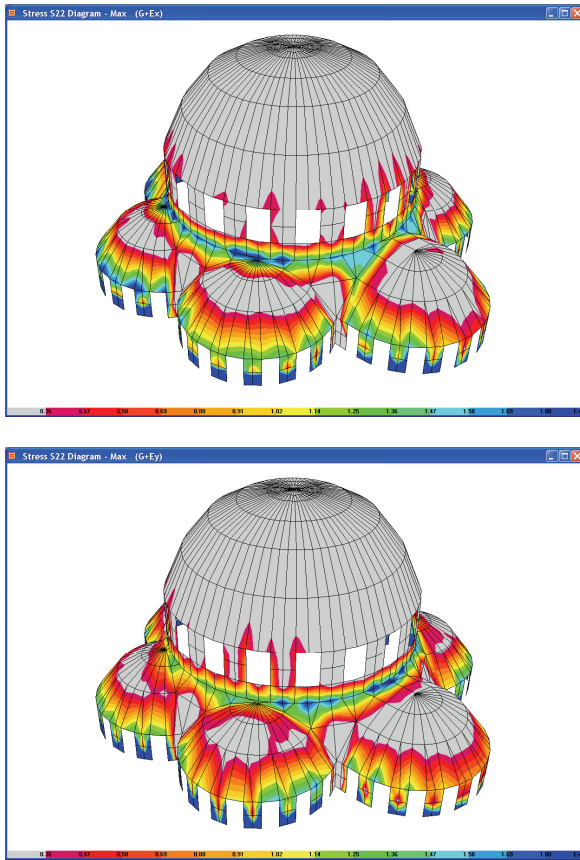
olanaksızdır. Hesap sonuçlarını yorumlamanın ve yapının davranışını anlamının en kolay yolu, yapısal analiz için hazırlanan sonlu elemanlar modelinin uygulanan yükler altında göstermiş olduğu şekil değiştirmelerdir. Şekil 4’de sonlu elemanlar yöntemiyle deprem analizi yapılan Hekimoğlu Alipaşa Camisi’nin ilk üç moduna göre şekil değiştirmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 4. Hekimoğlu Alipaşa Camisi’nin ilk üç moduna göre şekil değiştirmiş hali (First three modes of Hekimoğlu Alipaşa Mosque)

Tarihi binaların sayısal analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri ve titreşim frekansları, bu tür yapılarda deneysel yöntemlerle elde edilen yapının gerçek titreşim frekanslarıyla karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu kontrol edilebilmektedir. Bu yüzden tarihi yapıların deprem davranışını belirlemek için yapılan sayısal analizler sonucunda ilk olarak doğal periyotlarının ve mod şekillerinin değerlendirilmesi son derece önemlidir.

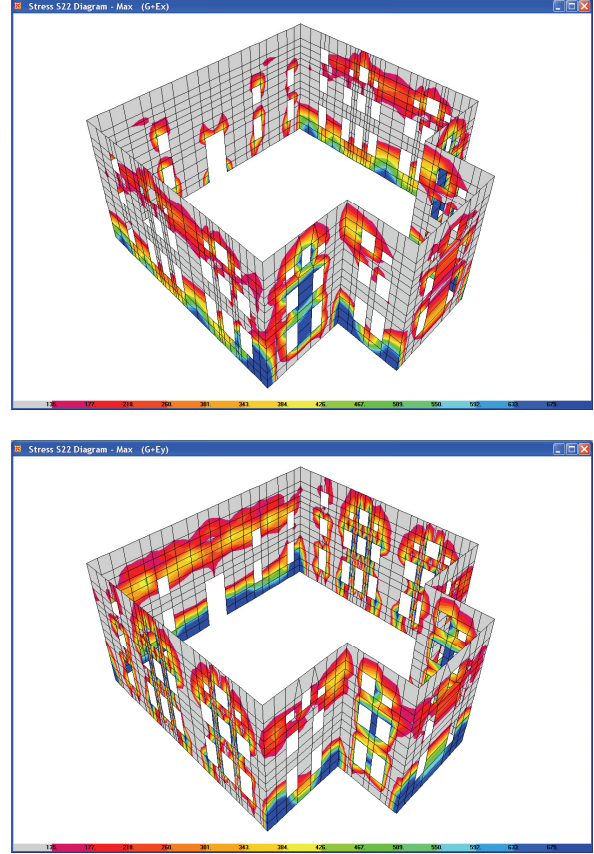
Sonlu elemanlar modelini oluşturan, çubuk eleman, genel kabuk veya plak elemanı ve üç boyutlu katı elemanlarının bireysel davranışı daha önce anlatılmıştı. Gelişmiş bilgisayar programları modeli oluşturan bireysel elemanların iç kuvvetlerini ve gerilmelerin şiddetini grafik olarak gösterme yeteneğine sahiptir.



Şekil 5. Hekimoğlu Alipaşa Camisi'nin kubbelerinde oluşan en büyük gerilmelerin renk konturlarıyla gösterilmesi (Maximum stresses developed at the dome of Hekimoğlu Alipaşa Mosque in colored contours)

Çubuk elemanlarda, her iki yerel eksen etrafında oluşan eğilme momenti (M) ve kesme kuvvetleri (V), aksenal kuvvet (N) ve burulma momenti (T) değerleri diyagramlar ve gerilme dağılımı haritalarıyla sunulur. Ancak, tarihi binalar taşıyıcı sistemlerinin geometrik özelliklerinden dolayı kabuk ve plak elemanlarıyla modellemeye daha uygundur. Kabuk ve plak elemanlarda iç kuvvetlerin aksenal kuvvet dağılımı ya da gerilme dağılımını gösteren haritalarla sunulması,

hesap sonuçların kolayca değerlendirilmesini ve yorumlanması sağlar. Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla Hekimoğlu Alipaşa Camisi'nin düşey yük ve deprem yükleri altında yapılan hesapları sonucunda, kubbelerinde ve duvarlarında oluşan en büyük gerilmelerin dağılımı renk konturlarıyla gösterilmiştir.



Şekil 6. Hekimoğlu Alipaşa Camisi'nin duvarlarında oluşan en büyük gerilmelerin renk konturlarıyla gösterilmesi (Maximum stresses developed at the walls of Hekimoğlu Alipaşa Mosque in colored contours)

Sonlu elemanlar bilgisayar programları, kayma gerilmelerini, basınç ve çekme gerilmelerini renk konturlarıyla gösterir. Böylece yapının, deprem ya da diğer yük etkileri karşısında taşıma gücü bakımından tehlike oluşturacak bölgeleri kolayca saptanır. Gerekirse bu bölgeler için daha önce sözü edilen mikro modelleme yöntemiyle daha ayrıntılı hesaplar yapılır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tarih yapıların ve anıtların strüktürel dayanımını veya performansını etkileyen en önemli unsur, çeşitli dış etkilere ve yüklere karşı direncidir. Bu nedenle tarihi yapıların strüktürel performansı ve dayanımı belirlenirken, yüklerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve yapısal analiz için hazırlanan hesap modeline hatasız bir şekilde aktarılması daha da önem kazanmaktadır. Tarihi yapıların strüktürel performansı ve dayanımını belirlemek için aşağıda belirtilen

adımlara uyularak sistemli bir çalışmanın yapılması gerekmektedir:

1. Yapının taşıyıcı sisteminin mevcut durumu dikkatli bir şekilde gözlemlenmeli, taşıyıcı sistemin durumu, çatlaklar, malzeme bozulmaları, aşırı deformasyonlar ve mesnet çökmeleri belirlenmelidir.

2. Sayısal modelleme ve yapısal analiz için ayrıntılı rölemler sağlanmalıdır. Ancak bu rölemler sadece mimari detayları ve dekoratif parçaları değil, aynı zamanda taşıyıcı sistem elemanların kesit boyutlarını ve malzeme niteliklerini de içermelidir. Örneğin, bir sütunun içinde gevşek dolgu malzemesinin bulunup bulunmadığı ya da bazı elemanların içinde metal bağlantı çubuklarının olup olmadığı, yapının strüktürel kapasitesinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için çok önemlidir.

3. Yapıya etki eden çevresel etkilerin ve yüklerin değerleri tam olarak hesaplanmalı ve analiz sırasında doğru olarak uygulanmalıdır.

4. Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanlar arasındaki etkileşim ve elemanların birleşme noktalarındaki yük aktarım mekanizması dikkatli bir şekilde incelenmelidir.

5. Yukarıda belirtilen maddelere uygun olarak yapının sayısal modeli hazırlanmalı, olası bütün yük durumları ve diğer çevresel etkiler altında hesaplar yapılmalıdır. Sayısal model yapının temel strüktürel davranışını sergilediği için, öncelikle kendi ağırlığı ve sabit yükler altında bir hesap yapılmalıdır. Yapının taşıyıcı sisteminin zayıf noktaları, düşey yük analizi sonucunda kolaylıkla saptanabilir.

Tarihi yapıların ve anıtların korunması farklı disiplinlerden gelen uzmanların birlikte çalışmasını gerektirdiğinden, yapılan hesapların sonuçlarının kolay anlaşılabilir olması çok önemlidir. Bu nedenle öncelikle yapının strüktürel davranışını anlatan, çeşitli yükler altında sergilemiş olduğu şekil değiştirmelerin yorumları yapılmalıdır. Özellikle yığma taş veya tuğla örgü sistemiyle yapılan binaların sınır gerilme değerleri, sayısal model üzerinde renk konturlarıyla gösterilmeli ve bu değerlerin ne anlama geldiği açık bir şekilde anlatılmalıdır. Şekil değiştirme diyagramları ve kritik gerilmelerin yerlerini gösteren gerilme dağılımı diyagramları, tarihi binaların ve anıtların korunması ile ilgili çalışan uzmanların kendi uzmanlık alanlarıyla ilgili sorunların da çözümü için yol gösterici olacaktır.

Kültür mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapıların ve anıtların korunması için ilgili bütün disiplinlerin ortak çalışması gerekmektedir. Farklı disiplinler, ortak amaç olan korumanın sağlıklı bir

şekilde gerçekleşmesi için bilimsel ve mesleki etik sınırları çerçevesinde, her bir disiplinin yaptığı çalışmayı bir bütünün parçası olduğunu unutmadan anlamaya ve saygı göstermeye çabalamalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lourenço, P.B., "Computations on historic masonry structures", **Progress in Structural Engineering and Materials**, Vol.4, 301-331, 2002.
2. Pena, F., et.al "Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower", **Engineering Structures**, Vol. 32, 1466-1478, 2010.
3. Ünay, A. İ., "Evaluation of the Structural Safety of Historical Masonry Buildings", **Architectural Science review**, Vol. 50(1), 26-30, 2007.
4. Mainstone, R., "Structural Analysis, Structural Insights, and Historical Interpretation", **The Journal of the Society of Architectural Historians**, Vol. 56 (3), 316-340, 1997.
5. Vintzileou, E. et.al., "Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece", **Construction and Building Materials**, Vol.21, 225-236, 2007.
6. Casolo, S., Sanjust, C. A., "Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The "Maniace Castle" of Syracuse", **Engineering Structures**, Vol.31(7), 1447-1459, 2009.
7. D' Ayala D., Speranza, E., "Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historical masonry buildings", **Earthquake Spectra**, Vol.19(3), 479-509, 2003.
8. Mallardo, V., et.al. "Seismic vulnerability of historical masonry buildings: A case study in Ferrara" **Engineering Structures**, Vol. 30, 2223-2241, 2008.
9. Pasticier, L., Amadio, C., Fragiaco, M., "Non-linear seismic analysis and vulnerability evaluation of a masonry building by means of the SAP2000 V.10 code", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Vol.137, 467-485, 2008.
10. Giordano, A., Mele, E., De Luca, A., "Modeling of historical masonry structures: Composition of different approaches through a case study" **Engineering Structures**, Vol. 24, 1057-1069, 2001.
11. D' ayala, D., "Numerical modeling of masonry structures", **Structures and Construction in Historic Building Conservation**, Ed. By Michael Forsyth, ISBN: 9781405111713, Blackwell Publishing, Oxford, 2007..
12. Ünay, A., İ., **Tarihi Yapıların Deprem Dayanımı**, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları, ISBN 975-429-189-6, Ankara, 2002

