

DÜZENSİZ GEOMETRİK ŞEKİLE SAHİP TARİHİ YIĞMA BİNALARIN SİSMİK DAVRANIŞI

Hüsnü CAN*, Joseph Kubin**, Ali İhsan ÜNAY***

* Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara

** PROTA Mühendislik, Turan Güneş Bulvarı No.27, 06550, Çankaya, Ankara

*** Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara

hunucan@gazi.edu.tr, jkubin@prota.com.tr, unay@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 13.03.2012; Kabul/Accepted: 26.04.2012)

ÖZET

Düzensiz plan geometrisine sahip olan ve büyük bir alana yayılan tarihi yığma yapılar depreme karşı iyi bir performans sergilemez. Yükseklik farkı ya da plandaki düzensizlikler ve simetrik olmayan kütle dağılımı nedeniyle, özellikle burulma momentlerinden kaynaklanan gerilmeler ortaya çıkar. Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle hesabı sırasında analitik modellemenin doğru bir şekilde yapılması analiz sonuçlarının sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada, dağınık bir plan şekline sahip olan Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın hesap modeli üzerinde iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır. Bu yüklemelerin ilki sabit yükleri, ikincisi ise deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketinin yol açtığı zorlamaları kapsamaktadır. Yapılan bu analizlerle tarihi binanın deprem etkisi altındaki performansı incelenmiştir. Analiz sonuçlarının yorumlarında dağınık plan geometrisi ve farklı yüksekliklerin neden olduğu düzensiz kütle dağılımından dolayı, tarihi yapıların analizi sırasında hazırlanan analitik modelleme tekniğinin önemine dikkat çekilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma yapılar, Deprem, Sismik davranış, Sayısal modelleme.

SEISMIC BEHAVIOR OF HISTORICAL MASONRY BUILDINGS WITH IRREGULAR GEOMETRY

ABSTRACT

Historical masonry buildings that cover a large area with irregular geometric layouts do not display sound behaviors against earthquakes. Stresses, due to torsional moments in particular, occur as a result of either different heights or irregularities in plan and unbalanced mass distributions. Accurate analytical modeling during finite element analysis is of great significance for a reliable interpretation of the analysis results. In this study, two different loadings are applied on an analysis model of Küçük Mustafa Pasha Bath. The first loading covers the analysis due to gravity loads while the second involves the loading due to ground movements defined by the earthquake spectrum. By means of these analyses, the performance of the building under the effects of earthquake is examined. In the interpretation of the results, due to the irregular mass distribution because of the uneven plan geometry and changing heights in the building, the importance of analytical modeling technique during the analyses of historical masonry buildings is emphasized.

Key Words: Historical masonry structures, Earthquake, Seismic behavior, Analytical modeling, Finite element analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kültür mirasının korunması ve geleceğe güvenle devredilmesi 21. yüzyılın önemli mühendislik araştırma ve uygulama konularının başında gelmektedir. Bu önemli konu mühendislik, mimarlık, sanat tarihi ve arkeoloji gibi bilim alanlarıyla ortak bir

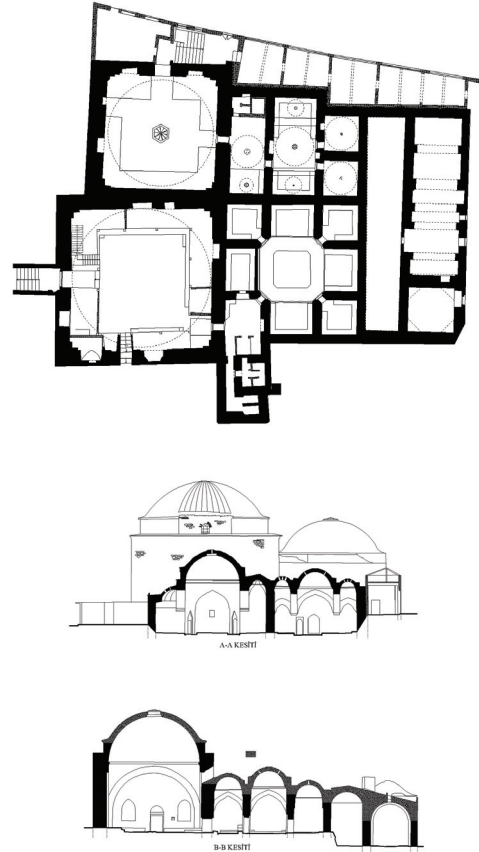
paydada bulunduğundan, son yıllarda oldukça önem kazanan disiplinlerarası çalışma gruplarının da ilgisini çekmektedir. Yapı mühendisliğinde kullanılan hesap yöntemleri bilgisayarların yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamasıyla daha hızlı bir şekilde kesin ve doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Günümüzün modern mühendislik yapılarının hesap ve

tasarımı için veri aktarımını kolaylaştıran, sonuçların entegre bir şekilde uygulama projelerine aktarılmasını sağlayan bir çok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Ancak günümüze kadar varlığını sürdürmüş tarihi yapılar genellikle mabet, saray, köprü ve kale gibi kendi devirlerinin prestij yapıları olduğundan, taşıyıcı sistemlerinin şekil ve biçimleri günümüzün modern mühendislik yapılarından farklılık gösterir. Bu nedenle, tarihi yapıların yapısal çözümlemesi için en uygun hesap yöntemi sonlu elemanlar analizidir [1, 2].

Tarihi binaların sonlu elemanlar yöntemiyle hesabının 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 söyleyemeyiz. Düzensiz plan şekline sahip ve büyük bir alana yayılan çağdaş betonarme ve çelik binalar dilatasyonlar sayesinde mimari plan değiştirilmeden yapısal anlamda birbirinden davranış ve fiziksel olarak tamamen ayrı düzenli yapılar haline getirilebilir. Modern yapı şartnameleri zaten bu tür bir düzenlemeyi zorunlu kılar. Sıcaklık farkı, sünme ve büzülme gibi zamana bağlı deformasyonlar, farklı zemin oturmaları gibi etkenler planda büyük boyutları olan binaların yapısal davranışını olumsuz yönde etkilerken, bazı taşıyıcı sistem elemanlarında aşırı gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olur. Düzensiz plan geometrisine sahip tarihi yapılarda, kütlesi ve yüksekliği bakımından farklı olan bölümler dilatasyon bırakılmadan yapısal anlamda bir bütün olarak inşa edilmiştir. Özellikle deprem sırasında kütle farkının büyük olduğu bölümlerde çatlaklar meydana gelir ve bu çatlaklar genellikle yapının sismik davranışını değiştirir. [3, 4].

Bu çalışmada İstanbul İli, Fatih İlçesi Küçük Mustafa Paşa Mahallesi'nde yer alan, dağınık plan geometrisi ve kütle düzensizliğine sahip, Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın olası bir deprem karşısında yapısal davranışının belirlenmesi ve deprem dayanımının saptanması için yapılan sonlu elemanlar yöntemine dayalı hesabının sonuçları sunulmuştur. İkinci Bayezit'in vezirlerinden Mustafa Paşa'nın adıyla anılan bu yapı 1477 yılında inşa edilmiştir. İstanbul'da saltanat süren ikinci Osmanlı Padişahı devrinden olması nedeniyle, Küçük Mustafa Paşa Hamamı İstanbul'daki en eski Osmanlı eserlerinden biridir [5].

Küçük Mustafa Paşa Hamamı, 38 m × 47 m boyutlarında, dikdörtgen şeklinde bir plana sahiptir. 17 m × 17 m boyutlarındaki erkekler bölümünün üzerindeki kubbenin çapı 16 metre, 14 m × 13 m boyutlarındaki kadınlar bölümünün üzerindeki kubbenin çapı ise 11 metredir. Büyük kubbenin mesnetlerinden itibaren yüksekliği 19.7 m, küçük kubbenin mesnetlerinden itibaren yüksekliği ise 16.1 metredir. Duvarların kalınlığı 1 metre, kubbelerin kalınlığı ise 50 cm dir.



Şekil 1. Küçük Mustafa Paşa Hamamı plan ve kesitler (Küçük Mustafa Pasha Bath plan layout and sections)

2. SONLU ELEMANLAR MODELİ VE HESAPLAMANIN ANA HATLARI (FINITE ELEMENT MODEL AND MAIN FEATURES OF STRUCTURAL ANALYSIS)

Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın sonlu elemanlar modeli SAP2000 programının modelleme özellikleri ve kurallarına göre hazırlanmıştır [6]. Yapının matematiksel modelinin oluşturulması için gerekli olan bütün geometrik boyutlar ve ölçüler, daha önce hazırlanmış olan rölöveler kullanılarak elde edilmiştir. Modelleme ve hesap parametreleri aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Ana kubbe, tonozlar, küçük kubbeler, ana kütlelerin duvarları ve diğer bütün duvarlar SHELL elemanları ile modellenmiştir.

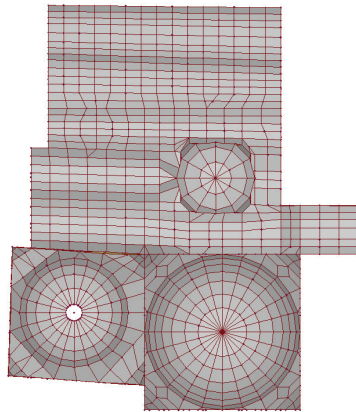
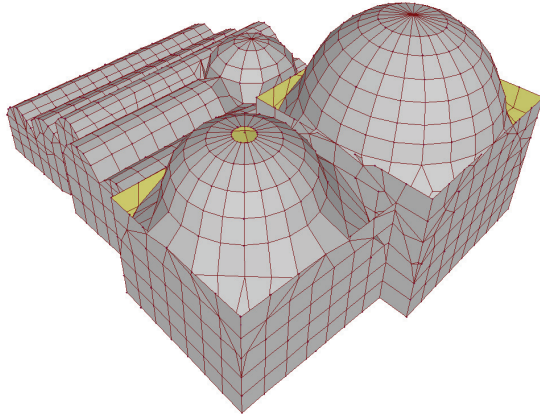
-Hesaplarda kullanılan model 1760 düğüm noktası ve 1863 SHELL elemanı ile hazırlanmıştır.

-Yapı elemanlarının malzeme özellikleri, benzer yapılar için daha önce yapılan çalışmalar sonucu üretilmiş ve uluslararası literatürde önerilen bağıntılardan yararlanılarak, yürürlükte olan Deprem Şartnamesinde yığma yapılar için önerilen değerler dikkate alınarak seçilmiştir [7][8].

-Tuğla veya taş yığma yapı elemanlarının, harç ile birlikte tek bir malzeme özelliği gösterdiği kabul edilerek elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır.

-Hazırlanan hesap modeli üzerinde, sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketinin yol açtığı zorlamaların göz önüne alındığı iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır. Spektrum, EQx ve EQy yüklemesi olmak üzere ayrı ayrı iki asal doğrultuda uygulanmıştır.

-Sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, G + EQx (Sabit yükler + x eksenli doğrultusundaki deprem yüklemesi) ve G + EQy (Sabit yükler + y eksenli doğrultusundaki deprem yüklemesi) olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.



Şekil 2. Sonlu elemanlar modeli (Finite Element Model)

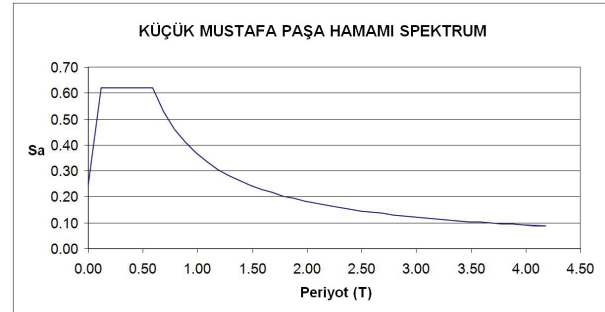
-Deprem etkilerinin belirlendiği spektral hesapta ilk 40 mod dikkate alınmıştır.

-Sonuçların değerlendirilmesi sırasında, deprem etkisi veya sabit yüklerde herhangi bir azaltma yapılmamıştır (R=1). Ancak, hesap sonucunda bulunan gerilmeler, emniyet gerilmelerinin 3 faktörü ile büyütülmesi ile elde edilen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın sonlu elemanlar hesap modelinde kabul edilen bazı malzeme özellikleri Tablo 1. de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sonlu Elemanlar Modelindeki Malzeme Özellikleri. (Material Properties of Finite Element Model)

Eleman Tipi	Elastisite Modülü E (kN/m ²)	Özgül Ağırlık (kN/m ³)	Kütle (t/m ³)
Tuğla Kubbe ve Pandantifler (harç ile birlikte)	1200000 (1200 MPa)	24	2,45
Taş Duvarlar (harç ile birlikte)	450000 (450 MPa)	24	2,45

Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın dinamik hesaplarında kullanılan spektrum değeri Şekil 3 de gösterilmiştir. Dinamik hesap için spektrum eğrisi 17 Ağustos 1999 depremi kayıtlarından alınmıştır [9].



Şekil 3. Dinamik hesap için spektrum eğrisi (Spectrum curve for dynamic analysis)

3. SONLU ELEMANLAR HESABI (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Türkiye Deprem Yönetmeliğinde, tuğla yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi $f_{em}=0,8$ MPa, taş yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi $f_{em}=0,3$ MPa olarak önerilmektedir. Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın depreme karşı dayanımı, yapılan hesap sonunda elde edilen gerilmelerin emniyet gerilmeleriyle karşılaştırılması ile yorumlanabilir. Hesap sonucunda elde edilen kuvvetlerde herhangi bir azaltma yapılmamıştır (R=1). Buna karşılık, emniyet gerilmeleri 3 katsayısı ile büyütülmüştür. Böylelikle, kubbe ve tonozlarda tuğla için sınırlayıcı gerilme;

$$f_m = 0,8 \times 3 = 2,4 \text{ MPa} \quad (1)$$

duvarlar ve kemerlerde taş için taşıma gerilmesi;

$$f_m = 0,3 \times 3 = 0,9 \text{ MPa} \quad (2)$$

kabul edilmiştir.

Çekme emniyet gerilmeleri, basınç emniyet gerilmesi olarak belirlenen değerlerin %15'i olarak kabul edilebilir. Bu durumda, kubbe ve tonozlarda tuğla için çekme emniyet gerilmesi;

$$f_{m(\text{çek})} = 2,4 \times 0,15 = 0,36 \text{ MPa} \quad (3)$$

duvarlar ve kemerlerde taş için çekme emniyet gerilmesi;

$$f_{m(\text{çek})} = 0,9 \times 0,15 = 0,135 \text{ MPa} \quad (4)$$

kabul edilmiştir.

Deprem hesabı sonucunda ortaya çıkan kayma gerilmeleri (Kabuk elemanlarındaki S12 gerilmeleri) aşağıdaki denkleme göre hesaplanan kayma sınır gerilmesi (τ_m) ile karşılaştırılmıştır.

$$\tau_m = \tau_o + \mu\sigma \quad (5)$$

Bu denklemde τ_m = duvar sınır gerilmesi, τ_o = duvar çatlama emniyet gerilmesi, μ = sürtünme katsayısı (0.5 olarak alınabilir), σ ise duvar düşey gerilmesidir. Ana kubbe, pandandifler ve küçük kubbelerde tuğla için duvar çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0,15 \times 3 = 0,45 \text{ MPa} \quad (6)$$

duvarlar ve kemerlerde taş için çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0,10 \times 3 = 0,30 \text{ MPa} \quad (7)$$

kabul edilmiştir.

Deprem yönetmeliğinde önerildiği gibi duvar düşey gerilmelerinin ilgili yapı elemanları için belirlenen basınç emniyet gerilmelerinden büyük olmadığı varsayımı ile; ana kubbe, pandandifler ve küçük kubbelerde tuğla için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0,45 + 0,5 (2,4/2) = 1,05 \text{ MPa} \quad (8)$$

duvarlar ve kemerlerde taş için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0,30 + 0,5 (0,9/2) = 0,53 \text{ MPa} \quad (9)$$

kabul edilmiştir [7].

Tablo 2. Malzeme Grupları için Emniyet Gerilmeleri. (Allowable Stresses for Material Groups)

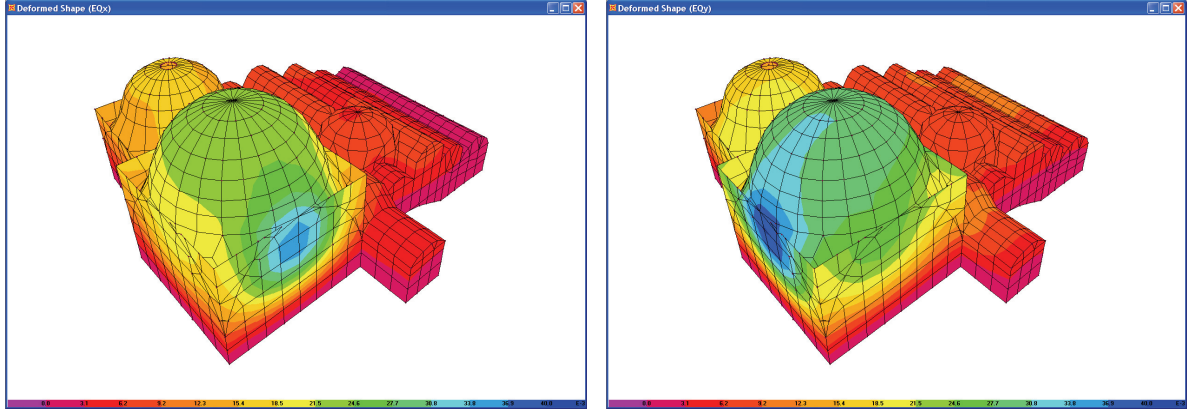
Malzeme Tipi	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Emniyet Gerilmesi (MPa)	Kayma Emniyet Gerilmesi (MPa)
Tuğla Kubbe ve Pandantifler	2,4	0,36	1,05
Taş Duvarlar ve Kemerler	0,9	0,135	0,53

Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın yapısal hesabı yukarıda belirtilen yük kombinasyonlarına göre SAP2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir. Hesap sonuçlarının yorumu SAP2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır [6]. Tablo 3'de dinamik hesap sonucunda elde edilen periyotlar ve kütle katılım oranları gösterilmiştir.

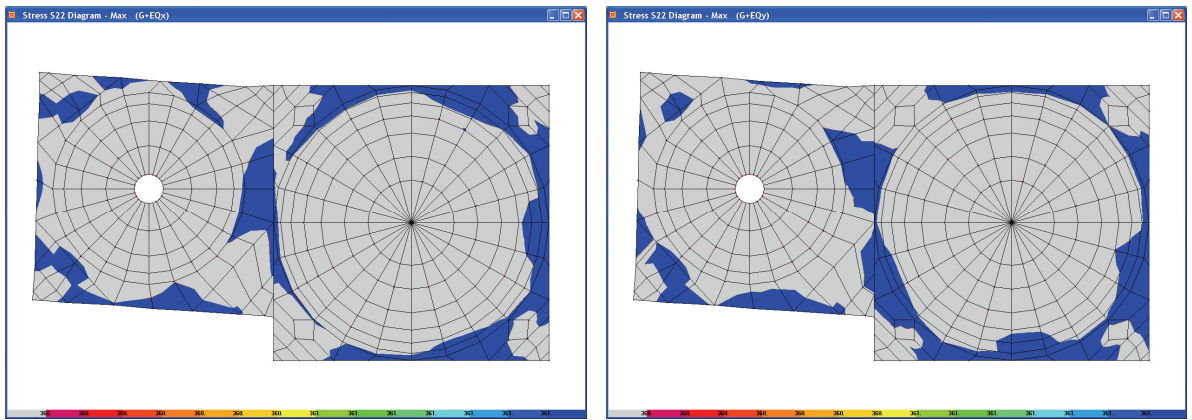
Tablo 3. Modlara Göre Periyotlar ve Kütle Katılım Oranları (Periods of Modal Shapes and Mass Participation Proportions)

Mod	Periyot (Sn)	X yönü Kütle Katılım Oranı	Y Yönü Kütle Katılım Oranı
1	0,34	0,04	0,43
2	0,31	0,44	0,51
3	0,26	0,53	0,60
4	0,24	0,54	0,60
5	0,22	0,54	0,79
40	0,08	0,86	0,85

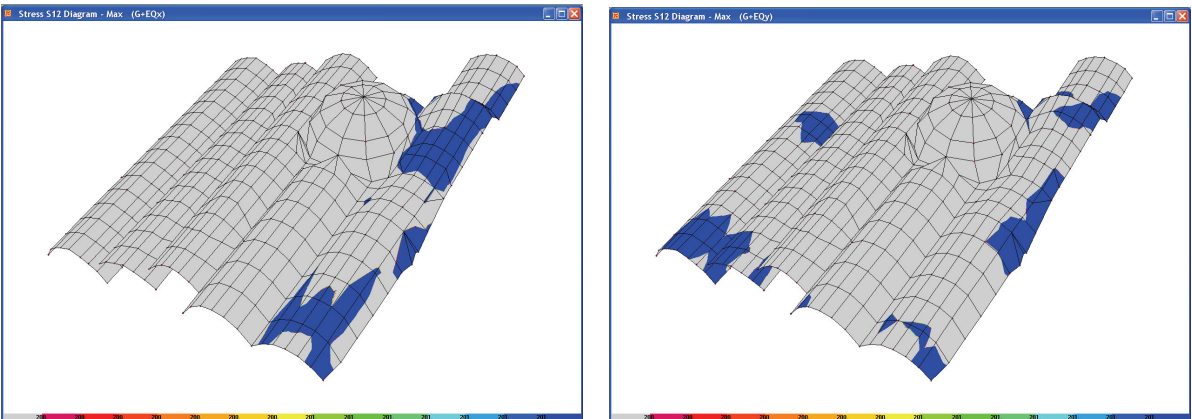
Yapının toplam ağırlığı **111502 kN**, güneybatı-kuzeydoğu (modele göre X yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti **33591 kN**, güneydoğu-kuzeybatı (modele göre Y yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altındaki toplam taban kesme kuvveti **36078 kN** olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, yapının maruz kaldığı taban kesme kuvveti, x yönünde toplam ağırlığının %30'na, y yönünde ise %32'ne karşılık gelmektedir. X yönündeki deprem yüklemesi sonucunda x yönündeki en büyük ötelenme Şekil 4'de görüldüğü gibi $\Delta_x=36$ mm, Y yönündeki deprem yüklemesi sonucunda y yönündeki en büyük ötelenme ise $\Delta_y=38$ mm'dir. Şekil 4'te deprem yüklemeleri sonucunda X ve Y yönündeki ötelenmeler gösterilmiştir.



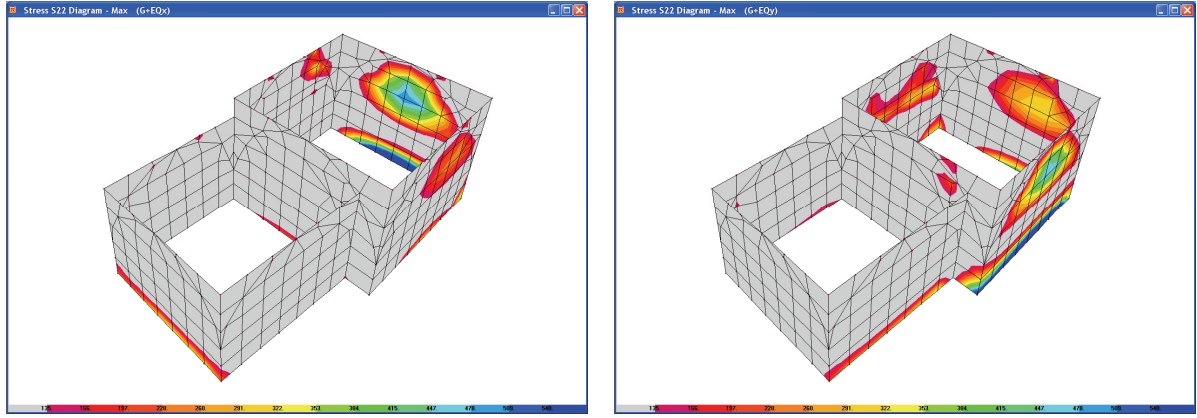
Şekil 4. Deprem yüklemeleri sonucunda X ve Y yönündeki ötelenmeler (Displacements along X and Y direction due to earthquake loadings)



Şekil 5. G+EQx ve G+EQy yüklemeleri sonucunda kubbelerde meydana gelen S22 çekme gerilmeleri (S22 tensile stresses appeared at domes due to G+EQx and G+EQy loadings)



Şekil 6. G+EQx ve G+EQy yüklemeleri sonucunda tonozlarda meydana gelen S12 kayma gerilmeleri (S12 Shear stresses appeared at vaults due to G+EQx and G+EQy loadings)



Şekil 7. G+EQx ve G+EQy yüklemeleri sonucunda kubbeleri taşıyan duvarlarda sınır değerleri aşan S22 çekme gerilmeleri (S22 tensile stresses above limiting values at the walls of main domes due to G+EQx and G+EQy loadings)

Tablo 4. Çeşitli eleman gruplarında elde edilen en büyük gerilmeler (S22) (Maximum stresses (S22) acquired at various building components)

Eleman Grubu			G + EQx Yüklemesi MPa	G + EQy Yüklemesi MPa
Kubbe ve Pandantifler	Üst Yüzey	Basınç	-2,7	-2,5
		Çekme	1,6	1,6
	Alt Yüzey	Basınç	-1,6	-1,7
		Çekme	1,0	0,9
Duvarlar	Üst Yüzey	Basınç	-1,6	-1,8
		Çekme	0,8	0,9
	Alt Yüzey	Basınç	-1,4	-1,4
		Çekme	0,8	0,8
Küçük Kubbeler	Üst Yüzey	Basınç	-1,5	-2,7
		Çekme	1,4	2,6
	Alt Yüzey	Basınç	-1,5	-2,0
		Çekme	1,2	2,4
Diğer Duvarlar ve Kemerler	Üst Yüzey	Basınç	-0,8	-0,9
		Çekme	0,4	0,5
	Alt Yüzey	Basınç	-0,8	-1,2
		Çekme	0,3	0,6

Tablo 5. Çeşitli eleman gruplarında elde edilen en büyük kayma gerilmeleri (S12) (Maximum shear stresses (S12) acquired at various building components)

Eleman Grubu		G + EQx Yüklemesi MPa	G + EQy Yüklemesi MPa
Kubbe ve Pandantifler	Üst Yüzey	0,7	0,4
	Alt Yüzey	0,7	0,4
Duvarlar	Üst Yüzey	0,4	0,3
	Alt Yüzey	0,6	0,4
Küçük Kubbeler	Üst Yüzey	1,0	1,3
	Alt Yüzey	0,8	1,1
Diğer Duvarlar ve Kemerler	Üst Yüzey	0,2	0,5
	Alt Yüzey	0,2	0,2

Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın depreme karşı dayanımını belirlemek için yapılan sonlu elemanlar hesabının, SHELL elemanlarında hesaplanan gerilmelerden, her elemanın kendi yerel eksenine göre düşey doğrultuda (SAP2000 programının formatına göre S22 olarak tanımlanan) meydana gelen çekme veya basınç gerilmeleri ile (SAP2000 programının formatına göre S12 olarak tanımlanan) kayma gerilmeleri yapının deprem dayanımı hakkında en açıklayıcı sonucu vermektedir. Bunlar sırasıyla düşey basınç ve deprem etkisi altındaki kayma gerilmelerine karşılık gelmektedir.

Yapının davranışını etkileyen karakteristik yapı elemanları Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterildiği gibi, S22 ve S12 gerilme değerleri için $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşimlerine göre ayrı ayrı hazırlanan gerilme haritaları kullanılarak incelenmiştir. Şekil 5'de $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yüklemesi için küçük kubelerde meydana gelen S22 çekme gerilmeleri gösterilmiştir. Şekildeki koyu renkli bölgeler tuğla için çekme gerilmesi sınırı kabul edilen $f_{m(çek)} = 36$ MPa'dan büyük çekme gerilmelerinin olduğu yerleri göstermektedir. Şekil 7'de, $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yüklemeleri sonucunda, ana kubbeyi taşıyan duvarlar için sınır değer kabul edilen $f_{m(çek)} = 0.135$ MPa'nın iki katı olan 0.27 MPa'dan büyük çekme gerilmeleri koyu renkle gösterilmiştir. Şekilin altında gri tonla gösterilen sınır değerlere göre gerilme dağılımı görülebilir.

Yapının taşıyıcı sistem elemanları: "Kubbe ve pandantifler", "Duvarlar", "Küçük kubeler" ve "Diğer duvarlar ve kemerler" olmak üzere 4 ayrı kategoride, $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşimleri için S22 ve S12 gerilmelerine göre ayrıntılı incelenmiştir. Tablo 4 ve Tablo 5'de her bir grup elemanları için en büyük basınç ve çekme gerilmeleri ile kayma gerilmeleri SHELL elemanlarının en üst ve en alt yüzeyleri için ayrı ayrı gösterilmiştir.

4. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF ANALYSIS RESULTS)

Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin elastik özelliklerini tahmin etmek oldukça zordur. Zaman etkisi, yapıda yıllar boyunca meydana gelen çatlama, oturmalar, rölöve bilgilerinin taşıyıcı sistem elemanlarını yeterince ayrıntılı göstermemesi gibi faktörler doğrusal elastik olmayan yöntemlerle hesap yapılmasını gerektiren faktörlerden sadece bir kaçıdır. Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın sonlu elemanlar hesabı doğrusal elastik malzeme özelliklerine göre yapılmış ve yapının deprem etkileri altındaki performansı incelenmiştir. Bu boyuttaki bir yapının doğrusal elastik olmayan hesap yöntemiyle deprem performansının incelenmesi, hazırlanan hesap modeli çok ayrıntılı yapılmış olsa bile, hesaplar sırasında yapılan iterasyonlar elde edilecek sonuçların

doğruluğu hakkında mutlaka şüphe uyandıracaktır [10]. Yapılan ayrıntılı hesaplar sonucunda Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın olası bir deprem sırasındaki davranışı ve taşıyıcı elemanlarının karşılaştıkları kuvvet ve gerilme etkilerine dayanımı ile ilgili şu gözlemler yapılmıştır.

-Hesap spektrumu Şekil 3'de verilen deprem etkisine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen en büyük ötelenme değerleri kubbenin en üst noktasında x yönünde 36 mm ve y yönünde ise 38 mm'dir. Bu noktanın yere göre kotu 20 m olduğu göz önüne alındığında 0,002 görelî yerdeğiştirme oranına karşı geldiğinden kabul edilebilir sınırların içinde kalmaktadır. Çünkü bu görelî yerdeğiştirme sınırında duvarlarda yapıldıkları malzemeye bağlı olarak çatlamanın ortaya çıkması beklenebilir ise de yıkılmanın uzak bir olasılık olduğu söylenebilir.

-Yapının sismik performansının değerlendirilmesinde sadece en büyük yerdeğiştirme değil bütün noktalarının hangi oranlarda yerdeğiştirdiğinin bilinmesi ön plana çıkmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi çok sayıda düğüm noktasının birleştirilmesi ile elde edilen yapı modelinin öngörülen deprem etkisi altında nasıl bir performans gösterdiği, yer değiştirmelerin lokal gerilmelere dönüştürülmesi ile görülebilir.

-Yapı içerisindeki rijitlik düzgün olmayan bir şekilde dağılmıştır. Bu bakımdan hesaplarda sadece en düşük birkaç modu gözönüne alarak doğru sonuç elde etmek neredeyse olanaksızdır. Dolayısıyla analizler ilk 40 mod kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

-Yapısal analizler sonucunda elde edilen etkilerin incelenmesinde, Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın taşıyıcı elemanlarında Türk Deprem Yönetmeliğinde yiğma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin aşılmadığı gözlenmiştir.

-Çekme gerilmelerinin ise sadece boşluk köşelerinde ve duvar alt köşe bölgelerinde küçük alanlarda aşıldığı gözlenmiştir. Kullanılan elemanların ağ yapısı ve mesnet koşulları gereği yatay yüklemelerde bu gerilmelerin oluşması kabul edilebilir düzeydedir.

-Yapılan gerilme hesapları sırasında, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin literatür araştırması ve mevcut yönetmeliklerde önerilen değerler doğrultusunda belirlenmiş olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda, yapının belirli yerlerindeki olası malzeme bozulmalarının ya da taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek malzeme kayıplarının yapının davranışını etkileyebileceği söylenebilir. Ancak, elde edilen deplasmanlar ve gerilmeler kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığından, bu tür bir varsayım sonucunda bile Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın depreme karşı

dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmesi olasılığı çok zayıftır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tarihi yapıların sismik performansının belirlenmesi için en elverişli yöntem sonlu elemanlar hesabıdır. Güvenilir sonuçlar veren bir sonlu elemanlar hesabı için, yapının taşıyıcı sistem elemanlarının boyutları ve malzeme özellikleri analitik modelde doğru olarak tanımlanmalıdır. Düzenli bir taşıyıcı sistemi olan yapılar için hazırlanacak modellerde bunları yerine getirmek çok zor değildir. Ancak geometrik ölçüleri ve malzeme özellikleri değişken olan, doğrusal elastik malzeme özelliği taşımayan ve tek bir taşıyıcı sistem elemanında taş+harç ve tuğla+harç+ahşap gibi birden çok değişik malzeme bulunan tarihi yapıların doğru bir şekilde modellenmesi çok daha önemlidir.

Düzensiz plan geometrisinin, uzun yıllar önce yapımı gerçekleştirilen tarihi yapılarda modern mühendislik tasarım kurallarının ve yapım yöntemlerinin gerektirdiği dilatasyon gibi, yapıların daha düzenli sismik davranış göstermesini sağlayacak kolaylıklardan yoksun olması, bu yapıların sismik davranışlarını olumsuz yönde etkiler.

Yığma tuğla veya taş örgü yöntemiyle inşa edilen tarihi yapıların doğrusal elastik analiz ile yapısal performanslarının gerçekçi bir biçimde hesaplanması ve taşıyıcı sistem elemanlarının taşıma gücünün aşılmadığı tam olarak belirlenemez. Doğrusal olmayan hesap yöntemleri, malzeme özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde tanımlanması koşuluyla bu elemanların kapasitelerinin daha doğru hesaplanmasını sağlayabilir. Ancak, doğrusal elastik olmayan hesap yöntemleri çok büyük ve karmaşık geometriye sahip yapılarda iterasyonlar sırasında ortaya çıkan daha önemli hatalara neden olur.

Küçük Mustafa Paşa Hamamı gibi karmaşık geometriye sahip yapıların, bazı ana blokların çok küçük yapı elemanlarıyla birbirlerine bağlanmış olmaları halinde bile bir bütün olarak modellenmesi sismik performanslarının doğru belirlenmesi için çok önemlidir. Bu ölçekteki binaların genel yapısal davranışının ve sismik performansının belirlenmesi için doğrusal elastik hesap yöntemleri yeterlidir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar teorik yöntem ve yapılan kabullerle sınırlıdır. Bu sonuçların ayrıca doğrusal olmayan yöntemlerle ve deneysel çalışmalarla değerlendirilmesi gereklidir.

6. SEMBOLLER (SYMBOLS)

f_{em}	Basınç emniyet gerilmesi
$f_{m(\text{çek})}$	Çekme emniyet gerilmesi
τ_m	Duvar kayma sınır gerilmesi
τ_o	Duvar çatlama kayma emniyet gerilmesi
μ	Sürtünme katsayısı
σ	Duvar düşey gerilmesi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Croci, G., **The Conservation and Structural restoration of architectural heritage**, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1998.
2. Ünay, A., İ., **Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı**, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara, 2002.
3. Betti, M. And Vignoli, A., “Modelling and Analysis of a Romanesque Church under Earthquake Loading: Assessment of Seismic Resistance”, **Engineering Structures**, Vol. 30, No: 2, 352-367, 2008.
4. Yi, T., Moon, F. L., Leon R. T. And Kahn, L. F., “Analyses of a Two-Story Unreinforced Masonry Building”, **Journal of Structural Engineering, ASCE**, Vol. 132, No: 5, 653-662, 2006.
5. Aslanapa, O., **Osmanlı Devri Mimarisi**, İnkılap Kitapevi, İstanbul, 2004.
6. **SAP 2000**, Computer Program, Computers and Structures, Berkeley, USA, 2000.
7. **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik**, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007
8. Giordano, A., Mele, E., & De Luca A., “Modeling of historical masonry structures: Composition of different approaches though a case study”, **Engineering Structures**, Vol. 24, 1057-1069, 2001.
9. Kalkan, E. ve Gülkan, P., “Site-Dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey”, **Earthquake Spectra**, Vol. 20, No:4,1111-1128, 2004.
10. Lourenço, P. B. “Computations on historic masonry structures”, **Progress in Structural Engineering Materials**, Vol. 4, 301-319, 2002.