



Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi

Dergiye Geliş Tarihi: 08.09.2013
Yayına Kabul Tarihi: 11.10.2013

Baş Editör: Naim Çağman
Danışman Editör: Ekrem Buhan

Tarihi Niksar Kulak Kümbetinin Deprem Altındaki Sismik Davranışının Değerlendirilmesi

Murat ÇAVUŞ (murat.cavus@gop.edu.tr)

Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Taslıçiftlik Yerleşkesi, 60250 Tokat

Özet – Restorasyon çalışmalarında ağırlıklı olarak geleneksel yöntemlerle ve geleneksel malzeme kullanımıyla onarım tercih edilmektedir. Bir başka yöntem yapının çağdaş malzemelerle restorasyonunun yapılmasıdır. Ancak burada da yeni malzeme ile geleneksel malzemenin birlikte kullanımından dolayı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların bir kısmı farklı malzemelerin birbiriyle etkileşiminden kaynaklanan sorunlar, bir kısmı ise yapısal sorunlardır. Bu çalışmada, yapısal sorunlar göz önüne alınarak model bir yapı seçilmiştir. Seçilen yapı, SAP2000 bilgisayar programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek analizi yapılmıştır. Yapılan bu analizlerle tarihi yapının deprem etkisi altındaki performansı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler –
Tarihi yapı,
Restorasyon, Deprem,
Sonlu elemanlar
yöntemi

Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research 7 (2013) 80-90

Assessment of Seismic Behavior of Historical Niksar Kulak Tomb Under Earthquake

Abstract – It is preferred to use traditional methods and traditional materials for repair in restoration works. Another method is to perform the restoration of the building with contemporary materials. However, some problems occur while using the new materials with the traditional materials. Some of these problems emerge because of the interaction of different materials, and the others are structural problems. In this study, is selected for the investigation of structural problems. The tomb is analyzed by using SAP2000 computer program with the finite element method. By means of these analyses, the performance of the structure under the effects of earthquake is examined.

Keywords –
Historical structure,
Restoration,
Earthquake, Finite
element analysis

Received: 17.07.2013

Accepted: 25.09.2013

1. Giriş

Birçok tarihi yapıya sahip olan ülkemiz, önemli aktif faylar üzerinde bulunmaktadır. Bu nedenle ülkemizde tarihi yapıları tehdit eden faktörlerden en önemlisi depremlerdir. Tarihi yığma taş veya tuğladan yapılmış bir yapının depreme karşı ne kadar güvenli olduğunu öğrenmek için iyi hazırlanmış analiz modeliyle deprem analizi yapılmalıdır. Ancak tarihi yapıların günümüzdeki yapılardan farklı olan özellikleri yapısal analizi zorlaştırmaktadır. Taş, tuğla ve harçtan oluşan yapı elemanlarının değişik fiziksel ve mekanik özellikler göstermesi analiz sırasında gerçek malzeme özelliklerinin tanımlanmasını zorlaştırmaktadır [1,2]. Ayrıca ana taşıyıcı elemanlarla, yüzeyleri kaplamak için kullanılmış diğer elemanları ayırmak oldukça güçtür [3].

Tarihi yapıların onarılması için öncelikle strüktürel davranışlarının tam olarak bilinmesi gereklidir. Yapıların davranışını gelişmiş hesap yöntemleriyle ayrıntılı bir şekilde incelemek mümkündür. Çoğu eğrisel geometrik formda olan yığma taş ve tuğla sistemli tarihi yapıların yük taşıyan elemanlarının 3-boyutlu yapısal davranış sergilemesi sonlu elemanlar analizini, tarihi yapıların davranışının incelenmesinde en elverişli hesap yöntemi haline getirmektedir [4,5].

Bu çalışmada Niksar Kulak Kümbeti'nin, taşıyıcı sistem performansının sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi amacıyla yapılacak hesaplar için matematiksel modelleme tekniği oluşturulmuştur. Örnek çalışma olarak seçilen Niksar Kulak Kümbeti'nin sonlu elemanlar hesabı yapılarak taşıyıcı sistem performansı incelenmiştir.

2. Niksar Kulak Kümbeti'nin Mimari ve Yapısal Özellikleri

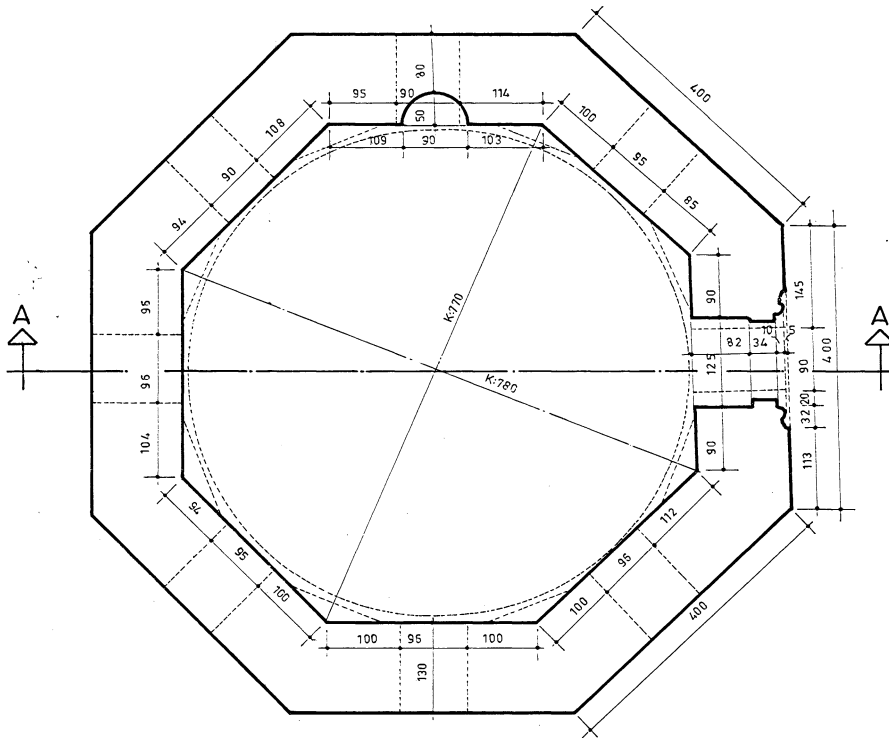
Kulak Kümbeti, Niksar ilçe merkezinin doğusunda bulunan Melik Gazi Mezarlığında, Akyapı Kümbeti ve Melikgazi Türbesi'nin yanında yer almaktadır (Şekil 1). Yapının tarihi ile ilgili herhangi bir belge bulunmamaktadır. Ancak giriş kapısı üzerindeki kitabeden yapının banisinin Selçuklu Emiri Arslan Toğmuş'un ve yapının XII yüzyıla ait olduğu düşünülmektedir. Yapı sekizgen bir şemaya sahip olup taştan inşa edilmiştir. Sekizgenin dış ölçüleri kenar uzunlukları itibarıyla 3.95-3.96 m arasında değişmektedir. Aynı şekilde içeride kenar uzunlukları 2.75-2.85 m arasında değişmektedir ve son derece sade bir mimariye sahiptir (Şekil 2).

Yapının girişi kuzeybatıdan 1.10 m genişliğinde bir kapıyla sağlanmıştır. Tüm duvarlarda dışa açılan pencereler mevcuttur. Sekiz kenarının ölçüleri ancak iki ila on cm civarında değişiyor olması, inşaatın ne kadar özenli yapıldığının bir göstergesidir [7,8,9].

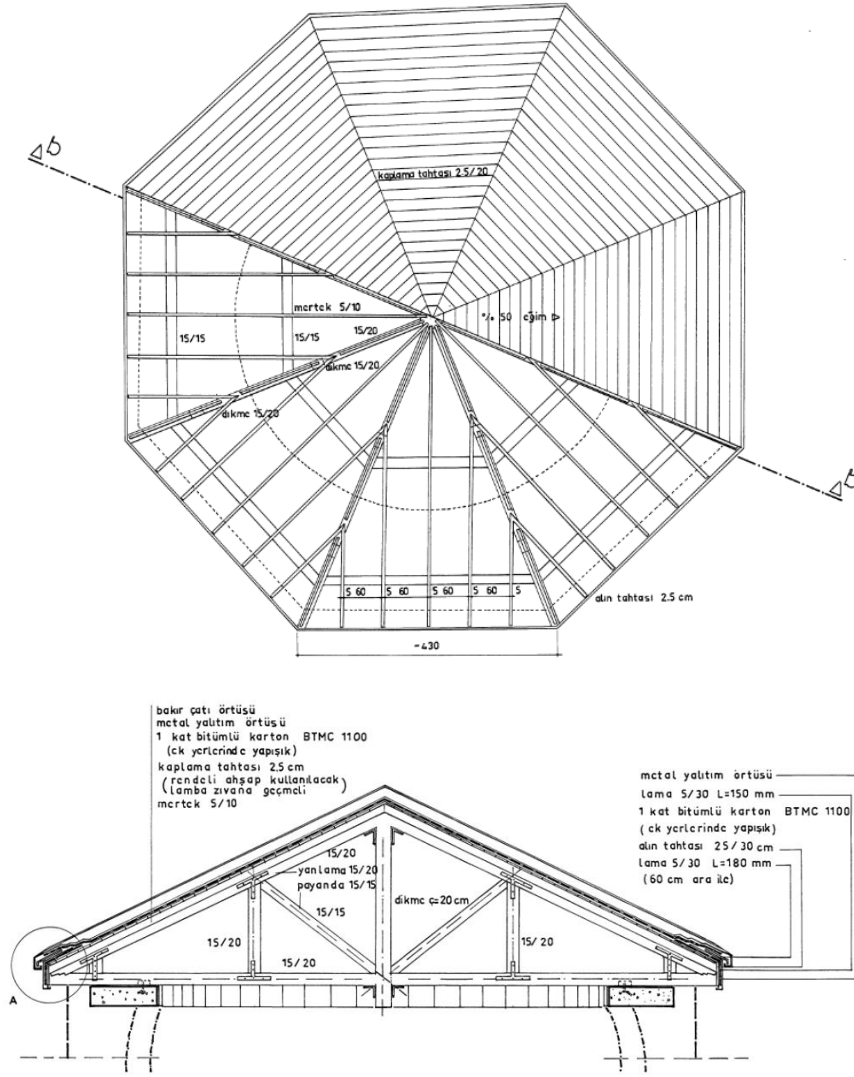
Üst örtüsünün kubbe olduğu eski resimlerinden anlaşılan yapıda, 1989 yılında yapılan restorasyon çalışması sonucu üst örtünün ahşap bir konstrüksiyonla desteklendiği, dıştan ise Şekil 3'de görüldüğü gibi piramidal külahla tamamlandığı anlaşılmaktadır [8].



Şekil 1. Kulak Kumbetinin günümüzdeki hali



Şekil 2. Kulak Kumbetinin Planı [6]



Şekil 3. Kümbetin Ahşap çatısının planı ve kesiti [6]

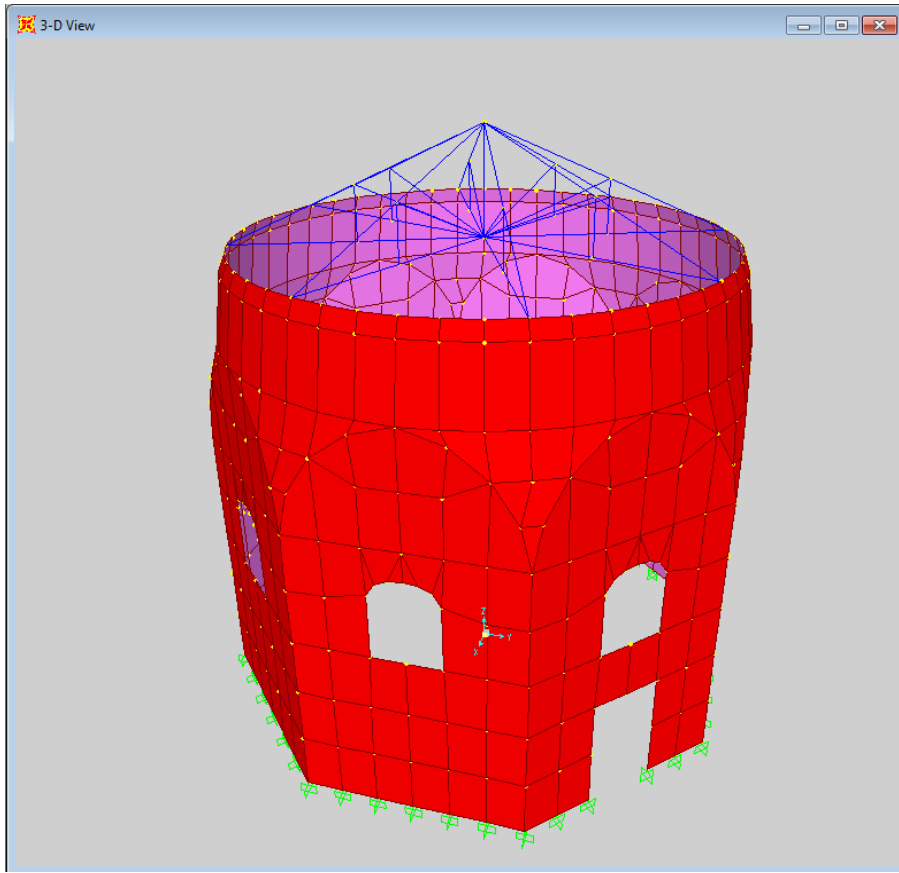
3. Sonlu Elemanlar Modeli ve Hesaplamanın Ana Hatları

Yığma yapıların ayrıntılı yapısal analizlerinde genellikle sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılır. Yapısal analiz, yapının tamamı ya da belirli bir elemanın matematiksel modelinin hazırlanmasıyla başlar. Bu işleme yapının ayrıştırılması denir. Yapı, ayrıştırma sırasında, analizin amacına uygun bir şekilde ve sayıda sonlu elemanlara ayrılır. Yapıyı oluşturan strüktürel elemanlar, yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnetlerin ve elemanların birleşim noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi göz önüne alınarak model içerisinde tanımlanır [2,4].

Ayrıca, yapının davranışını belirleyebilmek için taşıyıcı elemanı oluşturan malzemelerin gerçek davranışlarının belirlenmesi önemli bir faktördür. Yığma yapı tekniğiyle inşa edilen tarihi yapılarda kullanılan malzemeler belli bir şartnameye göre seçilmediği için aynı yapının benzer elemanlarında farklı malzeme özellikleri görülmektedir. Malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yığma yapıların yük taşıma performansını çok yakından etkiler. Ayrıca yapıların strüktürel onarımında eklenen yardımcı elemanlar bazen yapının

özgün malzemeleriyle farklı özellik taşıdığı için özgün malzemede kimyasal bozulmaya neden olurlar [10,11].

Sonlu Elemanlar Metodu ile yapılan analizlerde, yapıların çeşitli yük ve çevre etkilerine göre deplasmanları, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momentleri hesaplanabilir. Sonlu elemanlar analizinde yapının veya yapı elemanlarının geometrisi sonlu sayıda düğüm noktası ile belirlenmektedir. Bu yüzden Şekil 4'te gösterilen Niksar Kulak Kümbeti'nin sonlu elemanlar modeli SAP2000 programının modelleme özellikleri ve kurallarına göre hazırlanmıştır [12]. Yapının sonlu elemanlar analizinde, yapının davranışının sağlıklı bir şekilde belirlenmesi için çok sayıda düğüm noktası kullanılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde, 49 FRAME (Çubuk) elemanı, 500 adet SHELL (Kabuk) elemanı oluşturmak için 560 adet düğüm noktası kullanılmıştır.

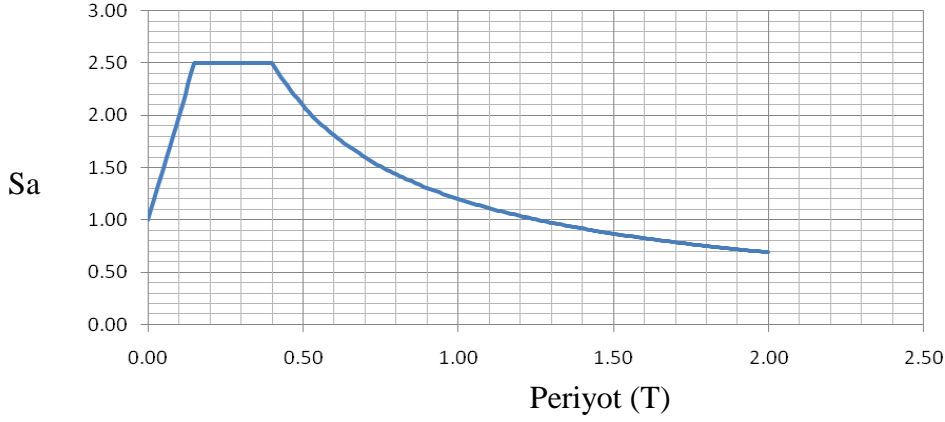


Şekil 4. Kulak Kümbeti'nin sonlu elmanlar modeli

Elde edilen modelin modları ve mod deformasyon şekilleri belirlenerek, uygulanacak olan deprem yüküne karar verilmiştir. Deprem yükü, modlarda göz önüne alınarak, Tokat Niksar yerel zemin sınıfına göre yeniden oluşturulmuştur (Şekil 5).

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, EQ_x ve EQ_y yüklemesi olmak üzere ayrı ayrı iki asal doğrultuda uygulanmıştır. Sonuçların kolaylıkla değerlendirilebilmesi için, $G + EQ_x$ (Sabit yükler + x eksenini doğrultusundaki deprem yüklemesi) ve $G + EQ_y$ (Sabit yükler + y eksenini doğrultusundaki deprem yüklemesi) ile analizler yapılmıştır.

doğrultusundaki deprem yüklemesi) olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımı yapılmıştır.



Şekil 5. Analizde kullanılan spektrum eğrisi

Yapının gerçek malzeme özelliklerine ulaşamadığı için, kullanılan malzeme özellikleri ulusal ve uluslararası literatürde bu tür malzemeler için kullanılan genel değerler arasından seçilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir [1,2,10,11]. Tuğla+harç ve taş+harç birlikte birim eleman özelliği gösterdiği varsayılarak, elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır.

Tablo 1. Yapıya ait sonlu elemanlar modelindeki malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite modülü (MPa)	Özgül ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Tuğla duvar ve kubbe (harç ile birlikte)	400	18	0,2
Taş duvarlar (harç ile birlikte)	450	24	0,2
Ahşap	9000	5	0,3

4. Yapının Sonlu Elemanlar Analizi ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Yürürlükte olan Deprem Yönetmeliğinde, taş yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi $f_{em}=0,3$ MPa tuğla yığma duvarlar için basınç emniyet gerilmesi $f_{em}=0,8$ olarak önerilmektedir. Hesap sonucunda elde edilen kuvvetlerde herhangi bir azaltma yapılmamıştır ($R=1$). Buna karşılık, emniyet gerilmeleri 3 katsayısı ile büyütülmüştür. Bu durumda, taş duvarlar için taşıma gerilmesi;

$$f_m = 0,3 \times 3 = 0,9 \text{ MPa} \quad (1)$$

tuğla duvarlar için taşıma gerilmesi;

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

olarak kabul edilmiştir.

Çekme emniyet gerilmeleri, basınç emniyet gerilmesi olarak belirlenen değerin %15'i olarak kabul edilebilir [10]. Bu durumda, taş duvar için çekme emniyet gerilmesi;

$$f_{m(\text{çek})} = 0,9 \times 0,15 = 0,135 \text{ MPa} \quad (3)$$

tuğla duvarlar için çekme emniyet gerilmesi;

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

olarak 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 = kayma sınır gerilmesi, τ_o = çatlama emniyet gerilmesi, μ = sürtünme katsayısı, σ ise duvar düşey gerilmesidir. Taş duvarlar için çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0,10 \times 3 = 0,30 \text{ MPa} \quad (6)$$

tuğla duvarlar için duvar çatlama gerilmesi;

$$\tau_o = 0,15 \times 3 = 0,45 \text{ MPa} \quad (7)$$

olarak kabul edilmiştir.

Deprem yönetmeliğinde önerildiği gibi duvar düşey gerilmelerinin ilgili yapı elemanları için belirlenen basınç emniyet gerilmelerinden büyük olmadığı varsayımı ile; taş duvarlar için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0,30 + 0,5 (0,9/2) = 0,53 \text{ MPa} \quad (8)$$

tuğla duvarlar için kayma emniyet gerilmesi;

$$\tau_m = 0,45 + 0,5 (2,4/2) = 1,05 \text{ MPa} \quad (9)$$

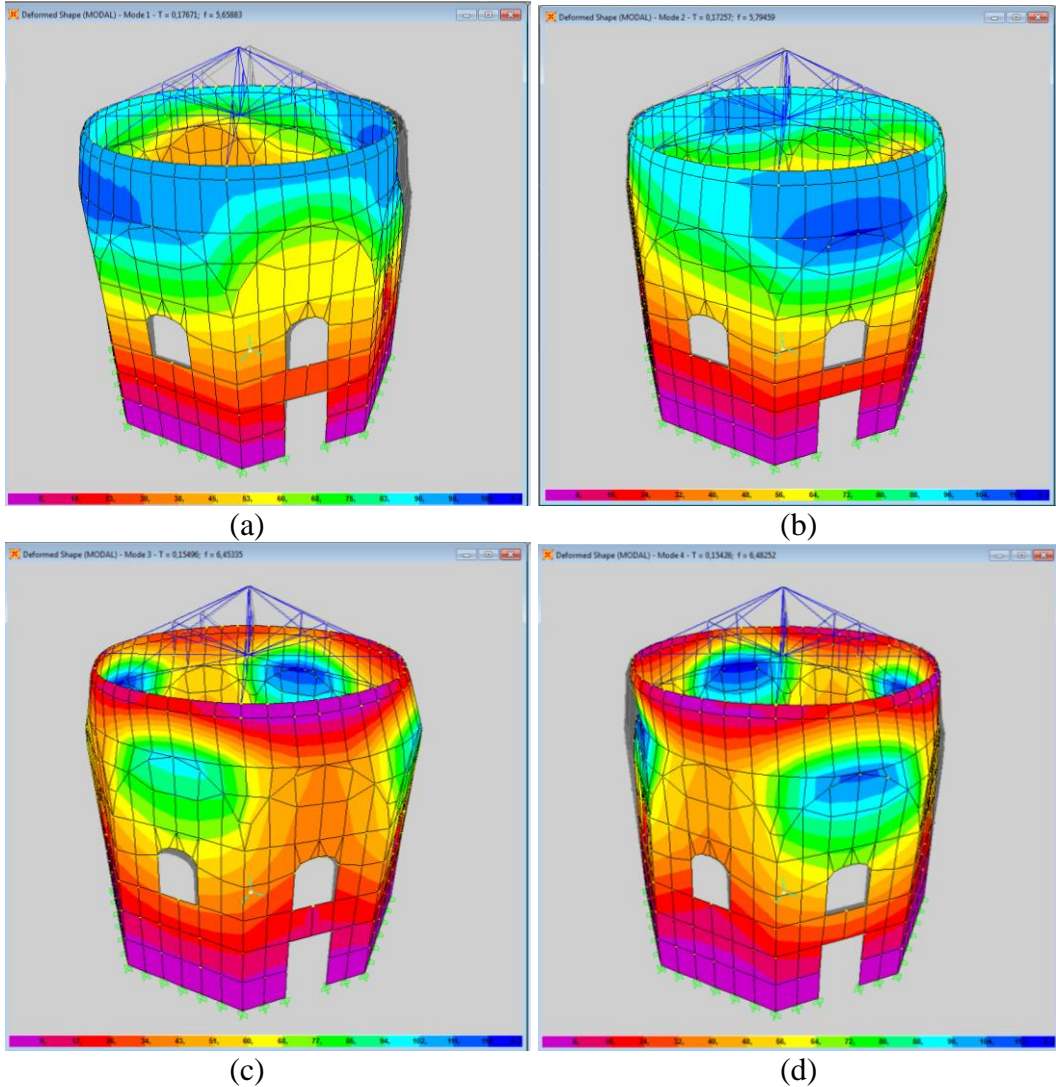
olarak kabul edilmiştir [2,11,12,13].

Tuğla, taş duvar ve ahşap çatı ile ilgili emniyet gerilmeleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme grupları için kabul edilen emniyet gerilmeleri

Malzeme tipi	Basınç emniyet gerilmesi (MPa)	Çekme emniyet gerilmesi (MPa)	Kayma emniyet gerilmesi (MPa)
Tuğla (Harçla birlikte)	2,4	0,36	1,05
Taş Duvar (Harçla birlikte)	0,9	0,135	0,53

Kulak Kümbeti'nin, analiz sonuçlarının yorumu, SAP2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır. Buna göre;

**Şekil 6.** Yapıya ait sırasıyla (a) birinci, (b) ikinci, (c) üçüncü ve (d) dördüncü mod şekilleri

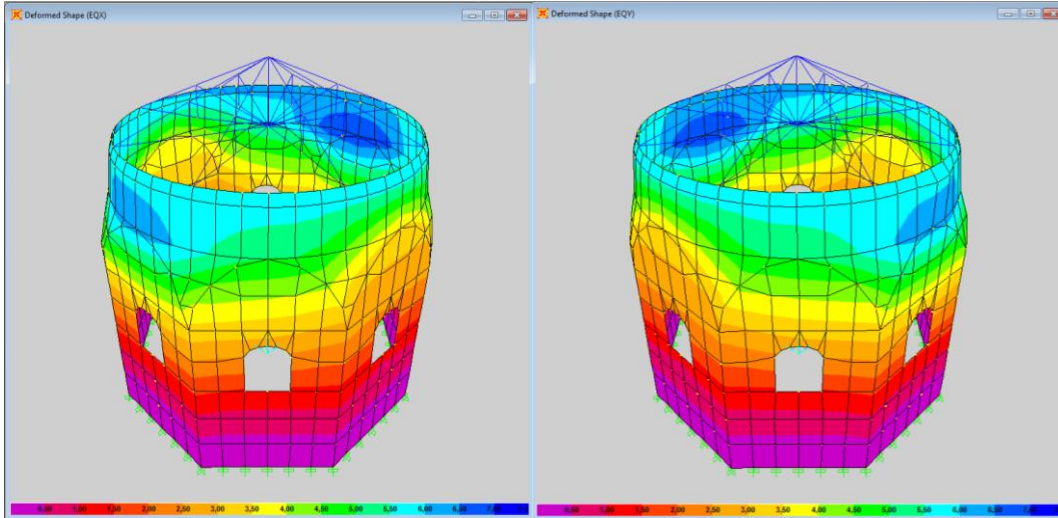
Yapının sonlu elemanlar analizi sonucu oluşan sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü mod şekilleri Şekil 6'da verilmiştir. Yine Tablo 3'de yapıya ait periyotlar ve kütle katılım oranları verilmiştir. Tablo incelendiğinde; birinci mod periyodu 0,17 sn, ikinci mod

periyodu yine 17 sn, üçüncü mod periyodunun 15 sn olduğu görülmektedir. Yığma yapıların salınım periyotlarının küçük olduğu düşünüldüğünde, elde edilen değerler tutarlı görünmektedir.

Yapının toplam ağırlığı **4584 kN**, güneybatı-kuzeydoğu (modele göre X yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti **1344 kN**, güneydoğu-kuzeybatı (modele göre Y yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altındaki toplam taban kesme kuvveti **1344 kN** olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre yapının maruz kaldığı taban kesme kuvvetleri, X ve Y yönünde toplam ağırlığının %29'ne karşılık geldiği görülmüştür.

Tablo 3. Modlara Göre Periyotlar ve Kütle Katılım Oranları

Mod	Periyot (Sn)	X Yönü Kütle Katılım Oranı	Y Yönü Kütle Katılım Oranı
1	0,17	0,43	0,04
2	0,17	0,48	0,43
3	0,15	0,56	0,55
4	0,15	0,61	0,57
5	0,10	0,69	0,69
30	0,07	0,85	0,85

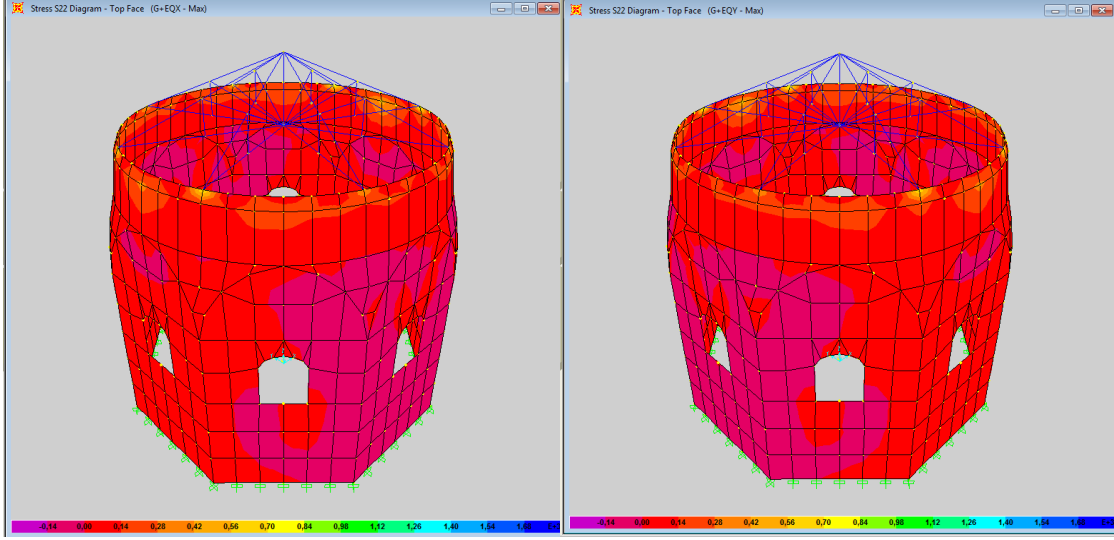


Şekil 7. Deprem Yüklemesi Sonucunda X ve Y yönünde oluşan ötelenmeler

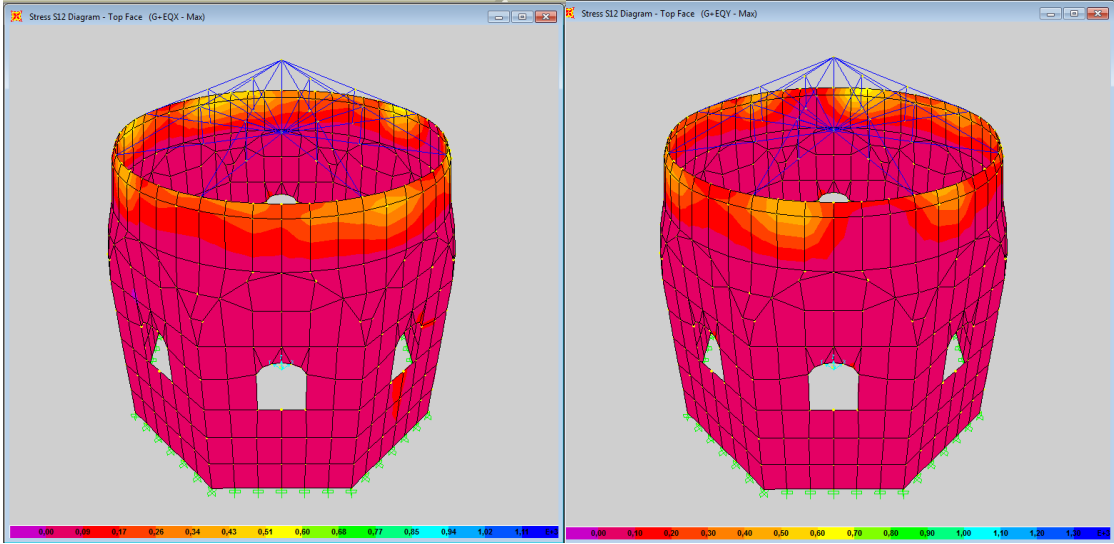
Analiz sonucunda yapıda X yönündeki deprem yüklemesi sonucunda x yönündeki en büyük ötelenme Şekil 7'de görüldüğü gibi $\Delta x=17$ mm, Y yönündeki deprem yüklemesi sonucunda y yönündeki en büyük ötelenme ise yine $\Delta y=17$ mm'dir.

Yapının davranışını etkileyen G +EQx ve G + EQy yük birleşimlerine göre ayrı ayrı hazırlanan S22 (çekme ve basınç) gerilme değerleri Şekil 8'de ve S12 (kayma) gerilme değerleri Şekil 9'da gösterildiği gibi, gerilme haritaları kullanılarak incelenmiştir. Şekil 8'de G+EQx ve G+EQy yüklemesinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesi her iki yönde taş duvar kısmında 0,120 MPa olarak gerçekleşmiştir. Basınç gerilmeleri yine taş

duvar kısmında ve 0,850 MPa olarak gerçekleşmiştir. Her iki değerinde Tablo 2'deki gerilme değerlerinin altında ancak sınır değerlere çok yakın çıkmıştır. Diğer taraftan yine $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşimlerine göre hesaplanan maksimum kayma gerilmesi 0,510 MPa olarak gerçekleşmiştir. Bu değerinde emniyetli kayma gerilmesi değerinin altında ancak sınır değerlere çok yakın çıkmıştır.



Şekil 8. $G+EQ_x$ ve $G+EQ_y$ yüklemeleri sonucu oluşan basınç ve çekme gerilmeleri



Şekil 9. $G+EQ_x$ ve $G+EQ_y$ yüklemeleri sonucu oluşan kayma gerilmeleri

Sonuç olarak yapısal analizlerde elde edilen etkilerin incelenmesinde, Niksar Kulak Kümbeti'nin taşıyıcı duvarlarında Türk Deprem Yönetmeliğinde yığma yapılar için önerilen basınç ve kayma gerilmesi değerlerinin aşılmadığı gözlenmiştir. Kullanılan elemanların ağ yapısı ve mesnet şartları gereği yatay yüklemelerde bu gerilmelerin oluşması kabul edilebilir düzeyde olmuştur.

5. Sonuç

Tarihi binaların yapısal analizi günümüzün modern yapım tekniklerine göre üretilen yapıların yapısal analizinden farklıdır. Modelleme aşamasında eleman boyutlarının tam olarak belirlenememesi, birleşim detaylarının tanımlanamaması, malzemelerin gerçek mekanik özellikleri ve sınır gerilme değerlerinin elde edilememesi gibi belirsizlikler nedeniyle hesap sonuçlarının yorumlanmasında benzer binaların yapısal davranışlarında gözlenen deneyimler ön plana çıkmaktadır

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. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar teorik yöntem ve yapılan kabullerle sınırlıdır. Bu sonuçların ayrıca doğrusal olmayan yöntemlerle ve deneysel çalışmalarla değerlendirilmesi gereklidir.

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 dahilinde olduğundan, bu tür bir varsayım sonucunda bile Niksar Kulak Kümbeti'nin depreme karşı dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmeyeceği gözlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Ünay, A.İ., Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, Ankara, O.D.T.Ü Mimarlık Fakültesi, 2002.
- [2] Akan, A., E., Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi, SDU International Technologic Science, Construction Technology, 2010, 2 (1): 41-54.
- [3] Güçhan, N.,F., Ünay, A., İ., Böke,H., Gökçe, F., Diyarbakır Kent Surlarının Koruma Sorunları, ODTU MFD/1, 2005, 22(1), 27-55.
- [4] Toker, S., Ünay, A. İ., Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 2004, 17(2) 129-139.
- [5] Akan, A., E., Özen, Ö., Bursa Yeşil Türbe'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Deprem Analizi, Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 2005, 758-762.
- [6] Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi.
- [7] Demir, N., Demirci, M.F., Tarih ve Kültür Kenti Niksar, Ankara, 2006.
- [8] Gündoğdu, H., Bayhan, A.,A., Aktemur, M., Kukaracı, İ.,U., Çelik, A., Güneş, B., Tarihi Yaşatan İl Tokat, Ankara, Türkiye, 2006.
- [9] Çal, H., Niksar'da Türk Eserleri, Kültür Bakanlığı Yayınları, Ankara, Türkiye, 1989.
- [10] Can, H., Kubin, J., Ünay, A., İ., Düzensiz Geometrik Şekile Sahip Tarihi Yığma Binaların Sismik Davranışı, G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 2012, 27(3), 679-686.
- [11] Küçükdoğan, B., Kubin, J., Ünay, A., İ., Seismic Assessment of Monastery of Stoudios (Imrahor Mosque) in İstanbul, Advanced Materials Research, 2010, 133-134, 721-726.
- [12] SAP2000, Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures, Computer and Structures Inc., Berkeley, California, USA, 1998.
- [13] Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.