



Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi

Dergiye Geliş Tarihi: 03.12.2012
Yayına Kabul Tarihi: 08.01.2013

Baş Editör: Naim Çağman
Alan Editörü: Levent Gökrem

Tarihi Niksar Kırk Kızlar Türbesinin Sismik Davranışı

Murat ÇAVUŞ^{a,1} (murat.cavus@gop.edu.tr)
Mustafa DAYI^b (mustafadayi@gazi.edu.tr)

^aGaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, 60250 Tokat
^bGazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar, 06500 Ankara

Özet - Bu çalışmada, yapısal davranışını ve depreme karşı dayanımını belirleyebilmek için, Anadolu'nun tuğla ile inşa edilmiş önemli örneklerinden biri olan Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Seçilen yapı, SAP2000 bilgisayar programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek analizi yapılmıştır. Bu amaçla, Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin hesap modeli üzerinde iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır. Bu yüklemelerin ilki sabit yüklerin, ikincisi ise deprem spektrumu ile tanımlanan yer hareketinin yol açtığı zorlamaları kapsamaktadır. Yapılan bu analizlerle tarihi yapının deprem etkisi altındaki performansı incelenmiştir. Yapılan 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi türbenin yapısal performansı hakkında genel bir fikir vermiştir.

Anahtar Kelimeler -
Tarihi yapı, Deprem,
Sonlu elemanlar
yöntemi

Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research 2 (2013) 25-34

Seismic Behavior of Historical Niksar Kırk Kızlar Tomb

Abstract – In this study historical Niksar Kırk Kızlar Tomb is analyzed in order to assess its structural behavior and seismic vulnerability. The tomb is analyzed by using SAP2000 computer program with the finite element method. For this purpose, two different loadings are applied on an analysis model of Niksar Kırk Kızlar Tomb. 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 structure under the effects of earthquake is examined. A full 3-D finite element analysis is performed in order to obtain a first insight into its structural performance.

Keywords -
Historical structure,
Earthquake, Finite
element analysis

Received: 03.12.2012

Accepted: 08.01.2013

¹ Baş Yazar

1. Giriş

Tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere güvenle aktarılması, insanlık tarihinin gelişimindeki verilerin saklanması anlamında önemli bir olgudur. Bu yapılar yapıldıkları dönemin yapım teknikleri, kültürleri, inanışları ve sosyolojik yapıları hakkında bilgiler barındırırlar. Bu bilgi akışının sürdürülebilirliği insanlık için önemlidir. Kültür mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapıların ve anıtların, deprem ve diğer çevresel etkilere karşı yapısal korunması için son yıllarda azımsanmayacak sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır. Taş veya tuğla taşıyıcı sisteme sahip tarihi binaların özellikle sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplarında önemli gelişmeler elde edilmiştir. [1,2].

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 [2,3].

Bu çalışmada Anadolu Türk mimari özelliklerini yansıtan bir yapı tipi olan Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin, taşıyıcı sistem performansının sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi amacıyla yapılacak hesaplar için matematiksel modelleme tekniği oluşturulmuştur. Örnek çalışma olarak seçilen Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin sonlu elemanlar hesabı yapılarak taşıyıcı sistem performansı incelenmiştir.

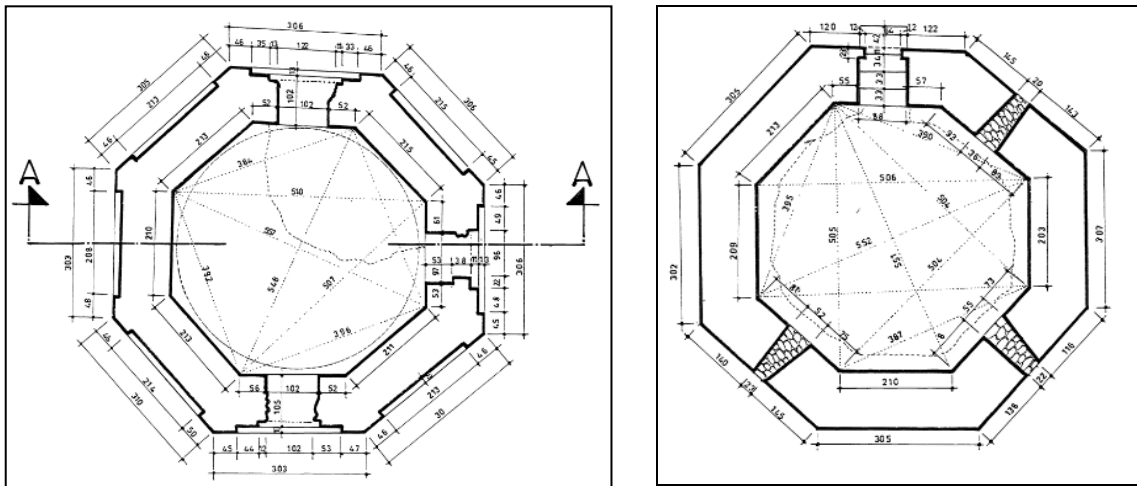
2. Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin Mimari ve Yapısal Özellikleri

Kırk Kızlar Türbesi, beylikler döneminde tuğla ile inşa edilmiş Anadolu'nun önemli türbelerindedir. Tokat'ın Niksar ilçesinde bir yamaca yerleştirilmiştir (Şekil 1). Türbe iki katlı olarak inşa edilmiştir. Alt kat cenazelik olarak oluşturulmuş ve taştan inşa edilmiştir. Üst kat ise tuğla duvar olarak inşa edilmiştir. Gövde her iki katta da sekizgen olup kenarları 3.03-3.20 m arasında değişir (Şekil 2).

Sekiz kenarının ölçüleri ancak 7 cm civarında değişiyor olması, inşaatın ne kadar özenli yapıldığının bir göstergesidir. Türbe her yüzde köşelere sağlı sollu uygulanan 0.46 m'lik ayaklar yükselip, tuğla başlangıcında 3.90 m yukarıda yarım tuğla kadar daralıp 0.06 m içeri çekilerek 0.60 m daha yükselir ve teğet kemere özengi görevi görür [4,5,6].



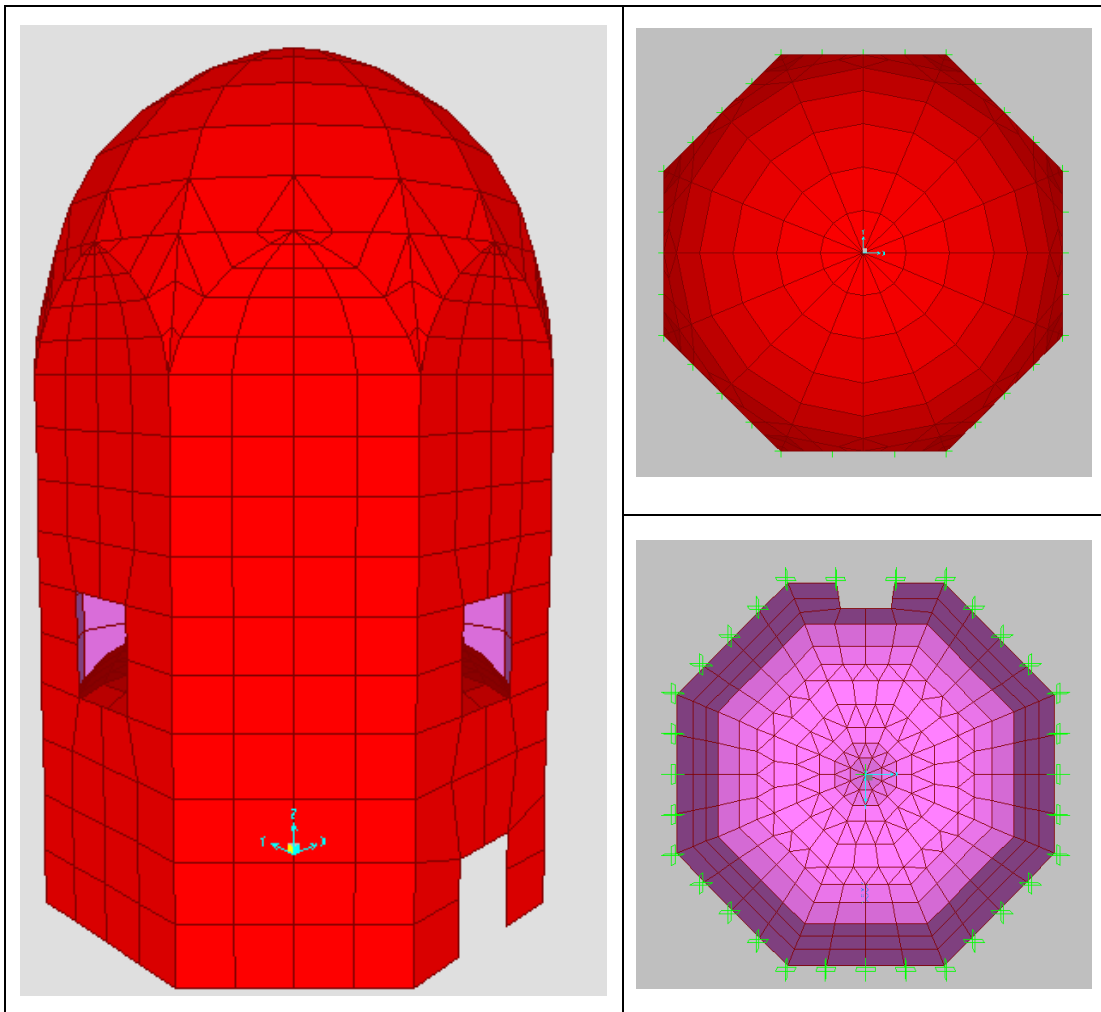
Şekil 1. Kırk Kızlar Türbesinin günümüzdeki hali.



Şekil 2. Kırk Kızlar Türbesi Planı [4].

3. Yapının Sonlu Elemanlar Modeli ve Analiz Parametreleri

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 [3].

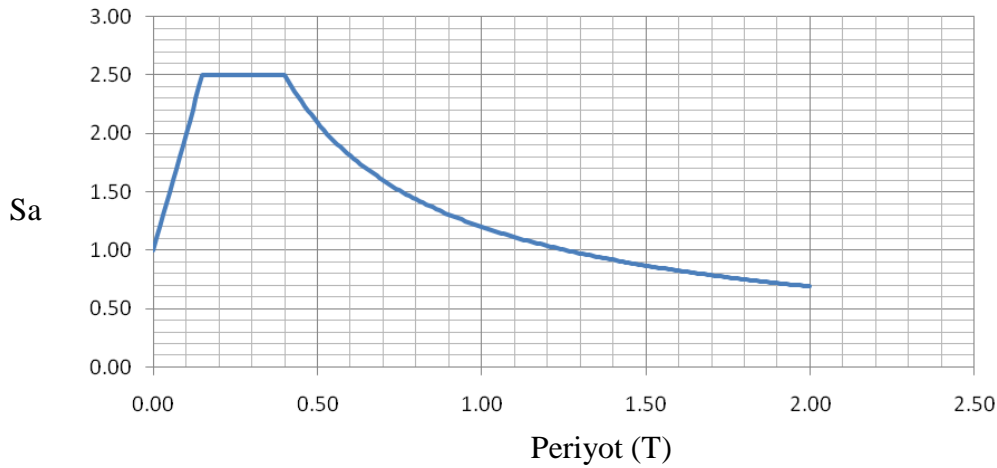


Şekil 3. Kırk Kızlar Türbesi'nin sonlu elemanlar modeli.

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak yapısal analiz programlarının kapasitelerinin artması ve grafik veri hazırlama kolaylıkları, özellikle karmaşık geometriye sahip tarihi binaların yapısal analizlerine olan talebi artırmıştır. Ancak grafik arayüz programlarıyla hazırlanan veriler analitik modelleme kurallarına dikkat

edilmeden hazırlanırsa çok önemli hatalara yol açabilir. Bu nedenle, tarihi binaların sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplarında modelleme aşaması çok önemlidir [2].

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 3'te gösterilen Niksar Kırık Kızlar Türbesi'nin sonlu elemanlar modeli SAP2000 programının modelleme özellikleri ve kurallarına göre hazırlanmıştır [7]. Yapının sonlu elemanlar analizinde, yapının davranışının sağlıklı bir şekilde belirlenmesi için çok sayıda düğüm noktası kullanılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde, 920 adet SHELL elemanı oluşturmak için 806 adet düğüm noktası kullanılmıştır.



Şekil 4. Analizde kullanılan spektrum eğrisi.

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 4).

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

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 yükleme 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) olmak üzere iki ayrı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.

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 [8,9]. Tuğla+harç ve taş+harç birlikte birim eleman özelliği gösterdiği varsayılarak, elastisite modülü ve birim ağırlık kabulleri yapılmıştır.

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 değerlerin %15'i olarak kabul edilebilir. 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.

$$\tau_m = \tau_0 + \mu \sigma \quad (5)$$

Bu denklemde τ_m = kayma sınır gerilmesi, τ_0 = 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 [8,9,10].

Tuğla ve taş duvarla 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

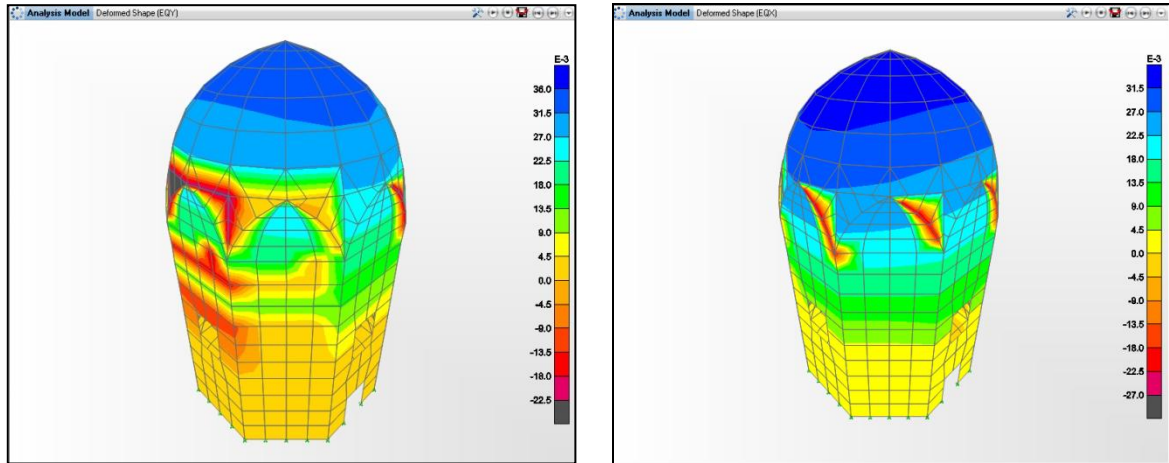
Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin yapısal analizi üçüncü bölümde belirtilen yük kombinasyonlarına göre SAP2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir. Bütün düğüm noktaları ve taşıyıcı elemanlarda elde edilen ötelenme, kuvvetler ve gerilmelerin tek tek incelenerek yorumlanması oldukça zordur. Bu nedenle, analiz sonuçlarının yorumu, SAP2000 programının ürettiği renk kodlu şekil ve gerilme haritaları kullanılarak en elverişsiz değerler dikkate alınarak yapılmıştır. Buna göre;

Yapının sonlu elemanlar analizi yapıldığında birinci mod periyodu 0,52 sn, ikinci mod periyodu yine 51 sn, üçüncü mod periyodu 28 sn olarak belirlenmiştir. Yığma yapıların salınım periyotlarının küçük olduğu düşünüldüğünde, elde edilen değerler tutarlı görünmektedir.

Tablo 3. Modlara Göre Periyotlar ve Kütle Katılım Oranları.

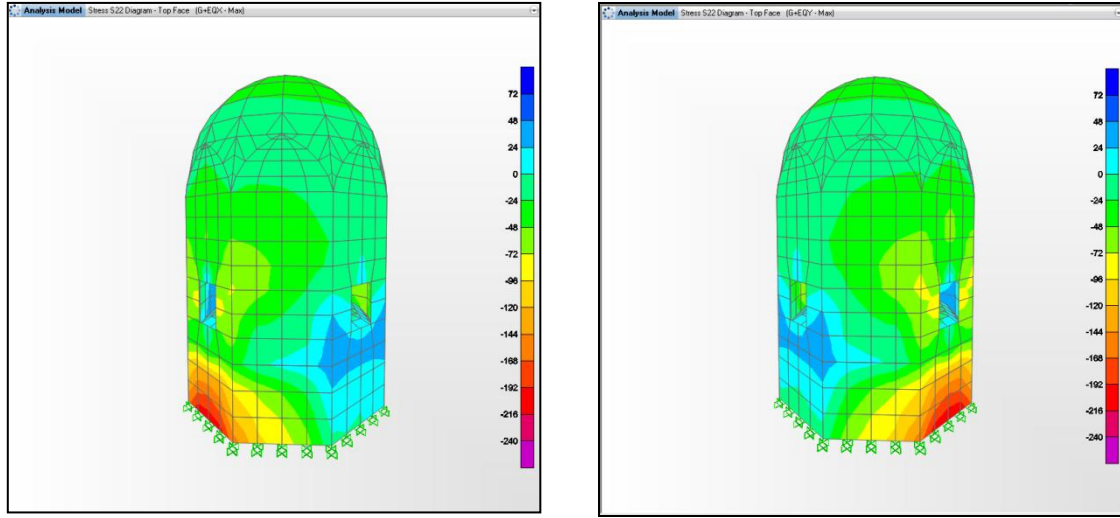
Mod	Periyot (Sn)	X Yönü Kütle Katılım Oranı	Y Yönü Kütle Katılım Oranı
1	0,52	0,42	0,06
2	0,51	0,45	0,42
3	0,28	0,57	0,54
4	0,27	0,60	0,57
5	0,20	0,63	0,59
30	0,10	0,84	0,83

Yapının toplam ağırlığı **4895 kN**, güneybatı-kuzeydoğu (modele göre X yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti **693 kN**, güneydoğu-kuzeybatı (modele göre Y yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altındaki toplam taban kesme kuvveti **689 kN** olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre yapının maruz kaldığı taban kesme kuvvetleri, X ve Y yönünde toplam ağırlığının %14'ne karşılık geldiği görülmüştür. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te görülmektedir. 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 $\Delta y=37$ mm'dir. Şekil 5'de deprem yüklemeleri sonucunda X ve Y yönündeki ötelenmeler gösterilmiştir.

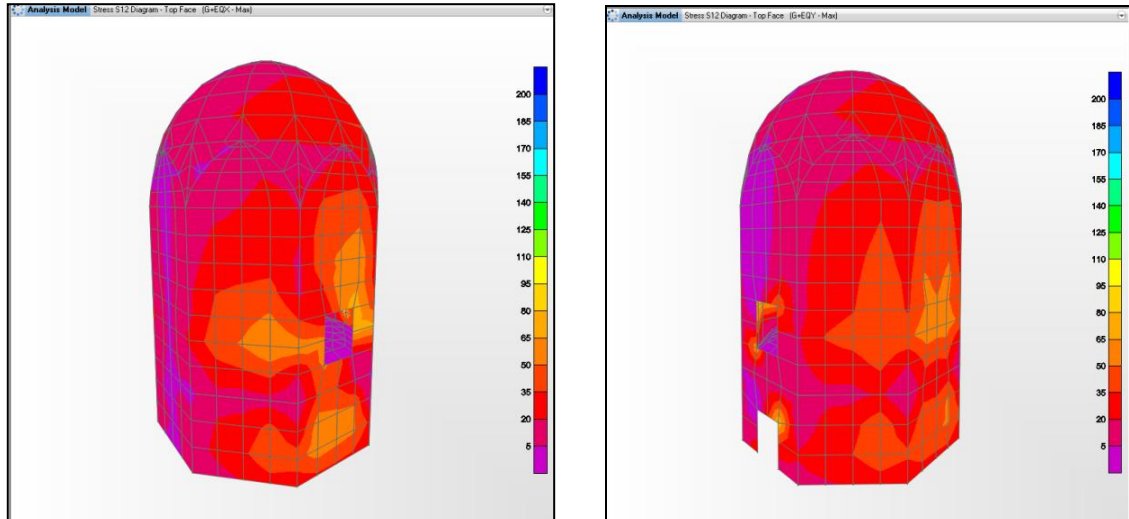
**Şekil 5.** Deprem Yüklemesi Sonucunda X ve Y yönünde oluşan ötelenmeler

Yapının davranışını etkileyen G +EQx ve G + EQy yük birleşimlerine göre ayrı ayrı hazırlanan S22 ve S12 gerilme değerleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterildiği gibi, gerilme haritaları kullanılarak incelenmiştir. Şekil 6'da G+EQx ve G+EQy yüklemesinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesi her iki yönde taş duvar kısmında 0,098 MPa olarak

gerçekleşmiştir. Basınç gerilmeleri yine taş duvar kısmında ve 0,240 MPa olarak gerçekleşmiştir. Her iki değerinde Tablo 2'deki gerilme değerlerinin altında kalmıştır. Diğer taraftan yine $G + EQ_x$ ve $G + EQ_y$ yük birleşimlerine göre hesaplanan maksimum kayma gerilmesi 0,132 MPa olarak gerçekleşmiştir. Bu değerinde emniyetli kayma gerilmesi değerinin bir hayli altında kaldığı görülmüştür.



Şekil 6. $G+EQ_x$ ve $G+EQ_y$ yüklemeleri sonucu meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri.



Şekil 7. $G+EQ_x$ ve $G+EQ_y$ yüklemeleri sonucu meydana gelen kayma gerilmeleri

Sonuç olarak yapısal analizlerde elde edilen etkilerin incelenmesinde, Niksar Kırk Kızlar Türbesi'nin taşıyıcı elemanlarında 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 oluşmuştur.

5. Sonuç

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.

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 Kırk Kızlar Türbesi'nin depreme karşı dayanımı ile ilgili bir olumsuzluğun meydana gelmesi ihtimali çok zayıftır.

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 aşılmış 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.

Kaynaklar

1. Ünay, A.İ., (2002) "*Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı*", O.D.T.Ü Mimarlık Fakültesi, Ankara, Türkiye.
2. Akan, A., E., (2010) "*Tarihi Ahşap Sütunlu Camilerin Sonlu Elemanlar Analizi ile Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi*", SDU International Technologic Science, Construction Technology, Isparta, 2 (1): 41-54.
3. Toker, S., Ünay, A. İ., (2004) "*Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi*", G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, Ankara, s. 129-139.
4. Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivi.
5. Demir, N., Demirci, M.F., (2006) "*Tarih ve Kültür Kenti Niksar*", Ankara, s 58-64.
6. Çal, H., (1989) "*Niksar'da Türk Eserleri*", Kültür Bakanlığı Yayınları:18, Ankara, Türkiye.
7. SAP2000, (1998) "*Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures, Computer and Structures Inc.*", Berkeley, California, USA.
8. Can, H., Kubin, J., Ünay, A., İ., (2012) "*Düzensiz Geometrik Şekile Sahip Tarihi Yığma Binaların Sismik Davranışı*", G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Ankara, s. 679-686.
9. Küçükdoğan, B., Kubin, J., Ünay, A., İ., (2010) "*Seismic Assessment of Monastery of Stoudios (Imrahor Mosque) in İstanbul*", Switzerland, Advanced Materials Research, s 721-726.
10. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (2007), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, s 86-90.