2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı
25-27 Eylül 2013 – MKÜ – HATAY

TARİHİ MALATYA ULU CAMİSİNİN SİSMİK DAVRANIŞI

H.Erkek[1], Y.Calayır[2], E.Sayın[2] ve M. Karaton[2]

[1] *İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Malatya*
[2] *Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Elazığ*
Email: erkutsayin@gmail.com

ÖZET:

Tarihi Camiler kültür mirasımızın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu yapılar, deprem gibi doğal afetler karşısında zarar görmekte veya yıkılmaktadır. Yapılan çalışmada, Malatya ilinin Battalgazi ilçesinde bulunan 1224 yılında Selçuklular döneminde inşa edilmiş Malatya Ulu camisinin sismik davranışı incelenmiştir. Bu amaçla cami üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiş, doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde malzeme modeli olarak çekmede şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Sismik etki olarak; Türk Deprem Yönetmeliği (TDY–2007) tasarım spektrumuna uyumlu yapay deprem ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak caminin sismik davranışı değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Tarihi köprüler, Sonlu elemanlar yöntemi, Doğrusal ve doğrusal olmayan sismik davranış

1. GİRİŞ

Geçmiş ile günümüz arasında köprü görevi gören tarihi eserler toplumların kültürel ve sosyal yansımalarıdır. Tarihi ve kültürel çok sayıda zenginliği barındıran ülkemizde tarihi eserlerin korunması açısından en önemli problemlerden biri depremlerdir. Yığma yapıların nümerik modellenmesinde yapı sisteminin büyüklüğüne bağlı olarak mikro, meso (basitleştirilmiş mikro) ve makro modelleme olmak üzere üç farklı modelleme tekniği kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde, büyük yığma yapı sistemlerinin çoğunlukla makro modelleme tekniğine göre modellendiği görülmektedir (Modena vd., 2002, Betti vd., 2011). Riva vd (1998), İtalya da bulunan Asinelli kulesini makro modelleme tekniğiyle modelleyerek sismik analizini yapmışlardır. Fanning ve Boothby (2001) yaptıkları çalışmada, üç yığma köprüyü makro modelleme yöntemiyle ile modelleyerek statik yükler altında incelemişlerdir. İlgili çalışmada taşıyıcı yapı elemanları için yayılı çatlak modelini kullanmışlardır. Bernardeschi vd. (2004), İtalya da bulunan Buti çan kulesini, makro modelleme tekniği ile modelleyip kendi ağırlığı ve kendi ağırlığı yanında yatay yük etkisi altında olmak üzere iki farklı durum altında incelemişlerdir. Karaton vd. (2009), Malabadi köprüsünün Erzincan depremi etkisi altında doğrusal olmayan sismik davranışını değerlendirmişlerdir. Bayraktar vd. (2010), Trabzon da bulunan Ayasofya çan kulesini makro modelleme yöntemiyle sonlu elemanlar modelini oluşturup deprem etkisindeki lineer olmayan dinamik analizini yapmışlardır. Sayın vd. (2011), Malatya da bulunan tarihi Uzunok köprüsünü makro modelleme yöntemi ile modelleyerek lineer ve lineer olmayan sismik analizlerini yapmışlardır. Sismik etki olarak 2003 Bingöl depremi ivme kayıtlarını kullanmışlardır.
Bu çalışmada, tarihi Malatya Ulu camisinin makro modelleme tekniği ile üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan çözümlerde malzeme modeli olarak, ezilme ve şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan çatlama/kırılma yapabilen yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Caminin dinamik çözümleri için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltme yöntemi ile birleştirilmiş formu seçilmiştir. Sismik etki olarak, Türk Deprem Yönetmeliğinde verilen (TDY-2007) tasarım ivme spektrumuna uyumlu yapay deprem ivme kayıtları kullanılmıştır.

2. MALATYA ULU CAMİ

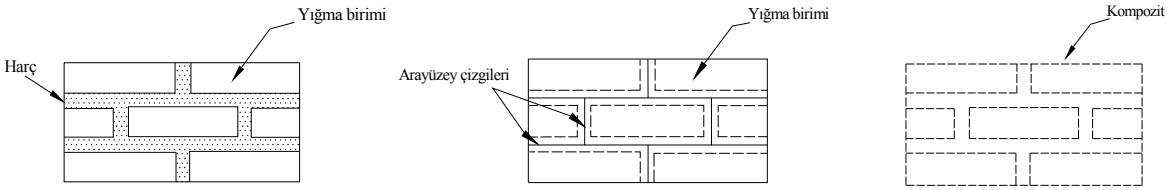
Malatya Ulu cami, Malatya ilinin yaklaşık 8 km kuzeyinde Battalgazi ilçesinde yer almaktadır. Cami, Anadolu Selçukluları tarafından 1224 yılında inşa edilmiş ve günümüze gelene kadar çok sayıda onarım geçirmiştir. Bu cami; İran'daki Büyük Selçuklu İmparatorluğunun cami mimari geleneğini Anadolu'da temsil eden tek örnek olarak önem kazanmaktadır. Yapının ilk inşasından kısa bir süre sonra başlayıp, sonraki dönemlerde devam eden onarım ve ilavelerle orijinal halinden önemli değişikliklerin meydana geldiği bilinmektedir. Caminin ortalama boyutları 34.39x51.36 m ölçülerinde olup yaklaşık dikdörtgen şeklindedir. Cami harim ve kaysariye (ek bölüm) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Aynı zamanda dış duvar cephelerinde 26 adet çeşitli ölçülere sahip payandalar bulunmaktadır. Camide inşa malzemesi olarak taş ve tuğla olmak üzere iki ayrı malzeme kullanılmıştır. Caminin dış duvar ve payandaları moloz taştan ve iç mekânındaki kemerler ise düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Kubbe, tonoz ve kemer üst kısımları tamamıyla tuğladan inşa edilmiştir. Malatya Ulu camisine ait doğu ve kuzey cephesi görünüşleri Şekil 1' de verilmiştir.

a) Doğu b) Kuzey

Şekil 1. Malatya Ulu camisinin doğu ve kuzey cephesi görünüşleri.

3. YIĞMA YAPILARIN NÜMERİK MODELLENMESİ

Yığma yapıların nümerik modellenmesinde yapı sisteminin büyüklüğüne bağlı olarak mikro, meso ve makro modelleme olmak üzere üç farklı modelleme tekniği yaygın olarak kullanılır. Bu modelleme teknikleri Şekil 2'de görülmektedir. Mikro modelleme daha çok yığma duvarların veya bir yapının belirli bir bölümünün modellenmesinde, makro modelleme ise tüm yapı sisteminin modellenmesinde kullanılır.



a) Mikro modelleme b) Meso modelleme c) Makro modelleme

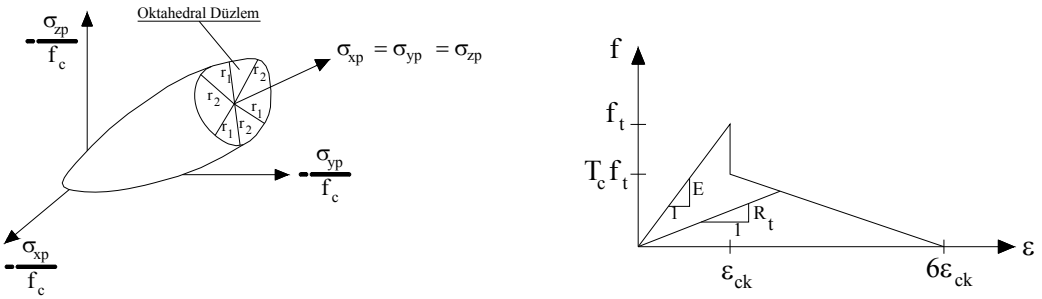
Şekil 2. Yığma yapı modelleme teknikleri

Mikro modellemede, yığma duvarı oluşturan yığma birimi ve harcın malzeme özellikleri ayrı ayrı değerlendirilir. Bu modelleme tekniği genellikle dikkate alınacak yapı sisteminin bir bölümünün çözümü için uygundur.

Meso modellemede (basitleştirilmiş mikro modelleme), yığma birimler harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimler birbirlerinden ara yüzey çizgileriyle ayrılmaktadır. Sistemde meydana gelmesi muhtemel çatlakların bu ara yüzey çizgilerinde meydana geleceği kabul edilir. Makro modelleme ise, taş, tuğla vb. birimler ve harç arasında ayrım yapmaksızın, yapı elemanını kompozit olarak kabul eden ve bu malzemelerin ortak özelliğini yansıtan eşdeğer bir malzeme modelidir (Lourenço., 1996). Bu yaklaşım, büyük yapı sistemlerin modellenmesinde bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azalttığından genelde tercih edilmektedir.

Malzeme bakımından doğrusal olmayan çözümler için kırılma, hasar mekaniği ve plastik analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Kırılma mekaniğinde çatlaklar; lokal (yayılı çatlak ve hasar mekaniği) ve global (ayrık çatlak) yaklaşım olmak üzere, iki ayrı çatlak modeli kullanılarak incelenmektedir (Manfredi vd., 1993, Rodriguez vd., 1999). Yayılı çatlak yaklaşımı, malzemenin davranışını temsil eden bünye denklemlerinin çatlak doğrultusuna bağlı olarak değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Hasar mekaniği lokal bir yaklaşım olup yayılı çatlak modeliyle aynı felsefeye dayanmaktadır (Manfredi vd., 1993, Rajgelj vd., 1993, Rodriguez vd., 1999). Ayrık çatlak yaklaşımında ise, çatlaklar sürekli ortam içerisinde süreksiz bir bölgenin tanımlanmasıyla modellenmekte ve gerilmelerin hesabı kırılma mekaniği teorilerine göre yapılmaktadır. Plastik analiz yöntemi de yine lokal bir yaklaşım olup, plastik gerilme-şekil değiştirme bağıntıları dikkate alınarak çözümler elde edilmektedir (Bangash., 1989).

Bu çalışmada, William ve Warnke (1975) modelinin özel hali olan üç parametreli beton modeli kullanılmıştır. Üç parametreli model, William tarafından geliştirilmiş olup, düşük basınç altında çekmeye maruz kesitlerdeki beton için göçme yüzeyini tanımlamaktadır. Zienkiewicz ve Taylor (1991), beton gibi gevrek özelliğe sahip malzemeler için bu malzeme modelinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. William ve Warnke' nin beton göçme yüzeyi modeli yığma yapıların makro modellemesinde kullanılabilir (Fanning vd., 2001). Şekil 3.a' da görüldüğü gibi bu modelin göçme yüzeyi, konveks olan bir koniye yakın görünüme sahiptir. Bu şekilde, σ_{xp}, σ_{yp} ve σ_{zp} birbirlerine dik asal gerilmeleri, f_c ise malzemenin tek eksenli basınç dayanımını göstermektedir. Bu modelde, göçme yüzeyinin içerisinde kalan gerilme değerlerinde malzemenin doğrusal elastik davranış gösterdiği; göçme yüzeyinin dışında kalan gerilme değerlerinde ise, malzemede çatlama ve ezilmelerin ortaya çıkacağı kabulü vardır. Sonlu eleman uygulamalarında yayılı çatlak yaklaşımı modelinde çatlağın eleman integrasyon noktalarında meydana geldiği kabul edilmektedir. Bir integrasyon noktasındaki çatlağın varlığı, çekme gerilmesine normal yönde zayıf bir düzlem tanımlanarak gerilmeleri şekil değiştirmelere bağlayan matrisin yeniden düzenlenmesiyle belirtilir. Bu düzenleme elastisite modülünün değişimine bağlı olarak elde edilmektedir. Söz konusu değişim tek eksenli gerilme şekil değiştirme ilişkisinden faydalanılarak yapılmaktadır. Şekil 3.b de malzemenin çekmedeki idealleştirilmiş tek eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilmektedir. Burada, ε_{ck} çatlama sınır şekil değiştirmesini, $6\varepsilon_{ck}$ kopma sınır şekil değiştirmesini, f_t malzemenin tek eksenli çekme dayanımını, T_c çatlama sınır şekil değiştirmesine karşılık gelen çatlak sonrası çekme dayanımı azaltma katsayısını, E elastisite modülünü, R_t ise yumuşama bölgesindeki çatlamış malzemenin elastisite modülünü belirtmektedir.

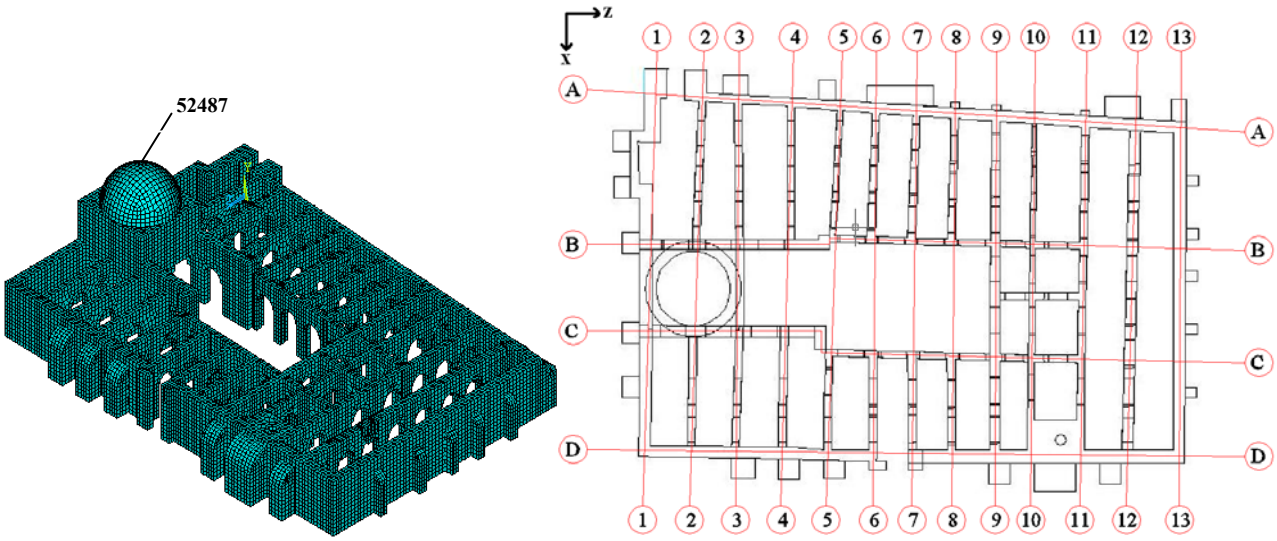


a) Göçme yüzeyi b) Tek eksenli gerilme – şekil değiştirme bağıntısı

Şekil 3. Üç parametreli beton modeli

4. ULU CAMİNİN SİSMİK ANALİZLERİ

Bu çalışmada, Malatya Ulu camisinin sonlu eleman modeli makro modelleme tekniği ile oluşturularak doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizler için çekmede şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Her iki çözümde temel ortamı rijit kabul edilmiştir. Bu caminin üç boyutlu sonlu eleman modeli plan görünüşü ile birlikte Şekil 4'de verilmiş olup, tepki büyüklüklerinin değerlendirildiği cami kubbesinde bulunan 52487 nolu düğüm noktası da aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Caminin sonlu eleman modelinde 61565 adet düğüm noktası ve 39450 adet sekiz düğüm noktalı katı eleman kullanılmıştır. Caminin yer aldığı bölge, ikinci derece deprem bölgesi içerisinde bulunduğundan bu bölgede oluşabilecek etkin yer ivmesi değeri 0.3g dir. Bu ivme değeri dikkate alınarak, Türk Deprem Yönetmeliği (TDY–2007) tasarım spektrumuna uyumlu iki yapay deprem ivme kaydı SeismoArtif (2013) programı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 5). Bu ivme kayıtları caminin enine (x) ve boyuna (z) doğrultularında sismik etki olarak kullanılmıştır. Çözümlerde, caminin kendi ağırlığından dolayı oluşan yer değiştirmeleri başlangıç şartı olarak dikkate alınmıştır. Camideki sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu kabul edilerek, rijitlik ve kütle orantılı ilgili sönüm katsayıları, hasarsız durumdaki caminin 6 ve 25 Hz frekanslarında 0.05' lik sönüm oranı sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Dinamik analizler için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır (Chung, J ve Hulbert, GM. 1993). İntegrasyon zaman adımı 0.001 s olarak seçilmiştir. Çözümler ANSYS programı kullanılarak elde edilmiştir. Ulu cami için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.



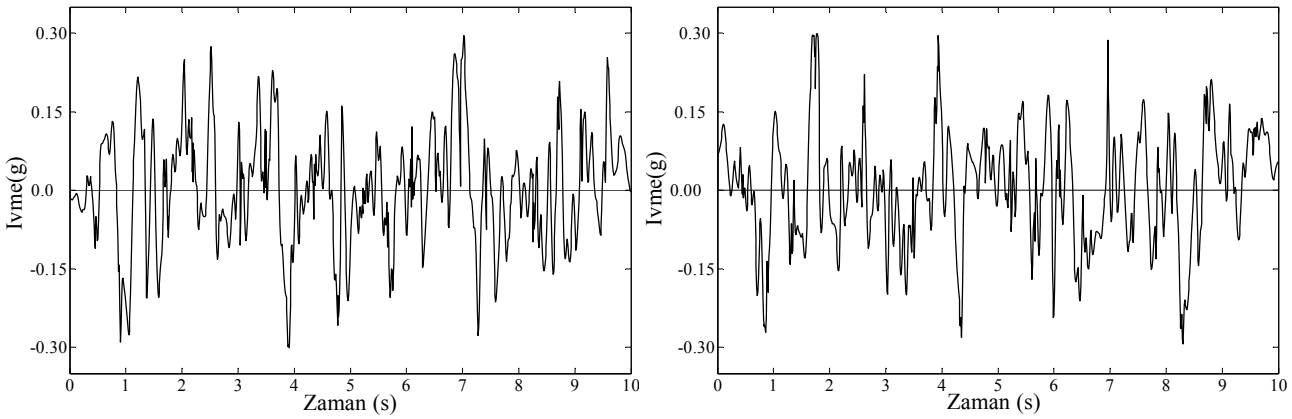
a) üç boyutlu sonlu eleman modeli b) plan görünüşü

Şekil 4. Ulu cami

Ulu camide doğrusal sismik çözümden elde edilen asal eş gerilme eğrileri tüm sistem için Şekil 6' da, gerilmelerin daha büyük değerler aldığı C ve 12 aksları için ise sırasıyla Şekil 7 ve 8' de sunulmuştur. Aşağıda verilecek doğrusal olmayan sismik çözümlerden de görüleceği gibi, hasar öncelikle bu bölgelerde ortaya çıkmakta ve buralarda yoğunlaşmaktadır.

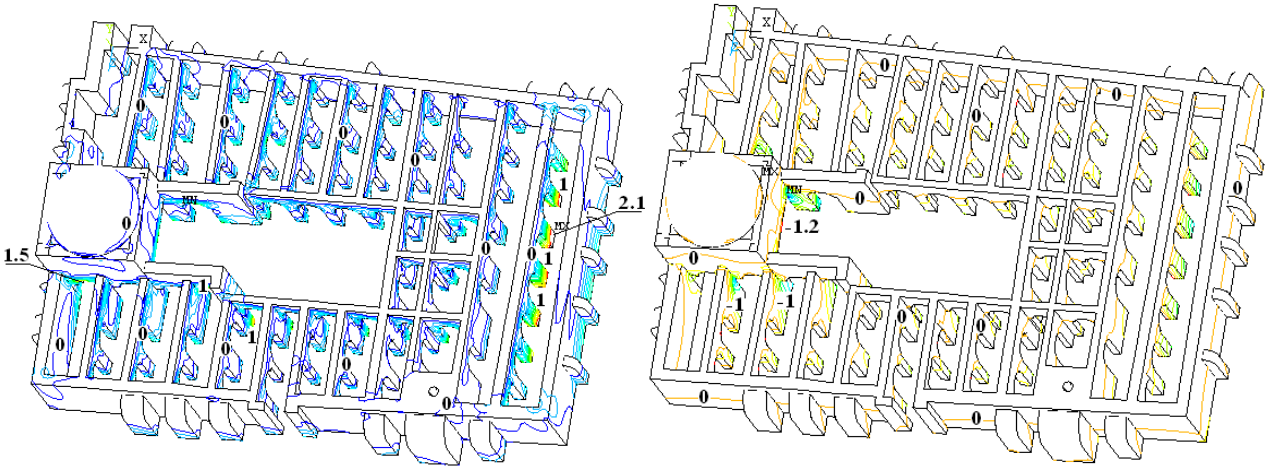
Tablo 1. Ulu Caminin Analizinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Taş Duvarlar				**Tuğla Duvarlar**			
E (MPa)	ρ (t/m^3)	ν	f_t (MPa)	E (MPa)	ρ (t/m^3)	ν	f_t (MPa)
35000	2.5	0.25	1.875	3500	1.7	0.16	0.75



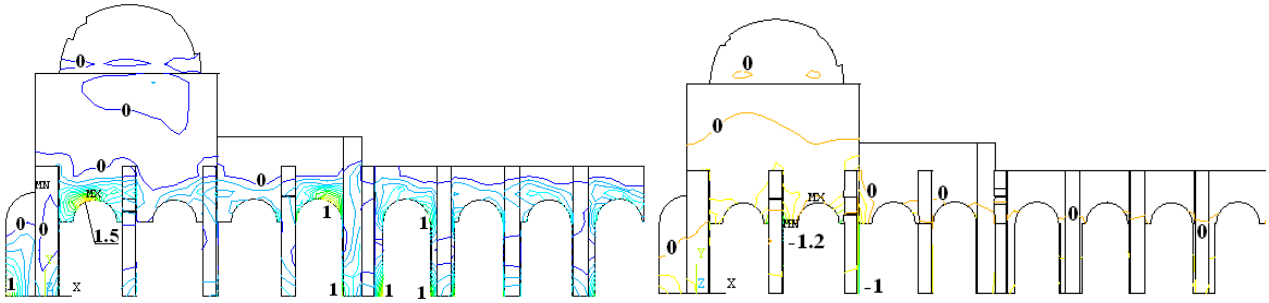
a) *x* (enine) bileşeni b) *z* (boyuna) bileşeni

Şekil 5. Yapay deprem ivme kayıtları



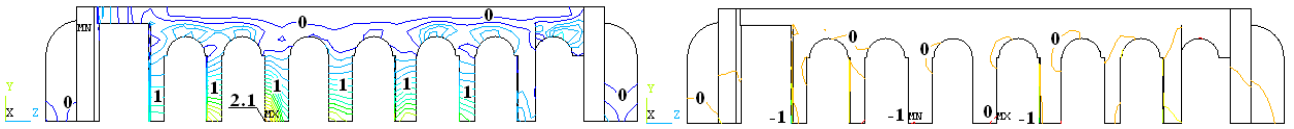
a) maksimum b) minimum

Şekil 6. Ulu caminin asal eş gerilme eğrileri (MPa).



a) maksimum b) minimum

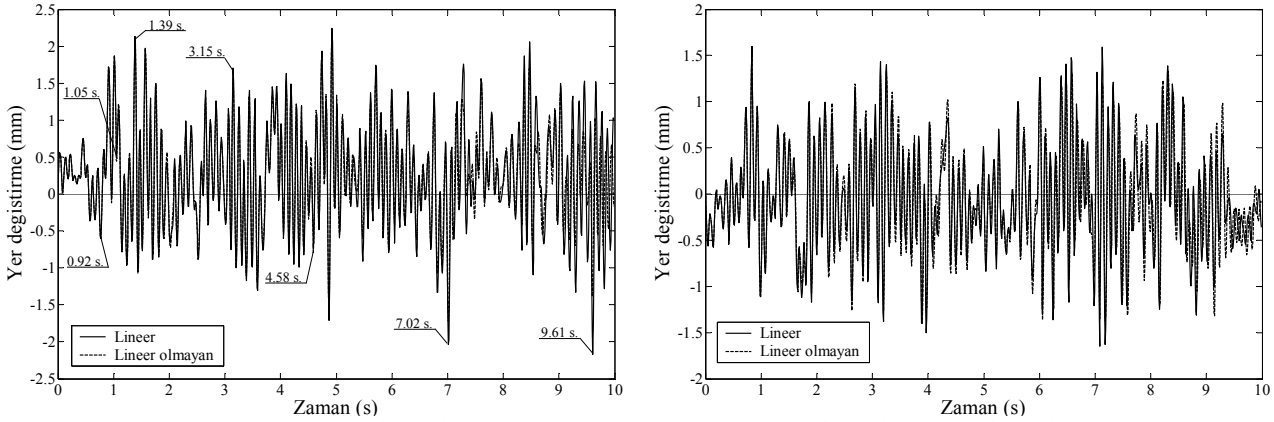
Şekil 7. C aksının asal eş gerilme eğrileri (MPa).



a) maksimum b) minimum

Şekil 8. 12 aksının asal eş gerilme eğrileri (MPa).

Caminin 52487 nolu düğüm noktasının doğrusal ve doğrusal olmayan sismik çözümlerinden elde edilen x ve z yatay doğrultularındaki yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 9' da verilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin frekans ve genlik açısından benzer olduğu görülmektedir. Bu da sistemde oluşan hasarların düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir.

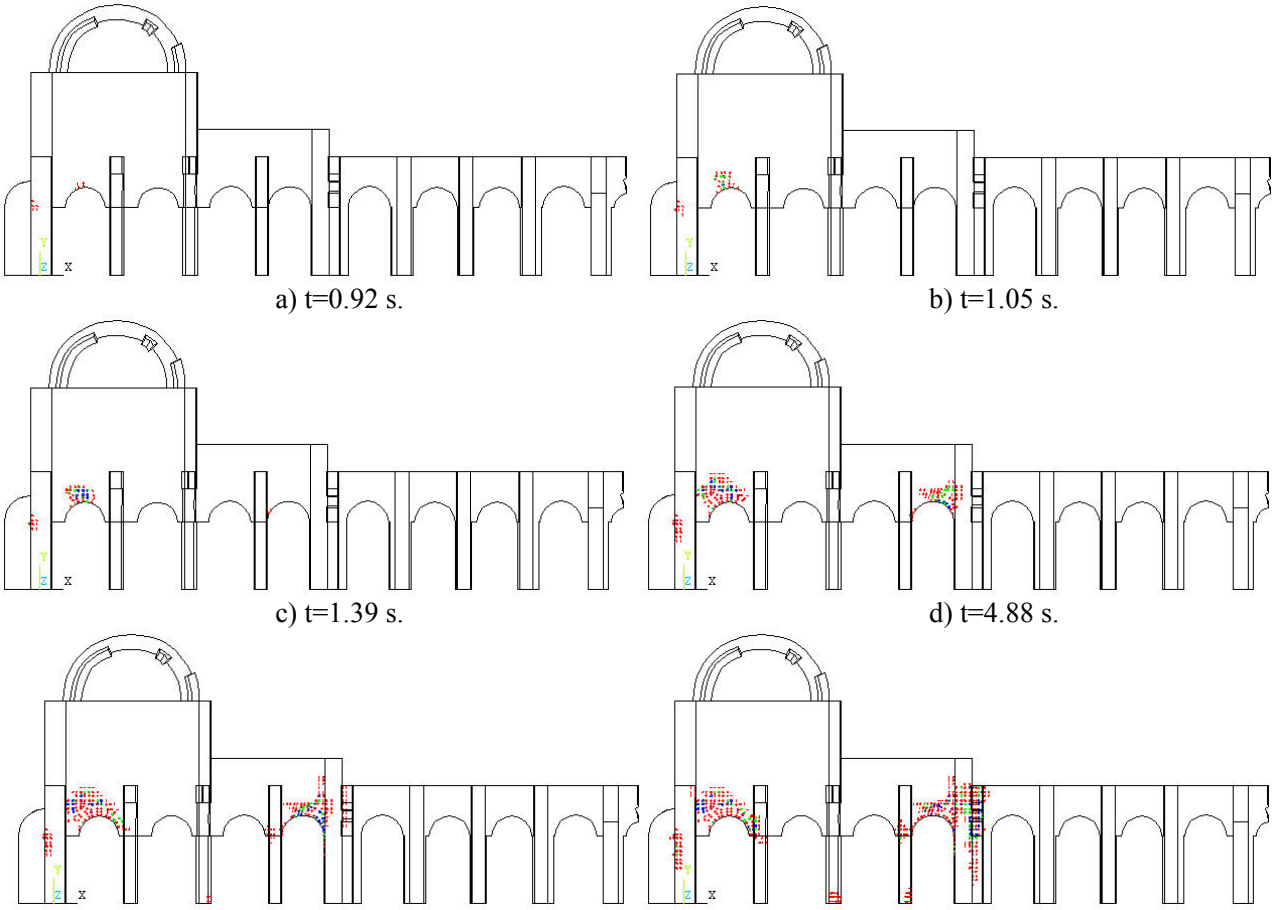


a) *x* (enine) doğrultusu b) *z* (boyuna) doğrultusu

Şekil 9. 52487 nolu düğüm noktasına ait yer değiştirme-zaman grafikleri

Camide ilk çatlak, açıklık mesafelerinin (x doğrultusu) daha az olduğu dolayısıyla rijitliğin nispeten daha yüksek ve gerilmelerin daha büyük olduğu bölgede bulunan C aksı üzerinde, payanda duvarının üst bölgesi ile birleşen cami dış duvarında 0.91 s anında meydana gelmiştir. Bu çatlak, ilerleyen zaman adımlarında payanda-duvar birleşim bölgesinden duvar içine doğru bir yayılım göstermekte ve ayrıca, C aksı üzerinde 1 ve 2 aksları arasında yer alan kemerin üst bölgesinde de hasar oluşmaktadır (Şekil 8.a). Kemer üst bölgesindeki bu hasar ilerleyen zaman adımlarında yukarıya doğru bir yayılış göstermiştir (Şekil 8.b-f). 1.39 s anında C ve 4 nolu aksların kesiştiği bölgede yer alan kemer ve taşıyıcı ayağın birleşim bölgesinde yeni bir hasar bölgesinin oluştuğu görülmektedir. İlerleyen zaman adımlarında C aksı üzerinde 4 ve 5 nolu aksların arasında kalan kemer üst bölgesinde nispeten geniş bir bölgeye yayılmış yeni bir hasar bölgesi meydana gelmiştir (Şekil 8.d). Bu hasar bölgesinin ilerleyişi kemer üst yüzeyinden yukarı doğrudur (Şekil 8.e-f). 7.02 s anında ise C aksının yerel süreksizlik gösterdiği ve 5 aksı ile kesiştiği bölgede ilave hasar bölgesi oluşmuş ve bu hasar bölgesi ilerleyen anlarda birleşim bölgesinden duvar içlerine doğru ilerlemiştir (Şekil 8.e-f, Şekil 9.a-b). C aksının 3 ve 4 akslarıyla birleştiği duvar bölgelerinde meydana gelen hasarların +*x* yönünde bir ilerleyiş sergilediği görülmektedir (Şekil 9.a-b).

C aksında oluşan bu hasar bölgelerine ilave olarak, 12 aksında bulunan kemer ve taşıyıcı ayaklarda da hasar bölgeleri oluşmuştur. 12 aksı, x doğrultusundaki diğer akslardan farklı olarak, B ve C aksları doğrultusunda bağlantı duvarlarına sahip olmadığından, hasarın bu aksta ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu aks üzerindeki hasar bölgeleri incelendiğinde; öncelikle B ve C aksları arasında yer alan 3 taşıyıcı ayağın temelle birleştiği bölgelerde meydana gelmiş (Şekil 10.a) ve temelden yukarıya doğru artış göstermiştir (Şekil 10.b). İlerleyen zaman adımlarında, B aksının sağındaki ilk taşıyıcı ayak ve C aksının solundaki taşıyıcı iki ayağın temel ile birleştiği bölgelerde ilave hasar bölgeleri ortaya çıkmıştır (Şekil 10.c-d).

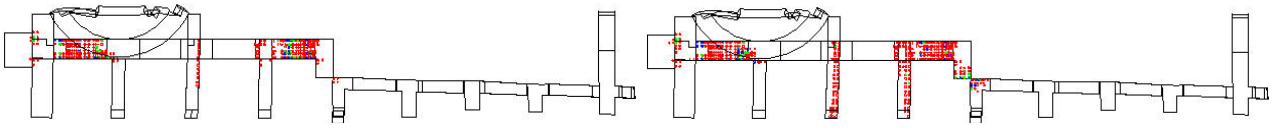


a) t=0.92 s. b) t=1.05 s.

c) t=1.39 s. d) t=4.88 s.

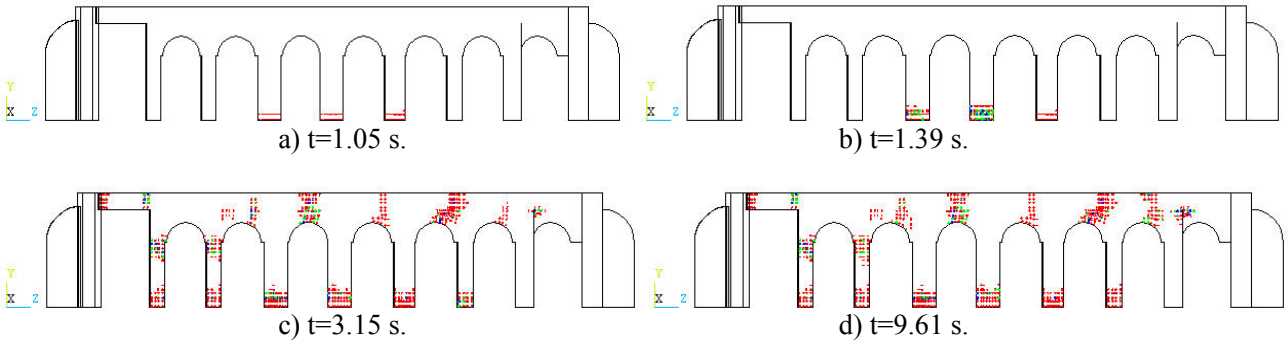
e) t=7.02 s. f) t=9.61 s.

Şekil 8. C aksı üzerinde değişik anlarda oluşan hasarların boy kesit görünümü.



a) t=7.02 s. b) t=9.61 s.

Şekil 9. C aksı üzerinde değişik anlarda oluşan hasarların plan görünümü.



a) t=1.05 s. b) t=1.39 s.

c) t=3.15 s. d) t=9.61 s.

Şekil 10. 12 aksı üzerinde değişik anlarda oluşan hasarlar.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Malatya ilinin Battalgazi ilçesinde bulunan tarihi Ulu caminin doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Caminin makro modelleme tekniği ile üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Malzeme modeli olarak, ezilme ve şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan çatlama/kırılma yapabilen yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Temel zemini rijit olarak kabul edilmiştir. Sismik etki olarak, Türk Deprem Yönetmeliği (TDY–2007) tasarım spektrumuna uyumlu iki yapay deprem ivme kaydı üretilmiş ve yapıya planda birbirine dik iki doğrultuda etki ettirilmiştir. Dinamik analizler için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Caminin doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri frekans ve genlik açısından benzerlik göstermektedir. Bu da sistemde oluşan hasarların düşük seviyelerde olduğunu göstermektedir. Camide ilk çatlak, açıklık mesafelerinin (x doğrultusu) daha az olduğu dolayısıyla rijitliğin nispeten daha yüksek ve gerilmelerin daha büyük olduğu bölgede bulunan C aksı üzerinde, payanda duvarının üst bölgesi ile birleşen cami dış duvarında 0.91 s anında meydana gelmiştir. İlerleyen zaman adımlarında sismik etki ve yapını titreşim özelliklerine bağlı olarak, bu aks üzerinde geniş bölgeye yayılan bir hasar oluşmuştur. Bu aksta meydana gelen hasara ek olarak, 12 aksında da hem kemer hem de taşıyıcı ayaklar yaygın hasar görmüştür. 12 aksının, x doğrultusundaki diğer akslardan farklı olarak, B ve C aksları doğrultusunda bağlantı duvarlarına sahip olmaması, bu aksta ortaya çıkan hasarın sebebi olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Modena, C., Valluzzi, MR., Tongini, FR. and Binda, L. (2002). Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower, *Constr. Build. Mater.* **16**, 385–395.

Betti, M., Orlando, M. and Vignoli A. (2011). Static behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage assessment by numerical modelling, *Computers and Structures,* **89**, 1956–1970.

P. Riva, F. Perotti, E. Guidoboni, E. Boschi, Seismic analysis of the Asinelli tower and earthquakes in Bologna, *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 17 (1998) 525–550.

Fanning, PJ. and Boothby, TE. (2001). Three-dimensional modeling and full-scale testing of stone arch bridges, *Computers and Structures*, **79**, 2645-2662.

Bernardeschi, K., Padovani, C. and Pasquinelli G. (2004). Numerical modeling of the structural behavior of Buti's bell tower, *J. Cultural Heritage,* **5**, 371–378.

Karaton, M., Sayın, E. ve Calayır Y. (2009). Malabadi köprüsünün lineer olmayan sismik analizi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2, Diyarbakır.

Bayraktar, A., Şahin, A., Özcan, D and Yıldırım, F. (2010). Numerical damage assessment of Hagia Sophia bell tower by nonlinear FE modeling, *Applied Mathematical Modelling*, **34**, 92-121.

Sayın, E., Calayır, Y. ve Karaton M. (2011). Tarihi Uzunok Köprüsünün Lineer Olmayan Sismik Analizi, Yedinci Ulusal Deprem Muhendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, İstanbul.

TDY (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik, T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Ankara

Malatya İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, Malatya Ulu Cami Tarihi.

Lourenço, PB. (1996). Computational strategies for masonry structures, Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands.

Manfredi, C. and Ramasco, R. (1993). The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different Methods, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22(10)**, 855-868.

Rodriguez, ME. and Aristizabal, JC. (1999). Evaluation of a seismic damage parameter, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28(5)**, 463-477.

Rajgelj, S., Amadio, C. and Nappi, A. (1993). An internal variable approach applied to the dynamic analysis of elastic-plastic structural systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22(10)**, 885-903.

Bangash, MYH. (1989). Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications, Middlesex Polytechnic Faculty of Engineering, Elsevier Applied Science, London.

William, KJ. and Warnke, EP. (1975). Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete, *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, **19**, 174-186, ISMES, Bergamo, Italy.

Zienkiewicz, OC. and Taylor, RL. (1991). Finite Element Method, McGraw-Hill, London.

SeismoArtif Version 1 (2013) available on www.seismosoft.com

Chung, J., Hulbert, GM. (1993). A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics with Improved Numerical Dissipation: The Generalized-α Method, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 60, pp. 371.