TARİHİ UZUNOK KÖPRÜSÜNÜN YAPI ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

Erkut Sayın[1], Muhammet Karaton[2], Burak Yön[3] ve Yusuf Calayır[4]

[1] *Arş. Gör.Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi, Elazığ*
[2] *Yrd. Doç, İnşaat Müh. Bölümü, Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi, Elazığ*
[3] *Arş. Gör., İnşaat Müh. Bölümü, Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi, Elazığ*
[4] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi, Elazığ*

Email: esayin@firat.edu.tr

ÖZET:

Kültür mirası olan tarihi yapıların önemli bir kısmı da tarihi köprülerdir. Yüzlerce yıllık geçmişe sahip olan tarihi yapılar deprem gibi doğal afetlerde zarar görmekte ya da yıkılmaktadır. Bu çalışmada Malatya ilinin Darende ilçe merkezindeki tarihi Uzunok köprüsünün doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Köprü üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir. Doğrusal olmayan analizde köprünün taşıyıcı kısmı için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli ve dolgu malzemesi için Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Temel ortamı ise doğrusal elastik kabul edilmiştir. Dinamik etki olarak, 1 Mayıs 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerden elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak köprünün sismik davranışı değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Tarihi köprüler, Yapı zemin etkileşimi, Doğrusal olmayan dinamik analiz

1. GİRİŞ

Kültür mirası olarak kabul edilen tarihi yapıların önemli bir bölümünü de tarihi köprüler oluşturmaktadır. Yüzlerce yıllık geçmişe sahip olan bu yapıların en iyi şekilde korunup geleceğe aktarılması gerekmektedir. Depremler tarihi yapıların hasar görmelerine sebep olan en önemli dış faktörlerdendir. Bu yapıların depremlerden en az hasar görmeleri ve yapısal bütünlüklerini korumaları için sismik davranışlarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak gerekli önlemlerin alınması gerekir. Tarihi köprülerin önemli bir bölümü yığma taş duvar tarzında inşa edilmiştir. Bu köprüler, temel, kemer, yan duvar ve dolgu malzemesinden meydana gelmektedir Köprüye etki eden yükler ise kendi ağırlığı, trafik yükü ve depreme bağlı olarak oluşan dinamik etkilerdir. Tarihi köprüler hakkında birçok araştırmacı önemli çalışmalar yapmışlardır. Royles ve Hendry (1991) yaptıkları çalışmada açıklıkları 1, 2.08 ve 2.48 m olan 24 model köprüyü test ederek; dolgu malzemesi, yan duvar ve kanat duvarların kemerin dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Begimgil (1997) yarım tuğla ile inşa edilmiş 1.25 m açıklıklı yığma köprüde yan duvarların dolgu ile etkileşimini araştırmıştır. Fanning ve Boothby (2001) üç yığma köprüyü üç boyutlu sonlu elemanları kullanarak modellemişlerdir. Taşıyıcı yapı elemanları için yayılı çatlak modelini, dolgu malzemesi için ise Drucker-Prager malzeme modelini kullanmışlardır. Söz konusu köprülerin servis yükleri altında statik analizlerini yapmışlar ve elde edilen çözümleri köprü üzerinde yapılan test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Pela vd. (2009), kemerleri betondan ve tuğladan inşa edilmiş iki farklı köprünün ENV 1998-1, OPCM 3274 ve FEMA 440 standartlarına göre doğrusal olmayan statik analizlerini yapmışlardır. Karaton vd. (2009) ise Malabadi köprüsünün doğrusal olmayan sismik analizini yaparak köprünün deprem davranışını incelemişlerdir.

Bu çalışmada, Uzunok köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak, köprünün doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Köprünün kemer ve yan duvarları, şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli ile dolgu malzemesi ise Drucker-Prager malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Temel ortamı doğrusal elastik olarak göz önüne alınmıştır. Dinamik analizlerde HHT-α yöntemi kullanılmış olup sismik etki olarak 1 Mayıs 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır.

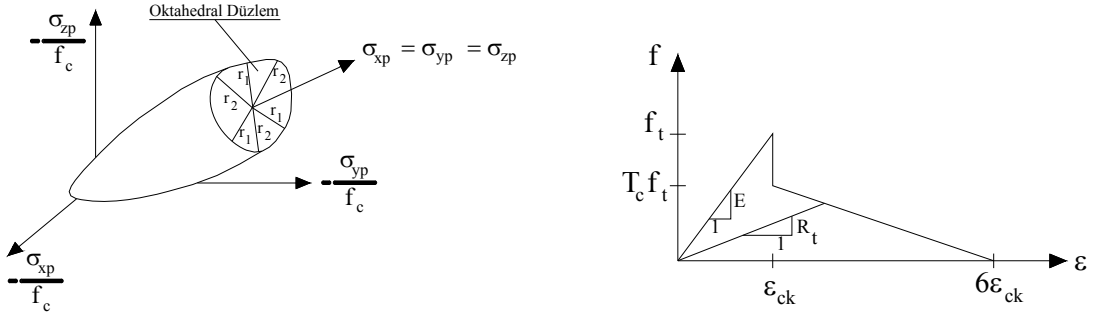
2. YIĞMA YAPILARIN SAYISAL MODELLENMESİ

Yığma yapıların sayısal modellenmesinde hassasiyet düzeyine bağlı olarak detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olmak üzere, üç farklı modelleme tekniği yaygın olarak kullanılır (Lourenço., 1996, Sayın., 2009). Literatür incelendiğinde büyük tarihi yapıların çoğunlukla makro modelleme tekniğine göre modellendiği görülmektedir (Modena vd., 2002, Bernardeschi vd., 2004). Bu çalışmada, Uzunok köprüsünün modellenmesinde makro modelleme tekniği kullanılarak, doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır.

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

2.1. Yayılı Çatlak Modeli

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 Warnke' nin beton göçme yüzeyi modeli yığma yapıların makro modellemesinde kullanılmıştır (Fanning vd., 2001). Bu model, Şekil 1.a' da görüldüğü gibi kesiti konveks olan bir koniye yakın görünüme sahiptir. Konveks kesit simetrik ve düzgün yapıdadır. Şekil 1.a' da σ_{xp}, σ_{yp} ve σ_{zp} birbirlerine dik asal gerilmeleri, f_c ise malzemenin tek eksenli basınç dayanımını göstermektedir. Von Mises ve Drucker-Prager yaklaşımları söz konusu modelin özel durumları olarak elde edilebilir (Zienkiewicz ve Taylor, 1991). Bu modelde göçme yüzeyinin içerisinde kalan gerilme değerlerinde malzeme doğrusal elastik davranış göstermekte; göçme yüzeyinin dışına çıkılan gerilme değerlerinde ise malzemede çatlama veya ezilmeler ortaya çıkmaktadır. Sonlu eleman uygulamalarında yayılı çatlak yaklaşımında çatlak durumu genellikle eleman integrasyon noktalarında değerlendirilmektedir. 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 1.b de 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 1. Üç parametreli model (William, 1975)

2.2. Drucker-Prager Yaklaşımı

Gevrek malzemelerin doğrusal olmayan davranışı, çekme gerilmeleri altında çatlama, basınçta ise ezilme olarak ortaya çıkmaktadır. Drucker-Prager yaklaşımı bu etkilerin göz önüne alınabildiği elasto-plastik bir malzeme modelidir (Bangash., 1989). Bu yaklaşım, Von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde genelleştirilmesinden elde edilmiştir. c kohezyonu ve ϕ içsel sürtünme açısına bağlı olarak ifade edilen Drucker-Prager yaklaşımının akma yüzeyi dik bir koni biçiminde olup plastik şekil değiştirme, hacimdeki değişimle birlikte ortaya çıkmaktadır. Drucker-Prager modelinde eşdeğer gerilme,

$$\sigma_e = 3\ \beta\ \sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{S\}^T\{S\}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

olarak verilir. Burada, σ_m ortalama gerilmeyi (Hidrostatik gerilme), {S} deviatorik gerilme vektörünü ve β ise bir malzeme sabitini göstermekte olup,

$$\beta = \frac{2\ \sin\phi}{\sqrt{3}\ (3-\sin\phi)} \tag{2}$$

bağıntısıyla tanımlanmaktadır. Akma yüzeyini belirten akma kriteri ise,

$$F = 3\ \beta\ \sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{S\}^T\ \{S\}\right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0 \tag{3}$$

Eşitliği ile verilmektedir. Denklem (3)' de verilen σ_y, malzemenin akma gerilmesini göstermektedir. Bu akma kriterini sağlayan gerilmeler için malzemede plastik şekil değiştirmeler ortaya çıkmaktadır.

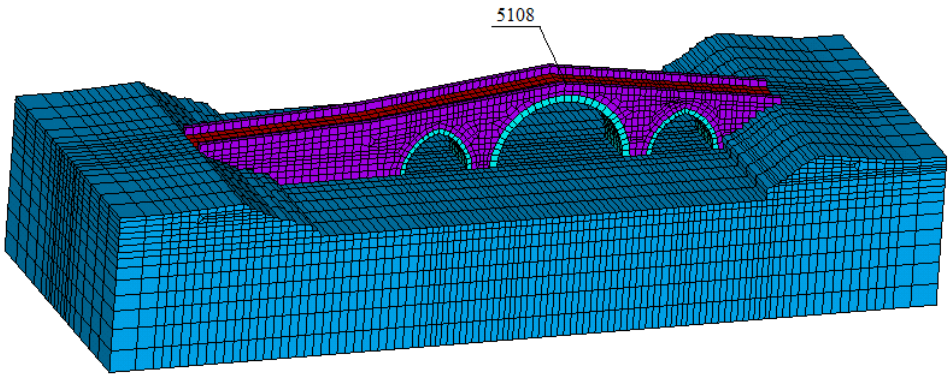
3. UZUNOK KÖPRÜSÜ

Uzunok köprüsü, Malatya ilinin Darende ilçe merkezindeki Tohma çayı üzerindedir. Osmanlı dönemine ait olan köprü 1779 yılında inşa edilmiştir. Köprü taşıyıcı kemer, yan duvarlar, dolgu malzemesi ve üst kısmında bulunan korkuluklardan oluşmaktadır. Köprü, 3.67 m genişliğinde ve 46 m uzunluğunda olup üç kemere sahiptir. İki kenar kemer 3.4 m, orta kemer ise 5 m yarıçaplarındadır. Köprünün yan taşıyıcı duvarlarının kalınlığı 0.45 m, korkuluk yüksekliği ise 0.60 m' dir. Temel ortamı köprü yüksekliğinin 1.5 katı olarak dikkate alınmıştır. Köprü bazı bölgelerinde zamanla oluşan yapısal hasarlardan dolayı, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2007–2008 tarihleri arasında restore edilmiştir. Şekil 2' de Uzunok köprüsünün restorasyondan önceki hali görülmektedir.

Şekil 2. Uzunok köprüsünün restorasyondan önceki durumu

4. SAYISAL UYGULAMA

Uzunok köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli ve yer değiştirmenin zamanla değişim grafiklerinin çizildiği köprünün en üst noktasında yer alan 5108 nolu düğüm noktası Şekil 3' de verilmiştir. Bu sonlu eleman ağ sisteminde 28134 adet düğüm noktası ve 23471 adet sekiz düğüm noktalı katı eleman kullanılmıştır. Köprünün kemer, yan duvar, dolgu ve temel ortamı malzeme özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Sismik etki olarak 1 Mayıs 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Köprünün doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizlerinde temel ortamı doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Bingöl depreminin kuzey-güney bileşeni trafik akışı doğrultusunda, doğu-batı bileşeni nehir akışı doğrultusunda ve düşey bileşeni ise düşey doğrultuda köprüye uygulanmış olup; bu bileşenlere ait ivme grafikleri Şekil 4'de görülmektedir. Söz konusu üç ivme bileşeninin mutlak maksimum genlikleri kuzey-güney, doğu-batı ve düşey bileşenler için sırasıyla 0.55g, 0.28g ve 0.48g dir. Deprem kayıtlarının aynen kullanılması sayısal problemlere neden olduğundan, Bingöl depreminin tüm bileşenlerine ait ivme değerleri 0.75 katsayısı ile çarpılarak yeniden ölçeklendirilmiş ve dinamik analizlerde kullanılmıştır. Hasarsız haldeki köprünün 3. ve 19. modlarında 0.05' lik sönüm oranı sağlanacak şekilde Rayleigh sönüm katsayıları belirlenmiştir. Köprünün dinamik analizleri, HHT- α algoritması kullanılarak yapılmıştır. İntegrasyon zaman adımı 0.001 s olarak seçilmiştir. Çözümler ANSYS paket programı kullanılarak elde edilmiştir.

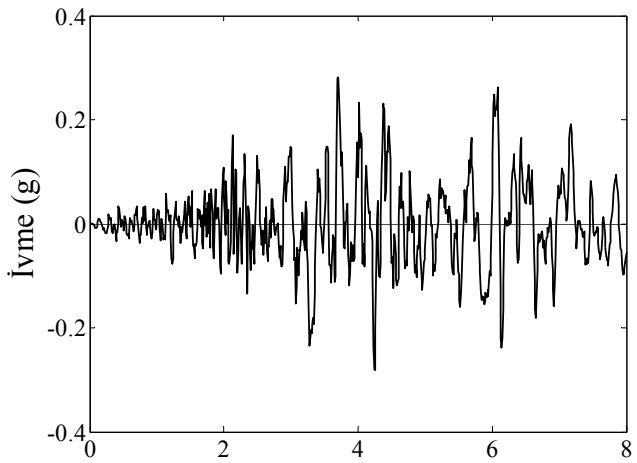


Şekil 3. Uzunok köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli ve yer değiştirmenin zamanla değişim grafiklerinin elde edildiği 5108 nolu düğüm noktası

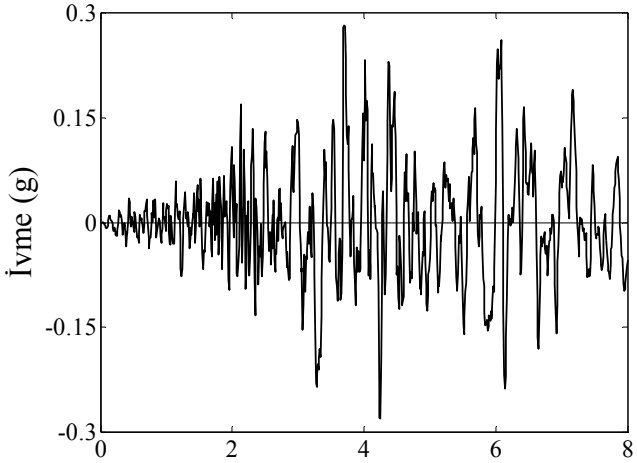
Tablo 1. Köprünün Analizinde Dikkate Alınan Malzeme Özellikleri

Kemerler				**Yan Duvarlar**				**Dolgu**					**Zemin**		
E (MPa)	ρ (t/m^3)	ν	f_t (MPa)	E (MPa)	ρ (t/m^3)	ν	f_t (MPa)	E (MPa)	ρ (t/m^3)	ν	c (MPa)	ϕ^o	E (MPa)	ρ (t/m^3)	ν
2500	2.3	0.2	0.6	2000	2.3	0.2	0.5	800	1.8	0.23	0.39	61	1250	1.8	0.3

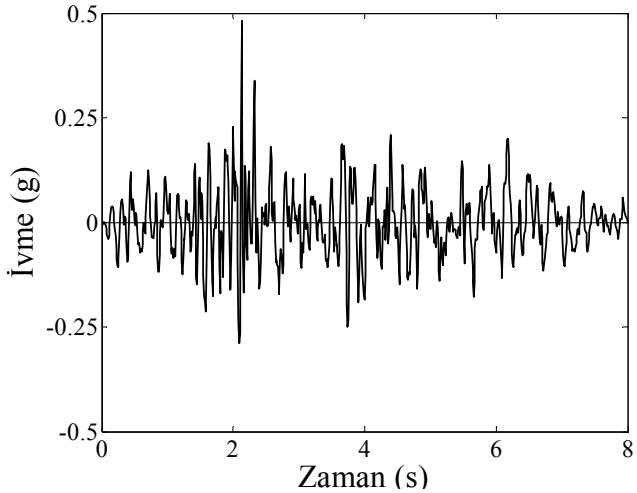
Köprünün 5108 nolu düğüm noktasının doğrusal ve doğrusal olmayan sismik çözümlerinden elde edilen x,y ve z doğrultularındaki yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 5' de verilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlerden elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri 3.711 s anına kadar frekans ve genlik açısından aynı değerlere sahip olmaktadır. Bu andan itibaren köprüde meydana gelen kırılma ve hasarlardan dolayı yer değiştirme genliklerinde bazı küçük farklar meydana gelmektedir. Akış doğrultusundaki yer değiştirmeler diğer doğrultulardaki yer değiştirmelere göre genelde daha büyüktür. 5108 nolu düğüm noktasının doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden elde edilen yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimum değerleri ve yüzde olarak farkları Tablo 2'de verilmiştir. Doğrusal çözümler baz alınarak elde edilen yüzde farkların, % 1' in altında olduğu görülmektedir.



a) Kuzey-güney bileşeni



b) Doğu-batı bileşeni



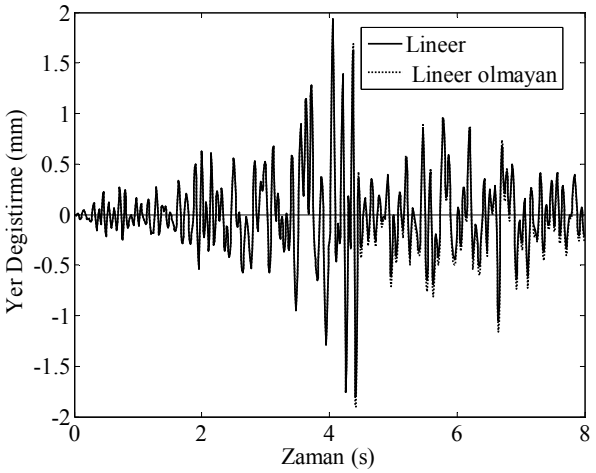
c) Düşey bileşen

Şekil 4. Bingöl depremi ivme kayıtları

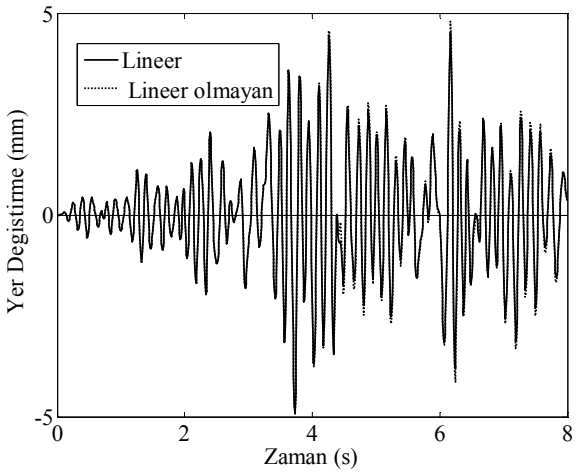
Tablo 2. 5108 nolu düğüm noktasının mutlak maksimum yer değiştirmeleri

Eksen Doğrultusu	Doğrusal (mm)	Doğrusal olmayan (mm)	% Fark
x	1.926	1.940	0.72
y	4.899	4.929	0.61
z	3.113	3.113	0.00

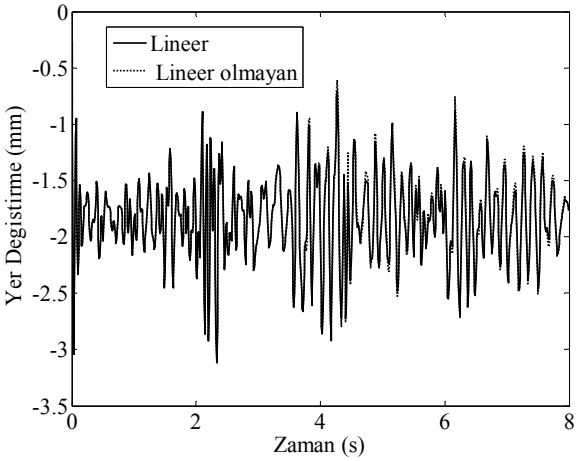
İlk çatlakların oluştuğu 3.711 s anında köprüdeki asal maksimum ve minimum eş gerilme eğrileri Şekil 6' da verilmektedir. Değişik anlarda köprüdeki çatlak ilerleyişi Şekil 7' de görülmektedir. Memba bölgesinde, gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı köprü sol kemerinin temel ile birleşen sağ kısmı ile orta kemerin temelle birleşen sağ kısmında ilk çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 7.a). Köprünün titreşim hareketine bağlı olarak, ilk çatlakların oluştuğu kemer ayaklarında çatlaklar soldan sağa doğru zamanla genişlemektedir. İlerleyen zaman adımlarında köprünün sağ kemerinin sağ üst bölgesinde de yeni bir çatlak bölgesi meydana gelmiştir (4.270 s anında). Daha sonraki zaman adımlarında bu bölgenin genişlemesiyle birlikte bu bölgenin sol karşısında yer alan korkuluk bölgesinde de yeni bir çatlak bölgesi oluşmuştur (4.280 s anında). İlerleyen zaman adımlarında söz konusu son iki çatlak bölgesi genişleyerek birleşmiştir (4.500 s anında). 4.500 s anından sonraki zaman adımlarında hasarlarda önemli bir artış gözlenmemektedir (Şekil 7.e-h).



a) Trafik akış doğrultusu

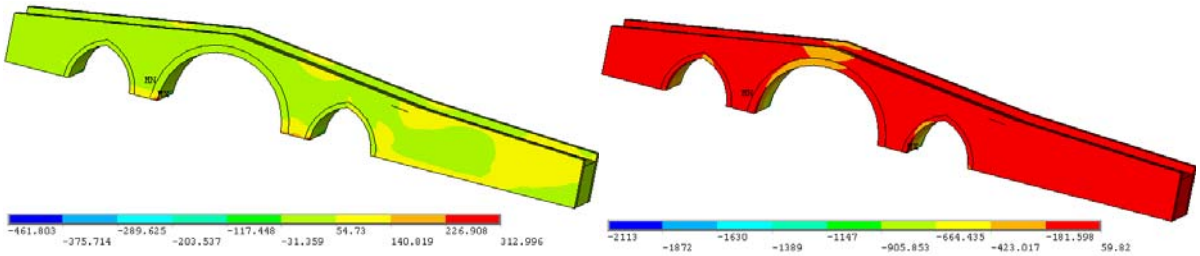


b) Nehir akış doğrultusu



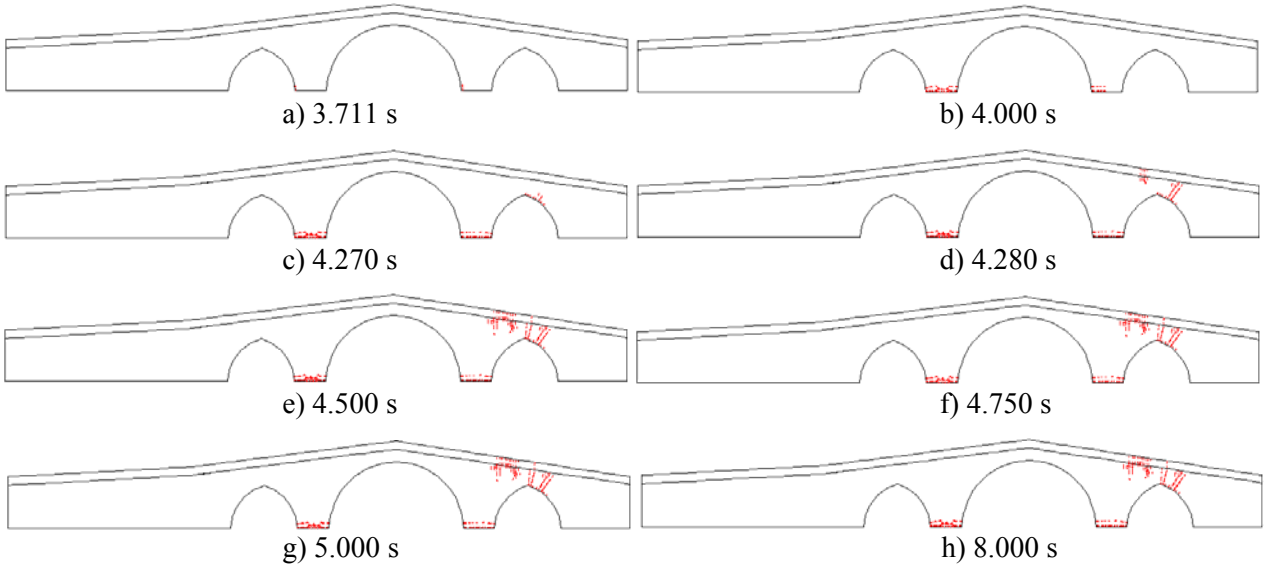
c) Düşey doğrultu

Şekil 5. 5108 nolu düğüm noktasının yer değiştirme zaman grafikleri



a) Asal maksimum b) Asal minimum

Şekil 6. Köprüde 3.711 s anında oluşan asal maksimum ve minimum eş gerilme eğrileri



a) 3.711 s b) 4.000 s

c) 4.270 s d) 4.280 s

e) 4.500 s f) 4.750 s

g) 5.000 s h) 8.000 s

Şekil 7. Değişik anlarda köprüdeki çatlak ilerleyişi

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Malatya ilinin Darende ilçesindeki Tohma çayı üzerinde bulunan tarihi Uzunok köprüsünün doğrusal olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Makro modelleme yaklaşımı esas alınarak köprünün üç boyutlu katı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Köprünün kemer ve yan duvarları, şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli ile dolgu malzemesi ise Drucker-Prager malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Temel ortamı ise doğrusal elastik olarak dikkate alınmıştır. Dinamik etki olarak, 1 Mayıs 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları seçilmiştir. Dinamik analizlerde HHT-α yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden elde edilen köprü korkuluk duvarı en üst noktasına ait yer değiştirme-zaman grafikleri ilk çatlamanın oluştuğu ana kadar frekans ve genlik açısından aynı olmaktadır. Bu andan itibaren köprüde meydana gelen kırılma ve hasarlardan dolayı yer değiştirme genliklerinde farklar meydana gelmektedir. Köprüde ilk çatlaklar memba bölgesinde, gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı köprü sol kemerinin temel ile birleşen sağ kısmı ile orta kemerin temelle birleşen sağ kısmında meydana gelmiştir. Köprünün titreşim hareketine bağlı olarak, ilk çatlağın oluştuğu ayaklarda hasar genişleyerek yayılmıştır. Ayrıca, ilerleyen zaman adımlarında önce köprü sağ kemerinin sağ üst bölgesinde bir çatlak bölgesi ve daha sonra bu bölgenin genişlemesiyle birlikte bu bölgenin sol karşısında yer alan korkuluk bölgesinde de yeni bir çatlak bölgesi oluşmuştur. Köprüde meydana gelen hasarlar, köprünün stabilitesini tehlikeye sokacak

büyüklükte olmamıştır. Sonuç olarak; deprem yer hareketi karakteristikleri titreşim hareketini ve buna bağlı olarak hasar yayılışını önemli düzeyde etkilemektedir. Ülkemiz gibi aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan bölgelerde tarihi yapıların sismik davranışlarının belirlenmesinde deprem etkilerinin gerçekçi bir şekilde dikkate alınması önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

Royles, D. and Hendry, AW (1991). Model tests of masonry arches, *Proc Inst Civil Engineers Part 2*, **91(6)**, 299-321.

Begimgil, M. (1997). Behavior of restrained 1.25 m span model masonry arch bridge, *Arch Bridges*, London, Thomas Telford, 321-327.

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

Pela, L., Aprile, A. and Benedetti, A. (2009). Seismic assessment of masonry arch bridges, *Engineering Structures*, **31**, 1777-1788.

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

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

Sayın, E. (2009). Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Türkiye.

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.

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.

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.

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.

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

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.