

TARİHİ SULTAN MAHMUT BENDİNİN LİNEER OLMAYAN SİSMİK ANALİZİ

Yusuf CALAYIR¹, Muhammet KARATON² ve Musa YETKİN³

ÖZ

Bu çalışmada, kâgir kemer baraj şeklinde inşa edilen tarihi Sultan Mahmut bendinin katı-sıvı etkileşimi dikkate alınarak, lineer ve lineer olmayan sismik analizleri yapılmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bendin kret yer değiştirmesi, gerilme ve hasar durumu değerlendirilmiştir. Lineer olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Katı-sıvı etkileşimi Euler yaklaşımıyla dikkate alınmıştır. Dinamik etki olarak, 12 Kasım 1999 Düzce depreminin Düzce ivme kayıtları seçilmiştir. Bu depremin, doğu-batı, kuzey-güney ve düşey bileşenleri sırasıyla akış, akışa dik ve düşey doğrultularda bent-zemin-rezervuar sistemine uygulanmıştır. Çözümlerde ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katı-sıvı etkileşimi, Euler yaklaşımı, Yayılı çatlak modeli, Lineer ve lineer olmayan sismik analiz

ABSTRACT

In this study, linear and nonlinear seismic analyses of historical Sultan Mahmut barrage which is constructed as masonry arch dam type are conducted by considering solid-fluid interaction and obtained results are compared with other. Displacements of the crest, cases of stress and damage on the barrage are evaluated. Smeared crack model which includes the strain softening is used in the nonlinear analysis for the behavior of barrage material. Reservoir and soil domains are assumed to be linear elastic. Solid-fluid interaction is considered by Eulerian approach. For the dynamic input, acceleration records of Düzce station of November 12, 1999 Düzce earthquake are used. East-west, north-south and vertical components of these records are acted in the stream, cross and vertical directions of the barrage-soil-reservoir system, respectively. ANSYS finite element program is used for the solutions.

Keywords: Solid-fluid interaction, Eulerian approach, Smeared crack model, Linear and nonlinear seismic analyses

¹ Prof. Dr. Yusuf Calayır., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye,
e-posta: ycalayir@firat.edu.tr

² Yrd. Doç. Dr. Muhammet Karaton, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye,
e-posta: mkaraton@firat.edu.tr

³ Arş.Gör. Musa Yetkin, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye,
e-posta: musayetkin@firat.edu.tr

GİRİŞ

Kültür mirası olan tarihi yapıların bir çeşidi de su bentleridir. Bu yapılar genellikle sulama ve/veya içme suyu sağlama amacıyla inşa edilmektedirler. Su bentleri kendi ağırlık yükleri yanında, bent-zemin ve bent-sıvı etkileşimlerine bağlı olarak ortaya çıkan ilave yüklere de maruz kalmaktadırlar. Sözü edilen etkileşim yüklerinde deprem etkisine bağlı olarak genellikle büyük artışlar meydana gelmektedir.

Yığma yapıların nümerik modellenmesinde yapı sisteminin büyüklüğüne bağlı olarak mikro, meso (basitleştirilmiş mikro) ve makro modelleme olmak üzere üç farklı modelleme tekniği kullanılmaktadır. Büyük boyutlu yığma yapı sistemleri çoğunlukla makro modelleme tekniği kullanılarak modellenmektedir (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 modeli kullanılmıştır. 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. Betti ve Vignoli (2008) Roma stili bir yığma kilise olan Farneta kilisenin, makro modelleme yöntemiyle matematiksel modelini oluşturarak, yapısal davranışını ve sismik hasar görebilirliğini incelediler. Karaton vd. (2009), Malabadi köprüsünün Erzincan depremi etkisi altında doğrusal olmayan sismik davranışını değerlendirmişlerdir. Bayraktar vd. (2010), makro modelleme yöntemiyle Trabzon'da bulunan Ayasofya çan kulesinin sonlu eleman 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 incelemişlerdir. Erkek vd. (2013) tarihi Malatya Ulu camisinin, makro modelleme tekniği ile üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmuş, doğrusal ve doğrusal olmayan sismik davranışını değerlendirmişlerdir.

Bu çalışmada, kâgir kemer baraj şeklinde inşa edilen tarihi Sultan Mahmut bendinin katı-sıvı etkileşimi dikkate alınarak, lineer ve lineer olmayan deprem analizleri yapılmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak bendin sismik davranışı değerlendirilmiştir. Lineer olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Katı-sıvı etkileşimi Euler yaklaşımıyla dikkate alınmıştır. Dinamik etki olarak, 12 Kasım 1999 Düzce depreminin Düzce ivme kayıtları seçilmiştir. Dinamik analizler için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltilme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır (Chung ve Hulbert, 1993).

TARİHİ SULTAN MAHMUT BENDİ

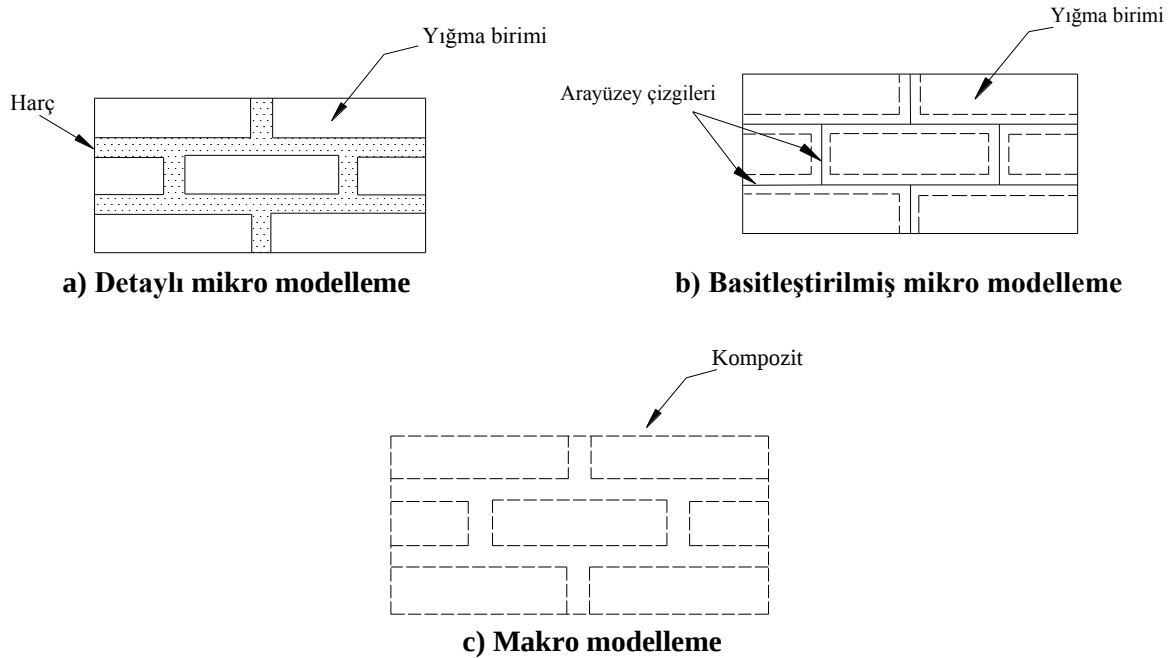
Sultan Mahmut bendi, İstanbul Taksim tesislerinin bentlerinden biri olup, Kağıthane deresinin kollarından Bahçeköy'de Arabacı Mandırası deresinin batı kolu üzerine II. Mahmut tarafından yaptırılarak 1839 yılında tamamlanmıştır. Yapılış zamanı sırası itibariyle Taksim tesislerinin üç bendinin en sonuncusudur. Bend-i Cedit (Yeni Bent) diye de adlandırılan bu bent kemer şeklinde olup kâgir ağırlık baraj tipindedir. Sultan Mahmut Bendinin tepesi mansap tarafına doğru meyilli olup, üzeri mermer plaklar ile kaplıdır (Şekil 1). Bendin hidrolojik bölgesi 830000 m^2 , kret yüksekliği 15.45 m , kret uzunluğu 101.55 m ve hazne hacmi 343325 m^3 tür (Çeçen, 1992).



Şekil 1. Sultan Mahmut Bendi

YIĞMA YAPILARIN NÜMERİK MODELLENMESİ

Yığma yapıların modellenmesinde hassasiyet düzeyine ve istenen basitliğe bağlı olarak Şekil 2 de gösterilen üç teknik yaygın olarak kullanılır (Lourenço, 1996; Sayın, 2009). Bunlar, detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak sıralanabilir. Detaylı mikro modellemede, yığma birimi ve harçın malzeme özellikleri yani elastisite modülü, Poisson oranı ve birim hacim ağırlıkları ayrı ayrı değerlendirilir. Hassas bir modelleme tekniği olmakla birlikte, yapının tamamının çözümünde çözüm süresi çok uzamaktadır. Bu nedenle, küçük yapıların ya da büyük yapıların bir parçasının çözümünde kullanışlı olmaktadır.

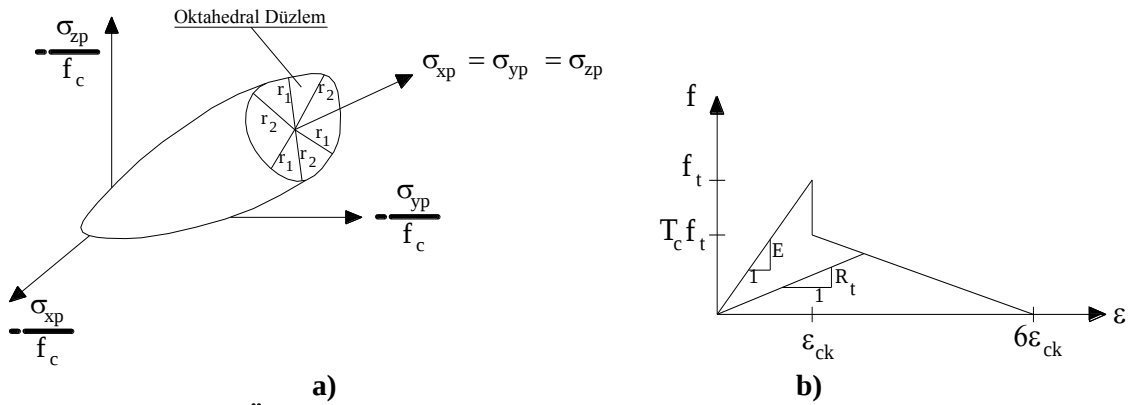


Şekil 2. Yığma yapıların modelleme teknikleri

Basitleştirilmiş mikro modellemede, yığma birimlerinin boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Yığma birimleri birbirinden ara yüzey çizgileri ile ayrılırlar. Sistemde meydana gelecek çatlakların bu ara yüzey çizgilerinde meydana geleceği kabul edilir.

Makro modellemede ise, taş, tuğla vb. yığma birimleri ile harç arasında ayırım yapmaksızın, yapıyı oluşturan bu malzemelerin ortak özelliğini yansıtan eşdeğer kompozit bir malzeme modeli seçilir. Büyük sistemlerin modellenmesinde bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azalttığından çoğunlukla tercih edilir.

Bu çalışmada yığma yapı, makro modelleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. Makro modelleme tekniği ile matematik modeli oluşturulan yapıların lineer olmayan çözümleri için kırılma ve hasar mekaniği yöntemleri kullanılabilir. Günümüzde kırılma mekaniğinde çatlaklar; global (ayrık çatlak) ve lokal (yayılı çatlak ve hasar mekaniği) yaklaşım olmak üzere, iki ayrı çatlak modeli kullanılarak incelenmektedir. Ayrık çatlak yaklaşımında çatlaklar, sürekli ortam içerisinde süresiz bir bölgenin tanımlanmasıyla modellenmektedir. Yayılı çatlak yaklaşımında ise, malzemenin davranışını temsil eden bünye denklemleri çatlak düzeyine ve durumuna bağlı olarak değiştirilerek kullanılmaktadır. Hasar mekaniği lokal bir yaklaşım olup yayılı çatlak modeliyle aynı felsefeye dayanmaktadır (Manfredi ve Ramasco, 1993; Rajgelj vd. 1993).



Şekil 3. Üç parametrelili model için a) göçme yüzeyi ve b) tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

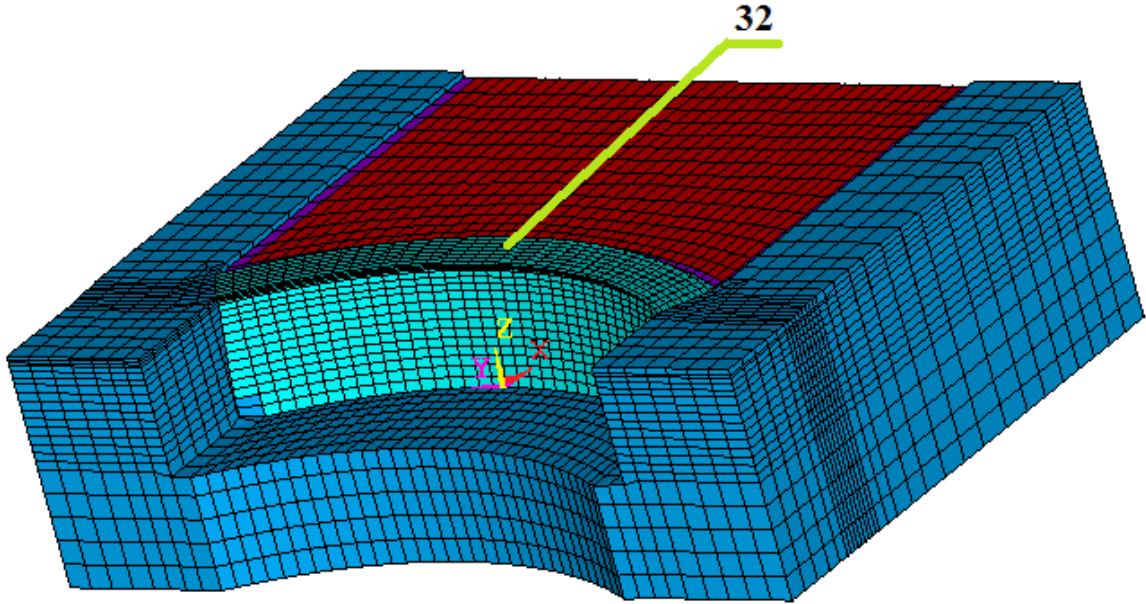
Yayılı Çatlak Modeli

Bu çalışmada, yayılı çatlak modeli için William ve Warnke (1975) modelinin özel hali olan üç parametrelili beton modeli kullanılmıştır. Üç parametrelili model William tarafından geliştirilmiş olup, düşük basınç altında çekmeye maruz kesitlerdeki beton için göçme yüzeyini tanımlamaktadır. Zeinkiewicz ve Taylor (1991), beton gibi gevrek özelliğe sahip malzemeler için bu malzeme modelinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. William Warnke' nin beton göçme yüzeyi modeli yığma yapıların global modellemesinde etkin bir şekilde kullanılabilir (Fanning ve Boothby, 2001; Cavicchi ve Gambarotta, 2005). Bu model, Şekil 3.a' da görüldüğü gibi kesiti konveks olan bir koniye yakın görünüme sahiptir. Konveks kesit simetrik ve düzgün yapıdadır. Burada, σ_{xp}, σ_{yp} ve σ_{zp} birbirlerine dik asal gerilmeleri, f_c ise malzemenin tek eksenli basınç dayanımını göstermektedir. Böyle bir kesit kolayca bir daireye dönüştürülebileceğinden, von Mises ve Drucker-Prager yaklaşımları bu modelin özel durumları olarak elde edilebilir (ANSYS, 2008; Zeinkiewicz ve Taylor, 1991). Bu modelde göçme yüzeyinin içerisinde kalan gerilme değerleri elde edildiği zaman malzemenin lineer elastik davranış gösterdiği; göçme yüzeyinin dışına çıkılan gerilme değerlerinde ise malzemede çatlama ve ezilmelerin ortaya çıkacağı kabulü vardır. Yayılı çatlak yaklaşımıyla sonlu eleman uygulamalarında çatlakların genellikle eleman üzerinde alınan integrasyon noktalarında oluştuğu kabul edilmektedir. Bir integrasyon noktasındaki çatlakların varlığı, çatlakla 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 Şekil 3.b' de verilen tek eksenli gerilme şekil değiştirme eğrisi üzerinde görülmektedir. Burada, f_t malzemenin tek eksenli çekme dayanımını, T_c çatlama dan hemen sonraki çekme dayanımı azaltma katsayısını, E elastisite modülünü ve R_t ise çatlama yumuşama bölgesi içerisinde hesap edilen Elastisite modülünü belirtmektedir. Ayrıca, ϵ_{ck} çatlama sınır şekil değiştirmesini, $6\epsilon_{ck}$ ise kopma sınır şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

SAYISAL UYGULAMA

Tarihi Sultan Mahmut bendinin bent-zemin-rezervuar etkileşimi dikkate alınarak, lineer ve lineer olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Lineer olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Katı-sıvı etkileşimi Euler yaklaşımıyla dikkate alınmıştır. Bent-zemin-rezervuar sistemine ait sonlu eleman ağı Şekil 4' de görülmektedir. Bu ağ üzerinde bendin kretinde bulunan ve yer değiştirmelerin zamanla değişim grafiklerinin çizildiği bir düğüm noktası ayrıca gösterilmiştir. Bent, zemin ve sıvı ortamları için sırasıyla, 4224, 12996 ve 7380 adet dörtgen prizmatik eleman kullanılmıştır. Bent-zemin-rezervuar sisteminin sonlu eleman ağında toplam 27867 adet düğüm noktası vardır.

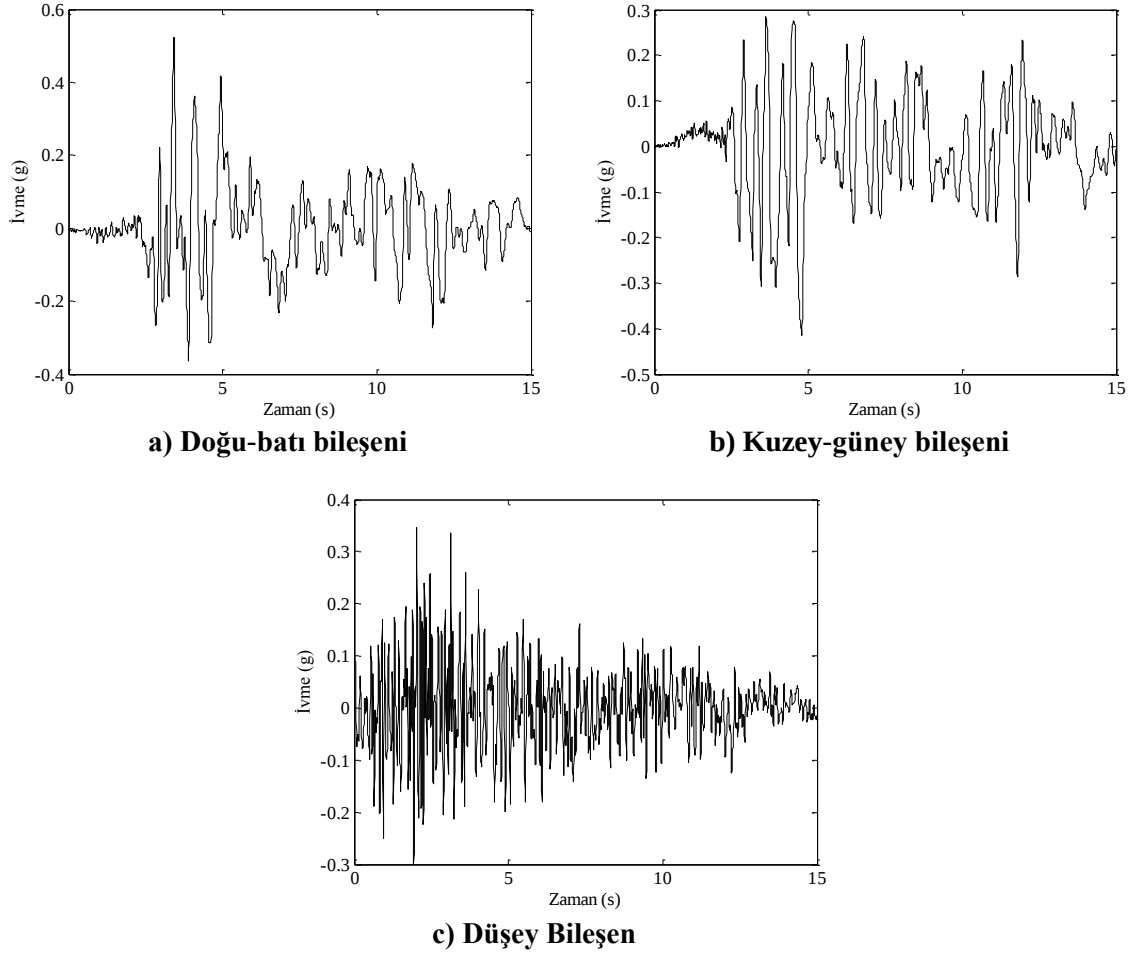


Şekil 4. Bent-zemin-rezervuar sisteminin üç boyutlu sonlu eleman ağı

Dinamik etki olarak, 12 Kasım 1999 Düzce depreminin Düzce ivme kayıtları dikkate alınmıştır (Şekil 5). Söz konusu ivme kayıtlarının mutlak maksimum genlikleri doğu-batı, kuzey-güney ve düşey bileşenler için sırasıyla 0.5237g, 0.4156g ve 0.3462g' dir. Bu depremin, doğu-batı, kuzey-güney ve düşey bileşenleri sırasıyla akış (-x), akışa dik (-y) ve düşey (z) doğrultularda bent-zemin-rezervuar sistemine uygulanmıştır. Dinamik analizler için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltilme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Çözümler ANSYS sonlu eleman programıyla elde edilmiştir.

Bent malzemesi için elastisite modülü 25×10^3 MPa, birim hacim kütlesi 2400 kg/m^3 , Poisson oranı 0.25, basınç dayanımı 15 MPa ve çekme dayanımı 1.0 MPa alınmıştır. Çözümlerde zemin kütlesiz kabul edilmiş, elastisite modülü 12.5×10^3 MPa ve Poisson oranı 0.25 seçilmiştir. Rezervuardaki sıvının birim hacim kütlesi 1000 kg/m^3 ve hacimsel elastisite modülü 2070 MPa olarak alınmıştır.

Buna göre sıvıdaki basınç dalgası hızı 1438.75 m/s olmaktadır. Çatlamadan hemen sonraki çekme dayanım azaltma katsayısı 1 olarak seçilmiştir. Katı ortamı için Rayleigh sönümü dikkate alınmıştır. Rayleigh sönüm sabitleri 15.9599 Hz (sistemin ilk frekansı) ve 30.3042 Hz (sistemin dördüncü frekansı) lik frekanslarda %5' lik bir sönümü sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. Rezervuarın boş olduğu kabulüne göre hesaplanan bu frekanslarda sırasıyla akış ve akışa dik doğrultudaki modal kütle katılımları yüksek çıkmaktadır. İntegrasyon zaman adımı lineer davranış bölgesinde deprem kayıt aralığı olan 0.005 s olarak dikkate alınırken, lineer ötesi davranış bölgesinde 0.001 s olarak uygulanmıştır.



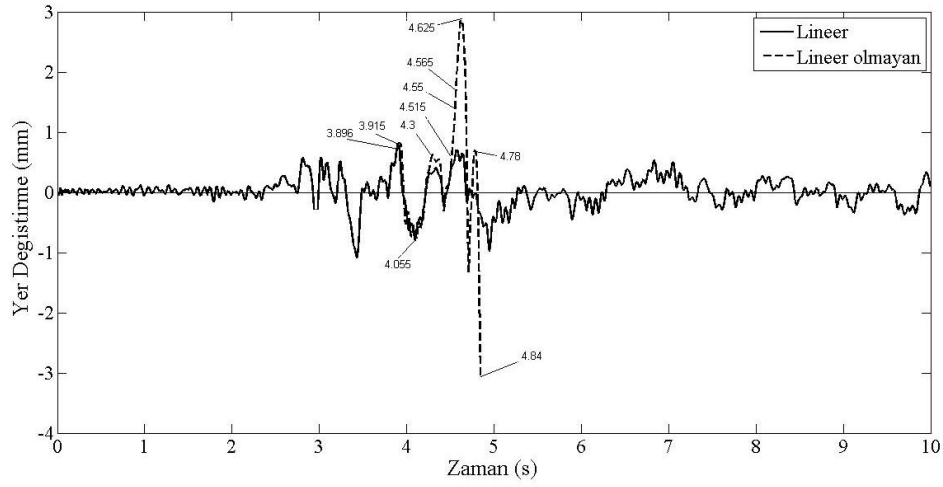
Şekil 5. 12 Kasım 1999 Düzce depreminin Düzce ivme kayıtları

Düzce ivme kayıtları altında yapılan ön analizlerde bentte oluşan maksimum asal gerilmelerin büyük değerler aldığı, buna bağlı olarak bentte yaygın hasarların oluştuğu ve nümerik stabilite problemlerine sebep olduğu tespit edilmiştir. Erken ortaya çıkan nümerik stabilite problemini aşmak/geciktirmek için söz konusu ivme kayıtlarının genlikleri 0.88 katsayısı ile çarpılarak ölçeklendirilmiş ve bu yeni haliyle analizlerde kullanılmıştır.

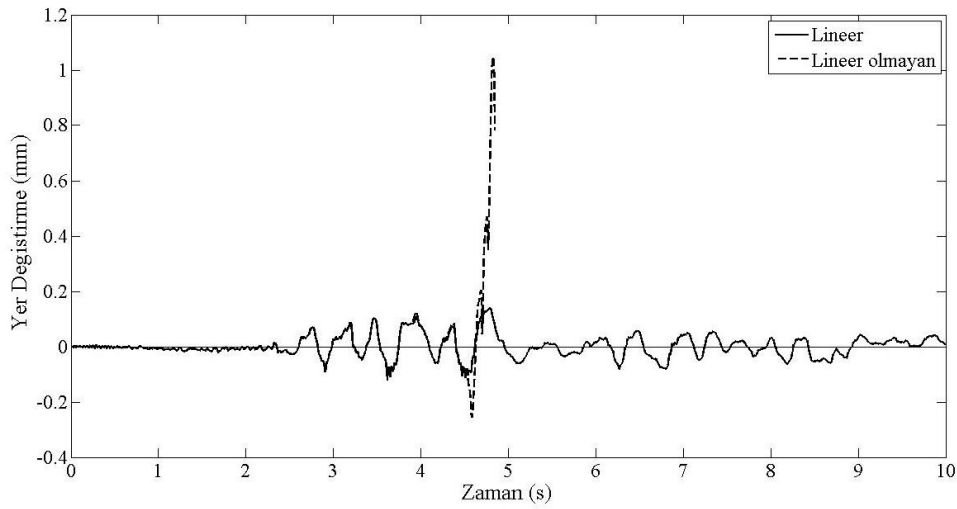
Ölçeklendirilmiş ivme kayıtları dikkate alınarak, bent-zemin-rezervuar sisteminin lineer ve lineer olmayan sismik çözümleri yapılmıştır. Bendin kret orta bölgesinde yer alan 32 nolu düğüm noktasının akış, akışa dik ve düşey doğrultulardaki yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri Şekil 6' da verilmiştir. Lineer ve lineer olmayan çözümlerden elde edilen yer değiştirmeler, bentte ilk çatlakların oluştuğu 3.896 s anına kadar (Şekil 7) frekans ve genlik açısından aynı değerlere sahip olmaktadır. Bu andan sonra bentte meydana gelen kırılma ve hasarlardan dolayı yer değiştirme genliklerinde belirgin farklar oluşmaktadır.

İlk çatlaklar, Şekil 7' den görüleceği üzere 3.896 s anında bendin memba tarafında gerilme yığılmalarının oluştuğu ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı bent-zemin ara yüzeyinin

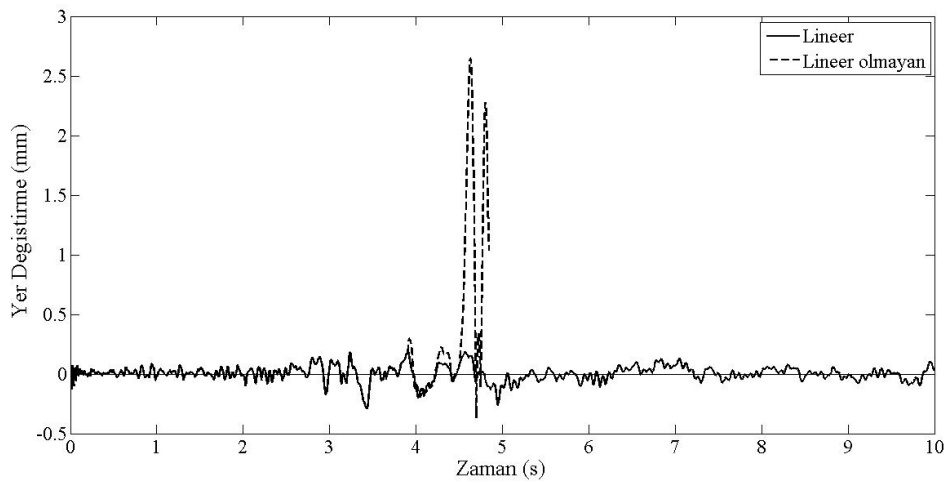
orta bölgesi civarında meydana gelmektedir. Çatlakların eleman integrasyon noktalarında oluştuğu kabul edilmiştir. Bir eleman integrasyon noktasında ortaya çıkan çatlak, açıkken içi boş daire ile, kapalı iken $\otimes$ sembolü ile temsil edilmiştir.



a) Akış doğrultusundaki yer değiştirme

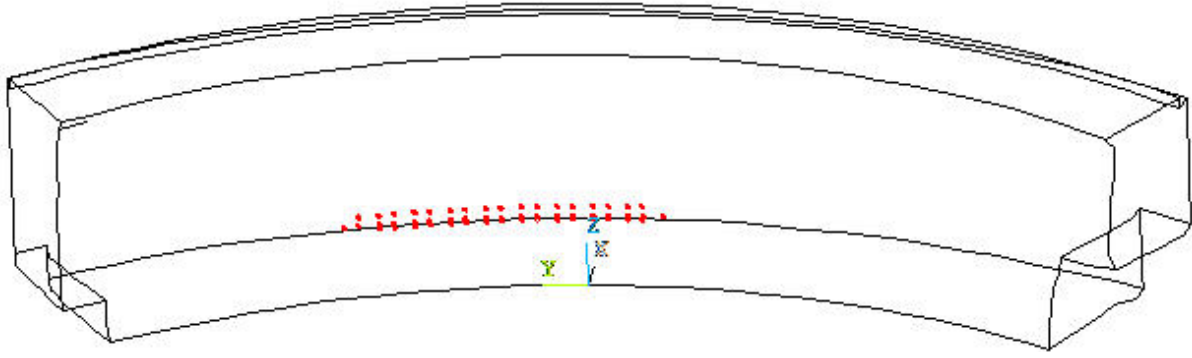


b) Akışa dik doğrultudaki yer değiştirme

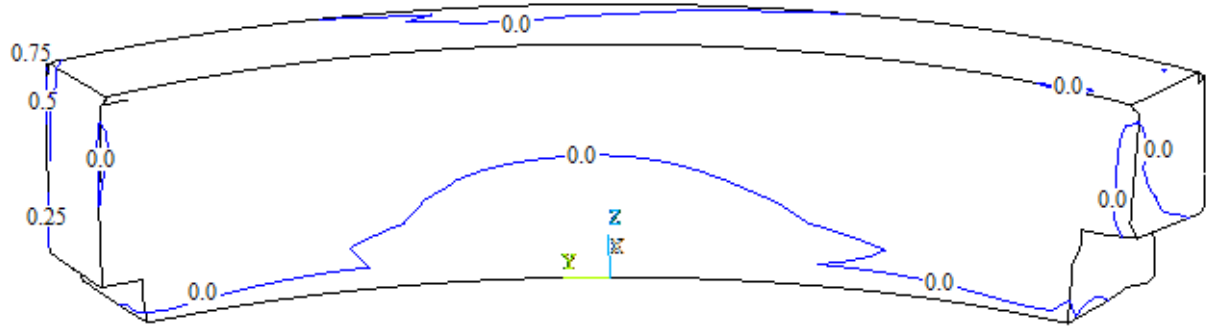


c) Düşey doğrultudaki yer değiştirme

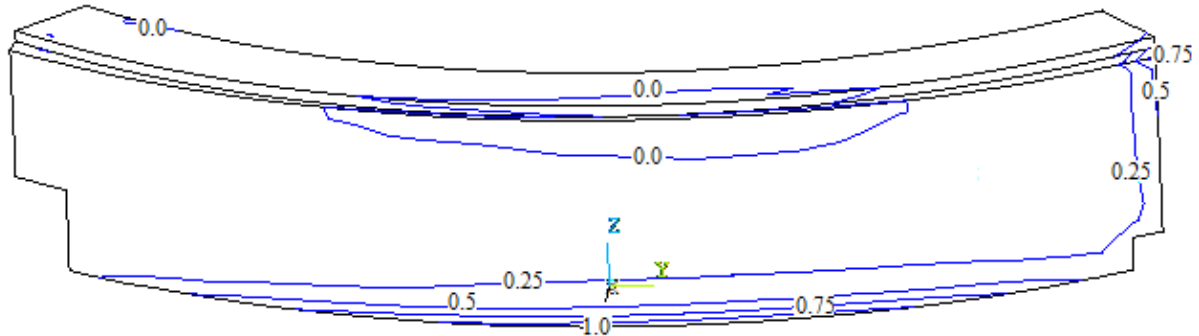
Şekil 6. Bent kretinin akış, akışa dik ve düşey doğrultudaki yer değiştirme grafikleri



Şekil 7. 3.896 s anında bentte oluşan çatlak durumu



a) Mansap

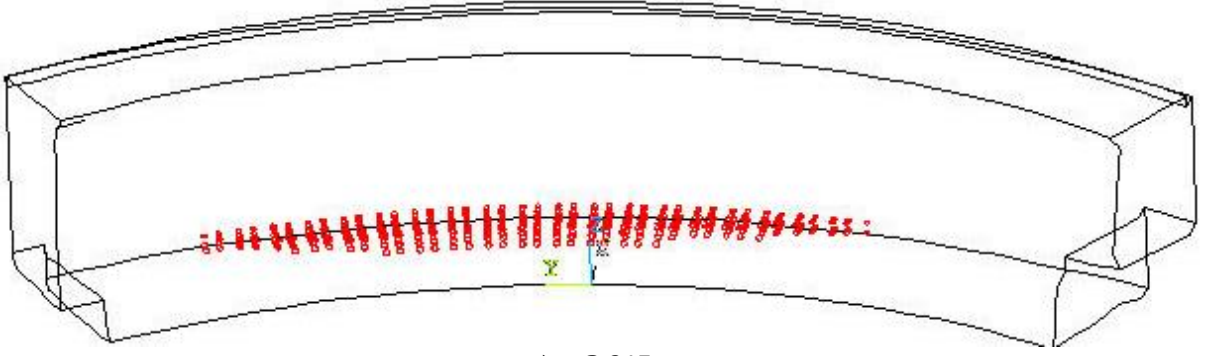


b) Memba

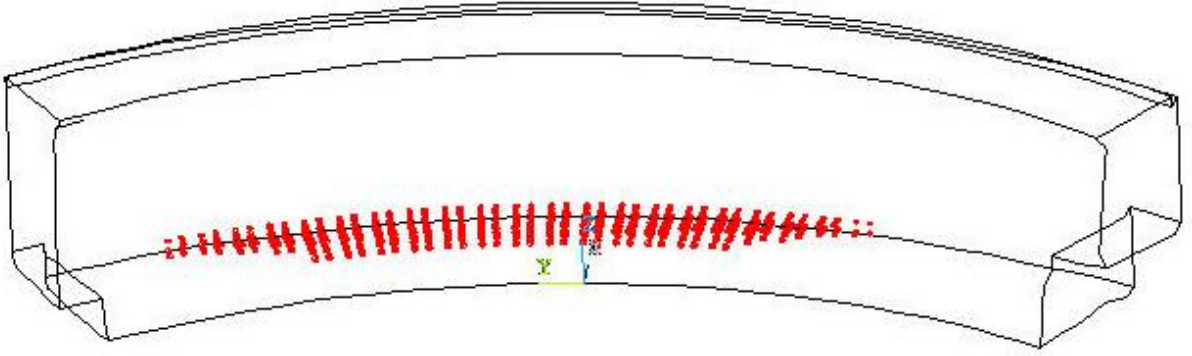
Şekil 8. 3.896 s anında bentte oluşan asal maksimum eş gerilme eğrileri (MPa cinsinden)

Lineer analiz sonucuna göre, ilk çatlakların oluştuğu 3.896 s anında bentteki asal maksimum gerilme durumunu gösteren memba ve mansap yüzeylerine ait eş gerilme eğrileri Şekil 8 de sunulmuştur. Bu şekilden görüleceği üzere; asal maksimum gerilmeler bent-zemin ara yüzeyinin orta bölgesinin memba tarafında malzemenin çekme dayanımına ulaşan/aşan değerler almaktadır. Çatlamaların bu bölgede ortaya çıkması beklenen bir durumdur. Bent-zemin ara yüzeyinin orta bölgesinde 3.896 s anında memba tarafında oluşan ilk çatlaklar (Şekil 7), ilerleyen zaman adımlarında titreşim hareketine bağlı olarak, ara yüzey orta bölgesinden yamaçlara ve mansaba doğru genişleyerek yayılmaktadır (Şekil 9-11). İlk çatlaklar, bent kretinin akış doğrultusundaki hareketine devam ettiği 3.915 s anına kadar bent taban bölgesinde hem akış doğrultusunda hem de iki yamaca doğru ilerlemektedir (Şekil 9.a). Bu andan sonra, bent kreti akışa zıt doğrultuda harekete geçmektedir. Bent kretinin akışa zıt doğrultudaki hareketinin devam ettiği 4.055 s anına kadar ilgili çatlak bölgesinde kayda değer bir değişim görülmemekle birlikte, mevcut çatlakların kapandığı belirlenmiştir (Şekil 9.b). 4.055 s anından sonra bent kreti akış doğrultusunda hareketine başlayarak, 4.3 s anına kadar mevcut çatlakların açılmasına neden olmaktadır. Ancak ilave çatlak ilerleyişi meydana gelmemiştir (Şekil 9.b,c). Bent kreti

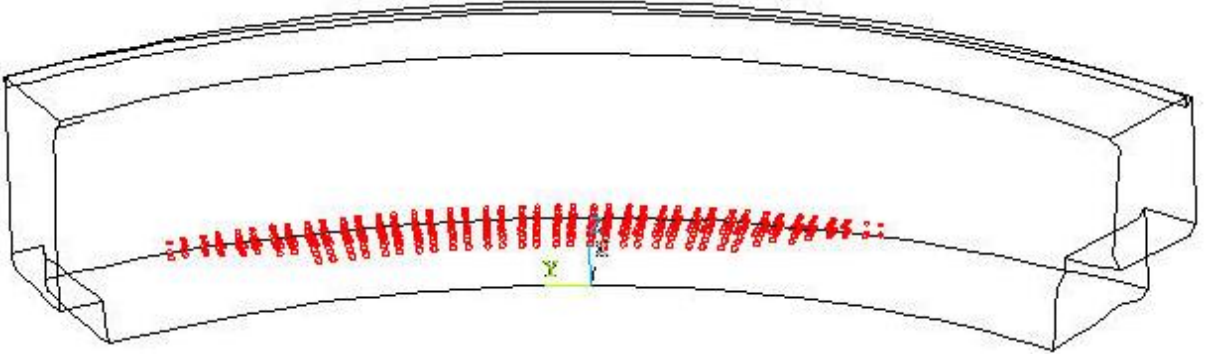
hareketinin akış doğrultusunda olduğu 4.515 s anına kadar da ilave çatlak ilerleyişinin olmadığı görülmüştür (Şekil 9.d).



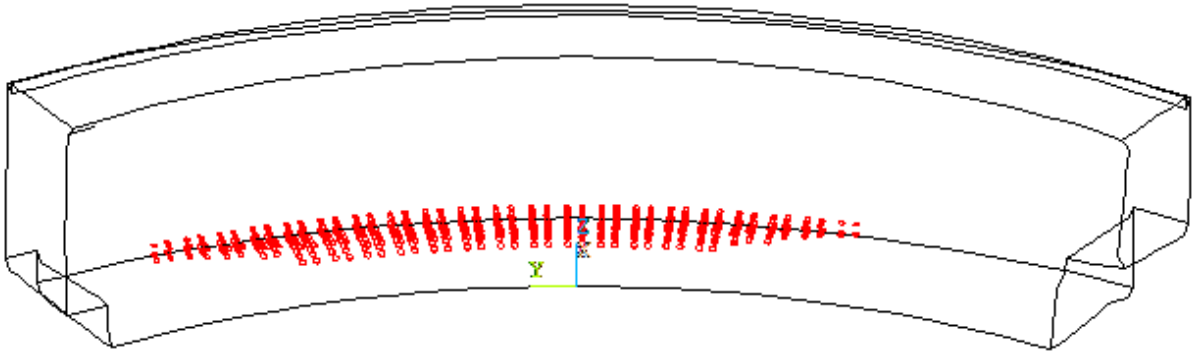
a) $t=3.915$ s



b) $t=4.055$ s

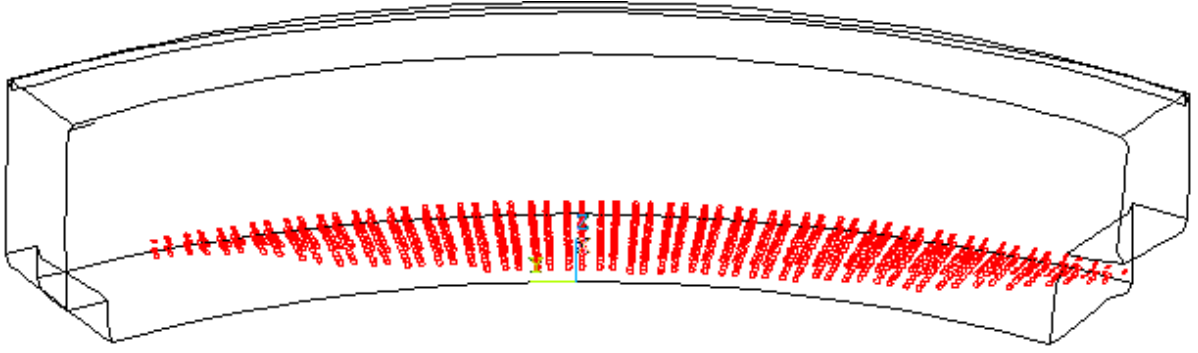


c) $t=4.300$ s

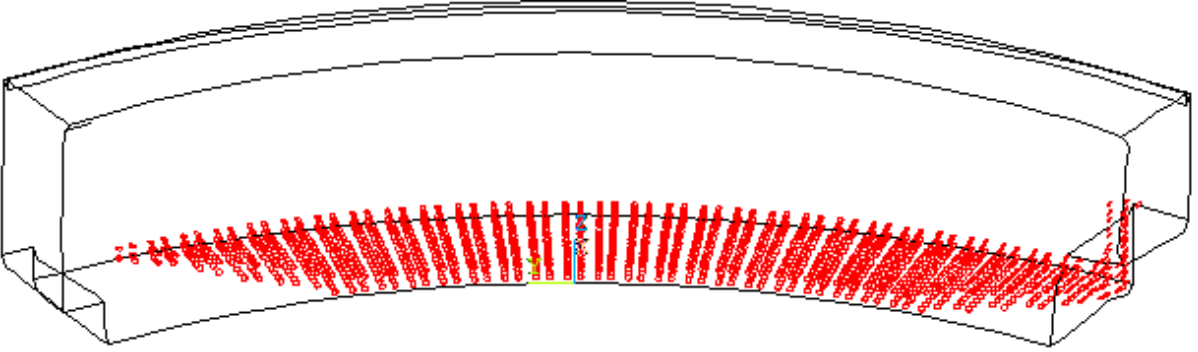


d) $t=4.515$ s

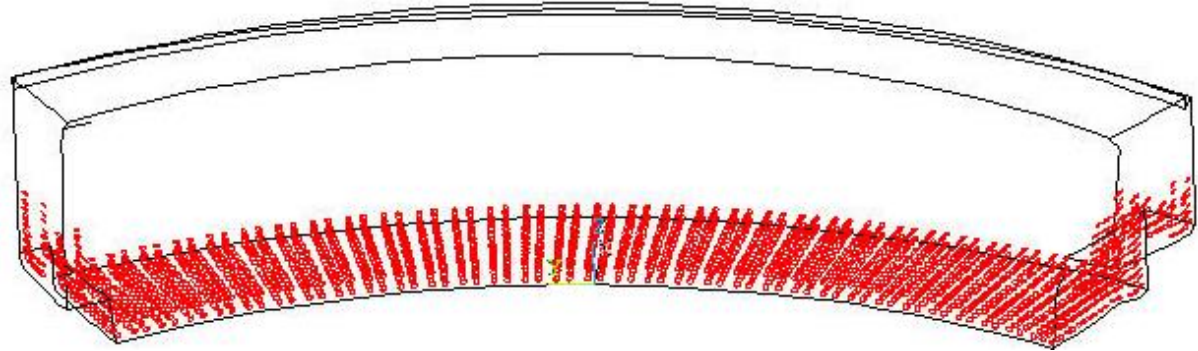
Şekil 9. Bentte 3.915 s, 4.055 s, 4.300 s ve $t=4.515$ s anlarında oluşan çatlak durumları



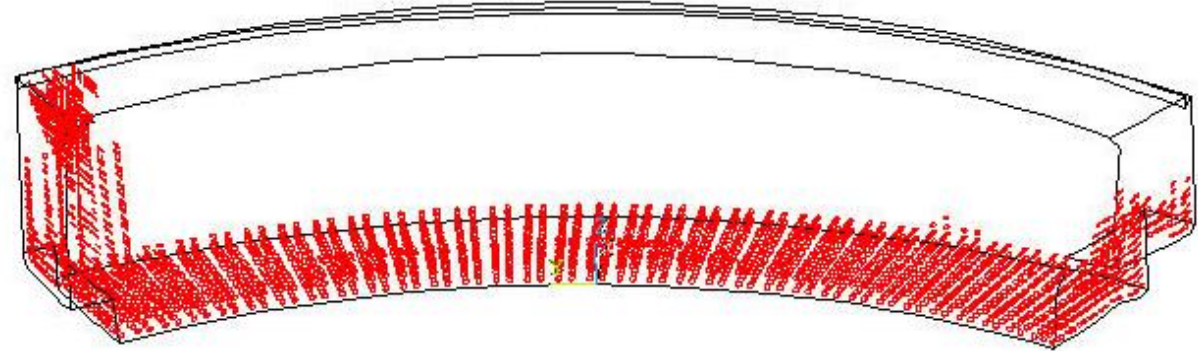
a) $t=4.550$ s



b) $t=4.565$ s



c) $t=4.625$ s

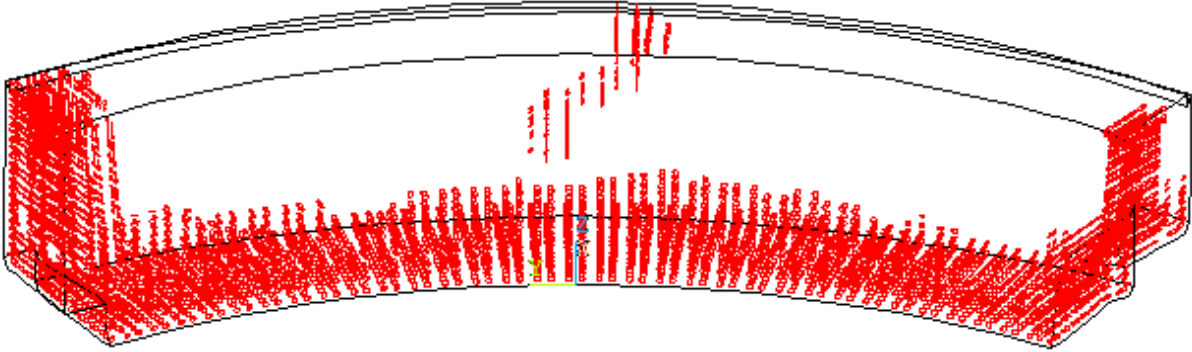


d) $t=4.780$ s

Şekil 10. Bente 4.550 s, 4.565 s, 4.625 s ve $t=4.780$ s anlarında oluşan çatlak durumları

4.55 s, 4.565 s, 4.625 s ve 4.78 s anlarının hepsinde bent kreti akış doğrultusunda hareket etmekte olup, bu anların tamamında ilave çatlaklar oluşmuştur (Şekil 10). Bent kretinin akışa zıt doğrultuda hareketine devam ettiği 4.84 s anında sağ ve sol yamaçlarla birlikte bent-zemin ara yüzeyinde ilave

çatlaklar meydana gelmiş, hatta bent gövdesi orta bölgesinin üst kısmında yeni bir çatlak bölgesi oluşmuştur (Şekil 11). Bent-zemin ara yüzeyini kaplayan ve her iki yamaçta krete kadar yayılarak ulaşan çatlakların bentin stabilitesini bozacağı aşıkardır. Bu durum, bentin kret orta bölgesinde yer alan 32 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafiklerinden de izlenebilir.



Şekil 11. Bente 4.840 s anında oluşan çatlak durumu

SONUÇLAR

Bu çalışmada, kâgir kemer baraj şeklinde inşa edilen tarihi Sultan Mahmut bentinin katı-sıvı etkileşimi dikkate alınarak, lineer olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla lineer analiz sonuçları da kullanılmıştır. Bentin kret yer değiştirmesi, gerilme ve hasar durumu değerlendirilmiştir. Lineer olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Katı-sıvı etkileşimi Euler yaklaşımıyla dikkate alınmıştır. Dinamik etki olarak, 12 Kasım 1999 Düzce depreminin Düzce ivme kayıtları seçilmiştir. Bu depremin, doğu-batı, kuzey-güney ve düşey bileşenleri sırasıyla akış, akışa dik ve düşey doğrultularda bent-zemin-rezervuar sistemine uygulanmıştır.

Düzce ivme kayıtları altında yapılan ön analizlerde bente oluşan maksimum asal gerilmelerin büyük değerler aldığı, buna bağlı olarak bente yaygın hasarların oluştuğu ve nümerik stabilite problemlerine sebep olduğu tespit edilmiştir. Erken ortaya çıkan nümerik stabilite problemini aşmak/geciktirmek için söz konusu ivme kayıtlarının genlikleri 0.88 katsayısı ile çarpılarak ölçeklendirilmiş ve bu yeni haliyle analizlerde kullanılmıştır. Ölçeklendirilmiş ivme kayıtları dikkate alınarak, bent-zemin-rezervuar sisteminin sismik çözümleri yapılmıştır. Lineer ve lineer olmayan çözümlerden elde edilen bentin kret yer değiştirmeleri, ilk çatlakların oluştuğu ana kadar frekans ve genlik açısından aynı değerlere sahip olmaktadır. İlerleyen zaman adımlarında bente meydana gelen kırılma ve hasarlardan dolayı yer değiştirme genliklerinde önemli farklar meydana gelmektedir.

Bente ilk çatlaklar, gerilme yığılmalarının oluştuğu ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı bent-zemin ara yüzeyinin orta bölgesi civarında meydana gelmektedir. Bu çatlaklar, titreşim hareketine bağlı olarak, ara yüzey orta bölgesinden yamaçlara ve mansaba doğru genişleyerek yayılmaktadır. Önce sadece taban bölgesinde geniş bir bölge oluşturan bu çatlaklar ilerleyen zamanlarda bent taban bölgesinin tamamını kaplayarak, bentin her iki yamacından kretine doğru ilerlemiştir. Bentin stabilitesini kaybettiği ana doğru bent gövdesi orta bölgesinin üst kısmında yeni bir çatlak bölgesi meydana gelmiş ve taban bölgesindeki mevcut çatlaklar krete doğru biraz ilerleyiş sergilemiştir.

Kültürel miras olan tarihi yapıların malzeme özelliklerinin tespiti genelde zordur. Bu nedenle, tahribatsız deneysel yöntemlerle malzeme özelliklerinin belirlenmesi, yapının bulunduğu bölgenin depremsellik durumu dikkate alınarak uygun yapay deprem kayıtlarının üretilmesi ve bunlara bağlı

olarak bu yapıların sismik değerlendirme analizlerinin yapılması daha gerçekçi sonuçların elde edilmesine imkân sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- ANSYS, 2008. Swanson Analysis System, USA.
- Bayraktar, A., Şahin, A., Özcan, D., Yıldırım, F., 2010. “Numerical damage assessment of Hagia Sophia bell tower by nonlinear FE modelling”. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, pp. 92-121.
- Bernardeschi, K., Padovani, C., Pasquinelli, G., 2004. “Numerical modeling of the structural behavior of Buti’s bell tower”. *J. Cultural Heritage*, vol. 5, pp. 371–378.
- Betti, M., Vignoli, A., 2008. “Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance”. *Engineering Structures*, 30, 352–367.
- Cavicchi, A., Gambarotta, C. (2005) Collapse Analysis of Masonry Bridges Taking Into Account Arch Fill Interaction. *Engineering Structures*, 27, pp. 605-615.
- Chung, J., Hulbert, G.M., 1993. “A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized- α method”. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 60, pp. 371.
- Çeçen, K., “Taksim ve Hamidiye Suları”, İSKİ Yayınları, İstanbul, 1992.
- Erkek, H., Calayır, Y., Sayın, E., Karaton M., 2013. “Tarihi Malatya Ulu camisinin sismik davranışı”. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül, Hatay.
- Fanning, P.J., Boothby, T.E., 2001. “Three-dimensional modeling and full-scale testing of stone arch bridges”. *Computers and Structures*, vol. 79, pp. 2645-2662.
- Karaton, M., Sayın, E., Calayır, Y., 2009. “Malabadi köprüsünün lineer olmayan sismik analizi”. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2, Diyarbakır.
- Lourenço, P.B., 1996. Computational strategies for masonry structures, Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands.
- Manfredi, C., Ramasco, R., 1993. “The use of Damage functionals in earthquake engineering: A comparison between different methods”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 22(10), pp. 855-868.
- Modena, C., Valluzzi, M.R., Tongini, F.R., Binda, L., 2002. “Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower”. *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, pp. 385–395.
- Rajgelj, S., Amadio, C., Nappi, A., 1993. “An internal variable approach applied to the dynamic analysis of elastic-plastic structural systems”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 22(10), pp. 885-903.
- Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E., Boschi, E., 1998. “Seismic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7-8), pp. 525-550.
- Sayın, E., Calayır, Y., Karaton, M., 2011. “Tarihi Uzunok köprüsünün lineer olmayan sismik analizi”. Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, İstanbul.
- Sayın, E., 2009. “Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi”. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı.
- 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.
- Zeinkiewicz, O. C., Taylor, R. L., 1991. “Finite Element Method”. vol.2, McGraw-Hill.