

TARİHİ SULTAN MAHMUT BENDİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN SİSMİK DAVRANIŞINA ZEMİN ESNEKLİĞİNİN ETKİSİ

EFFECT OF SOIL FLEXIBILITY ON NON-LINEAR SEISMIC RESPONSE OF HISTORICAL SULTAN MAHMUT BARRAGE

Yusuf CALAYIR¹, Musa YETKİN², Muhammet KARATON³ ve Erkut SAYIN⁴

ÖZET

Bu çalışmada, kâgir kemer baraj şeklinde inşa edilen tarihi Sultan Mahmut bendinin doğrusal olmayan sismik davranışına zemin esnekliğinin etkisi incelenmiştir. Bendin kret yer değiştirmesi ve hasar durumu değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının doğrusal davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Katı-sıvı etkileşimi Euler yaklaşımıyla dikkate alınmıştır. D2 deprem düzeyi için A, B, C ve D zemin gruplarına göre tasarım spektrumu uyumlu yapay deprem ivme kayıtları üretilmiştir. Bu ivme kayıtları bent-zemin-rezervuar sistemine akış doğrultusunda etki ettirilmiştir. Her bir zemin grubu için zemin esnekliğinin bendin sismik davranışına etkisi irdelenmiştir. Çözümlerde ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katı-sıvı etkileşimi, Yayılı çatlak modeli, Yapay ivme kayıtları ve Doğrusal olmayan sismik davranış.

ABSTRACT

In this study, effect of soil flexibility on non-linear seismic response of historical Sultan Mahmut barrage which is constructed as masonry arch dam type is investigated. Crest displacement and damage of 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 seismic input, artificial acceleration records are generated for four different soil types (A, B, C and D) considering D2 seismic level. These records are acted in the stream direction to the barrage-soil-reservoir system. Effect of soil flexibility on seismic response of the barrage is evaluated for each soil type. ANSYS finite element program is used for the solutions.

Keywords: Solid-fluid interaction, Smeared crack model, Artificial acceleration records and Nonlinear seismic analysis

GİRİŞ

Tarihi bentler korunması gereken kültür mirası yapılarıdır. Bentler çoğunlukla sulama veya içme suyu sağlama amacıyla inşa edilirler. Su bentleri kendi ağırlık yükleri yanında, bent-zemin ve bent-sıvı etkileşimlerine bağlı olarak ortaya çıkan ilave yüklere de maruz kalmaktadırlar. Deprem etkisine bağlı olarak, sözü edilen etkileşim yüklerinde genellikle önemli düzeyde artışlar meydana

¹ Prof. Dr, Fırat Üniversitesi, Elazığ, ycalayir@firat.edu.tr

² Arş. Gör, Fırat Üniversitesi, Elazığ, musayetkin@firat.edu.tr

³ Yrd. Doç. Dr, Fırat Üniversitesi, Elazığ, mkaraton@firat.edu.tr

⁴ Yrd. Doç. Dr, Fırat Üniversitesi, Elazığ, esayin@firat.edu.tr

gelmektedir. Tarihi yapıların depremlerden en az hasar görmeleri ve yapısal bütünlüklerini korumaları için sismik performanslarının bilinmesine ve buna göre gerekli önlemlerin alınmasına ihtiyaç vardır.

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 kilisesinin, makro modelleme yöntemiyle matematiksel modelini oluşturarak, yapısal davranışını ve sismik hasar görülebilirliğini 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 dört farklı zemin grubu için D2 düzeyi deprem etkisine göre tasarım spektrumu uyumlu üretilen yapay deprem ivme kayıtları kullanılarak doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Zemin esnekliğinin bendin sismik davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının doğrusal davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Katı-sıvı etkileşimi Euler yaklaşımıyla dikkate alınmıştır. Dinamik analizler için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltilme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır (Chung ve Hulbert, 1993).

TARİHİ SULTAN MAHMUT BENDİ

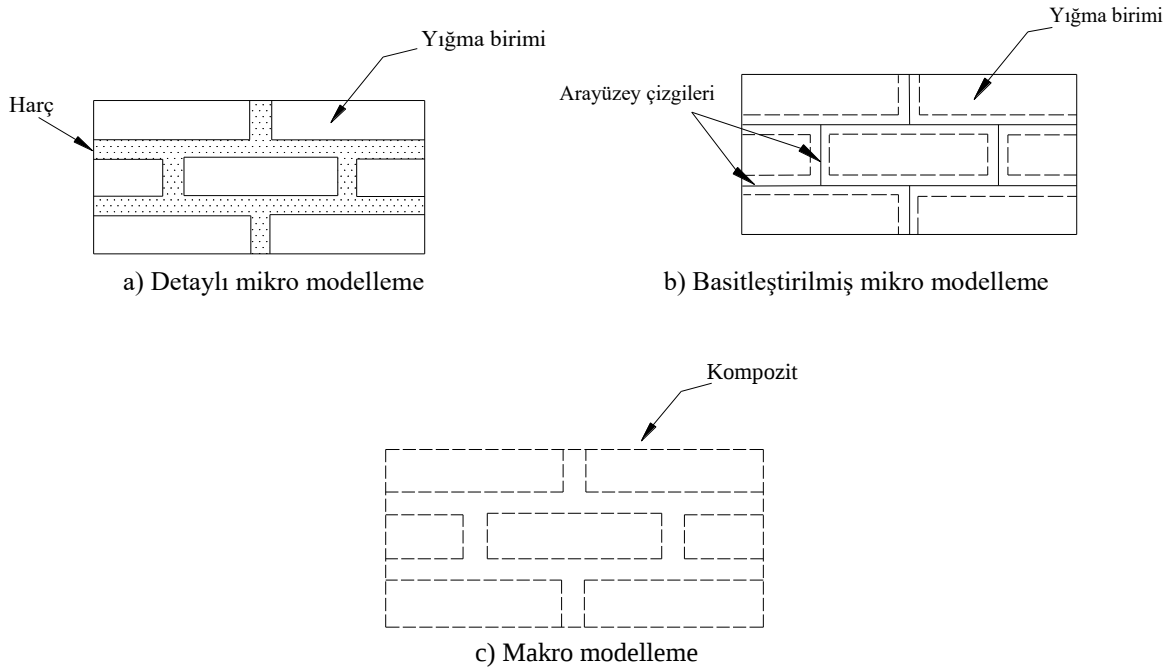
Sultan Mahmut bendi, İstanbul Taksim tesislerinin bentlerinden biri olup, Kâğıthane deresinin kollarından Bahçeköy'de Arabacı Mandırası deresinin batı kolu üzerine II. Mahmut tarafından yaptırılarak 1839 yılında tamamlanmıştır. Yapılış zamanı sırası itibarıyla Taksim tesislerinin üç bendinin en sonuncusudur. 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 m², kret yüksekliği 15.45 m, kret uzunluğu 101.55 m ve hazne hacmi 343325 m³ tür (Çeçen, 1992).



Şekil 1. Sultan Mahmut Bendi

YIĞMA YAPILARIN NÜMERİK MODELLENMESİ

Yığma yapıların modellenmesinde Şekil 2’ de gösterilen üç teknik yaygın olarak kullanılmaktadır (Lourenço, 1996; Sayın, 2009). Bunlar, detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak sıralanabilir. Detaylı mikro modellemede, yığma birimi ve harç 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.

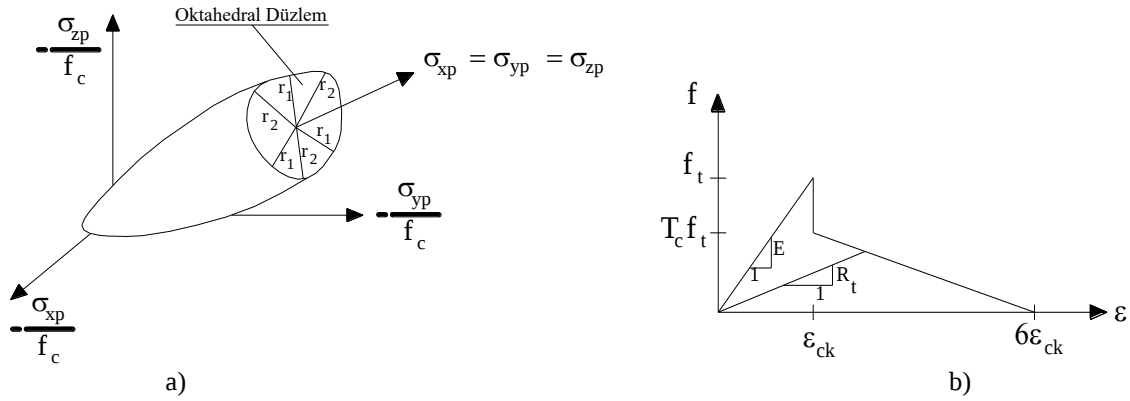


Şekil 2. Yığma yapıların modelleme teknikleri

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 süreksiz 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

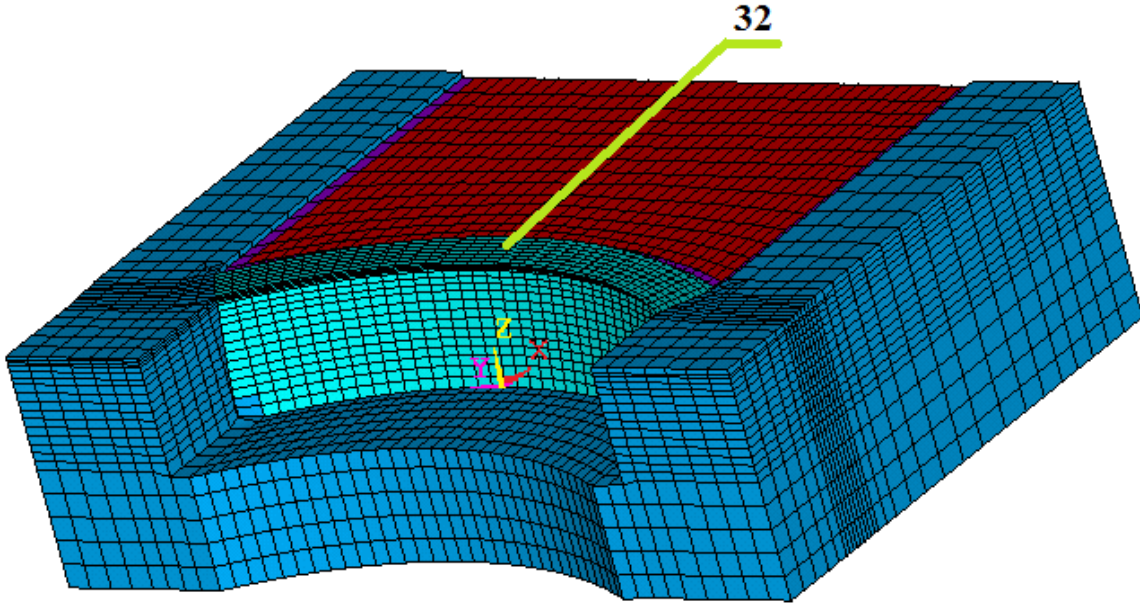
Yayılı Çatlak Modeli

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 çıkan gerilme değerlerinde ise malzemede çatlama ve ezilmelerin ortaya çıkacağı kabulü vardır. Yayılı çatlak yaklaşımıyla sonlu eleman uygulamalarında çatlağın genellikle eleman üzerinde alınan integrasyon noktalarında oluştuğu kabul edilmektedir. Bir integrasyon noktasındaki çatlağın varlığı, çatlağa 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

Bu çalışmada, Tarihi Sultan Mahmut bendinin doğrusal olmayan sismik davranışına zemin esnekliğinin etkisi incelenmiştir. Doğrusal olmayan analizlerde bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının doğrusal 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.



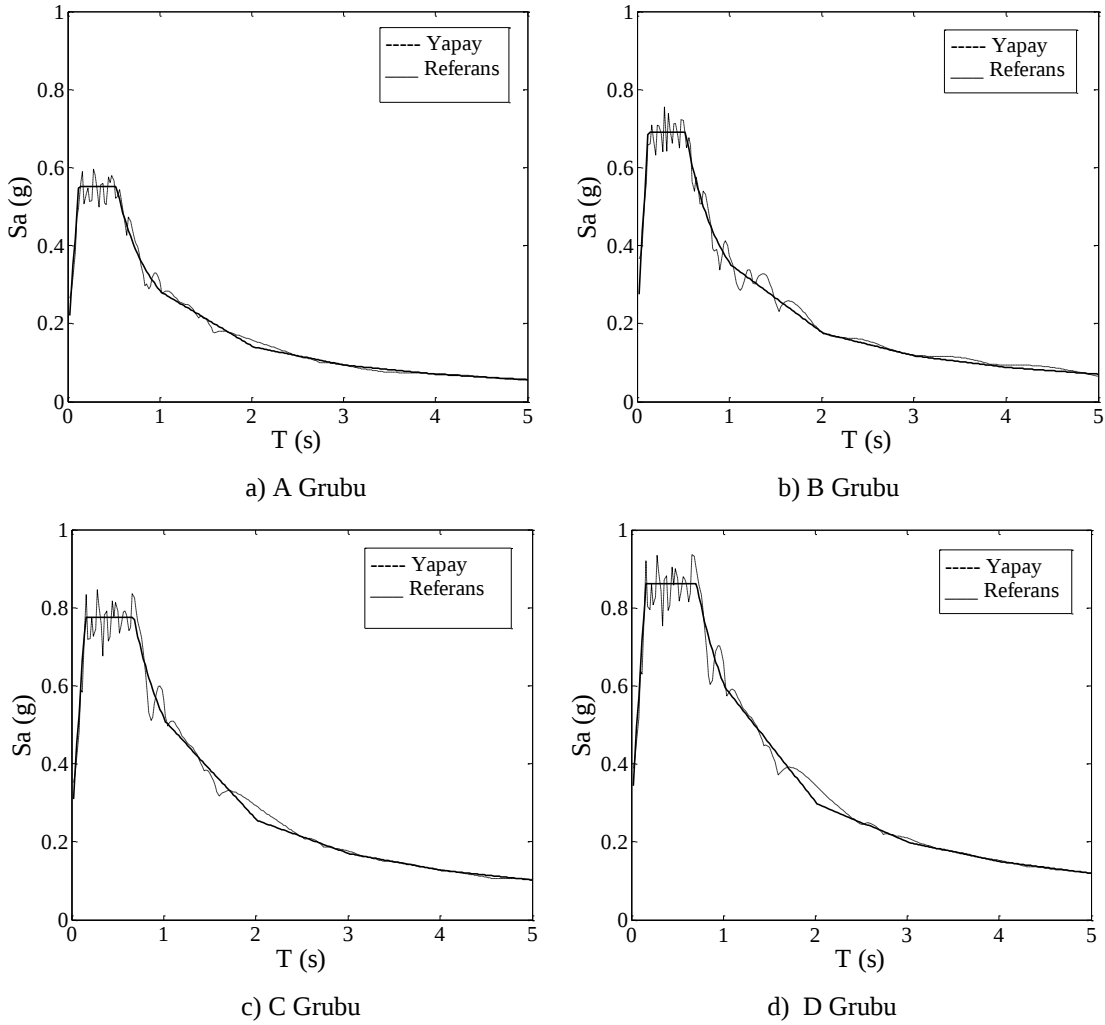
Şekil 4. Bent-zemin-rezervuar sisteminin üç boyutlu sonlu eleman ağı

Sismik etki için Kıyı ve Liman yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliğinde verilen (DLH-2007) tasarım ivme spektrumuna uyumlu yapay deprem ivme kayıtları üretilmiştir. Bu ivme kayıtları D2 düzeyindeki deprem için dört farklı zemin grubu (A, B, C ve D grupları) dikkate alınarak elde edilmiştir. D2 düzeyindeki deprem, yapıların servis ömürleri boyunca meydana gelebilmesi olasılığı çok fazla olmayan, seyrek ancak şiddetli yer hareketini ifade eder. Bu deprem düzeyinin, 50 yılda aşılma olasılığı %10, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 475 yıldır. Her bir zemin sınıfı için bir tane olmak üzere; üretilen bu ivme kayıtları bent-zemin-rezervuar sistemine akış (-x) doğrultusunda uygulanmıştır. Bununla birlikte DLH-2007’ ye göre tasarım amaçlı çözümlerde en az üç adet yapay ivme kaydının kullanılması gerektiğine işaret etmekte yarar vardır. Seçilen zemin grupları için yapay ivme kayıtlarının üretilmesinde kullanılan referans S_{MS} ve S_{M1} değerleri (DLH-2007) Tablo 1’ de verilmiştir. Yapay ve referans ivme spektrumları arasındaki ortalama fark % 5’ i aşmayacak şekilde yapay ivme kayıtları üretilmiştir. A, B, C ve D zemin grupları için yapay ve referans ivme spektrum eğrileri Şekil 5’ de sunulmuştur. Yapay deprem ivme kayıtlarının mutlak maksimum genlikleri A, B, C ve D zemin grupları için sırasıyla 0.2660g, 0.3654g, 0.3510g ve 0.3890g’ dir (Şekil 6). Dinamik

analizler için genelleştirilmiş α algoritmasının tahmin-düzeltilme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Çözümler ANSYS sonlu eleman programıyla elde edilmiştir.

Tablo 1. Seçilen zemin grupları için referans S_{MS} ve S_{M1} değerleri

	A Grubu	B Grubu	C Grubu	D Grubu
S_{MS}	0,5520	0,6900	0,7756	0,8611
S_{M1}	0,2800	0,3500	0,5075	0,5950



Şekil 5. A, B, C ve D zemin grupları için yapay ve referans ivme spektrum eğrileri

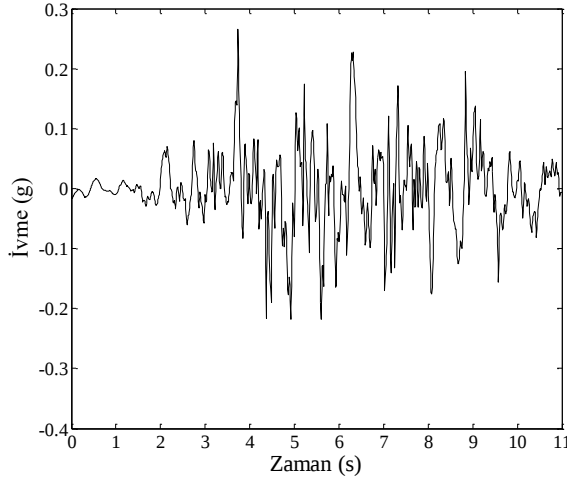
Bent malzemesi için elastisite modülü 7500 MPa, birim hacim kütlesi 2200 kg/m³, Poisson oranı 0.25, basınç dayanımı 10 MPa ve çekme dayanımı 1.0 MPa alınmıştır. Çatlamadan hemen sonraki çekme dayanım azaltma katsayısı 1 olarak seçilmiştir. Çözümlerde zemin kütsüz kabul edilmiş, seçilen zemin gruplarının malzeme özellikleri Tablo 2' de verilmiştir. Bu tabloda E_b ve E_t sırasıyla bent ve zeminin elastisite modüllerini, ν ise zeminin Poisson oranını göstermektedir. Zemin grubu A' dan D' ye doğru değiştikçe elastisite modülü azalmakta diğer bir deyişle zemin yumuşamaktadır. Rezervuardaki sıvının birim hacim kütlesi 1000 kg/m³ ve hacimsel elastisite modülü 2070 MPa olarak alınmıştır.

Katı ortamı için rijitlik orantılı sönüm dikkate alınmıştır. Bent-zemin sisteminin akış doğrultusundaki temel frekansı A, B, C ve D zemin grupları için sırasıyla 12.0445 Hz, 10.4324 Hz, 7.73659 Hz ve 4.95437 Hz' dir. Her bir zemin grubunun temel frekansında %5' lik sönüm oranı sağlanacak şekilde bent-zemin sistemine ait rijitlik orantılı sönüm katsayısı hesaplanmıştır.

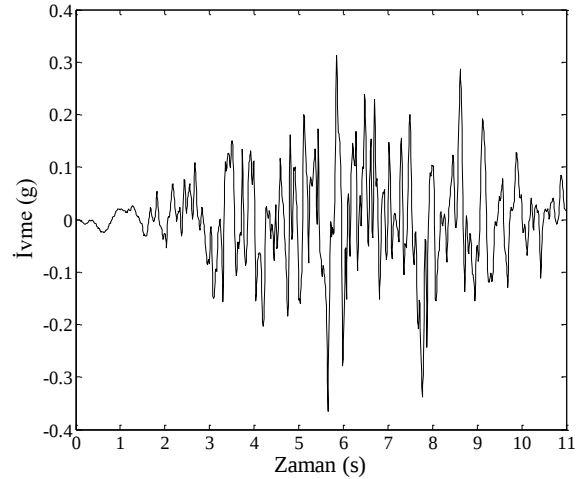
İntegrasyon zaman adımı lineer davranış bölgesinde deprem kayıt aralığı olan 0.01 s olarak dikkate alınırken, lineer ötesi davranış bölgesinde 0.001 s olarak uygulanmıştır. Ayrıca, lineer ötesi davranış bölgesinde maksimum iterasyon sayısı 40 alınmıştır.

Tablo 2. Zemin gruplarının malzeme özellikleri

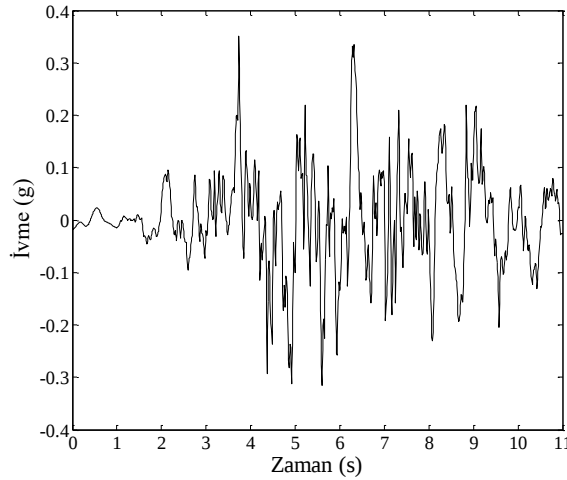
Zemin Grubu	E_b/E_t	E_t (kN/m ²)	ν
A	0,25	30000000	0,20
B	1	7500000	0,25
C	4	1875000	0,30
D	16	468750	0,35



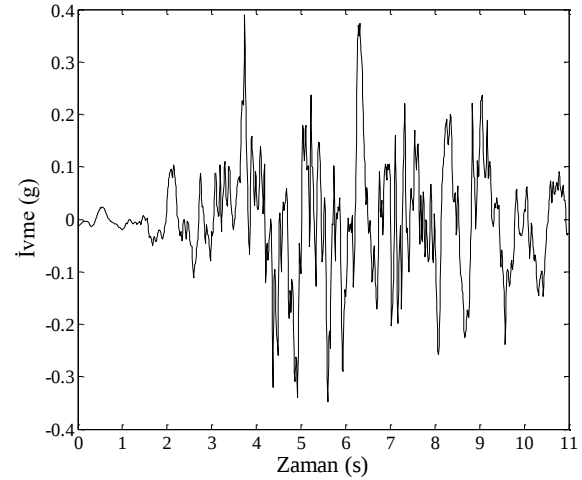
a) A Grubu Zemin



b) B Grubu Zemin



c) C Grubu Zemin



d) D Grubu Zemin

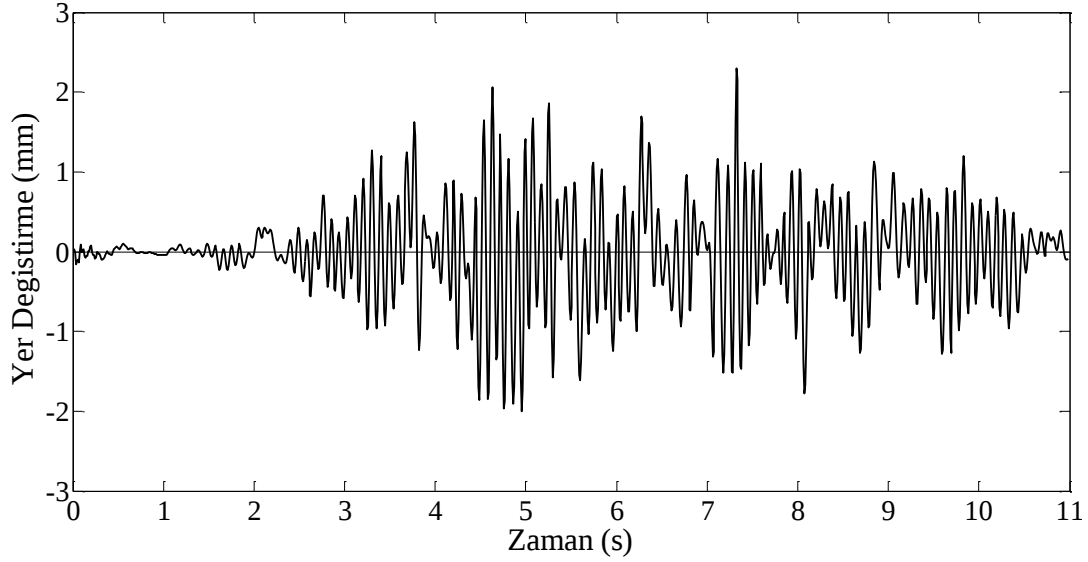
Şekil 6. Farklı zemin grupları için üretilen yapay deprem ivme kayıtları

Bent-zemin-rezervuar sisteminin lineer olmayan sismik çözümleri farklı zemin grupları için üretilen yapay deprem ivme kayıtları kullanılarak elde edilmiştir. Bentin kret orta bölgesinde yer alan 32 nolu düğüm noktasının akış doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi A ve B zemin grupları için Şekil 7' de, C ve D zemin grupları için ise Şekil 8' de verilmiştir. A zemin grubunda deprem kayıt süresi olan 11 s boyunca analiz devam etmiş, bent elastik davranış göstermiş ve bentte hasar oluşmamıştır. Ancak diğer üç zemin grubunda bentte oluşan hasarlara bağlı olarak deprem kayıt süresi tamamlanamadan, analizlerde maksimum iterasyon sayısı aşılmış ve analizler program tarafından sonlandırılmıştır. Bentte hasarın oluştuğu yer değiştirme-zaman grafiklerinde (Şekil 7.b, Şekil 8.a-b) eğriler üzerindeki rakamlar, bentteki hasar durumunun verildiği anları göstermektedir. Dört farklı zemin grubu için bent kretinde oluşan maksimum ve

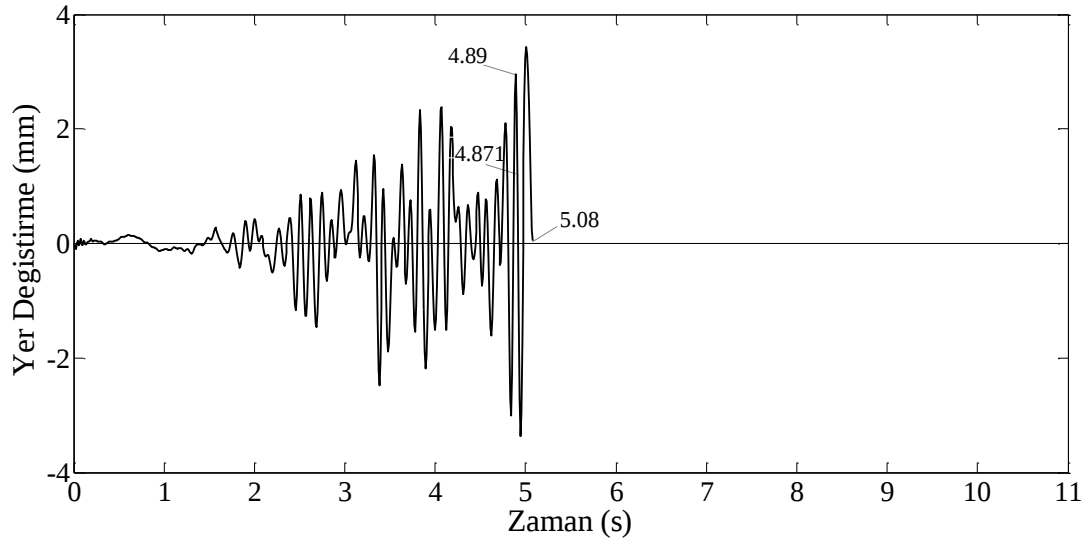
minimum yer değiştirmeler Tablo 3' de verilmiştir. Tablodan izleneceği gibi zemin yumuşadıkça yer değiştirmenin arttığı görülmüştür.

Tablo 3. Bent kretinde oluşan maksimum ve minimum yer değiştirmeleri

	Zemin Grubu			
	A	B	C	D
Maksimum yer değiştirme (mm)	2.296	3.431	5.023	10.59
Minimum yer değiştirme (mm)	-1.997	-3.374	-4.511	-14.55



a) A grubu zemin

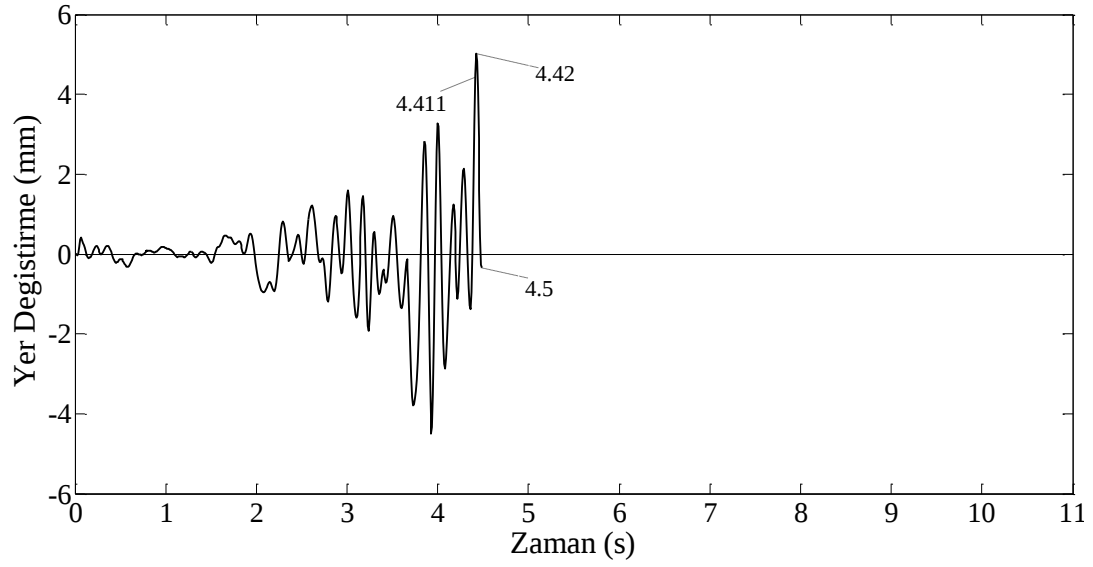


b) B grubu zemin

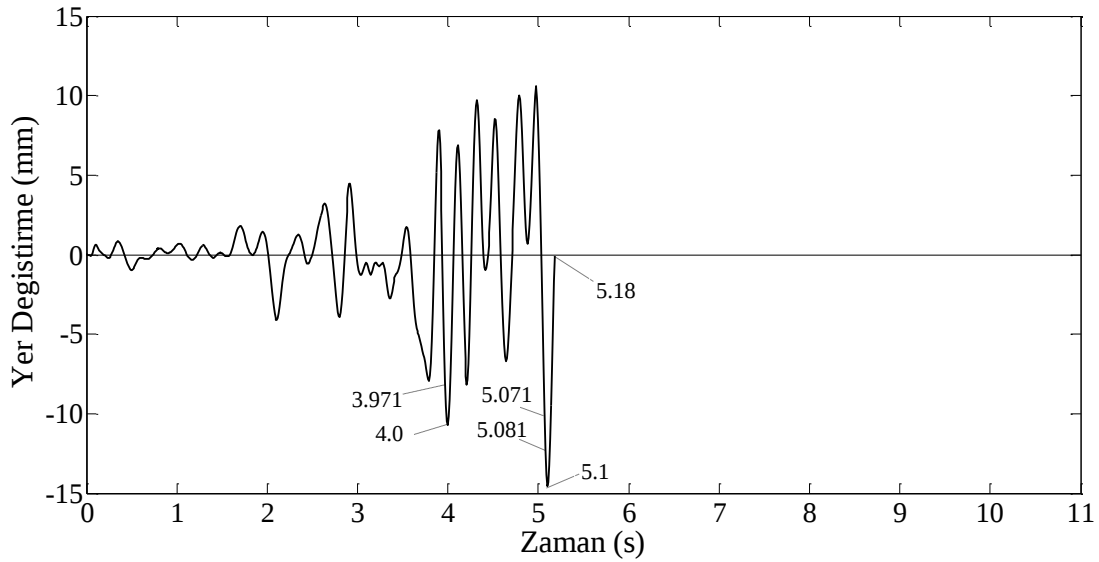
Şekil 7. A ve B grubu zeminler için bent kretinin akış doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

Bentte oluşan hasarların (çatlama veya ezilme) eleman integrasyon noktalarında meydana geldiği kabul edilmiştir. Bir eleman integrasyon noktasında ortaya çıkan çatlak, açıkken içi boş daire ile, kapalı iken $\otimes$ sembolü ile temsil edilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi A grubu zemin için bentte hasar meydana gelmemiştir. B grubu zemin için bentte ilk hasar 4.871 s anında bendin kreti akış doğrultusunda hareketine devam ederken, bendin memba tarafında gerilme yığılmalarının olduğu ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı bent-zemin ara yüzeyinin orta bölgesi civarında meydana gelmiştir (Şekil 9.a). Bent kretinin akış doğrultusundaki hareketinin devam ettiği 4.89 s anına kadar ilgili çatlak bölgesi her iki yamaca doğru ilerleyerek biraz genişlemiştir

(Şekil 9.b). Analizin hasara bağlı olarak sonlandırıldığı 5.08 s anında mevcut çatlak bölgesi hem yamaçlar doğrultusunda hem de akış doğrultusunda önemli düzeyde artış göstermiştir (Şekil 9.c).



a) C grubu zemin



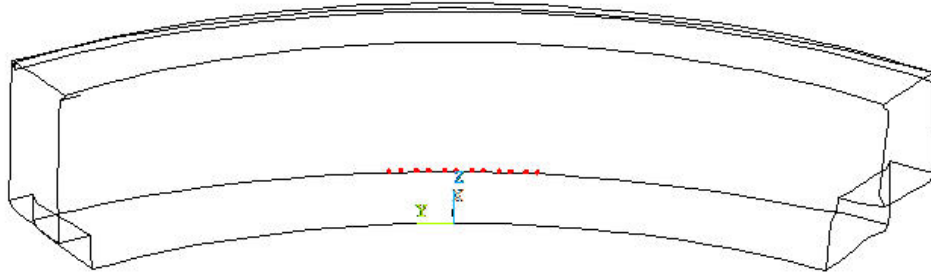
b) D grubu zemin

Şekil 8. C ve D grubu zeminler için bent kretinin akış doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

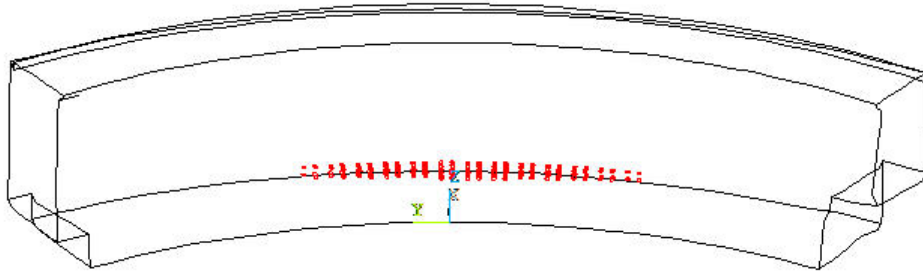
C grubu zemin için bentte ilk hasar 4.411 s anında bendin kreti akış doğrultusunda hareketine devam ederken, bendin memba tarafında gerilme yığılmalarının olduğu ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı bent-zemin ara yüzeyinin orta bölgesi civarında meydana gelmiştir (Şekil 10). Bent kretinin akış doğrultusundaki hareketinin devam ettiği 4.42 s anına kadar bu çatlak bölgesinde önemli bir değişim olmamıştır (Şekil 11.a). Analizin hasara bağlı olarak sonlandırıldığı ve bent kretinin akışa zıt doğrultuda hareket ettiği 4.5 s anında ise, mevcut çatlak bölgesi hem yamaçlar doğrultusunda hem de akış doğrultusunda biraz genişlemiştir (Şekil 11.b).

D grubu zemin için bentte ilk hasar, 3.971 s anında bendin kreti akışa zıt doğrultuda hareketine devam ederken, bendin mansap tarafında gerilme yığılmalarının olduğu ve çekme gerilmelerinin büyük değerlere ulaştığı bent-zemin ara yüzeyi ile sağ yamacın birleştiği bölgede çok küçük bir alan olarak meydana gelmiştir (Şekil 12.a). Bent kretinin akışa zıt doğrultuda hareketinin devam ettiği 4.0 s anında aynı çatlak bölgesinde bir miktar artış olmuştur (Şekil 12.b). Bent kretinin aynı doğrultuda hareketine devam ettiği 5.071 s anında aynı çatlak bölgesinde biraz

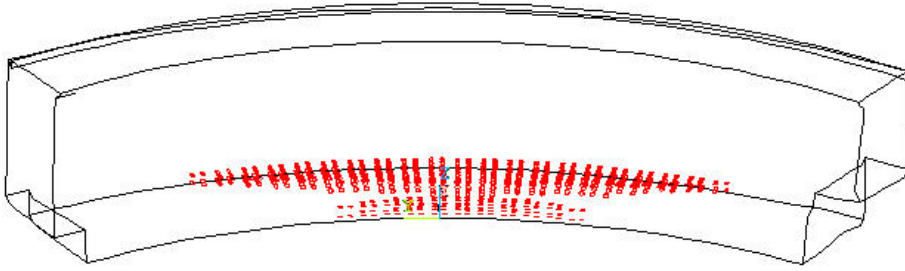
daha genişleme olurken, yine mansap tarafında fakat bent-zemin ara yüzeyinin sol yamaç ile birleştiği yerde ilave bir çatlak bölgesi daha oluşmuştur (Şekil 13.a). 5.081 s anında ise, bent kretinin yine aynı doğrultudaki hareketinde mevcut iki çatlak bölgesinde ek genişlemeler gözlenirken, mansap tarafında kretin sağ yamaçla birleştiği yerde ilave bir çatlak bölgesi daha ortaya çıkmıştır (Şekil 13.b). Bent kretinin akışa zıt doğrultuda hareketine devam ettiği 5.1 s anında üç çatlak bölgesinde de çatlak ilerlemeleri devam etmiştir. Mansap tarafında kretin sağ yamaçla birleştiği yerdeki çatlaklar, kretten sağ yamaca paralel olarak aşağıya doğru yayılmıştır (Şekil 13.c). Analizin hasara bağlı olarak sonlandırıldığı ve bent kretinin akışa zıt doğrultuda hareket ettiği, fakat kret yer değiştirmesinin neredeyse sıfır olduğu 5.18 s anında, bent-zemin ara yüzeyindeki çatlak bölgelerinde özellikle sağ yamaç tarafındaki hasar önemli düzeyde artış göstermiştir. Kretin sağ yamaçla birleştiği yerdeki yamaca paralel aşağıya doğru çatlak yayılımı ise, hemen hemen sağ yamacın tamamını kaplamıştır (Şekil 13.d).



a) $t=4.871$ s

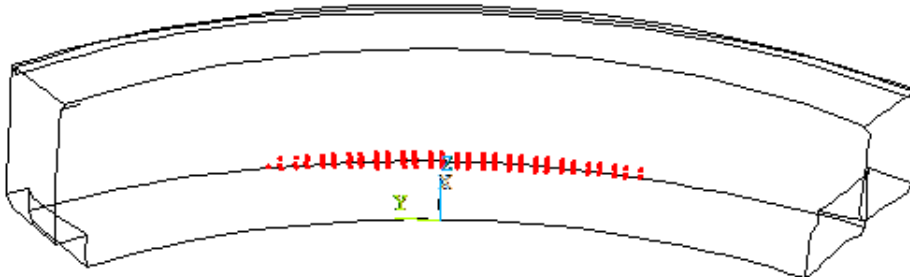


b) $t=4.89$ s

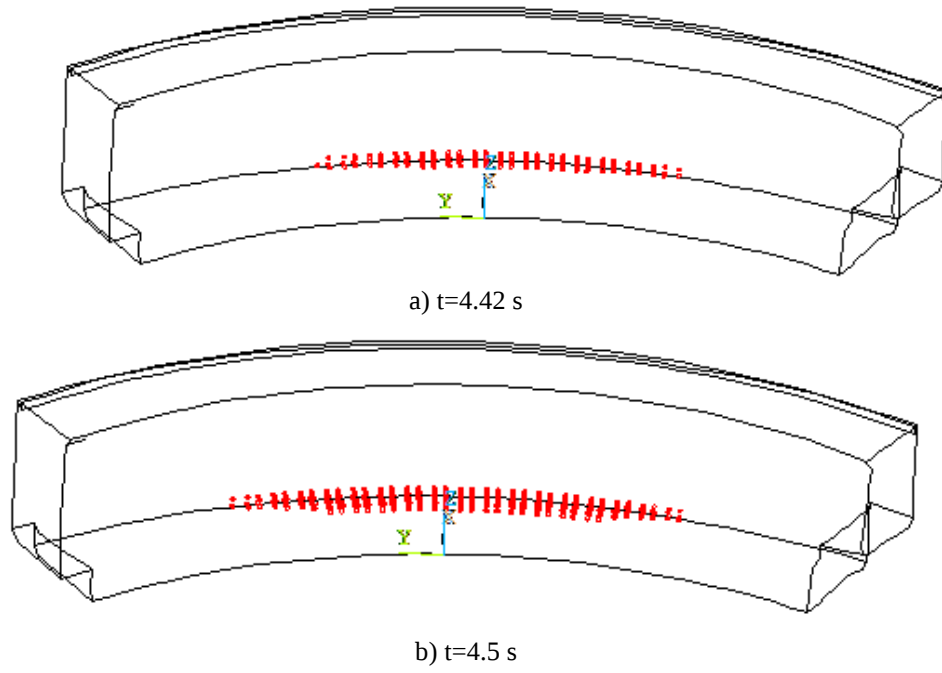


c) $t=5.08$ s

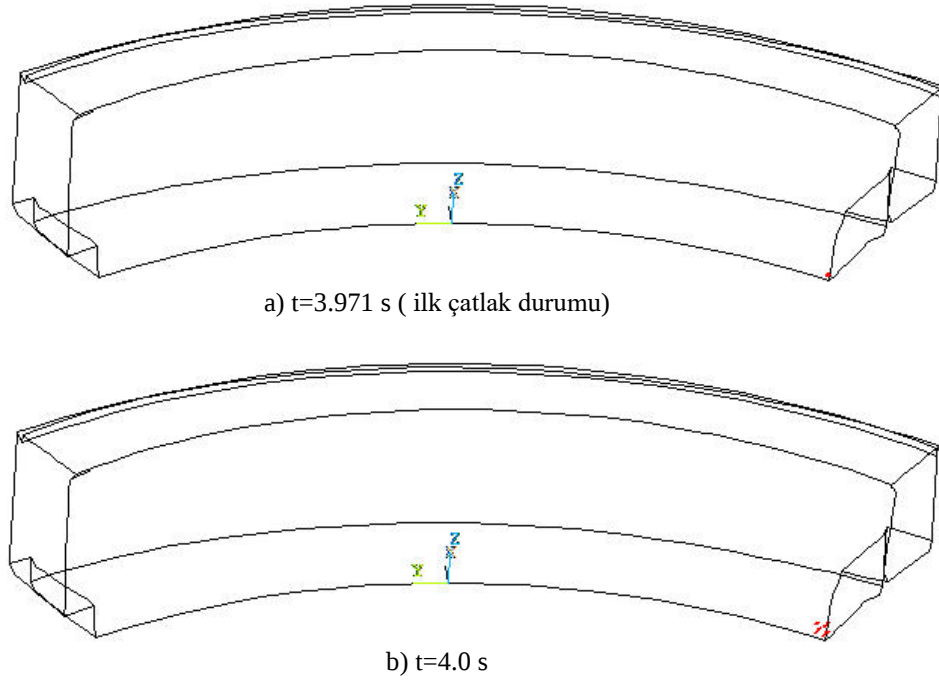
Şekil 9. B grubu zemin için bentte değişik anlarda oluşan çatlak durumları



Şekil 10. C grubu zemin için bentte $t=4.411$ s anında oluşan çatlak durumu



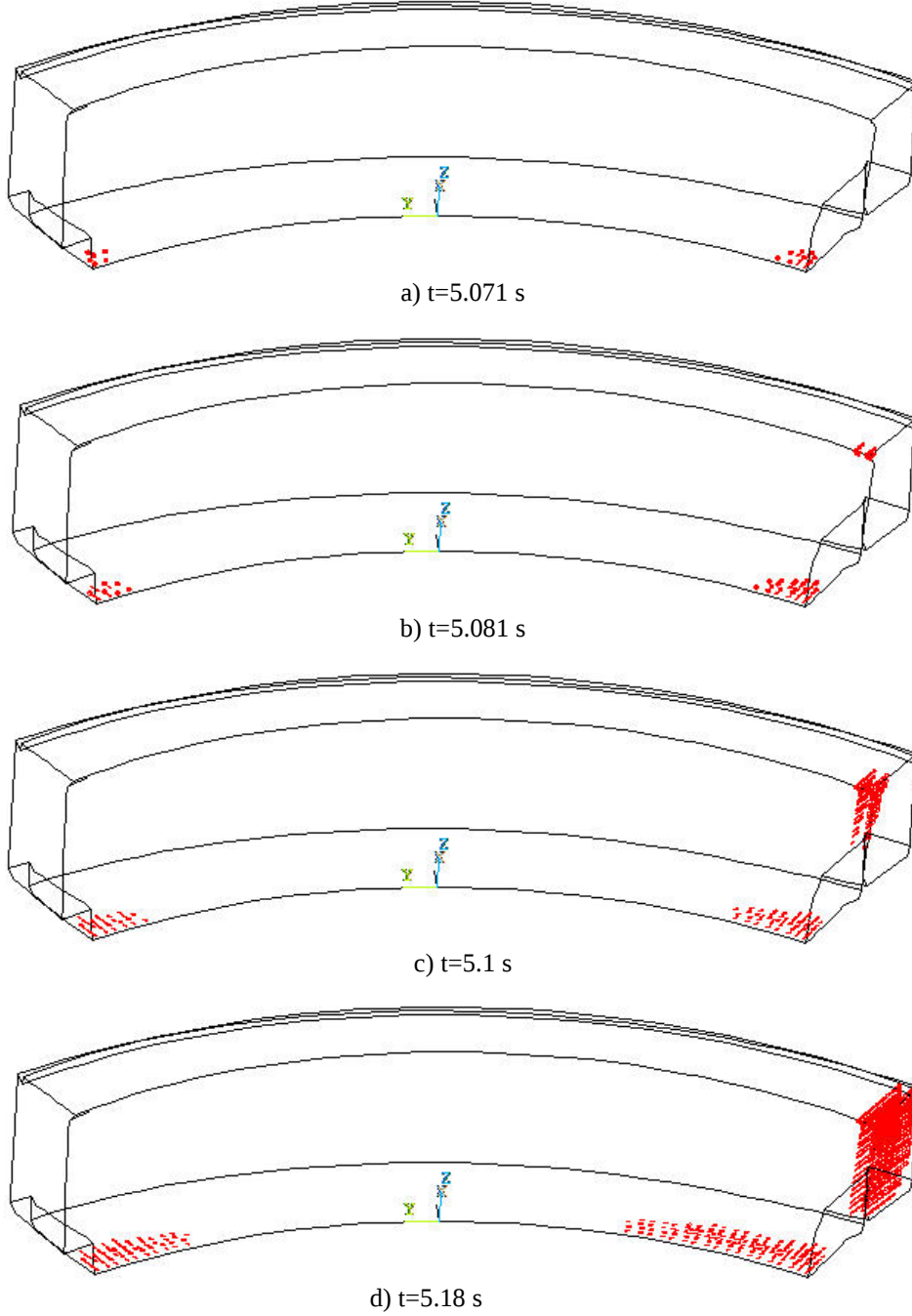
Şekil 11. C grubu zemin için bentte t=4.42 s ve t=4.5 s anlarında oluşan çatlak durumları



Şekil 12. D grubu zemin için bentte t=3.971 s ve t=4.0 s anlarında oluşan çatlak durumları

Sonuç olarak; zemin grubunun A dan D' ye doğru değişmesiyle (zeminin yumuşamasıyla), bent kretinin akış doğrultusundaki maksimum ve minimum yer değiştirmelerinde belirgin düzeyde mutlak değerce artışlar görülmüştür. A zemin grubu için sismik etkiye bağlı olarak bentte herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. B ve C zemin gruplarında ilk hasar memba tarafında bent-zemin ara yüzeyinin yaklaşık orta bölgesinde oluşmuş ve zamanla aynı bölgede bir miktar genişleyerek yayılmıştır. Ancak, B zemin grubu için nihai hasar C zemin grubuna göre daha fazla olmuştur. D zemin grubu için ise; B ve C zemin gruplarından farklı olarak, ilk hasar mansap tarafında bent-zemin ara yüzeyi ile sağ yamacın birleştiği bölgede meydana gelmiştir. İlerleyen anlarda hasar,

bent-zemin ara yüzünün sol yamaç ile birleştiği bölgede ve kretin sağ yamaç ile birleştiği bölgede olmak üzere, mansap tarafında iki farklı yerde daha görülmüştür. Söz konusu üç bölgedeki hasarlar zamanla daha da genişlemiş ve özellikle kretin sağ yamaçla birleştiği bölgede yamaca paralel aşağıya doğru büyük miktarda hasar oluşmuştur. Dolayısıyla, zemin esnekliğinin benden sismik davranışını önemli düzeyde etkilediği söylenebilir.



Şekil 13. D grubu zemin için bentte $t=5.071$ s, $t=5.081$ s, $t=5.1$ s ve $t=5.18$ s anlarındaki çatlak durumları

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Tarihi Sultan Mahmut bendinin doğrusal olmayan sismik davranışına zemin esnekliğinin etkisi incelenmiştir. Bent malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan

yayılı çatlak modeli kullanılmıştır. Rezervuar ve zemin ortamlarının doğrusal davranış gösterdiği kabul edilmiştir. D2 deprem düzeyi için A, B, C ve D zemin gruplarına göre tasarım spektrumu uyumlu yapay deprem ivme kayıtları üretilmiştir. Bu ivme kayıtları bent-zemin-rezervuar sistemine akış doğrultusunda etki ettirilmiştir. Zemin grubunun A dan D' ye doğru değişmesiyle (zeminin yumuşamasıyla), bent kretinin akış doğrultusundaki maksimum ve minimum yer değiştirmelerinde belirgin düzeyde mutlak değerce artışlar görülmüştür. A zemin grubu için bentte herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. B ve C zemin gruplarında ilk hasar memba tarafında bent-zemin ara yüzünün yaklaşık orta bölgesinde oluşmuş ve zamanla aynı bölgede bir miktar genişleyerek yayılmıştır. Ancak, B zemin grubu için nihai hasar C zemin grubuna göre daha fazla olmuştur. D zemin grubu için ise, ilk hasar mansap tarafında bent-zemin ara yüzeyi ile sağ yamacın birleştiği bölgede meydana gelmiştir. İlerleyen anlarda hasar, bent-zemin ara yüzeyinin sol yamaç ile birleştiği bölgede ve kretin sağ yamaç ile birleştiği bölgede olmak üzere, mansap tarafında iki farklı yerde daha görülmüştür. Söz konusu üç bölgedeki hasarlar zamanla daha da genişlemiş ve özellikle kretin sağ yamaçla birleştiği bölgede yamaca paralel aşağıya doğru büyük miktarda hasar oluşmuştur. Dolayısıyla, zemin esnekliğinin bendin sismik davranışını önemli düzeyde etkilediği söylenebilir.

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*, 34:92-121
- Bernardeschi K, Padovani C, Pasquinelli G (2004) "Numerical modeling of the structural behavior of Buti's bell tower", *J. Cultural Heritage*, 5:371-378
- Betti M and Vignoli A (2008) "Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance". *Engineering Structures*, 30, 352-367.
- Cavicchi A and Gambarotta C (2005) "Collapse Analysis of Masonry Bridges Taking Into Account Arch Fill Interaction", *Engineering Structures*, 27, 605-615.
- Chung J and Hulbert GM (1993) "A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized- α method", *Journal of Applied Mechanics*, 60:371
- Çeçen K (1992) Taksim ve Hamidiye Suları, İSKİ Yayınları, İstanbul
- Erkek H, Calayır Y, Sayın E, Karaton M (2013) "Tarihi Malatya Ulu camisinin sismik davranışı", 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Hatay, Türkiye, 25-27 Eylül
- Fanning PJ and Boothby TE (2001) "Three-dimensional modeling and full-scale testing of stone arch bridges", *Computers and Structures*, 79:2645-2662
- Karaton M, Sayın E, Calayır Y (2009) "Malabadi köprüsünün lineer olmayan sismik analizi", *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2*, Diyarbakır, Türkiye
- 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
- Modena C, Valluzzi MR, Tongini FR, Binda L (2002) "Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower", *Constr. Build. Mater.*, 16:385-395
- 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*, 22(10):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), 525-550
- Sayın E, Calayır Y, Karaton M (2011) "Tarihi Uzunok köprüsünün lineer olmayan sismik analizi", *Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 30 Mayıs-3 Haziran
- Sayın E, (2009) Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Elazığ
- William KJ and Warnke EP (1975) "Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete", *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, ISMES, Bergamo, Italy
- Zeinkiewicz OC and Taylor RL (1991) Finite Element Method, vol.2, McGraw-Hill