

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARAJ-TEMEL-REZERVUAR ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK BETON
AĞIRLIK BARAJLARIN SİSMİK HASAR ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ertuğrul ÇAMBAY
(112115104)

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON (F.Ü)

TEMMUZ-2014

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARAJ-TEMEL-REZERVUAR ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK BETON
AĞIRLIK BARAJLARIN SİSMİK HASAR ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ertuğrul ÇAMBAY
(112115104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:01.07.2014
Tezin Savunulduğu Tarih:16.07.2014

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Yusuf CALAYIR
Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

TEMMUZ-2014

ÖNSÖZ

Dünyamızda zengin su kaynaklarına sahip olup elektrik üretimi ve sulama amaçlı çok sayıda baraj inşa edilmiştir. Halen inşaları devam eden ve proje aşamasında olan birçok baraj da vardır. Arkalarında büyük miktarda su kütleleri biriktiren barajların deprem kuvveti etkisiyle yıkılmaları hem can hem de mal kaybı yönünden kötü sonuçlara neden olabilir. Deprem kuşağı üzerinde bulunan bu barajların deprem güvenliklerinin sağlanması deprem mühendislerinin çalışma konusu olmuştur. Bu nedenle, gerek mevcut barajların deprem güvenliklerinin gözden geçirilmesi gerekse inşa edilecek barajların depreme dayanıklı bir şekilde projelendirilmelerinin, gerçekçi yöntemlerle yapılması kaçınılmazdır.

Bu tez çalışmasında, deprem kuşağında yer alan beton ağırlık barajın baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak bu barajın dinamik davranışı incelenmiştir. Sıvı sıkışabilirliğinin, temelin elastik malzeme özelliklerinin ve taban absorpsiyon katsayısının çözümlere etkisi araştırılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmanın deprem konusunda insanları bilinçlendirmek ve araştırmacıları teşvik etmek amacı ile yapılmıştır. Yapılan bu çalışma süresi boyunca tüm zamanını ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON' a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ülkemize ve tüm insanlara faydalı olması dileğiyle çalışmamı saygı ile sunuyorum.

Arş. Gör. Ertuğrul ÇAMBAY

Temmuz-2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Önemi	1
1.2. Önceki Çalışmalar	2
1.3. Mevcut Çalışmanın Kapsamı.....	5
2. BETON İÇİN HASAR MEKANİĞİ YAKLAŞIMI	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. Anizotropik Hasar Modeli	7
3. SIVI-KATI SİSTEMİNİN EULER FORMÜLASYONU	13
3.1. Sıvının hareket denklemi (dalga denklemi)	13
3.2. Sıvı ortamının sınır ve başlangıç şartları.....	15
3.3. Sıvı Ortamı Hareketinin Sonlu Eleman Formülasyonu	18
3.4. Sıvı-Yapı Sisteminin Sonlu Eleman Hareket Denklemleri	20
4. SAYISAL UYGULAMA.....	22
4.1. Temelin Elastise Modülünün Barajın Dinamik Hasar Davranışı Üzerindeki Etkisi	24
4.1.1. Kütlesiz Temel Durumu	24
4.1.2. Kütleli Temel Durumu	31
4.2. Sıvı Sıkışabilirliğinin Barajın Dinamik Hasar Davranışı Üzerindeki Etkisi	39
4.2.1. Kütlesiz Temel Durumu İçin Sıvı Sıkışabilirliğinin Etkisi	39
4.2.2. Kütleli Temel için Sıvı Sıkışabilirliğinin Etkisi	45
4.3. Taban Absorbsiyon Katsayısının Barajın Dinamik Hasar Davranışı Üzerindeki Etkisi	50
4.3.1. Kütlesiz Temel Durumu İçin Taban Absorbsiyon Katsayısının Etkisi	51
4.3.2. Kütleli Temel Durumu İçin Taban Absorbsiyon Katsayısının Etkisi	55
5. SONUÇLAR.....	60
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	64

ÖZET

Bu çalışmada, beton ağırlık barajların baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak deprem etkisindeki sismik hasar analizleri incelenmiştir. İlk olarak şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan anizotropik bir hasar modeli tanıtılmıştır. Baraj-rezervuar ve baraj-temel sisteminin dinamik etkileşimi için Euler yaklaşımı kullanılmıştır. Bu formülasyon; sıvı sıkışabilirliğini, sıvı serbest yüzeyi dalgaları etkisini, yayılma sınır şartını ve taban absorpsiyonun dalga sönümleme etkilerini içermektedir. Rezervuar sonlu eleman ağının kesildiği yüzeye Sommerfeld yayılma sınır şartı uygulanmıştır. Rezervuar tabanı dalga sönümleme özelliği, bir boyutlu dalga yayılma şartı ile hesaba katılmıştır. Temel ortamı lineer elastik olarak modellenmiş olup sonlu eleman ağının kesildiği yüzeylere Unifield sınır şartı kullanılmıştır. Çözümlerde Koyna beton ağırlık barajı seçilmiş; baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak bu barajın dinamik hasar analizleri yapılmıştır. Dinamik etki olarak, 11 Aralık 1967 Koyna depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Temel ortamı elastisite modülü değişiminin, sıvı sıkışabilirliğinin ve taban absorpsiyon katsayısının değişiminin sismik harekete maruz barajın hasar davranışına etkisi irdelenmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde yer değiştirme ve hasar büyüklükleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri, Anizotropik hasar, Euler yaklaşımı ve sismik analiz.

SUMMARY

SEISMIC DAMAGE ANALYSIS OF CONCRETE GRAVITY DAMS INCLUDING DAM-FOUNDATION-RESERVOIR INTERACTION

In this study, nonlinear dynamic analyses of concrete gravity dams which subjected to earthquake ground motion were investigated by considering dam-reservoir and dam-foundation interactions. An anisotropic damage model which include strain softening behavior was firstly presented. Eulerian approach was used for dam-reservoir and dam-foundation interactions. This formulation were included fluid compressibility, effect of the fluid free surface waves, radiation boundary condition and wave damping effect of base absorption. Sommerfeld radiation boundary condition was applied at truncated boundary of the reservoir finite element mesh. Wave damping properties of the reservoir base was considered with condition of one dimensional wave propagation. Foundation domain was modelled as linearly elastic and Unifield boundary condition was used at truncated surfaces of the finite element mesh. Koyna gravity dam was selected for the solutions and dynamic damage analyses of the dam which consider dam-reservoir and dam foundation interactions were obtained. Acceleration records of 11 December 1967 Koyna earthquake were used for dynamic effect. Effects on damage response of the dam, subject to seismic quake were investigated according to variation of foundation elasticity modulus, effect of fluid compressibility and variation of base absorption coefficient. Displacements and damage evaluations were used for assessment of the results.

Keywords: Dam-reservoir and dam-foundation interactions, Anisotropic damage, Eulerian approach and seismic analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Hasarın oluşma evreleri: a) Beton içerisindeki mikro çatlaklar, b) Mikro çatlakların büyümesi ve sayısının artması c) Oluşan makro çatlaklar.	8
Şekil 2.2. Eşdeğer şekil değiştirme hipotezi: a) Hasar görmemiş malzeme, b) Hasar görmüş malzeme, c) Eş değer hasar görmemiş malzeme	10
Şekil 2.3 a) Betonun idealleştirilmiş tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [51] b) Betonda çatlağın açılıp-kapanma kriteri.	12
Şekil 4.1 Baraj-Temel sonlu eleman modeli.	22
Şekil 4.2 Rezervuar sonlu eleman modeli.	23
Şekil 4.3 Koyna depremi ivme bileşenleri.	23
Şekil 4.1.1 Kütlesiz temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi.....	26
Şekil 4.1.2 Kütlesiz temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi	27
Şekil 4.1.3 Kütlesiz temellerde, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2 ve 1/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	29
Şekil 4.1.4 Kütlesiz temellerde, E_t/E_b oranının 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	30
Şekil 4.1.5 Kütlesiz temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi	31
Şekil 4.1.6 Kütleli temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi.....	34
Şekil 4.1.7 Kütleli temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi	35
Şekil 4.1.8 Kütleli temel durumunda, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2 ve 1/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar	36
Şekil 4.1.9 Kütleli temel durumunda, E_t/E_b oranının 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar	37
Şekil 4.1.10 Kütleli temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi	38
Şekil 4.2.1 Kütlesiz temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi	40
Şekil 4.2.2 Kütlesiz temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi	41
Şekil 4.2.3 Kütlesiz temellerde, C-1, C-2, C-4 ve C-6 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	42

Şekil 4.2.4 Kütlesiz temellerde, C-8, C-10 ve C-20 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	43
Şekil 4.2.5 Kütlesiz temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi.	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 4.2.6 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi	46
Şekil 4.2.7 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi.	47
Şekil 4.2.8 Kütleli temellerde C-1, C-2, C-4 ve C-6 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	48
Şekil 4.2.9 Kütleli temellerde C-8, C-10 ve C-20 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	49
Şekil 4.2.10 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi.	50
Şekil 4.3.1 Kütlesiz temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) ' nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay yöndeki (x) yer değiştirmesinin zamanla değişimi.	52
Şekil 4.3.2 Kütlesiz temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) ' nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey yöndeki (y) yer değiştirmesinin zamanla değişimi.	53
Şekil 4.3.3 Kütlesiz temellerde $\alpha=0.00, 0.25$ ve 0.50 olması durumlarında hasarın zamanla değişimi.	54
Şekil 4.3.4 Kütlesiz temellerde $\alpha=0.75$ ve 1.00 olması durumu için değişik anlarda oluşan hasarlar.	55
Şekil 4.3.5 Kütlesiz temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) ' nın değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi.	55
Şekil 4.3.6 Kütleli temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) ' nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay yöndeki (x) yer değiştirmesinin zamanla değişimi.	56
Şekil 4.3.7 Kütleli temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) ' nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey yöndeki (y) yer değiştirmesinin zamanla değişimi	57
Şekil 4.3.8 Kütleli temellerde, $\alpha=0.00, 0.25, 0.50$ ve 0.75 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	58
Şekil 4.3.9 Kütleli temellerde, $\alpha=1.00$ olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.	59
Şekil 4.3.10 Kütleli temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) ' nın değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi.	59

SEMBOLLER LİSTESİ

C	: Sıvıdaki basınç dalgası hızı (veya sıvıdaki ses dalgası hızı)
$[C_f]$	: Sıvı ortamının sönüm matrisi
$[C_f^b]$	: Rezervuar tabanındaki alüvyon ve sediment malzemesinin dalga sönümleme etkisinden dolayı sıvı ortamında oluşan sönüm matrisi
$[C_f^t]$	: Sommerfeld dalga yayılma sınır şartından dolayı sıvı ortamına kazandırılan sönüm matrisi
$[C_s]$	: Yapı ortamına (baraj+temel) ait sönüm matrisi
E_T	: Temelin elastisite modülü
E_B	: Barajın elastisite modülü
G_f	: Kırılma enerjisi
$\{F\}$	: Yapının dış yük vektörü
$\{F_{sf}\}$	: Sıvı ortamında oluşan hidrodinamik basınçlardan ötürü yapıya gelen ek dış yük vektörü
$\{F_{fg}\}$	: Sıvı-yapı ara yüzeyi ile sıvı tabanındaki rijit ivmelenmeden ötür ortaya çıkan sıvı yük vektörü
g	: Yer çekim ivmesi
H	: Baraj yüksekliği
$[K_f]$	: Sıvı ortamının rijitlik matrisi
$[\hat{K}_f]$	: Sıvı ortamının efektif rijitlik matrisi
$[K_s]$	: Yapı ortamına (baraj+temel) ait rijitlik matrisi
$[\hat{K}_s]$	: Yapı ortamı için efektif rijitlik matrisi
$[M_f]$	: Sıvı ortamının kütle matrisi
$[M_f^a]$	: Sıvı ortamındaki bütün elemanların katkılarını içeren kütle matrisi
$[M_f^y]$	: Sıvı serbest yüzeyinde oluşan dalgaların etkisini içeren kütle matrisi

$[M_s]$	: Yapı ortamına (baraj+temel) ait kütle matrisi
α	: Taban absorpsiyon katsayısı
ω_1^r	: Rezervuarın açısal frekansı
ω_1^s	: Barajın açısal frekansı
Ω_r	: Sıkışabilirlik etkisi
$\tilde{\sigma}$	: Cauchy gerilme vektörü
$\tilde{\sigma}^+$	: Efektif gerilme vektörü

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi

Büyük bir barajın yıkılması hem ekonomik hem de can kaybı bakımından kötü sonuçlar doğuracağından, barajların deprem tasarımları deprem mühendisliğinde önemli bir ilgi alanı oluşturmaktadır. Birçok barajın depremlerde hasar görmesi, özellikle 1967 yılında Hindistan'daki Koyna ve 1962 yılında Çin Halk Cumhuriyeti'ndeki Hsinfengkiang barajının deprem sırasında önemli hasarlar görmesi [1] bu ilgiyi daha çok arttırmıştır. Günümüze kadar sismik bölgelerde birçok beton baraj inşa edilmiş ve bundan sonra da inşa edilmesi beklenmektedir. Bu nedenle, gerek mevcut ve inşa halindeki barajların deprem güvenliklerinin gözden geçirilmesi ve gerekse inşa edilecek barajın depreme dayanıklı şekilde projelendirilmesi konusunda gereksinimler doğmuştur.

Deprem yer hareketinin beton barajlara etkisinin değerlendirilebilirliği; mevcut barajların güvenliklerini araştırmak, eski barajların performanslarının iyileştirilmesi için planlanan değişikliklerin yeterliliklerini belirlemek ve inşa edilecek barajlar için önerilen tasarımları değerlendirmek çabalarına temel oluşturmaktadır. Beton barajların deprem sırasındaki performanslarının tahmini yapı dinamiğinin daha karmaşık ve araştırılan problemlerinden biridir. Aşağıda sıralanan faktörler problemi daha karmaşık hale getirmektedir [1].

- Barajlar ve rezervuarlar site alanının topoğrafyasına bağlı olarak karmaşık geometriye sahiptirler.
- Barajların davranışları, yer hareketi şiddetinin ve özelliklerinin barajın oturduğu vadinin genişliği ve yüksekliği boyunca değişiminden önemli ölçüde etkilenebilir. Bu nedenle, uygun aletsel kayıtların eksikliğinden dolayı yer hareketinin uzaysal değişimleri güvenli bir şekilde belirlenemeyebilir.
- Rezervuardaki suyun depreme bağlı hareketi, temel kayasının deformasyon yapabilme özelliği ile su, temel kayası ve barajın etkileşim hareketi bir barajın davranışını önemli derecede etkilemektedir.
- Şiddetli deprem hareketleri sırasında, yatay ve düşey inşa derzleri kayabilir veya açılabilir, beton çatlayabilir ve rezervuardaki su barajın memba yüzeyinden yerel olarak ayrılabilir. Bu olaylar lineer olmadıkları için bunları modelleyerek analizde göz önünde bulundurmamak problemi karmaşık hale getirmektedir [2].

1.2. Önceki Çalışmalar

Barajın deprem yer hareketi etkisindeki lineer elastik davranışı, rezervuarın boş kabul edilmesi halinde standart yöntemlerle kabul edilebilir. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi bu problem için başarıyla kullanılmaktadır [3]. Bu yöntemlerde baraj sonlu elemanlara bölünmekte ve sonlu eleman düğüm noktalarında bilinmeyen olarak yer değiştirmeler seçilerek sistemin hareketi bir denklem takımı ile temsil edilmektedir. Kemer barajlar üç boyutlu analizler gerektiği halde beton ve toprak barajlar için genellikle iki boyutlu idealleştirmeler yeterlidir [2]. Barajın dinamik davranışını belirleyen hareket denklem takımının çözümü zaman alanında adım adım integrasyon yöntemi ile direkt olarak elde edilebilir. Bu yöntem yerine, barajın ilk birkaç modunu içermeyi öngören modların süperpozisyonu yöntemi uygulanabilir. Günümüzde her iki yöntem, standart yapı analiz programlarında yer almaktadır [4]. Alternatif olarak, önce hareket denklemleri frekans alanında çözülerek frekans alanındaki davranış elde edilmektedir; daha sonra Fourier transformasyon metotları aracılığıyla zaman alanındaki çözümler bulunmaktadır [5].

Barajlar, sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda, deprem gibi dinamik bir etki alanında, yapı sıvının, sıvı da yapının davranışlarını önemli ölçüde etkiler. Sonuçta, sıvı ortamında oluşan hidrodinamik basınçlar yapı ortamında, ilave bir yük oluşmaktadır. Bu nedenle, barajların dinamik analizlerinde rezervuarın, baraj dinamik özellikleri ve davranışı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Sıvı-yapı etkileşim problemleri Euler, Lagrange ve Kütle Ekleme yaklaşımlarından birbiriyle modellenebilir [6-10]. Euler yaklaşımında, sıvı ortamında basınçlar (hız potansiyelleri), yapı ortamında ise yer değiştirmeler değişken olarak seçilir [6-8]. Lagrange yaklaşımında, hem yapı hem de sıvı ortamında değişken olarak yer değiştirmeler göz önünde alınır [6-9]. Sıvı ortamının hidrodinamik basınçlarını barajın memba yüzeyi üzerinde toplanan bir ilave kütleyle eşdeğer olarak kabul eden yaklaşım ise Kütle Ekleme metodu olarak bilinir [6-8, 10]. Bu çalışmada Euler yaklaşımı kullanılarak sıvı-yapı etkileşimi dikkate alınmıştır.

Euler yaklaşımı, baraj ve sıvı depoları gibi sıvı ile etkileşim halinde bulunan birçok yapı probleminin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Westergaard'ın 1931 yılında yaptığı çalışma sıvı-yapı etkileşim analizleri için bir başlangıç sayılabilir [10]. İlgili çalışmada, barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey memba yüzeyli olduğu; rezervuarın memba doğrultusunda sonsuza uzandığı ve yüzey dalgalarının oluşmadığı kabulleri yapılmıştır.

Suyun lineer sıkışabilirliği dikkate alınarak, baraj eksenine dik yatay doğrultudaki harmonik bir yer hareketi için analitik çözümler elde edilmiştir. Hidrodinamik basınçların yer hareketiyle karşıt fazda olduğu bu nedenle, barajla birlikte hareket eden ilave bir kütlenin atalet kuvvetlerine eş değer olarak alınabileceği bu çalışma ile gösterilmiştir [10].

Westergaard çözümü sadece harmonik hareket periyodunun rezervuar temel periyodundan daha büyük olduğu haller için geçerli olmaktadır [11,12]. Harmonik hareket periyodu rezervuar temel periyodundan daha büyük olduğu hallerde çözümler sıkışamaz sıvı çözümlerine daha yaklaşmaktadır [13]. Zangar [14] elektrik analogisini kullanarak eğik memba yüzeyine sahip rijit barajlar üzerindeki hidrodinamik etkilerin kütle ekleme metodu ile temsil edilmesi yaklaşımına temel oluşturmaktadır [3].

1960'lı yılların ortalarına kadar barajların deprem analizlerinde baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri ya ihmal edilmiş ya da çok basit olarak hesaba katılmıştır. Yüksek hızlı büyük kapasiteli bilgisayarların ve buna paralel olarak sonlu elemanlar metodu gibi etkin sayısal metotların gelişmesiyle bu konu hem önem kazanmış hem de probleme daha gerçekçi olarak yaklaşılmaya başlanılmıştır [1].

Sonlu elemanlar yöntemi değişik geometriye sahip problemlere kolaylıkla uygulanabilir bir üstünlüğe sahiptir. Bununla birlikte, baraj rezervuar sisteminin sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerinde rezervuar ortamının baraj memba doğrultusunda uzunluğunun ne kadar alınacağı problemi ile karşılaşmaktadır. Dış tahrik frekansının rezervuar frekansından büyük veya küçük olmasına göre sıkışabilir sıvıdaki hidrodinamik basınçların rezervuar uzunluğundan etkilenmesi farklı olmaktadır. Söz konusu frekans büyük olduğunda hidrodinamik basınçlar rezervuar uzunluğuna karşı duyarlı hale gelmektedir. Dış tahrik frekansının rezervuar temel frekansından küçük olduğu durumlarda (özellikle kısa barajlarda) ise rezervuar uzunluğu, yüksekliğinin iki ve daha fazla katı [15,16] veya üç ve daha fazla katı [12,17-18] alındığında rezervuar uzunluğunun sıkışabilir sıvıdaki hidrodinamik basınçlara etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bunun yanında, sıvı dalgalarının yayılma sönüm etkilerini içermek maksadıyla rezervuar sonlu eleman ağının kesildiği arka yüzeye uygun yayılma sınır şartları uygulanabilir [15,19]; viskoz ve geçirgen (transmitting) sınır şartları buna örnektir [20-22]. Bu tür sınır şartlarının kullanılması halinde rezervuar sonlu eleman ağının uzunluğu daha da kısa tutulabilir [19]. Diğer bir yaklaşım olarak, rezervuarın baraja bitişik yakın bölgesi sonlu elemanlarla, uzak bölgesi ise sürekli ortam olarak temsil edilmektedir [23-25].

Chopra ve grubunun suyun sıkışabilirlik etkilerini içeren baraj-rezervuar etkileşimi ile ilgili farklı çalışmaları vardır; bu çalışmalarda modların süperpozisyonu yöntemi kullanılarak frekans alanında çözümler elde edilmiştir [5,23,24,26-36]. Chopra' nın 1968 yılında yaptığı çalışmada; [27] başlangıçta, boş barajın sadece temel modu dikkate alınarak incelenmeye başlanılmış [27-29] daha sonra ilk birkaç mod içerecek şekilde baraj-rezervuar etkileşim problemi genişletilmiştir [30]. İlgili çalışma iki temel mantığa dayanmaktadır. (a) Baraj ve rezervuar ortamları toplam sistemin iki alt sistemi olarak göz önüne alınmaktadır. Baraj alt sistemi rijit temele oturan bir sonlu eleman sistemi olarak, rezervuar sistemi ise sabit derinlikli ve sonsuza uzanan sürekli bir ortam olarak temsil edilmektedir. Rezervuardaki suyun hidrodinamik etkileri barajın hareket denkleminde frekans bağımlı terimler olarak gözükmektedir. (b) Daha sonra, bu denklemler barajın ilk birkaç modu cinsinden ifade edilmektedir. Bu transformasyon bilinmeyenlerin sayısında önemli bir indirgeme meydana getirdiğinden, çok etkili çözümlere götürmektedir. Yapı denklemlerindeki hidrodinamik terimler rezervuar ortamı üzerinde dalga denklemlerinin uygun sınır şartları altında analitik çözümüyle belirlenmektedir. Benzer bir yaklaşım kemer barajlar içinde yapılmıştır [26]. Daha sonraki çalışmalarda barajın esnek temele oturması [31] ve ayrıca, rezervuar tabanlarında çoğunlukla bulunan sediment ve alüvyon gibi malzemelerin etkilerini içerecek şekilde [32] söz konusu çalışma [30] geliştirilmiştir.

Hall ve Chopra [23], beton ağırlık ve toprak dolgu barajların hidrodinamik etkileri içeren deprem davranışlarını belirlemek üzere frekans alanında bir analiz metodu geliştirdiler. İlgili çalışmada, yukarıda bahsedilen çalışmalara [5,23,24,26-36] benzer bir yol izlemekle birlikte, hem baraj hem de rezervuar alt sistemi sonlu elemanlarla modellendirilmektedir. Rezervuar ortamı düzensiz (sonlu eleman sistemi) ve düzenli (sürekli ortam) olmak üzere iki bölge halinde düşünülmektedir. Rezervuarın düzensiz bölgesi baraja bitişik, düzenli bölgesi ise düzensiz bölgenin bitiminden sonra başlamaktadır. Düzenli bölgenin sabit derinlikli ve üniform bir şekilde sonsuza uzadığı kabul edilmektedir. Her iki bölgenin ara yüzeyi sonlu eleman ve sürekli ortam gösteriminin kesişim yeri olmaktadır. Benzer bir analiz metodu kemer barajlar içinde geliştirilmiştir [24]. Fok ve Chopra [33,34] kemer barajlarda temel esnekliği ile rezervuar tabanındaki alüvyon ve sediment malzemenin dalga sönümleme etkisi hesaba katılacak şekilde [24] çalışma yaptılar. Tan ve Chopra [35,36], baraj temel etkileşiminde temel esnekliği yanında temelin atalet ve sönüm etkilerini de göz önünde bulundurarak kemer barajların deprem davranışını incelediler.

1.3. Mevcut Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, beton ağırlık barajların baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak deprem etkisindeki dinamik davranışı incelenmiştir. İlk olarak sıvı-yapı sisteminin dinamik etkileşim problemi için Euler yaklaşımına göre sonlu eleman formülasyonu sunulmuştur. Formülasyon; sıvı sıkışabilirliğini, dalga yayılma sönümünü sıvı yüzey dalgası yayılma sönümünü, sıvı serbest yüzey dalgalarını ve rezervuar tabanında genelde mevcut olan alüvyon ve sediment malzemesinin dalga sönümleme etkisini içermektedir. Çözümlerde temel ve rezervuar ortamları sonlu boyutta seçilmiştir. Rezervuar sonlu eleman ağının mansap-memba doğrultusunda ağın kesildiği arka yüzeyine Sommerfeld dalga yayılma sönüm şartı uygulanmıştır. Ayrıca, rezervuar tabanında bulunan alüvyon ve sediment malzemesinin dalga sönümleme etkisi, bir boyutlu dalga yayılma sınır şartına dayanan bir α_r parametresi ile hesaba katılmıştır. Sayısal uygulama için Koyna beton ağırlık barajı seçilmiş; baraj-rezervuar ve baraj temel etkileşimi dikkate alınarak bu barajın dinamik analizleri yapılmıştır. Dinamik etki olarak, 11 Aralık 1967 Koyna depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Sıvı yüzey dalgalarının ve sıvı sıkışabilirliğinin çözümlere etkisi incelenmiştir. Rezervuar tabanındaki alüvyon ve sediment malzemesinin dalga sönümleme özelliği ile dalga yayılma sönüm şartının sonuçlara etkisi ayrıca irdelenmiştir. Temelin elastik malzeme özellikleri, temelin elastisite modülü değiştirilerek hesaba katılmıştır. Bu ortamın diğer malzeme parametreleri baraj ortamındaki gibi alınmıştır. Temel-baraj elastisite modülü oranı değiştirilerek temel esnekliğinin çözümlere etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 2’ de anizotropik hasar modeli ile ilgilidir. Betonun çatlak davranışının modellenmesinde global (ayrık çatlak) ve lokal (yayılı çatlak ve hasar mekaniği) çatlak modelleri açıklanmaktadır.

Bölüm 3’ te sıvı-yapı (baraj-rezervuar) sisteminin dinamik etkileşiminin Euler formülasyonu verilmiştir. Sıvı sistemlerinin dinamik hareketi ile ilgili temel bağıntılar verildikten sonra, sıvı-yapı sistemlerinin hareketi için Euler yaklaşımına göre sonlu eleman formülasyonu tanıtılmıştır. Ortak sistemin hareket denklemlerinin zaman alanında sayısal çözümü için Newmark metoduna dayanan bir genişletilmiş HHT- α algoritması verilmiştir.

Bölüm 4' te sayısal uygulama kısmı yer almakta olup çözümler için seçilen Koyna barajının geometrik ve malzeme özellikleri verilmiştir. Baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri göz önünde bulundurularak bu barajın deprem etkisindeki dinamik analizi yapılmıştır. Sıvı sıkışabilirliğinin, temelin elastik malzeme özelliklerinin ve taban absorpsiyonun dalga sönümleme etkisinin farklı durumları için analizler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bölüm 5' te ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2.BETON İÇİN HASAR MEKANİĞİ YAKLAŞIMI

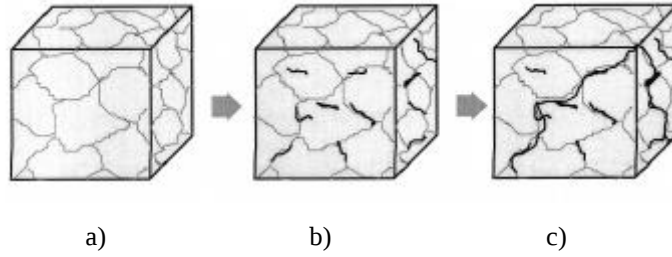
2.1 Giriş

Betonun çatlak davranışı hakkında yirmi beş yılı aşkın bir zamandan beri birçok araştırma yapılmaktadır. Çatlağın modellenmesinde kırılma mekaniği teorilerinden faydalanılmaktadır. Kırılma mekaniğinde çatlaklar; global (ayrık çatlak) ve lokal (yayılı çatlak ve hasar mekaniği) yaklaşım olmak üzere, iki ayrı çatlak modeli kullanılarak incelenmektedir [38-51]. Global yaklaşımda, çatlaklar sürekli ortam içerisinde süresiz bir bölgenin tanımlanmasıyla modellenmekte ve gerilmelerin hesabı kırılma mekaniği teorilerine göre yapılmaktadır [38]. Lokal çatlak yaklaşımı ise betonun davranışını temsil eden bünye denklemlerinin değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda yapısal bütünlük lokal bir bazda değerlendirilmektedir [39-44]. Global çatlak yaklaşımı, çatlak profilindeki gerilme tekilliğini ve betonun gerçekçi çatlak davranışını hesaba katan birçok problemde başarılı bir şekilde kullanılmasına rağmen, aşağıda belirtilen bazı faktörlerden dolayı büyük yapı sistemlerinin çözümünde sınırlı kalmaktadır. Bu faktörler; çatlakların oluşmasıyla her bir asal gerilme (veya şekil değiştirme) doğrultusunda bağımsız davranışın belirlenmesi gereği, bir çatlak noktasında birden çok çatlak oluşması durumunda o noktada denge kaybı, çatlak yüzeyinde kayma dayanımını sağlamak için rasgele bir kayma dayanım faktörünün seçilmesi ve tekrarlı yükleme durumlarında çatlağın açılıp-kapanmasının modellenmesinin zorluğu olarak sıralanabilir [40,41,44]. Lokal yaklaşım ise son zamanlarda bu alanda meydana gelen önemli gelişmeler ve yapılan iyileştirmelerle daha yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

2.2. Anizotropik Hasar Modeli

Lokal bir yaklaşım olan hasar mekaniği yayılı çatlak modeliyle aynı felsefeye dayanmaktadır. Lokal yaklaşımda tek bir bünye denkleminin kullanılmasıyla ayrık çatlak modeli için yukarıda belirtilen bazı sınırlamaların üstesinden rahatlıkla gelinebilir. Hasar mekaniği kavramını tanıtmadan evvel betonun makro ölçekli tepkisinin iki mikro ölçekli mekanizmayla belirlendiğine işaret etmek gerekir [45-51]. Bu mekanizmalar; malzeme içerisinde mikro-çatlakların başlaması ve büyümesidir. Mikro-çatlaklar başlangıçta, farklı sıcaklık etkileri, alkali-agrega reaksiyonları, su sızması gibi dış etkilerin yanı sıra agrega

ve beton arasındaki ara yüzey ayrışmaları, betondaki boşlukların birleşmesi vb. gibi içsel kusurlardan dolayı oluşmaktadır [6, 45-51]. Bu mikro-çatlaklar, deprem gibi dinamik bir etki ile büyümekte ve makro-çatlaklara dönüşmektedir. Bu bağlamda hasar mekaniği, makro ölçülerde mikro-çatlaklardan dolayı malzeme dayanımındaki ortalama azalım miktarının belirlenmesini sağlamaktadır (Şekil 2.1). Çekme gerilmeleri altında beton gibi gevrek malzemelerde hasar, eşdeğer bir elastik dayanım azalımı olarak göz önüne alınabilir (Şekil 2.2). Malzemedeki bu dayanım azalımı yapının lineer olmayan davranışını yansıtmaktadır. Hasar mekaniği modellerini kullanarak birçok araştırmacı beton ağırlık ve kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışını incelemiştir [6, 46-48, 50-51].



Şekil 2.1. Hasarın oluşma evreleri: a) Beton içerisindeki mikro çatlaklar, b) Mikro çatlakların büyümesi ve sayısının artması c) Oluşan makro çatlaklar.

Malzeme içerisindeki mikro-çatlaklar gerilmeleri ileten net taşıma alanlarını azaltmaktadır. Malzemedeki hasar bu azalıma bağlı olarak ifade edilmektedir. Anizotropik hasar yaklaşımı kullanılarak iki boyutlu problemler için Cauchy ve efektif gerilme bileşenleri arasındaki ilişki lokal koordinatlarda,

$$\begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_1^+ \\ \tilde{\sigma}_2^+ \\ \tilde{\sigma}_{12}^+ \\ \tilde{\sigma}_{21}^+ \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_2)} \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_1)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_1 \\ \tilde{\sigma}_2 \\ \tilde{\sigma}_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

veya kısa yazılımla

$$\{\tilde{\sigma}^+\} = [\Psi] \{\tilde{\sigma}\} \quad (2.2)$$

bağıntısı ile tanımlanabilir. Burada $\{\tilde{\sigma}\}$ ve $\{\tilde{\sigma}^+\}$ sırasıyla, Cauchy ve efektif gerilme vektörlerini, $[\psi]$ hasar matrisini göstermektedir. d_1 ve d_2 ise iki asal doğrultudaki hasar parametreleri olup,

$$d_i = \frac{A_i - A_i^+}{A_i} \quad i=1,2 \quad (2.3)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Burada A_i ve A_i^+ sırasıyla, normal i doğrultusunda olan yüzeydeki toplam ve net alanları temsil etmektedir. Denklem (2.1)' den görüldüğü gibi efektif gerilme vektörü simetrik değildir. Simetrik efektif gerilme vektörü $\{\tilde{\sigma}^*\}$,

$$\{\tilde{\sigma}^*\} = \begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_1^* \\ \tilde{\sigma}_2^* \\ \tilde{\sigma}_{12}^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_1^+ \\ \tilde{\sigma}_2^+ \\ \sqrt{\frac{(\tilde{\sigma}_{12}^+)^2 + (\tilde{\sigma}_{21}^+)^2}{2}} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

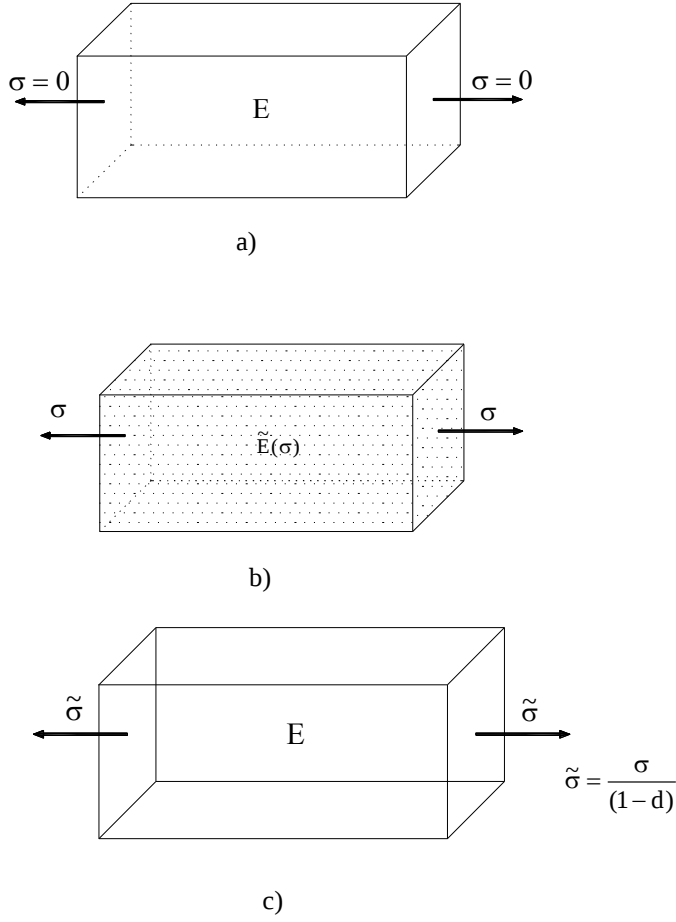
olarak tanımlanabilir. Bu vektör, Cauchy gerilme vektörü ile

$$\{\tilde{\sigma}^*\} = [\Psi^*] \{\tilde{\sigma}\} \quad (2.5)$$

şeklinde ilişkilendirilebilir. $[\Psi^*]$, $\{\tilde{\sigma}^*\}$ gerilme vektörü ile ilgili hasar matrisi olup

$$[\Psi^*] = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_2)} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{(1-d_1)^2} + \frac{1}{(1-d_2)^2} \right)} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

formunda açık olarak yazılabilir.



Şekil 2.2. Eşdeğer şekil değiştirme hipotezi: a) Hasar görmemiş malzeme, b) Hasar görmüş malzeme, c) Eş değer hasar görmemiş malzeme

Anizotropik hasara uygun bir bünye denklemi elde etmek için, hasarlı malzemenin ve hayali hasar görmemiş eş değer malzemenin komplementer elastik enerjilerinin eşit olduğu kabul edilip, gerekli işlemler yapıldıktan sonra anizotropik koordinat sisteminde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki matris elde edilebilir [6,47,50,51]. Bu durumda eşdeğer hasarsız malzeme için lokal koordinatlardaki bünye ilişkisi,

$$\{\tilde{\sigma}\} = [\tilde{D}^*] \{\tilde{\varepsilon}\} \quad (2.7)$$

eşitliği ile tanımlanabilir (Şekil 2.2). $[\tilde{D}]$ hasarsız malzemenin bünye matrisini belirtmek üzere, hasarlı haldeki bünye matrisi $[\tilde{D}^*]$,

$$[\tilde{D}^*] = [\Psi^*]^{-1} [\tilde{D}] [\Psi^*]^T \quad (2.8)$$

bağıntısıyla verilebilir. Lokal koordinat sisteminde verilen (2.7) bağıntısı dönüşüm matrisi kullanılarak global koordinat sisteminde yazılabilir. Bu durumda,

$$\{\sigma\} = [D^*] \{\varepsilon\} \quad (2.9)$$

bağıntısına ulaşılır. $[D^*]$ matrisi daha açık bir şekilde,

$$[D^*] = [T_\varepsilon]^T [\tilde{D}^*] [T_\varepsilon] \quad (2.10)$$

formunda yazılabilir. Burada $[T_\varepsilon]$ şekil değiştirme dönüşüm matrisini göstermektedir.

Betonun idealleştirilmiş tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.3.a' dan görüleceği gibi,

$$\sigma(\varepsilon) = E_0 \varepsilon \quad \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (2.11.a)$$

$$\sigma(\varepsilon) = f_t \left[2 e^{-a(\varepsilon - \varepsilon_0)} - e^{-2a(\varepsilon - \varepsilon_0)} \right] \quad \varepsilon_0 < \varepsilon \quad (2.11.b)$$

bağıntılarıyla tanımlanabilir [6,47,50,51,54]. Burada f_t ve ε_0 sırasıyla betonun çekme dayanımını ve ilgili şekil değiştirmeyi; E_0 hasar görmemiş betonun elastisite modülünü, a ise boyutsuz bir sabiti belirtmekte olup,

$$a = \frac{3}{\varepsilon_0 \left[\frac{2EG_f}{l_{ch} f_t^2} - 1 \right]} \geq 0.0 \quad (2.12)$$

eşitliğiyle elde edilmektedir. Bu denklem, köşeli parantez içerisindeki değer pozitif olmasını gerektirmektedir. Buradan, $l_{ch} \leq 2EG_f / f_t^2$ ifadesi sonlu eleman ağ yapısında bir boyutlandırma kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır. l_{ch} ' in değeri büyüdükçe Kırılma İşlem Süreç Bölgesi (KİSB) büyümekte ve malzeme daha gevrek olmaktadır. Bu sınırdan daha büyük değerler için malzeme gevrek bir davranış sergilemektedir (yani, maksimum dayanım aşıldıktan sonra şekil değiştirme yumuşaması davranışı oluşmaz) [6, 52].

Şekil değiştirme enerjisi eşdeğerlik hipotezi kullanılarak, tek eksenli gerilme halinde anizotropik hasar parametresi için sekant elastisite modülü yardımıyla,

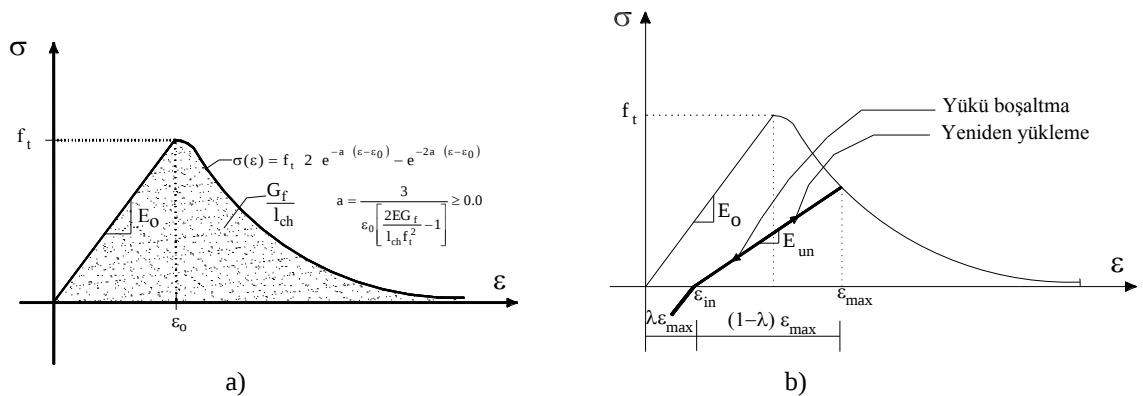
$$d = 1 - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right) \left[2 e^{-a(\varepsilon - \varepsilon_0)} - e^{-2a(\varepsilon - \varepsilon_0)} \right]} \quad (2.13)$$

eşitliği yazılabilir. İki boyutlu gerilme durumunda her bir asal şekil değiştirme doğrultusundaki hasar parametresi (2.13) denklemi kullanılarak ayrı ayrı elde edilecektir.

Tekrarlı yükleme sırasında gerilmeler çekmeden basınca işaret değiştirirken açık olan çatlaklar kapanmaya doğru bir eğilim gösterirler. Bu değişim sırasında, betonun şekil değiştirmesinin tümü geri dönmeyebilir (Şekil 2.3.b). Bu durumda maksimum şekil değiştirmenin bir kısmı elastik-olmayan kalıcı şekil değiştirmedir. Dahlblom ve Ottosen [53] elastik-olmayan şekil değiştirmenin, maksimum asal şekil değiştirmenin yüzde 20' si civarında olduğunu ifade etmişlerdir. Toplam şekil değiştirme; elastik şekil değiştirme ε_e ve elastik-olmayan şekil değiştirme ε_{in} olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Buradan toplam şekil değiştirme için,

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{in} = \varepsilon_e + \lambda \varepsilon_{max} \quad (2.14)$$

eşitliği yazılabilir. λ , bir kalibrasyon parametresi olup beton gibi gevrek malzemeler için genellikle 0.2 alınmaktadır [47,50,51,53].



Şekil 2.3 a) Betonun idealleştirilmiş tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [47,50,51]
b) Betonda çatlağın açılıp-kapanma kriteri.

3. SIVI-KATI SİSTEMİNİN EULER FORMÜLASYONU

Bu çalışmada, Euler yaklaşımı kullanılarak beton ağırlık barajların baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimi dikkate alınarak deprem davranışı incelenmiştir. Euler yaklaşımı, barajlar ve su depoları gibi sıvı-yapı etkileşimine maruz sistemlerin sonlu ve sınır eleman yöntemiyle analizlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sıvı-yapı sistemlerinin Euler yaklaşımıyla analizinde, yapının hareketi yer değiştirmeler cinsinden, sıvının hareketi ise basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Sıvı-yapı ara yüzeyindeki etkileşiminden dolayı ortak hareket meydana gelmektedir. Bu nedenle, çözüm için özel ara yüzey denklemlerinin tanımlanması gerekmektedir. Beton ağırlık barajların deprem davranışlarını belirlemek için iki boyutlu analiz genellikle yeterli olduğundan [54,55], burada problemin iki boyutlu formülasyonu üzerinde durulacaktır. Önce sıvı hareketi ile ilgili iki boyutlu haldeki temel bağıntılar elde edilecek ve bunların sonlu eleman formu yazılacak ve daha sonra sıvı-yapı sistemi için ortak hareket denklemleri verilecektir. Son olarak Newmark metoduna dayalı genişletilmiş HHT- α metoduna dayalı sıvı yapı sisteminin ortak hareket denklemleri verilecektir.

3.1. Sıvının hareket (dalga) denklemi

Burada öncelikle, lineer sıkışabilir, viskoz olmayan ve rotasyonsuz bir sıvının küçük yer değiştirmeler altındaki hareketi için formülasyonlar verilecektir. $P = P(x, y, t)$ hidrodinamik basıncı göstermek üzere; sıvı hareketi sırasında x ve y koordinat eksenleri doğrultusundaki basınç gradyanları Newton'un hareket prensibinden yararlanılarak,

$$P_{,x} = -\rho_f \ddot{u}_x \quad (3.1)$$

$$P_{,y} = -\rho_f \ddot{u}_y \quad (3.2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada P_i hidrodinamik basıncın i değişkenine göre kısmi türevini; ρ_f sıvının kütle yoğunluğunu, u_x ve u_y sırasıyla x ve y eksenleri doğrultusundaki yer değiştirmeleri göstermektedir [2]. Büyüklüklerin üzerindeki nokta işareti ilgili büyüklüğün zamana göre türevini temsil etmektedir. (3.1) denklemi x' e ve (3.2) denklemi y' ye göre türetilip, taraf tarafa toplanırsa,

$$P_{,xx} + P_{,yy} = -\rho_f (\ddot{u}_{x,x} + \ddot{u}_{y,y}) \quad (3.3)$$

veya

$$P_{,xx} + P_{,yy} = -\rho_f \frac{d^2}{dt^2} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (3.4)$$

eşitliğine ulaşılır. Burada $\varepsilon_x = u_{x,x}$ ve $\varepsilon_y = u_{y,y}$ olup, sırasıyla x ve y doğrultularındaki şekil değiştirmeleri; $P_{,ii}$ hidrodinamik basıncın i değişkenine göre iki kez kısmi türevini göstermektedir [2]. Hacimsel şekil değiştirme oranı (θ) iki boyutlu halde,

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y = -\frac{P}{\beta_f} \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada β_f sıvı hacimsel elastisite modülünü belirtmektedir. (3.5) denklemi, (3.4) denkleminde kullanılırsa, sıvı hareketini temsil eden ve dalga denklemi olarak bilinen

$$P_{,xx} + P_{,yy} = \frac{\rho_f}{\beta_f} \ddot{P} \quad (3.6)$$

veya

$$P_{,xx} + P_{,yy} = \frac{1}{C^2} \ddot{P} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir [56,57]. Burada $C = \sqrt{\beta_f / \rho_f}$ olup; sıvıdaki basınç dalgası hızını (buna sıvıdaki ses dalgası hızı da denilmektedir) temsil etmektedir. Herhangi bir dinamik etki sonucu sıvı sisteminde oluşan hidrodinamik basınçlar, (3.1) denkleminin uygun sınır ve başlangıç şartları altında çözülmesiyle elde edilir.

3.2. Sıvı ortamının sınır ve başlangıç şartları

Sıvı ortamı için sıvı-yapı ara yüzeyinde, sıvı tabanında, sıvı serbest yüzeyinde ve sonlu eleman ağının kesildiği arka yüzeyde sınır şartları belirlenmelidir. Sıvı ortamı sınır şartları, genel olarak aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

1. Sıvı-yapı (baraj-rezervuar) ara yüzeyinde sınır şartı: Ara yüzeye dik doğrultudaki ivmeler sıvıyı dinamik olarak tahrik eder. Bu ara yüzeyde

$$P_{,n} = -\rho_f \ddot{u}_n \quad (3.8)$$

bağıntısı yazılabilir. n ilgili yerdeki sıvı yüzeyi dış normalini, $P_{,n}$ basıncın yüzey normali doğrultusundaki türevini, $\ddot{u}_n$ sıvı-yapı ara yüzeyinde normal doğrultusundaki yapı ivmelerini göstermektedir [2].

2. Sıvı (rezervuar) serbest yüzeyinde sınır şartı: Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgaları etkisi ihmal edilirse bu yüzeyde

$$P = 0 \quad (3.9)$$

eşitliği söz konusu olur. Şayet yüzey dalgalarının etkisi göz önüne alınırsa ilgili yerde

$$P = \rho_f g u_{ns} \quad (3.10)$$

bağıntısı geçerli olur. g yerçekimi ivmesini ve u_{ns} ise sıvı yüzeyi dış normal doğrultusundaki yer değiştirmeyi ifade etmektedir. n normal doğrultusundaki basınç gradyanının

$$P_{,n} = -\rho_f \ddot{u}_n \quad (3.11)$$

şeklinde olduğu düşünülürse, (3.10) denklemi (3.11) denklemi ile birleştirilerek

$$P_{,n} = -\frac{\ddot{P}}{g} \quad (3.12)$$

formuna sokulabilir [2]. Bu durumda (3.10) denklemini yerine (3.12) bağıntısı kullanılabilir.

3. Sıvı (rezervuar) tabanında sınır şartı: Rijit temele sahip sıvının tabanında dinamik etki sonucu rijit bir ivmelenme oluşur. Bu durumda sıvı tabanındaki sınır şartı

$$P_{,n} = -\rho_f \ddot{u}_{ng} \quad (3.13)$$

olarak ifade edilebilir. $\ddot{u}_{ng}$ sıvı tabanı dış normal doğrultusundaki yer ivmesini göstermektedir.

Rezervuar tabanlarında alüvyon ve sediment malzemelerinden oluşan yaklaşık olarak sabit kalınlıkta bir tabaka mevcuttur. Barajların dinamik analiz çözümlerinden daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için rezervuar tabanındaki alüvyon ve sediment malzemesinin dalga sönümleme etkisinin analizlerde göz önünde bulundurulması gerekir. Rezervuarın altındaki temel ortamının sadece esnekliği dikkate alınarak ve bu ortamda rezervuar tabanına normal doğrultuda bir boyutlu dalga yayılımının meydana geldiği kabul edilirse, sıvı tabanındaki sınır şartı

$$P_{,n} = -\rho_f \ddot{u}_{ng} - q \dot{P} \quad (3.14)$$

olarak yazılabilir [4,53]. q sıvı tabanı sönüm katsayısını belirtmektedir. Bu katsayı

$$q = \frac{(1-\alpha)}{C(1+\alpha)} \quad (3.15)$$

eşitliğiyle verilebilir [2]. α katsayısı rezervuar tabanından yansıyan dalganın gelen dalgaya oranını göstermektedir. (3.14) bağıntısı rezervuar-esnek temel etkileşimini, rezervuar tabanı boyunca geçerli olan bir sönüm sınır şartı vasıtasıyla yaklaşık olarak temsil etmektedir.

4. Sıvının (rezervuarın) arka yüzeyinde sınır şartı: Baraj-rezervuar sistemlerinde sıvı ortamının mansap-memba doğrultusunda teorik olarak sonsuza uzandığı kabul edilmektedir. Sıvı ortamında mansap-memba doğrultusunda yayılan dalgaların genlikleri gittikçe küçülmemekte ve sonsuzda sıfır olmaktadır. Bu durumda sonsuzda hidrodinamik basınç sıfır olduğundan sıvı arka yüzeyi için

$$P = 0 \quad (3.16)$$

sınır şartı yazılabilir. Sonlu eleman uygulamalarında sıvı ortamı uzunluğu sonlu alınabilir. Dış tahrik frekansının rezervuar temel frekansından küçük olduğu durumlar için rezervuar uzunluğu yüksekliğinin iki veya daha fazla katı alınarak, sonsuz rezervuar bir sonlu rezervuar modeli ile temsil edilebilir [15]. Eğer dış tahrik frekansı rezervuar temel frekansından büyükse, sonlu uzunluğa sahip bir rezervuar modeli giden deprem dalgalarındaki enerji kaybını genellikle doğru bir şekilde temsil edememektedir. Rezervuar sonlu eleman ağının kesildiği arka yüzeye uygun bir dalga yayılma sınır şartı uygulanarak, bu enerji kayıpları modellenenabilir [15,58]. Zienkiewicz ve Newton [58] baraj memba yüzeyinden yeteri bir mesafedeki sıvı dalgalarının düzlem dalga olarak göz önüne alınabileceğini kabul ederek, bir dalga yayılma sınır şartı tanımlamışlardır. Bir düzlem dalga

$$P = F(x - Ct) \quad (3.17)$$

formundaki denklemle temsil edilebilir. Burada t zamanı göstermektedir. F fonksiyonu x , C ve t 'ye bağlıdır. (3.17) denklemi bazı matematiksel işlemlere tabi tutularak, Sommerfeld yayılma şartı olarak bilinen ve sisteme sönüm sağlayarak giden dalgalarındaki enerji kaybını temsil eden

$$P_{,x} = P_{,n} = -\frac{\dot{P}}{C} \quad (3.18)$$

eşitliğine dönüştürülebilir [15,58,59]. n rezervuar arka yüzeyi dış normalini belirtmektedir.

Sıvı ortamının başlangıçta hareketsiz olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda başlangıç şartları

$$P(x, y, 0) = 0 \quad (3.19)$$

$$\dot{P}(x, y, 0) = 0 \quad (3.20)$$

olur.

3.3. Sıvı Ortamı Hareketinin Sonlu Eleman Formülasyonu

Sıvı ortamı hareketinin sonlu eleman denklemleri varyasyonel yaklaşımdan elde edilecektir. Sıvı hareketini temsil eden (3.7) denkleminin, (3.8), (3.12), (3.14) ve (3.18) eşitlikleri ile verilen sınır şartları altında çözümü için bir fonksiyonelin tanımlanması gerekir. Bu problemle ilgili Π fonksiyoneli,

$$\begin{aligned} \Pi = & \int_A \left(\frac{P_{,x}^2 + P_{,y}^2}{2} + \frac{1}{C^2} P \ddot{P} \right) dA + \int_{S_s} \rho_f \ddot{u}_n P dS \\ & + \int_{S_f} \frac{P \ddot{P}}{g} dS + \int_{S_t} \frac{P \dot{P}}{C} dS + \int_{S_b} (\rho_f \ddot{u}_{ng} + q \dot{P}) P dS \end{aligned} \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir [2,56,58]. Bu eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral sıvı ortamı üzerinde, ikinci integral sıvı-yapı ara yüzeyi üzerinde, üçüncü integral sıvı serbest yüzeyi üzerinde, dördüncü integral sıvı sonlu eleman ağının kesildiği arka yüzey üzerinde ve beşinci integral ise sıvı tabanı üzerinde geçerlidir. Denklem (3.21) ile verilen fonksiyonelin stasyonier olma şartı, (3.7), (3.8), (3.12), (3.14) ve (3.18) bağıntılarını verecektir. P , $\dot{P}$, $\ddot{P}$, $\ddot{u}_n$ ve $\ddot{u}_{ng}$ büyüklükleri sonlu eleman yaklaşımı kullanılarak,

$$P = \{N\} \{P_e\} \quad (3.22)$$

$$\dot{P} = \{N\} \{\dot{P}_e\} \quad (3.23)$$

$$\ddot{P} = \{N\} \{\ddot{P}_e\} \quad (3.24)$$

$$\ddot{u}_n = \{n\}^T \{N'\} \{\ddot{U}_{fs}^e\} \quad (3.25)$$

$$\ddot{u}_{ng} = \{n\}^T \{N'\} \{\ddot{U}_{fbg}^e\} \quad (3.26)$$

olarak eleman bazında tanımlanabilir. Burada $\{N\}$ ve $\{N'\}$ sırasıyla, basınç ve yer değiştirme büyüklükleri için şekil (interpolasyon) fonksiyonlarını; $\{P_e\}$ eleman basınç vektörünü; $\{\ddot{U}_{fs}^e\}$ sıvı-yapı ara yüzeyinde eleman bazında yapı ivme vektörünü; $\{\ddot{U}_{fbg}^e\}$ ise sıvı tabanında eleman bazında yer ivmesi vektörünü; $\{n\}$ sıvı dış yüzeyi normalini doğrultusundaki birim vektörü belirtmektedir. Büyüklüklerin üzerindeki T üst indisi ilgili büyüklüğün transpozisini göstermektedir. (3.22)-(3.26) eşitlikleri kullanılarak (3.21) bağıntısı ile,

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \{P\}^T [K_f] \{P\} + \{P\}^T [M_f] \{\ddot{P}\} \\ & + \{P\}^T [C_f] \{\dot{P}\} + \rho \{P\}^T [R_i] \{\ddot{U}_{fs}\} + \rho \{P\}^T [R_b] \{\ddot{U}_{fbg}\} \end{aligned} \quad (3.27)$$

olarak yazılabilir. Denklem (3.27) ile verilen fonksiyonelin stasyoner olma şartı ($\delta \Pi = 0$) kullanılırsa sıvı sisteminin hareketini temsil eden,

$$[M_f] \{\ddot{P}\} + [C_f] \{\dot{P}\} + [K_f] \{P\} = -\rho \left([R_i] \{\ddot{U}_{fs}\} + [R_b] \{\ddot{U}_{fbg}\} \right) \quad (3.28)$$

eşitliği bulunur. Burada $\{P\}$ hidrodinamik basınç vektörünü ve $\{\dot{P}\}$ ile $\{\ddot{P}\}$ ise sırasıyla bu vektörün zamana göre bir ve iki kez kısmi türevlerini belirtmektedir. Burada $[K_f]$ matrisi sıvı ortamının rijitlik matrisini $[C_f]$ ise Sommerfeld dalga yayılma sınır şartından ve rezervuar tabanındaki alüvyon ve sediment malzemesinin dalga sönümleme etkisinden dolayı sıvı ortamda oluşan sönümü içeren matrisi göstermektedir. Denklem (3.15)' ten görüleceği gibi q da α dalga yansıtma katsayısına bağlı olduğundan, alüvyon ve sediment

malzemesinin dalga sönümleme etkisi α ile ilişkilidir. $[M_f]$ ise sıvı ortam kütlesi ve sıvı serbest yüzeyinin dalga etkisini içeren kütle matrisini ifade etmektedir. $[R_i]$ sıvı-yapı ara yüzeyi ile ilgili bir matris olup; yapı ortamında oluşan ivmelerden sıvı yük vektörünü ve sıvı ortamında oluşan basınçlardan yapı düğüm noktası ilave kuvvetlerini belirlemede kullanılır. $[R_b]$ sıvı tabanında oluşan yer ivmelerinden dolayı sıvı yük vektörünü belirlemede kullanılan bir matristir. $\{\ddot{U}_{fs}\}$ vektörü sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı düğüm noktası toplam ivmelerini; $\{\ddot{U}_{fbg}\}$ vektörü sıvı tabanındaki düğüm noktası yer ivmelerini temsil etmektedir.

3.4. Sıvı-Yapı Sisteminin Sonlu Eleman Hareket Denklemleri

Sıvı- yapı etkileşiminin söz konusu olduğu durumlarda yapı ortamının dinamik hareketini temsil eden sonlu eleman denklemleri,

$$[M_s]\{\ddot{U}_s\} + [C_s]\{\dot{U}_s\} + \{F_s^{int}\} = \{F_s\} + [R_i]^T \{P\} \quad (3.29)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada, $[M_s]$ ve $[C_s]$ sırasıyla katı ortamına ait kütle ve sönüm matrislerini; $\{\ddot{U}_s\}$, $\{\dot{U}_s\}$, $\{F_s^{int}\}$ ve $\{F_s\}$ büyüklükleri de aynı ortama ait bağıl ivme, bağıl hız, içsel kuvvet ve dış kuvvet vektörlerini göstermektedir. Temel ortamı dalga yayılma şartından dolayı katı ortamı sönüm matrisi ve dış yük vektörü değişime uğramaktadır.

Geliştirilmiş *HHT- α* integrasyon yöntemi kullanılarak, sıvı-katı sisteminin lineer olmayan denklem takımları adım adım integrasyon işlemiyle çözülmektedir [60]. (3.16) ve (3.17) denklemlerinin *HHT- α* algoritmasına uygun formları

$$[M_s]\{\ddot{U}_s\}_{i+1} + (1+\alpha)[C_s]_{i+1}\{\dot{U}_s\}_{i+1} - \alpha[C_s]_i\{\dot{U}_s\}_i + (1+\alpha)\{F_s^{int}\}_{i+1} - \alpha\{F_s^{int}\}_{i+1} - (1+\alpha)[R_i]^T \{P\}_{i+1} + \alpha[R_i]^T \{P\}_i = (1+\alpha)\{F_s\}_{i+1} - \alpha\{F_s\}_{i+1} \quad (3.30)$$

$$(1+\alpha)\rho[R_i]\{\ddot{U}_{fs}\}_{i+1} - \alpha\rho[R_i]\{\ddot{U}_{fs}\}_i + [M_f^P]\{\ddot{P}\}_{i+1} + (1+\alpha)[C_f^P]\{\dot{P}\}_{i+1} - \alpha[C_f^P]\{\dot{P}\}_i + (1+\alpha)[K_f^P]\{P\}_{i+1} - \alpha[K_f^P]\{P\}_i = (1+\alpha)[R_b]\{\ddot{U}_{fbg}\}_{i+1} - \alpha[R_b]\{\ddot{U}_{fbg}\}_i \quad (3.31)$$

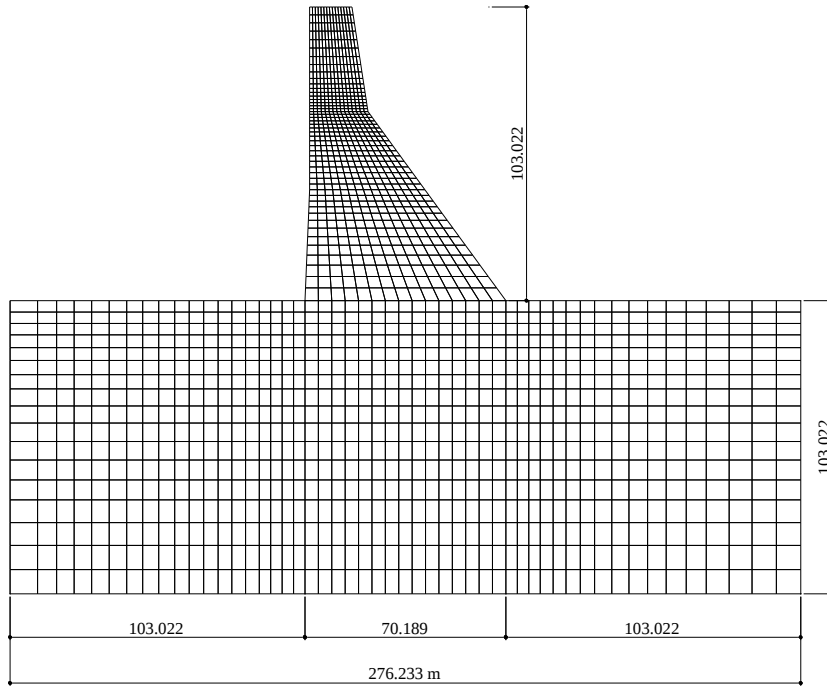
olarak elde edilebilir. Burada i zaman adımını göstermekte olup α nümerik dağılım kontrol parametresini ifade etmektedir. Şartsız stabiliteyi ve ikinci mertebeden doğruluğu sağlamak için α parametresi ile Newmark katsayıları olan β ve γ parametreleri,

$$\alpha \in \left[-\frac{1}{3}, 0 \right], \quad \beta = \frac{1}{4}(1-\alpha)^2, \quad \gamma = \frac{1}{2} - \alpha$$

şeklinde seçilmelidir [47,50,51,60]. Bu çalışmada α parametresi -0.10 olarak alınmıştır.

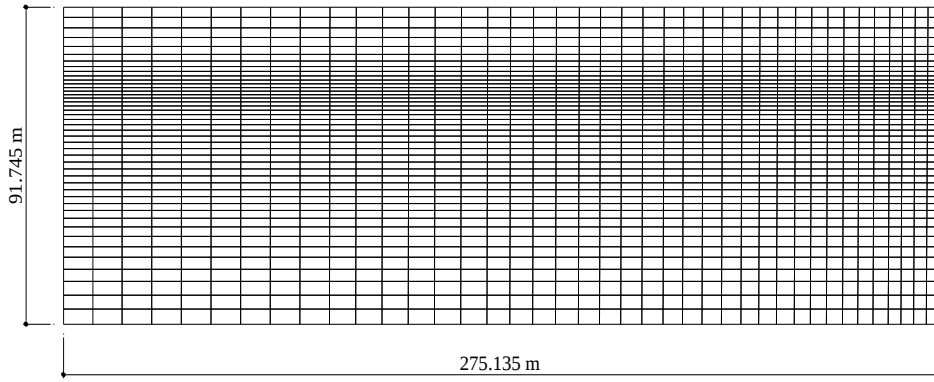
4. SAYISAL UYGULAMA

Bu tezde, baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimlerinin beton ağırlık barajlarda oluşan dinamik hasar tepkisine etkisi incelenmiştir. Sayısal uygulama için Hindistan'daki Koyna beton ağırlık barajı seçilmiş ve baraj-rezervuar etkileşimi için Euler yaklaşımı kullanılmıştır. Sıvı ve temel ortamı lineer elastik olarak modellenmiştir. Temel ve rezervuar ortamları sonlu boyutta seçilmiş olup, temel yüksekliği baraj yüksekliğine eşit alınmış, temelin uzunluğu memba ve mansap doğrultusunda barajın memba topuğundan ve mansap topuğundan itibaren baraj yüksekliği kadar alınmıştır (Şekil 4.1). Rezervuar yüksekliği 91.745 m seçilmiş olup uzunluğu yüksekliğinin üç katı kadar alınmıştır (Şekil 4.2). Rezervuar, sonlu elemanlar modelinde memba-mansap doğrultusunda ağırlık kesildiği yüzeylere Sommerfeld dalga sınır şartı, temelin sonlu eleman ağlarının kesildiği yüzeylere Unifield dalga yayılma sınır şartı uygulanmıştır. Rezervuar serbest yüzünde ise yüzey dalgalarının etkisi dikkate alınmıştır. Dinamik etki olarak 11 Aralık 1967 Koyna depreminin yatay ve düşey ivme birleşenleri seçilmiş (Şekil 4.3) ve baraj-rezervuar-temel sistemine sırasıyla, akış ve düşey doğrultularda etki ettirilmiştir. Çözümler, beton ağırlık barajlar için geliştirilmiş bir bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir [60].

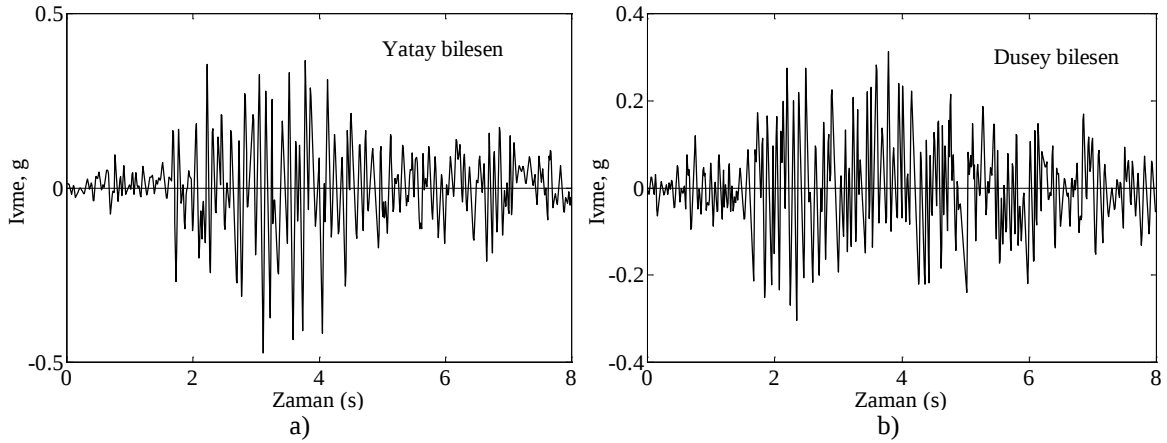


Şekil 4.1 Baraj-Temel sonlu eleman modeli.

Hasarsız durumdaki baraj betonunun malzeme özellikleri CEB-FIB [61] standartlarına göre belirlenmiş olup betonun karakteristik basınç dayanımı 25 MPa seçilerek; elastisite modülü 29180 MPa, çekme dayanımı 2.576 MPa ve kırılma enerjisi 328 N/m olarak hesaplanmıştır. Çözümlerde, dinamik şekil değiştirme etkisinden dolayı betonun çekme dayanımı ve kırılma enerjisi %20 arttırılarak sırasıyla 3.095 MPa ve 394 N/m değerleri kullanılmıştır [6,47,50,51]. Aynı zamanda, Poisson oranı 0.15 ve kütle yoğunluğu ise 2400 kg/m³ olarak seçilmiştir [61].



Şekil 4.2 Rezervuar sonlu eleman modeli.



Şekil 4.3 Koyna depremi ivme bileşenleri.

Baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimlerinin beton ağırlık barajlarda oluşan dinamik hasar tepkisine etkisini incelemek amacıyla temelin elastik malzeme özelliğinin, sıvı sıkışabilirliğinin ve taban absorpsiyon katsayısının etkisi ayrı ayrı başlıklar halinde incelenmiştir.

4.1. Temelin Elastise Modülünün Barajın Dinamik Hasar Davranışı Üzerindeki Etkisi

Temelin kütlesi, barajın kütlesi ile karşılaştırıldığında çok büyük değerlere sahip olduğundan nümerik çözümlerde daha büyük tepki kuvvetlerinin baraj gövdesi üzerinde meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu sebepten, baraj-temel dinamik etkileşiminin dikkate alındığı önceki çalışmalarda temelin kütsüz alınması gerektiği belirtilmiştir [38]. Bu bölümde, temelin elastisite modülünün değışiminin barajın hasar davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kütleli/kütsüz temel durumları için sonuçlar elde edilmiş olup temelin elastisite modülünün barajın elastisite modülüne oranı (E_t/E_b) 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları dikkate alınmıştır.

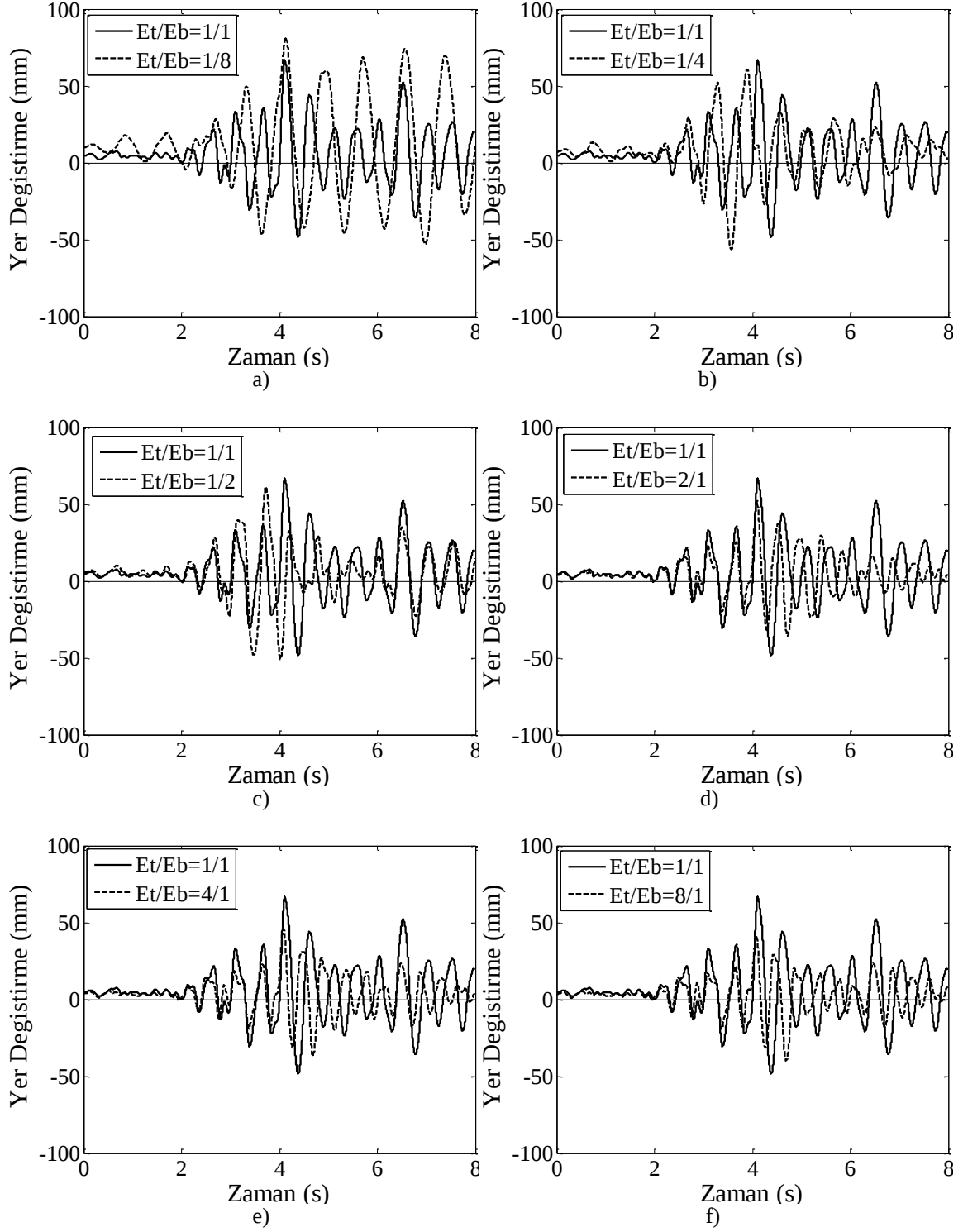
4.1.1. Kütsüz Temel Durumu

Bu bölümde baraj-temel etkileşimlerinin beton ağırlık barajlarda oluşan dinamik hasar tepkisi için temelin kütsüz olduğu durumda, E_t ve E_b sırasıyla temel ortamı ve baraj betonu elastise modüllerini belirtmek üzere; E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olduğu yedi farklı durumu için temel kütsüz kabul edilerek çözümler yapılmıştır. Temelin diğer malzeme parametreleri Bölüm 4' de verilen özelliklerde kabul edilmiş olup sadece kütle yoğunluğu için 1×10^{-6} kg/m³ gibi küçük bir değ er alınmıştır. Rezervuar ortamındaki sıkışabilir suyun basınç dalgası hızı 1438.75 m/s olarak alınmıştır. Sistemde rijitlik orantılı sönüm dikkate alınmış olup sadece baraj-temel sisteminin katkı sağladığı kabulü yapılmıştır. Hasar görmemiş baraj-temel sisteminin temel periyodunda 0.05 sönüm oranını sağlayacak şekilde sönüm katsayısı belirlenmiştir. Bu amaçla baraj-temel sisteminin önce modal analizi ANSYS [62] sonlu elemanlar paket programı yardımıyla yapılmış ve E_t/E_b oranına bağı lı olarak sistemin modları elde edilmiştir. Kütsüz temel kabulü için E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için baraj-temel sisteminin temel periyotları sırasıyla 0.64551 0.506173 0.421413 0.373661 0.348151 0.334830 ve 0.327919 s. olarak hesaplanmıştır. Sönüm kuvvetleri sayısal integrasyon iş leminde baraj-temel sisteminin teğ et rijitlik matrisiyle orantılı olarak hesaba katılmıştır. İ ntegrasyon zaman adımı, beton malzeme modeli yumuş ama bölgesinin lineer olmayan davranış a etkisini yansı tacak şekilde 0.001 s. gibi küçük bir değ erde seç ilmiştir. Sonuç ları yorumlamada yer değ iş tirme ve hasar büyüklükleri kullanılmıştır. Çözümlerde, baraj-temel

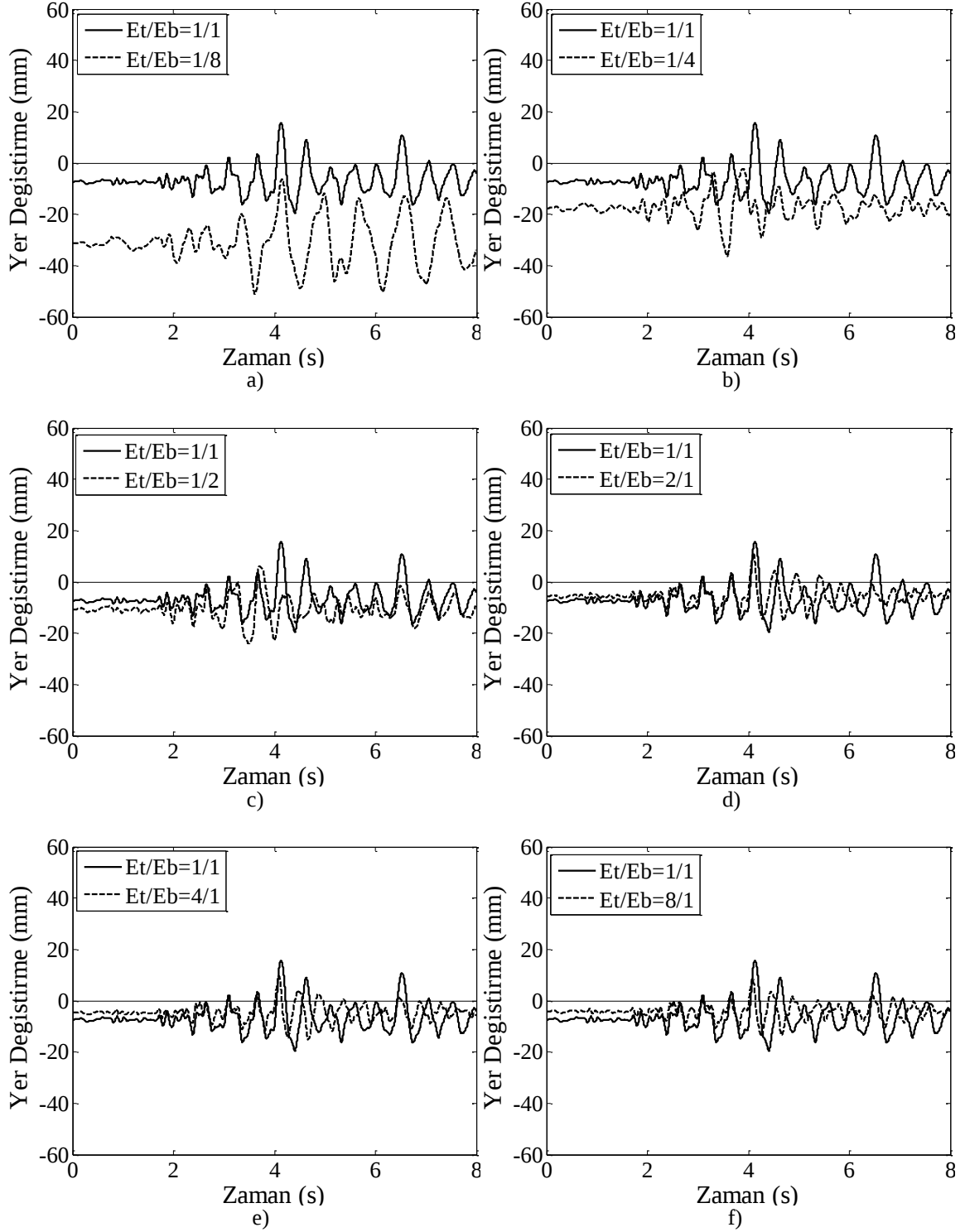
ve baraj-rezervuar sisteminin ağırlık kuvvetleri etkisindeki statik çözümleri başlangıç şartları olarak hesaba dahil edilmiştir.

Baraj kreti akış yönünde ve düşey yer değiştirmenin zamanla değişimlerini veren çözümler $E_t/E_b=1/1$ oranı esas alarak bu oranın 1/8, 1/4, 1/2, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1.1-4.1.2). $E_t/E_b=1/8$ ile $E_t/E_b=1/1$ olduğu çözümlerin yatay (x) yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri karşılaştırıldığında genelde büyük genlik değerleri elde edilmiştir. Bu genlik farkları özellikle 4.0 s.' den sonra belirgin olarak gözükmemektedir. Tüm zaman anları için her iki çözüm arasında faz farkları oluşmaktadır. $E_t/E_b=1/4$ ve $E_t/E_b=1/1$ çözümleri karşılaştırıldığında başlangıçta hem genlik hem de frekans açısından biraz benzer olan çözümler barajda hasarların oluşmasıyla bir birlerinden tamamıyla farklılıklar göstermiştir. Özellikle barajda oluşan hasarların artışına bağlı olarak 2.5 s. anından sonra bu farklar belirginleşmiştir. $E_t/E_b=1/2$, 2/1, 4/1 ve 8/1 çözümleri ile $E_t/E_b=1/1$ çözümü karşılaştırıldığında başlangıçta hem genlik hem de frekans açısından benzer olan çözümler barajda hasarların oluşmasıyla birbirlerine göre farklılıklar göstermiştir. Bu farklar 2.5 s. anından sonra barajda oluşan hasarların artışına bağlı olarak hem frekans hem de genlik açısından farklar ortaya çıkmıştır. $E_t/E_b=1/8$ çözümü dışındaki tüm çözümlerde özellikle 4.0 s. anından sonra barajda oluşan hasarların artışına bağlı olarak sönüm etkisi büyümüştür. Böylece genlik değerlerinde küçülme görülmüştür. $E_t/E_b=1/1$ çözümü ile $E_t/E_b=1/8$, 1/4, 1/2, 2/1, 4/1 ve 8/1 çözümlerinin düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafiklerinin karşılaştırması Şekil 4.1.2' de görülmektedir. Bu grafiklerin başlangıç değerleri dikkate alındığında, E_t/E_b oranının artışına bağlı olarak statik düşey yer değiştirme değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durum temelin elastik malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. $E_t/E_b=1/2$, 1/1 ve 2/1 çözümleri frekans ve genlik açısından biraz daha yakın seyrederken bu çözümler dışındaki diğer grafiklerde belirgin farklar görülmektedir.

Barajda oluşan kümülatif hasarlar bölgeleri, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için Şekil 4.1.3-4.1.4' de verilmiştir. Bir sonlu eleman integrasyon noktasında hasarın şiddeti siyah rengin değişik tonları kullanılarak temsil edilmiştir. Hasarın şiddeti koyu tondan açık tona doğru azalım göstermektedir ve hasarın olduğu eleman integrasyon noktası bölgesel alanın tamamı ilgili tonla taranmaktadır. Çatlağın kapalı veya hasarın ortaya çıkmadığı eleman integrasyon noktalarında bir tarama yapılmamaktadır.



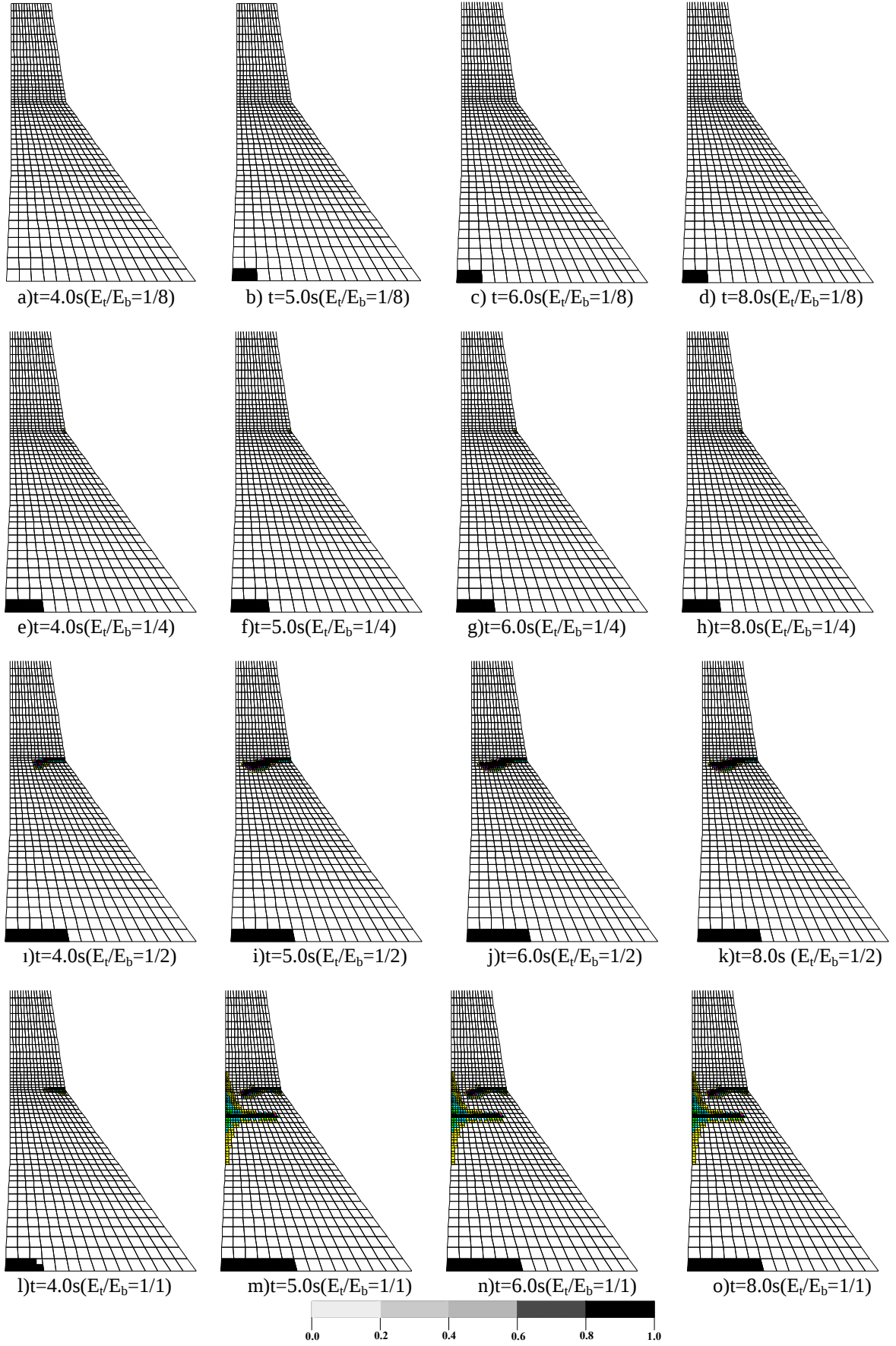
Şekil 4.1.1 Kütleli temelde E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi



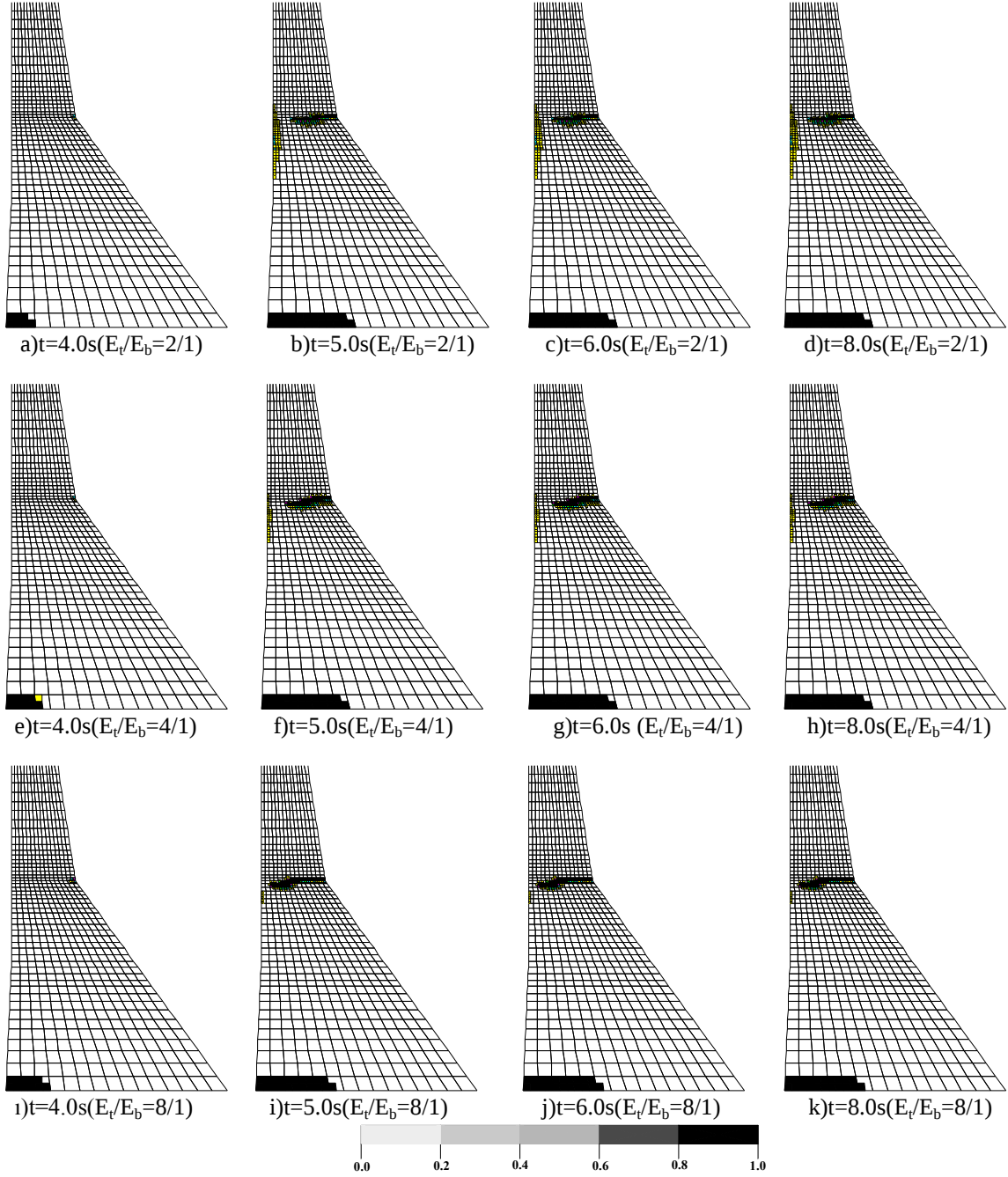
Şekil 4.1.2 Kütlesiz temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

$E_t/E_b = 1/8$ durumunda, ilk hasar baraj memba topuğunda 4.025 s. anında meydana gelmiş olup ilerleyen zaman anlarında memba yüzünden mansaba doğru yatay yöne bir ilerleyiş sergilemiştir. Diğer bölgelerde hasarlar meydana gelmemiştir. Bu hasar

bölgesinde yaklaşık 4.350 s. anından sonra her hangi bir değişim gözlenmemiştir. $E_t/E_b=1/4$ durumunda, ilk hasar baraj mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede 3.004 s. anında meydana gelmiştir. İlerleyen zaman anlarında bu hasar bölgesinde yayılmalar görülmezken 3.500 s. anına doğru barajın memba topuğunda ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiştir. Bu hasar bölgesi membadan mansaba doğru yatay bir ilerleyiş sergilemiş ve yaklaşık 4.000 s. anından sonra her hangi bir değişim gözlenmemiştir. $E_t/E_b=1/2$ durumunda, ilk hasar baraj memba topuğunda 2.635 s. anında meydana gelmiş olup ilerleyen zaman anlarında bu hasar bölgesinde membadan mansaba doğru yatay bir ilerleyiş görülmüştür. Aynı zamanda özellikle 3.000 s. anından sonra baraj mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mansaptan memba ya doğru yataya yakın bir bant şeklinde ilerleyiş göstermiştir. Söz konusu bu hasar bölgeleri yaklaşık 4.350 s. anından sonra önemli bir ilerleyiş göstermemiştir. $E_t/E_b=1/1$ durumunda, baraj memba topuğunda 2.748 s. anında hasar oluşmakta ve barajın titreşim hareketine bağlı olarak mansap yüzeyi boyun bölgesinde 2.900 s. anında ilave bir hasar oluşmaktadır. 4.150 s. anında ise, mansap yüzeyinde hasarın ilk ortaya çıktığı bölgeye yaklaşık karşılık gelen memba yüzeyindeki bölgede büyük bir hasar oluşmakta ve ilerleyen zaman adımlarıyla bu hasarda yayılma görünmezken mansap-boyun ve topuk bölgesindeki hasarlar yataya yakın ilerleyişine devam etmektedir. $E_t/E_b=2/1$ durumunda, ilk hasar memba yüzeyi topuk bölgesinde 2.618 s. anında hasar oluşmakta ve 2.900 s. de mansap-boyun bölgesinde mevcut hasara ilave bir hasar oluşmaktadır. İlerleyen zaman adımlarında mansap ve memba topuk bölgesinde hasarlar yataya yakın bir ilerleyiş sergilerken 4.150 s. anından itibaren mansap yüzeyinde hasarın ilk ortaya çıktığı bölgeye yaklaşık karşılık gelen memba yüzeyindeki bölgede hasar meydana gelmiştir. $E_t/E_b=4/1$ durumunda, ilk hasar mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede 3.350 s. anında hasar oluşmakta ve bir sonraki zaman adımında memba topuk yüzeyinde ilk hasarlar görülmektedir. Topuk bölgesinde meydana gelen hasar sürekli ilerlerken mansap boyun bölgesindeki hasarlar daha yavaş bir şekilde barajın içine doğru ilerlemektedir. Mansap boyun ve memba topuk bölgesinde hasarlar yataya yakın bir ilerleyiş sergilerken 4.150 s. anından itibaren, mansap yüzeyinde hasarın ilk ortaya çıktığı bölgeye yaklaşık karşılık gelen memba yüzeyindeki bölgede hasar meydana gelmiştir. $E_t/E_b=8/1$ durumunda, ilk hasar mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede 3.345 s. anında hasar oluşmakta ve bir sonraki zaman adımında memba topuk yüzeyinde ilk hasarlar görülmektedir.



Şekil 4.1.3 Kütlesiz temellerde, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2 ve 1/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.

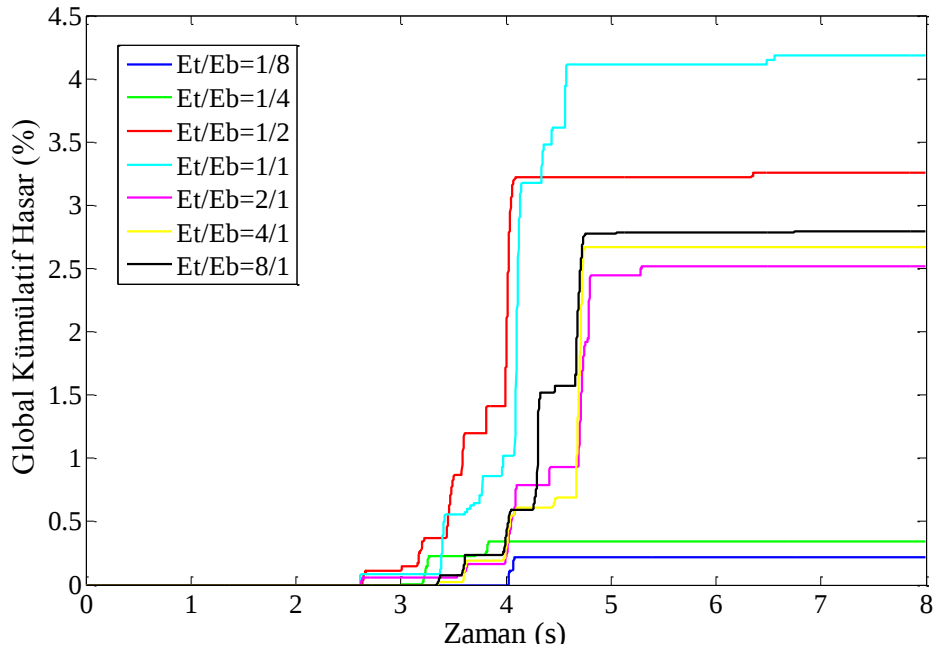


Şekil 4.1.4 Kütlesiz temellerde, E_t/E_b oranının 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.

Global hasarın belirlenmesinde farklı yaklaşımlar mevcuttur [6]. Bu çalışmada, barajın global hasar büyüklüğünü belirlemek için,

$$D_g = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{\int_v (d_i)^2 dV}}{\sum_{i=1}^{nel} \sqrt{\int_v dV}} \quad (4.1)$$

eşitliği kullanılmıştır [6,47,50,51,60]. Burada D_g global kümülatif hasar indeksi (GKHİ) olup m barajda hasara uğramış toplam eleman sayısını ve nel ise barajın toplam eleman sayısını belirtmektedir. E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için GKH indeksinin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.1.5’ de görülmektedir. E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için GKHİ’ nin en büyük değerleri sırasıyla, % 0.22, 0.34, 3.26, 4.18, 2.52, 2.79 ve 2.79 olarak elde edilmiştir. E_t/E_b oranının 1/8 ve 1/4 olması durumları için GKHİ’ nin değerleri % 0.5’ in altında kalırken diğer çözümlerden elde edilen değerler ise % 2.5’ in üzerinde ortaya çıkmıştır. Bu durum, E_t/E_b oranının 1/8 ve 1/4 olması halleri için temelin baraja göre daha esnek davranışından kaynaklanmaktadır. Tüm analizler dikkate alındığında GKHİ’ nin değerleri yaklaşık 3-5 s. aralığında ani bir artış içerisinde olmuştur. Bu zaman aralığı, tüm çözümlerde yatay doğrultuda elde edilen yer değiştirmelerin zamanla değişim grafiklerinde en büyük değerlerin elde edildiği zaman dilimidir. Bununla birlikte, GKHİ’ nin değeri E_t/E_b oranının 1/1 olduğu çözümlerde en büyük olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1.5 Kütlesiz temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi

4.1.2. Kütleli Temel Durumu

Yapılan çalışmanın bu bölümünde temel kütleli alınmış olup elastisite modülündeki değişimin çözümlere etkisi araştırılmıştır. E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1

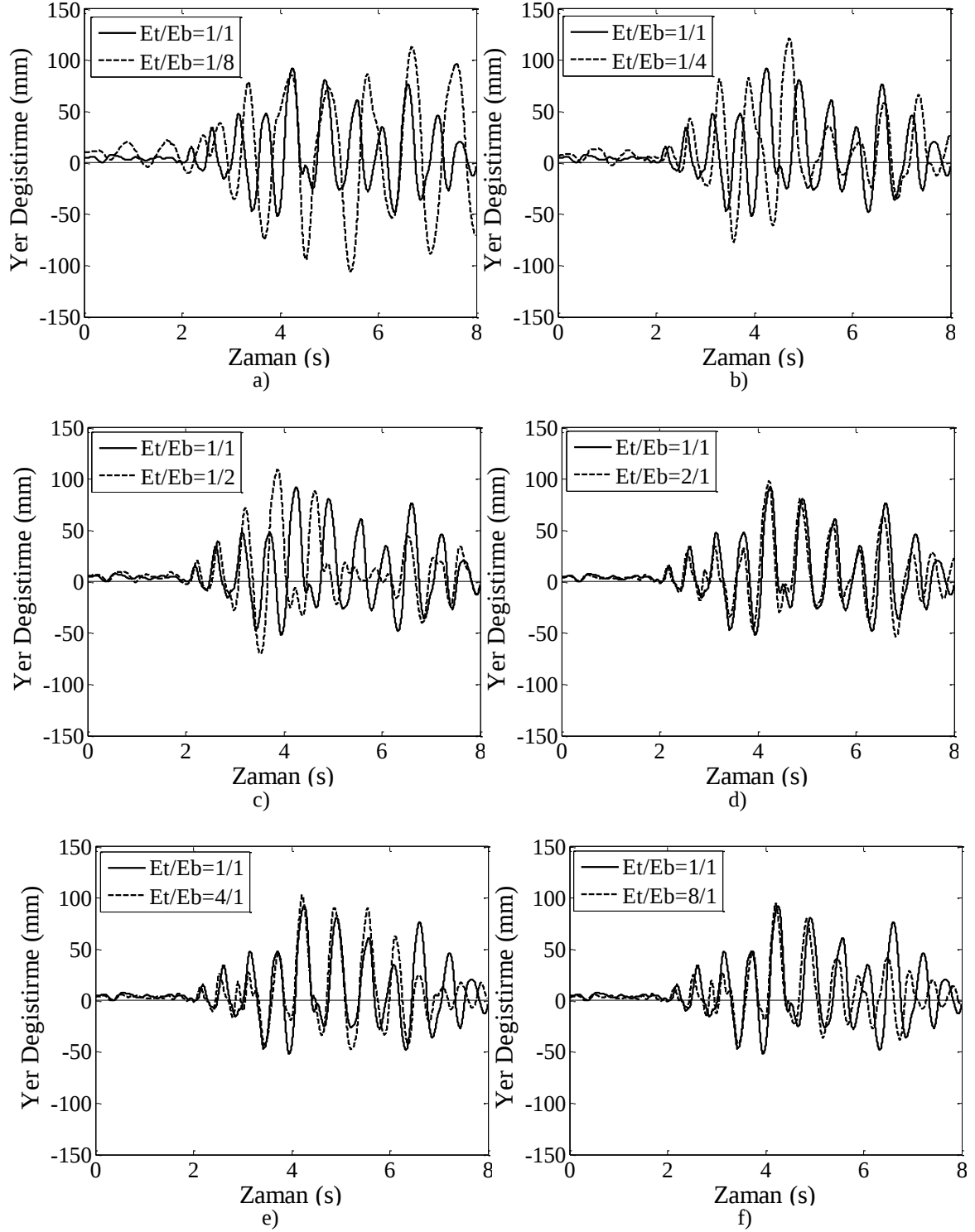
olduğu yedi farklı durumu için temel kütleli kabul edilerek çözümler elde edilmiştir. Temelin diğer malzeme parametreleri Bölüm 4’ de verilen özelliklerde kabul edilmiş olup kütle yoğunluğu için, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olduğu durumlarda sırasıyla 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8 ve 3.0 kg/m³ olarak seçilmiştir. Rezervuar ortamındaki sıkışabilir suyun basınç dalgası hızı kütsüz temellerde olduğu gibi 1438.75 m/s olarak alınmıştır. Sistemde rijitlik orantılı olarak göz önüne alınan sönüme sadece baraj-temel ortamlarının katkı sağladığı kabulü yapılmıştır. Hasar görmemiş baraj-temel sisteminin temel periyodunda 0.05’ lik oranı sönüm sağlayacak şekilde sönüm katsayısı belirlenmiştir. Bu amaçla baraj-temel sisteminin önce modal analizi ANSYS [62] programı yardımıyla yapılmış ve E_t/E_b oranına bağlı olarak sistemin modları belirlenmiştir. Kütleli temel kabulü için E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için baraj-temel sisteminin temel periyotları sırasıyla 0,666080, 0,517684, 0,426565, 0,375508, 0,349030, 0,334994 ve 0,327975 s. olarak hesaplanmıştır. Sönüm kuvvetleri sayısal integrasyon işleminde baraj temel sisteminin teğet rijitlik matrisiyle orantılı olarak hesaba katılmıştır.

$E_t/E_b=1/1$ oranı esas alınarak bu oranın 1/8, 1/4, 1/2, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için baraj kreti akış (x) ve düşey (y) yönlerindeki yer değiştirmelerinin zamanla değişimlerini veren çözümler karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1.6-4.1.7). $E_t/E_b=1/8$ olduğu çözümlerin yatay (x) yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafiklerine bakıldığında yaklaşık 2.500 s. anından sonra büyük genlik ve faz farkları görülmüştür. $E_t/E_b=1/4$ ve 1/8 çözümleri $E_t/E_b=1/1$ çözümleri ile karşılaştırıldığında hem frekans hem de genlik açısından farklılıklar göstermektedir. $E_t/E_b=1/2$ olduğu çözümlerde başlangıçta önemli bir faz farkı oluşmazken 2.5 s. anından sonra hem genliklerde atışlar görülürken faz farkları da ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra yaklaşık 5.000 s. anından sonra sönüm kuvvetlerinin etkisi ile genlik değerlerinde azalmalar görülmüştür. $E_t/E_b=1/1$ için bu sönümün etkisi tam olarak görülmemektedir. $E_t/E_b=2/1$, 4/1 ve 8/1 çözümleri ile $E_t/E_b=1/1$ çözümü karşılaştırıldığı durumlarda başlangıçta hem genlik hem de frekans açısından benzer olan çözümler barajda hasarların oluşmasıyla hem genlik ve frekanslarda bazı farklılıklar görülmüştür.

$E_t/E_b=1/1$ çözümü ile $E_t/E_b=1/8$, 1/4, 1/2, 2/1, 4/1 ve 8/1 çözümlerinin düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafiklerinin karşılaştırması Şekil 4.1.7’ de görülmektedir. Bu grafiklerin başlangıç değerleri dikkate alındığında, E_t/E_b oranının artışına bağlı olarak statik düşey yer değiştirme değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durum temelin elastik malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. $E_t/E_b=1/1$ ve 2/1

özmleri frekans ve genlik açısından biraz daha yakın seyrederken bu çözümler dışındaki diğerk grafiklerde belirgin farklar görülmektedir.

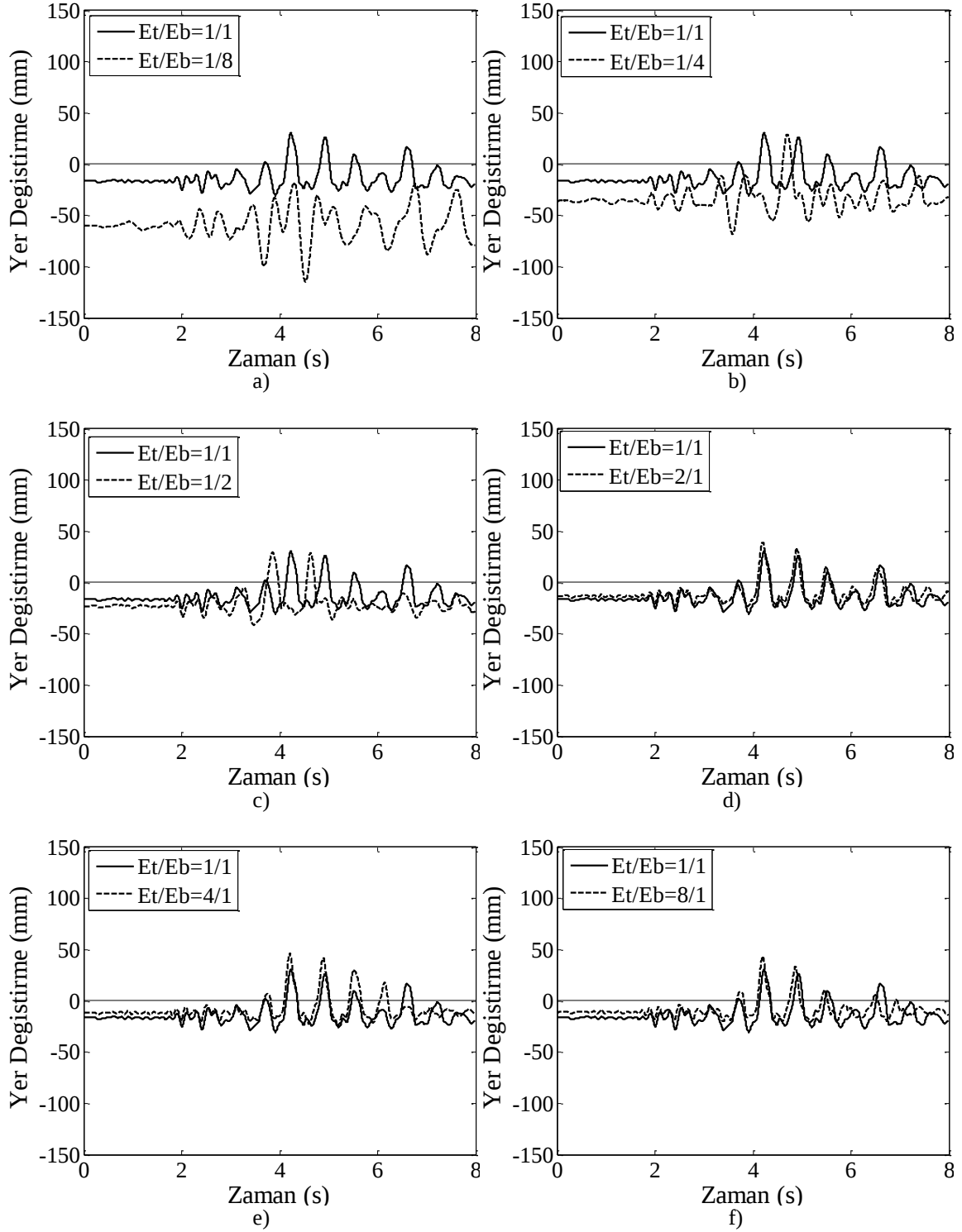
Barajda oluşan kümülatif hasarlar bölgeleri kütleli temeller için, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için şekil 4.1.8-4.1.9' da verilmiştir. $E_t/E_b=1/8$ durumunda, ilk hasar baraj memba topuğunda 3.909 s. anında meydana gelmiş olup ilerleyen zaman anlarında memba-boyun bölgesinde ilave bir hasar bölgesi grlmüştir. Yaklaşık olarak 4.450 s. anında barajın mansap yüzeyinde eğimin değiştiği bölgede ilave bir hasar bölgesi oluşmaktadır. İlerleyen zaman adımlarında bu hasar bölgesi baraj gövdesi içerisine doğru yaklaşık 45° aı ile barajın memba yüzüne kadar ilerlemektedir. $E_t/E_b=1/4$ durumunda, ilk hasar barajın memba-topuk yüzeyinde 2.666 s. anında meydana gelmiştir. İlerleyen zaman anlarında bu hasar bölgesinde barajın içine doğru yatay bir ilerleyiş görülürken yaklaşık 3.750 s. anına barajın mansap yüzeyi eğimin değiştiği yerde yeni bir hasar bölgesi oluşmaktadır. Bu hasar bölgesi ise memba yüzeyine kadar yataya yakın bir ilerleyiş sergilemektedir. $E_t/E_b=1/2$ durumunda ise ilk hasar, baraj memba topuğunda 2.567 s. anında meydana gelmiş olup ilerleyen zaman anlarında bu hasar bölgesinde membadan mansaba doğru yatay bir ilerleyiş grlmüştir. Aynı zamanda özellikle 3.500 s. anından sonra baraj mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mansaptan memba ya doğru dağınık şeklinde yatay ve 45° aı arasında bir ilerleyiş göstermiştir. Söz konusu bu hasar bölgesi yaklaşık 3.750 s. anında barajın memba yüzünde ortaya çıkan yeni bir hasar bölgesi ile ilerleyen zaman adımlarında birleşmektedir. Sonraki anlarda baraj boynundaki bu hasar bölgesi genişleyerek dağınık bir hal almaktadır. $E_t/E_b=1/1$ olduğu durumda, ilk hasar baraj memba topuğunda 2.694 s. anında meydana gelmiş olup ilerleyen zaman anlarında bu hasar bölgesinde membadan mansaba doğru yatay bir ilerleyiş sergilemiştir. Sonraki zaman adımlarında yaklaşık 3.500 s. anında baraj mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede ilave bir hasar meydana gelmiş olup mansaptan memba ya doğru yataya yakın bir şekilde ilerleyiş göstermiştir. Söz konusu bu hasar bölgesi yaklaşık 4.150 s. anında barajın memba yüzünde ortaya çıkan yeni bir hasar bölgesi ile ilerleyen zaman adımlarında birleşmektedir. Bu hasar bölgelerinde yaklaşık 4.350 s. den sonra önemli bir değişim görülmemiştir. $E_t/E_b=2/1$ durumunda, ilk hasar memba yüzeyi topuk bölgesinde yaklaşık 2.806 s. anında oluşmakta ve 2.900 s. de mansap boyun bölgesinde ilave bir hasar bölgesi görülmektedir.



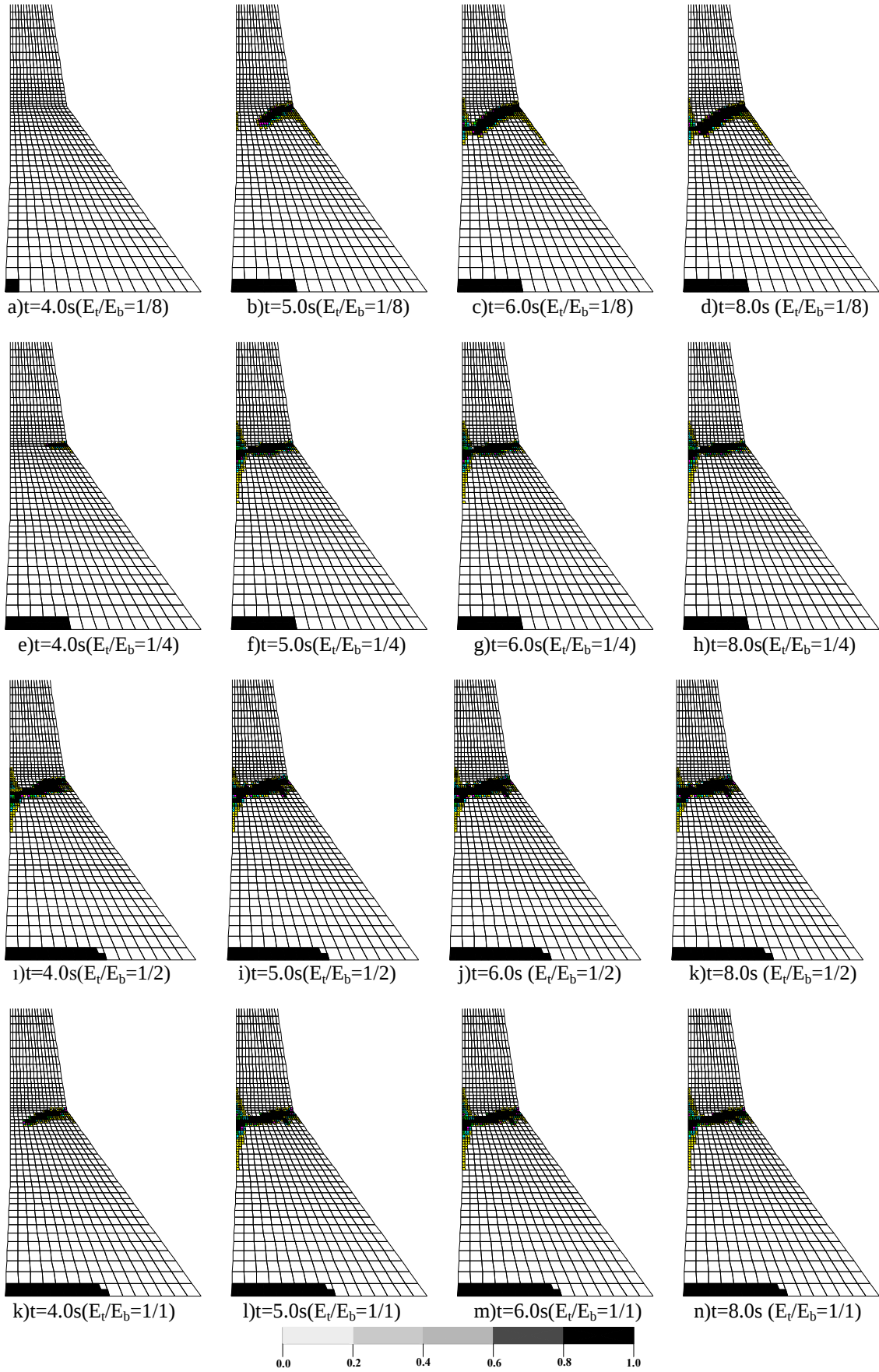
Şekil 4.1.6 Kütleli temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

İlerleyen zaman adımlarında mansap boyun bölgesindeki hasarlar memba ya doğru doğru yataya yakın ve memba topuk bölgesinde hasarlar ise mansaba doğru yatay bir ilerleyiş sergilemektedir. $E_t/E_b=4/1$ ve $8/1$ olduğu durumlarda, ilk hasar mansap yüzeyi boyun bölgesinde eğimin değiştiği bölgede sırasıyla 2.797 ve 2.795 s. anlarında

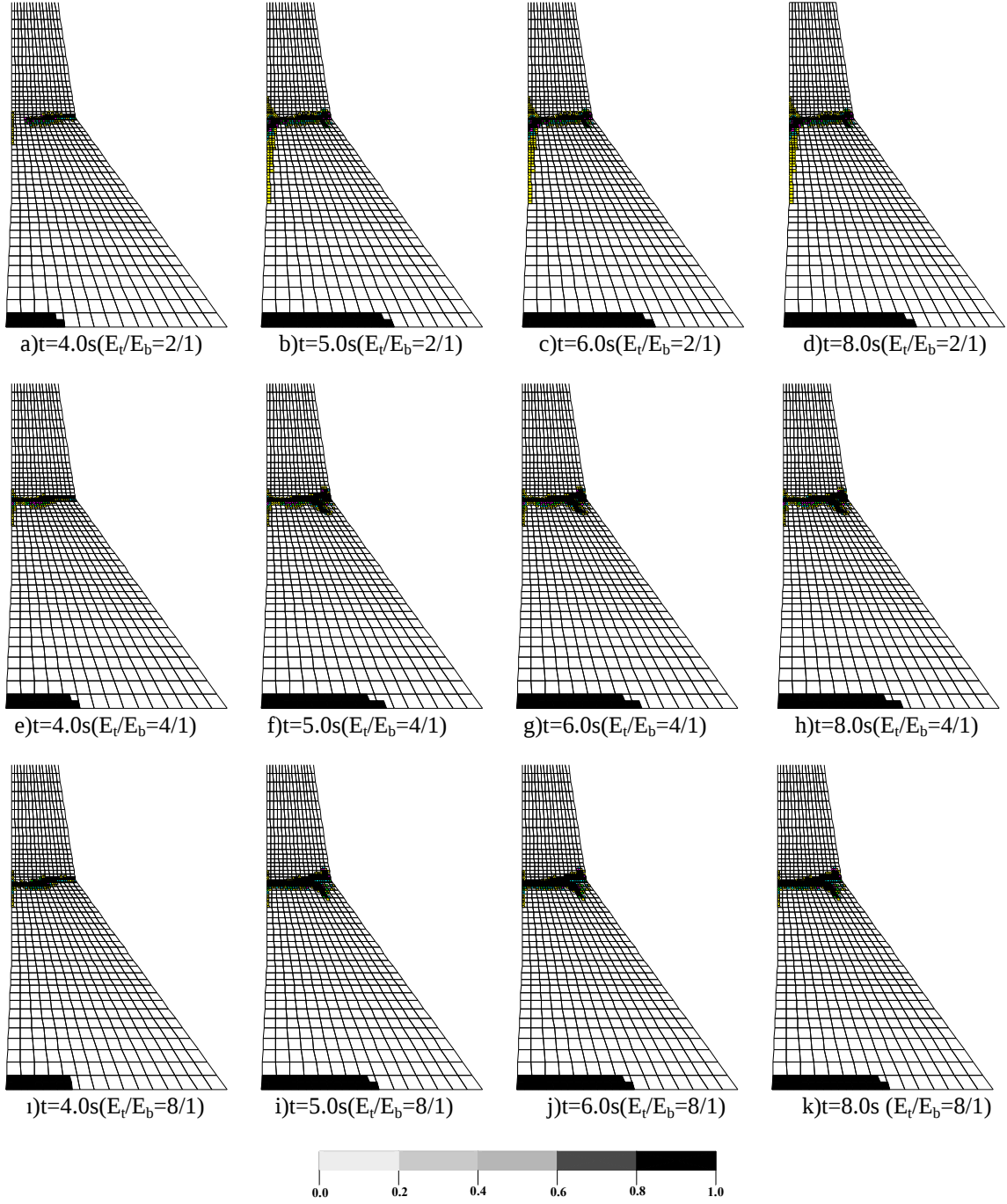
oluşmaktadır. Her iki çözüm için yaklaşık 3.150 s. anında bu hasar bölgesinin karşısındaki baraj memba yüzeyinde ilave hasar bölgeleri oluşmaktadır.



Şekil 4.1.7 Kütleli temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi



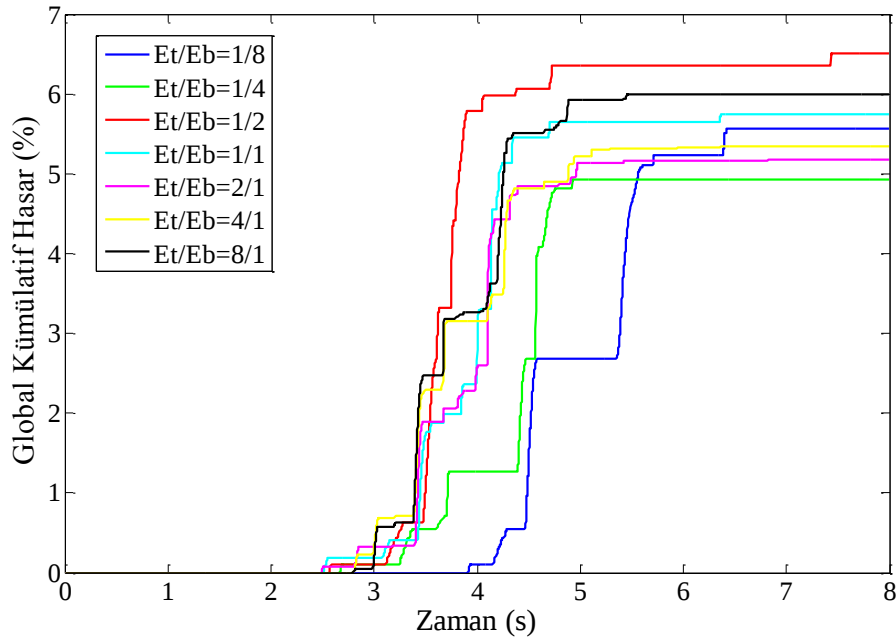
Şekil 4.1.8 Kütleli temel durumunda, E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2 ve 1/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar



Şekil 4.1.9 Kütleli temel durumunda, E_t/E_b oranının 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar

Sonraki zaman adımlarında mansap yüzeyi boyun bölgesindeki hasarlar mansaptan memba ya doğru yataya yakın bir ilerleyiş sergileyerek memba yüzündeki hasar bölgesi ile birleşmektedir. Aynı zamanda her iki çözümde yaklaşık 3.500 s. anında baraj memba topuğunda ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup membadan mansaba doğru yatay bir ilerleyiş sergilemiştir.

E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için GKHİ' nin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.1.10' da görülmektedir. E_t/E_b oranının 1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1 ve 8/1 olması durumları için GKHİ' nin maksimum değerleri sırasıyla, % 5.56, 4.92, 6.50, 5.74, 5.17, 5.99 ve 5.99 olarak elde edilmiştir. E_t/E_b oranının 1/4 olması durumları haricinde GKHİ' nin değerleri % 5' in altına kalmazken E_t/E_b oranının 1/4 olduğu durumda % 5' in altında kalmıştır. E_t/E_b oranının 8/1 ve 4/1 olduğu durumlarda hasar yüzdesi değişmezken en büyük hasar 1/2 durumunda meydana gelmektedir. E_t/E_b oranının 1/8 ve 1/4 olduğu durumda GKHİ' nin değerleri yaklaşık 4-5.5 s. de ani bir artış içerisinde olurken geriye kalan tüm analizlerde ise yaklaşık 3-4 s. aralığında ani artışlar meydana gelmektedir. Bununla birlikte, GKHİ' nin değeri E_t/E_b oranının 1/2 olduğu çözümlerde en büyük elde edilmiş olup en küçük değeri ise E_t/E_b oranının 1/4 olduğu çözümlerde elde edilmiştir (Şekil 4.1.10).



Şekil 4.1.10 Kütürlü temel durumunda E_t/E_b oranının değişimine bağı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi

4.2. Sıvı Sıkışabilirliğinin Barajın Dinamik Hasar Davranışı Üzerindeki Etkisi

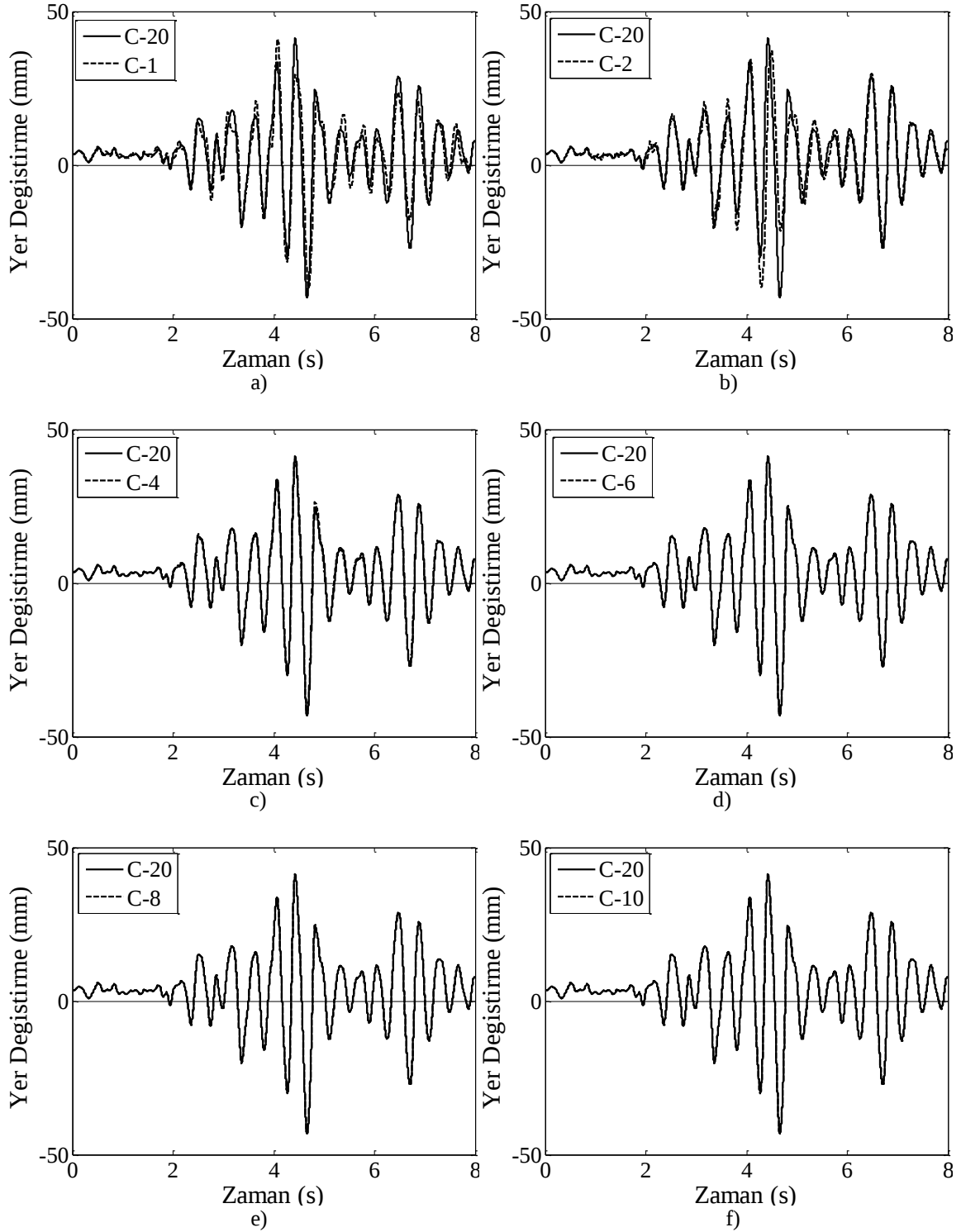
Bu bölümde, Koyna beton ağırlık barajının sismik hasar davranışı üzerinde sıvı sıkışabilirliğinin etkisi incelenmiştir. Çözümlerde basınç dalgası yayılma hızı (C) 1438.75 m/s olarak alınmış, bu değerin 1, 2, 4, 6, 8, 10 ve 20 katları alınarak çözümler elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çözümlerde bu katsayılar için C-1, C-2, C-4, C-6, C-8, C-10 ve C-20 kısaltmaları kullanılmıştır. Aynı zamanda, temel ortamı kütleli/kütlesiz durumlar için dikkate alınmış olup çözümlerde temelin elastisite modülünün barajın elastisite modülüne oranı E_t/E_b 8/1 olarak alınmıştır. Baraj ve temelin malzeme özellikleri Bölüm 4' de bahsedildiği gibi kullanılmıştır. Sistemde rezervuar tabanı rijit kabul edilmiş, Sommerfeld dalga yayılma sınır şartı rezervuar sonlu eleman modelinin kesildiği yüzeye uygulanmıştır. Sıvı yüzey dalgaları çözümlerde dikkate alınmıştır.

4.2.1. Kütlesiz Temel Durumu İçin Sıvı Sıkışabilirliğinin Etkisi

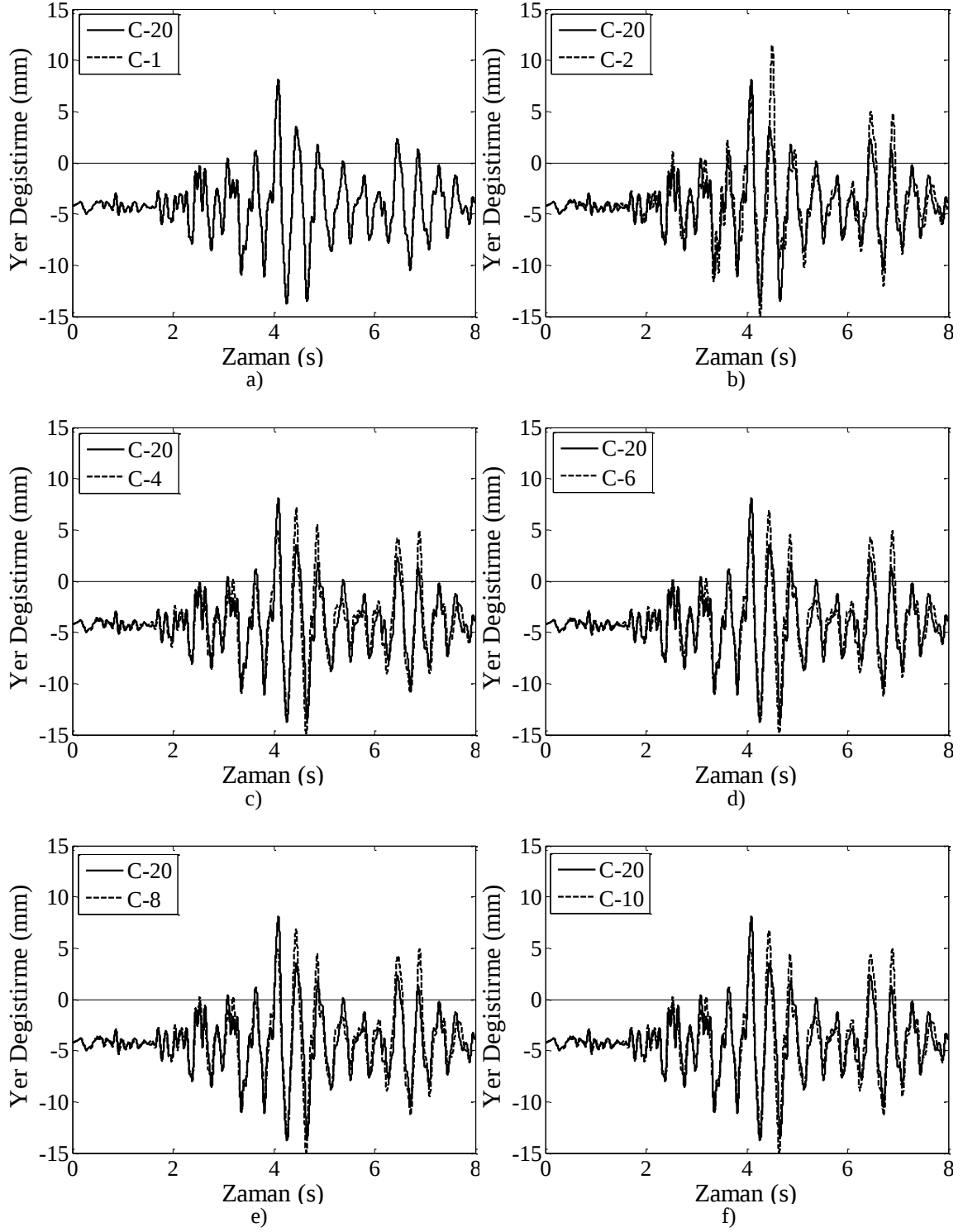
Bu bölümde temel ortamının kütlesiz olması durumu için sıvı sıkışabilirlik etkisinin beton ağırlık barajlarda oluşan dinamik hasar tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Baraj kreinin akış ve düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.2.1-4.2.2' de sunulmuş olup sıkışabilir basınç dalgası yayılma hızı 20 kat (C-20) alınarak elde edilen çözümler sıkışamaz sıvı durumu olarak dikkate alınmış ve diğer çözümlerle karşılaştırması yapılmıştır. C-20 ve C-1 durumunda, hem akış hem de düşey yönde genlik ve frekans bakımından küçük farklılıklar oluşmuştur. Aynı zamanda C-1 çözümü dışındaki diğer tüm karşılaştırıldığında çok küçük genlik farkları meydana geldiği görülmüştür. Bütün durumlarda akış yönünde yer değiştirmeler yaklaşık 43 mm civarında olup düşey yönündeki yer değiştirmeler ise sadece 15 mm civarında elde edilmiştir. Genliklerdeki artışlar her iki yönde benzer zaman aralığında gerçekleşirken yaklaşık 5.000 s. den sonra sönümün etkisiyle genliklerde ani bir düşüş meydana gelmiştir. Fenves ve Chopra [32] lineer analizler ile beton ağırlık barajlarda sıvı sıkışabilirliği üzerine incelemeler yapmışlardır. Sıvı sıkışabilirliği etkisinin,

$$\Omega_r = \omega_1^r / \omega_1^s \quad (4.2)$$

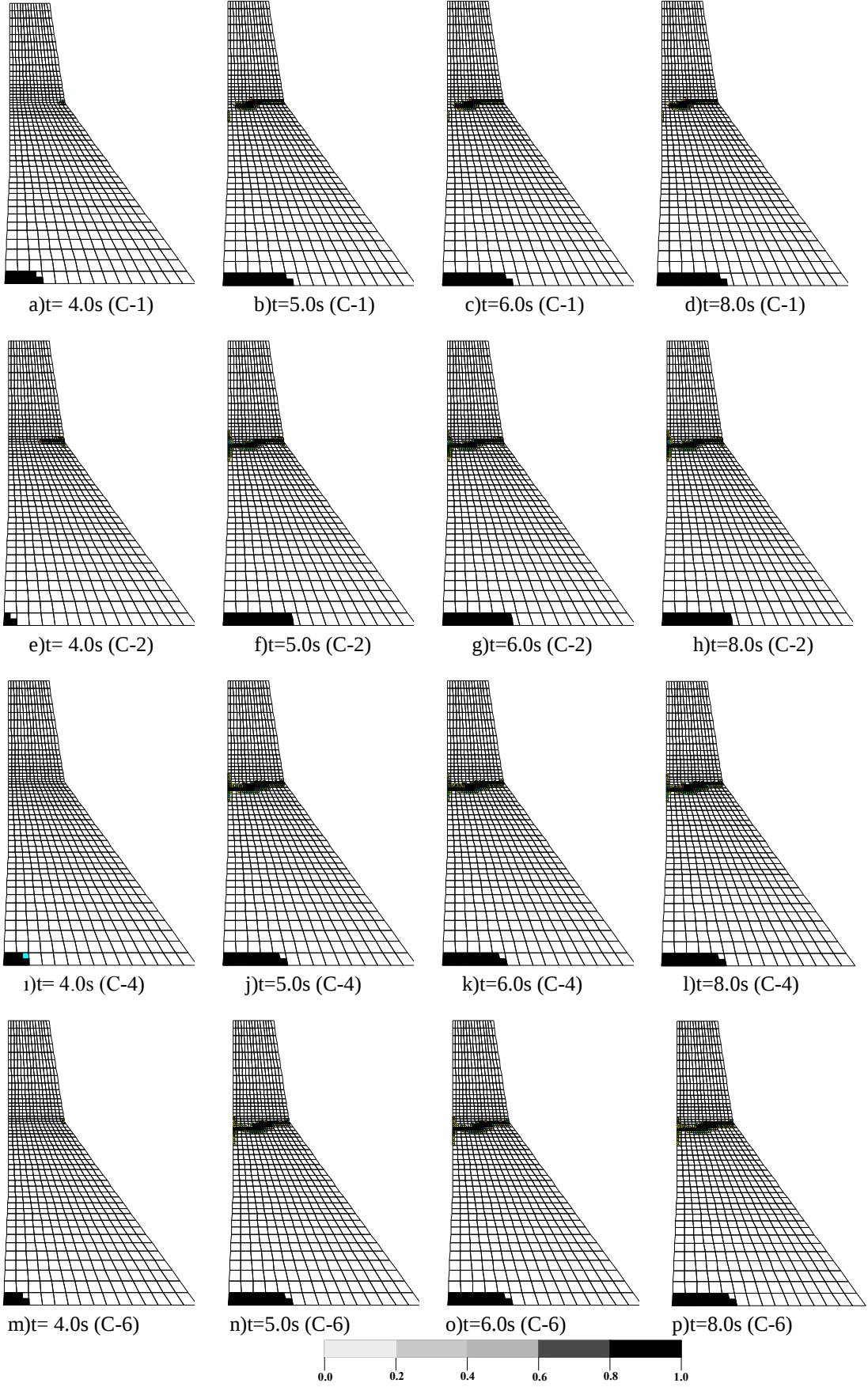
eşitliğine bağlı olduğunu ifade edilmiştir[32]. Bu eşitlikte ω_1^r ve ω_1^s sırasıyla rezervuar ve barajın açısal frekanslarını göstermektedir. Araştırmalar $\Omega_r > 2$ değeri için sıvının sıkışabilirlik etkisinin ihmal edilebileceğini göstermektedir.



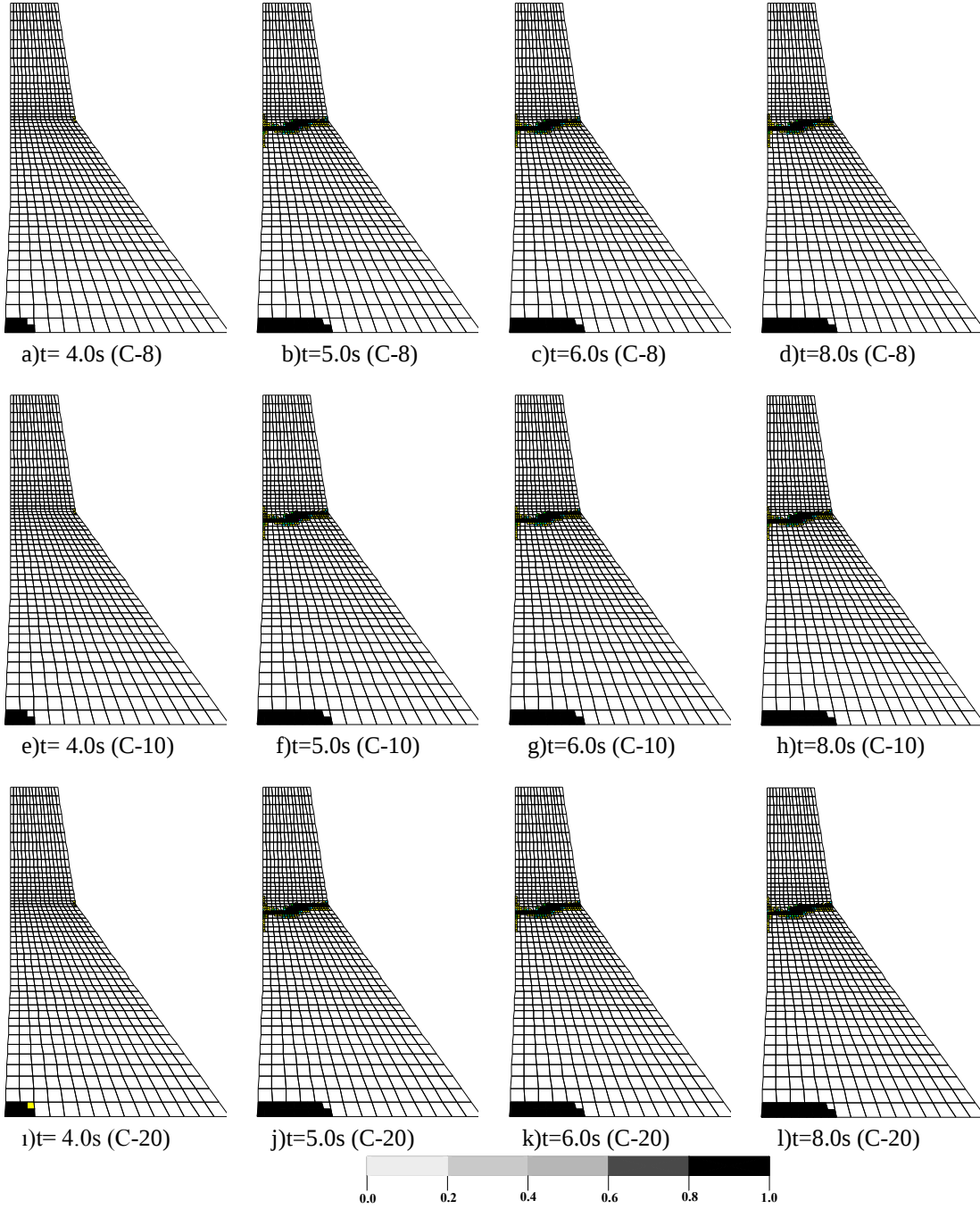
Şekil 4.2.1 Kütlesiz temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.2.2 Kütlesiz temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.2.3 Kütlesiz temellerde, C-1, C-2, C-4 ve C-6 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.

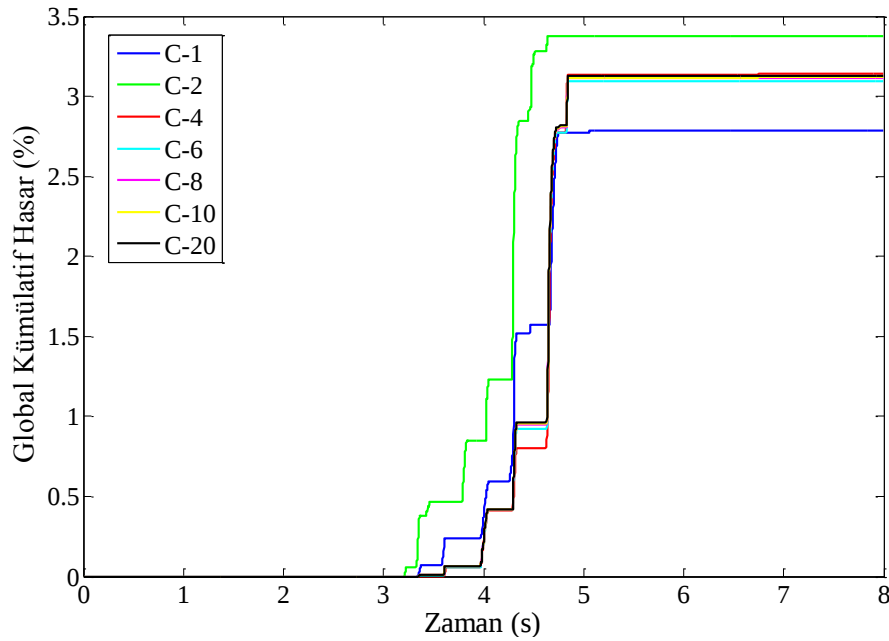


Şekil 4.2.4 Kütlesiz temellerde, C-8, C-10 ve C-20 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.

Eğer Şekil 4.2' de görülen rezervuar ortamı yaklaşık olarak dikdörtgen kabul edilirse rezervuarın açısal frekansı yaklaşık olarak $\pi C / 2H$ eşitliği ile elde edilebilir. Bu eşitlik yardımıyla C-1, C-2, C-3, C-5, C-8, C-10 ve C-20 durumları için rezervuar ortamının açısal frekansları sırasıyla, 24.633, 49.266, 73.900, 123.167, 197.066, 246.333 ve 492.666 rad/s olarak hesaplanabilir. Baraj-temel sisteminin açısal frekansı ise 19.16 rad/s olarak modal analiz yardımıyla elde edilmiştir. Böylece, Ω_r anahtar parametresi C-1, C-2, C-3, C-

5, C-8, C-10 ve C-20 durumları için sırasıyla, 1.286, 2.571, 3.835, 6.428, 10.285, 13.900 ve 25.713 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ışığında C-1 dışındaki tüm çözümlerde sıvının sıkışabilirlik etkisinin ihmal edilebileceği ortaya çıkmaktadır. Ancak lineer olmayan analiz sonuçlarına göre C-1 ve C-2 çözümleri dışındaki tüm çözümlerde sıvı sıkışabilirlik etkisinin ihmal edilebileceği görülmüştür.

Barajda oluşan hasarlar 4, 5, 6 ve 8 s. anları için Şekil 4.2.3-4.2.4’de gösterilmiştir. Barajda ilk hasar, C-1, C-2, C-4, C-6, C-8, C-10 ve C-20 durumları için mansap yüzeyinin eğimi değiştiği yerde sırasıyla 3.345, 3.299, 3.335, 3.351, 3.351 ve 3.350 s. anlarında meydana gelirken C-4 durumu için baraj memba topuğunda 3.609 s. anında meydana gelmiştir. Aynı zamanda yaklaşık 4.270 s. anında barajın mansaptan membaya doğru hareketinden dolayı C-4 çözümünde boyun kısmında ilave bir hasar bölgesi de meydana gelmiştir. Diğer çözümlerde ise yaklaşık 3.650 s. anından sonra barajın memba yüzü topuğunda ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiştir. İlerleyen zaman anlarında tüm çözümler için barajın topuk bölgesindeki hasarlar membadan mansaba doğru yatay bir hasar bölgesi meydana getirirken baraj boyun bölgesinde ortaya çıkan hasar bölgesi ise mansaptan memba’ya doğru yataya yakın bir hasar bölgesi oluşturmaktadır. Tüm hasar bölgelerinde yaklaşık 6.000 s. anından sonra her hangi bir ilerleyiş ve genişleme görülmemiştir.



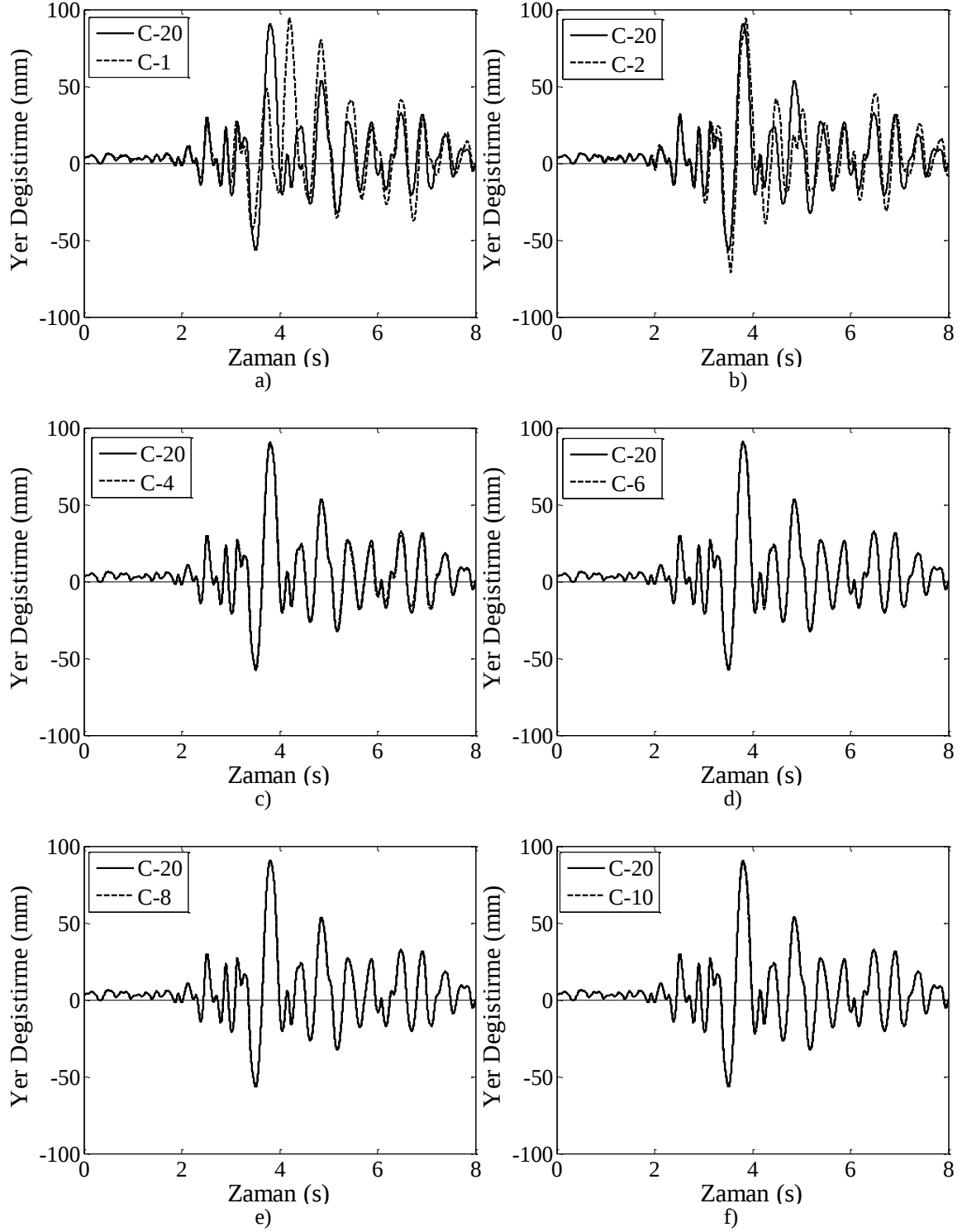
Şekil 4.2.5 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi

Tüm sıvı sıkışabilirlik durumları için GKHİ' nin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.2.5' de verilmiştir. Burada C-1 ve C-2 durumları için en büyük GKHİ değeri sırasıyla % 2.79 ve 3.37 olarak elde edilmiştir. Geriye kalan diğer çözümlerde ise % 3.09 ve 3.14 arasında değişen değerler görülmüştür. Tüm çözümlerde ise 3-5 s. aralığında GKHİ' nin değerinde hızlı bir artış meydana gelmiştir. C-1 ve C-2 çözümleri haricindeki diğer çözümlerin zamanla değişim grafikleri birbirleri ile genellikle örtüşmektedir. Böylece sıvı sıkışabilirliğinin etkisi kütsüz temel durumu için C-4 ve üzerindeki katsayılar için ihmal edilebilir olduğu görülmüştür.

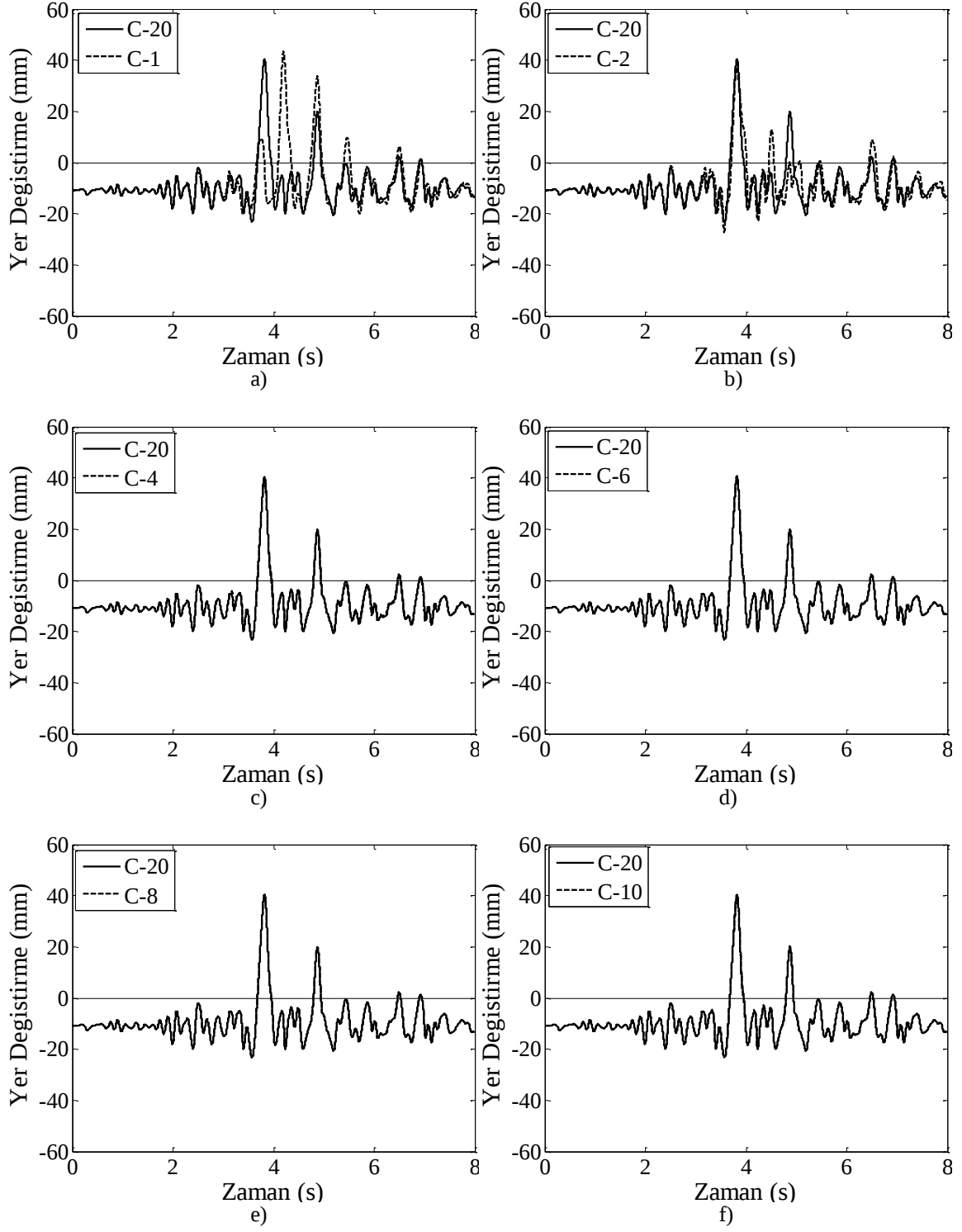
4.2.2. Kütleli Temel için Sıvı Sıkışabilirliğinin Etkisi

Bu bölümde temel ortamının kütleli olması durumu için sıvı sıkışabilirliğinin beton ağırlık barajlarda oluşan dinamik hasar tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Baraj kretinin akış ve düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.2.6-4.2.7' de sunulmuş olup sıkışabilir basınç dalgası yayılma hızı 20 kat (C-20) alınarak elde edilen çözümler sıkışamaz sıvı durumu olarak dikkate alınmış ve diğer çözümlerle karşılaştırması yapılmıştır. C-1 ve C-2 durumlarının C-20 ile karşılaştırılmasında, hem akış hem de düşey yönde genlik ve frekans bakımından bazı farklılıklar oluşmuştur. Aynı zamanda C-1 ve C-2 çözümleri dışındaki diğer tüm karşılaştırıldığında çok küçük genlik farkları meydana geldiği görülmüştür. Bütün durumlarda akış yönünde yer değiştirmeler yaklaşık 90 mm civarında olup düşey yönündeki yer değiştirmeler sadece ise 40 mm civarında elde edilmiştir. Genliklerdeki artışlar her iki yönde benzer zaman aralığında gerçekleşirken yaklaşık 5.000 s. den sonra sönümün etkisiyle genliklerde ani bir düşüş meydana gelmiştir. Rezervuar ortamının açısal frekansları için $\pi C / 2H$ denklemi kullanılırsa C-1, C-2, C-4, C-6, C-8, C-10 ve C-20 durumları için sırasıyla 24.633, 49.267, 98.533, 147.800, 197.066, 246.333 ve 492.666 rad/s değerleri hesaplanabilir. Baraj-temel sisteminin açısal frekansı ise kütleli temel durumu için 19.15 rad/s olarak modal analiz yardımıyla elde edilmiştir. Böylece, Ω_r anahtar parametresi C-1, C-2, C-4, C-6, C-8, C-10 ve C-20 durumları için sırasıyla, 1.286, 2.573, 5.145, 7.718, 10.291, 12.863 ve 25.727 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yardımıyla C-1 dışındaki tüm çözümler için sıvının sıkışabilirlik etkisinin ihmal edilebileceği ortaya çıkmaktadır. Ancak lineer olmayan analiz sonuçlarından elde edilen baraj kreti akış ve düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri (Şekil

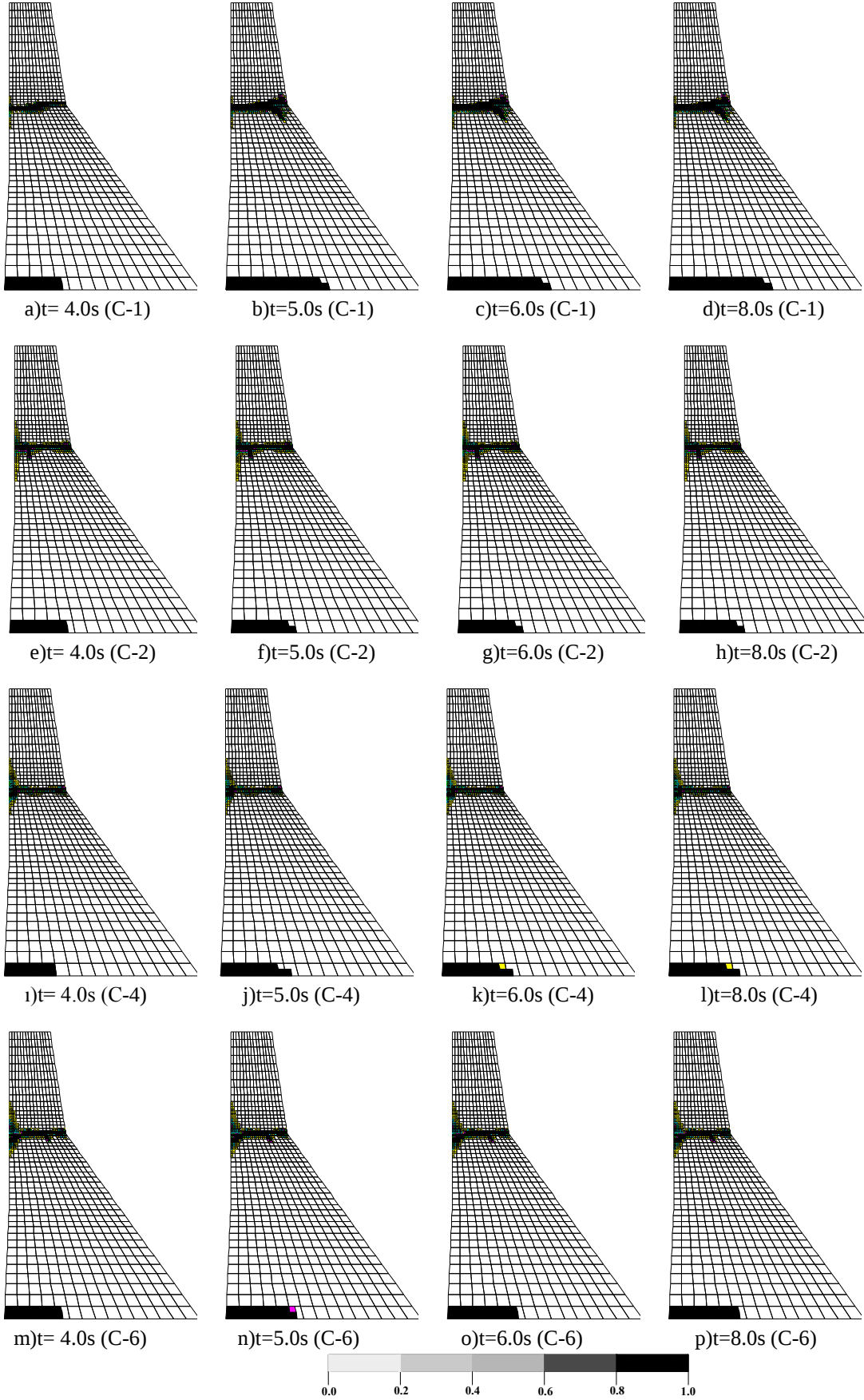
4.2.6-4.2.7) dikkate alındığında basınç dalgası yayılma hızı katsayısının 4 ve üzeri alınması durumlarında sıvı sıkışabilirlik etkisinin ihmal edilebileceği görülmektedir.



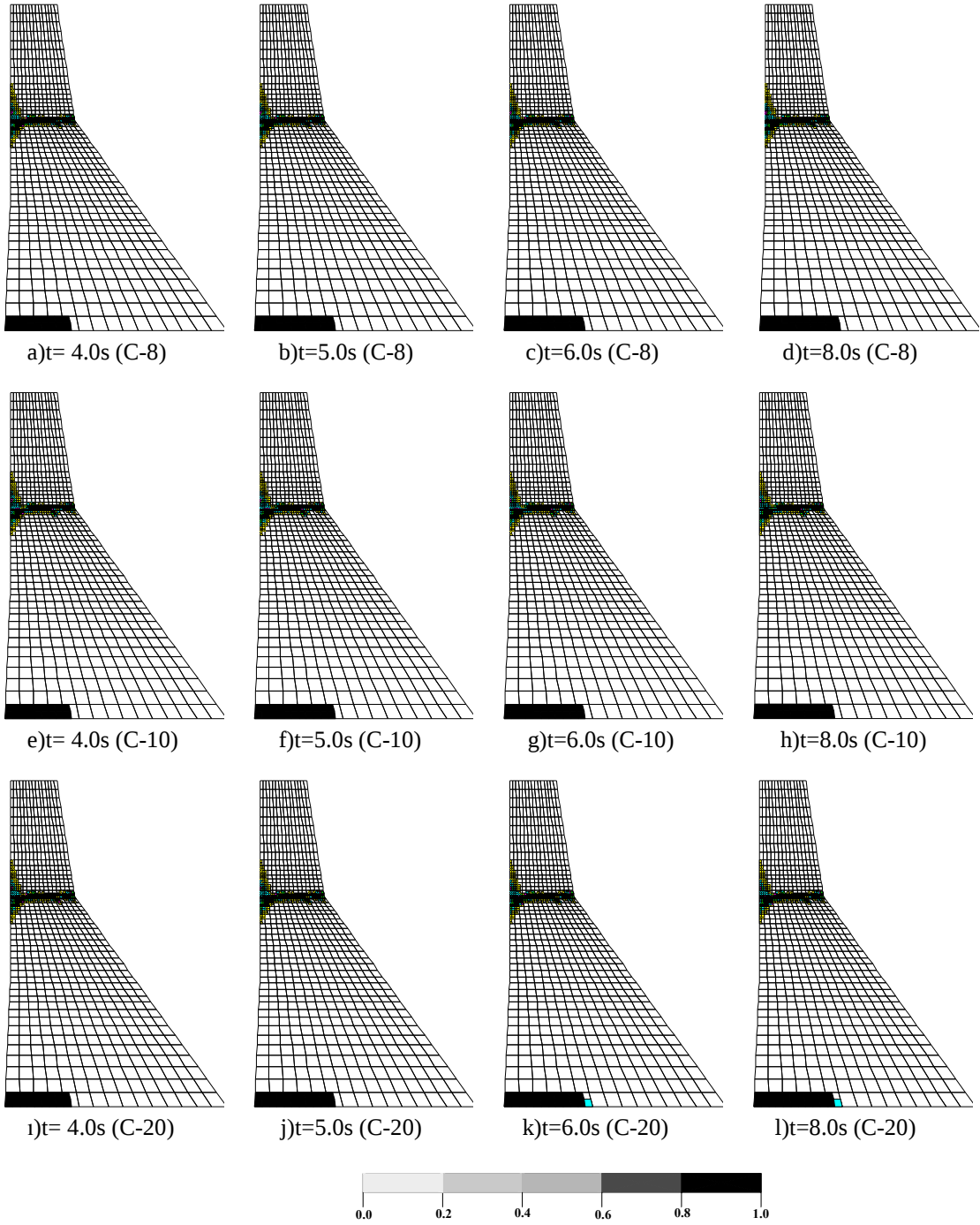
Şekil 4.2.6 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kreinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi



Şekil 4.2.7 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi.



Şekil 4.2.8 Kütelli temellerde C-1, C-2, C-4 ve C-6 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.

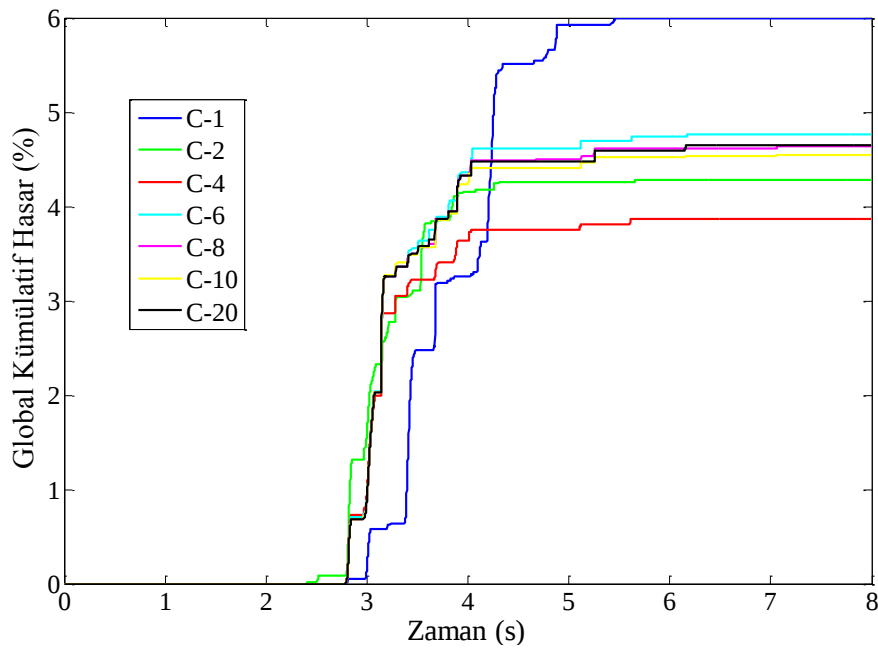


Şekil 4.2.9 Kütleli temellerde C-8, C-10 ve C-20 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar

Barajda oluşan hasarlar 4, 5, 6 ve 8 s. anları için Şekil 4.2.8-4.2.9' da gösterilmiştir. Barajda ilk hasar C-1, C-2, C-4, C-6, C-8, C-10 ve C-20 durumları için mansap yüzeyinin eğimi değiştiği yerde sırasıyla 2.795, 2.397, 2.792, 2.792 ve 2.792 s. anlarında meydana gelmiştir. Tüm çözümler için yaklaşık 2.803 s. anından sonra barajın memba yüzü topuğunda ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiştir. İlerleyen zaman anlarında tüm

çözümler için barajın topuk bölgesindeki hasar bölgesi membada doğru yatay bir hasar bölgesi meydana getirirken baraj boyun bölgesinde ortaya çıkan hasar bölgesi ise mansaptan membaya doğru yataya yakın bir hasar bölgesi oluşturmaktadır. Tüm hasar bölgelerinde yaklaşık 6.000 s. anından sonra her hangi bir ilerleyiş ve genişleme görülmemiştir.

Tüm sıvı sıkışabilirlik durumları için GKHİ' nin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.2.10'da verilmiştir. C-1, C-2, C-4, C-6, C-8, C-10 ve C-20 durumları için en büyük GKHİ' nin değerleri sırasıyla % 5.99, 4.28, 4.63, 4.33, 4.54, 4.54 ve 4.54 olarak elde edilmiştir. Tüm çözümlerde ise 3-4 s. aralığında GKHİ' nin değerinde hızlı bir artış meydana gelmiştir. C-6, C-8, C-10 ve C-20 çözümlerinin zamanla değişim grafikleri birbirleri ile örtüşmektedir. Maksimum hasar C-1 durumunda görülürken minimum hasar ise C-4 durumunda görülmektedir. Böylece sıvı sıkışabilirliğinin etkisi kütleli temel durumu için C-6 ve üzerindeki katsayılar için ihmal edilebilir olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2.10 Kütleli temel durumunda sıvı sıkışabilirliğine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi.

4.3. Taban Absorbsiyon Katsayısının Barajın Dinamik Hasar Davranışı Üzerindeki Etkisi

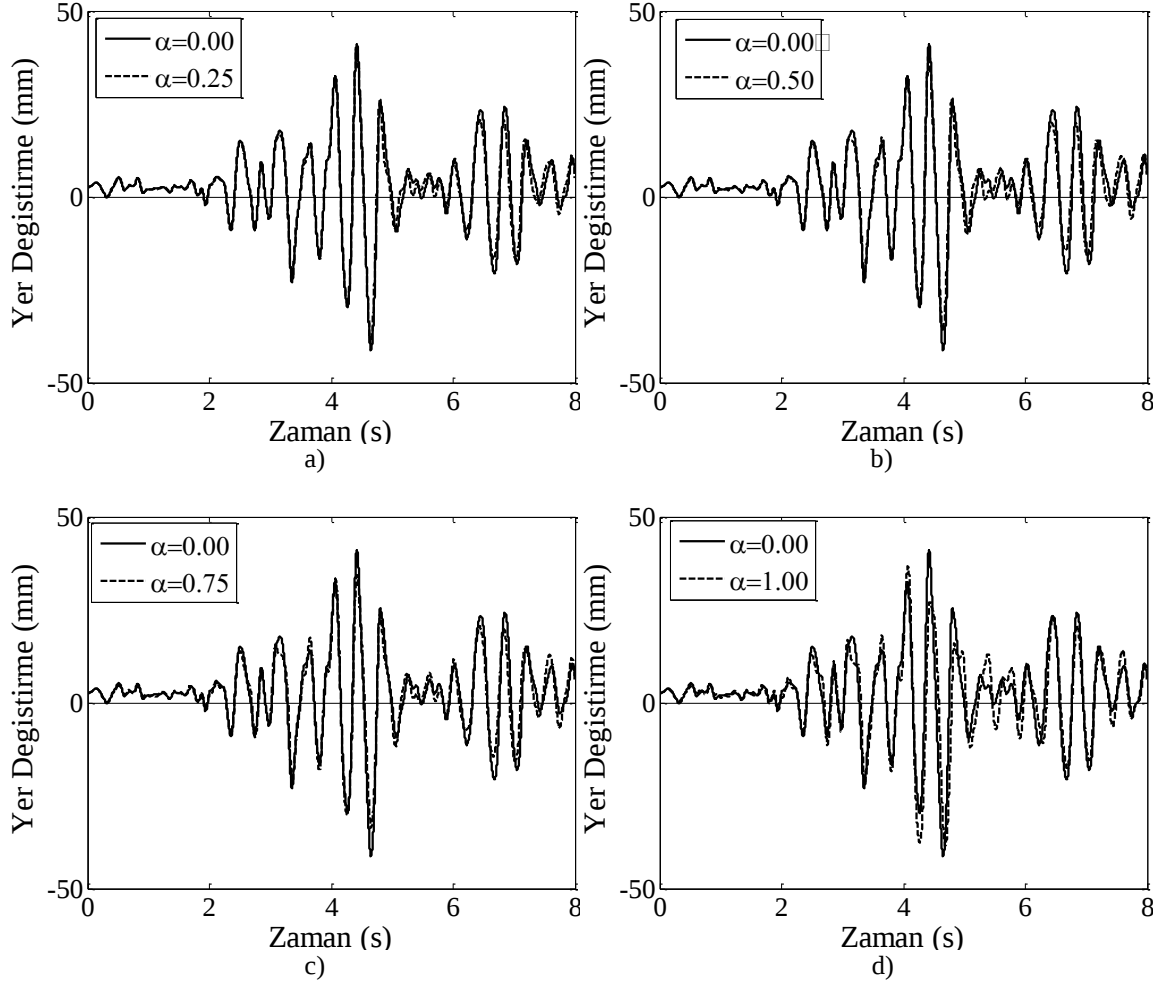
Bu bölümde, Koyna beton ağırlık barajının sismik hasar davranışı üzerinde taban absorpsiyon katsayısının etkisi incelenmiştir. Çözümlerde baraj-rezervuar sisteminde taban

absorbsiyon katsayısı olan α 'nın 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 olması durumları için çözümler elde edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu katsayının 0.00 olması durumunda rezervuar tabanında oluşan dalgalar, herhangi bir sönüm olmadan rezervuar ortamına aktarılırken ve 1.00 olması durumunda bu dalgaların tamamıyla sönümlenmesi anlamına gelmektedir. Aynı zamanda, temel ortamı kütleli/kütsüz durumları için dikkate alınmış olup çözümlerde temelin elastisite modülünün barajın elastisite modülüne oranı (E_r/E_b) 8/1 alınmıştır. Baraj ve temelin malzeme özellikleri Bölüm 4' de bahsedildiği gibi kullanılmıştır. Sistemde rezervuar tabanı rijit kabul edilmiş, Sommerfeld dalga yayılma sınır şartı rezervuar sonlu eleman modelinin kesildiği yüzeye uygulanmıştır. Sıvı yüzey dalgaları çözümlerde dikkate alınmıştır.

4.3.1. Kütsüz Temel Durumu için Taban Absorbsiyon Katsayısının Etkisi

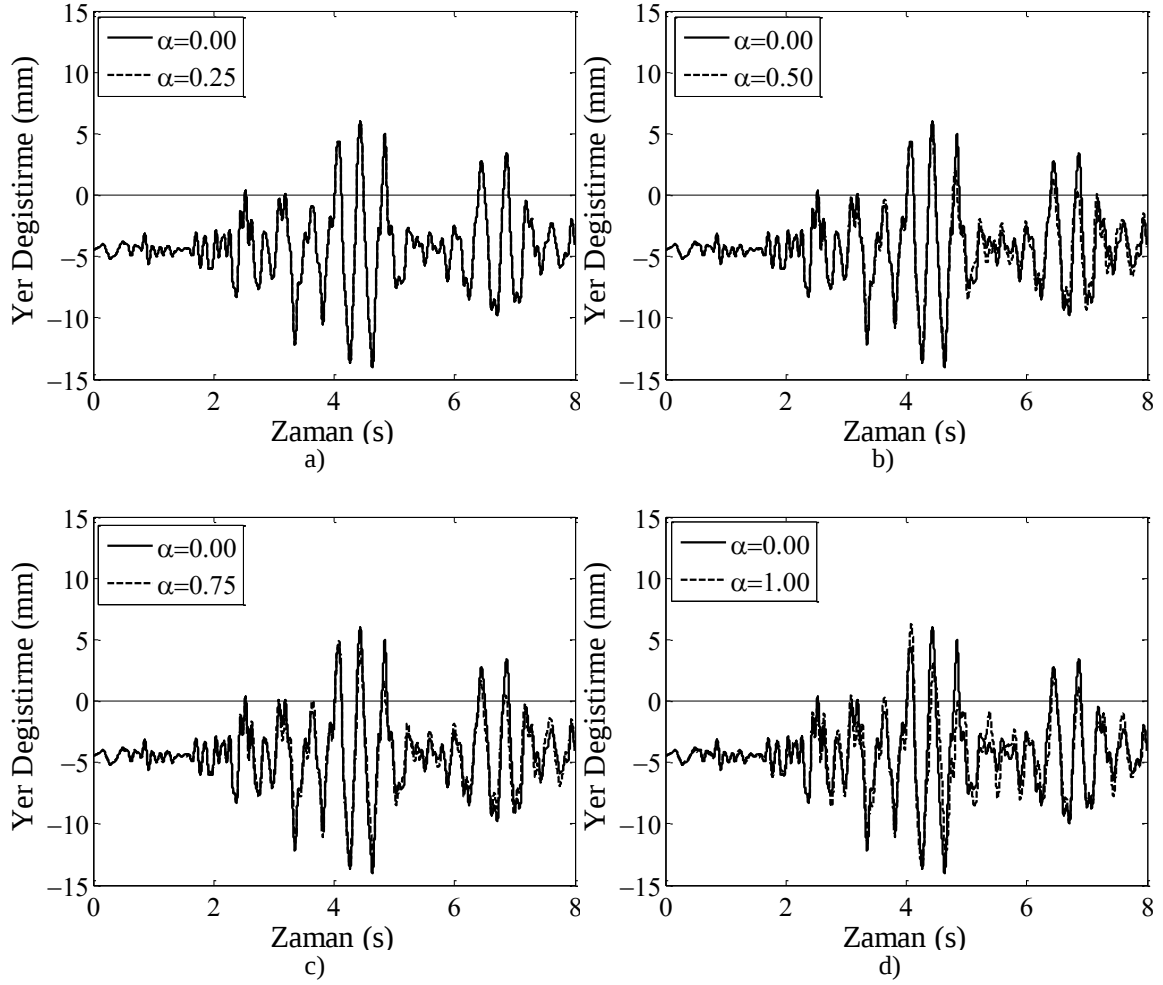
Bu bölümde temel ortamının kütsüz olması durumu için taban absorbsiyon katsayısının beton ağırlık barajların dinamik hasar davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Baraj kretinin akış ve düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.3.1-4.3.2' de sunulmuş olup taban absorbsiyon katsayısının 0.00 olması durumu esas alınarak diğer çözümlerle karşılaştırması yapılmıştır. $\alpha=0.00$ durumu $\alpha=0.25$, 0.50 ve 0.75 durumları ile karşılaştırıldığında, hem akış hem de düşey yönde genlik ve frekans bakımından çok küçük farklılıklar oluşmuştur. $\alpha=0.00$ ve 1.00 durumları karşılaştırıldığında genlik ve frekans açısından bazı farklılıklar meydana gelmektedir. Taban absorbsiyon katsayısının 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 olması durumları için akış yönünde mutlak değerce en büyük yer değiştirmeler sırasıyla 41.40, 40.19, 38.26, 34.31 ve 38.52 olarak elde edilmiştir.

Bu yatay yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları $\alpha=0.00$ durumu esas alınıp $\alpha=0.25$, 0.50 ve 0.75 durumları karşılaştırıldığında α değerinin artışına bağlı olarak % 3-17 aralığında değişen azalimler görülmüştür. Bunun yanı sıra $\alpha=0.00$ ve 1.00 durumları karşılaştırıldığında $\alpha=1.00$ durumu için % 6.95' lik bir azalım farkı elde edilmiştir. Düşey yönde yer değiştirmeler genellikle 13.5 mm civarında elde edilmiştir. Hem akış hem de düşey yöndeki en büyük yer değiştirmelerin mutlak maksimum değerleri karşılaştırıldığında α 'nın 0.00 olduğu durum için en büyük değerler elde edilmiştir.



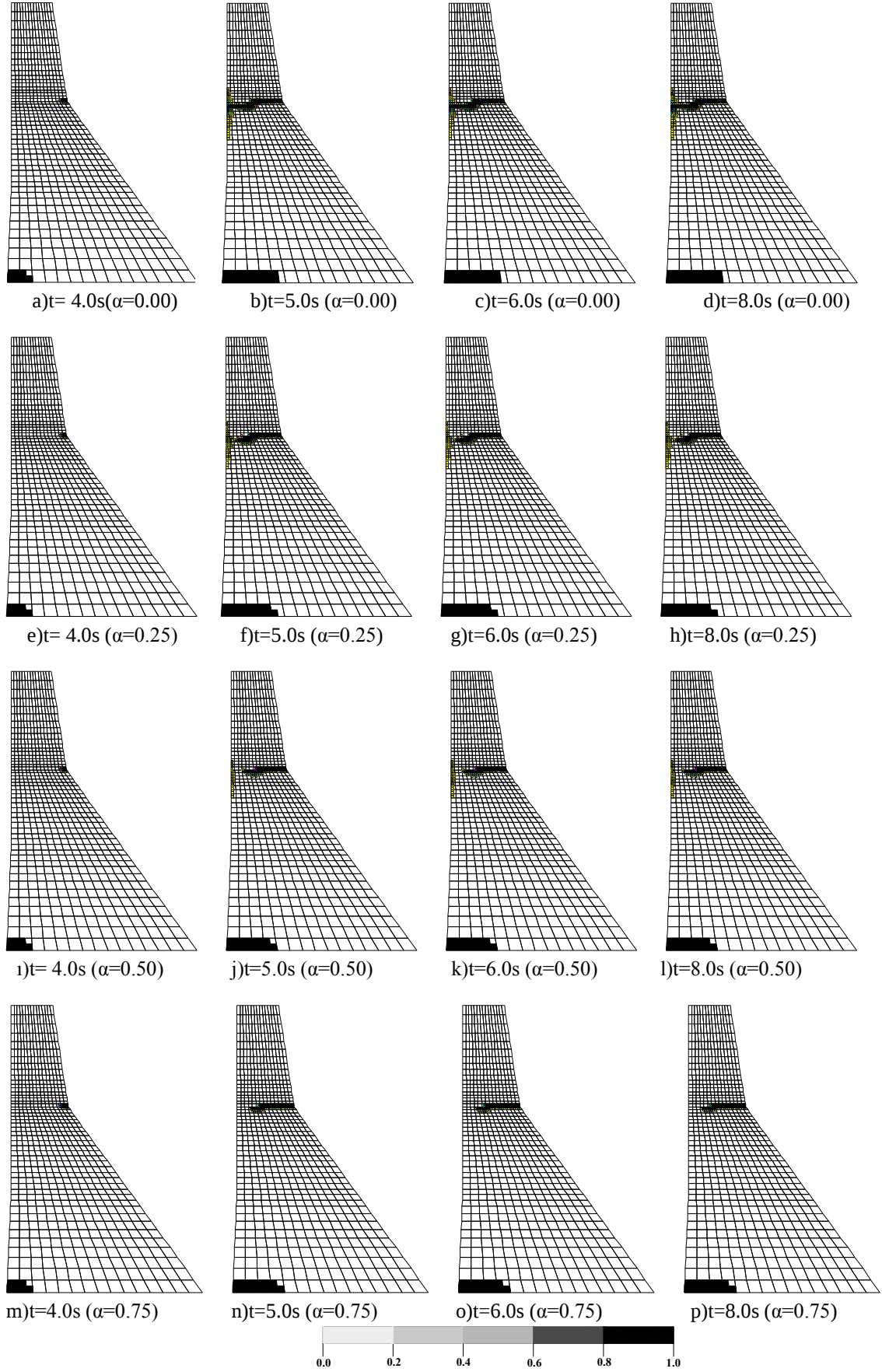
Şekil 4.3.1 Kütlesiz temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) 'nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay (x) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

Barajda oluşan hasarlar 4.0, 5.0, 6.0 ve 8.0 s. anları için Şekil 4.3.3-4.3.4'de gösterilmiştir. Taban absorpsiyon katsayısının $\alpha=0.00$, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 durumları için barajda ilk hasar mansap yüzeyinin eğimi değiştiği yerde sırasıyla 3.337, 3.338, 3.339, 3.340 ve 3.343 s. anlarında meydana gelmektedir. Bütün çözümlerde ise yaklaşık 3.650 s. anından sonra barajın memba yüzü topuğunda ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiştir. İlerleyen zaman anlarında tüm çözümler için barajın topuk bölgesindeki hasarlar membadan mansaba doğru yatay bir hasar bölgesi meydana getirmektedir. $\alpha=0.00$ durumu için bu hasar bölgesi diğer durumlardan elde edilen hasar bölgesi ile karşılaştırıldığında daha uzun bir bölgeye yayılmaktadır. Ancak $\alpha=1.00$ durumu ile çok yakın bir hasar bölgesi elde edilmiştir. Baraj boyun bölgesinde ortaya çıkan hasar bölgesi ise mansaptan membaya doğru yataya yakın bir hasar bölgesi oluşturmaktadır.

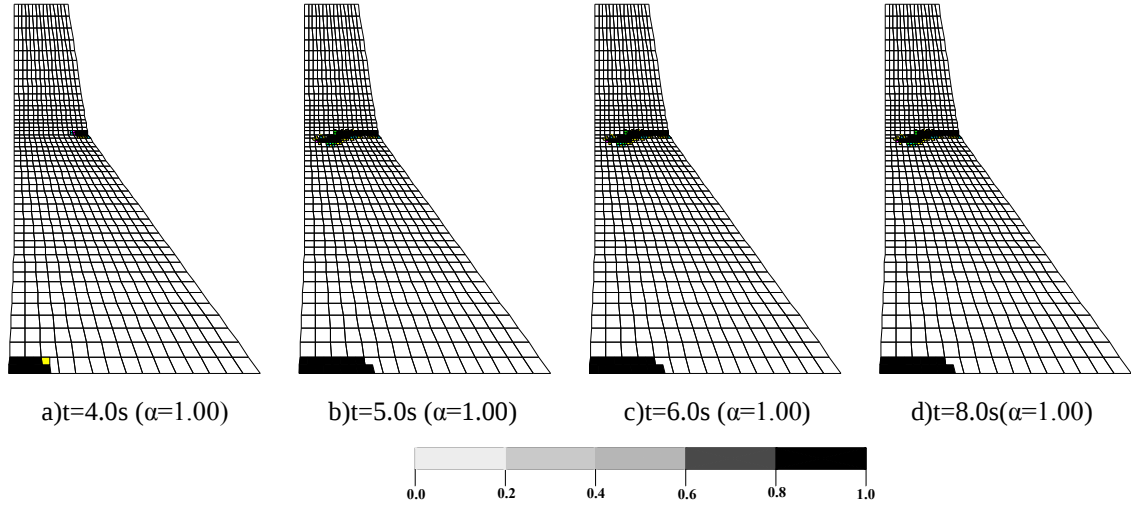


Şekil 4.3.2 Kütlesiz temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) 'nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey (y) yöndeki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

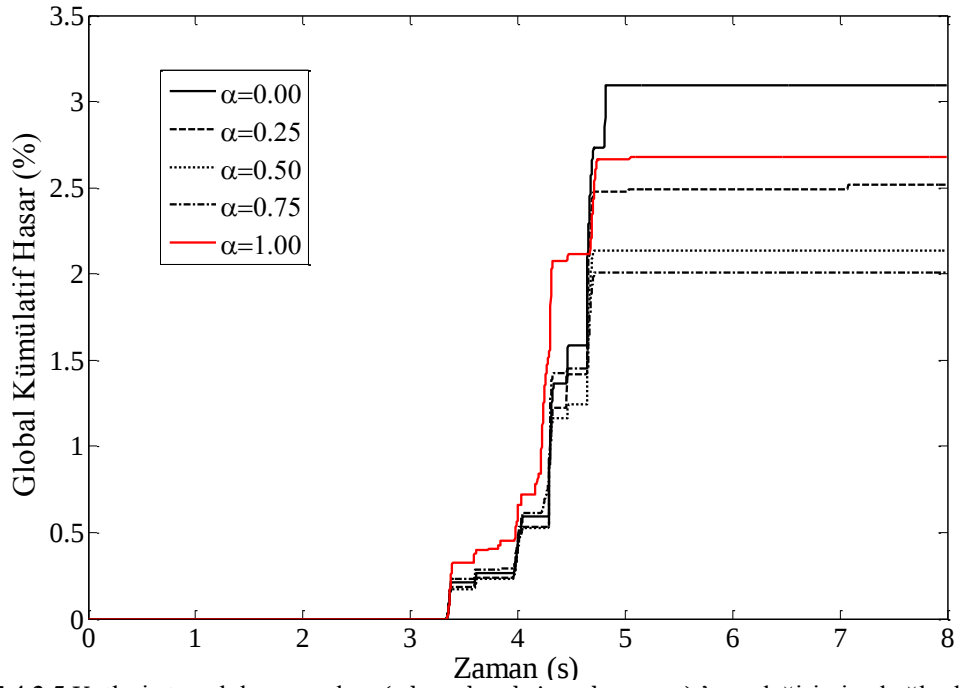
Taban absorpsiyon katsayısının tüm durumları için GKHİ' nin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.3.5' de verilmiştir. Burada $\alpha=0.00, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1.00 durumları için GKHİ' nin en büyük değeri sırasıyla % 3.97, 2.51, 2.13, 2.00 ve 2.67 olarak elde edilmiştir. α değerinin artışına bağlı olarak GKHİ' nin en büyük değerinde azalmalar meydana gelmekte olup $\alpha=1.00$ için ani bir artış meydana gelmiştir. Bu durum $\alpha=1.00$ için baraj taban bölgesinde meydana gelen hasar ilerleyişinden kaynaklanmaktadır. Tüm çözümlerde ise 3.5-5 s. aralığında GKHİ değerinde hızlı bir artış meydana gelirken yaklaşık 4.5 s. anından sonra bu indeks değerinde değişimler görülmemektedir.



Şekil 4.3.3 Kütlesiz temel için $\alpha=0.00, 0.25, 0.50$ ve 0.75 olması durumlarında hasarın zamanla değişimi



Şekil 4.3.4 Kütlesiz temel için $\alpha=1.00$ olması durumunda değişik anlarda oluşan hasarlar

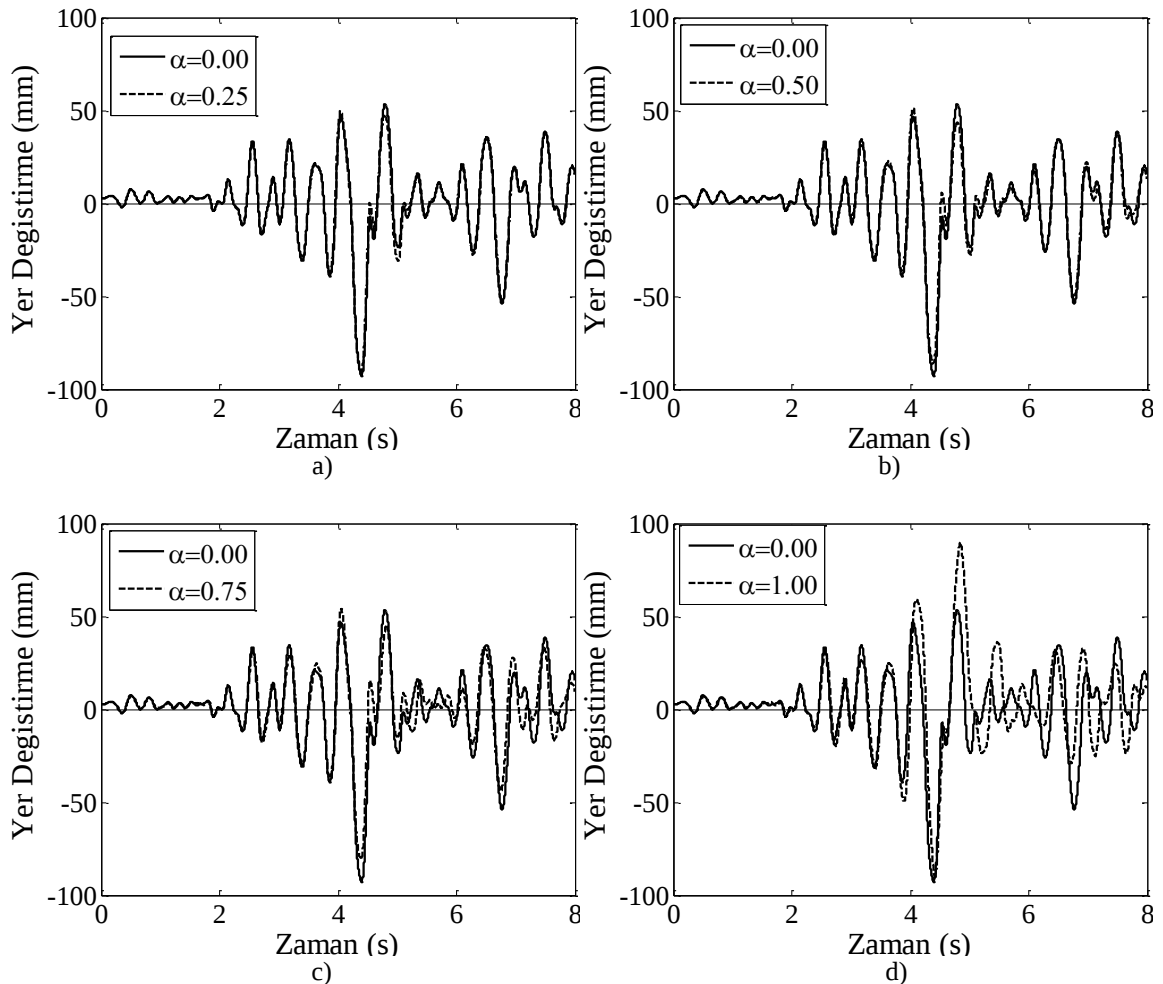


Şekil 4.3.5 Kütlesiz temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) 'nın değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi

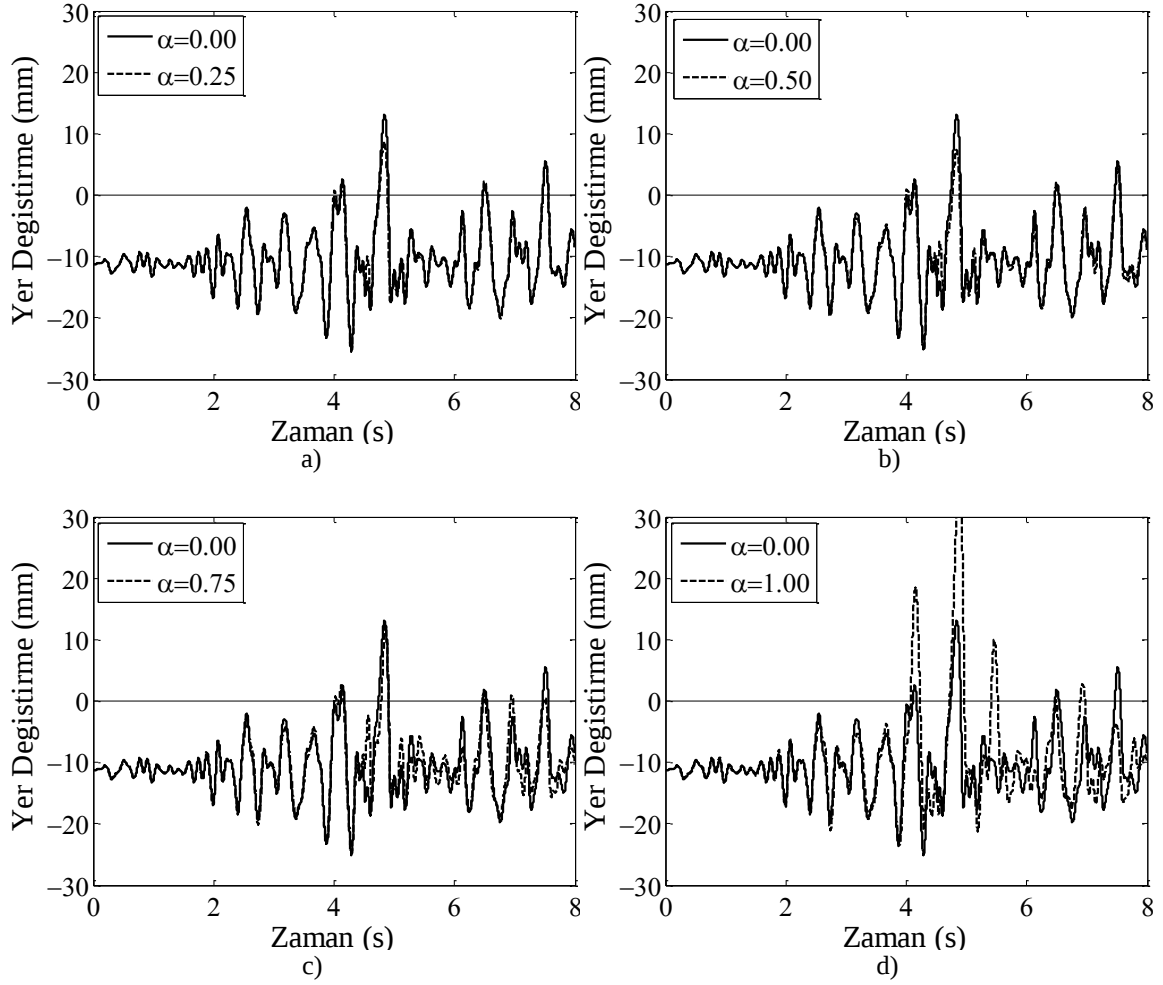
4.3.2. Kütleli Temel Durumu için Taban Absorpsiyon Katsayısının Etkisi

Bu bölümde temel ortamının kütleli olması durumu için taban absorpsiyon katsayısının etkisi beton ağırlık barajlarda oluşan dinamik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Baraj kretinin akış ve düşey yer değiştirmelerinin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.3.6-4.3.7' de sunulmuştur. Taban absorpsiyon katsayısının $\alpha=0.00$ olması durumu için elde edilen çözümler esas alınmış olup diğer çözümlerle karşılaştırması yapılmıştır.

$\alpha=0.00$ ve 0.25 durumları karşılaştırıldığında hem akış hem de düşey yönde genlik ve frekans bakımından çok küçük farklılıklar oluşurken $\alpha=0.50$ ve 0.75 durumlarında bu farklar daha belirginleşmektedir. Bunun yanı sıra, $\alpha=0.00$ ile 1.00 durumları karşılaştırıldığında genlik ve frekans açısından çok daha belirgin farklılıklar meydana gelmektedir. Taban absorpsiyon katsayısının $\alpha=0.00, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1.00 olması durumları için akış yönünde mutlak değerce en büyük yer değiştirmeler sırasıyla $93.01, 90.42, 86.30, 80.54$ ve 90.40 olarak elde edilmiştir. Bu yatay yer değiştirme değerlerinin mutlak maksimumları $\alpha=0.00$ durumu esas alınıp $\alpha=0.25, 0.50$ ve 0.75 durumları karşılaştırıldığında α değerinin artışına bağlı olarak % 3-14 aralığında değişen azalmalar görülmüştür. Aynı zamanda $\alpha=0.00$ ve 1.00 durumları karşılaştırıldığında $\alpha=1.00$ durumu için % 2.81' lik bir azalış farkı elde edilmiştir.



Şekil 4.3.6 Kütleli temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) 'nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin yatay yöndeki (x) yer değiştirmesinin zamanla değişimi.

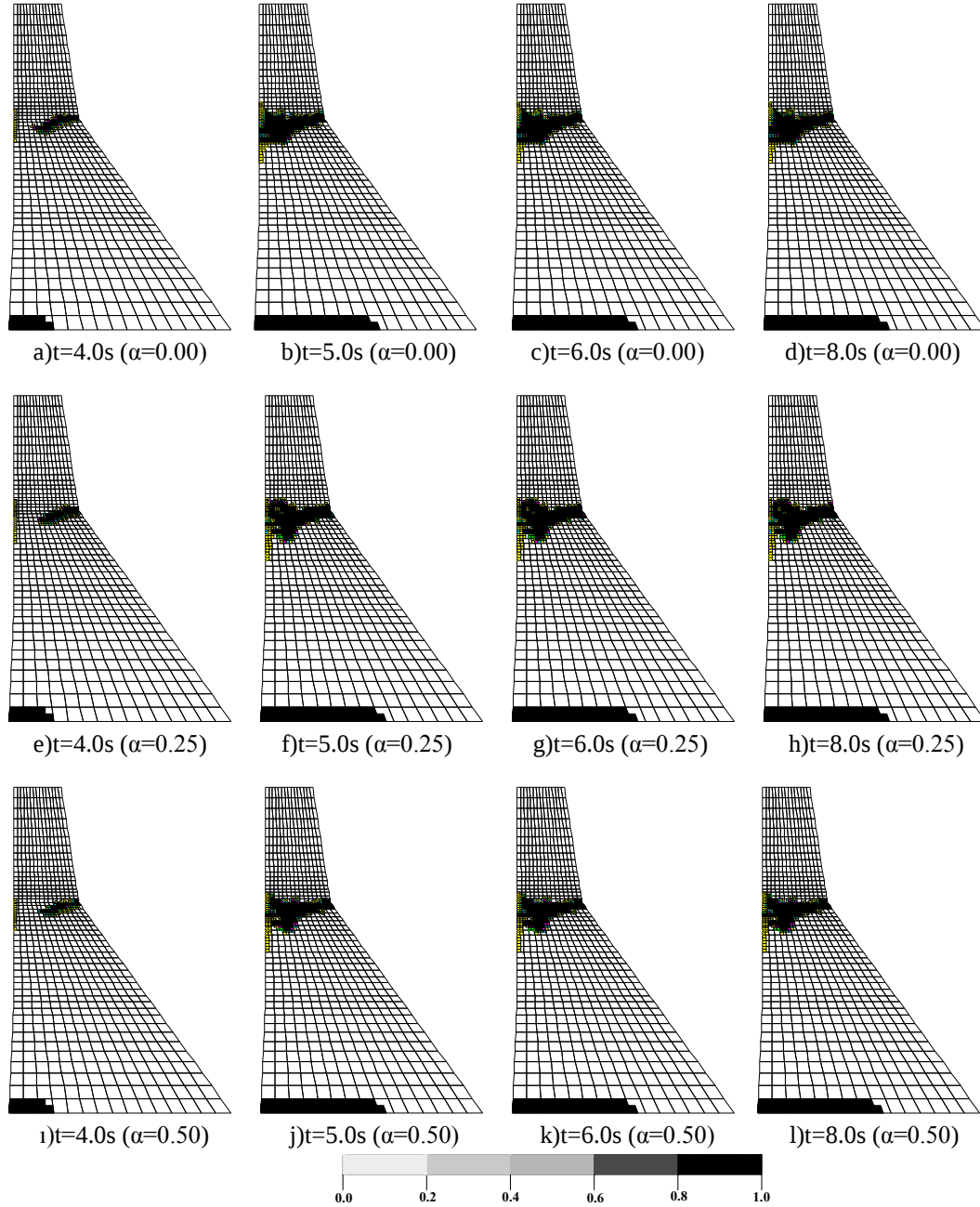


Şekil 4.3.7 Kütleli temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) 'nın değişimine bağlı olarak baraj kretinin düşey yöndeki (y) yer değiştirmesinin zamanla değişimi

Düşey yöndeki yer değiştirme değerlerinin mutlak değerce en büyük genlik değerleri ise genellikle 25 mm civarında elde edilmekte olup $\alpha=1.00$ durumu için bu genlik değeri 40.16 mm olarak hesaplanmıştır. Akış yönünde elde edilen yer değiştirmelerin mutlak değerce en büyük değerleri karşılaştırıldığında α 'nın 0.00 olduğu durum için en büyük yer değiştirme değerleri elde edilirken düşey yönde ise α 'nın 1.00 olduğu durum için en büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu durum lineer olmayan davranışın bir sonucudur.

Barajda oluşan hasarlar 4, 5, 6 ve 8 s. anları için Şekil 4.3.8-4.3.9'de gösterilmiştir. Taban absorpsiyon katsayısının $\alpha=0.00, 0.25, 0.50, 0.75$ ve 1.00 durumları için barajda ilk hasar memba yüzeyi topuğunda sırasıyla 2.488, 2.488, 2.489, 2.490 ve 2.493 s. anlarında meydana gelmektedir. Bütün çözümlerde ise yaklaşık 3.450 s. anından sonra barajın mansap yüzü eğimin değiştiği yerde ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiştir. İlerleyen zaman adımlarında tüm çözümler için barajın topuk bölgesindeki hasarlar mambadan

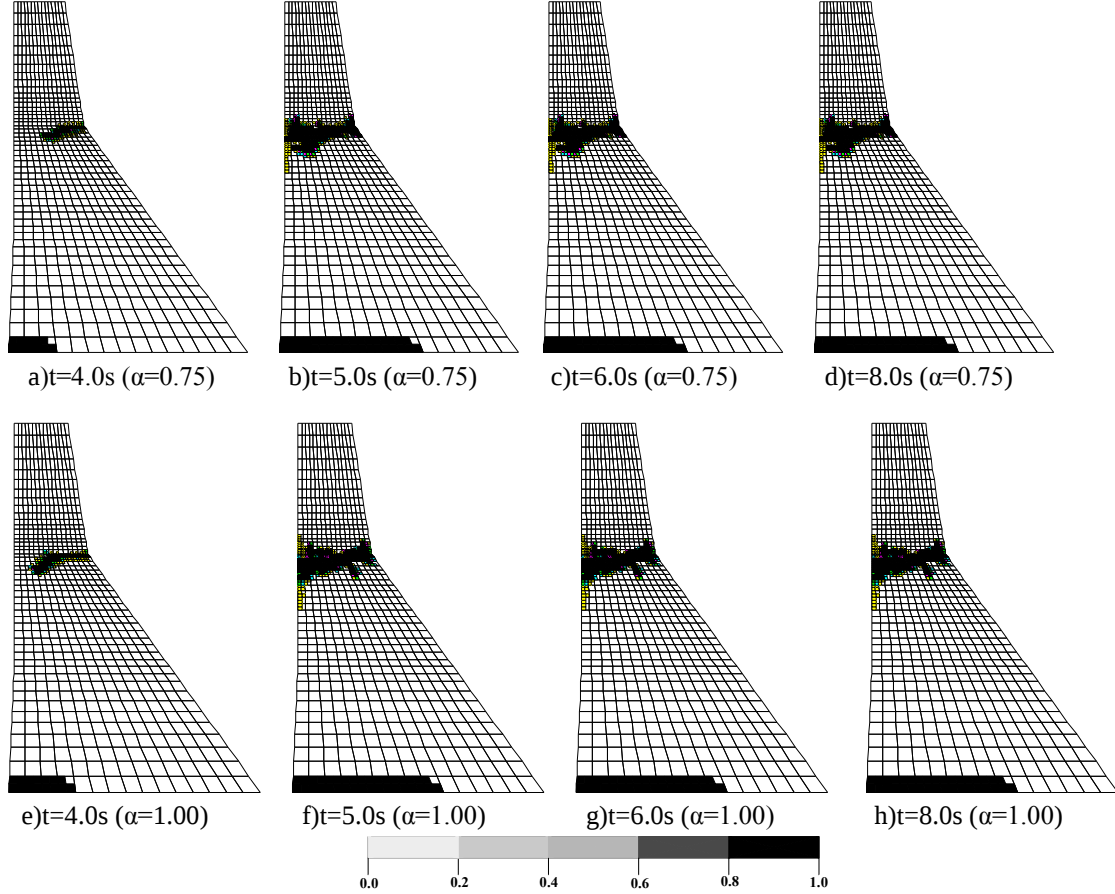
mansaba doğru yatay bir hasar bölgesi meydana getirirken baraj boyun bölgesinde ortaya çıkan hasar bölgesi ise mansaptan membaya doğru genişleyerek dağınık bir hasar bölgesi oluşturmaktadır. Tüm hasar bölgelerinde yaklaşık 5.000 s. anından sonra her hangi bir ilerleyiş ve genişleme görülmemiştir.



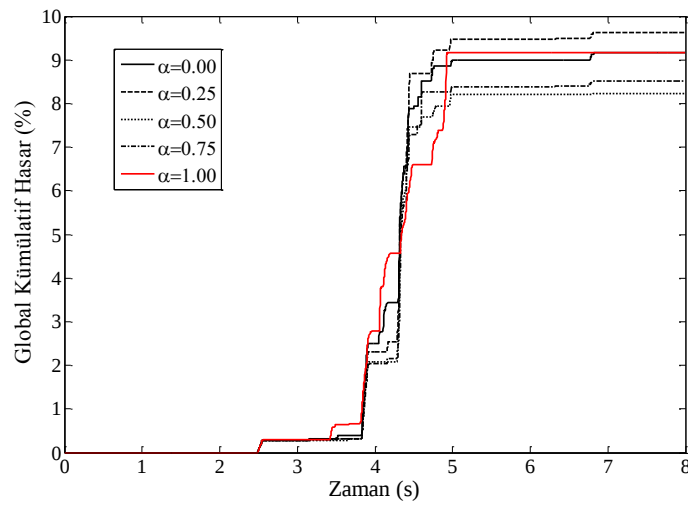
Şekil 4.3.8 Kütleli temel için $\alpha=0.00$, 0.25 ve 0.50 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar

Kütleli temel durumunda taban absorpsiyon katsayısının $\alpha=0.00$, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 olması halleri için GKHİ' nin zamanla değişim grafikleri Şekil 4.3.10' da verilmiştir.

GKHİ' nin en büyük olduğu değerler $\alpha=0.00$, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 durumları için sırasıyla % 9.62, 9.16, 8.82, 8.52 ve 9.16 olarak elde edilmiştir. Tüm çözümlerde ise 4-5 s. aralığında GKHİ' nin değerinde artış meydana gelmiştir. GKHİ' nin zamanla değişim grafiğine göre yaklaşık 5 s. anından sonra hasar büyüklükleri değişim görülmemiştir.



Şekil 4.3.9 Kütleli temel için $\alpha=0.75$ ve 1.00 olması durumları için değişik anlarda oluşan hasarlar.



Şekil 4.3.10 Kütleli temel durumunda α (taban absorpsiyon katsayısı) 'nın değişimine bağlı olarak global kümülatif hasar indeksinin zamanla değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada baraj-rezervuar ve baraj-temel dinamik etkileşiminin beton ağırlık barajlarda oluşan hasara etkisi, Euler yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Temel kütleli ve kütsüz seçilerek, elastisite modülü, sıvı sıkışabilirliği ve taban absorpsiyon katsayısının değişimi için analizler yapılmıştır. Sıvı ve katı ortamları lineer elastik olarak incelenmiştir. Beton malzemesi için şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan anizotropik hasar modeli kullanılmıştır. Sayısal uygulama için Hindistan'daki Koyna beton ağırlık barajı seçilmiştir. Sistemde rezervuar tabanı rijit kabul edilmiş olup Sommerfeld dalga yayılma sınır şartı rezervuar sonlu eleman modelinin kesildiği yüzeye uygulanmıştır. Sıvı yüzey dalgaları çözümlerde dikkate alınmıştır.

İlk olarak temelin elastisite modülünün değişiminin barajın hasar davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kütleli/kütsüz temel durumları için sonuçlar elde edilmiş olup temelin elastisite modülünün barajın elastisite modülüne oranı $E_t/E_b=1/8, 1/4, 1/2, 1/1, 2/1, 4/1$ ve $8/1$ olması durumları dikkate alınarak çözümler yapılmıştır.

Kütleli/kütsüz temel durumları için baraj kreti akış yönünde ve düşey yer değiştirmenin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında kütsüz temel durumunda yatay yöndeki tepkiler için genelde $E_t/E_b=1/2, 2/1, 4/1$ ve $8/1$ çözümleri ile $E_t/E_b=1/1$ çözümleri başlangıçta hem genlik hem de frekans açısından benzer olan çözümler barajda hasarların oluşmasıyla birbirlerine göre farklılıklar göstermiştir. Bu çözümlerin dışındaki çözümler için genelde genlik ve frekans açısından belirgin farklar oluşmuştur. Düşey yöndeki tepkilerin başlangıç değerleri için, E_t/E_b oranının artışına bağlı olarak statik düşey yer değiştirme değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durum temelin elastik malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. $E_t/E_b=1/2, 1/1$ ve $2/1$ çözümleri frekans ve genlik açısından biraz daha yakın seyrederken bu çözümler dışındaki diğer grafiklerde belirgin farklar görülmektedir. Kütleli temel durumunda yatay yöndeki tepkiler için genelde $E_t/E_b=2/1, 4/1$ ve $8/1$ çözümleri ile $E_t/E_b=1/1$ çözümleri başlangıçta hem genlik hem de frekans açısından benzer olan çözümler barajda hasarların oluşmasıyla bir birlerinden farklılıklar göstermiştir. Bu çözümlerin dışındaki çözümler için genelde genlik ve frekans açısından belirgin farklar oluşmuştur. Düşey yöndeki tepkilerin başlangıç değerleri için, E_t/E_b oranının artışına bağlı olarak statik düşey yer değiştirme değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durum temelin elastik malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. $E_t/E_b=1/1$ ve $2/1$ çözümleri frekans ve genlik açısından biraz daha yakın seyrederken bu

çözümler dışındaki diğer grafiklerde belirgin farklar görülmektedir. Kütleli ve kütsesiz temel durumları birbirleri ile karşılaştırıldığında kütleli temelin durumu için elde edilen yer değıştirme değeri kütsesiz temel durumuna göre elde edilen yer değıştirme değeriinden daha büyük elde edilmiştir.

Kütsesiz temel durumunda, tüm çözümler için barajın memba yüzeyi topuk bölgesinde bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mambadan mansaba doğru yatay bir yayılış sergilemiştir. Barajın mansap yüzeyinde eğiminin değıştiğı boyun bölgesinde ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mansaptan membaya doğru yataya yakın bir yayılış sergilemiştir. Aynı zamanda bu hasar bölgesi E_t/E_b oranının 1/8 olduğu durum için ortaya çıkmamıştır. E_t/E_b oranının 1/1 olduğu durumda ise barajın boyun bölgesi memba yüzeyinde bu hasar bölgelerine ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mambadan mansaba doğru yatay bir yayılış sergilemiştir. Kütleli temel durumunda ise tüm çözümler için barajın memba yüzeyi topuk bölgesinde bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mambadan mansaba doğru yatay bir yayılış sergilemiştir. Barajın mansap yüzeyinde eğiminin değıştiğı boyun bölgesinde ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mansaptan membaya doğru E_t/E_b oranının artışına bağı olarak 45° açıdan başlayıp yataya yaklaşan bir açıda yayılış sergilemiştir.

Kütleli ve kütsesiz temel durumlarında tüm çözümler için elde edilen Global Kümülatif Hasar İndeksi (GKHİ)' nin zamanla değışim grafikleri karşılaştırıldığında, bu indeksin değeri yaklaşık 3-5 s. aralığında ani bir artış içerisinde olmuştur. Bu zaman aralığı, tüm çözümlerde yatay doğrultuda elde edilen yer değıştirmelerin zamanla değışim grafiklerinde en büyük değeri elde edildiğı zaman dilimidir. Bununla birlikte, kütleli ve kütsesiz temel durumunda GKHİ' nin değeri sırasıyla $E_t/E_b=1/1$ ve $E_t/E_b=1/2$ olduğu çözümler için en büyük olarak elde edilmiştir. Kütleli temel durumu ile kütsesiz temel durumları karşılaştırıldığında GKHİ değeri kütleli temel durumunda daha büyük değeri elde edilmiştir. Bu malzeme özelliklerine sahip bu geometrideki ağırlık baraj için kütsesiz temel durumunda $E_t/E_b=1/8$ ve kütleli temel durumunda $E_t/E_b=1/4$ oranında olan zeminlerin seçilmesi halinde baraj gövdesinde daha az hasarlar olacağı görülmüştür.

Koyna beton ağırlık barajının sismik hasar davranışı üzerinde sıvı sıkışabilirliğinin etkisinin incelendiğı çözümlerde basınç dalgası yayılma hızı (C) 1438.75 m/s olarak alınmış ve bu değeri 1, 2, 4, 6, 8, 10 ve 20 katları seçilerek kütleli/kütsesiz temeller için $E_t/E_b=8/1$ durumu esas alınmıştır. Hem kütleli hem de kütsesiz durumlar için C-20 ile C-1 durumu karşılaştırıldığında yatay ve düşey yönde genlik ve frekans açısından bazı

farklılıklar görülmüş olup diğer tüm durumlar için genlik bakımından küçük farklılıklar oluşmuştur. Kütleli temel durumunda elde edilen yer değiştirme değerleri kütsüz durumda elde edilen yer değiştirme değerlerinden daha büyük elde edilmiştir.

Kütleli ve kütsüz temel durumlarında, tüm çözümler için barajın memba yüzeyi topuk bölgesinde bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup membadan mansaba doğru yatay bir yayılım sergilemiştir. Barajın mansap yüzeyinde eğiminin değiştiği boyun bölgesinde ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup mansaptan membaya doğru yataya yakın bir yayılım sergilemiştir.

Kütleli ve kütsüz temel durumlarında tüm çözümler için elde edilen Global Kümülatif Hasar İndeksi (GKHİ)' nin zamanla değişim grafikleri karşılaştırıldığında, bu indeksin değerleri yaklaşık 3-5 s. aralığında ani bir artış içerisinde olmuştur. Bu zaman aralığı, tüm çözümlerde yatay doğrultuda elde edilen yer değiştirmelerin zamanla değişim grafiklerinde en büyük değerlerin elde edildiği zaman dilimidir. Kütleli temel durumu ile kütsüz temel durumları karşılaştırıldığında GKHİ değerleri kütleli temel durumunda daha büyük elde edilmiştir. Bununla birlikte, GKHİ' nin değeri dikkate alındığında kütsüz temel durumu için C-4 ve üzerindeki katsayılar ve kütleli temel durumu için C-6 ve üzerindeki katsayılar için sıkışabilir sıvı durumu elde edilmiştir.

Son bölümde ise Koyna beton ağırlık barajının sismik hasar davranışı üzerinde taban absorpsiyon katsayısının etkisi incelenmiştir. Çözümlerde baraj-rezervuar sisteminde taban absorpsiyon katsayısı olan α 'nın 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.00 olması durumları için çözümler elde edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Temel ortamı kütleli/kütsüz durumları için dikkate alınmış olup çözümlerde temelin elastisite modülünün barajın elastisite modülüne oranı (E_t/E_b) 8/1 alınmıştır. Kütsüz ve kütleli temel durumları için $\alpha=0.00$ ve 1.00 çözümleri karşılaştırıldığında genlik ve frekans açısından önemli farklılıklar meydana gelirken geriye kalan diğer durumlar için bu farklılıklar azalmıştır. Kütleli temel durumunda elde edilen yer değiştirme değerleri kütsüz durumda elde edilen yer değiştirme değerlerinden daha büyük elde edilmiştir.

Kütleli ve kütsüz temel durumlarında, tüm çözümler için barajın memba yüzeyi topuk bölgesinde bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup membadan mansaba doğru yatay bir yayılım sergilemiştir. Barajın mansap yüzeyinde eğiminin değiştiği boyun bölgesinde ilave bir hasar bölgesi meydana gelmiş olup kütsüz temel durumu için mansaptan membaya doğru yataya yakın bir yayılım sergilerken kütleli temel durumunda ise mansaptan memba' ya doğru genişleyerek dağınık bir hasar bölgesi oluşturmaktadır.

Kütleli ve kütsüz temel durumlarında tüm çözümler için elde edilen GKHİ' nin zamanla değışim grafikleri karşılaştırıldığında, bu indeksin değeri yaklaşık 3-5 s. aralığında ani bir artış içerisinde olmuştur. Bu zaman aralığı, tüm çözümlerde yatay doğrultuda elde edilen yer değıştirmelerin zamanla değışim grafiklerinde en büyük değerin elde edildiğı zaman dilimidir. Kütleli temel durumu ile kütsüz temel durumları karşılaştırıldığında GKHİ değeri kütleli temel durumunda daha büyük elde edilmiştir. Bununla birlikte, GKHİ' nin değeri dikkate alındığında kütsüz temel durumu için $\alpha=0.00$ durumunda ve kütleli temel durumu için $\alpha=0.25$ durumunda en büyük GKHİ değeri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. Chopra, A. K., 1988, Earthquake Response Analysis of Concrete Dams, Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, Edited by: R. B. Jansen, Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A, 416-465.
- [2]. A.A. Dumanoglu, Y. Calayır ve M. Karaton., 2003, “Beton Ağırlıklı Barajların Rezervuar ve Temel Etkileşimleri Dikkate Alınarak Euler Yaklaşımıyla Deprem Analizi”, Türkiye deprem vakfı teknik raporu TDV/047-82, İstanbul.
- [3]. Clough, R. W., Raphael J. M. And Mojtahedi, S., 1973, ADAP-A Computer Program For Static and Dynamic Response of Linear System, Earthquake Engineering Research Center Report No. EERC 73-14, University of California, Berkeley.
- [4]. Bathe, K. J., 1982, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 725 p.
- [5]. Hall, J. F., Chopra, A. K., 1980, Dynamic Response of Embankment, Concrete-Gravity and Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/39, University of California, Berkeley, California.
- [6]. Karaton, M., 2004, “Sıvı-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Kemer Barajların Dinamik Hasar Analizi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ.
- [7]. Calayır, Y., ve Karaton, M., 2002, Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi: Euler ve Lagrange Çözümleri, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, TUBİTAK, 26, 179-192.
- [8]. Calayır, Y., 1994, Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- [9]. Wilson, E. L., and, Khalvalti, M., 1983, Finite Element for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, Int. J. Num. Methods Eng., 19, 1657-1668.
- [10]. Westergard, H. M., 1933, Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 1835, 418-433.
- [11]. Kutsubo, S., 1959, Dynamic Water Pressures on Dams due to Irregular Earthquakes, Memoirs Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 18, 4, 119-129.

- [12]. Chopra, A. K., 1967, Hydrodynamic Pressures on Dams During Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 93, EM6, 5695, 205-223.
- [13]. Zienkiewicz, O. C., 1964, "Hydrodynamic Pressures Due to Earthquakes", Water Power, 16, 9, 82-388.
- [14]. Zangar, C. N. 1952, Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Horizontal Earthquake Effects, Engineering Monograph No. 11, U.S. Bureau of Reclamation.
- [15]. Humar, J., Ruofail, M., 1983, Finite Element Analysis of Reservoir Vibration, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1, 17698, 215-230.
- [16]. Brahtz, H. A., Heilbron, C. H., 1933, discussion of, Water Pressures on Dams During Earthquakes, by H. M. Westergaard, Transactions, ASCE, 98, 452- 460.
- [17]. Bustamante, J.I., Rosenblueth, E., Herrera, I., Flores, A., 1963, Presion Hidrodinamica en Presas y Depositos, Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica, 1, 2, 37-54.
- [18]. Newmark, N.M., Rosenblueth, E., 1971, Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [19]. Sharan, S. K., 1985, Finite Element Modeling of Infinite Reservoirs, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 111, 12, 20206, 1457-1469.
- [20]. Dumanoglu, A. A., 1978, Zemin G6m6l6 Ağır Yapıların Dinamik Hesabı, Doçentlik Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- [21]. Dumanoglu, A. A., 1980, A Method for the Dynamic Analysis of Embedded Structures, 7th World Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, 5, II, 335-338.
- [22]. Dumanoglu, A. A., Çakıroğlu, E., 2001, Zemin Kısmen G6m6l6 Yapıların Geçirgen Sınırlar Kullanılarak Lineer Olmayan Deprem Analizi, TDV Teknik Rapor, TDV/TR 042-73, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul.
- [23]. Hall, J. F., Chopra, A. K., 1982, Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 305-322.
- [24]. Hall, J. F., Chopra, A. K., 1983, Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1, 17696, 149-167.

- [25]. Tsai, C. S., Lee, G. C., and Ketter R. L., 1990, A Semi Analytical Method for Time-Domain Analyses of Dam-Reservoir Interactions, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 29, 913-933.
- [26]. Porter, C. S., 1980, Chopra, A. K., Dynamic Response of Simple Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/17, University of California, Berkeley, California.
- [27]. Chopra, A. K., 1968, Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 94, EM6, 6297 1475-1500.
- [28]. Chopra, A. K., 1970, Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 96, EM4, 7485 443-454.
- [29]. Chakrabarti, P., 1973, Chopra, A. K., Hydrodynamic Pressures and Response of Gravity Dams to Vertical Earthquake Component, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1, 325-335.
- [30]. Chakrabarti, P., 1973, Chopra, A. K., Earthquake Analysis of Gravity Dams Including Hydrodynamic Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2, 143-160.
- [31]. Chopra, A. K., Chakrabarti, P., 1981, Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, 363-383.
- [32]. Fenves, G., Chopra, A. K., 1984, Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 633-680.
- [33]. Fok, K. L., Chopra, A. K., 1985, Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-85/07, University of California, Berkeley, California,.
- [34]. Fok, K. L., Chopra, A. K., 1986, Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 114, 155-184.
- [35]. Tan, H., Chopra, A. K., 1995, Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water- Foundation Rock Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 1453-1474.

- [36]. Tan, H., Chopra, A. K., 1996, Foundation Rock Interaction Effects in Earthquake Response of Arch Dams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 122, 5 528-538.
- [37]. Finn, W. D. L., Varoğlu, E., 1973, Dynamics of Gravity Dam-Reservoir Systems, *Computer and Structures*, 3, 913-924.
- [38]. Dowling, J. M, 1989, Non-linear Analysis of Arch Dams, *Earthquake Engineering Research Laboratory, Report No: EERL 87-03*, University of California, Berkeley.
- [39]. Bazant, Z. P. and Cedolin, L., 1979, Blunt Crack Band Propagation in Finite element Analysis, *Journal of Engineering Mechanical Division*, ASCE, Volume 105. 297-315.
- [40]. Bhattacharjee, S. S., 1993, Smeared Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams for Static and Seismic Loads, McGill University, PhD. thesis, Montreal, Canada.
- [41]. Bhattacharjee, S. S., and Léger, P. 1993, Seismic Cracking and Energy Dissipation in Concrete Gravity Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 991-1007.
- [42]. Vatani, O. A. ve Dumanoglu, A. A, 1997, Çatlakların Beton Ağırlık Barajların Dinamik Davranışına Etkisi, *TMMOB Teknik dergi*, 8, 3, 1457-1470.
- [43]. Calayır, Y. ve Karaton, M., 2002, Beton Ağırlık Barajların Lineer Olmayan Dinamik Çatlak Analizi, *Beşinci İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, ACE2002*, İstanbul, 63-72, İstanbul.
- [44]. Calayır, Y., and Karaton, M., "Seismic Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Reservoir Interaction", *Computers&Structures*, 1595-1606 pp., 83, 19-20, 2005 , DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.02.003.
- [45]. Manfredi, C. G., 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.
- [46]. Cervera, M, and, Oliver, J., 1995, Seismic Evaluation of Concrete Dams via Continuum Damage Models, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 1225-1245.
- [47]. Ghrib, F. and Tinawi, R. 1995, An Application of Damage Mechanics for Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 24, 157-173.

- [48]. Lee, J., and Fenves, G. L., 1998, A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 9, 937-956.
- [49]. Rodriguez, M. E., and Aristizabal, J. C., 1999, Evaluation of a seismic damage parameter, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 5, 463-477.
- [50]. Valliappan, S., Yazdchi, M. and Khalili, N., 1999. Seismic Analysis of Arch Dams- A Continuum Damage Mechanics Approach, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45, 1695-1724.
- [51]. Calayır, Y., and Karaton, M., "A Continuum Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dam-Reservoir System", *International Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 857-869 pp., 25, 11, 2005 DOI: 10.1016/j.soildyn.2005.05.003.
- [52]. Bazant, Z. P., He, S., Plesha, M. E., Gettu, R. and Rowlands, R. E, 1991, Rate and Size Effects in Concrete Fracture: Implications for Dams, *Proc. Int. Conf. Dam Fracture*, Boulder, CO, 413-425.
- [53]. Dahlblom. O. and Ottosen N. S., 1990, Smeared crack analysis using generalized fictitious model, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 116, 55-76.
- [54]. Rea, D., Liaw, C-Y., Chopra, A.K., 1975, Mathematical Models for the Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 249-258.
- [55]. Priscu, R., Popovici, A., 1985, Stenatiu, D., Stere, C., *Earthquake Engineering for Large Dams*, Editura Academiei, București,.
- [56]. Zeinkiewicz, O. C., Taylor, R. L., 1991, *The Finite Element Method*, Fourth edition, Volume 2, McGraw-Hill, London,.
- [57]. Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., 1989, *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley and Sons. , Singapore.
- [58]. Zienkiewicz, O. C., and Newton, R. E., 1969, Coupled Vibrations of a Structure Submerged in a Compressible Fluid, *Proceeding of the International Symposium on Finite Element Techniques*, Stuttgart, Germany, 359-379.
- [59]. Zeinkiewicz, O. C., 1991, Taylor, R. L., *The Finite Element Method*, Fourth edition, Volume 2, McGraw-Hill, London.

- [60]. M. Karaton ve Y. Calayır, "Baraj-Rezervuar-Temel Etkileşimi Dikkate Alınarak Beton Ağırlık Barajların Sismik Hasar Analizi", XVI. Ulusal Mekanik Kongresi, TUMTMK-XVI, 783-792 pp., Kayseri, Türkiye, Haziran 2009.
- [61]. Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, London, 1991.
- [62]. ANSYS, Swanson Analysis System, Mechanical Toolbox, Release 10.0.

ÖZGEÇMİŞ

Ertuğrul ÇAMBAY 1988 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Elazığ Mezire İlköğretim okulunda tamamladı. 2007 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği lisans öğrenimime başladı. 2012 yılının Şubat ayında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekanik Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimime başlamış olup halen devam etmektedir.