

# Beton Barajların Deprem Davranışlarının İncelenmesinde Kullanılan Analiz Metotları

Alper ALDEMİR<sup>1</sup>  
Sema Melek YILMAZTÜRK<sup>2</sup>  
Ali Rıza YÜCEL<sup>3</sup>  
Barış BİNİCİ<sup>4</sup>  
Yalın ARICI<sup>5</sup>  
Altuğ AKMAN<sup>6</sup>

## ÖZ

Barajların deprem davranışlarının belirlenmesinde baraj, zemin ve rezervuar etkileşiminin dikkate alınması oldukça önemlidir. Ayrıca olası risklerinin belirlenmesi için doğrusal olmayan analizlerin de gerçekleştirilmesi gerekebilmektedir. Bu amaçla Devlet Su İşleri Müdürlüğü önderliğinde "Beton Barajların Tasarım İlkeleri" hazırlanmıştır. Bu rehberin hazırlanmasına katkıda bulunan yazarlar, beton baraj sismik tasarımı hususunda literatür değerlendirmelerini, yapısal analiz araçlarını, baraj sismik güvenliğine ilişkin görüşlerini ve örnek çözümlerini sunmaktadır. Çalışma iki ve üç boyutlu analizlerin gerekliliği, doğrusal olmayan analizlerin uygulama şekli ve baraj deprem davranışını etkileyen önemli faktörler konusunda önemli sonuçlar ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton barajlar, analiz yöntemleri, tasarım.

## ABSTRACT

### Analysis Methods for the Investigation of the Seismic Response of Concrete Dams

The consideration of the dam-foundation-reservoir interaction is extremely important for estimating the seismic response of concrete gravity dams. Moreover, nonlinear analysis may be required for determining the possible risk associated with dams. In order to address these issues, DSI recently published the "Guidelines for Seismic Design of Concrete Dams". Authors who have contributed to the preparation of this document provide a perspective on the seismic safety/design of concrete dams and structural analysis methods

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11.07.2013 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

- 1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - aaldemir@metu.edu.tr
- 2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ymelek@metu.edu.tr
- 3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - alirizayucel@gmail.com
- 4 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - binici@metu.edu.tr
- 5 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - yarici@metu.edu.tr
- 6 Es Proje Müh. Müş. Ltd. Şti., Ankara - altugakman@esproje.com

along with a set of illustrative solutions. The study presented herein provides important results on the necessity of conducting two and three dimensional seismic analysis, the use of nonlinear analyses techniques and the important factors that affect the seismic response of the concrete gravity dams.

**Keywords:** Concrete dams, analysis methods, design.

## 1. GİRİŞ

Ülkemizin artan içme suyu, sulama ve enerji ihtiyacını karşılamak için su kaynaklarının verimli olarak kullanılması gerekmektedir. 2009 yılı itibari ile su kaynaklarımızın yaklaşık %35'i verimli olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan ciddi yatırımlar ile gelişmiş ülkeler seviyesinde verimli su kaynaklarına sahip olmamız mümkün olacaktır. 2005 yılından itibaren su yapılarının inşaa ve işletme hakları özel sektöre açılmıştır. Özel sektör, hızlı yatırım geri dönüşü amacıyla su yapılarının tasarım ve inşaa sürelerini asgariye indirme gerekliliği hissetmiştir. Bilindiği gibi geçtiğimiz 50 yıl boyunca DSİ tarafından genellikle kil çekirdekli kaya dolgu baraj yapımı tercih edilmiştir. İnşaa sahasına yakın kil bulunan durumlarda bu tip barajlar oldukça ekonomik olabilmektedir. Ayrıca, kil çekirdekli kaya dolgu barajların tasarım ve inşaa konusunda ülkemizde geniş bir tecrübe bulunmaktadır. Ancak, son yıllarda alternatif baraj tipleri olan silindirik sıkıştırılmış beton (SSB), ön yüzü beton kaplı kaya dolgu (ÖYBKKD) barajlar yapım hızı ve kolaylığı sebepleri ile yaygınlık kazanmıştır. 1970'li yılların sonlarında ortaya çıkan SSB teknolojisi beton barajların yapımına yeni bir ivme kazandırmıştır. SSB, düşük su-çimento oranı ve yüksek agrega boyutu ile oldukça ekonomik, kolay ve hızlı yerleştirilebilen bir malzemedir (ACI 207 [1]). SSB kullanılarak inşaa edilen barajlar, kil yerine puzolan veya uçucu külün sahaya yakın temin edilebileceği durumlarda asgari inşaa süreleri elde etmek için oldukça uygun bir baraj tipidir. 2005 yılına kadar birkaç istisna dışında hemen hiç ilgi görmemiş SSB barajların, onlarca bu tarihten sonra tasarlanmış, inşaa edilmiş veya edilmektedir.

Ülkemiz topraklarının önemli bir kısmı deprem tehlikesi altındadır. Bu tehlike, geçmiş deprem gözlemlerinden de öğrenildiği üzere ülkemizi ciddi deprem riski altında bırakmaktadır. Benzer bir riskin su yapıları için de söz konusu olması durumu ülke için önemli bir risktir. Benzer tehlikenin bulunduğu ülkelerin başında Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya gelmektedir. ABD, 1970'li yıllardan beri FERC (Federal Energy Regulatory Commission), USACE (United States Army Corps of Engineers) ve USBR (United States Bureau of Reclamation) gibi devlet kuruluşlarının desteği ve akademisyenlerin katkısı ile barajların depreme dayanıklı tasarımı ve deprem tahkikleri konularında ciddi çalışmalar yapmıştır. Bilimsel ve kurumsal çalışmalar, baraj-zemin-hidrokinamik etkileşimlerini dikkate alan depreme dayanıklı su yapıları inşaa için gerekli rehber doküman, yazılım ve bilgi birikiminin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Benzer şekilde Japonya'da 2000'lerin başlarında ülkenin en büyük enerji üreticisi olan TEPCO (Tokyo Elektrik İşletmeleri) fonu ile deprem etkileri altında baraj güvenliği konusu akademisyen ve mühendisler tarafından çalışılmıştır. Çalışmaların neticesinde ilgili kılavuz dokümanlar ve yazılımlar üretilmiştir. Bu kapsamda Kuzey Amerika ve Japonya'da pek çok barajın değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi konusunda doğrusal olmayan yöntemler kullanılmaktadır (Chen vd. [2] ve Yamaguchi vd. [3]). Deprem riskinin yüksek olmadığı Orta ve Kuzey Avrupa ülkelerinde deprem yükleri için baraj tasarımı bilgisi sınırlı olup

genellikle Amerika menşeli basitleştirilmiş metotlar ile tasarımlar gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde ise son yıllara kadar baraj tasarımının kil çekirdek kaya dolgu baraj tasarımından miras olan basitleştirilmiş stabilite analizleri ile yapılmakta olduğu görülmektedir. İlerleyen bilgi ve teknoloji seviyesi sahaya özel deprem tehlikesinin daha detaylı hesaplanmasına olanak vermekte ve (sahaya özel) olası deprem senaryoları ve sentetik kayıtları oluşturma imkanı sunmaktadır. İstem tarafında elde edilebilen bu önemli verilerin detaylı sayısal analizlerde kullanılması ile baraj performansının ve riskinin tespit edilmesi, yeni sistemlerin tasarlanması ve mevcutların tahkik edilmesi en güncel yaklaşımdır. Bu güncel yaklaşımların ulusal mühendislik pratiğinde uygulanır hale gelmesi ile tasarım firmalarımızın yurt dışında da rekabet imkanına ulaşması mümkün olacaktır.

Beton barajlar büyük yer ivmelerine tabi tutulduğunda oldukça fazla hasar alabilmektedir. Buna örnek olarak Nuss vd. [4] yaptığı çalışma incelenecek olursa dünyada belirgin hasar gözlemlenen beton barajlar olduğu ve bazılarının ciddi hasarlar aldıkları anlaşılmaktadır (Tablo 1). Bu nedenle hasar aldıklarında felakete yol açabilecek bu önemli yapıların tasarım aşamasında özen gösterilmeli ve deprem etkisi altındaki gerçekçi deprem davranışının mümkün olduğunca iyi bir şekilde ortaya konması sağlanmalıdır. Ülkemizdeki mevcut barajların geçmiş depremlerde almış olduğu hasarları derleyen sistematik bir çalışma bulunmamaktadır. Bu kapsamda bir çalışmanın özellikle kaya ve toprak dolgu barajlar için DSİ tarafından yapılmakta olduğu bilgisi yazarlara iletilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere özellikle SSB barajların sayısı ancak geçen beş yıl içerisinde artmış olup bu barajların gerçek deprem performansına ilişkin bir veri elde etmek henüz mümkün değildir.

Tüm dünyada basit stabilite esaslı tasarım metotlarının yerini sayısal modellere dayalı tasarım yöntemleri almıştır. Bu ileri teknikler, mühendislik camiamızın sıklıkla karşılaştığı kısıtlı zaman ve öğrenmeye vakit bulamama sebepleri ile henüz yaygınlık kazanamamıştır. DSİ tarafından 2012 yılında taslak olarak yayınlanan ve 2014 yılında nihai haline kavuşan “Beton Barajların Tasarım İlkeleri (BBTİ) [5]” isimli döküman aslında bu eksiklikleri gidermeye yönelik önemli bir adımdır. Bu makalenin öncelikli amacı, BBTİ’de verilen ilkelerin bilimsel altyapısını sunmak ve kullanıcıların dikkat etmesi gereken hususlara işaret etmektir. Ayrıca, uygulamalı karşılaştırmalar ve parametrik çalışma sonuçları sunularak karmaşık simülasyon araçlarının kullanılması ile elde edilecek sonuçlara ilişkin bir mühendislik sezgisi ortaya konmaya çalışılacaktır. Çalışma sonuçlarının ülkemizdeki mühendislik pratiğine BBTİ ile yön verilmesi hususunda önemli bir referans olabileceği düşünülmektedir.

## 2. DEPREM ANALİZLERİ

### 2.1. Genel

Diğer birçok yapıdan farklı olarak yayılı kütle dağılımına sahip barajların sismik taleplerinin belirlenmesinde yapı-zemin-rezervuar etkileşimlerinin dikkate alınması oldukça önemlidir (Fenves ve Chopra [6]). Deprem esnasında suyun memba yüzündeki hareket ile oluşan hidrodinamik kuvvetler, hidrostatik etkiler mertebesinde ve hatta daha fazla olabileceğinden muhakkak dikkatle hesaplanmalıdır. Hidrodinamik kuvvetler, deprem hareketine, suyun sıkıştırılabilir olmasına, rezervuarın şekline ve baraj memba yüzü geometrisine göre değişebilir. Barajlar oldukça rijit yapılar olduğundan üzerine oturdukları

genellikle daha yumuşak zemin yapısının baraj dinamik davranışı üzerinde önemli etkileri olabilir. Kaya zemin baraj titreşim periyotlarını değiştirmenin yanında frekansa bağlı değişen rijitlik ve sönüm sağlar. Kinematik etkileşim sonucu baraja ulaşan deprem dalgalarının baraj gövdesinden yansması ile enerji taşıyarak uzaklaşması ısıma sönümüne sebep olur. Ayrıca zemin rijitliği dinamik durumda frekansa bağlı olarak değişim göstermektedir. Rezervuar ve zemine ilave olarak baraj gövdesinin dinamik ve lineer ötesi davranışı da barajların deprem performansı hususunda belirleyicidir. Bahsi geçen bu etkilerin dikkate alındığı pek çok bilimsel çalışma bulunmaktadır (Örneğin Fenves ve Chopra [7], Wang ve Chopra [8]).

Beton gerilme şekil değiştirme eğrisi hem basınç hem de çekme altında yumuşama göstermektedir. Bu sebeple beton yarı gevrek bir malzeme olarak kabul edilebilir. Ayrıca beton agrega ve çimento pastasından oluşan kompozit bir malzeme olması sebebi ile çatlak ilerlemesi oldukça düzensiz ve karmaşık bir şekilde gerçekleşmekte ve tahmini zor bir hal almaktadır. Betonun basınç-kayma yüklemeleri altında basınç miktarına bağlı olarak deformasyon yapabilme yeteneği de bulunmaktadır. Malzeme kaynaklı bu doğrusal elastik olmayan davranışa ilave olarak depremin baraj gövdesi üzerinde oluşturduğu gerilme dağılımı da barajlarda oluşması beklenen doğrusal elastik olmayan davranış için belirleyicidir. Yüksek mod etkileri, gövde ve tabanda oluşan çatlakların iç gerilme dağılımını değiştirebilmesi gibi etmenler barajların deformasyon yapabilme yeteneği üzerinde etkindir. Barajlar için deprem performanslarının belirlenmesine ilave olarak havza bazında yapılacak risk çalışmaları için muhakkak baraj göçme şekilleri hakkında bilgi sahibi olunması gereklidir.

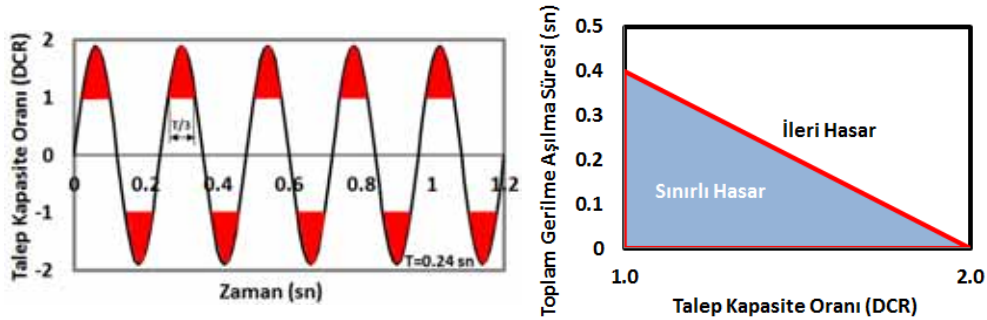
Yukarıda özetlendiği üzere barajların deprem davranışları için hem dinamik yapı-zemin rezervuar etkileşimi hem de doğrusal elastik olmayan davranış önemlidir. Yapı-zemin-rezervuar etkileşiminin çözümü elastik durum için dahi frekans tanım alanında çözüm gerektirmekte, doğrusal elastik olmayan davranışın ise zaman-tanım alanında çözümlerle yapılması gereklidir. Her iki problemin bir arada çözüldüğü hibrit yaklaşımlar ve özel sayısal metotlar mevcut olmasına karşın akademisyenler arasında dahi genel kabul görmüş bir metodoloji bulunmamaktadır (Tsai vd. [9], Tsai ve Lee [10], Beskos [11], Bernel ve Youssef [12] ve Taghipour vd. [13]). Bu sebeple, barajların deprem analizlerinde genellikle iki yaklaşım kullanılmaktadır: 1-Yapı-zemin-rezervuar etkileşimini gerçekçi (veya basitleştirilmiş olarak) dikkate alan elastik dinamik analizler, 2-Basitleştirilmiş yapı-zemin-rezervuar etkileşimini dikkate alan ve beton doğrusal elastik olmayan davranışı modellemeye olanak veren yöntemler. BBTİ, diğer ülkelerde bulunan rehber dökümanlara benzer olarak her iki yaklaşımı da benimsemiştir. Bu kapsamda ilk olarak bir baraj kesiti için muhakkak lineer elastik analizler gerçekleştirilmesi ve tasarım depremi için gerilme esaslı performans kriterlerinin kontrolü yapılması önerilmektedir. Elastik gerilme tabanlı performans kriterlerini (aşağıda hesap detayları sunulmaktadır) sağlayan en küçük kesit güvenli ve en ekonomik kesit olarak kabul edilebilir. Performans kriterlerinin sağlanmaması durumunda, kriter sağlanana kadar kesit büyütülebilir veya daha yüksek dayanımlı beton tüm veya yerel olarak baraj gövdesi için kullanılabilir. Özellikle deprem tehlikesinin fazla olduğu bazı durumlarda lineer elastik analiz ile optimum bir tasarım yapmak mümkün değildir. Zira, elastik analiz yöntemi, özellikle memba topuğu ve geometrinin kırıldığı bölgelerde oluşan gerilme yığılmaları sebebi ile hiçbir zaman gerilme esaslı performans kriterlerinin sağlanmasına olanak vermeyebilir. Bu durumda baraj gövdesi ve baraj-zemin ara yüzünde meydana gelebilecek doğrusal elastik olmayan

davranışı modelleyerek doğrusal elastik olmayan analizler gerçekleştirilir. Doğrusal elastik olmayan analiz sonuçları ve elde edilen çatlak boyut ve uzunlukları değerlendirilerek barajın deprem güvenliği tahkik edilir.

Tablo 1. Kayda Değer Ölçüde Sarsılan (PGA>0,3g) Beton Barajlar ve Hasarları [4]

Baraj İnşa Tarihi	Ülke	Yükseklik (m)	Kret Uzunluğu (m)	Deprem Adı ve Tarihi	Uzaklık (km)	Büyükük	PGA (g)	Hasar Durumu
<b>Beton Ağırlık Barajları</b>								
Lower Crystal Springs (1890)	Amerika	47	183	San Francisco (1906)	0,4	8,3	0,52 - 0,68	Çatlama dahi yok
Koyna (1963)	Hindistan	103	853	Koyna (1967)	3	6,5	0,63	Barajın iki yüzünde de çatlaklar
Williams (1895)	Amerika	21	27	Loma Prieta (1989)	9,7	7,1	0,6	Hasarsız
Bear Valley (1912, 1988)	Amerika	28	110	Landers (1992)	45	7,4	0,18	Kemer baraj 1988 yılında ağırlık barajına dönüştürüldü.
				Big Bear (1992)	14,5	6,6	0,57	Kret köprü girişlerinde hafif oynamanın dışında hasarsız
Gohonmatsu (1900)	Japonya	33	110	Kobe (1995)	1	7,2	0,83	Hasarsız (Yığma Baraj)
Shih Kang (1977)	Tayvan	21,4	357	Chi Chi (1999)	0	7,6	0,51	9 m'lik dikey deplasman ve betonda kırılmalar
Mingtian (1990)	Tayvan	82	-	Chi Chi (1999)	12	7,6	0,4 - 0,5	Hasarsız
Kasho (1989)	Japonya	46,4	174	Western Tottori (2000)	3 ya da 8	7,3	0,54	Kretteki kontrol binasında çatlaklar
Uh (-)	Japonya	14	34	Western Tottori (2000)	1 ya da 3	7,3	1,16	Dolusavak tabanında küçük çatlaklar
Takou (2007)	Japonya	77	322	Tohoku (2011)	109	9	0,38	Kretteki kapıcı odasında çatlaklar
Miyatoko (1993)	Japonya	48	-	Tohoku (2011)	135	9	0,32	Hasarsız
<b>Beton Kemer Barajlar</b>								
Gibraltar (1920, 1990)	Amerika	52	183	Santa Barbara (1925)	-	6,3	> 0,3	Hasarsız
Pacoima (1929)	Amerika	113	180	San Fernando (1971)	5	6,6	0,6 - 0,8	Kemerde çatlak yok. Kemer ve taban yatağı arasında açılma
				Northridge (1994)	18	6,8	0,53	Kemer ve taban yatağı arasında açılma (5 cm)
Ambiesta (1956)	İtalya	59	145	Gemona-Friuli (1976)	20	6,5	0,36	Hasarsız
Rapel (1968)	Şili	111	270	Santiago (1985)	45	7,8	0,31	Dolusavak ve su alma yapısında hasar
				Maule (2010)	232	8,8	0,302	Asfalt kaplamasında çatlaklar
Techi (1974)	Tayvan	185	290	Chi Chi (1999)	85	7,6	0,5	Kretteki curb'de lokal çatlaklar
Shapai RCC (2003)	Çin	132	250	Wenchuan (2008)	32	8	0,25 - 0,50	Hasarsız
<b>Beton Payandalı Barajlar</b>								
Hsinfengkiang (1959)	Çin	105	440	Reservoir (1962)	1,1	6,1	0,54	Barajın üst kısımlarında yatay çatlaklar
Sefid Rud (1962)	İran	106	417	Manjil (1990)	Baraj Yakınlarında	7,7	0,71	Barajın üst kısımlarında yatay çatlaklar ve bloklar arası hafif oynamalar

Baraj kesitinin gerilme taleplerine bakılarak kesitin yeterli olup olmadığına karar vermek maksadıyla USACE-EM-1110-2-6051'de [14] verilen elastik analiz performans kabul kriterleri BBTİ'de [5] yer almıştır. Bu metoda göre zaman tanım alanında yapılan lineer analizlerden talep – kapasite oranları ve toplam gerilme aşılma süreleri hesaplanmaktadır. Daha sonra toplam aşılma zamanına talep kapasite oranları çizilmekte ve bu eğri sınır çizgisi ile karşılaştırılmaktadır (Şekil 1). Sınır çizgisi yatay eksende 2, düşey eksende ise 0.4sn ile sınırlanmıştır. Yatay eksende kullanılan iki sayısı, dinamik çekme dayanımının statik çekme dayanımına oranı (1.5) ve betonun çekme altında göstereceği doğrusal olmayan davranışın bir bileşkesidir (Raphael [15]). Belirlenen istem limitlerin altında kalırsa beklenen hasarın sınırlı kalacağı söylenebilir. Sınırlı hasar, dinamik çatlama dayanımının yaklaşık %30 mertebesinde geçildiği çatlamanın sınırlı kaldığı ve baraj dinamik özelliklerinde ve davranışında elastik davranıştan çok farklı bir aşamaya geçilmediğine işaret etmektedir. Sınır çizginin ötesine geçen noktalar bulunması durumunda ise ileri hasar beklenmektedir. İler hasar durumu ise çatlama sebebi ile baraj dinamik özelliklerinin ve deprem davranışının ciddi anlamda değiştiği seviyedir. Bu durumda artık lineer elastik analiz olası hasar tespitini belirleme hususunda yeterli değildir. Bu sebeple, aşılma durumunda daha detaylı doğrusal elastik olmayan analiz yapılması önerilmektedir. BBTİ'de verilen sınır çizgi USACE-EM-1110-2-6051'de [14] verileden farklı olarak ağırlık ve kemer barajlar için aynı tanımlanmıştır. Ayrıca BBTİ, USACE-EM-1110-2-6051'e [14] göre doğrusal olmayan analizler için çok daha detaylı bir rehber sunmaktadır.



(a) Aşılma Zamanı Hesabı

(b) Değerlendirme Ölçütleri

Şekil 1. BBTİ Değerlendirme Methodu [3]

BBTİ'ye göre lineer elastik analizler; stabilite analizleri, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizler olmak üzere sınıflandırılabilir. Doğrusal elastik olmayan analizler ise iki Boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizler olarak sıralanabilir. Tablo 2'de BBTİ'ye göre azami yer ivmesi, baraj boyutları ve analiz amacına bağlı olarak kullanılması önerilen analiz türü sunulmaktadır. Bu tabloya göre azami yer ivmesinin düşük olduğu durumlarda lineer elastik statik analiz yöntemlerinin kullanılması yeterlidir. Azami yer ivmesinin 0.2g'nin üzerinde olduğu durumlarda ise asgari olarak kati tasarım için lineer elastik dinamik analiz, mevcut bir barajın değerlendirilmesi için ise lineer doğrusal elastik

olmayan dinamik analiz gerekli görülmektedir. Baraj aksının, yüksekliğine göre yeterince uzun olduğu durumlarda iki boyutlu analiz yapılması yeterli görülmektedir. İki boyutlu analizler düşey derzlerin bulunması durumunda düzlemsel gerilme, dersiz inşa durumu için ise düzlemsel şekil değiştirme sayısal modelleri ile gerçekleştirilmelidir. Tablo 2’den görüldüğü üzere düşey derzlerin bulunmadığı dar vadiye inşa edilen baraj gövdelerinin analizlerinde üç boyutlu analizler yapılması zorunludur.

Ülkemizde iki ve üç boyutlu lineer elastik ve doğrusal elastik olmayan analizler dışında ön tasarım ve boyutlandırma maksadı ile rijit blok stabilite analizleri yapılmaktadır. Stabilite analizlerinde baraj gövdesi ve zemin rijit olarak kabul edilir ve deprem etkileri etkin yer ivmesi katsayısıyla dikkate alınır. Bu yöntemde hidrodinamik etkiler genellikle ekli kütle metodu (Westergaard [16]) ile hesaplanır. Eşdeğer yatay deprem kuvveti ile stabilite hesapları dolgu baraj tasarım geleneğinin bir mirası olarak değerlendirilebilir. Bu yöntem içinde deprem mühendisliğinin ana istem parametresi olan periyoda bağlı spektral ivme değeri kullanılmamaktadır. Yapı dinamik özelliklerinin dikkate alınmaması ve rijit baraj öngörüsü ile baraj gerilme dağılımı genellikle doğru olmayan tasarımlara yol açmaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için genellikle etkin yer ivmesi değeri analizlerde azaltılarak kullanılır. Etkin yer ivmesi azaltma katsayısının beton barajlarda kullanımı için bilimsel bir altyapı bulunmamaktadır. Fenves ve Chopra’nın [17] önerdiği basitleştirilmiş yaklaşımda ise zeminden kaynaklanan ek sönüm, temel periyotta hesaplanmış hidrodinamik etkiler ve zemin rezervuar yapı etkileşiminden kaynaklanan sönüm ve periyot değişimi yaklaşık olarak dikkate alınarak spektral ivme değeri kullanılmaktadır. Stabilite analizleri ile incelenen kesitin kayma veya devrilmeye karşı güvenliği kontrol edilir. Ayrıca, incelenen baraj kesitinde giriş teorisi kabulleri ile gerilme hesapları yapılabilir. Stabilite analizleri ile dinamik yapı davranışını, hidrodinamik ve deprem etkilerini ve yapı zemin rezervuar etkileşimini doğru olarak hesaplamak mümkün olmadığından, yöntem sadece kesit hakkında fikir edinmek için yapılan ön analizlerde kullanılmalıdır. Bu yöntemin kati tasarım için kullanımı sakıncalıdır. Bu durum Yücel [18] tarafından yapılan çalışmada ortaya konmuştur. Yücel [18] 50, 100, 150 m yüksekliğe sahip beton baraj kesitlerinin optimum tasarımlarını (düşey ön yüzlü kesitte en küçük mansap eğimi veren kesit) psödostatik yöntem Fenves ve Chopra’nın [17] ve frekans tanım alanında dinamik analizler ile belirlemiştir. Sonuçlar, psödostatik yöntemin daha küçük kesitler vererek güvensiz baraj tasarımına yol açabildiğini göstermiştir.

## 2.2. İki Boyutlu (2B) Lineer Analiz

İki boyutlu lineer analiz metodu dünya literatüründe oldukça yaygın bir şekilde kullanılan bir yaklaşımdır. İki boyutlu analizler, en basit hali ile Westergaard ek kütle ile hidrodinamik etkilerin, kütsüz zemin modeliyle ise zemin rijitliğinin dikkate alınması ile gerçekleştirilebilir (Şekil 2.a). Dinamik yapı zemin rezervuar etkileşimini, sıkıştırılabilir su ve kütleli zemin etkileriyle (yarı sonsuz düzlem) dikkate alan metod ise bu analizlerin lineer elastik olarak yapılabildiği en kapsamlı araçtır (Şekil 2.b). Bu yöntem ile baraj gövde gerilmelerinin elastik sınırlar içinde mümkün olduğunca gerçekçi olarak belirlenebilmesi mümkündür. Fenves ve Chopra [19] tarafından geliştirilen 2B dinamik baraj-zemin-rezervuar etkileşim modeli için akış şeması Şekil 3’te sunulmaktadır. İki boyutlu lineer analizlerin sonucunda elde edilen gerilme talepleri vasıtasıyla optimum kesit belirlenebilmekte veya mevcut bir kesit için gerilme yığılması bölgeleri ve olası hasar

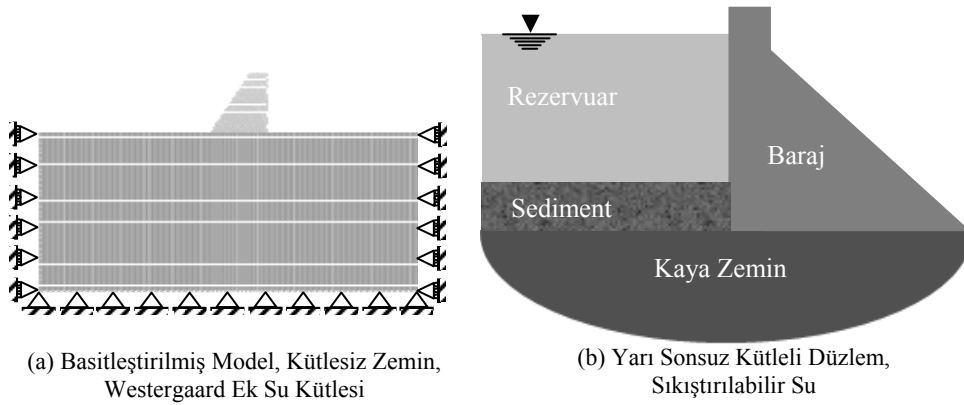
*Beton Barajların Deprem Davranışlarının İncelenmesinde Kullanılan Analiz Metotları*

tahmini yapılarak baraj rehabilitasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemin uygulandığı EAGD-84 programının ülkemizdeki barajların tasarımı ve tahkiki için kolay bir şekilde kullanılmasına olanak veren kullanıcı dostu arayüz Yücel [18] tarafından sunulmuştur.

*Tablo 2. Beton Ağırlık Barajlar için Deprem Analiz Yöntemleri*

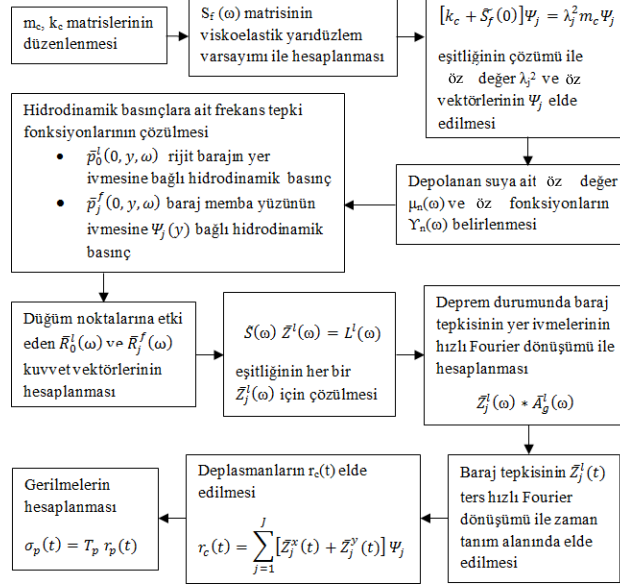
Azami Yer İvmesi	L/H <sup>1</sup>	Düşey Derz <sup>2</sup>	Kati Tasarım <sup>3</sup>	Değerlendirme
< 0.2 g	> 4	Var	İki Boyutlu Statik Lineer Analiz <sup>4</sup>	İki Boyutlu Dinamik Lineer Analiz <sup>4</sup>
	> 4	Yok	İki Boyutlu Statik Lineer Analiz <sup>5</sup>	İki Boyutlu Dinamik Lineer Analiz <sup>5</sup>
	< 4	Var	İki Boyutlu Statik Lineer Analiz <sup>4</sup>	İki Boyutlu Dinamik Lineer Analiz <sup>4</sup>
	< 4	Yok	Üç Boyutlu Statik Lineer Analiz	Üç Boyutlu Dinamik Lineer Analiz
> 0.2 g	> 4	Var	İki Boyutlu Dinamik Lineer Analiz <sup>4</sup>	İki Boyutlu Dinamik Lineer Ötesi Analiz <sup>5</sup>
	> 4	Yok	Üç Boyutlu Dinamik Lineer Analiz <sup>5</sup>	İki Boyutlu Dinamik Lineer Ötesi Analiz <sup>5</sup>
	< 4	Var	İki Boyutlu Dinamik Lineer Analiz <sup>4</sup>	İki Boyutlu Dinamik Lineer Ötesi Analiz <sup>4</sup>
	< 4	Yok	Üç Boyutlu Dinamik Lineer Analiz	Üç Boyutlu Dinamik Lineer Ötesi Analiz

1: L/H oranı baraj aks uzunluğunun en derin kesit yüksekliğine oranıdır, 2: Düşey derzlerin mabdan mansaba doğru sürekli olduğu durumlarda düşey derz var kabul edilir. 3: Baraj aksında karp, eğrilik gibi iki boyut modellenmesini etkileyen geometriler bulunması halinde üç boyutlu analizler gerçekleştirilmelidir. 4: Düzlemsel Gerilme Sonlu Eleman modeli kullanılacaktır. 5: Düzlemsel Şekil Değiştirme Sonlu Eleman modeli kullanılacaktır.



*Şekil 2. 2B Modeller*





Şekil 3. EAGD Programı Analiz Prosedürü

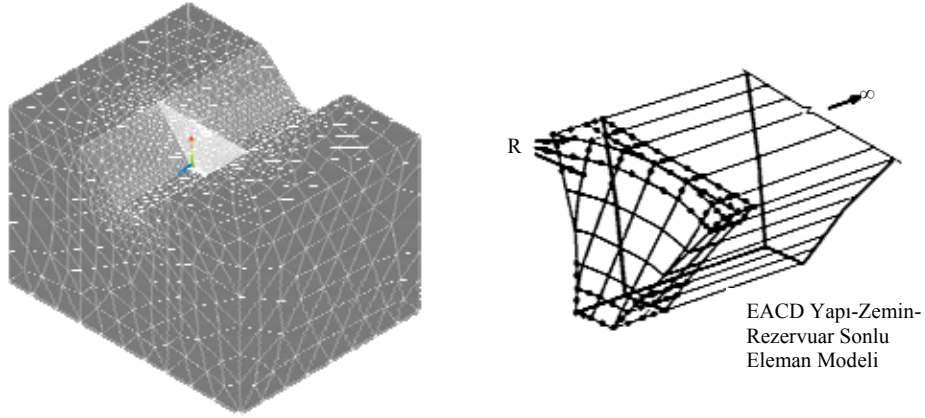
### 2.3. 3B Lineer Analizler

Üç boyutlu lineer analizler basitleştirilmiş (Westergaard ek kütlesi + kütleli zemin) veya gerçekçi etkileşim modelleri olarak iki sınıfa ayrılabilir (Şekil 4). Dünya pratiğinde bahsi geçen gerçekçi lineer elastik dinamik analiz yaklaşımı (Wang ve Chopra [8] tarafından geliştirilen yöntem) için akış şeması Şekil 5’de sunulmaktadır. Bu yaklaşım vasıtasıyla dinamik analizler ile lineer elastik kabuller çerçevesinde baraj deprem davranışını belirlemek ve baraj gövde elastik gerilme istemlerini mümkün olduğunca gerçekçi olarak belirlemek mümkündür. Ayrıca, üç boyutlu lineer analizlerin sonucunda elde edilen gerilme talepleri vasıtasıyla bir önceki bölümde anlatılan gerilme tabanlı tahkikler ile baraj kesitlerinin yeterliliği, gerilme yığılma bölgeleri ve gerekli baraj rehabilitasyonları tespit edilebilir.

### 2.4. Doğrusal Elastik Olmayan Analizler

İki ve üç boyutlu analizler neticesinde elastik performans sınırlarının aşıldığı barajlarda doğrusal elastik olmayan analizler ile baraj hasarı tahmin edilerek baraj güvenliği belirlenmelidir. Doğrusal elastik olmayan dinamik analizler genellikle zaman tanım alanında adım adım integrasyon yöntemi ile gerçekleştirilir [20]. Bu analizlerde frekans tanım alanı analiz sonuçları ile uyumlu sönüm miktarı veya Fenves ve Chopra [17] tarafından verilen sönüm oranları kullanılabilir. Doğrusal elastik olmayan analizlerde beton çatlaması yayılı veya ayrık çatlak modelleri ile temsil edilebilir. Yayılı çatlak modellerinde (Şekil 6.a) ilk çatlak asal eksenler yönünde oluşur. Gerilme-şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak asal eksenler yönünde integrasyon noktasına ait rijitlik değerleri belirlenir ve

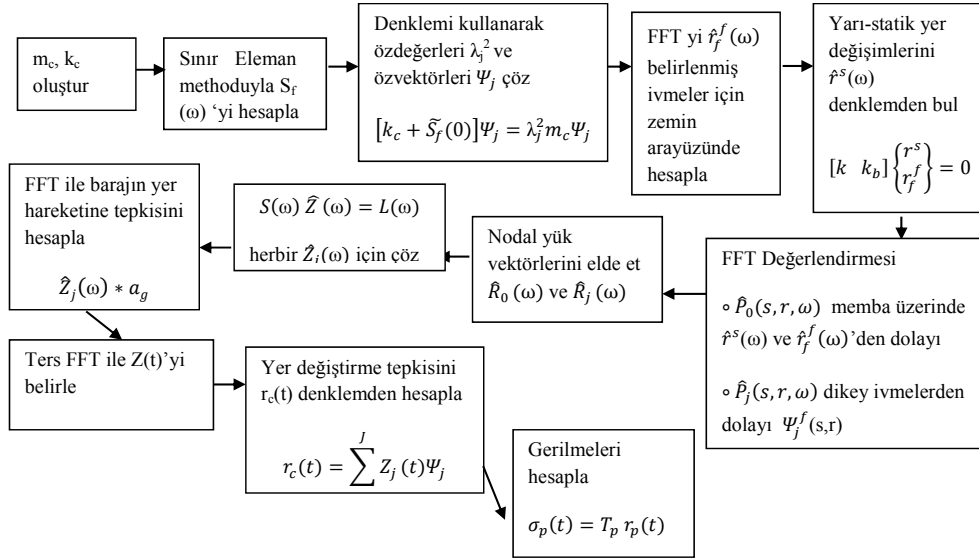
rijitlik matrisleri oluşturulur. Döner çatlak modellerinde bir sonraki çatlak, yeni asal eksenlerde oluşur ve yeni rijitlik hesapları yeni asal eksenlerde yapılır. Sabit çatlak modellerinde ise ilk oluşan çatlak yeri sabit alınır ve çatlakta gerilme-şekil değiştirme (kayma dahil olmak üzere) bağıntıları kullanılarak rijitlikler belirlenir (Vecchio [20 ve 21], Bhattacharjee ve Leger [22], Leger ve Bhattacharjee [23]). Ayrık çatlak yönteminde (Şekil 6.b) ise bünye modelleri bilinen çatlak eksenlerinde formüle edilir (DeBorst vd. [24] ve Rots [25]). Beton çekme ve basınç davranışının temsilinde doğrusal elastik olmayan elastik, elastoplastik veya elastoplastik-hasar yaklaşımları kullanılabilir.



(a) Basitleştirilmiş Model

(b) "Doğru" Etkileşim Modeli

Şekil 4. 3B Modeller



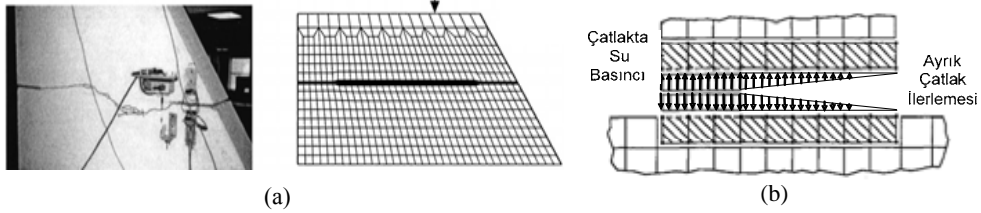
Şekil 5. EACD Analiz Akış Şeması

Yukarıda bahsedilen çatlak modellerinin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Modellerden birisinin diğerlerine daha üstün olduğunu gösteren bir çalışma bulunmadığından çoğunlukla mevcut paket programlarda bulunan çatlak modelleri tercih edilmektedir. Analiz sonuçlarının çatlak modeli seçimlerine göre değişiklik göstereceği gerçeği de unutulmamalıdır. Bununla birlikte bütün doğrusal olmayan malzeme modelleriyle yapılan simülasyonlarda olduğu gibi elde edilen sonuçlar model parametrelerinin seçimine çok bağlıdır. Bu sebeplerle hem bu programları kullananların hem de sonuçları değerlendiren mühendislerin doğrusal olmayan malzeme modelleri kullanımı, zaman aşımli analizler ve sonlu eleman yöntemlerinde ehil kişiler olması gereklidir.

### 3. SÖNÜM

Deprem hareketi esnasında baraj deplasman ve gerilmelerini önemli ölçüde azaltabilen sönümün başlıca kaynakları şu şekilde sıralanabilir:

- Malzeme Sönümü: Beton ve temel kayası ile ara yüzlerin maruz kaldığı küçük deformasyonlarda içsel sürtünme gibi doğrusal elastik olmayan davranış kaynaklıdır.
- Rezervuar Işıma Sönümü: Teorik olarak sonsuza uzandığı düşünülen rezervuar kanalında barajdan enerji taşıyarak uzaklaşan dalgaların geri gelmemesi sebebi ile ortaya çıkmaktadır.
- Temel Işıma Sönümü: Teorik olarak sonsuza uzandığı düşünülen zemin kayasında barajdan enerji taşıyarak uzaklaşan dalgaların geri gelmemesi sebebi ile ortaya çıkmaktadır.
- Rezervuar Altı Sönüm: Rezervuar dibinde biriken tortuların izolatör vazifesi göerek enerjinin bir kısmını emmesi ile ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6. Çatlak Modelleri : (a) Yayıllı Çatlak Modeli ve (b) Ayrık Çatlak Modeli

Yukarıdaki etmenlerin bir araya gelmesi ile ortaya çıkan sönüm, Bölüm 2.2’de anlatılan frekans tanım alanı çözümleri ile gerçekçi olarak dikkate alınabilir. Zemin, kütsüz ve sınırlı bir sonlu eleman ağı ile modellendiğinde ışımaya kaynaklı sönüm genellikle hızı bağlı vizkoz sönüm modeli ile artırılmış etkin sönüm olarak hesaba katılır. Ağır barajlar için etkin Rayleigh sönüm oranı %20, kemer barajlar için ise %10 mertebelerine kadar

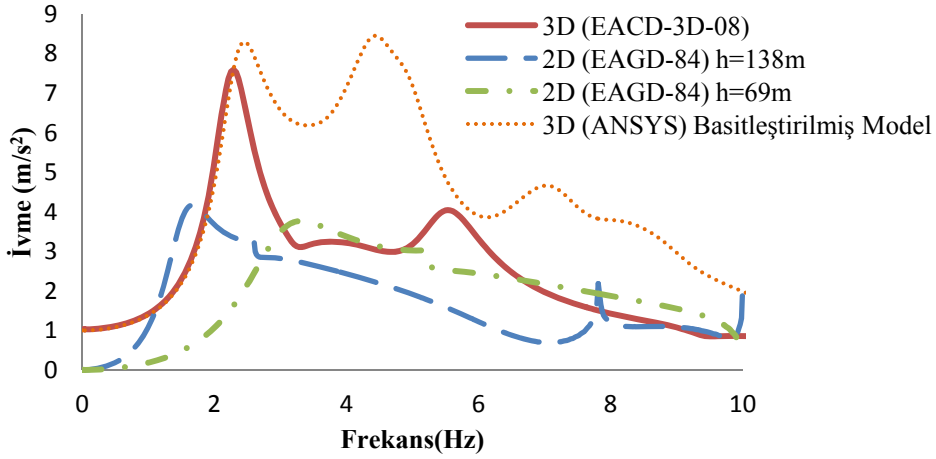
çıkabilmektedir (Akpınar vd. [26], Chuhan vd. [27] ve Arıcı vd. [28]). Çeşitli araştırmacılar (örneğin Fenves ve Chopra [7], Chuhan vd. [27], Lotfi vd. [29] ve Chopra [30]) ile bazı rehber dökümanlar (USACE [31] ve USBR [32]) sönümün baraj davranışında önemli bir rol oynadığını ve ağırlık barajların tasarımında dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Işıma etkileri ile sadece malzeme sönümünden fazla bir etkin sönümün var olduğunu destekleyen en önemli kanıtlardan biri geçmiş barajların deprem performansdır. Deprem geçirmiş mevcut barajların hasarları, ışıma sönümünün ihmal edildiği sayısal modellerle tahmin edilen hasarların oldukça altındadır. Bu sebeple beton ağırlık barajların “iyi” deprem performansı vermelerinin en önemli sebeplerinden birinin yapı-zemin-rezervuar etkileşimi olduğu söylenebilir. Tahribatsız saha deneyleri ile elde edilen sönüm değerleri genellikle etkin sönüm değerinin oldukça altında kalabilmektedir (Sevim vd. [33]). Bu durumun en önemli sebebi tahribatsız saha deneylerinin sınırlı frekans içeriğine sahip düşük genlikli titreşimler ile gerçekleştirilmesidir.

Bölüm 5’te detayları sunulan Andıraz Barajı modelinin farklı modelleme teknikleri kullanılarak tüm frekanslar için bir birimlik yer ivmesine tabi tutulması ile elde edilen analiz sonuçları Şekil 7’de sunulmaktadır. Analizler baraj-zemin-rezervuar etkileşimini dikkate alan iki ve üç boyutlu frekans tanım alanı analizlerinin yanı sıra, üç boyutlu kütleli zemine sahip basitleştirilmiş modeller ile gerçekleştirilmiştir. Basitleştirilmiş üç boyutlu analizlerde, USACE-EP-1110-2-12 [31] önerileri ışığında etkin sönümleme oranı, malzeme, ışıma ve hidrodinamik etkileri dikkate alarak %15 olarak alınmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde Rayleigh katsayıları sönümleme oranı birinci doğal periyotta ve deprem kayıtlarının içinde bulunan maksimum frekans olan 20 Hz’te %15 verecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 7’ye bakıldığında birinci mod’da tahmin edilen kret ivmeleri oldukça yakınken diğer modlarda etkin sönümlemenin özellikle yüksek modlar için yetersiz olduğu kolaylıkla anlaşılmaktadır. Ayrıca dar vadili monolitik bir baraj için iki boyutlu analizlerin üç boyutlu analiz sonuçları ile oldukça farklı sonuçlar verdiği göze çarpmaktadır. İki boyutlu analizler, barajın hem en derin kesiti hem de vadi yönünde kritik gerilmelerin gözlemlendiği orta kesit için (sırasıyla 138 ve 69 metrelik kesitler) gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de ivme değerlerinin iki boyutlu analizlerde düşük kaldığı görülmektedir. Temel titreşim periyotları iki ve üç boyutlu analizler için kıyaslandığında barajın maruz kalacağı spektral ivme isteminin iki ve üç boyutlu analizlerde farklı olabileceği söylenebilir. Üç boyutlu analizler sonucunda iki boyutlu analizlere göre yüksek gerilme değerleri beklenebileceği görülmektedir. Kısaca, iki/üç boyutlu modeller arasındaki olası farkların ciddi seviyede olduğu, (doğrusal olmayan analiz için) basitleştirilmiş model ve üç boyutlu frekans tanım alanı çözümleri arasında da yapı-zemin rezervuar etkileşiminin yaratmış olduğu sönüm sebebi ile büyük farklar bulunduğu gözlemlenmektedir.

#### **4. İKİ BOYUTLU DEPREM ANALİZLERİ**

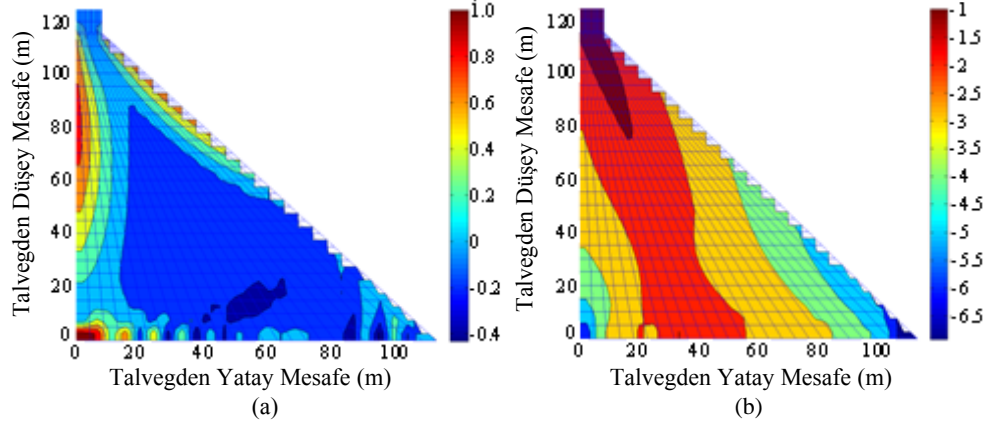
Bu bölümde daha önceki bölümlerde değinilmiş olan frekans tanım alanında iki boyutlu doğrusal analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Söz konusu analizler, zemin-yapı-rezervuar etkileşimlerinin frekans tanım alanında hesaba katılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz metodunun seçilmesinin en önemli sebebi, mühendislik camiasına denektaş olarak kabul edilebilecek gerçekçi sonuçlar sunarak mühendislik bilgi ve sezgisinin artmasına katkı sağlayabilmektir. Bu amaçla, Fenves ve Chopra’nın [19] hazırladığı EAGD-84 programı (orjinal halinde yapı-zemin arasında 8

düğüm noktası zorunluluğu bulunmaktadır), baraj ve zemin arayüzünde istenen düğüm noktası sayısının kullanılmasına izin verecek şekilde geliştirilerek hazırlanan yeni bir arayüz ile kullanılmıştır. Bu yeni versiyonda, ön yüz ile programın kullandığı parametreler kolaylıkla değiştirilip analizler hızlı olarak yapılabilmektedir. Ayrıca, yeni program sonuçları otomatik olarak Şekil 1’de özetlenen değerlendirme işlemlerini gerçekleştirerek deprem performans değerlendirmesi yapılabilmektedir.



Şekil 7. Frekansa Bağlı Kret İvme Taleplerinin Karşılaştırılması

Sunulan sonuçlar İstanbul su temini projesinin önemli halkalarından biri olan Melen Barajı için 2475 yıllık tekerrür periyoduna sahip spektruma uyumlu bir deprem kaydı (Şekil 10) kullanılarak elde edilmiştir. Melen Barajı 125 metre yüksekliğinde tasarlanmış bir SSB olup barajın uzunluk ve yükseklik oranı 8’in üzerinde olduğundan BBTİ [5] tarafından iki boyutlu deprem analizleri gerçekleştirilmesine izin verilmektedir. Melen Barajı’nın tüm tasarım detaylarına Binici ve Arıcı’dan [34] ulaşılabilir. Baraj kesiti 25 düşey ve 25 yatay olmak üzere toplam 625 düzlemsel gerilme sonlu elemanı kullanılarak tam dolu rezervuar durumu için modellenmiştir. Barajın memba yüzü dik, mansap yüzü ise 0.9 eğime sahip olarak tasarlanmış olup SSB elastisite modülü 15000MPa, zemin elastisite modülü 7500 MPa, sönüm oranı 0,05 ve dalga yansıtma katsayısı (tanımı için Fenves ve Chopra’ya [7] bakınız) 0,9 olarak alınmıştır. Fenves ve Chopra [7] yöntemi ile gerçekleştirilen iki boyutlu doğrusal elastik baraj analizler sonucunda elde edilen azami ve asgari kesit asal gerilmeleri ve azami asal gerilmelerin baraj tabanı boyunca dağılımı (çekme gerilmeler pozitif olarak) sırasıyla Şekil 8.a, Şekil 8.b ve Şekil 9.a’da sunulmaktadır. En kritik asal çekme gerilmeleri baraj memba topuğunda ve memba topuğundan yaklaşık 80 m yüksekte oluşmaktadır. Azami asal basınç gerilmelerinin ise beklendiği üzere mansap topuğunda olduğu gözlemlenmiştir. Asal çekme gerilmelerinin (BBTİ önerileri ışığında) talep kapasite oranı-gerilme limit aşılma süresi grafiği ve ilgili sınır çizgisi Şekil 9.b’de verilmektedir. Görüldüğü üzere azami gerilmeler sınır çizgisinin altında kalarak güvenli sonuç vermektedir.

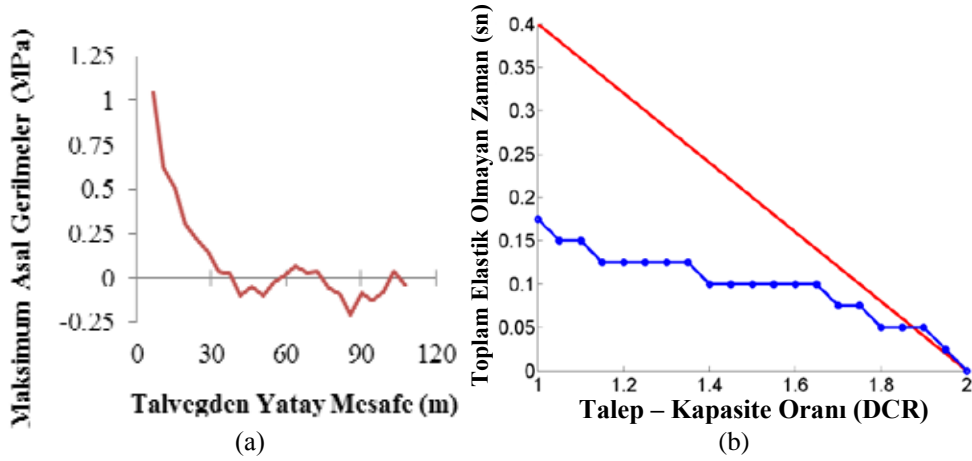


Şekil 8. Asal Gerilmelerin Baraj Kesiti Üzerinde Dağılımı: (a) Azami Asal Gerilmeler ve (b) Asgari Asal Gerilmeler

Benzer baraj kesitlerinin deprem performansını daha iyi anlayabilmek amacı ile baraj kesit geometrisi ve gövde ile zemin elastisite modülü oranlarının deprem performansı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan değişkenler Tablo 3'de özetlenmekte olup kullanılan parametreler ve baraj gövdesi Şekil 10'da sunulmaktadır. Analizlerde beş değişik baraj yüksekliği ve mansap eğimi ve 4 farklı baraj – zemin elastisite oranı kullanılmıştır. Bu değişkenler dışında sonuçları etkileyen zemin malzemesi ve beton özgül ağırlığı, Poisson oranları, sönümlenme katsayıları ve dalga yansıtma katsayısı ( $\alpha$ ) gibi değerler analizlerde sabit tutulmuştur. Analizler frekans tanım alanında zemin, yapı, rezervuar etkileşimlerinin tam doğru olarak göz önüne alınması ile gerçekleştirilmiştir. Baraj performansı değerlendirilirken BBTİ [5] tarafından önerilen yöntem (Şekil 1) kullanılmıştır. Barajın doğrusal elastik sınırı aştığı durumlarda, beklenen doğrusal olmayan davranışın ölçütü olarak Talep Kapasite Oranı ile Gerilme Sınır Aşım Süresinin sınır çiziyi aştığı kısmın altında kalan alan hesaplanmıştır (Şekil 11). Analizler neticesinde elde edilen Gerilme Sınırını Aşan Alan değerleri, farklı elastik modülü oranları ve baraj yüksekliği için mansap eğimi değerlerine karşı çizilmiştir (Şekil 12).

Şekil 12 incelendiğinde  $E_c/E_f$  oranı 0.1 iken (zemin rijite yakın durumda) 50 m'den yüksek ve mansap eğimi 0.9'dan küçük baraj kesitlerinin elastik kriterleri sağlayamadığı görülmektedir.  $E_c/E_f$  oranı 0.5'e yükseltildiğinde ise çalışmada kullanılan tüm baraj kesitleri yükseklikleriyle doğru orantılı bir şekilde mansap eğimleri arttırıldığında elastik kriterleri sağlamaktadır. Örneğin, 50 m'lik yüksekliğe sahip bir baraj kesitinin 0.8'lik bir mansap eğimiyle elastik kalması beklenirken 150 m'lik bir baraj ancak mansap eğimi 1 iken BBTİ gerilme kriterlerini sağlayabilmektedir.  $E_c/E_f$  oranı 1 (2) iken (beton gövdeye göre yumuşak zemin koşulları için) baraj yüksekliğinden bağımsız olarak mansap eğimi 0.9 (0.8) için performans kriterlerinin sağlandığı görülmektedir. Bu sonuçlar baraj tasarımında zemin rijitliğinin önemini çok açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Zemin rijitliğinin (hem statik rijitliğinin azalması hem de ışımaya sönümünün artması sebebi ile) azalması ile baraj gerilmelerin düştüğü söylenebilir. Bu durumda kaya taşıma gücü kontrolünün önem

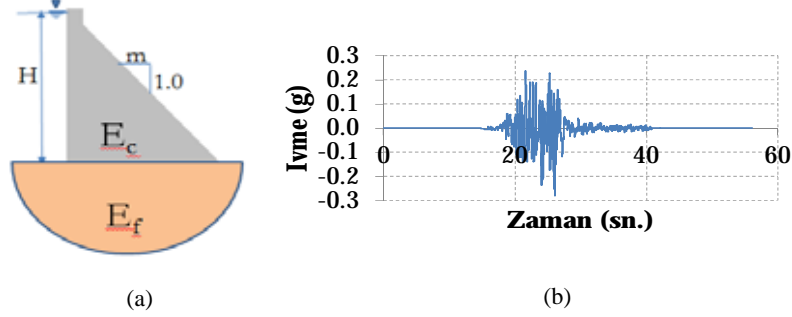
kazandığı unutulmamalıdır. Ayrıca, baraj yüksekliği arttıkça artan hidrodinamik yükler ve yüksek mod etkilerinden kaynaklı gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.



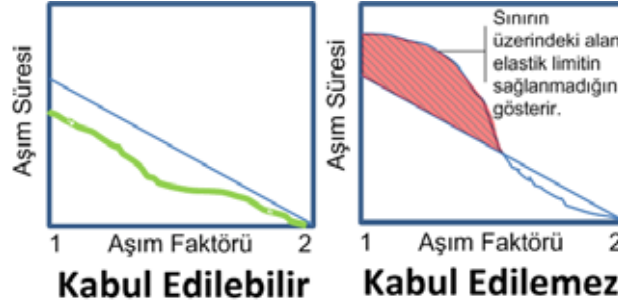
Şekil 9. Gerilme Şekilleri : (a) Maksimum Asal Gerilmelerin Baraj Tabanı Boyunca Dağılımı ve (b) Talveg Sonlu Elemanı İçin Gerilme Talep Eğrisi

Tablo 3. 2B Parametrik Analizlerde Kullanılacak Parametreler

Parametre	Değerler
H (m)	50, 75, 100, 125 ve 150
m	0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1.0
$E_c/E_f$	0.1, 0.5, 1 ve 2
$E_c$ (MPa)	15.000
Kret Genişliği (m)	8
Statik Çekme Dayanımı (MPa)	1.50
Betonun Poisson Oranı	0.2
Zeminin Poisson Oranı	0.33
Betonun Özkütlesi ( $kg/m^3$ )	2400
Zeminin Özkütlesi ( $kg/m^3$ )	2500
Dalga Yansıtma Katsayısı ( $\alpha$ )	0.9



Şekil 10. 2B Parametrik Analizler: (a) EAGD Modeli ve (b) Yer İvmesi



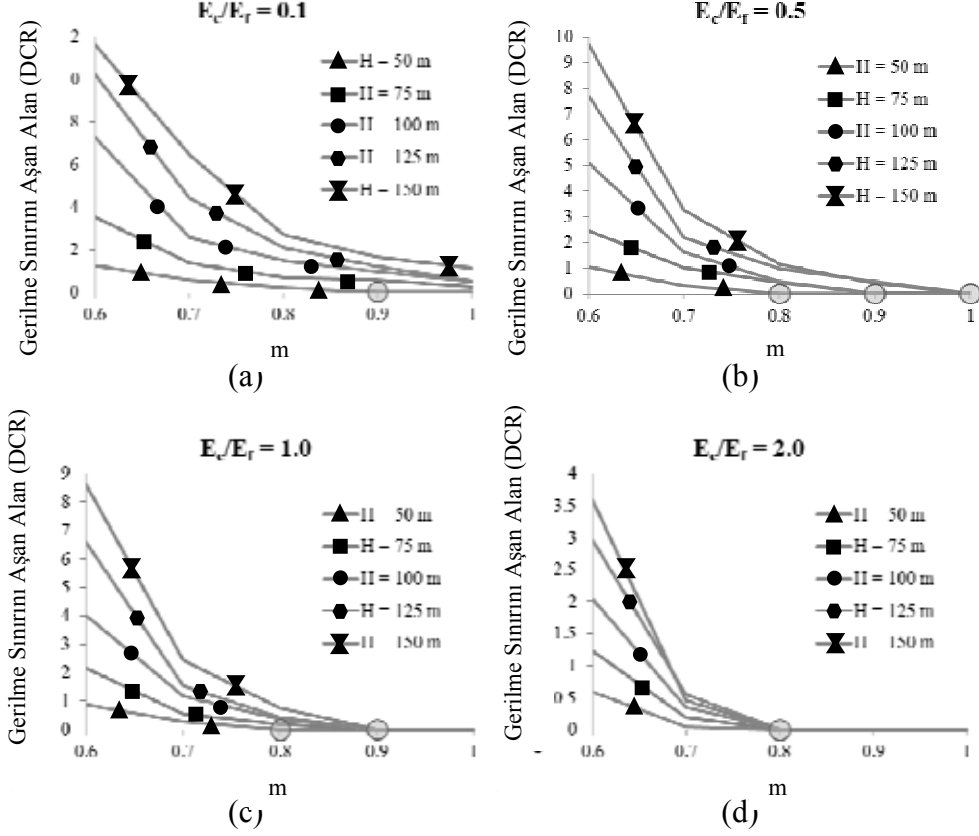
Şekil 11. BBTİ Dökümanındaki Gerilme Aşılmaları

Yüksekliği 125 m, mansap eğimi 1 ve  $E_c/E_f$  oranı 2 olan bir baraj kesiti için ise daha yüksek deprem tehlikesi durumunu incelemek maksadı ile 2475 yıllık tasarım depremi (EED) ölçeklenerek analizler tekrar edilmiştir. EED depreminin 1.5 ile 2.0 katı bir deprem istemi (yaklaşık 10000 yıllık tekerrür periyoduna denk gelen bir deprem) oluştuğunda, kesidin %15 – 25 büyümesi ile gerilme performans kriterlerinin sağlandığı belirlenmiştir (Şekil 13). Bu durum deprem yer ivmesinin artışı ile gerekli kesit boyutları arasında lineer bir ilişki olmadığını göstermektedir.

İki boyutlu örnek analizler neticesinde elde edilen önemli bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- 1- Zemin rijitliği azalması ile yapı zemin etkileşimi etkin hale gelerek gövde gerilmeleri düşmektedir. Bu durum daha ekonomik tasarımlar yapılmasına olanak verebilir.
- 2- Yüksek barajlar (>100 m) hasar görülebilirlik açısından daha alçak barajlara göre çok daha kritik durumdadır.
- 3- Rijit blok stabilite analizlerinin aksine, deprem tehlikesinin artması ile BBTİ performans kriterlerini sağlayan optimum kesit alanı lineer bir ilişki içinde değildir. Diğer bir deyişle deprem zaman-ivme kaydının iki katına çıkarılması kesit alanının aynı miktarda artması gerektiği anlamına gelmez.





Şekil 12. Sabit Baraj – Zemin Elastisite Oranları için Sonuçlar

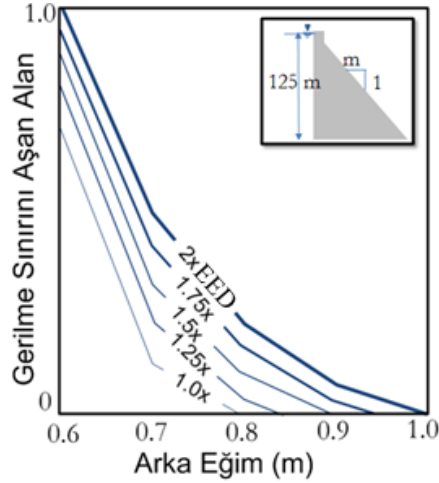
## 5. ÜÇ BOYUTLU DEPREM ANALİZLERİ

### 5.1. Lineer Analizler

Bu bölümde, ilk olarak, Wang ve Chopra'nın [8] geliştirdiği frekans tanım alanında baraj zemin ve rezervuar etkileşimini dikkate alan yöntem (Bölüm 2.3) kullanılarak dar bir vadiye anosuz bir şekilde inşa edilmesi planlanan Andıraz Barajı'nın sismik davranışı incelenmiştir. Andıraz Barajı 138 metre yüksekliğine sahip silindire sıkıştırılmış beton ağırlıklı barajdır. Barajın kret uzunluğu 362 metre, kret genişliği 10 metredir ve vadi yönünde 0,85 ve 1,015'lik eğimlere sahiptir. Andıraz Barajı için SSB elastisite modülü 23750, statik çekme dayanımı ise 3MPa olarak alınmıştır.

Andıraz Barajının frekans tanım alanında yapılan dinamik analizlerinde 475 yıllık tekrarlanma periyotlarına sahip tasarım spektrumuna uyumlu üretilmiş deprem kaydı kullanılmıştır. İlk olarak mansap eğiminin etkisini gözlemlemek amacı ile 4 farklı eğim (0,8, 0,9, 1 ve 1,05) için elastik gerilme tabanlı performans kriterleri kullanılarak baraj kesitleri değerlendirilmiştir. Burada sonuçlar, en kritik kombinasyon olarak değerlendirilen

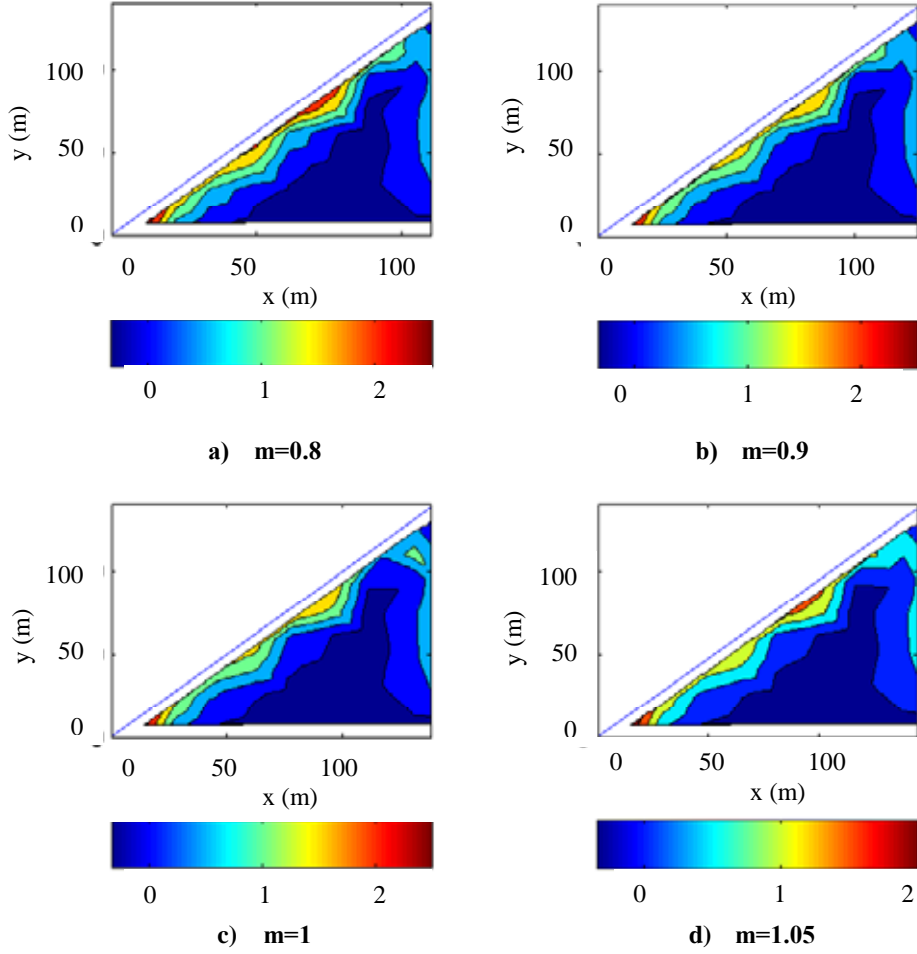
EED1 depreminin  $x+0.3y+0.3z$  deprem kombinasyonu için sunulacaktır (Mamba tarafı +x eksenini ile, baraj yüksekliği boyunca düşey doğrultu y eksenini ile ve son olarak akışa dik doğrultu z ekseniniyle gösterilmektedir). Şekil 14’de en derin kesite ait ( $z=38,8$  metresindeki Gauss integrasyon noktasında) asal gerilme grafikleri her bir mansap eğimi için gösterilmektedir. Mansap eğimi 0,8 ve 0,9 olarak belirlendiğinde gerilme talepleri limitlerin oldukça üzerindedir. Mansap eğiminin 1 ve 1,05 olduğu durumlarda gerilmelerin çekme gerilme sınırına yaklaştığı tespit edilmiştir. Asal gerilme değerleri Şekil 14’de verildiği üzere en derin kesit için 2-2,6 MPa arasında değişmektedir. Ancak, üç boyutlu analizler sonucunda barajın diğer bölgelerinde özellikle vadiyle kesişim noktalarında asal gerilmelerin daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Gerilme limitinin aşılma sürelerinin talep-kapasite oranına göre değişimi her bir mansap eğimi için Şekil 15’de verilmiştir. Şekil 15’den de anlaşılacağı üzere mansap eğiminin 0,8 ve 0,9 olduğu durumlarda limit değerleri aşılmaktadır, bu durum lineer analiz kullanımının yeterli olmadığını işaret etmekte ve lineer ötesi analiz gereksinimi göstermektedir. Eğimin 1 ve 1,05 olduğu durumlarda ise limit aşımı olmamaktadır. Sonuçlar incelenen kesitler içinde en ekonomik ve güvenli kesitin  $m=1$  mansap eğimine sahip kesit olduğunu göstermektedir. Ayrıca, incelenen baraj için gövdedeki en kritik gerilme bölgeleri en derin kesitte değil, vadiyle kesişim noktası bulunan kenar yüzeylerde oluşmakta olup bu durum üç boyutlu analizin önemini göstermektedir.



Şekil 13. Yer Hareketinin Gerilme Taleplerine Etkisi

Andıraz Barajı deprem performansı için betonun elastik modülünün zeminin elastik modülüne ( $E_c/E_f$ ) oranının analiz sonuçlarını nasıl etkilediği incelenmiştir. SSB elastisite modülü 23.750 MPa olarak sabit tutularak farklı zemin elastisite modülleriyle analizler yapılmıştır. Analizler sıkıştırılabilir su ve sıkıştırılamaz su varsayımları için ayrı ayrı her bir deprem senaryosu göz önüne alınarak tekrarlanmıştır. Şekil 16’da  $E_c/E_f$  oranının maksimum asal gerilme ve kret yer değiştirmesine etkisi gösterilmektedir. Beton elastisite modülünün zemin elastisite modülüne oranının azalması ile maksimum asal gerilme değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Zemin rijitliğinin, iki boyutlu analizler üzerindeki

etkisine benzer olarak üç boyutlu analizlerde de göz önünde bulundurulması gereken bir unsur oluşu söylenebilir. Ayrıca, sıkıştırabilir suyun sıkıştırılmaz su varsayımına kıyasla daha yüksek asal gerilmelere sebep olduğu söylenebilir. Maksimum kret yer değiştirmesiyle ilgili kesin bir yorum yapılması zor görülsede, depremin özelliklerine göre  $E_c/E_f$  oranıyla birlikte artma eğiliminde olduğu söylenebilir.



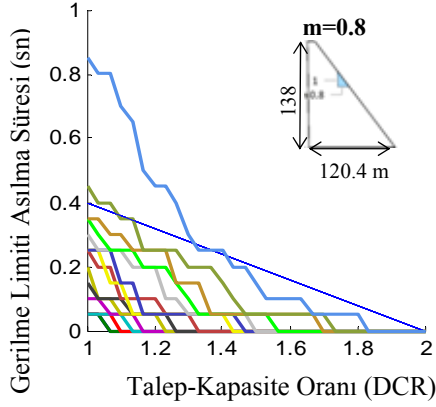
Şekil 14. Farklı Mansap Eğimlerine Ait En Derin Kesitteki Asal Gerilmeler (MPa)

Yukarıda sunulan analiz sonuçları neticesinde yapılan önemli çıkarımlar aşağıda sunulmaktadır:

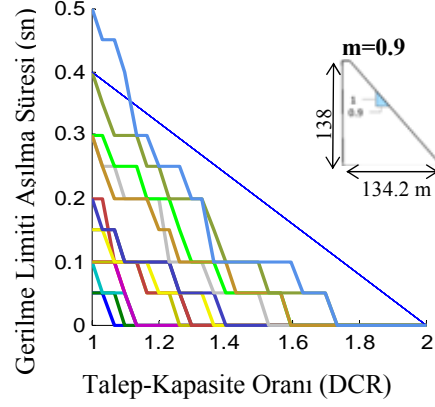
- 1- Mansap eğiminin değişimi ile incelenen model üzerinde gerilme talepleri düşmektedir.

*Beton Barajların Deprem Davranışlarının İncelenmesinde Kullanılan Analiz Metotları*

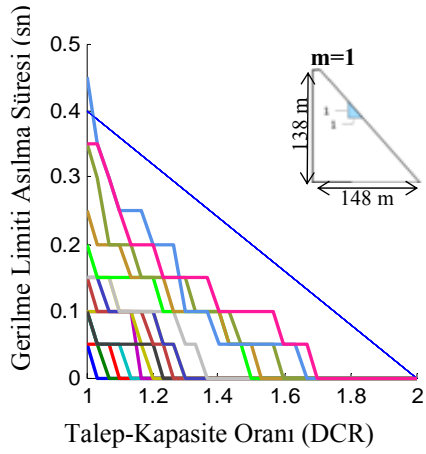
- 2- Dar bir vadiye oturan Andıraz Barajında azami gerilmelerin beklenenin aksine en derin kesitin tabanı yerine vadi kenarlarında olduğu tespit edilmiştir. Bu durum dar vadiye oturan beton barajlar için üç boyutlu analiz zorunluluğunu (Tablo 2) doğrulamaktadır.
- 3- Zemin rijitliğinin azalması ile iki boyutlu analiz sonuçlarına benzer olarak azami gerilmelerin azaldığı tespit edilmiştir.
- 4- Sıkıştırılmaz su modeli daha gerçekçi sıkıştırılabilir su modeline göre benzer ancak bir miktar daha düşük gerilmeler vermektedir.



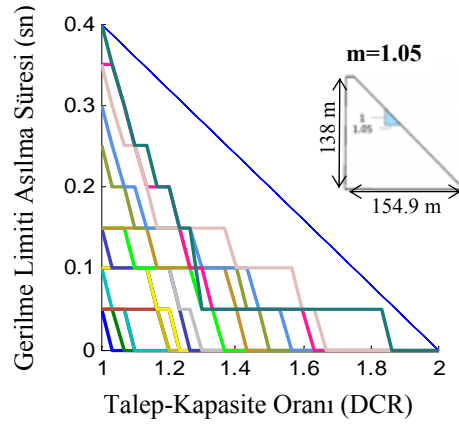
a) m=0.8



b) m=0.9

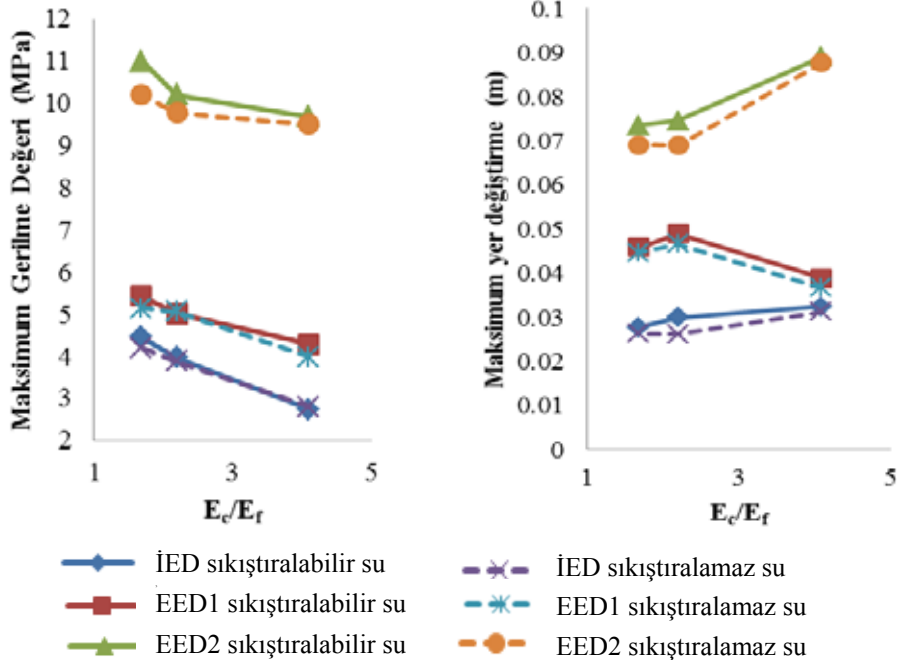


c) m=1



d) m=1.05

*Şekil 15. Mansap Eğiminin Gerilme Taleplerine Etkisi*



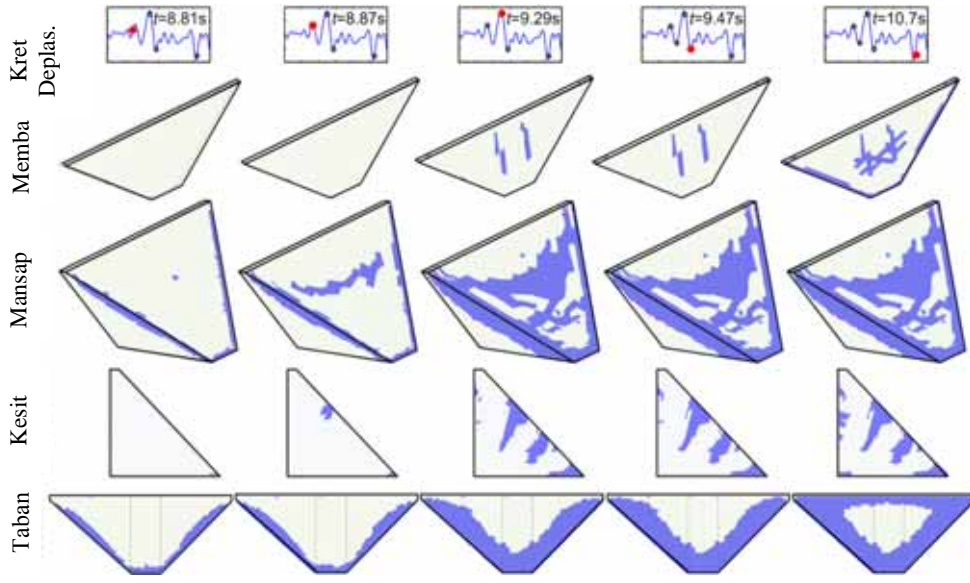
Şekil 16. Baraj – Zemin Elastisite Oranının Gerilme Taleplerine Etkisi

## 5.2. Doğrusal Elastik Olmayan Analizler

Yukarıda 475 yıllık tekerrür periyoduna karşılık gelen deprem hareketi için yapılan doğrusal analizler 2475 yıllık tekerrür periyoduna sahip deprem hareketi için tekrarlandığında performans kriterlerinin sağlanmadığı görülmüştür. Bu durumda BBTİ doğrusal olmayan analizler ile performans tahkiki yapılmasına izin vermektedir. Bu kapsamda kütsüz zemin ve Westergaard ekli kütle metodu kullanılarak üç boyutlu bir model hazırlanmıştır. Analizlerde frekans tanım alanı sonuçları ile en iyi şekilde örtüşen %15'lik etkin sönüm oranı kullanılmıştır (Şekil 7). Betonun lineer ötesi davranışını modellemek için Vecchio ve Collins [35] ve Selby ve Vecchio [36] tarafından önerilen döner çatlak bünye modeli kullanılmıştır. Betonun basınç davranışı parabolik gerilme-birim uzama bağıntısıyla alınmıştır. Ayrıca, sonuçların sonlu eleman ağ örgüsünden bağımsız hale getirilebilmesi için gerilme-şekil değiştirme davranışındaki yumuşama bölgesinin eğimi sabit kırılma enerjisi kriterine göre düzenlenmiştir. Doğrusal elastik olmayan analiz sonuçlarına göre baraj gövdesinin deprem performansının yeterli olup olmadığına analiz sonucunda elde edilen çatlak boylarına ve yayılmasına göre karar verilebilir. Baraj tabanında beklenen çatlama miktarı kohezyonunun ortadan kaybolarak barajın kayma deformasyonlarına tabi olacağı sonucunu işaret edebilir. Ayrıca gövde çatlaklarının ve çatlak kamalarının şekli baraj gövdesinin güvenliği hakkında fikir verebilir.

Analiz edilen baraj gövdesi için Şekil 17'de görüldüğü üzere deprem sonrası, baraj tabanının neredeyse tamamı çatladığı ve barajın kayma direncinin önemli ölçüde azaldığı

söylenbilir. Barajın memba yüzünde oluşan çatlaklar özellikle vadi kenarlarında mansap yüzü ile birleşmiştir. Bu bilgiler ışığı altında alternatif tasarım olarak baraj kesitinin değiştirilmesi veya yerel olarak daha yüksek çekme dayanımına sahip beton kullanılması değerlendirilmiştir. Andıraz Barajı'nın tasarımında ikinci alternatif seçilerek memba ve mansap yüzünde 10 m kalınlığında çekme dayanımı 4 MPa olan konvansiyonel beton kaplama yapılması öngörülmüştür. Analiz sonuçları dar vadilere oturan bu tip barajlarda ana monolitlerin değil vadi omuzlarında olan monolitlerin çok daha kritik olduğunu ve üç boyutlu analizlerin elzem olduğunu göstermektedir. Bu baraj için doğrusal olmayan analiz sonuçları detaylı olarak Arıcı ve Binici'de [37] verilmektedir.



*Şekil 17. Doğrusal Elastik Olmayan Analiz Sonucunda Oluşan Çatlaklar*

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karmaşık bir yapı-zemin-rezervuar etkileşimi problemi olan beton barajların deprem davranışına ilişkin analiz ve performans kıstasları sunulmuştur. Beton barajların gövde tasarımında kullanılacak analiz metotları ile DSİ tarafından yayımlanan "Beton Barajların Tasarım İlkeleri"nde sunulan performans değerlendirme yöntemleri örnekler ışığında incelenmiştir. Elde edilen önemli bulgular aşağıda sunulmaktadır:

- 1- Yapı-zemin-rezervuar etkileşimini dikkate alan modeller ile yapılan analizler zemin elastisite modülünün beton elastisite modülüne göre düşük olduğu hallerde baraj gövde gerilmelerinin ciddi miktarda azalabildiğini göstermiştir. Diğer bir deyişle yapı-zemin-rezervuar etkileşiminin doğru olarak dikkate alınması ekonomik ve güvenli baraj tasarımı için anahtar husustur.

- 2- Rijit blok stabilite analizlerinin aksine, deprem tehlikesinin artması ile BBTİ performans kriterlerini sağlayan optimum kesit alanı lineer bir ilişki içinde değildir. Diğer bir deyişle, azami yer ivmesi veya spektral ivme gibi değerlerin baraj kesit büyüklüğü ile doğrusal bir ilişkide olmadığını göstermektedir.
- 3- Dar vadiye oturan barajlarda boyut etkileri sebebi ile azami gerilmelerin vadi kenarında oluştuğu ve muhakkak üç boyutlu analizler yapılması gerektiği belirlenmiştir.
- 4- Doğrusal olmayan analizler, çatlak miktarları ve olası göçme şekilleri konusunda fikir vererek deprem sonrası baraj stabilitesi tahkiki yapılmasına olanak verebilir. Ancak bu analizler muhakkak tecrübeli mühendisler tarafından kullanılmalıdır.

### Semboller

- g : Yer çekimi ivmesi  
L : Baraj aks uzunluğu  
H : Baraj en derin kesit yüksekliği  
USACE : United States Army Corps for Engineers  
USBRE : United States Bureau of Reclamation  
 $\eta$  : Histeretik sönüm oranı  
 $\alpha$  : Dalga yansıtma katsayısı  
 $E_c$  : Baraj gövde betonu elastisite modülü  
 $E_f$  : Baraj zemini elastisite modülü  
m : Baraj gövde eğimi  
İED : İşletme esaslı deprem  
EED : Emniyet esaslı deprem  
DCR : Talep – kapasite oranı  
PGA : Azami yer ivmesi  
 $\hat{P}_o$  : Yer ivmesinden kaynaklı rijit barajda oluşan hidrodinamik basınç  
 $\hat{P}_j$  : Baraj memba ivmesine bağlı hidrodinamik basınç  
 $m_c$  : Kütle matrisi  
 $k_c$  : Rijitlik matrisi  
 $\mu_n(\omega)$  : Depolanan suya ait özdeğerler  
 $Y_n(\omega)$  : Depolanan suya ait özvektörler  
 $S_f(\omega)$  : Kondense edilmiş dinamik zemin rijidite matrisi

*Beton Barajların Deprem Davranışlarının İncelenmesinde Kullanılan Analiz Metotları*

- $\lambda_j$  : Özdeğerler  
 $\Psi_j$  : Özvektörler  
 $\hat{r}_f^f(\omega)$  : Yarı statik yer değiştirme vektörü (baraj gövdesi)  
 $\hat{r}_f^s(\omega)$  : Yarı statik yer değiştirme vektörü (baraj tabanı)  
 $\hat{Z}_j(\omega)$  : Baraj tepki matrisi  
 $\hat{R}_o(\omega)$  : Baraj tabanındaki düğüm noktalarına etki eden kuvvet vektörü  
 $\hat{R}_j(\omega)$  : Baraj gövdesindeki düğüm noktalarına etki eden kuvvet vektörü  
 $r_c(t)$  : Deplasman vektörü  
 $\sigma_p(t)$  : p no'lu eleman için gerilme matrisi  
 $T_p$  : p no'lu eleman için gerilme – deplasman dönüşüm matrisi  
 $r_p(t)$  : p no'lu eleman için deplasman vektörü  
 $L(\omega)$  : Kütle ve su için empoze edilen limit durumlar ile su yüklemesinin etkileri

**Kaynaklar**

- [1] ACI 207, Roller - Compacted Mass Concrete, 1999.
- [2] Chen, J., Li, X. ve Fan, S., Study on Sismic Resistance of Concrete Gravity Dam Retrofitted with UHTCC, 15. World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, 2012.
- [3] Yamaguchi, Y., Hall, R., Sasaki, T., Matheu, E., Kanenawa, K., Chudgar, A. ve Yule, D., Seismic Performance Evaluation of Concrete Gravity Dams, 13. World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [4] Nuss, L.K., Matsumoto, N. And Hansen, K.D., Shaken but not Stirred – Earthquake Performance of Concrete Dams, Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management, 32nd Annual USSD Conference New Orleans, Louisiana, pp. 1511-1530, 2012.
- [5] Beton Barajların Tasarım İlkeleri (BBTİ), Devlet Su İşleri, 2012.
- [6] Fenves, G. and Chopra, A.K., Earthquake Analysis and Response of Concrete Gravity Dams, Report No. UCB/EERC-84/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 236 p, 1984.
- [7] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams, Journal of Structural Engineering, 113(8), pp. 1688-1708, 1987.
- [8] Wang, J. and Chopra, A.K., EACD-3D-2008: A Computer Program for Three Dimensional Earthquake Analysis of Concrete Dams Considering Spatially-varying Ground Motion, Report No. UCB/EERC-2008/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 151 p, 2008.



- [9] Tsai, C., Lee, G.C. ve Ketter, R.L., A Semi-analytical method for time-domain analyses of Dam-Reservoir Interactions, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 29, pp. 913-933, 1990.
- [10] Tsai, C. ve Lee, G.C., Time-Domain Analyses of Dam-Reservoir System II : Substructure Method, *Journal of Engineering Mechanics*, 117(9), pp. 2007-2026, 1991.
- [11] Beskos, D.E., *Boundary Element Methods in Dynamic Analysis: Part II (1986-1996)*, American Society of Mechanical Engineers, 50(3), pp. 149-197, 1997.
- [12] Bernal, D. ve Youssef, A., A Hybrid Time Frequency Domain Formulation for Non-linear Soil-Structure Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, pp. 673-685, 1998.
- [13] Taghipour, R., Perez, T. ve Moan, T., Hybrid Frequency-Time Domain Models for Dynamic Response Analysis of Marine Structures, *Ocean Engineering*, 35, pp. 685-705, 2008.
- [14] United States Army Corps of Engineers, (USACE), *Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures*. Engineering Procedure EM 1110-2-6051, 2003.
- [15] Raphael, J.M., Tensile Strength of Concrete, *Journal Proceedings*, 81(2), pp. 158-165, 1984.
- [16] Westergaard, H.M., Water Pressures on Dams during Earthquakes, *Trans. ASCE*, 98, 418-434, 1933.
- [17] Fenves, G. and Chopra, A.K., *Simplified Analysis for Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dams*, Report No. UCB/EERC-85/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 144 p, 1985.
- [18] Yücel, A.R., *Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Foundation-Reservoir Interaction*, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, 2013.
- [19] Fenves, G. and Chopra, A.K., *EAGD-84: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Concrete Gravity Dams*, Report No. UCB/EERC-84/11, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 102 p, 1984.
- [20] Vecchio, F.J., Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes. *ACI Structural Journal*, 86(1), pp. 26-35, 1989.
- [21] Vecchio, F.J., Reinforced Concrete Membrane Element Formulations, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116(3), pp. 730-750, 1990.
- [22] Bhattacharjee, S.S. and Léger, P., Application of NLFM Models to Predict Cracking in Concrete Gravity Dams, *Journal of Structural Engineering*, 120(4), pp. 1255-1271, 1994.
- [23] Léger, P. and Bhattacharjee, S.S., Seismic Fracture-Analysis of Concrete Gravity Dams, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(1), pp.196-201, 1995.

- [24] De Borst, R., Crisfield, M.A., Remmers, J.J.C. ve Verhoosel, C.V., Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2012.
- [25] Rots, J.G., Computational Modeling of Concrete Fracture, Delft University of Technology, Delft, 1988.
- [26] Akpınar, U., Binici, B. and Arıcı, Y., Earthquake Stresses and Effective Damping in Concrete Gravity Dams, Earthquakes and Structures, 6(3), 2014.
- [27] Chuhan, Z., Guanglun, W., Shaomin, W. and Yuexing, D., Experimental Tests of Rolled Compacted Concrete and Nonlinear Fracture Analysis of Rolled Compacted Concrete Dams, Journal of Materials in Civil Engineering, 14(2), pp. 108-115, 2002.
- [28] Arıcı, Y., Binici, B. and Aldemir, A., Comparison of the Expected Damage Patterns from Two- and Three-dimensional Nonlinear Dynamic Analyses of a Roller Compacted Concrete Dam, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, DOI : 10.1080/15732479.2012.753921, 2012.
- [29] Lotfi, V., Roesset, J.M. and Tassoulas, J.L., A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15(4), pp. 463-490, 1987.
- [30] Chopra, A.K., Earthquake Analysis of Arch Dams: Factors to be Considered. ASCE, Journal of Structural Engineering, 138 (2), 205-214, 2012.
- [31] United States Army Corps of Engineers (USACE), Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams, No. EP-1110-2-12, 1995.
- [32] United States Bureau of Reclamation (USBR), Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams, 1977.
- [33] Sevim, B., Altunisik, A.C. ve Bayraktar, A., Earthquake Behaviour of Berke Arch Dam using Ambient Vibration Test Results, Journal of Performance of Constructed Facilities, 26(6), pp. 780-792, 2011.
- [34] Binici, B. ve Arıcı, Y., Melen Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajı Sismik Analizleri : Zemin-Yapı Etkileşimi ve 3 Boyutlu Geometri Etkilerinin İrdelenmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Danış. Kod. No: 10-03-03-1-00-56, 2010.
- [35] Vecchio, F.J. and Collins, M.P., The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements subjected to Shear. ACI Journal, 83:2, 219-231, 1986.
- [36] Selby, R.G. and Vecchio, F.J., Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, Dept. of Civil Eng., Toronto, Canada, 1993.
- [37] Arıcı, Y. ve Binici, B., Andıraz Barajı Sismik Performans Değerlendirmesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2011.