BETON AĞIRLIK VEYA SSB BARAJLARIN SİSMİK TASARIMI İLE İLGİLİ DEĞERLENDİRME VE ÖRNEKLER

E. Yıldız[1] ve A.F. Gürdil[2]

[1] *Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş.*
[2] *Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş.*
Email: ersan.yildiz@temelsu.com.tr; gurdil@temelsu.com.tr

ÖZET:

Bu çalışmada beton ağırlık veya silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajların deprem davranışı ve güvenliğinin irdelenmesinde izlenecek yol ve kullanılan değişik yaklaşımlar, tasarımı yapılan barajlardan ilgili örnekler verilerek özetlenmiştir. Barajların sismik tasarımında kullanılacak deprem parametreleri ve yükleme durumları irdelenmiş, işletmeye esas deprem ve maksimum tasarım depremi için gerekli görülen performans kriterleri ve bunlara ilişkin kullanılabilecek çözüm yöntemleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Halen baraj duraylılık kontrolleri ve ön tasarım aşamasında yaygın olarak kullanılan sismik katsayı yönteminin geçerliliği ve kullanılabilirlik sınırları tartışılmış ve bu yöntem ile tasarlanan ülkemizdeki ilk silindir ile sıkıştırılmış katı dolgu baraj olan 107 m yüksekliğindeki Cindere Barajı'nın tasarımı özetlenmiştir. Yazıda, özellikle son yıllarda bilgisayarlardaki gelişmeye paralel yaygın olarak kullanılmaya başlanan zaman-tanım alanında analizlere geniş yer ayrılmıştır. Zaman-tanım alanında analizler, doğrusal elastik malzeme modelleri kullanılarak gerilme seviyelerinin belirlenmesine imkân verdiği gibi, özellikle yüksek yer hareketine maruz kalan barajlarda doğrusal olmayan malzeme modelleri veya olası çatlak geometrileri kullanılarak deprem sonrası hasarların da incelenmesine olanak tanımaktadır. Söz konusu analizlerde, baraj gövdesi, taban kayası ve rezervuar suyundan oluşan sistemin modellenmesi ile ilgili konular açıklanmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analizlerin kullanıldığı 180 m yüksekliğindeki Siirt - Pervari Barajının sismik tasarımı, deprem parametreleri, yük koşulları, performans kriterleri ve elde edilen sonuçlar örnek olarak sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Ağırlık Baraj, SSB, Sismik Tasarım, Deprem

1. GİRİŞ

Uluslararası standartlar, barajların sismik tasarımlarında izlenecek yöntemlerin ve yapılacak deprem hesabı kapsamının, barajın tipi, yüksekliği, yeri ve sismisitesi gibi özelliklerine bağlı olarak değerlendirilmesini önermektedir. Özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojileri ve analiz programlarındaki gelişmelere paralel olarak, araştırmacılar ve mühendisler barajların deprem davranışlarının belirlenmesinde ileri analiz yöntemleri kullanmaktadırlar. Beton ağırlık barajların sismik tasarımlarında da geleneksel basitleştirilmiş eşdeğer statik yöntemlerden çeşitli kırılma mekaniği algoritmalarını da içeren ileri nümerik modellerin kullanıldığı doğrusal olmayan analizlere kadar farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Bu tür ağırlık barajlarının deprem güvenliğinin değerlendirilmesinde belirleyici iki öğe; bir veya birden çok bloğun derzler veya temel üzerindeki kayma hareketinin tetiklenmemesi veya barajda deprem sırasında meydana gelen gerilme veya deformasyonların kabul edilebilir sınırlar içinde kalması olarak özetlenebilir (Bureau, 2003). Bu nedenle, tasarımda kullanılacak analiz yöntemi, barajın değişik yükler altındaki davranışını gerçekçi olarak izlemeye olanak sağlamalıdır.

Bu bildiride, beton ağırlık veya silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajların deprem tasarımı ile ilgili yöntemler hakkında özet bir değerlendirme yapılmış, bu yöntemler ile tasarımı yapılan barajlardan örnekler sunulmuştur.

2. SİSMİK TASARIM KRİTERLERİ

Barajların deprem güvenliğinin incelenmesindeki ilk adım baraj yerindeki sismisitenin ve deprem parametrelerinin belirlenmesidir. Deprem tasarımlarında geniş kullanım alanı bulan maksimum yatay yer ivmesi (Peak Ground Acceleration, PGA) ve tasarım yöntemine göre gerekli olabilecek baraj yerine özgü tepki spektrumu ve/veya ivme-zaman kayıtlarının belirlenmesi bu yazı kapsamı dışında tutulmuştur.

ICOLD (Bulletin - 72, 1989) ve USACE (2007) barajların deprem tasarımında kullanılmak üzere 2 farklı deprem seviyesi önermektedir. Bunlar; işletmeye esas deprem (Operating Basis Earthquake - **OBE**) ve maksimum tasarım depremi (Maximum Design Earthquake - **MDE)** veya emniyet belirleme deprem seviyesi (Safety Evaluation Earthquake - **SEE**, ICOLD Bulletin - 72, 2010) olarak ifade edilmektedir. OBE, ICOLD (1989) tarafından 144 yıllık tekerrür süresine sahip olan deprem olarak tanımlanmakta olup, tanımı gereği en uygun şekilde olasılıksal sismik tehlike yaklaşımı ile belirlenebilir. Bu seviyede bir depremde, baraj, yardımcı yapılar ve donanımın işlevlerini sürdürebilir olması ve hasarın kolaylıkla giderilebilecek seviyelerde kalması istenmektedir. USACE (1995), OBE durumunda beton ağırlık barajlardaki gerilme seviyelerinin elastik sınırlar içinde kalmasını gerekli görmektedir.

Baraj tasarımında kullanılacak en yüksek yer hareketini yaratacak deprem olarak tanımlanan MDE (veya SEE), kabul edilen tektonizmanın yaratabileceği maksimum deprem (Maximum Credible Earthquake, MCE) kullanılarak deterministik olarak belirlenebileceği gibi, çok yüksek bir tekrarlama süresi kabul edilerek (belirlenen tektonizmaya, bölgenin sismik aktivitesine, barajın önemine ve akış aşağısındaki risklere bağlı olarak 2500, 5000, 10000 yıl gibi süreler esas alınabilir) olasılıksal olarak da belirlenebilir. MDE seviyesindeki bir depremde, baraj veya yardımcı yapılarda elastik sınırların aşılması ve buna bağlı hasarlar "**izin verilebilir**" olarak değerlendirilmektedir (USACE, 1995). Ancak rezervuar suyunun kontrolsüz boşalımı veya can kaybına neden olacak katastrofik bir göçme meydana gelmemelidir.

MDE seviyesindeki bir depremden sonra meydana gelecek hasarlar vs. nedeni ile, baraj ve yardımcı yapıların deprem sonrası duraylılığı, söz konusu hasarlar nedeniyle yükleme durumları ve malzeme parametrelerinde meydana gelebilecek değişiklikler de dikkate alınarak değerlendirilmeli, deprem sonrası servis yükleri ve olası artçı şoklar için gerekli kayma, devrilme vs. kontrolleri yapılmalıdır.

Barajın dinamik tasarımında, yukarıda farklı deprem seviyeleri için sağlanması gerekli görülen performans kriterlerinin kontrol edilebilmesi için, farklı koşullarda çeşitli yöntemlere gereksinim duyulmaktadır. Söz konusu yöntemlerin bazıları ile ilgili özet bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

3. TASARIM YÖNTEMLERİ

3.1. Sismik Katsayı Metodu

Sismik yer hareketi nedeniyle meydana gelecek atalet kuvvetlerinin basitleştirilmiş bir yaklaşımla eşdeğer statik kuvvetler olarak göz önüne alındığı sismik katsayı metodu geleneksel bir yöntem olarak halen barajların kayma, devrilme ve taban basıncı tahkiklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Potansiyel kayma yüzeyinin üzerinde yer alan sistemin rijit bir blok olarak ele alındığı bu yaklaşımda, deprem kuvvetleri yapının kütlesi ve Westergaard (1933) tarafından önerildiği şekilde yapı ile birlikte hareket ettiği varsayılan hiperbolik su kütlesinin sismik bir katsayı ile çarpılması ile elde edilmektedir. Sismik katsayı, genellikle maksimum yatay yer ivmesinin bir oranı olarak alınmaktadır.

Söz konusu yöntem deprem kuvvetlerinin ve barajın deprem güvenliğinin basit bir şekilde değerlendirilmesine yöneliktir. Bununla birlikte, sismik katsayının belirlenmesi, potansiyel kayma yüzeyinin kesme dayanımı parametreleri (kohezyon + sürtünme açısı veya sadece sürtünme açısı), sağlanması gerekli görülen güvenlik

sayıları ile ilgili uluslararası bir görüş birliği olmayıp, farklı kurumlar tarafından farklı kriterler önerilmektedir. Örneğin, USBR Normal, OBE ve MDE yüklemelerine karşılık kayma güvenlik sayılarını sırasıyla 3.0, 2.0 ve 1.0 olarak önermekte, aynı yükleme durumları için USACE, 2.0, 1.5 ve 1.1 güvenlik sayısı kriterlerini sunmaktadır. Farklı ülke ve kurumlar tarafından önerilen ölçütler özet olarak ICOLD European Club (2004)'de bulunabilir.

Deprem etkilerinin, bir ivme katsayısı aracılığı ile statik yanal kuvvetler olarak modellendiği sismik katsayı metodunda, gerek yapı-su-temel zemininden oluşan sistemin dinamik özellikleri, gerekse yer hareketinin dinamik karakteristikleri dikkate alınmamaktadır. Bahsi geçen etkenlerin, barajın dinamik davranışı üzerindeki önemli etkileri Chopra (1988) tarafından değerlendirilmiş ve sunulmuştur.

Sismik katsayının yükseklik boyunca sabit kabul edilerek ve baraj gövdesinin rijit bir blok olarak incelendiği yaklaşımın bir başka önemli dezavantajı da baraj gövdesinde deprem sırasında meydana gelen gerilmelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımamasıdır. 2. bölümde açıklandığı üzere, farklı deprem seviyelerindeki performans kriterlerinin kontrol edilebilmesi ve özellikle yüksek yer hareketine maruz kalan barajlarda olası hasarların öngörülebilmesi için gerilmelerin gerçekçi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, gerçekte yatay ivmenin baraj tabanından yukarıya doğru önemli ölçüde arttığı (amplification), buna karşılık aynı yönde kütlenin azaldığı bir davranışı statikçe eşdeğer katsayı yöntemi ile modellemek her zaman güvenli olamayacağından yöntemin ancak belirli koşullarda ve emniyetli yaklaşımlar ile kullanılması önerilir. Bu bağlamda, sismik katsayı metodunun ön-tasarım aşamasında kayma ve devrilme gibi tahkiklerde kullanılabileceği, ancak özellikle yüksek sismisiteli bölgelerde barajın deprem davranışının daha detaylı analizler ile irdelenmesi gereği açıktır.

3.2. Zaman Tanım Alanında Analizler

Zaman tanım alanında analizler, hareket denklemlerinin küçük zaman adımlarında doğrudan entegral alınarak çözümlenmesi nedeni ile yer hareketine maruz kalan yapıların dinamik davranışlarının incelenmesinde en etkin yöntem olarak tanımlanmaktadır (USACE, 2007). Her zaman adımında hareket dengesinin sağlandığı hesap yönteminde barajın deprem davranışı tüm bir deprem kaydı süresince hesaplanabilmekte, böylece gerilme ve deformasyonların zamana bağlı değişimi izlenebilmektedir. Söz konusu yöntemde, temel kayası, rezervuar suyu, baraj gövdesi ve bunların birbirleri ile karşılıklı etkileşimi de modellenerek barajın dinamik davranışı daha gerçekçi bir şekilde incelenebilmektedir. Zaman tanım alanında analizler ile ilgili oldukça kapsamlı bilgi USACE (2003)'de bulunabilir.

Zaman tanım alanında analizlerin önemli bir avantajı da, gerek doğrusal, gerekse doğrusal olmayan sistemlerin çözümüne, bu bağlamda OBE ve MDE performans kriterlerinin tam olarak kontrol edilmesine olanak vermesidir. Yöntem beton gerilmelerinin elastik sınırlar içinde kaldığı durumlar için geçerli ve güvenilir sonuçlar vermesi yanısıra, uluslararası şartnameler tarafından (FEMA,2005; USACE,2007) barajın doğrusal sınırların üzerindeki davranışının ve oluşabilecek hasarların öngörülmesi amacı ile tüm baraj tasarımları için de önerilmektedir.

Gerek yerinde döküm beton, gerekse silindirle sıkıştırılmış beton barajlarda düşey yapım derzleri yer almakta, ayrıca gövde imalatı sırasında çekme ve kesme dayanımı gövde betonuna göre daha düşük olan yatay döküm derzleri meydana gelmektedir. Yüksek seviyeli bir yer hareketi sırasında, düşey derzlerde tekrarlı olarak açılıp kapanma, yatay döküm derzleri, beton-kaya kontağı veya gerilme yığılmalarının oluştuğu köşelerde çekmeye bağlı çatlakların olması muhtemeldir (USACE, 2007). Bu bağlamda, deformasyonların büyük çoğunluğu bu çatlaklar üzerinde meydana gelecek ve baraj gövdesindeki diğer bölgelerde çekme gerilmelerinin azalması nedeniyle çatlak oluşumu engellenecektir. Dolayısıyla büyük bir deprem durumunda, beton barajlarda birkaç ana çatlak yüzeyinin oluşması beklenmelidir (Wieland, 2008). Böyle bir durumda, barajın doğrusal olmayan davranışının incelenmesi için ana fikir olarak iki farklı yaklaşımdan söz edilebilir. Bunlar, yayılan çatlak (smeared crack) yaklaşımı ve ayrık çatlak (discrete crack) yaklaşımı olarak ifade edilmektedir.

Yayılan çatlak yaklaşımında, doğrusal elastik analizlerde kullanılan nümerik modelin aynısı kullanılarak, çatlak oluşumu ve dağılımı, beton için çatlak oluşumuna imkân verecek doğrusal olmayan bir gerilme-deformasyon davranışı modellenerek incelenmektedir. Söz konusu yaklaşım ile ilgili detaylı bilgi ve analiz örnekleri El-Aidi (1988), Panel on Earthquake Engineering of Concrete Dams (1990); Yamaguchi v.d. (2004) ve Mirzabozorg ve Kianoush (2008) gibi referanslarda bulunabilir. Bu yaklaşımda, betonun modellenmesinde kullanılan ileri malzeme modeli için çok sayıda parametre gerekmekte olup, bunların belirlenmesinde zorluklar söz konusudur. Ayrıca, çözümün doğruluğu ve geçerliliği, modeldeki eleman sayısına, yük aralıklarının küçüklüğüne ve tekrarlanan çözüm (iteration) sayısına bağlı olup, iki boyutlu da olsa gerçek bir in-elastik davranışı modellemek bugünkü hızlı bilgisayarlar için bile çok pratik değildir Bu nedenle, barajın potansiyel yenilme ve çatlama davranışını belirleyen derzlerin ve zayıf düzlemlerin göz önüne alındığı daha basitleştirilmiş yöntemler önerilmektedir (USACE,2007; Wieland, 2008).

Basitleştirilmiş bir yöntem olan ayrık çatlak yaklaşımında, doğrusal elastik analiz sonuçlarına göre aşırı zorlanan ve çatlamanın beklendiği derzlerde veya bölgelerde, kayma ve ayrılma hareketinin modellenebildiği eklemler tanımlanarak, bu eklemler ile birbirine bağlanan blokların içinde doğrusal elastik davranış kabul edilmektedir. Bu yöntemin avantajı, doğrusal olmayan davranışın sadece eklemler için belirlenen dayanım parametreleri ile sağlanabilmesidir. Deprem sırasında, doğrusal elastik analiz sonuçları ve benzer barajlardaki tecrübeye dayanarak belirlenen çatlaklar nedeniyle oluşan blokların, çatlak yüzeyi boyunca yapacağı deplasmanlar belirlenmeli, ayrıca deprem sonrası duraylılık çatlak yüzeyi için artık (residual) dayanım parametreleri ve olası su basınçlarının çatlak içindeki olumsuz dağılımı göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım prensibinde tasarlanan Pervari Barajı ile ilgili hesap detayları 4. bölümde verilmektedir.

4. TASARIM ÖRNEKLERİ

4.1. Cindere Barajı

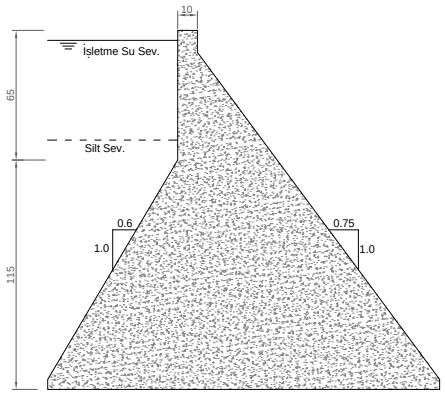
Ocak 2002'de yapımına başlanan Cindere Barajı Türkiye'de "Silindirle Sıkıştırılmış Katıdolgu - SSKD" yöntemi ile inşa edilen ilk barajdır. Temelden yüksekliği 107 m ve kret uzunluğu 281 m olan barajın akış yukarı ve akış aşağı yüzeyleri simetrik olarak 0,7Y:1,0D eğimle projelendirilmiştir. Büyük Menderes Grabeni'nin doğu ucunda yer alan bölgenin yüksek depremselliği nedeni ile barajın yapısal tasarımı, duraylılığı ve yapı malzemelerinin seçimine büyük önem verilmiştir. Barajın şekil ve şev optimizasyonu için klasik duraylılık analizleri, dayanım gereksinimlerini belirlemek için ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, her iki çalışmada da statikçe eşdeğer sismik katsayı yöntemi izlenmiştir. Gövde hacmi ve kullanılacak bağlayıcı malzeme içeriğinin belirlenmesinde a=0,2g yatay ivme katsayısı ile OBE deprem seviyesi esas alınmış, MDE seviyesindeki deprem için ise a=0,3g yatay ivme katsayısı kullanılarak baraj duraylılığı kontrol edilmiştir. Yapılan bu analizlerde kaymaya karşı güvenlik sayıları DSİ tarafından istenilen sınırların üzerinde, OBE seviyesindeki deprem için 1,39, MDE deprem seviyesi için ise 1,05 olarak hesaplanmıştır.

SSKD tipi barajlarda simetrik eğimin en önemli avantajı, tüm yüklemelerde gövdenin basınç tesirleri altında kalmasıdır. Böylece deprem yüklerinden kaynaklanan tersinir kayma gerilmeleri her zaman basınç altında oluşacak sürtünme kuvvetleri ile karşılanabilmekte, yüksek bir hedef dayanımına ve tabakalar arasında yastık betonu ile (bedding mortar) büyük ölçüde bir derz iyileştirmesine gerek kalmamaktadır. Geniş baraj tabanı da, yüksek barajın göreceli zayıf kaya üzerine inşa edilmesine olanak sağlamaktadır. Seçilen baraj tipi, boyutlar ve elde edilen sonuçlar nedeni ile kullanılan tasarım yöntemi yeterli bulunmuş ve daha ileri seviyede bir sismik tasarım gerekli görülmemiştir. En olumsuz yükleme halinde oluşabilecek gerilmeleri ve dayanıklılık (durability) koşulunu karşılayabilmek için gereken dayanımının 6 MPa seviyesinde olacağı hesaplanmış ve bu sonuca göre hedef dayanım 8 MPa olarak belirlenmiş, böylelikle baraj inşasında büyük bir ekonomi ve sürat sağlanmıştır. Cindere barajının sismik tasarım detayları, 1. Ulusal Baraj ve Hidroelektrik Santralar Sempozyumu – DSİ, Ankara, 2004' de sunulmuştur (Gürdil, 2004).

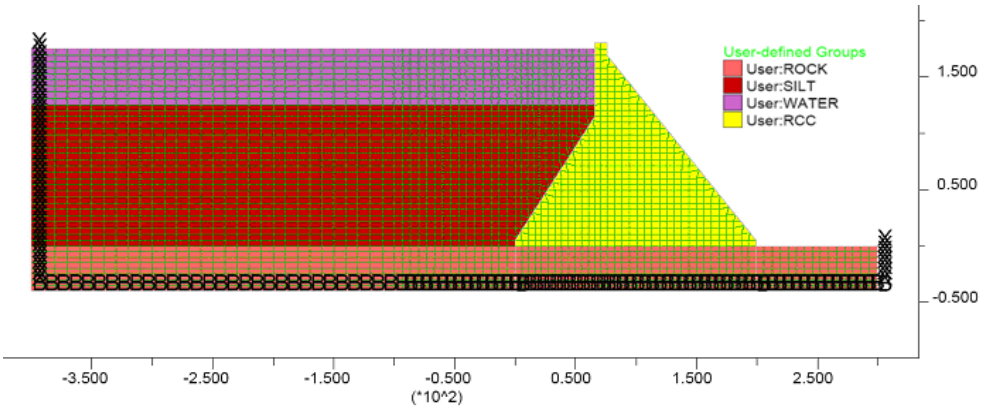
4.2. Pervari Barajı

Siirt İl sınırları içerisinde, temelden itibaren 180 metre yüksekliğinde SSB olarak projelendirilen Pervari Barajı'nın sismik davranışı, sonlu farklar metodunun kullanıldığı FLAC bilgisayar programı yardımıyla incelenmiştir. Bu bildiride, sadece zaman tanım alanında analizlere yer verilmiş, baraj tasarımında birlikte kullanılan statik ve eşdeğer statik yöntemler kapsam dışında tutulmuştur.

Maksimum kesitteki geometrisi Şekil 1'de verilen baraj, duraylılık hesapları sonucunda gerekli görülen taban alanının sağlanabilmesi amacı ile, akış yukarı tarafın alt bölgesinde 0,6Y:1D eğim, akış aşağı tarafında ise 0,75Y:1D eğim verilerek projelendirilmiştir. Maksimum su seviyesi, kretin 5 m altındadır. Barajın akış yukarı tarafında silt tabakası yüksekliği 125 m kabul edilmiştir. Barajın deprem davranışının sonlu farklar yöntemi ile incelenmesi için oluşturulan model Şekil 2'de gösterilmektedir. Düzlem-birim deformasyon (plane-strain) elemanları, kullanılarak hazırlanan modelde taban kayası 40 m derinliğe kadar devam ettirilmiş, rezervuar suyu ve silt de modele düzlem elemanlar ile dahil edilmiştir. Modelin sağ ve sol yanları, sınır koşullarının sistemin dinamik davranışına olan etkisini azaltmak amacı ile uygun mesafelere çekilmiş, serbest alan (free-field) sınır koşulları kullanılarak sismik dalga yayılımının model sınırlarındaki sürekliliği sağlanmıştır (ITASCA 2008).



Şekil 1. Baraj Maksimum Kesit Geometrisi



Şekil 2. Baraj İçin Oluşturulan Sonlu Farklar Ağı

Yapılan jeolojik değerlendirmeler sonucunda taban kayası için elastisite modülü Er= 12 GPa olarak belirlenmiş ve taban kayası kayma dayanımının silindirle sıkıştırılmış beton baraj gövdesindeki yatay derzlerin dayanımından daha fazla olacağı anlaşılmıştır. Bu nedenle, taban kayası doğrusal elastik bir malzeme olarak modellenmiş, gerilme ve duraylılık kontrolleri daha düşük dayanıma sahip olan baraj gövdesi için yapılmıştır.

Yapılan ön analizlerde SSB hedef basınç dayanımının 16 MPa olması yeterli görülmüştür. Yatay derzlerde düşey yöndeki, gövde betonunda ise asal yöndeki hedef çekme dayanımları, gerekli olan yerlerde tabakalar arasında soğuk derz oluşmasını engelleyecek yastık betonu uygulanacağı dikkate alınarak, USACE (2000) kriterlerine göre aşağıdaki şekilde belirlenmiştir. Çekme dayanımı, dinamik yükleme durumu için %50 oranında artırılmıştır.

$\sigma_{tv} = 0{,}05\ \sigma_c = 0{,}80$ MPa, $\quad \sigma_{tv\text{-}dyna} = 1{,}5\ \sigma_{tv} = 1{,}2$ MPa
$\sigma_{tp} = 0{,}09\ \sigma_c = 1{,}45$ MPa, $\quad \sigma_{tp\text{-}dyna} = 1{,}5\ \ \sigma_{tp} = 2{,}15$ Mpa

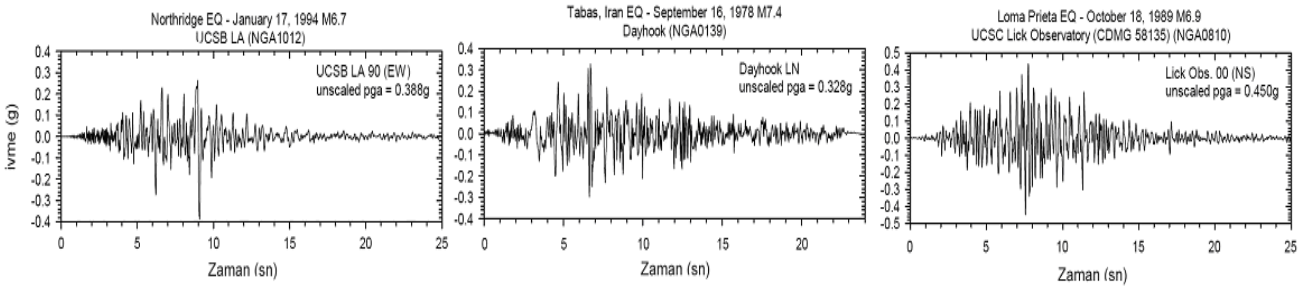
Yukarıdaki ifadelerde, σ_{tv} ve $\sigma_{tv\text{-}dyna}$ sırasıyla düşey yönde; σ_{tp} ve $\sigma_{tp\text{-}dyna}$ ise sırasıyla asal yönde statik ve dinamik çekme dayanımını göstermektedir. Döküm derzlerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, $c = 0{,}75$ MPa ve $\phi = 42$ derece olarak; SSB için elastisite modülü ise $E = 20$ GPa alınmıştır. SSB baraj inşaatı için hazırlanacak yapı malzemelerinin hedef dayanımlarının yukarıda verilen bu "tasarım değerleri + 1 standard sapma" doğrultusunda hazırlanacağı öngörülmüştür.

Rezervuar suyu, beton ağırlık barajların dinamik davranışında önemli rol oynamaktadır. Bu etkinin dikkate alınması amacı ile dinamik analizlerde rezervuar suyu, Westergaard yaklaşımı ile modele eklenen noktasal kütleler, sürekli ortam elemanları (düzlem veya üç boyutlu) veya akustik elemanlar ile modellenebilmektedir. Scheulen vd. (2010), yaptıkları çalışmada, rezervuar suyunun akustik elemanlar veya sürekli ortam elemanları ile modellendiği durumlarda, ölçümler ile tutarlı su basınçları elde edildiğini göstermişlerdir. Bu çalışmada, Şekil 2'de verilen sonlu farklar ağından da görülebileceği gibi, rezervuar suyu, çok düşük kayma rijitliğine sahip olan düzlem-deformasyon elemanlar ile modellenerek, dinamik davranış üzerindeki etkisi gerçekçi bir şekilde modellenmeye çalışılmıştır.

Sismik tehlike analizi sonucunda, İşletmeye Esas Deprem (OBE) ve Maksimum Tasarım Depremi (MDE) için Maksimum Yer İvmesi (PGA) sırasıyla 0,11 g ve 0,38 g olarak belirlenmiş (Martin, 2010), zaman-tanım alanında analizlerde kullanılmak üzere deprem kayıtları ve ölçek faktörleri aşağıdaki tabloda verildiği şekilde önerilmiştir. Orijinal (ölçeklenmemiş) deprem kayıtları ise Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. Analizlerde Kullanılan Depremler ve Ölçek Faktörleri

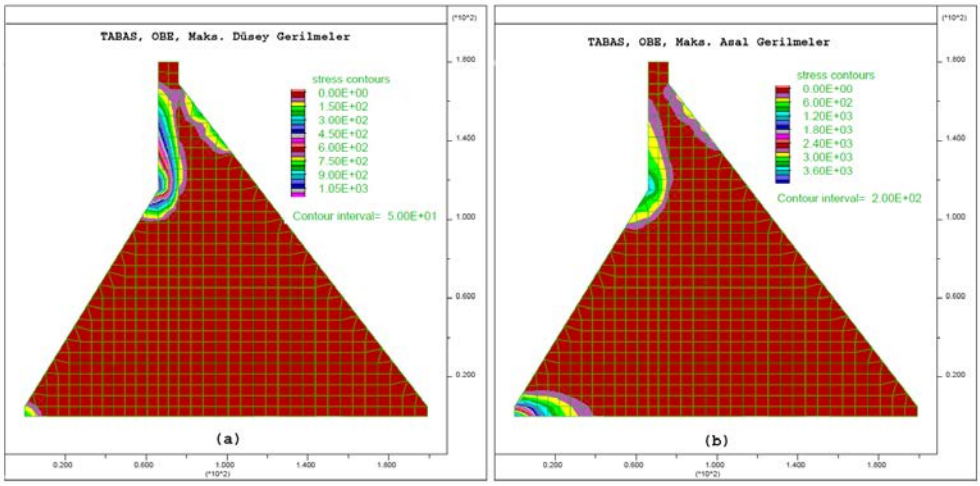
Deprem / İstasyon	Bileşen	PGA (g)	Ölçek Fak.(MDE)	Ölçek Fak.(OBE)
Tabas, Iran / Dayhook	LN	0,328	1,0	0,33
L. Prieta/CDMG 58135	NS	0,450	0,70	0,23
Northridge / UCSB LA	EW	0,388	1,0	0,33



Şekil 3. Analizlerde Kullanılan Deprem Kayıtları

Yukarıda bahsi geçen deprem hareketleri, oluşturulan sonlu farklar ağının tabanına ivme-zaman kaydı olarak uygulanmıştır. Sistemin sönüm oranı, USACE (2003) tarafından önerildiği şekilde, OBE yüklemesi için %5 olarak alınmış, MDE yüklemesi durumunda, yüksek seviyeli yer hareketi nedeniyle küçük ve büyük ölçekli

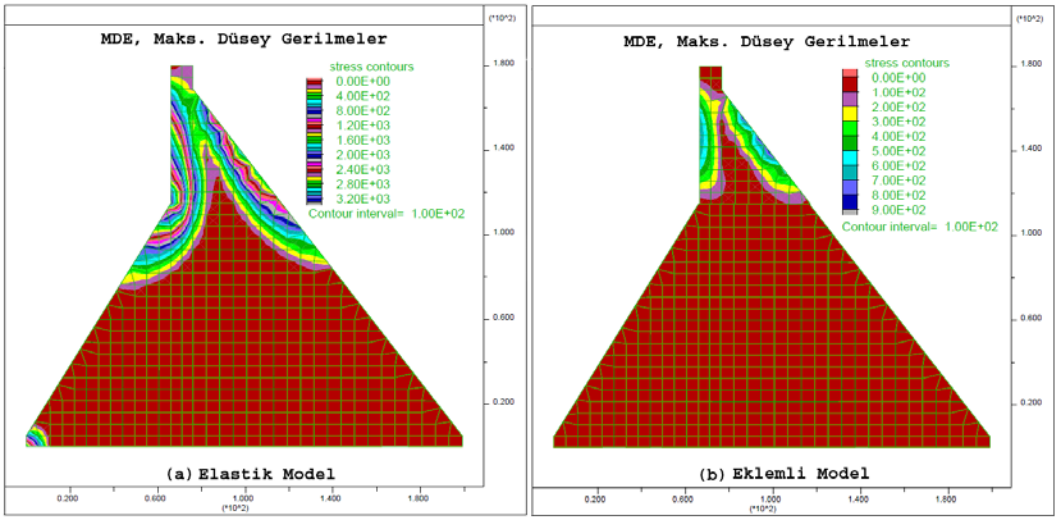
çatlakların oluşacağı ve bu çatlaklardaki enerji sönümü dikkate alınarak sönüm oranı %7'ye çıkarılmıştır. İşletmeye esas deprem (OBE) için doğrusal elastik malzeme modelleri kullanılmıştır. En kritik sonuçların elde edildiği Tabas deprem kaydı için oluşan maksimum düşey ve asal çekme gerilmeleri Şekil 4'de verilmektedir. Sonuçlardan görüleceği gibi, düşey çekme gerilmeleri, baraj gövdesinin küçük bir bölümünde derzlerin çekme dayanımının altında meydana gelmekte; asal yöndeki çekme gerilmeleri ise sadece barajın taban köşesinde bir noktada yerel olarak dayanımı aşmaktadır. Bu durum, hesapların maksimum kesit için yapıldığı nümerik analizlerde yerel yüksek gerilmelerin köşelerde oluşan gerilme yığılmalarından kaynaklandığı ve söz konusu kesimde betonun iyileştirme bölgesinde kalacağı da göz önüne alınarak, kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.



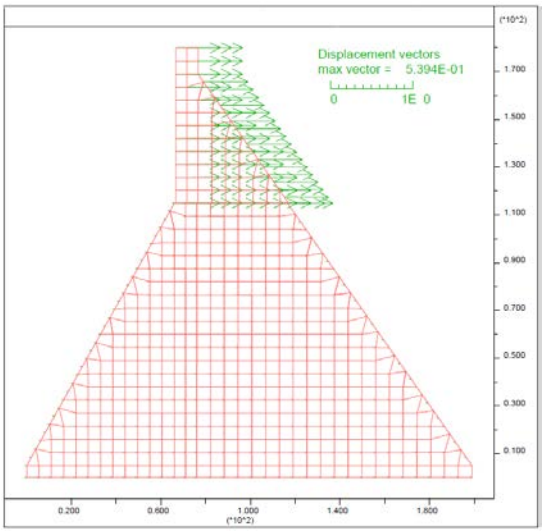
Şekil 4. Tabas Depremi (OBE) Yüklemesi Sonucunda Maksimum Düşey (a) ve Asal (b) Çekme Gerilmeleri

Barajın MDE yüklemesindeki dinamik davranışı öncelikle doğrusal elastik malzeme modelleri kullanılarak incelenmiş, bunun için yapılan analizde OBE yüklemesinde en kritik sonuçların elde edildiği Tabas Depremi kullanılmıştır. Analiz neticesinde düşey yönde elde edilen maksimum çekme gerilmesi dağılımı Şekil 5.a'da verilmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi, beton çekme dayanımı özellikle akış yukarı yüzde eğim değişikliğinin bulunduğu bölgede ve aynı alanın karşısında akış aşağı tarafta önemli ölçüde aşılmaktadır. Bu durum, MDE gibi yüksek seviyede bir sismik yükleme durumunda, barajın bahsi geçen kısımlarında çatlakların oluşmasının kaçınılmaz olduğunu göstermektedir. Aşırı çekme gerilmeleri nedeniyle kırılma ve çatlakların beklendiği bu bölgede doğrusal olmayan (in-elastik) davranışın ve kalıcı deformasyonların izlenebilmesi için akış yukarısından akış aşağı yüzeye kadar uzanan bir eklem tanımlanmış ve analizler 3. Bölümde anlatılan "ayrık çatlak" yöntemi ile tekrarlanmıştır. Tanımlanan eklemde, güvenli yönde kalınarak kohezyon ve çekme dayanımı sıfır kabul edilmiş; sadece içsel sürtünme açısı $\phi=42^0$ için sürtünme kuvvetleri göz önüne alınmıştır. Yapılan analiz neticesinde, deprem sırasında meydana gelen maksimum düşey çekme gerilmeleri Şekil 5.b'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, belirlenen bölgedeki kırılma sonrasında, barajın diğer bölgelerinde gerek yatay derzlerdeki düşey çekme gerilmelerinin gerekse gövdedeki asal çekme gerilmelerinin hedeflenen çekme dayanımından düşük olacağını göstermektedir. Diğer taraftan, deprem sonunda meydana gelen deformasyon vektörleri ve yatay deplasman dağılımı incelendiğinde (Şekil 6), tanımlanan eklem yüzeyinde yaklaşık 0.5 m civarında kalıcı bir deplasmanın oluşabileceği görülmüştür. Bu aşamadan sonra, SSB baraj gövdesinin deprem sonrası (post-earthquake) güvenliğinin incelenmesi amacı ile, varsayılan eklemin üstünde kalan bloğun duraylılığı, çatlağın içinde tam su basıncı oluşabileceği düşünülerek ve kohezyon değeri c=0 kabul edilerek, OBE deprem seviyesi için eşdeğer statik yöntem ile tekrar kontrol edilmiştir. Söz konusu bloğun kaymaya karşı emniyetinin MDE sonrasında OBE seviyesindeki bir artçı şok için 1,29 gibi bir güvenlik sayısı ile yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 5. (MDE) Yüklemesi Sonucunda Doğrusal Elastik (a) ve Eklemli Model (b) için Maksimum Düşey Çekme Gerilmeleri



Şekil 6. Eklemli Model Analizi Sonucunda Kalıcı Deplasman Vektörleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deprem hareketleri kısa süreli ve tersinirdir. Bu nedenle uygun formdaki beton ağırlık barajlarda, zemin sorunu yok ise, tam bir duraysızlık olası değildir.

Yapıda meydana gelebilecek iç kuvvetlerin doğrusal elastik sınırlar içerisinde kalması durumunda, barajların sismik tasarımlarında statikçe eşdeğer sismik katsayı yöntemi yeterli olarak kabul edilebilir. Bu bağlamda, tasarımda OBE yüklemesi için yukarıda bahsedilen statik yöntemler kullanılarak gerilmeler hesaplanabilir. Bu seviyede bir depremde oluşabilecek küçük hasarlar da kolayca tamir edilebilir seviyede olacaktır. Ancak özellikle yüksek sismisiteli bölgelerde ve MDE yüklemesinde, betonda oluşan çekme gerilmelerinin izin verilebilir sınırlara yakın olduğu veya aştığı durumlarda zaman-tanım alanında analiz yöntemleri tercih edilmelidir (FEMA, 2005).

Analizlerde ani şekil değişimlerinin kaçınılmaz olduğu noktalardaki gerilme yığılmaları nedeniyle dayanım gereksinimlerinin artırılması ekonomik değildir. MDE deprem seviyesinde oluşabileceği varsayılan kırık yüzeyi boyunca önemli ölçüde kalıcı deplasmanlar da meydana gelebilir. Ancak doğrusal olmayan (in-elastik) davranışın, gerçekçi bir şekilde modellendiği ileri analiz yöntemleri ile kontrol edildiği ve deprem sonrası artçı şokların ve servis yüklerinin göz önüne alınarak deprem sırasında veya sonrasında baraj duraylılığının denetlenerek yeterli güvenliğin sağlandığı durumlarda, bu hasarlar ve deformasyonlar kabul edilebilir.

KAYNAKLAR

Bureau, G.J. (2003). Dams and Appurtenant Facilities. Earthquake Engineering Handbook, Chapter 26, Chen W. And Scawthorn C. ed., CRC Press.

Chopra, A.K. (1988). Earthquake Response Analysis of Concrete Dams. Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation, Chapter 15, Rober B. Jansen ed., Van Nostrand Reinhold, New York.

El-Aidi, B. (1988). Nonlinear Reponse of Concrete Gravity Dam Systems. Report No. EERL-88-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology.

FEMA. (2005). Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analysis and Design of Dams.

Gürdil, A. F., (2004), Cindere Barajının Yapısal Tasarımı, 1. Ulusal Baraj ve Hidroelektrik Santralar Sempozyumu – DSİ, Ankara,

ICOLD. (1989). Selecting Seismic Parameters for Large Dams , Bulletin 72.

ICOLD European Club. (2004). Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams, Final Report.

Itasca Consulting Group, Inc. (2008). FLAC ver 6.0 User's Guide, Dynamic Analysis, Minneapolis:Itasca.

Martin, J.R. (2010). Pervari Dam and HEPP Project Final Seismic Risk Assessment Report. Pervari Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş.

Mirzabozorg, H. Ve Kianoush, M.R. (2008). Seismic Safety Evaluation of Concrete Dams Using Damage Mechanics Approach. *14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China*

Panel on Earthquake Engineering for Concrete Dams. (1990). Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance and Research Needs. National Academy Press, Washington DC.

Scheulen, F., Gersdorff, V.N., Duran, Z. Knarr, M. (2010). Numerical Model Validation for Large Concrete Gravity Dams. *USSD 30th Annual USSD Conference, Sacramento, California, April 12-16,* 233-248

USACE. (1995). Gravity Dam Design, EM 1110-2-2200.

USACE. (2000). Roller Compacted Concrete, EM-1110-2-2006.

USACE. (2003). Time History Dynamic Analyses of Concrete Hydraulic Structures, EM-1110-2-6051.

USACE. (2007). Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures, EM-1110-2-6053.

Wieland, M. (2008). Analysis Aspects of Dams Subjected to Strong Ground Shaking. *International Water Power and Dam Construction, March 2008,* 28-31..

Yamaguchi, Y., Hall, R., Takashi, S.,Matheu, E., Kanenawa, K., Chudgar, A., Yule, D. (2004). Seismic Performance Evaluation of Concrete Gravity Dams. *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada,* Paper No.1068