KOÇAK KEMER BETON BARAJI SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Alper Aldemir¹, Barış Binici²

Özet

Bu çalışmada Koçak kemer baraj gövdesinin deprem performansı üç boyutlu sonlu eleman analizleriyle incelenmiştir. Aktif fay hattına oldukça yakın mesafede bulunan baraj gövde tasarımında sismik güvenliğinin incelenmesi büyük ehemmiyet taşımaktadır. Öncelikle, barajın bulunduğu mevkiye özel sismik tehlike sonuçları derlenmiş ve analizlerde tasarım deprem spektrumlarıyla tutarlı üçer adet sentetik yer hareketinden faydalanılmıştır. Daha sonra, zemin-yapı-rezervuar ve siltli dolgu etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. İlk aşamada bu bahsi geçen deprem senaryolarının tek yönlü ve üç yönlü uygulanması sonucu baraj gövdesinin lineer elastik kalacağı düşünüldüğünde maruz kalacağı etkiler gözlemlenmiştir. Tüm analizlerin neticesinde Koçak baraj gövdesinin OBE (İşletme Esaslı Deprem [Operatinal Based Earthquake]) ve MDE (Azami Tasarım Depremi [Maximum Design Earthquake]) deprem hareketleri etkisi altında sınırlı hasar aldığı ancak MCE (Azami Karakteristik Deprem [Maximum Credible Earthquake]) deprem etkisi altında ciddi hasar alabileceği sonucuna varılmaktadır. Yapılan stabilite analizi sonucu oluşan hasarın hem kayma hem de devrilme sorunu ortaya çıkarmayacağı söylenebilir.

1. Giriş

Bu bildiri, Koçak Barajı gövdesi deprem değerlendirmesi ve performansı için gerçekleştirilmiş sonlu eleman analiz çalışmalarını içermektedir. Beton kemer baraj olarak tasarlanan Koçak Barajı, Giresun-Çamoluk mevkiinde yer almakta olup Doğu Anadolu Fay hattına yaklaşık 9 km mesafededir (Şekil 1). Koçak Barajı'nın deprem analizleri için baraj-zemin etkileşimini, üç boyut ve üç yön deprem etkilerini dikkate alan lineer elastik ve nonlineer zaman aşımlı sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Bildirinin ana amacı, yapılan bu analizler ile literatürde mevcut bulunan tasarım ve gerilme kriterleri çerçevesinde baraj kesitinin güvenlik durumunun değerlendirilmesidir. Gövde tasarımında sismik etki büyük rol oynadığından, çalışmalar yerel sismik riskin belirlenmesi ile başlamıştır. Bu bağlamda Yılmaz (2010) tarafından yapılan çalışmada, sismik tehlike çalışması ile tasarım spektrumu ve sentetik deprem hareketleri belirlenmiştir. Üretilen

¹ İnş.Y.Müh., O.D.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

² Doç. Dr., O.D.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara



Şekil 1 - Koçak Barajı Plan ve İmalat Fotoğrafları

bu yer hareketlerinin zaman aşımlı sonlu eleman analizlerinde kullanılması ile Koçak Barajı deprem performansının belirlenmesi hedeflenmiştir. Öncelikle baraj-zemin-dolgu ve rezervuar bölgelerinin 3 boyutlu modeli oluşturularak öz şekilleri (eigen modları) belirlenmiştir. Ardından, üçer adet senaryo depremleri kullanılarak Koçak Barajı ve zemin modelinin üç boyutlu sonlu eleman analizleri ile dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sonlu eleman modelleri, statik ve hidrodinamik su yüklerini, rezervuar altı dolgu etkilerini ve baraj zemin etkileşimini dikkate alacak şekilde düzenlenmiştir. OBE durumu için kemer orta bölgesinde kritik olabileceği durum rezervuarın boş durumu ile gerçekleşebileceğinden, bu deprem seviyesi için boş rezervuar durumu incelenmiştir. Ayrıca, OBE ve MDE deprem hareketlerinin ölçeklendirilmesi ile MCE olarak tanımlanan deprem seviyesi için de baraj gerilmeleri ve stabilite durumu tahkik edilmiştir.

2. Analiz Parametreleri

2.1 Yerel Sismik Tehlike Sonuçları

Koçak Barajı mevkii birinci deprem kuşağında yer almakta olup, sismik tasarım kriterleri baraj tasarımında önemli rol oynamaktadır. Sismik riskin tasarımda bu şekilde önemli yer tuttuğu projelerde, mevkiye özel olarak hesaplanacak deprem istemlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Şekil 2'de gösterilen tasarım spektrumları, kayma dalga hızı 760 m/s olan kaya zemin üzerinde değişik periyotlar için serbest yüzey spektral ivmesi olarak hesaplanmıştır. Türk Deprem Şartnamesinde (2007) sunulan tasarım spektrumu birinci derece deprem bölgesi için azami yer ivmesi ve spektral ivme değerlerini 0.4 ve 1.0g olarak sunmaktadır. Görüldüğü üzere sahaya özel belirlenen deprem istemle-



Şekil 2 - Sismik Tehlike Çalışmaları Sonucunda Üretilen Tasarım Spektrumları



Şekil 3 - OBE ve MDE Yer Hareketleri

ri, OBE durumu için Türk Deprem Şartnamesinde önerilen tehlikenin yaklaşık %60'ına, MDE durumu için yaklaşık %97'sine, MCE için ise yaklaşık 1.6 katına denk gelmektedir.

Dinamik analizlerde kullanılması öngörülen zaman-ivme kayıtları hedef spektrumlardan elde edilen deagraga spektrumlara (en kritik senaryo deprem için belirlenen deprem spektrumu ile uyumlu deprem üretilmesi) uygunlaştırılmıştır. Kullanılan bu altı değişik zaman-ivme kaydı Şekil 3'te verilmektedir.

2.2 Malzeme ve Sönüm Bilgileri

Sahada yapılan deneyler sonucunda elde edilen baraj zeminin ortalama elastik modülü, Poisson oranı ve tek eksenli basınç değerleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Alüvyon dolgu ise kısmi boşluklu granuler malzeme olarak düşünülmüş ve veri yokluğundan sıkıştırılmış granuler dolgu için tipik mekanik özellikler olan 200MPa elastisite modulü, 18kN/ m3 birim hacim ağırlık değeri ve 0.3 Poisson oranı analizlerde kullanılmıştır.

		Elastisite Modülü, F (GPa)	Birim Hacim Ağırlık, (kN/m ³)	Poisson Oranı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı, (MPa)
	Ortalama	11.80	26.24	0.22	40.30
	St. Sapma	3.05	0.32	0.02	21.73

Tablo 1 - Baraj Zemini Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Deney Sonuç Ortalamaları

Baraj gövdesinde kullanılan betonun sınıfı C25'dir. Direk çekme mukavemeti USACE-EM-110-2-2200, USACE-EP-1110-2-12 ve Harris ve diğerleri (2000) tarafından çalışma sonuçlarına göre OBE depremi ve MDE/MCE depremleri için aşağıdaki işlemler takip edilerek sırasıyla 2.70 MPa ve 4.00 MPa olarak tespit edilmiştir.

OBE:
$$f_{dt} = 0.9 \times (0.1 \times f_{ck}) \times 0.8 \times 1.5 = 0.108 \times f_{ck} = 2.70 \text{ MPa}$$

MDE/MCE: $f_{dt} = 1.33 \times (0.1 \times f_{ck}) \times 0.8 \times 1.5 = 0.16 \times f_{ck} = 4.00 \text{ MPa}$

Bu çekme dayanımı değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek maksadıyla sahada kullanılacak karışım oranına benzer olarak hazırlanan beton silindir numuneler yarmadan çekme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen çekme dayanımları literatürde önerilen değerlerin bir miktar altında kalmakta olup, yarmadan çekme dayanımının ortalamada 2.2 MPa civarında olduğunu göstermiştir. Bu bilgiler ışığında, C25 betonu için dinamik çekme gerilme limitleri (statik değerlere göre %50 fazla) OBE ve MDE depremleri için sırasıyla, 2.40 MPa ve 3.50 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yapılan hesabın detayları aşağıda verilmektedir.

OBE: $f_{dt} = 0.9 \times f_{ctk} \times 0.8 \times 1.5 = 1.08 \times 2.2 = 2.40 \text{ MPa}$

MDE/MCE: $f_{dt} = 1.33 \times f_{dt} \times 0.8 \times 1.5 = 1.6 \times 2.2 = 3.50 \text{ MPa}$

Beton için elastisite modülü değeri ise USACE-EP-1110-2-12 ve ACI-2008 şartnameleri uyarınca 4750(fck)0.5 denklemi ile 23.75GPa olarak bulunmuştur. Birim hacim ağırlığı beton için tipik değer olan 24 kN/m³ olarak kabul edilmiştir. Görüldüğü üzere baraj zemini kaya olmasına rağmen, zemin beton elastisite modülünün yaklaşık yarısı bir elastisite modülüne sahiptir. Bu sonuç barajın oturduğu kayanın sönümleme etkisi yaratabileceğine işaret etmektedir.

Fenves ve Chopra'nın (1985) çalışmalarını temel alan USACE-EP-1110-2-12 dökümanında, kütlesiz temel yardımı ile çözülen sonlu eleman beton baraj analizlerinde kullanılacak sönüm oranının üç faktörün (yapı, zemin, rezervuar) etkisi dikkate alınarak hesaplanabileceği belirtilmiştir. Sönümleme oranı bir miktar güvenli tarafta kalınarak ve sönüme uyumlu spektrumların kullanılabileceği düşünülerek tüm analizlerde %10 olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda dinamik analizlerde kullanılan Rayleigh sönüm miktarı 1. ve 3. öz şekiller (modlar) arası sabit %10 sönüm verecek şekilde ayarlanmıştır.

2.3 Analiz Kesiti

Üç boyutlu analizlerde dolgu üzeri bölgede membada düşey mansap tarafında ise (1:0.33) eğime sahip kesit kullanılmıştır. İlk 30 m'lik kısmı dolgu ile kapatılacak kesit ise memba ve mansap taraflarında düşey eğime sahiptir.

3. Model ve Analizler

Bu çalışmada yapılan analizler oluşturulurken üç boyutlu 8 düğüm noktalı lineer enterpolasyon fonksiyonlarına sahip elemanlar kullanılmıştır. Tüm analizlerde baraj gövdesi, zemin ve zemin üstü dolgu (silt) modellenmiştir. Ayrıca, bu çalışma boyunca yapılan tüm analizlerde ANSYS (2003) sonlu elemenalar programından faydalanılmıştır.

Modellenen kaya katmanının alt, kuzey-güney, doğu-batı yönleri mesnetlenmiştir. Bu yöntemde zemin kütlesiz verilmekte olup zemin-yapı etkileşiminden dolayı oluşacak sönüm ayrıca eklenmektedir. Yer hareketi olarak kaya üzerinde verilen hareket kullanıl-maktadır. Bu yaklaşım USACE-EP-1110-2-12 de önerilen modelleme ile örtüşmektedir: Analiz metodu, zemin rijtiliğini kütlesiz zemin modeli (USACE-EP-1110-2-12'de önerildiği üzere) ile dikkate alan, hidrodinamik etkileri ekli kütle yaklaşımı ile göz önünde bulunduran ve dolgu etkisini ise kütlesiz elemanlarla katan zaman tanım alanı analiz yaklaşımıdır.

Ayrıca, tüm modellerde su etkileri alınırken hidrostatik basınç kuvveti, eleman yüzeyine düğümsel kuvvet olarak rezervuar derinliğine bağlı tanımlanmıştır. Su kütlesinin yaratacağı ek atalet kuvvetleri ise Westergaard (1933) tarafından düz gövdeli barajlar için önerilen ve Shaw ve Kuo (1982) tarafından genelleştirilen "kütle ekleme" metodu ile dikkate alınmıştır. Bu metotta deprem esnasında su kütlesinin Z yüksekliğinde oluşturacağı dinamik basınç kuvveti Westergaard (1933)'e göre Denklem 1 ile hesaplanır:

$$p = \frac{7}{8} * \rho * \ddot{u}_g * \sqrt{H * (H - Z)}$$
(1)

Bu denklemde p su özkütlesi (kg/m³), üg yer ivmesi (m/sn²), H baraj yüksekliği (m) ve Z yüksekliktir (m). Denklem 1 ile hesaplanan basınç, her bir düğüm noktası etkin alanı (kullanılan sonlu eleman boyutuna göre hesaplanır) ile çarpılarak düğümsel kuvvete, ardından da gerekli düzeltme yapılarak düğümsel kütle haline dönüştürülür. Son olarak bu düğümsel kütleler, sonlu eleman modeli üzerinde noktasal kütle elemanları olarak tanımlanır. Bu aşamada Shaw ve Kuo (1982) tarafından da belirtilen en önemli husus şudur: "Su tarafından deprem etkileri altında yaratılacak olan ek atalet kuvvetleri baraj gövdesine dik yönde etkimek zorundadır." Bundan ötürü model oluşturulurken her bir sonlu elemanın düğüm noktasının normal vektörü bulunup düğümsel kütleler yüzeye dik etkiyecek şekilde verilmiştir.

Bu çalışmada yüklemeler şu durumlar için incelenmiştir: 1) İşletme (Rezervuar Dolu), 2) İnşaat Sonu + OBE Depremi (rezervuar boş), 3) İşletme + MDE (rezervuar dolu), 4) İşletme + MCE (rezervuar dolu). Deprem yönü için ise dikkate alınan iki alternatif: i) baraj aksına dik deprem durumu (Z) ve ii) Baraj Aksına Dik + 0.3 Baraj Aksı Yönünde + 0.8 Düşey (0.3X+Z+0.8Y) şeklindedir. Gerçekleştirilen ön analizler diğer olası kombinasyonların kritik olmadığına işaret etmiştir.

4. Analiz Sonuçları

4.1 Özdeğer Analizi

Koçak barajının üç boyutlu modelle elde edilen (boş rezervuar ve dolu rezervuar koşulları altında) ilk üç öz şekli (eigen modları) Şekil 4'te sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, barajın bütün öz şekilleri her iki rezervuar koşullarında da aksa dik şekillerden oluşmakta ve rezervuar etkileri frekans değerlerini düşürerek periyotların uzamasına sebep olmaktadır.

4.2 Lineer Dinamik Analizler

Üç boyutlu baraj modeli, yamaçlarda lineer idealleştirme yaparak ve baraj ve zemin temsili için yaklaşık 25000 elemandan oluşan bir ağ kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 5). Model büyüklüğü dikkate alındığında her bir deprem analizinin Intel Core 2 Quad Q8300 (2.5 GHz) işlemciye, 4GB belleğe (800MHz) ve Geforce 210 (256 MB bellek ve 128 bit veri yolu) ekran kartına sahip bir bilgisayarda yaklaşık 8 saat civarında sürdüğü ve analiz sonrası sonuçların elde edilmesinin de yaklaşık 2 saat aldığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, üç boyutlu analizlerde doğrusal davranış kullanılmıştır. Analizler, düşey yüklere ek olarak üç yönlü deprem etkileri de dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Deprem



Şekil 4 - Öz Şekiller : (a-c) Boş Rezervuar ve (d-f) Dolu Rezervuar



Şekil 5 - Baraj Aks Yerleşme Planı ve Model için İdealleştirme



Şekil 6 - Sonlu Eleman Analizlerinde Elde Edilen Azami Basınç ve Çekme Gerilmeleri (MCE3)

kombinasyonlarında %30 birleştirme kuralı kullanılmış, düşey deprem katsayısı ise barajın fay hattına çok yakın mesafede bulunması ve çok rijit bir yapı olması nedeniyle 0.8 olarak alınmıştır. Analizlerde memba-mansap yönü z, düşey yön y, aks yönü ise x olarak seçilmiştir. Analizlerin tamamlanmasının ardından çekme ve basınç asal gerilmelerinin maksimum olduğu zaman adımı belirlenmiştir. Bu deprem anı için gerilme değerleri OBE durumu için çekme limiti olan 2.4MPa, MDE ve MCE için ise 3.5MPa değerleri ile kıyaslanmıştır.

Ülkemizde DSİ tarafından tasarlanan barajların teknik şartnamelerine uyumlu olarak OBE ve MDE depremleri altında güvenliğin tetkik edilmesi gerekliliği bilinmektedir. Buna karşın USACE-EM-110-2-2200 tarafından önerilen tasarım ilkelerine göre bu depremlere ek olarak MCE depreminin de kullanılması gerekmektedir. MCE depremi altında barajda stabilite sorunu olmadığı sürece her tür hasar kabul edilebilir. OBE, MDE ve MCE analizlerinden elde edilen azami çekme ve basınç gerilmeleri MCE3 depremi etkisi altında oluşmaktadır (Şekil 6). Şekillerde, azami çekme gerilmelerinin, C25 beton çekme limitlerini aştığı bölgeler sunulmuştur.

Zaman tanım alanında yapılan analizlerin maksimum çekme gerilmeleri, basınç gerilmeleri ve kret deplasmanları sonuçları sırasıyla Şekil 7-10'da özetlenmiştir. Beklendiği üzere artan kret deplasman istemleri ile asal çekme gerilmeleri de artmaktadır. Deplasman istemlerinin 3 no'lu deprem için büyük olmasına benzer şekilde, asal gerilme talepleri de üç numaralı deprem senaryosunda en büyüktür. MCE3 depremi etkisi altında kret deplasmanının zamana göre değişim grafiği bir örnek sonuç teşkil etmek üzere Şekil 10'da verilmektedir.



Şekil 7 - Azami Çekme Gerilmeleri





Şekil 8 - Azami Basınç Gerilmeleri



Şekil 10 - Kret Deplasmanı (MCE3)

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde OBE deprem etkileri barajda en fazla 1.42 MPa çekme gerilmesi yaratırken bu değer limit değerin (2.4MPa) çok altında kalmaktadır. Fakat MDE deprem etkileri hemen hemen her deprem senaryosunda limit değere (3.5 MPa) oldukça yakındır. Örneğin, MDE 3 depremi için azami asal çekme değeri 3.87 MPa olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere MCE depremlerinde azami asal çekme değerlerinin limit değer olan 3.50 MPa değerini ciddi miktarda geçmektedir. Limit çekme değerlerinin geçildiği bölgelerin sunulduğu Şekil 6.a, çatlama bölgelerinin memba tarafında zemin bölgesinde olduğu bilgisini vermektedir. Fakat aşılma miktarı oldukça fazla olduğundan barajın MDE 3 ve MCE 3 deprem etkileri altında daha detaylı incelenmesi gereksinimi olduğu açıktır. Bu gereksinim ışığında gerçekleştirilen nonlineer analiz sonuçları bir sonraki bölümde sunulacaktır.

Azami beton basınç asal gerilmeleri sırasıyla OBE, MDE ve MCE için 2.6 MPa, 6.3 MPa ve 10.4 MPa değerlerindedir. Tüm bu değerler beton azami basınç dayanımının oldukça altındadır.

4.3 Nonlineer Dinamik Analizler

Yukarıdaki bilgiler ışığı altında baraj davranışını daha iyi anlamak amacıyla MDE 3 ve MCE 3 deprem etkileri altında beton çatlama davranışını göz önünde bulunduran analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde beton modellenirken Willam-Warnke (1975) beton modeli kullanılmıştır. Model sabit çatlama modeli olarak tasarlanmış olup çatlama sonrası beton kayma aktarımını daha düşük bir kayma rijitliği ile gerçekleştirmeye izin vermektedir. Analizlerde çatlamış bölgelerin kayma rijitliği çatlamamış betonun %10'u olarak alınmıştır. Kullanılan beton çatlama modeli uyarınca, bir asal eksende çekme gerilmesi geçildiğinde çatlak oluşur ve dayanım azalarak sıfır değerine iner (Şekil 11.a). Fakat, baraj analizlerinde dayanımın çatlama gerçekleştikten sonra sıfıra indiği varsayılmıştır (Şekil 11.b). Her bir integrasyon noktasında en fazla üç yönde çatlak oluşmasına izin verilir. Bu şekilde zaman aşımlı analiz sürecinde oluşan çatlama bölgeleri tespit edilebilir.

Kısım 2.2'de belirtilen çekme dayanım limitleri nonlineer analizlerde kullanılırken, elastik ötesi davranışı dikkate almak için tavsiye edilen büyütme katsayısına (MDE ve MCE



Şekil 11 - Nonlineer Modelde Kullanılan Çekme Gerilmesi ve Çekme Şekildeğiştirme Eğrisi: (a) Genel Model [Willam-Warnke (1975)]; (b) Analitik Modelde Kullanılan Eğri (Tc=0)

için) ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sebeple, C25 beton sınıfı için dinamik çekme basınç dayanımı 2.64 MPa olarak belirlenmiştir. Nonlineer analizler sadece en kritik deprem kombinasyon durumu için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ile kemer ve konsol yönlerinde birim uzama değerlerinin çekme birim uzama limitini geçtiği bölgeler tespit edilmiştir. MDE 3 deprem analizi neticesinde elde edilen ve çatlak bölgeleri olarak nitelendirilebilecek kritik birim uzama bölgeleri Şekil 12'de sunulmaktadır. İlk olarak baraj aksı yönünde oluşan birim uzama değerlerinin betonun çekme limitini aştığı bölgeler işaretlenmiştir (Şekil 12). Ayrıca, MDE3 depremi etkisi altında baraj aksına dik yönde oluşan birim uzama değerleri betonun çekme limitini hiçbir zaman aşmamaktadır. Görüldüğü üzere kemer gövdesi üzerinde boyuna çatlak açılması beklenmektedir. Bu çatlak yaklaşık 0.2sn süre ile açık kalıp kapanmaktadır. Ayrıca olası çatlağın herhangi bir konsol çatlağı ile birleşmediği gözlemlenmiştir.

Üç yönlü MCE depremi etkisi altında elde edilen olası çatlama bölgeleri ise Şekil 13-15'te sunulmaktadır. Şekil 13'de gövde üzerinde düşey çatlaklar (kemer gerilmeleri sebebi ile) oluşması beklenmektedir. Şekil 14 ve 15'ten gözlemlendiği üzere konsol çatlakları ayrı ayrı zamanlarda baraj tabanında ve gövdesi üzerinde V şeklinde oluşmaktadır.



Şekil 12 - MDE3 (0.3X+0.8Y+Z) Deprem Etkisi Altındaki Kemer Birim Uzama Değerlerinin Betonun Çekme Limitini Aştığı Bölgeler



Şekil 13 - MCE3 (0.3X+0.8Y+Z) Deprem Etkisi Altında Kemer Birim Uzama Değerlerinin Betonun Çekme Limitini Aştığı Bölgeler (Zaman=5.16sn)



Şekil 14 - MCE3 (0.3X+0.8Y+Z) Deprem Etkisi Altındaki Konsol Birim Uzama Değerlerinin Betonun Çekme Limitini Aştığı Bölgeler (Zaman=5.05 sn)



Şekil 15 - MCE3 (0.3X+0.8Y+Z) Deprem Etkisi Altındaki Konsol Birim Uzama Değerlerinin Betonun Çekme Limitini Aştığı Bölgeler (Zaman=5.39 sn)

Yukarıdaki sekillerden de anlaşılacağı gibi MCE3 depremi etkisi altında baraj ağır hasar almaktadır. Diğer bir yandan sonuçlar, kritik blok tabanının yaklaşık %70'lik bir kısmının çatladığını ancak çatlamanın memba tarafına tam olarak geçmediğini de göstermektedir. Beklenen bu ağır deprem hasarının ardından, deprem sonrası hasar gören bölgedeki blok stabilitesinin bozulup bozulmadığı Şekil 16'da ayrıca incelenmiştir. Baraj gövdesinden çatlama neticesinde tamamen ayrıldığı varsayımı ile modellenen bloğun kendi ağırlığı, su yükü ve kaldırma kuvveti altında kohezyon dayanımı sıfırken stabil olarak kalması gerekmektedir. Bu modelde bloğun çevresinin tamamen çatladığı ve çatlaklara suyun sızarak kaldırma kuvveti ve yüzey basıncı yarattığı varsayılmıştır. Blok stabilitesinin, etki eden toplam yatay kuvvetin beton bloğun net ağırlığına oranı (kaldırma kuvveti dikkate alındıktan sonra) beton sürtünme katsayısından küçük olması durumunda, bozulmadığı öne sürülebilir. Yukarıda tarif edilen stabilite analizi sonucunda yatayda 2.76*10⁵ kN (Baraj eksenine dik) ve 2.64*10³ kN (Baraj eksini yönünde) reaksiyonlar olusmaktadır. Kaldırma kuvveti etkilerinden sonra kalan efektif beton bloğun kütlesi ise 4.48*10⁵ kN olmaktadır. Diğer bir deyisle bloğun stabilitesinin bozulmaması icin gerekli sürtünme katsayısı 0.62'dir. ACI 318-05 (2005) uyarınca, aralarında sürtünme sağlayacak herhangi bir pürüzlendirme olmamış derzler için sürtünme katsayısı 0.6, pürüzlü yüzeyler icin ise sürtünme katsayısı 1'dir. Buna göre blok deprem sonrası, catlaklara tamamen su girmesi neticesinde dahi kayma açısından güvenli olarak addedilebilir. Bu blok üzerinde taban düşey gerilmeleri incelendiğinde yaklaşık 3 metrelik kısım hariç tüm gerilmelerin basınç olarak kaldığı belirlenmiştir. Azami basınç gerilme değeri (1.8MPa) beton basınç mukavemetinin oldukça altındadır. Bu sonuçların, bloğun devrilme açısından da güvenli olacağı sonucunu doğurmaktadır.



Şekil 16 - Stabilite Analizi Detayları

5. Sonuçlar

Bu bildiride Koçak kemer barajının deprem performansı sonlu eleman analizleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada üç boyutlu analizler çok yönlü ve tek yönlü deprem etkileri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk etapta zaman tanım alanında analizler en basit haliyle yani lineer malzeme ve geometri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu analizlerden çıkan sonuçlar ışığı altında baraj gövdesinde doğrusal olmayan malzeme özellikleri göz önüne alınmıştır. Böylece hem daha gerçekçi bir modelleme tekniği kullanılmaya çalışılmış hem de bu iki farklı analiz yönteminin karşılaştırılmasına da olanak sağlanmıştır.

Lineer analizler sonucunda aşılan gerilme bölgeleri tüm deprem etkileri için çok sınırlı

kaldığı fakat özellikle MCE depremi için aşılma miktarının çok fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sadece bu sonuçlar göz önüne alındığında söz konusu barajın çok fazla hasar almayacağı düşünülebilir. Fakat aynı deprem etkisi altında nonlineer analizler sonucunda barajın çok ağır hasar alacağı gözlemlenmiştir. Ayrıca lineer ve nonlineer analiz sonucunda aşılan gerilme bölgeleri de paralellik göstermemektedir. Bunun sebebi doğrusal olmayan malzeme davranışında elemandan elemana yük dağılımı gerçekleşmesidir. Aslında her iki metodun da baraj tasarımı ve analizinde kullanılmasının bir sakıncası olmadığı düşünülmesine rağmen incelenen barajda bu düşüncenin tam olarak tasdik edilmediği söylenebilir.

Sonuç olarak, zaman tanım alanında yapılan lineer ve nonlineer analiz sonuçlarına bakılarak Koçak barajında OBE depremi etkisi altında minimum hasar, MDE depremi neticesinde kabul edilebilir/tamir edilebilir hasar ve MCE depremi sonrasında ise ağır hasar beklenmektedir. MCE depremi hasar durumuna bakılacak olursa deprem sonrası stabilite kaybı olması ihtimalinin az olduğu söylenebilir. Burada sunulan çalışmaya benzer olarak ülkemizde inşa edilmekte olan baraj gövdeleri için deprem performansı belirleme ve beklenen performansa göre işletim ve acil durum planlarının hazırlanması çalışmalarının mutlaka yapılması gerektiği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- 1. American Concrete Institute (2005). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318r-05)", Farmington Hills, 432 pp.
- 2. ANSYS Inc. (2010) "Basic Analysis Guide for ANSYS 13", SAS IP Inc.
- 3. Fenves, G. ve Chopra A.K. (1984). "Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams", Report No. UCB-EERC/84-10.
- 4. Fenves, G. ve Chopra A.K. (1984). "EAGD84: A computer Program for Analysis of Concrete Gravity Dams", Report No. UCB-EERC/84-11.
- 5. Fenves, G. ve Chopra, A. K. (1985). "Simplified analysis for earthquake resistant design of concrete gravity dams", Report No. UCB/EERC-85/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- 6. Harris, D.W., Mohorovic ve C.E., Dolen, T., (2000). "Dynamic Properties of Mass Concrete Obtained from Dam Cores", ACI Materials Journal, 97(3), p. 290-296.
- 7. Shaw, J. ve H. Kuo (1982). "Fluid-Structure Interactions : Added Mass Computations for incompressible Fluid", Report No. UCB-EERC/82-09.
- 8. Türk Deprem Şartnamesi (2007). "Deprem Bölgesinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- 9. United States Army Corps of Engineers (1995). "Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams", Engineering Procedure 1110-2-12, 50 pp..
- 10. United States Army Corps of Engineers (1995). "Gravity Dam Design", Engineering Procedure, Report No.110-2-2200, 88 pp.
- Willam, K.J. ve E.D. Warnke (1975). "Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete, Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering", Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, 174 pp.

- 12. Westergaard, H.M. (1933). "Water Pressure on Dams during Earthquakes", Transactions, ASCE Vol. 98.
- 13. Yılmaz, T. (2010). "Koçak Barajı için Tasarım Spektrumunun Olasılık Hesaplarına Dayalı Sismik Tehlike Analizi", ODTÜ Döner Sermaye Danışmanlık Raporu.