

## SSB BARAJLAR ve KELEBEK BARAJI DEPREM ANALİZİ

Seçkin AYDIN<sup>1</sup>, Koray C HAN<sup>2</sup>, brahim AKDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> . Yük. Müh. DSİ Genel Müd. Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı

<sup>2</sup> . Müh. DSİ Genel Müd. Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı

<sup>3</sup> . Müh. DSİ Genel Müd. Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı

Email: seckinaydin@dsi.gov.tr

### ÖZET:

Bu çalışmada Silindire Sıkı tırlı Beton (SSB) barajlar özetlenmiş ve Manisa ili sınırları içerisinde inşa edilmiş Kelebek barajının iki boyutlu lineer elastik dinamik analizleri 3 adet MDE Deprem ivme kaydı kullanılarak yapılmıştır. Baraj gövdesinde dikkate alınan söz konusu kritik noktalarda asal çekme gerilmesi-zaman sonuçları elde edilerek yine aynı noktalarda toplam elastik ötesi davranış süresi-talep kapasite oranı (DCR) değerleri elde edilerek barajın deprem performansı değerlendirilmiştir. Analizi yapılan Kelebek Barajında MDE meydana gelen iç kuvvetlerin lineer elastik sınırlar içerisinde kaldığı, barajın sismik tasarımında betonda oluşan çekme gerilmelerinin izin verilebilir sınırlara ulaşmadığı ve basınç gerilmesi altında kaldığı görülmüştür. Bununla beraber 2475 yıl tekerrür periyotlu yani 50 yılda %2 ortalama olasılığa sahip EED depremi ile yapılan analizde bazı kritik bölgelerde çekme gerilmeleri oluşmakta ancak bu gerilme değerlerinin malzemenin dinamik çekme dayanımı olan 1 MPa değerini depreme süresi boyunca aşmadığı görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER :** Silindire Sıkı tırlı Beton (SSB) baraj, Dinamik analiz

### 1. GİRİŞ

Silindire Sıkı tırlı Beton (SSB) barajların büyük çoğunluğu, ağırlık barajı tipinde tasarlanıp inşa edilmektedir. SSB ile kemer tipte barajlar da inşa edilmiş olmakla birlikte bunların davranışları hakkında yeterli kadar tecrübe birikimi ve yaygın uygulama bulunmamaktadır. En basit tanımı ile ağırlık barajı, tüm dış yüklerin etkisi sonucu meydana gelecek kaymaya ve devrilmeye karşı kendi ağırlığı ile karşı koyan, çoğunlukla dik üçgen bir kesite sahip kütleli bir yapıdır. Silindire Sıkı tırlı Beton (SSB) ağırlık barajı ekil olarak klasik beton dökümü ile yapılmış olan beton ağırlık barajın tıpa tıpa benzeridir. Klasik beton ağırlık barajı, betonun kendisi ve betonu oluşan turan malzemelerde aranan özellikler (agreganın yıkanması gereği v.b.) ve inşaat tekniği yönüyle maliyeti yüksek bir yapıdır. Farklı bir beton malzemesi olan sıfır çökmeli betonun imali, taşınması, serilmesi ve silindire sıkı tırlanmasında toprak veya kaya dolgu barajların yapımında olduğu gibi inşaat makinelerinin benzer şekilde kullanılması ile Silindire Sıkı tırlı Beton (SSB) baraj inşaatında önemli bir tasarruf sağlanmış ve SSB barajlarda da klasik betonun özelliklerine eşdeğer bir beton malzemesi elde edilmiştir. Silindirlerin ve diğer inşaat makinelerinin batmadan üzerinde dolaşmasına imkan veren bu beton malzemesi ile kısa sürede ve düşük maliyette beton baraj inşa edilmesi mümkün olmuştur. Bu durumda, Silindire Sıkı tırlı Beton (SSB) barajlar toprak ve kaya dolgu ve diğer tipteki barajlarla maliyet bakımında yarışır hale gelmiştir.

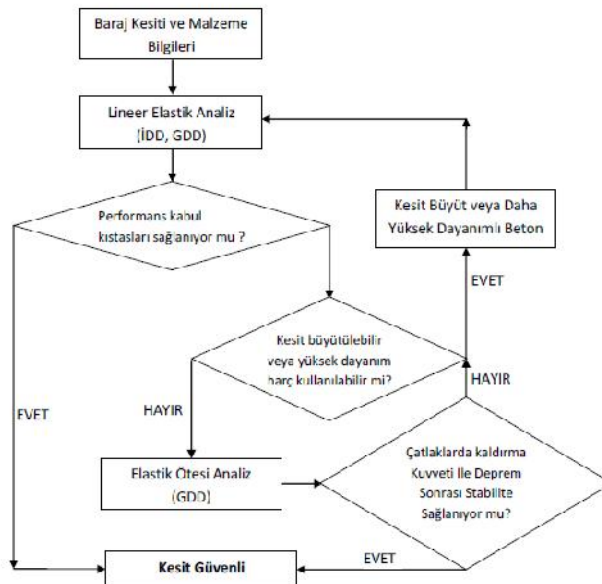
Zaman tanım alanında analizler, hareket denklemlerinin küçük zaman adımlarında doğrudan entegral alınarak çözümlenmesi nedeniyle yer hareketine maruz kalan yapıların dinamik davranışlarının incelenmesinde en etkin yöntem olarak tanımlanmaktadır (USACE, 2007). Her zaman adımında hareket dengesinin sağlanması hesap yönteminde barajın deprem davranışını 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 birbirleriyle karşılıklı etkileşimi de modellenerek barajın dinamik davranışını daha gerçekçi bir şekilde incelenebilmektedir.

Zaman tanım alanında analizlerin önemli bir avantajı da, gerek do rusal, gerekse do rusal olmayan sistemlerin çözümüne, bu ba lamda letme Esaslı Deprem (OBE) ve Maksimum Tasarım Depremi (MDE) performans kriterlerinin tam olarak kontrol edilmesine olanak vermesidir. Yöntem beton gerilmelerinin elastik sınırlar içinde kaldı ı durumlar için geçerli ve güvenilir sonuçlar vermesi yanı sıra, uluslararası arnameler tarafından (FEMA,2005; USACE,2007) barajın do rusal sınırların üzerindeki davranı mın ve olu abilecek hasarların öngörülmesi amacı ile tüm baraj tasarımları için de önerilmektedir.

Gerek yerinde döküm beton, gerekse silindire sıkı tırlımı beton barajlarda dü ey yapım derzleri yer almakta, ayrıca gövde imalatı sırasında çekme ve kesme dayanımı gövde betonuna göre daha dü ük olan yatay döküm derzleri meydana gelmektedir. Yüksek seviyeli bir yer hareketi sırasında, dü ey derzlerde tekrarlı olarak açılıp kapanma, yatay döküm derzleri, beton-kaya konta ı veya gerilme yı ılmalarının olu tu u kö elerde çekmeye ba lı çatlakların olması muhtemeldir (USACE, 2007). Bu ba lamda, deformasyonların büyük ço unlu u bu çatlaklar üzerinde meydana gelecek ve baraj gövdesindeki di er bölgelerde çekme gerilmelerinin azalması nedeniyle çatlak olu umu engellenecektir. Dolayısıyla büyük bir deprem durumunda, beton barajlarda birkaç ana çatlak yüzeyinin olu ması beklenmelidir (Wieland, 2008).

SSB Barajların deprem performansının tahmininde iki veya üç boyutlu, statik veya dinamik, elastik veya elastik ötesi analizler gerçekleştirilir. Analizler sonucunda gerilme yı ılması bölgeleri ile potansiyel hasar bölgeleri tespit edilir. Elastik analizlerde gerilme limitleri göz önüne alarak, elastik ötesi analizlerde ise hasar bölgelerinin deprem sonrası baraj stabilitesine etkisi incelenerek kesit güvenli i belirlenir.

ekil 1 de deprem analizleri ile deprem sonrası yapılması gereken tahkikler özetlenmektedir. OBE, MDE ve EED için gerçekleştirilecek lineer elastik gerilme analizleri ile kritik noktalar tahkik edilir. Kıstasları sa lamayan barajların kesiti büyütülebilir veya yetersiz oldu u tespit edilen bölgelerde daha yüksek dayanımlı beton ya da harç kullanılabilir. Lineer elastik analizler neticesinde gerilme kıstaslarını sa lamayan ancak elastik ötesi davranı mın sınırlı kalabilece i dü ünülen kesitler için elastik ötesi do rusal olmayan analizler ile baraj gövdesinin güvenli i tahkik edilebilir. Genellikle zaman tanım alanında gerçekleştirilen elastik ötesi analizler oldukça zahmetli ve karma ık analizlerdir. Bünye modellerinde beton çatlama davranı mın mutlaka do ru modellendi inden emin olunduktan sonra bu modeller kullanılmalıdır.



ekil 1. Deprem Tahkiklerinde zlenecek Akı eması

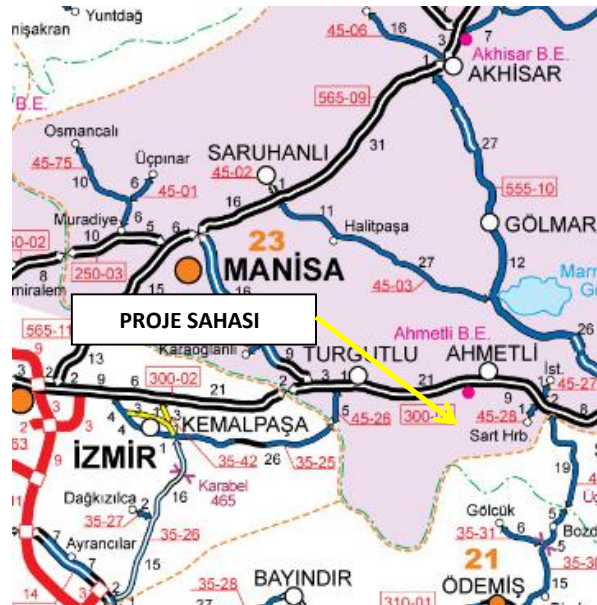
Deprem analizlerinde statik ve dinamik yüklerin dikkate alınması gerekir. Lineer elastik analizlerde statik ve dinamik analiz sonuçları doğrudan toplanır. Elastik ötesi analizlerde ise yükler, olası sıralarına göre modellere yansıtılır. Barajlar üzerine etki eden dinamik yükler, baraj gövdesinin atalet kuvvetleri, memba ve mansaptaki rezervuar ve kuyruksuyu kaynaklı hidrodinamik yükler, rezervuar tabanı ve var ise dolgu malzemesinin yaratabileceği dinamik etkilerdir. Statik yükler ise barajın ağırlığı, hidrostatik su basıncı, baraj tabanında oluşan silt yükleri ve kaldırma kuvvetleridir. Hidrostatik ve hidrodinamik yükler baraj su seviyesinin asgari ve azami su seviyeleri dikkat alınarak ayrı durumlar için ele alınmalıdır.

Bu çalışmada Manisa ili sınırları içerisinde inşaatı planlanan Kelebek barajının iki boyutlu lineer elastik dinamik analizleri 3 adet MDE Deprem ivme kaydı ve bir adet EED kaydı kullanılarak yapılmıştır. Baraj gövdesinde dikkate alınan söz konusu kritik noktalarda asal çekme gerilmesi-zaman sonuçları elde edilerek yine aynı noktalarda toplam elastik ötesi davranış süresi-talep kapasite oranı değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

## 2. BARAJA AİT KARAKTERİSTİKLER, MALZEME PARAMETRELER ve DİNAMİK YÜKLER

### 2.1. Geometri ve Model

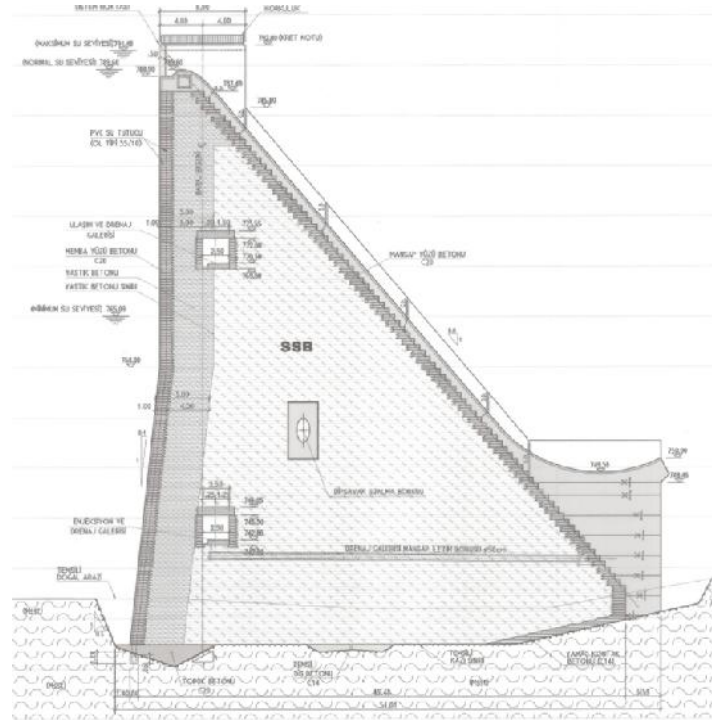
Manisa iline bağlı Ahmetli ilçesinin 25 km güneyinde yapılacak olan Kelebek barajı Proje Sahası ekil 2 de görülmektedir.



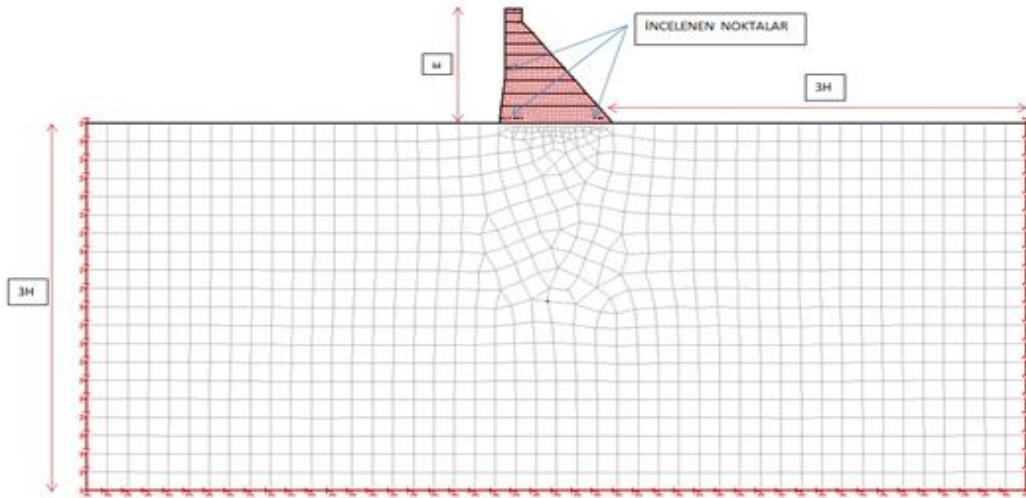
ekil 2. Proje Alanı

Kelebek barajı maksimum kesitte 79.35 m yüksekliğinde Silindirik Sıkırtılı Beton (SSB) dolgu tipinde olup, 8 m kret genişliğine sahiptir. Maksimum kesitte geometrisi ekil-3'de verilen baraj, duyarlılık hesapları sonucunda gerekli görülen taban alanının sağlanabilmesi amacıyla akı yukarı tarafın 760.00 kotunun altında 1D/0.1Y ve akı aşağı tarafında ise 1D/0.8Y eğimi verilerek projelendirilmiştir. Maksimum su seviyesi, kretin 0,52 m altında yer almaktadır.

Barajın deprem davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenebilmesi için oluşturulan model ekil-3'de gösterilmektedir. Model 1590 adet elemana bölünmüştü ve modelin sağ ve sol yanları, sınır koşullarının sistemin dinamik davranışına olan etkisinin azaltmak amacıyla uygun mesafelere çekilmiştir.



ekil 3.Max. Gövde En Kesiti



ekil 3.Sonlu Eleman Modeli

## 2.2. Malzeme Parametreleri

Yapılan jeolojik de erlendirmeler sonucunda taban kayası için elastisite modülü Rocklab programı ile  $E_r=1.73$  GPa olarak belirlenmi ve taban kayası kayma dayanımının silindirle sıkı tırlımı beton baraj gövdesindeki yatay derzlerin dayanımından daha fazla olaca 1 anla ılımı tır. Bu nedenle, taban kayası lineer elastik bir malzeme olarak modellenmi tır.

Yapılan ön analizlerde SSB hedef basınç dayanımının 10 MPa olması yeterli görülmü tır. Yatay derzlerde dü ey 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 denklem 1,2,3,4 de verilen şekilde belirlenmiştir.

OBE deprem için SSB' çekme dayanımı

$$t_v = 0.05 \quad c = 0.50 \text{ MPa}, \quad t_{v\text{-dinamik}} = 1.35 \quad t_v = 0.68 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$t_p = 0.09 \quad c = 0.90 \text{ MPa}, \quad t_{p\text{-dinamik}} = 1.35 \quad t_p = 1.22 \text{ MPa} \quad (2)$$

MDE ve EED deprem için SSB' çekme dayanımı

$$t_v = 0.05 \quad c = 0.50 \text{ MPa}, \quad t_{v\text{-dinamik}} = 2.00 \quad t_v = 1.00 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$t_p = 0.09 \quad c = 0.90 \text{ MPa}, \quad t_{p\text{-dinamik}} = 2.00 \quad t_p = 1.80 \text{ MPa} \quad (4)$$

Yukarıdaki ifadelerde,  $t_v$  ve  $t_{v\text{-dinamik}}$  sırasıyla düşey yönde;  $t_p$  ve  $t_{p\text{-dinamik}}$  ise sırasıyla asal yönde statik ve dinamik çekme dayanımını göstermektedir. Kelebek barajının statik ve dinamik analizlerine kullanılan malzeme parametreleri Tablo 1. de görülmektedir. Sonlu eleman modelinde zemin kütsüz modellenerek zeminin atalet etkisi oluşmaması sağlanmıştır. Temeldeki sınıma etkilerini de ihmal etmek amacıyla sönüm girilmemiştir.

Statik Elastisite Modülü ( $E_s$ )	15 GPa
Poisson Oranı	0.20
Birim Ağırlık	24.0 kN/m <sup>3</sup>
Kohezyon	500 kPa
İçsel Sürtünme Açısı	45°
Basınç Dayanımı	10 MPa
Çekme Dayanımı	0.68/1.00 ve 1.22/1.80 MPa
Maksimum Kayma Modülü ( $G_{\max}$ )	10 GPa
Dinamik Elastisite Modülü ( $E_d$ )	27.20 GPa

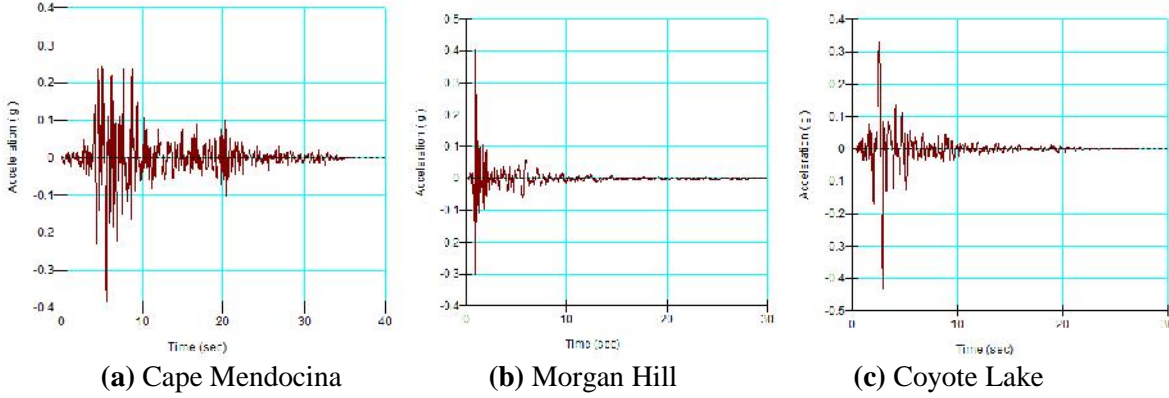
**Tablo 1.** Baraj Gövdesi Malzeme Parametreleri

### 3.4. Dinamik Yükler

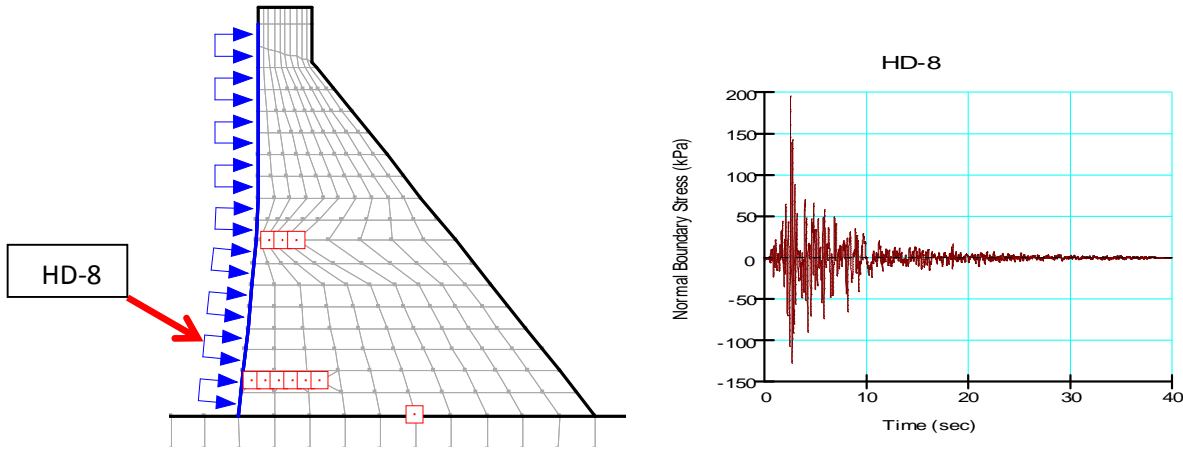
Kelebek Barajı Sismik Tehlike Analiz Raporunda MDE değeri 0.39 g olarak verilmiştir. Dinamik analizlerde kullanılmak üzere C grubu sıkı yada orta sıkı kum çakıl veya sert kil benzeri formasyonlar üzerinde kayıt yapılmış üç adet ivme kaydı elde edilmiştir ve bu kayıtlar maksimum tasarım depremi 50 yılda %10 olasılıkla olan deprem MDE=0.39 g olacak şekilde sahaya özgü hedef spektrum kullanılarak ölçeklenmiştir. MDE-1 kaydı için Cape Mendocina depremi, MDE-2 kaydı için Morgan Hill depremi, MDE-3 kaydı için Coyote Lake depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Aynı şekilde 50 yılda %2 olasılıkla olan EED depremi için Cape Mendocina depremi 0.7g olacak şekilde sahaya özgü hedef spektrum kullanılarak ölçeklenmiştir. Ayrıca verilen deprem hareketleri modelin tabanına uygulanmıştır. Analizlerde SSB'nin sönüm oranı % 7 olarak alınmıştır. Depremin baraj haznesindeki suda meydana getirdiği dinamik etki 5 numaralı bağlantıda verilen Chwang'ın momentum metodu yaklaşımı (Chwang,1978) kullanılarak deprem süresince depremi hesaplanmış ve barajın memba yüzü için 3 te görülen 9 bölgeye ayrılarak her bir bölge için hesaplanan hidrodinamik yük modeler harici yük olarak dahil edilmiştir. Analizler Geostudio Programı kullanılarak yapılmıştır.

$$P = C \cdot a \cdot \gamma_w \cdot h \quad (5)$$

Bu ba ntıda; P: Hidrodinamik kuvvet, C: Barajın memba yüzü e imine göre kullanılan katsayı, a : Max. taban ivmesi,  $\gamma_w$  : Suyun birim hacim a ırlı ı, h: Baraj kretinden itibaren ilgili noktaya dü ey yüksekliktir.



ekil 5. Ölçeklenmi MDE vme Kayıtları

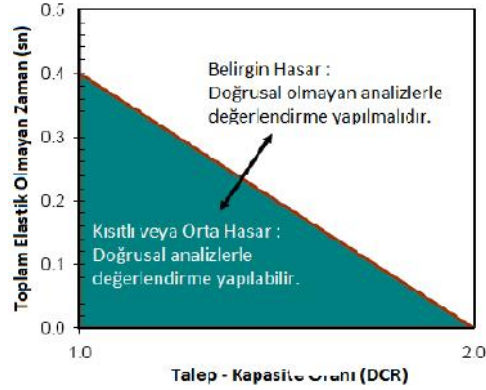


ekil 7. Memba Yüzüne Uygulanan Hidrodinamik yükler ve 8 nolu aralıktaki yükün zamanla de i imi

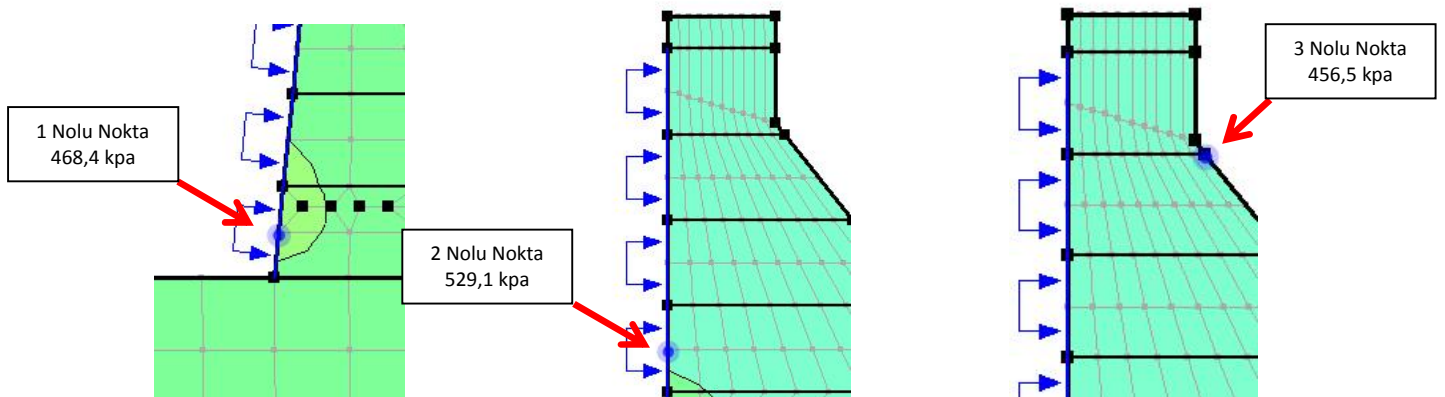
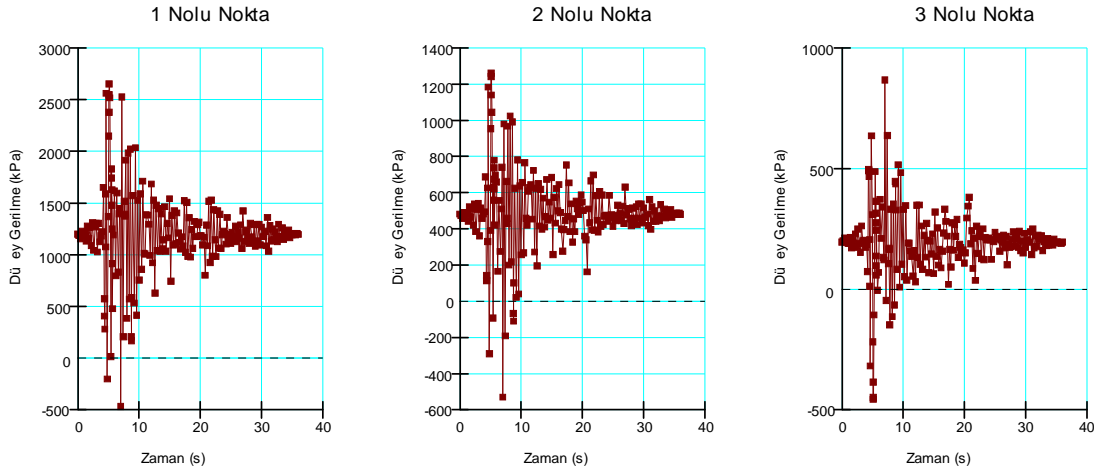
#### 4. ANALİZ SONUÇLARI

Kelebek barajında 3 adet MDE kaydı ve bir adet EED kaydı için yapılan Lineer Elastik dinamik analizler sonucunda MDE depremleri altında baraj gövdesinde herhangi bir bölgede çekme gerilmeleri oluşmazken gövdenin emniyetini de erlendirmek adına 2475 tekrerrür periyotlu EED depremi için lineer elastik analizler yapılarak ekil 9 de gösterilen kritik bölgelerde çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Ancak deprem süresince oluşan çekme gerilmeleri ve pik de eri denklem (3) ile elde edilen malzemenin dinamik çekme dayanımı olan 1 MPa dan oldukça küçüktür. Dolayısıyla yapı tüm deprem yüklemeleri altında lineer elastik davranmıştır. Talep kapasite oranı (DCR), dinamik analizlerde elde edilen ve beton statik çekme mukavemetini geçen asal çekme gerilmelerinin beton statik direk çekme mukavemetine oranıdır. Bu durumda hasar e risinde DCR 1'i a arsa betonun lineer olmayan davranışlar ve çatlama sergileyece i anlamına gelir. Kelebek barajında MDE

depremlerinde  $DCR < 1$  elde edilmiştir. Böylece lineer elastik analiz sonuçlarına göre MDE ve EED depremleri için kritik noktalarda bulunan Talep-Kapasite (DCR) ile bu depremlere karşılık gelen Toplam Elastik Olmayan Zaman değerleri ekil 8 de gösterilen USACE tarafından önerilen Analiz Değerlendirme grafiğinin koyu bölgesinde kaldığından lineer elastik analizler yeterli görülmüştür.



ekil 8. Lineer Elastik Analiz Değerlendirme Grafiği (USACE,2003)



ekil 9. İncelenen En Kritik Noktalar ve bu noktalardaki Çekme Gerilmesi değeri ve pik değerleri.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Analizi yapılan Kelebek Barajında MDE meydana gelen iç kuvvetlerin lineer elastik sınırlar içerisinde kalması durumunda barajın sismik tasarımında betonda oluşan çekme gerilmelerinin izin verilebilir sınırlara ulaşmadığı ve basınç gerilmesi altında kaldığı görülmüştür. Bununla beraber 2475 yıl tekerrür periyotlu yani 50 yılda %2 a ilma olasılığına sahip EED depremi ile yapılan analizde ekil 8 de görülen bölgelerde çekme gerilmeleri oluşmakta ancak bu gerilme değerleri denklem (3) ile elde edilen malzemenin dinamik çekme dayanımı olan 1 MPa değerini deprem süresi boyunca aştırmamaktadır. Proje çalışmaları başlangıcında klasik gerilme analizi yöntemleri kullanılarak ön görülen 10 MPa hedef dayanımının gerekli dayanımdan yüksek olduğu görülmektedir. Kelebek Barajı için muhtemel olabilecek sismik yükleri barajın duyarlılığı bozulmadan ve herhangi bir çatlak yada hasar olmadan atlatacaktır.

## 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.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D. & Bell, G. 2005. Geotechnical engineering of dams. Leiden: Balkema.
- Pells, S. & Fell, R. 2003. Damage and cracking of embankment dams by earthquake and the implications for internal erosion and piping. Proceedings 21st International Congress on Large Dams, Montreal, ICOLD, Paris Q83-R17. International Commission on Large Dams, Paris.
- FEMA. (2005). Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analysis and Design of Dams.
- 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.
- 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.
- Chwang, A. T. and Housner, G.W. (1978), Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes. Part 1- Momentum method. *J. of Fluid Mechanics, ASCE, 87, pp.335-341.*