

ARTIMLI DİNAMİK ANALİZ YÖNTEMİ İLE BETON AĞIRLIK BARAJLARDAKİ HASAR BELİRLENMESİ

B.F. Soysal¹ ve Y. Arıcı²

¹ Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara

² Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara

Email: fesoyal@metu.edu.tr

ÖZET:

Doğrusal olmayan analizler yeni beton ağırlık barajların tasarımında ve mevcut barajların değerlendirilmesinde önem kazanmıştır. Doğrusal analizlerde uzun süreli kullanım ile oluşan pratik aksine, bu çit yöntemler kullanarak beton ağırlık barajların incelenmesi için bir gelenek ya da kılavuz bulunmamaktadır. Barajların doğrusal olmayan davranışları yüksek belirsizlik içermekte, geometri, homojen olmayan malzeme yapısı ve deprem hareketlerinin çitliliği yapıların davranışlarının belirsizliğinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı, artımlı dinamik analiz yöntemi kullanarak örnek olarak seçilmiş üç baraj modelinde oluşan hasar oluşumunu ve gelişimini belirlemektir. Bu amaçla ilk olarak kullanılan malzeme modeli literatürdeki dinamik deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Böylelikle bu çalışma mada kullanılan doğrusal olmayan döner çatlak modeli ile gerçekçi sismik davranış elde edilebileceği görülmüştür. Daha sonra baraj modellerinde oluşan hasar seviyeleri ile deprem yükleri özellikleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Artımlı dinamik analiz sonuçlarına göre kret deplasmanı ve taban kesme kuvveti gibi parametrelerin monolitteki hasar seviyesi ile zayıf bir korelasyon sağladığı görülmüştür. Hasarın gelişiminde etkin olan parametrelerin spektral hız (S_v) ve maksimum yer ivmesi (PGA) olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : beton ağırlık barajlar, artımlı dinamik analiz, hasar seviyesi, döner çatlak modeli

1. GİRİŞ

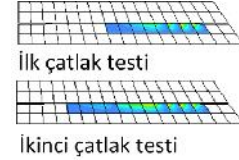
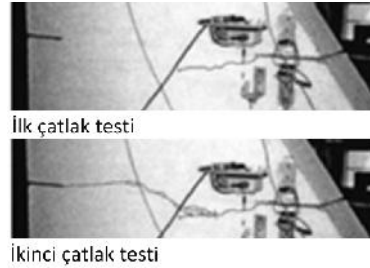
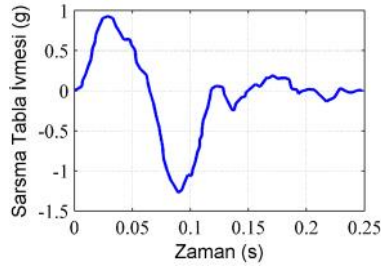
Yeni barajların tasarımında ve mevcut barajların güncellenmesi risk seviyelerine göre performans limitlerinin belirlenmesinde doğrusal olmayan analiz yöntemleri oldukça önem kazanmıştır. Bina ve köprülerdeki performansa dayalı tasarım tecrübesi barajlar için mevcut olmayıp bu konuda çalışmalar devam etmektedir (Çalayır ve Karaton, 2005; Mansouri v.d. 2011; Hariri-Ardebili ve Saouma 2014). Deprem yükleri altında ciddi hasar gören baraj sayısının çok az olması sebebiyle literatürde barajların hasar seviyeleri ve performans limitlerini belirleme çalışmaları yapılmış ancak bu ara tırmalarda yer hareketi parametrelerinin önemi fazla sorgulanmamış, ve spektral ivmeler baz alınmıştır (Alembagheri ve Ghaemian, 2012; Hariri-Ardebili ve Saouma 2014). Bu çalışma mada ise barajlarda oluşan hasar seviyeleri ile deprem yükleri özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun için öncelikle kullanılan malzeme modeli ile barajlarda çatlak oluşumunun gerçekçi bir şekilde modellenenildiği literatürdeki deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Daha sonra üç farklı baraj modelinde 9 ayrı ölçek ve 21 farklı deprem kaydı kullanılarak artımlı dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Toplamda 500'den fazla analiz sonucuna göre barajlardaki hasar seviyesi ile yer hareketi parametreleri arasındaki ilişki irdelenmiştir.

2. MALZEME MODEL

Genel amaçlı sonlu elemanlar programı DIANA (TNO DIANA, 2010) kullanılarak yapılan bu çalışmada, betonun çatlaması döner çatlak modeli ile simüle edilmiştir. Bu modelde betonun çatlamadan önceki elastik davranışı izotropik malzeme ile tanımlanmış olup çatlama ile birlikte ortotropik malzeme modeline geçi yapılmaktadır (Rots, 1988). Davranışı etkileyen ana parametreler çekme ve basınç dayanımları ile yumuşama davranışlarıdır. Çekme davranışı için pek çok yumuşama fonksiyonu bulunmakta olup bu çalışmada üssel yumuşama kullanılmıştır. Yumuşama fonksiyonları çekme enerji katsayısı, G_f ve sonlu eleman boyutu, h parametrelerine bağlıdır ve gerilme deformasyon grafiği altında kalan alan G_f/h 'a eşitlenerek sonuçların yapılarından bağımsızlığı sağlanır.

3. DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Kullanılan malzeme modelinin dinamik yükler altındaki güvenilirliği, ölçekli sarsma tablası deneyi (Tinawi v.d. 2000) modellenerek doğrulanmıştır. Tinawi v.d. (2000) 3.4 m yükseklikteki ölçekli baraj monolitini 1a'da verilen deprem ivmesinin ilk maksimum ivme değeri 0.87g, 0.94g ve 0.98g olacak şekilde ölçeklemiştir. Bu testlerden ilki olan 0.87g ölçekli deneyde çatlak oluşmuştur, 0.94g ve 0.98g ölçekli deneyler ise sırasıyla ilk ve ikinci çatlak testi olarak adlandırılmıştır (Tinawi v.d. 2000). Bu deneyin modellenmesi ile ilgili ayrıntılı parametrik çalışması Soysal ve Arıcı (2015)'de bulunmaktadır. Eleman büyüklüğü 10 cm olarak oluşturulmuş sonlu elemanlar modelinde çekme dayanımı 3.78 MPa, elastisite modülü 14.8 MPa olup ilk çatlak testi için sönmeme oranı yapının ilk doğal titreşim periyodunda %1, ikinci test için de %0.7 olarak alınmıştır.



(a) Deprem ivmesi (Tinawi v.d. 2000)

(b) İlk ve İkinci Çatlak Testi Sonuçları

ekil 1. Deprem ivmesi ve Deney Sonuçları

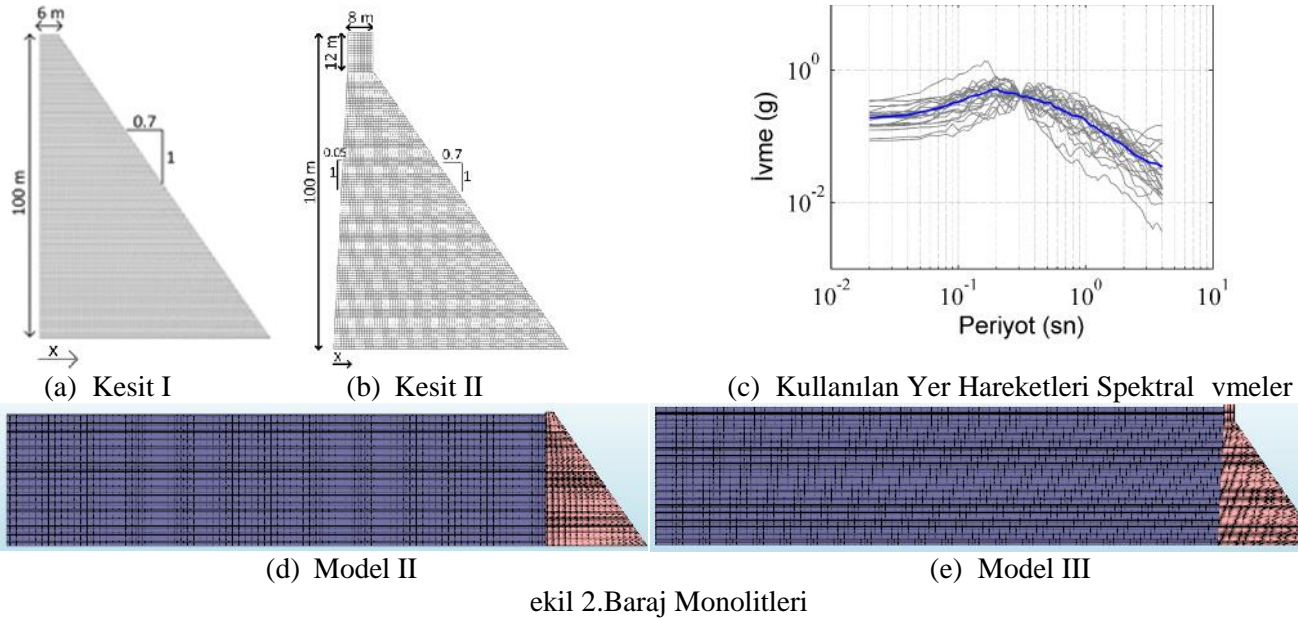
ekil 1b'de ilk ve ikinci çatlak test sonuçlarının sonlu eleman modeli ile karşılaştırılması görülmektedir. Bu sonuca göre çatlakların yeri, zamanlaması, ilerlemesi ve açılıp kapanma miktarı deney sonucuna oldukça yakın bir şekilde simüle edilmiştir.

4. ARTIRILMIŞ DİNAMİK ANALİZ

Yapıların doğrusal olmayan davranışlarını belirlemede kullanılan yöntemlerden biri artırılmış dinamik analizdir. Bu yöntemde yapının analizleri farklı derecelerde ölçeklendirilmiş deprem ivmeleri ile yapılır. Yapının deprem yükü altındaki davranışını anlamak için yer hareketi parametreleri ile hasar seviyeleri arasında bir ilişki kurulur. Yer hareketi parametreleri, deprem özelliklerine bağlı pozitif bir skalerdir. Sıklıkla kullanılan yer hareketi parametreleri maksimum yer ivmesi (PGA), maksimum yer hızı (PGV) ve yapının ilk doğal titreşim periyodundaki spektral ivmedir ($S_a(T_1, 5\%)$). Binalar için yaygın bir şekilde kullanılan hasar seviyeleri ise maksimum çatı deplasmanı, taban kesme kuvveti ya da kat ötelenmesidir (Vamvatsikos ve Cornell, 2002).

4.1. Baraj Modelleri ve Seçilen Deprem Kayıtları

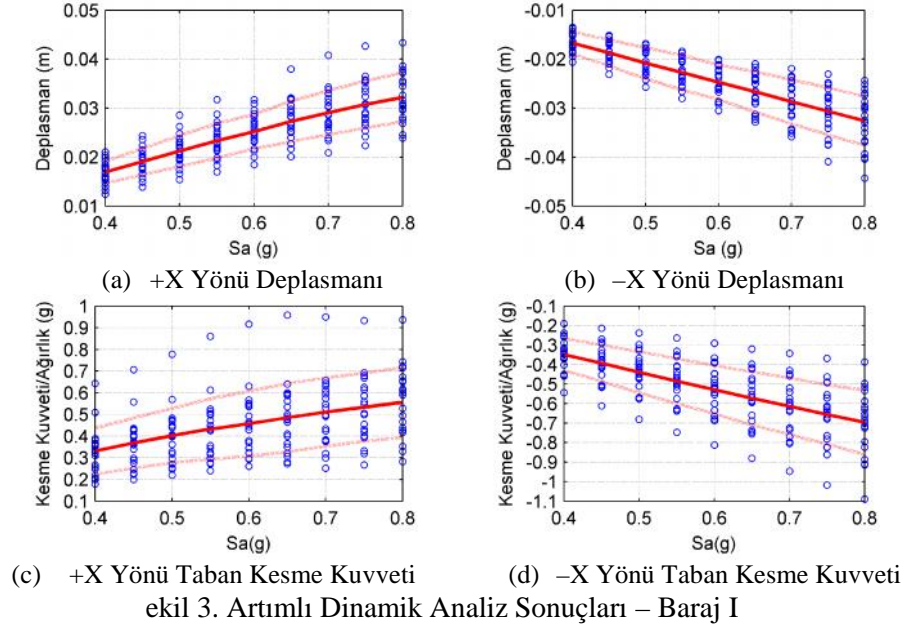
Bu çalışma için analizler üç farklı baraj modeli üzerinde yapılmıştır. Üç model için de döner çatlak modeli kullanılmış olup malzeme parametreleri şöyledir: Elastisite modülü, Poisson's oranı, yoğunluk, çekme dayanımı ve basınç dayanımı sırasıyla 28 GPa, 0.2, 2400 kg/m³, 2.4 MPa ve 20 MPa. Çekme davranışı için üssel yumuşama fonksiyonu kullanılmış olup çekme enerji katsayısı 200 N/m alınmıştır. Basınç enerji katsayısı ise 25000 N/m olup parabolik yumuşama fonksiyonu kullanılmıştır. Üç barajın da yüksekliği 100 m, rezervuar yüksekliği 98 m ve arka yüz eğimi 0.7'dir. Birinci modelin ön yüzü düz (ekil 2a), kret uzunluğu 6 m olup hidrodinamik yükler Westergaard eklenmiş kütle yaklaşımı ile modellenmiştir (Westergaard, 1933). İkinci baraj modelinin kesit özellikleri ilki ile aynı olup, Westergaard yaklaşımı yerine rezervuar elemanları modellenmiştir (ekil 2d). Üçüncü baraj modelinin kret uzunluğu 8 m ve ön yüz eğimi 0.05'dir (ekil 2b). Bu modelde de rezervuar elemanları kullanılmıştır (ekil 2e). Analizlerde sönümleme oranı barajın 1. ve 3. doğal titreşim periyodunda %6 olacak şekilde kütle ve rijitliğe bağlı Rayleigh sönümleme katsayıları kullanılmıştır. Zaman aralığı bütün dinamik analizlerde 0.005 olarak alınmıştır.



Artımlı dinamik analizler 21 deprem kaydı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir deprem kaydı barajın ilk doğal periyodu 0.30 saniyeye denk gelen spektral ivme 0.4g ile 0.8g arasında 0.05g aralıklarla değişecek şekilde ölçeklenmiştir (ekil 2c). Deprem kayıtları PEER (2005) veritabanından alınmış olup FEMA440 (2005) baz alınarak seçilmiştir. Buna göre kullanılan deprem kayıtları kaya ya da sert zeminde (USGS tip A ya da B) kaydedilmiş, episentri uzaklığı 12 km ile 39 km, büyüklükleri 6 ile 7.6 arasında değişecek şekilde seçilmiştir.

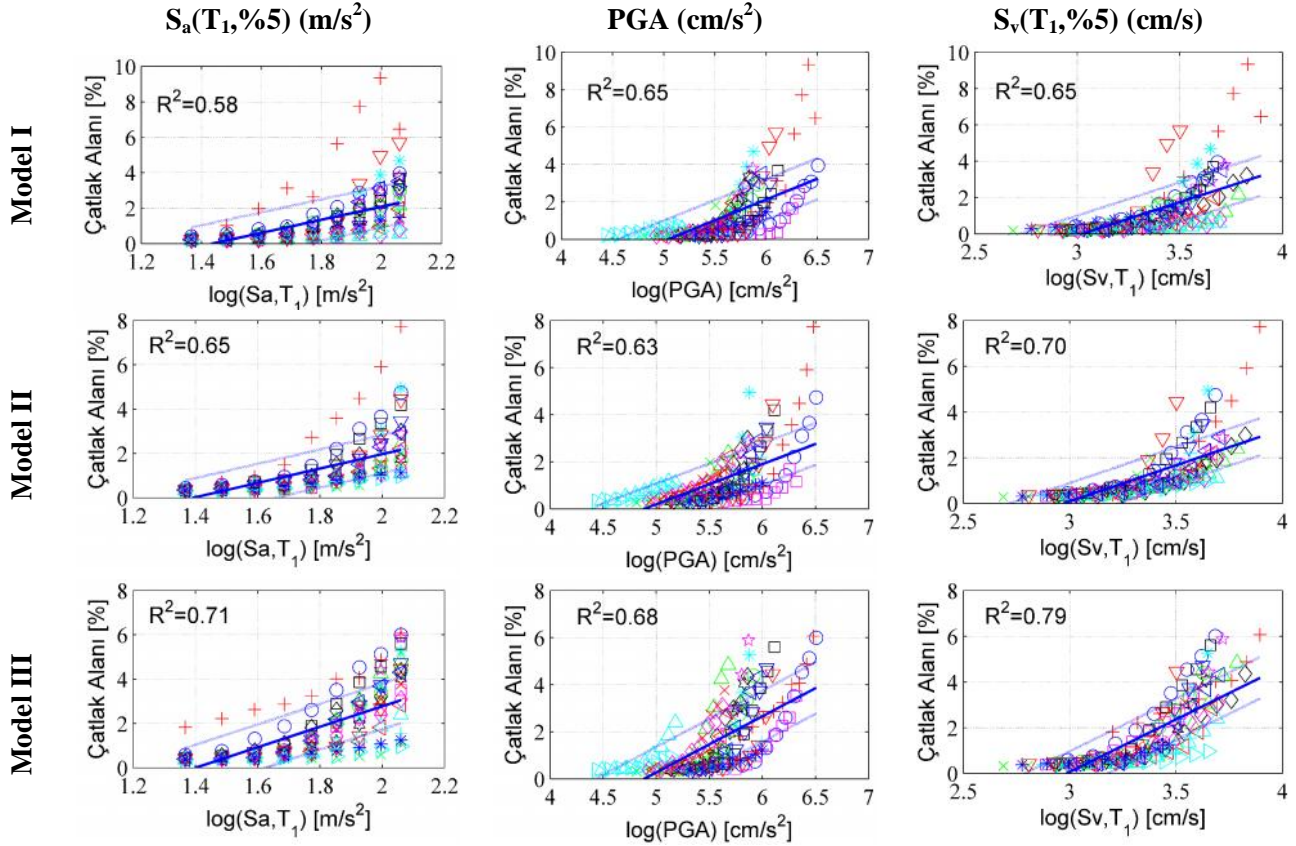
4.2. Artımlı Dinamik Analiz Sonuçları

Binalarda hasar seviyesi olarak sıklıkla çatı deplasmanı ve taban kesme kuvveti kullanılmaktadır (Vamvatsikos ve Cornell, 2002). Alembagheri ve Seyedkazemi (2014) tarafından yapılan bir çalışmada da barajda hasar seviyesi kret deplasmanı olarak seçilmiştir. Bu amaçla, barajdaki hasar seviyesi parametresini belirlemek için baraj I analiz sonuçları spektral ivmeye karşılık kret deplasmanı ve spektral ivmeye karşılık taban kesme kuvveti ilişkileri incelenmiştir. Ekil 3'de görüldüğü üzere, aynı spektral ivmede farklı deplasman ve taban kesme kuvveti değerleri vardır. Özellikle en küçük ölçek olan $S_a=0.4g$ analizinde ciddi bir doğrusal olmayan davranışlar gözlemlenmemiştir, bu ölçekteki deplasman ve kesme kuvveti varyasyonu barajın davranışında deprem kayıtlarının önemini göstermektedir ve bu parametrelerin hasar seviyesi tanımlamada zayıf olduğu görülmüştür.



Barajlarda hasar seviyeleri hakkında literatürde çalışmalar yeni başlangıçta olup bir konsensus bulunmamaktadır (Alembagheri ve Ghaemian, 2012; Hariri-Ardebili ve Saouma, 2014). Bu çalışmada ise hasar seviyesi indisi olarak çatlamı elemanların baraj kesit alanına oranı, yani çatlak oranı seçilmiştir (Çalayır ve Karaton, 2005). Seçilen bu hasar indisinin kullanılan yer hareketlerinin spektral ivme (S_a), maksimum yer ivmesi (PGA) ve spektral hız (S_v) değerleri ile ilişkisi üç model için değerlendirilerek korelasyon katsayıları ve standart sapmalar hesaplanmıştır (ekil 4). Bu deprem parametrelerinden spektral hız spektral ivme değerinden daha yüksek korelasyonla hasar seviyesi ile ilişkili görülmektedir. Spektral ivme değerinin özellikle düşük ölçeklerde hasar seviyesi ile bağlantısı çok düşüktür.

Verilen illerde model tipi ve geometriye göre de bir parça değerlendirilmektedir. Ekli kütle yöntemi ile rezervuar elemanları kullanıldığında deprem hareketlerinin birbirlerine göreceli olan hasar etkisinin bir miktar değerlendirilmesi görüldüğüde (Model 1 ve Model 2 sonuçları, ekil 4), genel hasar trendi benzer elde edilmiştir. Geometrisinde bir değerlendirilme noktası olmayan model 1 ve 2'nin aksine, böyle bir değerlendirilme noktasına sahip olan model 3'te oluşan gerilme toplanması etkisi ile hasar gelişimi farklı elde edilmektedir. Daha düşük ölçekli seviyelerde stres toplanması etkisi ile bazı depremler için hasar görülebilmekte (ekil 4, model III, S_a grafiği) ve geniş varyasyon olmaktadır. Daha yüksek ölçeklerde ise değerlendirilen depremlerde benzer hasar formasyonuna ulaşılmaktadır. Bu kesit için genel hatları ile korelasyon değerleri her deprem istem parametresi için değerlendirilmiştir. Bu kesitlerden daha fazla elde edilmiştir.

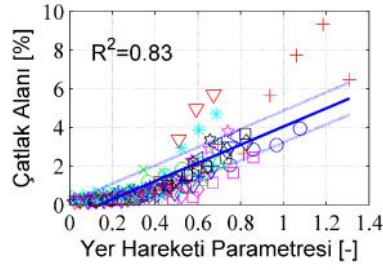


ekil 4. Deprem Parametreleri ve Hasar Seviyesi İlişkileri

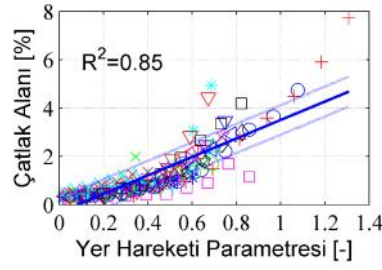
Depremlerin barajlar üzerinde olu turaca ı hasarın daha iyi belirlenmesi için yeni bir yer hareketi parametresi önerilmiştir (Denklem 1). Bu denklem bilineer şekilde olup belirli bir de erin altında hasar ihmal edilebilecek kadar az olmaktadır.

$$\alpha[\log S_v \times \log PGA]^\beta - 0.3 > 0 \quad (1)$$

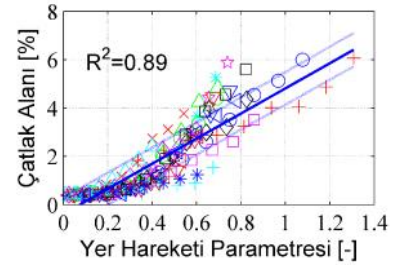
Yukarıdaki denklemde PGA maksimum yer ivmesi olup birimi cm/s^2 ve S_v ise barajın birinci doğal titreşim periyodundaki spektral ivmedir (cm/s). Önerilen yer hareketi parametresi birimsizdir. Yapılan analizler sonucu katsayılar α ve β sırasıyla 0.0001 ve 3 olarak elde edilmiştir. Önerilen yer hareketi parametresine karşılık barajdaki hasar seviyesi grafikleri üç baraj için ekil 5'de gösterilmiştir. Dizayn yaparken sıklıkla kullanılan spektral ivme de eri yerine önerilen bu parametrenin hasar seviyesi ile yüksek bir korelasyon sağladığı görülmektedir ($R^2 > 0.8$).



(a) Baraj I



(b) Baraj II



(c) Baraj III

ekil 5. Önerilen Yer Hareketi Parametresi ve Hasar Seviyesi İlişkileri

5. SONUÇLAR

Artımlı dinamik analiz yöntemi kullanılan bu çalışmada barajların hasar seviyesi ile yer hareketleri parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışmada sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ❖ Kret deplasmanı ve taban kesme kuvveti barajlardaki hasar seviyelerinin tanımı olarak zayıf bir korelasyon sağlanmıştır.
- ❖ Tasarımlarda sıklıkla kullanılan spektral ivmenin barajda oluşacak hasar ile yüksek bir korelasyon sağlamıştır.
- ❖ Spektral hız (S_v) ve maksimum yer ivmesi (PGA) parametrelerinin barajdaki hasar gelişiminde etkin olduğu görülmüştür ve bu iki parametreyi içeren basit bir yer hareketi parametresi bu çalışmada önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alembagheri, M. ve Ghaemian, M. (2012). Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **42:1**, 123-144.
- Alembagheri, M. ve Seyedkazemi, M. (2014). Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* doi: 10.1002/eqe
- Calayir, Y. ve Karaton, M. (2005). Seismic fracture analysis of concrete gravity dams including dam-reservoir interaction. *Computers and Structures* **83**, 1595-1606.
- FEMA. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440: Washington, DC.
- Hariri-Ardebili, M.A. ve Saouma, V. (2014). Quantitative failure metric for gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **44**, 461-480.
- Mansouri, A., Neshaei, M.A.L. ve Aghajany, R. (2011). Fracture analysis of concrete gravity dam under earthquake induced loads. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* **15**, 317-325.
- PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.

3. Türkiye Deprem Mühendisli i ve Sismoloji Konferansı
14-16 Ekim 2015 – DEÜ – ZM R



Rots, J.G. (1988). Computational Modeling of Concrete Fracture. Doktora Tezi, Delft University of Technology: Delft.

Soysal, B.F. ve Arıcı, Y. (2015). The Use of Nonlinear Analysis Tools for the Structural Design of Concrete Dams. *Symposium Hydropower '15*, Stavanger.

Tinawi, R., Leger, P., Leclerc, M. ve Cipolla, G. (2000). Seismic safety of gravity dams: from shake table experiments to numerical analysis. *Journal of Structural Engineering* **126:4**, 518-529.

TNO DIANA. (2014). User's Manual, R. 9.5.

Vamvatsikos, D. ve Cornell, C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **31:3**, 491-514.

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* **98:2**, 418-433.