

BETON A ıRLIK BARAJLARIN S İSMİK DAVRANI İNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

B.F. Soysal¹ ve Y. Arıcı²

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

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

Email: fesoyosal@metu.edu.tr

ÖZET:

Beton a ırlık barajların tasarımı için yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde do rusal olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte eski baraj sto unda da artan sismik tehlike artlarında do rusal olmayan yöntemlerle performans tetkiki yapılması gerekmektedir. Do rusal olmayan alanda beton için en sık kullanılan malzeme modellerinden biri ise döner çatlak yapısal modelidir. Bu çalı mada, beton a ırlık barajların sismik davranı nın ve performans sınırlarının döner çatlak modeli ile tahmin edilmesi irdelenmi tir. Bu amaçla öncelikle literatürdeki 4 farklı statik ve dinamik deneysel çalı malar simule edilmi ve sonuçların matematiksel model ve malzeme özelliklerine olan hassasiyeti incelenmi tir. Daha sonra 100 metre yüksekli indeki bir baraj monoliti üzerinde bu modeli kullanarak sonlu eleman a ıyo unlu u, malzeme özellikleri ve deprem hareketi belirsizlikleri modele yansıtılarak duyarlılık analizleri yapılmı ve barajın sismik davranı ı üzerinde etkili olan modelleme seçimleri belirlenmi tir. Son olarak da farklı çekme dayanımları kullanılarak yapılan analizler sonucu hasar olasılık e rileri olu turulmu tur.

ANAHTAR KELİMELER : beton a ırlık barajlar, do rusal olmayan analiz, döner çatlak modeli, duyarlılık analizi, hasar olasılık e risi

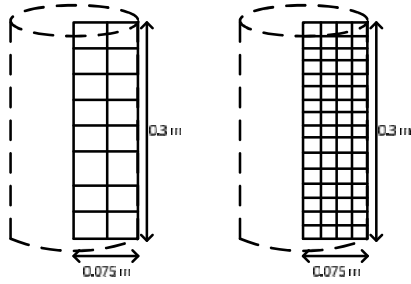
1. G İRİŞİM

Barajların tasarım ve tahkiklerinde do rusal olmayan yöntemler önem kazanmaktadır. Döner çatlak modeli do rusal olmayan malzeme modelleri arasında en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalı mada beton a ırlık barajların sismik davranı ı döner çatlak modeli ile DIANA (TNO DIANA, 2014) sonlu eleman programı kullanılarak incelenmi ve sonuçları etkileyen parametreler irdelenmi tir. Bu amaçla öncelikle literatürdeki deneysel çalı malar kullanılarak model do rulanmı tir. Kullanılan deneyler, tek eksenli çekme deneyi (Li v.d. 2002), hidrostatik yükleme altında ölçekli beton baraj testi (Carpinteri v.d. 1992), dinamik benzeri yöntemlerle ölçekli beton barajda deprem simulasyonu (Aldemir v.d. 2015) ve ölçekli bir barajın sarsma tablası testi (Tinawi v.d. 2000) olarak basit davranı tan kompleks deprem davranı na gidecek ekilde seçilmı tir. Çalı manın ikinci kısmında öncelikle 100 metre yüksekli inde bir barajın üç de i ik deprem hareketi ile artımlı dinamik analizi gerçekleştirilmi ve sonlu eleman a ıyo unlu u ve malzeme özelliklerinin baraj üzerindeki hasar miktarında olan etkileri ara tırılmı tir. Çekme dayanımının sonuçlara büyük etkisinin gözlenmesi ile bu parametreye odaklanarak 21 de i ik deprem hareketi ile 500'den fazla artımlı dinamik analiz gerçekleştirilmi ve bu analizler sonucu barajın hasar olasılık e rileri çıkarılmı tir.

2. DO RULAMA ÇALI MALARI

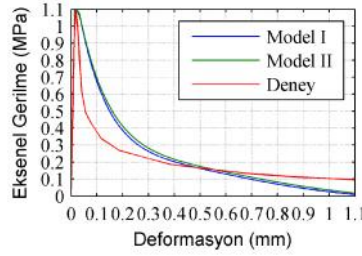
2.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi

Li v.d. (2002) tarafından gerçekleştirilen çekme deneyi bu çalışmada genel amaçlı sonlu elemanlar programı DIANA kullanılarak modellenmiştir. T-17 numaralı numunenin basınç ve çekme dayanımı, elastisite modülü ve çekme enerji katsayısı sırasıyla 15 MPa, 1.10 MPa, 23.6 GPa ve 263 N/m olarak rapor edilmiştir. Bu malzeme özellikleri kullanılarak iki farklı sonlu eleman modeli ile (16 ve 64 elemandan oluşan) aksisimetrik modeller oluşturulmuştur. Analizlerde sonlu eleman modeli ve çekme davranışı yumuşama fonksiyonu etkileri incelenmiştir. Sonuçların karşılaştırılması ekil 1'de sunulmuştur. Beklendiği gibi statik davranışta eleman modelinin önemli bir etkisi olmamıştır (ekil 1c). Test sonucuna en yakın analiz sonucu ise Hordyk ve bilineer yumuşama fonksiyonları ile elde edilmiştir (ekil 1d).

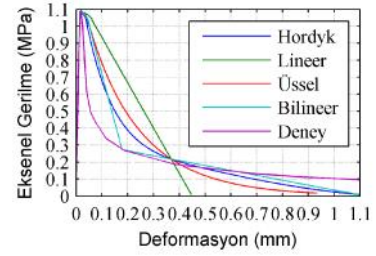


(a) Model I

(b) Model II



(c) Eleman A1 Etkisi

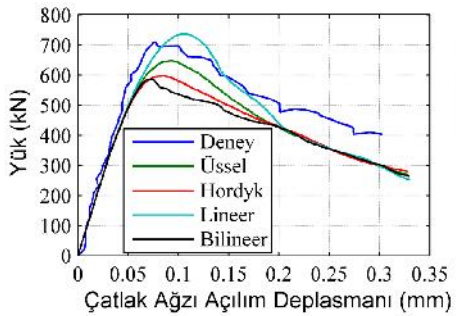


(d) Yumuşama Fonksiyonu Etkisi

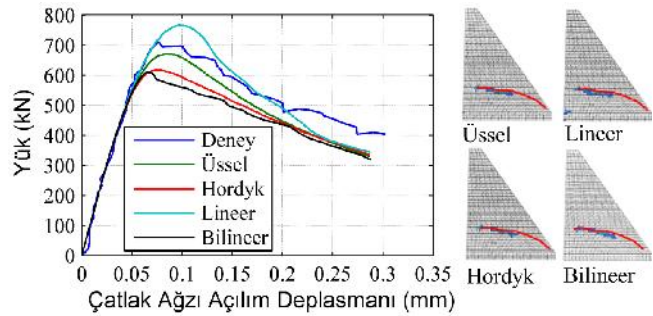
ekil 1. Çekme Deneyi Sonuçları

2.2. Hidrostatik Yükleme Altında Ölçekli Beton Baraj Testi

Carpinteri v.d. (1992) tarafından 1:40 oranında ölçeklenmiş bir beton baraj hidrostatik yük altında test edilmiştir. Çatlak başlangıç yerini belirlemek adına barajın ön yüzeyinde yerden 0.6 m yükseklikte ve 30 cm uzunluğunda bir çentik atılmıştır. Çekme dayanımı, elastisite modülü ve çekme enerji katsayısı sırasıyla 3.6 MPa, 35.7 GPa ve 184 N/m olarak verilmiştir. Model parametrelerinin yük deplasman ilişkisi ve çatlak ilerlemesi davranışlarına etkisinin tahkiki için 696 ve 1503 düzlemsel gerilme elemanlarından oluşan iki farklı model yapılmıştır. Yük deplasman grafikleri iki model için karşılaştırıldığında eleman modelinin sonuçlara önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir (ekil 2). Üssel ve lineer yumuşama fonksiyonları deney sonucunu daha iyi yansıtmaktadır. Çatlak ilerlemesinde yumuşama fonksiyonunun etkisi iki modelde de görülmemiştir, analiz sonuçları birbirine oldukça yakın elde edilmiştir (ekil 2). Deney sonucu oluşan çatlak uzunluğunun 1.6 m olmasına rağmen analiz sonuçlarında bu değer 1 m civarındadır. Bu çatlak teması sonucu aynı problemi modelleyen Bhattacharjee ve Leger (1994) çalışmasındaki sonuca oldukça yakındır.



(a) Model I Sonuçları

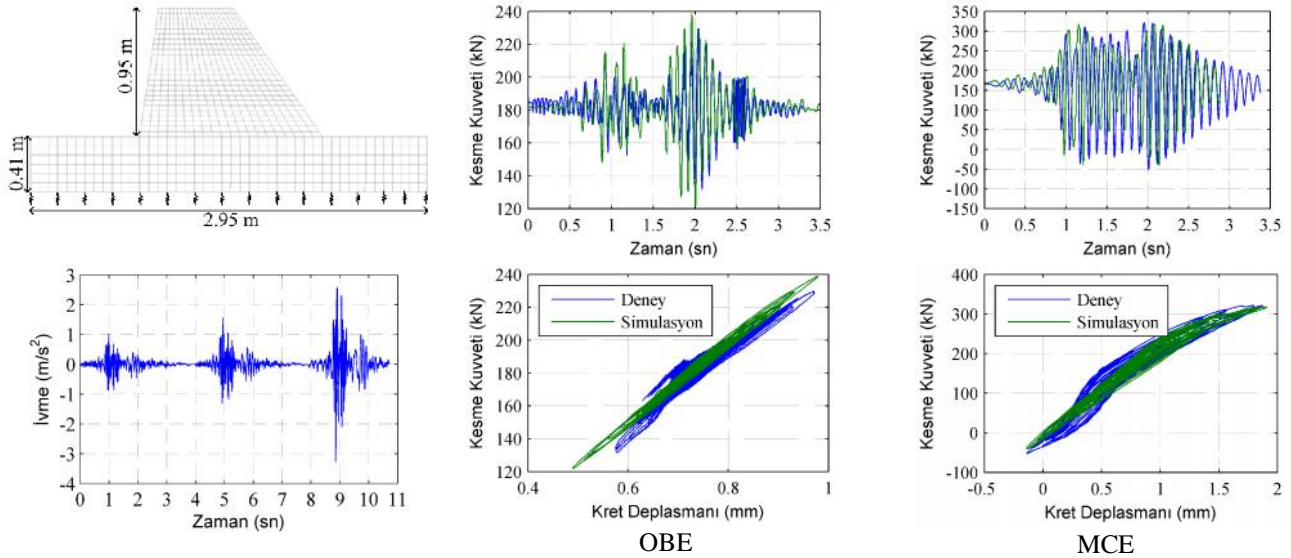


(b) Model II Sonuçları

ekil 2. Ölçekli Beton Baraj Simülasyonu Sonuçları

2.3. Dinamik Benzeri Yöntemler ile Ölçekli Beton Barajda Deprem Simülasyonu

120 m yüksekli indeki Melen Barajı'nın 1:75 ölçekli modeli Aldemir v.d. (2015) tarafından üç farklı ölçekli deprem yükü altında dinamik benzeri yöntemler ile test edilmiştir. Deney düzeneği sayesinde baraj kesitinin sadece alt kısmı test edilmiş olup atalet ve hidrodinamik yükler özel yükleme ekipmanları ile simüle edilmiştir. Doğrulama analizleri için 764 sonlu elemandan oluşan model hazırlanmıştır. Temeldeki esneklik barajın doğal periyoduyla örtüşecek şekilde yaylar aracılığıyla modellenmiştir. Analizlerde çekme dayanımı, elastisite modülü ve çekme enerji katsayısı sırasıyla 1 MPa, 15 GPa ve 40 N/m olarak alınmış olup lineer yumuşama fonksiyonu kullanılmıştır. Oluşturulan baraj modeli ve analizlerde kullanılan temel prensip (OBE), en büyük tasarım (MDE) ve oluşabilecek en büyük deprem (MCE) kayıtları ekil 3a'da sunulmuştur. OBE ve MCE depremleri sonuçları ekil 3b'de verilmiştir. OBE seviyesinde kesme kuvveti deney sonucuna göre daha fazla hesaplanmış olmakla beraber bu değer MCE seviyesi için oldukça iyi tahmin edilmiştir.



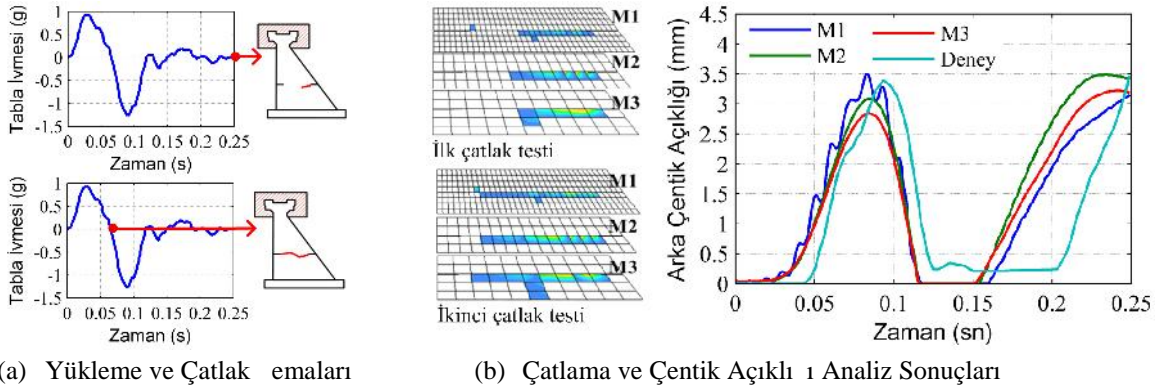
(a) Baraj Modeli ve Deprem Yükleri

(b) Taban Kesme Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi ve Taban Kesme Kuvveti - Kret Deplasmanı İlişkisi

ekil 3. Melen Barajı'nın Dinamik Benzeri Yöntemlerle Test Sonuçları

2.4. Ölçekli Bir Barajın Sarsma Tablası Testi

Tinawi v.d. (2000) tarafından test edilen 3.4 m yüksekli indeki ölçekli baraj monoliti **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ekil 4a'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 oluşmamıştır, 0.94g ve 0.98g ölçekli deneyler ise sırasıyla ilk ve ikinci çatlak testi olarak adlandırılmıştır (Tinawi v.d. 2000). Bu çalışmada deplasman davranışı ile beraber çatlak oluşması ve zamanlaması da simüle edilmiştir.



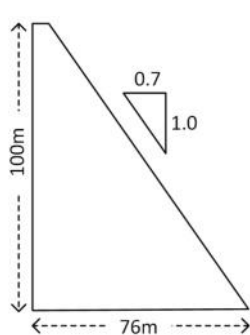
ekil 4. Yükleme ve Çatlak açmaları

Sonlu eleman analizi'nin etkisini belirlemek amacıyla eleman boyutları 5 cm (M1), 10 cm (M2) ve 15 cm (M3) olan üç model oluşturulmuştur. Barajın iki yüzünde de çentik olması o bölgede yüksek gerilim değerlerinin oluşmasına sebep olmaktadır ve eleman boyutu küçüldükçe gerilim değerleri artmaktadır. Bu nedenle M1 modeli için 4.4, M2 için 3.78 ve M3 için 3.42 MPa gerilme dayanımları kullanılmıştır. Lineer yumuşama fonksiyonu ile oluşan çatlaklar üç model için de deney sonuçlarıyla uyum göstermektedir (ekil 4b). Arka çentik çatlak açılması zamanla inceleme içinde çatlakın başlangıcı ve ikinci defa açılması deney sonuçlarına göre daha erken elde edilmekle beraber maksimum deplasman değeri deney sonucuna yakın bulunmuştur (ekil 4b).

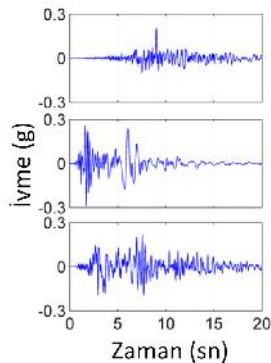
3. ÖRNEK BARAJ MONOLİT ÜZERİNDE DUYARLILIK ÇALIŞMALARI VE HASAR OLASILIK DEĞERLERİ

Duyarlılık çalışmaları için 100 m yüksekliğinde bir baraj seçilmiştir (ekil 5a). Barajın kret uzunluğu 6 m, ön yüzü dik ve arka yüz eğimi 0.7'dir. Reservoir yüksekliği 98 m olan barajda hidrodinamik yükler Westergaard eğilimi kütle yaklaşımları ile hesaba katılmıştır (Westergaard, 1933). Barajın elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluğu ve basınç dayanımı sırasıyla 28 GPa, 0.2, 2400 kg/m³ ve 20 MPa alınmıştır. Barajın ilk ve üçüncü modunda %6 sönümleme oranı olacaktır Rayleigh katsayıları kullanılmıştır.

Seçilen üç deprem ile artımlı dinamik analiz (Vamvatsikos ve Cornell, 2002) gerçekleştirilmiştir (ekil 5b). Deprem kayıtları barajın ilk periyotunda 0.4g ile 0.8g arasında 0.05g aralıklarla değerlendirilmiştir.



(a) Baraj Modeli



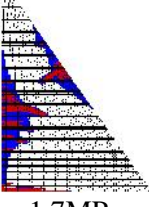
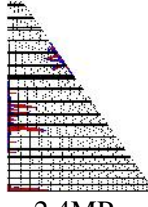
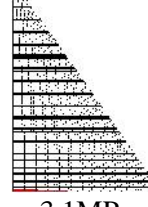
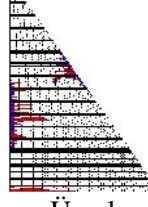
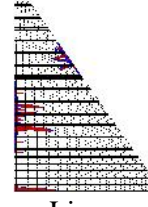

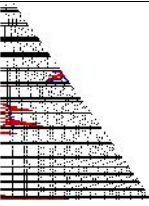
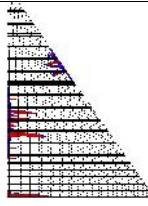
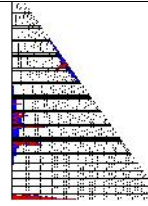
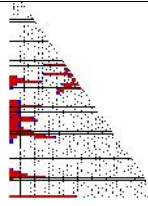
(b) Deprem Serileri

No	Deprem Adı	M _w	PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Imperial Valley, 1979	6.5	0.204	16.1
2	Morgan Hill, 1984	6.2	0.292	36.7
3	Kocaeli-zmit, 1999	7.4	0.22	29.8

(c) Seçilen Hareketler

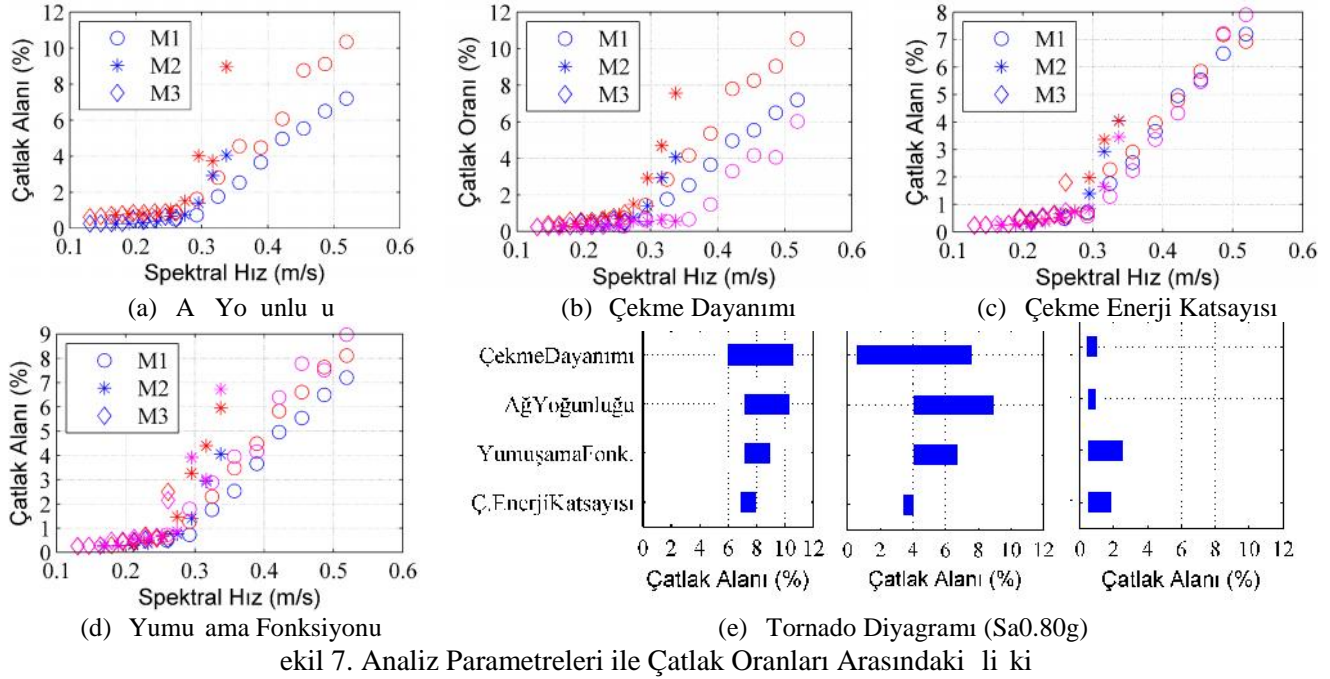
ekil 5. Baraj Modeli ve Seçilen Depremler

Duyarlılık analizlerinde farklı çekme davranışı yumu ama fonksiyonları, çekme enerji katsayıları, çekme dayanımları ve eleman ağırlıklı yorulmaları dikkate alınmıştır. Sonuçlardaki farklılıkları sunmak adına ikinci depremin en büyük ölçeği ($S_a=0.8g$) sonucu oluşan çatlak emaları ekil 6'da gösterilmektedir. Beklendiği gibi çatlak oluşumunda en etkili parametre çekme dayanımı olmuştur, sonlu elemanlar ağırlıklı yorulması da doğrudan doğruya sonuçlarının aksine çatlak oluşumunda ikinci sırada etki etmektedir. Çatlakın yayılması ise düşük çekme dayanımlarında oldukça fazladır. Ayrıca yumu ama fonksiyonu da çatlakın yayılma davranışında etkili bir parametre olmuştur. Küçük ölçekli deneylerde daha kolay bir şekilde tahmin edilen hasar emaları büyük ölçekli modellerde aynı davranışı sergilememekte, analiz parametrelerine göre davranış geniş bir varyasyon göstermektedir.

Çekme Dayanımı	 1.7MPa	 2.4MPa	 3.1MPa	Yumu ama Fonksiyonu	 Üssel	 Lineer	 Bilineer
	Çekme Enerji Katsayısı	 105 N/mm	 150N/mm		 195N/mm	Eleman Ağırlıklı Yorulması	 Büyük Eleman

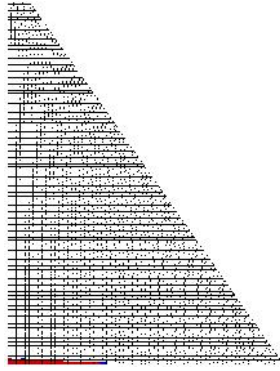
ekil 6. İkinci Deprem, $S_a=0.80g$ Ölçeği Çatlak Emaları

Üç depremin 9 ölçekli analizleri sonucu barajda oluşan çatlak yüzdeleri spektral hıza karşılık ekil 7'de gösterilmiştir. Ayrıca en büyük ölçekte oluşan minimum ve maksimum çatlak yüzdeleri analiz parametrelerine bağlı tornado diyagramında gösterilmiştir (ekil 7e). Barajın davranışındaki en büyük etmenler çekme dayanımı ve sonlu eleman ağırlıklı yorulması olmakla beraber yumu ama fonksiyonun etkisi daha azdır. Barajdaki hasar yüzdesini en az etkileyen parametre ise çekme enerji katsayısıdır.

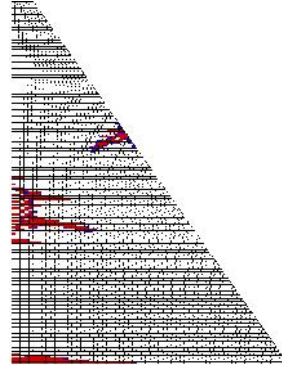


Hassasiyet çalışmaları sonucu barajın hasar görme davranışını etkileyen en önemli parametre olarak elde edilen çekme dayanımı kullanılarak hasar olasılıkları belirlenmiştir. Bunun için artımlı dinamik analizler 21 deprem kaydının benzer şekilde ölçeklenmesi ile yukarıda belirtilen üç farklı çekme dayanımı ile gerçekleştirilmiştir. Depremler FEMA440 (2005) önerileri baz alınarak seçilmiştir. Buna göre kaya ya da sert zeminde (USGS tip A ya da B) kaydedilmiş, episantr uzaklığı 12 km ile 39 km arasında olan ve büyüklükleri 6 ile 7.6 arasında deprem hareketleri kullanılmıştır.

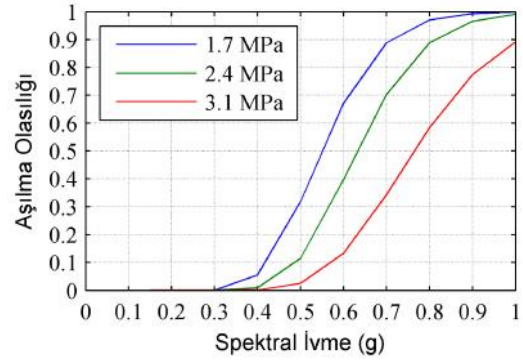
Barajın limit durumu temel kısmındaki çatlak ilerlemesinin ardından baraj gövdesinde de çatlak oluşması olarak seçilmiştir (ekil 8b). Bu sınır seçimi bu tip sistemlerde istenen davranışa uygun olarak belirlenmiştir: zira deprem sonrası amada baraj zeminindeki hasar beton enjeksiyonu gibi teknikler ile gövdedeki herhangi bir çatlakın tamir edilmesine göre çok daha kolay iyileştirilebilir. ekil 8c'de bu durum için maksimum benzerlik sistemi (Baker, 2015) ile oluşturulan kırılma olasılıkları sunulmaktadır. Toplamda 500'den fazla analiz sonucunda oluşturulan hasar olasılıkları barajın doğrusal olmayan davranışını ve özellikle yüksek spektral ivme değerlerinde gövdede çatlak ilerlemesi olasılığını açıkça göstermektedir (ekil 8). Örnek olarak 0.7g spektral ivme oluşturulan bir deprem altında barajın çekme dayanımı 1.7 MPa, 2.4 MPa ve 3.1 MPa oldu unda barajda limit durumuna ulaşma olasılıkları sırasıyla %90, %70 ve %30 olmaktadır. Çekme dayanımı 2.4 MPa olarak planlanırsa bu değerdeki %30'luk artışın limit sınırının ulaşma olasılığını %40 azalttığı görülmektedir.



(a) Kabul Edilebilir
Hasar



(b) Limit Durum



(c) Hasar Olasılık E rileri

ekil 8. Limit Durum ve Hasar Olasılık E rileri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada döner çatlak modelini gerçeklemek için öncelikle literatürdeki deneysel çalışmalar simüle edilmiştir. Bu analizler sonucu aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ❖ Statik deneylerde yük deplasman ili kısmını ba lıca etkileyen parametre çekme yumu ama fonksiyonudur.
- ❖ Dinamik deneylerde çatlak ın yeri, zamanlaması ve ilerlemesi döner çatlak modeli kullanılarak gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmektedir fakat çatlak ın teması çekme dayanımına oldukça hassastır.
- ❖ Deneylerin simülasyonunda eleman a ı yo unlu unun davranış ına önemli bir etkisi görülmemiştir.

100 m yüksekli indeki baraj modeli üzerinde yapılan duyarlılık analizi sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- ❖ Döner çatlak modelinde çatlak ilerlemesini etkileyen en önemli parametre çekme dayanımıdır.
- ❖ Deneysel sonuçlarının aksine barajdaki çatlak oranı eleman a ı yo unlu undan etkilenmektedir.
- ❖ Farklı çekme dayanımları için oluşturulan hasar olasılık e rileri yapının yüksek spektral ivme altında doğrusal olmayan davranış ını ve bu davranış ın tasarımda çekme dayanımı planları olarak nasıl değerlendirilebileceğini açıkça göstermektedir.

KAYNAKLAR

Aldemir, A., Binici, B., Arici, Y., Kurc, O. ve Canbay, E. (2015). Pseudo-dynamic testing of a concrete gravity dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* DOI: 10.1002/eqe.2553.

Baker, J.W. (2015). Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis. *Earthquake Spectra* **31:1**, 579-599.

Bhattacharjee, S.S. ve Leger, P. (1994). Application of NLFM Models to Predict Cracking in Concrete Gravity Dams. *Journal of Structural Engineering* **120**, 1255-1271.

Carpinteri, A., Valente, S.V., Ferrara, G. ve Imperato, L. (1992). Experimental and Numerical Fracture Modelling of a Gravity Dam. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 351-360.

FEMA. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440: Washington, DC.

Li, Q., Zhang, F., Zhang, W. ve Yang, L. (2002). Fracture and Tension Properties of Roller Compacted Concrete Cores in Uniaxial Tension. *Journal of Materials in Civil Engineering* **14**, 366-373.

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**, 518-529.

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

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

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