Bölüm 4

Dolgu Barajların Deprem Kaynaklı Kret Oturma Tahmini İçin Kullanılan Denklemler ve Karşılaştırmalı Analiz

Sadettin Topçu[1]

Evren Seyrek[2]

Özet

Deprem kaynaklı kret oturmalarının önceden tahmini dolgu barajların tasarımında son derece önemlidir. Deprem sırasında oluşan deformasyonlar hava payını aşar ise üstten aşma kaynaklı baraj göçmesine sebebiyet verebilmektedir. Dolgu barajlarda sismik yükler altında oluşacak deformasyonları belirlemek için pek çok yöntem kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş Newmark yaklaşımı, ampirik ve yarı-ampirik yaklaşımlar barajların deprem sırasındaki davranışını incelemek için kullanılan ilk değerlendirme yöntemleridir. Ancak bu yöntemlerin gerçek deformasyon biçimini ve deformasyon büyüklüğünü tam olarak tahmin ettiğini söylemek mümkün değildir. Bu sebeple dolgu barajlarda deprem kaynaklı kret oturmalarının tek bir yöntem yerine farklı yaklaşımlara göre tahmin edilmesi ve sonuçların karşılaştırılarak kullanılması çok daha uygundur.

1. GİRİŞ

Depremselliğin yüksek olduğu bölgelerde inşa edilen dolgu barajların deformasyon davranışının analiz edilmesi, bu barajların uzun vadeli güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır. Esasen, deprem yüklerine maruz kalan dolgu barajlarda aşırı oturmalar enine çatlaklara neden olarak içsel erozyona neden olabilmektedir (Seed vd., 1978). Oturma sebebiyle, hava payının aşılması, rezervuardaki suyun taşmasına ve dolgu barajların çökmesine neden olabilir (OMNR, 2011).

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Yüksekokulu, İnşaat Böl., Kütahya, Türkiye, sadettin.topcu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1306-2502

2 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Kütahya, Türkiye, evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723

https://doi.org/10.58830/ozgur.pub391.c1653

Literatürde deprem kaynaklı kret oturma değerini tahmin etmek için basit ve hızlı yöntemlerden karmaşık yöntemlere kadar farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Her yöntemin farklı avantaj ve dezavantajlarının olduğu unutulmamalıdır. Her yöntemin farklı amaçlar için kullanım önceliğine sahip olabileceği açıktır. Son yıllarda geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılan yazılımların popülaritesinin artmasıyla birlikte, dolgu barajlarda deformasyonların belirlenmesinde psödo-statik analizlerin yerini 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizler almıştır. Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar yöntemleri sayısal analizde en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Dolgu barajların tasarımında bu teknikler esas alınarak birçok ticari paket program geliştirilmiştir (FLAC, Quake/W, Plaxis vb). Sayısal analizler sırasında şev stabilitesi, sıvılaşma, yatay ve düşey yer değiştirmeler bütünsel bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Özellikle baraj geometrisinin yanında, barajın doğal periyodu ve baraj vadisinin şeklinin de dikkate alınması bu yöntemlerin sonuçlar üzerindeki etkisini arttırmaktadır.

Zeminlerin gerilme-deformasyon davranışına dayalı yöntemler hem karmaşık hem de zaman alıcı olduğundan, barajların risk durumunu değerlendirmek için bu kapsamlı analizlere alternatif olan basitleştirilmiş yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş yöntemler arasında Newmark'ın önerdiği en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde dolgudaki potansiyel kayan kütlenin davranışının, eğimli yüzeydeki kayan bloğun davranışına benzer olduğu kabul edilmektedir (Newmark, 1965). Literatürde bu yaklaşım değiştirilerek geliştirilen farklı çalışmalar da mevcuttur (Maksidi ve Seed 1978; Rathje ve Braj 1999; Bray ve Travasarou 2007; Saygili ve Rathje 2008).

Bu yöntemlerin dışında ampirik ve yarı ampirik yaklaşımlar da dikkat çekmektedir (Jansen 1990; Swaisgood 1998; Swaisgood 2003; Singh vd., 2007; Bureau 2009; Swaisgood 2014; Seyrek ve Topçu 2022) Bu çalışmalarda deprem yüklerine maruz kalan barajlar incelenerek ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Genel olarak deprem sonrasında gözlenen oturma ve depremin şiddet ölçümleri (M ve PGA) ile baraj yüksekliği ve kret uzunluğu gibi baraj özellikleri arasında matematiksel korelasyonlar kurulmuştur. Uygun maliyetli ve hesaplama açısından kolay olan bu ampirik yöntemler, gelişmiş sayısal simülasyon tekniklerine göre daha az zaman ve profesyonellik gerektirir. Deprem kaynaklı kret oturmalarının kritik olup olmadığını değerlendirmek için birçok kılavuz, yönetmelik ve referans, erken tasarım aşamalarında yardımcı analiz araçları olarak bu tür yöntemlerin kullanılmasını önermektedir (FEMA 2005, USBR 2015, ANCOLD 2017). Bu yöntemlerle hesaplanan oturma değerleri hava payı değerine yakın ya

da büyük ise barajların daha kapsamlı bir dinamik analize tabi tutulması gerektiği yönünde görüş hakimdir.

Bu çalışmada deprem kaynaklı baraj oturmalarını hesaplamak için literatürde yer alan farklı denklemler kullanılmıştır. Bu denklemlerin; deprem büyüklüğü (M), en büyük yer ivmesi (PGA) ve baraj yüksekliği (H) değerlerine olan hassasiyetini değerlendirmek altmış dört farklı senaryo için analizler gerçekleştirilmiş ve oturma değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların barajların erken tasarım aşamasında risklerinin belirlenmesinde kullanılabileceği görülmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında farklı deprem senaryoları ve baraj yükseklikleri için deprem kaynaklı kret oturma değerlerini tahmin eden yaklaşımlar karşılaştırılmıştır. Dört farklı deprem büyüklüğü (M=6, 6.5, 7 ve 7.5), dört farklı ivme değeri (PGA=0.20g, 0.30g, 0.40g ve 0.50g) ve dört farklı baraj yüksekliği (H=25m, 50m, 75m ve 100m) dikkate alınarak oluşturulan altmış dört ayrı senaryo için analizler gerçekleştirilmiştir. Pratik olmaları ve ilk değerlendirmelerde daha hızlı çözüm üretme yetenekleri nedeniyle beş farklı ampirik yaklaşım aday denklem olarak seçilmiş ve ön değerlendirmeye tabii tutulmuştur (Swaisgood 1998; Swaisgood 2003; Bureau 2009; Swaisgod 2014; Seyrek ve Topçu, 2022). Swaisgood'un son iki yaklaşımı, yıllar içinde veri tabanına eklenen yeni olayların güncellenmiş versiyonlarına atıfta bulunmaktadır. Bu yaklaşımlara ilişkin özet bilgiler aşağıda verilmektedir.

2.1. Swaisgood (1998) Yöntemi

Bu yaklaşımda 54 adet dolgu barajın sismik davranışı incelenmiş ve Denklem 1'de verilen ilişki elde edilmiştir. Denklem 1'de hesaplanacak kret oturması (Δ) değeri, baraj yüksekliği ve alüvyon kalınlığının oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\Delta\% = SEF \times Ktyp \times Kdh \times Kat \quad (1)$$

Denklem 1'de SEF, Ktyp, Kdh ve Kat sırasıyla sismik enerjiye, baraj tipine, baraj yüksekliğine ve alüvyon kalınlığına bağlı faktörlerdir. Sismik Enerji Faktörü (SEF), baraj yerindeki en yüksek yer ivmesine (g cinsinden PGA) ve deprem büyüklüğüne (M) bağlı olarak Denklem 2 ile hesaplanmaktadır. Kat ve Kdh değerleri Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılarak belirlenmektedir. At ve H sırasıyla metre cinsinden alüvyon kalınlığını ve baraj yüksekliğini ifade etmektedir.

$$SEF = e^{(0.7168 \times M + 6.405 \times PGA - 9.098)} \quad (2)$$

$$Kat = 0.851 \times e^{(0.00368 \times At)} \quad (3)$$

$$Kdh = 9.134 \times H^{-0.437} \quad (4)$$

Ktyp değerinin; merkezi çekirdekli kaya dolgu barajlar ve ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar için 1.187, toprak dolgu barajlar için 1.363 ve hidrolik dolgu barajlar için 4.620 değerinin alınması önerilmektedir.

2.2. Swaisgood (2003) Yöntemi

Bu yöntemde sıvılaşma ile ilgili herhangi bir olayın yaşanmadığı 69 vaka geçmişi dikkate alınarak ampirik bir denklem önerilmiştir. Araştırmacının önceki çalışmasında olduğu gibi depreme bağlı deformasyonu gösteren parametre olarak kret oturmaları seçilmiştir. Regresyon analizi sonucunda kret oturmaları üzerinde en etkili faktörlerin PGA ve deprem büyüklüğü olduğu tespit edilmiştir (Denklem 5). S değeri baraj yüksekliğine (DH) ve alüvyon kalınlığına (AT) bağlı olarak Denklem 6'daki gibi tanımlanmaktadır. Denklem 5'te verilen PGA değeri, barajın temelinde ölçülen veya tahmin edilen en yüksek yer ivmesi değeri olarak dikkate alınmakta olup M deprem büyüklüğünü ifade etmektedir.

$$S\% = e^{(6.07 \times PGA + 0.57M - 8.00)} \quad (5)$$

$$S\% = \frac{\Delta}{DH + AT} \times 100 \quad (6)$$

2.3. Bureau (2009) Yöntemi

Bureau (1985), senaryo deprem için baraj yerinde beklenen yer hareketinin, deprem sonrası baraj yapısını değerlendirme amacıyla sarsıntının şiddetinin tahmininde kullanılan deprem şiddet indeksi (ESI) ile ifade edilebileceğini belirtmiştir (Denklem 7). Bu yaklaşıma göre ESI değeri depremin şiddet ölçüsü olarak kullanılabilir. Bu denklemde PGA değeri baraj yerindeki en yüksek yer ivmesi değerini, M ise Richter veya Moment magnitüdünü temsil etmektedir.

$$ESI = PGA \times (M - 4.5)^3 \quad (7)$$

Bureau (2009), Denklem 7'de verilen ESI değerini kullanarak kret oturmalarını hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir. Bu denklemde S, göreceli kret oturmasını göstermektedir.

$$\log(S\%) = -0.51931 + 0.54388 \times \log(ESI) + 0.26284 \times [\log(ESI)]^2 \quad (8)$$

2..4 Swaisgood (2014) Yöntemi

Swaisgood (2014) tarafından gerçekleştirilen araştırma, 2003 yılındaki çalışmasına 13 vaka daha ekleyerek toplam 82 vaka içeren bir veri tabanı içermektedir. Bu çalışma, içerdiği 2004 Niigata Ken Chuetsu depremi (M=6.6), 2008 Wenchuan depremi (M=7.9), 2008 Iwate-Miyagi Nairiku depremi (M=6.9), 2010 Maule depremi (M=8.8) ile Swaisgood (2003)'dan farklılık göstermektedir. Bu depremlerin yanı sıra 2011 Tohku depreminde (M=9.0) meydana gelen 13 baraj kazasını da içermektedir. Çoklu regresyon analizlerinde deprem sırasındaki en yüksek yer ivmesi, deprem büyüklüğü, baraj tipi, baraj ile enerji kaynağı arasındaki mesafe, baraj yüksekliği, kret uzunluğunun baraj yüksekliğine oranı, eğim açıları ve rezervuar su seviyesi değerleri bağımsız olarak dikkate alınmıştır. Ancak kret oturmalarıyla yalnızca maksimum yer ivmesi ve deprem büyüklüğünün doğrudan ilişkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Denklem 9'da normalize edilmiş kret oturması (NCS) ile PGA ve M değerleri arasındaki ilişki verilmektedir.

$$NCS\% = e^{(5.70 \times PGA + 0.471M - 7.22)} \quad (9)$$

Denklem 9'da tanımlanan NCS değeri, baraj yüksekliği ve alüvyon kalınlığın toplamının yüzdesi olarak ifade edilen kret oturma miktarını temsil etmektedir. PGA değeri "g" cinsinden temelde ölçülen veya hesaplanan en büyük yer ivmesi değeri olarak dikkate alınmaktadır.

2.5. Seyrek ve Topçu (2022) Yöntemi

Dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelmiş seksen sekiz ayrı vakanın incelendiği bu çalışma da Genetik Algoritma kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu vakaların seçimi sırasında sıvılaşma içeren olaylar veri tabanından çıkarılarak değerlendirme yapıldığı özellikle belirtilmelidir. Araştırmacılar tarafından önerilen tahmin denklemi aşağıda verilmektedir (Denklem 10). İlgili denklemde girdi parametrelerinden biri olan magnitüd-ivme-faktörü (MAF) Denklem 11'de tarif edilmekte olup M_w moment magnitüdünü PGA ise "g" cinsinden en büyük yer ivmesi değerini ifade etmektedir. H_d ise "m" cinsinden baraj yüksekliğini tanımlamak için kullanılmıştır.

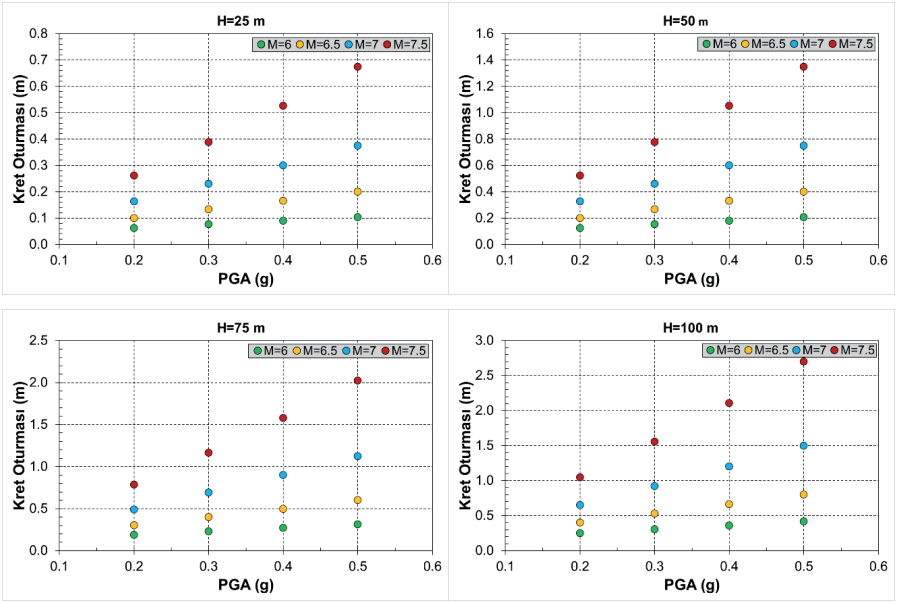
$$S_{kret} = \log[\log(2.849 - \sin(9.972 \times H_d))] \times \left[-\frac{MAF}{18.836} \times (14.977 + H_d)\right] \times \left[0.240 + \left(\frac{15.534}{H_d}\right)^{MAF}\right] \times 0.645^{7.747 - \sin(26.812 \times MAF)} \quad (10)$$

$$MAF = e^{\sqrt{2xPGAxMw}} \quad (11)$$

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

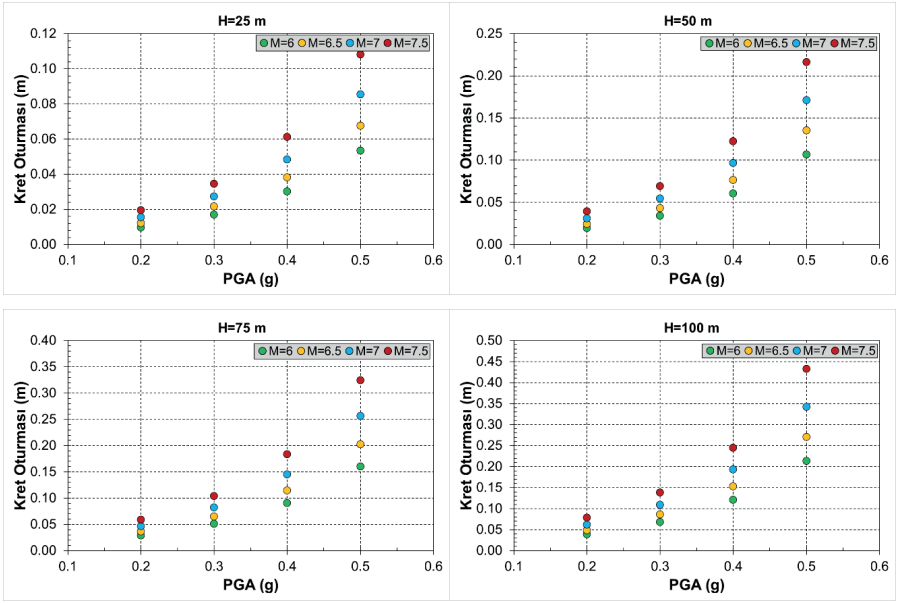
Bir önceki bölümde detayları verilen ve Swaisgood tarafından önerilen yaklaşımlar dikkate alınarak yapılan ön değerlendirme analizlerinde, araştırmacının 2003 ve 2014 yıllarında önerdiği yaklaşımların benzer sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Ayrıca Swaisgood (1998) tarafından önerilen tahmin denkleminin oluşturulmasında kullanılan veri tabanındaki vakaların bazıları sıvılaşma kaynaklı oturmalar da içerdiği belirlenmiştir. Bu sebeple analizlerde kullanılacak ve karşılaştırması yapılacak yöntemlerin Bureau (2009), Swaisgood (2014) ve Seyrek ve Topçu (2022) olmasına karar verilmiştir. Dört farklı deprem büyüklüğü, dört farklı ivme değeri ve dört farklı baraj yüksekliğinin dikkate alındığı altmış dört ayrı senaryo için deprem kaynaklı kret oturma değerleri belirlenmiştir. Baraj temeli altındaki alüvyon kalınlığı 0 m olarak kabul edilerek analizler yapılmıştır.

H=25m, H=50m, H=75m ve H=100 m'lik dolgu baraj yüksekliği için Bureau (2009) denklemi ile hesaplanan deprem kaynaklı kret oturma değerleri Şekil 1'de verilmektedir. İlgili şekle göre, farklı en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerine karşılık gelen kret oturma değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirildiğinde doğrusal bir çizgi elde edilmektedir. Farklı deprem büyüklükleri için elde edilen noktaların birleşimi ile oluşan çizgilerin eğimi deprem büyüklüğünün artması ile artmaktadır. Bu gözlem, kret oturması değerlerindeki artışın deprem büyüklüğünden çok fazla etkilendiğini göstermektedir. Şekil 1 detaylı olarak değerlendirildiğinde, aynı en büyük yer ivmesi değerine sahip senaryolar içim incelenen tüm baraj yüksekliklerinde kret oturmalarındaki en büyük değişim oranı, deprem büyüklüğünün M=6.5'dan M=7.0'ye ve M=7.0'dan M=7.5'a çıkması durumunda oluştuğu görülmektedir. Örnek olması açısından H=50 m yüksekliğe sahip dolgu barajda M=7.0 ve PGA=0.50g deprem senaryosu için beklenen kret oturması değeri 0.749 m iken aynı baraj yüksekliği için M=7.5 ve PGA=0.50g senaryosunda tahmini kret oturması 1.350 m bulunmuştur.



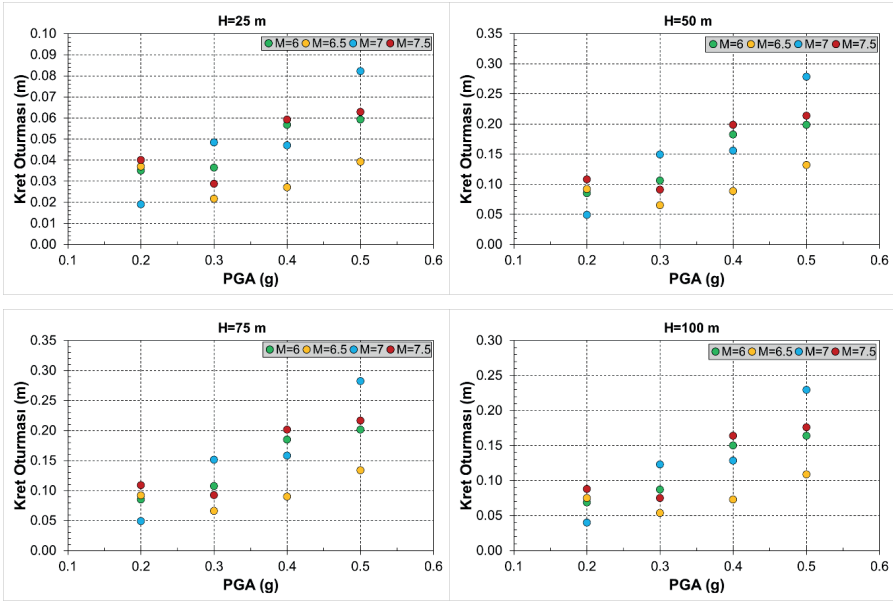
Şekil 1. Bureau (2009) yöntemine göre deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin değişimi

Swaisgood (2014) tarafından önerilen tahmin denklemi kullanılarak hesaplanan kret oturma değerlerinin deprem büyüklüğü, en büyük yer ivmesi ve baraj yüksekliğine göre değişimi Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 2 incelendiğinde, farklı en büyük yer ivmesi değerlerine karşılık gelen kret oturma değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirildiğinde doğrusal olmayan bir ilişki elde edildiği görülmektedir. Farklı PGA değerleri için hesaplanmış kret oturma değerlerinin deprem büyüklüğünün artması ile arttığı görülmekle birlikte bu artış oranı Swaisgood (2014) yaklaşımına göre daha küçüktür. Karşılaştırmayı daha kolay yapabilmek için, H=50 m yükseklikteki bir dolgu baraj için M=7.0 ve PGA=0.50g deprem senaryosu için beklenen kret oturması değeri ile aynı baraj yüksekliği için M=7.5 ve PGA=0.50g senaryosuna ait tahmini kret oturması değeri incelendiğinde ilk senaryo için 0.171 m kret oturması beklenirken, ikinci senaryoda tahmini kret oturması 0.216 m olarak hesaplanmıştır. İlgili şekilde dikkati çeken bir diğer durum ise kret oturmalarının deprem büyüklüğünden en çok etkilendiği durumun PGA≥0.40g olan senaryolarda gözlenmesidir.



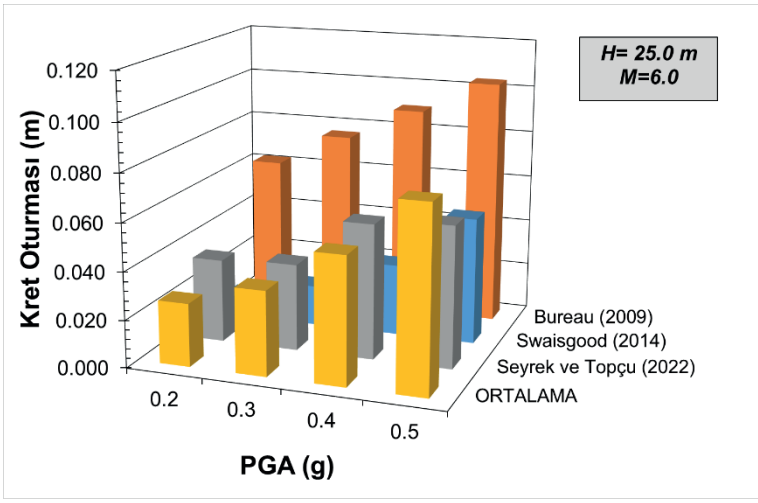
Şekil 2. Swaisgood (2014) yöntemine göre deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin değişimi

Seyrek ve Topçu (2022) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde ise Bureau ve Swaisgood yöntemlerindeki gibi en büyük yer ivmesi ve deprem büyüklüğünün artışına paralel olarak deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin düzenli bir şekilde artmadığı görülmektedir (Şekil 3). Bu durum, diğer yöntemlerdeki denklemlerin aksine araştırmacıların önerdiği denklemin genel bir formunun olmaması, küçük depremlerin küçük ivme, büyük depremlerin ise büyük ivme oluşturma ihtimallerinin de model sonuçlarına yansıması ve önerdikleri modelin deprem belirsizliklerindeki rassallığı da göz önüne alması ile açıklanabilir. Şekil 3 incelendiğinde, altmış dört senaryo içerisinde en büyük kret oturması değerinin M=7.5 ve PGA=0.50 g ve H=75.0 m için gözlendiği ve 0.282 m olduğu anlaşılmaktadır. Aynı deprem senaryosu için baraj yüksekliğinin 50.0 m olması durumunda ise tahmini kret oturması değeri 0.278 m olarak belirlenmiştir. Tahmini kret oturma değerlerindeki değişim oranı açısından yapılacak değerlendirmede, özellikle M=7.0 deprem büyüklüğünün oluşması senaryosunda ivme değerinin 0.20g den 0.30g'ye çıkması durumunda en büyük değişim ortaya çıkmaktadır. Benzer davranış M=7.0 deprem büyüklüğünde ivme değerinin 0.40g'den 0.50g'ye artması durumunda da görülmektedir.

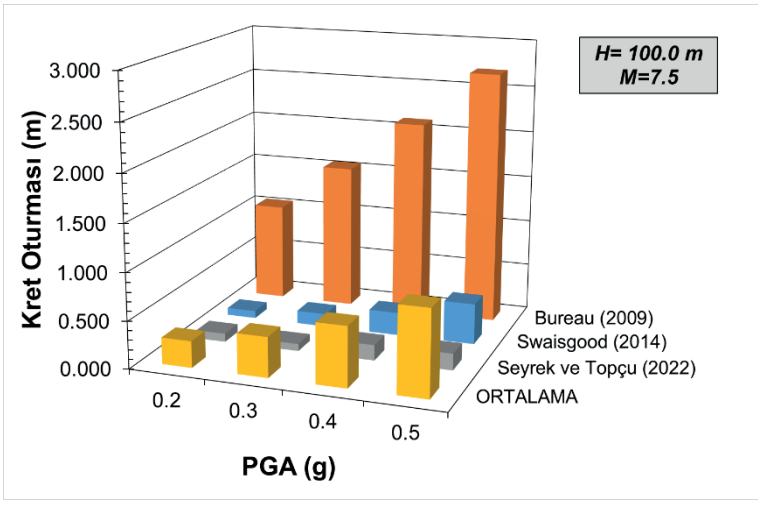


Şekil 3. Seyrek ve Topçu (2022) yöntemine göre deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin değişimi

Deprem kaynaklı kret oturmalarının tahmini için seçilen yöntemlerin birbiri ile mukayesesini daha kolay yapabilmek adına baraj yüksekliği ve deprem büyüklüğünün en küçük olduğu senaryo (H=25 m, M=6.0) ile baraj yüksekliği ve deprem büyüklüğünün en büyük olduğu senaryo (H=100 m, M=7.5) için kret oturması değerlerinin değişimini gösteren Şekil 4 ve Şekil 5 oluşturulmuştur. H=25 m ve M=6.0 kombinasyonunda en büyük kret oturma değeri Bureau (2009) yöntemi ile edilmiş olup bu yöntemi Seyrek ve Topçu (2022) ile Swaisgood (2014) yöntemi izlemektedir. Üç farklı yöntem ile belirlenen ortalama kret oturması değerlerinin Seyrek ve Topçu (2022) yaklaşımı ile belirlenen kret oturması değerlerine yakın olduğu dikkati çekmektedir. H=100 m ve M=7.5 kombinasyonunda ise en yüksek kret oturması değerleri Bureau (2009) yöntemiyle elde edilmiştir. Bu senaryo için en küçük oturma değeri Seyrek ve Topçu (2022) yaklaşımında gözlenmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 birlikte değerlendirildiğinde, baraj yüksekliğinin ve deprem büyüklüğünün artması ile birlikte Bureau (2009) yöntemine göre belirlenen kret oturması değeri ile diğer yöntemlere göre hesaplanan oturma değerleri arasındaki fark da artmaktadır.



Şekil 4. H=25.0 m ve M=6.0 senaryosu için deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin mukayesesi



Şekil 5. H=100.0 m ve M=7.5 senaryosu için deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin mukayesesi

4. SONUÇLAR

Dört ayrı baraj yüksekliği (H=25m, 50m, 75m ve 100m), dört ayrı deprem büyüklüğü (M=6, 6.5, 7 ve 7.5) ve dört farklı ivme değeri (PGA=0.20g, 0.30g, 0.40g ve 0.50g) dikkate alınarak oluşturulan altmış dört ayrı senaryo için deprem kaynaklı kret oturma değerleri hesaplanmıştır. Oturma değerlerinin tahmini için Bureau (2009), Swaisgood (2014) ile

Seyrek ve Topçu (2022) tarafından önerilen denklemler kullanılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tüm senaryolar için Bureau (2009) yöntemi diğer iki yönteme göre daha büyük kret oturması değeri tahmin etmektedir.
- Bureau (2009) yöntemine göre elde edilen oturma değerleri ile Swaisgood (2014) ve Seyrek ve Topçu (2022) yaklaşımları ile belirlenen oturma değerleri arasındaki farklar baraj yüksekliği ve deprem büyüklüğünün artışı ile beraber artmaktadır.
- Bureau (2009) yaklaşımında en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerine karşılık gelen kret oturma değerlerinin oluşturduğu noktalar birleştirildiğinde doğrusal bir çizgi elde edilmektedir.
- Swaisgood (2014) yönteminde kret oturmalarının deprem büyüklüğünden en çok etkilendiği durum PGA≥0.40g olan senaryolarda gözlenmiştir.
- Seyrek ve Topçu (2022) tarafından önerilen tahmin denkleminin genel formu sebebiyle Bureau ve Swaisgood yöntemlerindeki gibi en büyük yer ivmesi ve deprem büyüklüğünün artışına paralel olarak deprem kaynaklı kret oturma değerlerinin düzenli bir şekilde artmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

ANCOLD (2017). ANCOLD Guidelines for Design of Dams and Appurtenant Structures for Earthquake. Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD).

Bray, J.D. and Travasarou, T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. J. Geotech. Geoenviron. Eng. - ASCE, 133(4), 381-392.

Bureau G. (2009). Seismic performance review of Zipingpu Dam. In Proc. International Seminar on Earthquake and Dam Safety, ICOLD, March-April, China, 33-54.

FEMA (2005). Federal guidelines for dam safety: earthquake analyses and design of dams. FEMA-65, Federal Emergency Management Agency.

Jansen, R. B. (1990). Estimation of embankment dam settlement caused by earthquake. International Water Power and Dam Construction, 42(12), 35-40.

Makdisi, F.I and Seed H.B. (1978). Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. J. Geoteh. Eng. Division, 104(7), 849-867.

Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15, 139-16.

OMNR. (2011). Geotechnical design and factors of safety. Technical Bulletin, Ontario Ministry of Natural Resources, Canada.

Rathje, E.M. and Bray, J.D. (1999). An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures. Can. Geoteh. J., 36(1), 72-87.

Saygili, G. and Rathje, E.M. (2008). Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes. J.Geotech. Geoenviron. Eng. - ASCE, 134(6), 790-803.

Seed, H. B., Makdisi, F. I., & De Alba, P. (1978). Performance of earth dams during earthquakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104(7), 967-994.

Seyrek, E., & Topcu, S. (2022). Prediction of earthquake-induced crest settlement of embankment dams using gene expression programming. Geomechanics and Engineering, 31(6), 637.

Singh, R., Roy, D. and Das, D. (2007). A correlation for permanent earthquake-induced deformation of earth embankments. Eng. Geol., 90(3-4), 174-185.

Swaisgood J. R. (1998). Seismically-induced deformation of embankment dams. In proceedings of sixth national conference on earthquake engineering. Seattle, Washington, U. S. A. May 31 – June 4 1998.

Swaisgood, J.R. (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes. Proceeding of the 7th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Christchurc, New Zealand.

Swaisgood, J.R. (2014). Behavior of embankment dams during earthquake. J. Dam Saf., 12(2),35-44.

USBR (2015). Chapter 13: Seismic Analysis and Design. Design Standards No. 13 Embankment Dams, Phase 4: Final, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.