

KİL ÇEKİRDEKLİ KAYA DOLGU BARAJLARDA HİDROLİK ÇATLAMA POTANSİYELİNİN TAHMİN EDİLMESİ

Sadettin TOPÇU
Dumlupınar Üniversitesi Germiyan Kampüsü Merkez/Kütahya
sadettin.topcu@dpu.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 23.02.2017, Makalenin kabul tarihi: 18.10.2017)

ÖZ

Dolgu barajlarda çatlaklar; kemerlenme, farklı oturma, tektonik yer hareketleri ve hidrolik çatlamlar sonucu oluşabilir. Dolgu barajlarda memba yüzeyinde meydana gelen su basıncı etkisiyle mevcut çatlağın büyümesi veya yeni bir çatlağın oluşmasıyla ortaya çıkan çatlak oluşma mekanizmasına hidrolik çatlama adı verilir. Literatürde hidrolik çatlama nedeniyle göçen birçok barajdan bahsedilmektedir. Hidrolik çatlama sonucu barajda yoğun bir kaçak ile birlikte içsel erozyon ve borulanma olayları görülür. Özellikle kil çekirdekli kaya dolgu yüksek barajlarda baraj emniyeti açısından araştırılması gerekir. Bu çalışmada önce; hidrolik çatlama neden olan kemerlenme davranışı anlatılmış, daha sonra da hidrolik çatlama mekanizması verilmiştir. Daha sonra da talvegten 125 metre yüksekliğindeki kil çekirdekli kaya dolgu enkesite sahip olan Çınarcık Barajı için hidrolik çatlama potansiyeli tahmin edilmiştir. Bu çalışma sonucunda Çınarcık Barajı için dikkate alınacak düzeyde hidrolik çatlama potansiyeli ortaya çıkmıştır. Fakat; baraj rezervuarının yavaş doldurulması ve çatlak durdurucu filtre kullanılması şimdiye kadar bu barajla ilgili bir problemin ortaya çıkmasını engellemiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik çatlama, Kemerlenme, Enine Çatlak, Yatay Çatlak, Çınarcık Barajı

ESTIMATION OF HYDRAULIC FRACTURING POTENTIAL FOR CLAY-CORE ROCKFILL DAMS

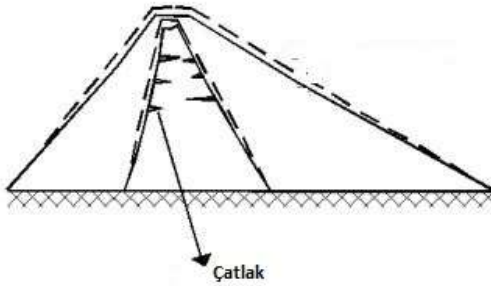
ABSTRACT

The cracks in the embankment dams might occur as the result of arching, differential settlement, tectonic ground movements and hydraulic fracturing. The mechanism of crack formation, which occurs as the enlargement of the existing crack or the formation of a new crack on the upstream due to the effect of water pressure on the surface of the column at the clay-core rockfill dams, is called hydraulic fracturing. In the literature, there are many dams that are mentioned to be collapsed due to hydraulic fracturing. As the result of the hydraulic fracturing at the dam, concentrated leakage together with internal erosion and piping incidents are seen. So, hydraulic fracturing is a problem that needs to be investigated in terms of dam safety especially in clay-core rockfill dams. In this study; first of all, the behavior of arching causing the hydraulic fracturing was explained and then the hydraulic fracturing mechanism was given. Hydraulic fracturing potential is estimated for Çınarcık Dam, which has a clay-core rockfill cross-section of 125 meters in height from river bed. As a result of this study, there is a possibility of hydraulic fracturing to be considered for Çınarcık Dam. But; slow impounding of dam reservoir and use of a crack stopper filter prevented the occurrence of a problem with this dam until now.

Keywords: Hydraulic Fracturing, Arching, Transverse crack, Horizontal crack, Çınarcık Dam

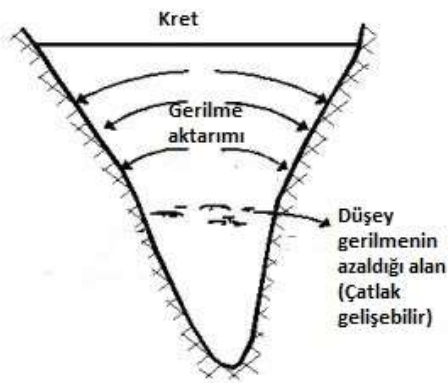
1 GİRİŞ

Kil çekirdeğe sahip dolgu barajlarda gerilme transferleri sonucu ortaya çıkan “kemerlenme” hadisesi üç farklı şekilde gelişmektedir. Bunlardan birincisi memba-mansap doğrultusunda gelişir. Bu kemerlenmeye enine kemerlenme adı verilir (Şekil 1). Kabuk ile çekirdeğin farklı deformasyon modüllerine sahip olmasından kaynaklanır. Kil çekirdeğin deformasyon modülünün, kabukta kullanılan kayanınkine göre daha az olmasından dolayı yukarıdan gelecek yüklerin etkisiyle daha fazla oturma yapmak isteyecektir. Bu durumda da düşey yüklerin bir kısmı kabuğa transfer olacaktır. Böylece özellikle kil çekirdeğin kabuğa yakın kısımlarında düşey gerilmede azalmalar görülecektir.



Şekil 1 - Enine kemerlenme [Rezai vd, 2011]

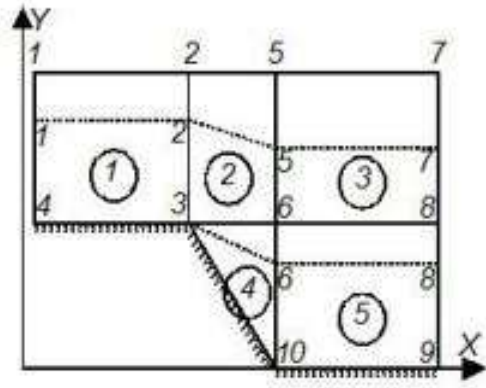
Kil çekirdeğin eğimli inşa edilmesi bu kemerlenmeyi engelleyebilir. İkincisi ise dolgu ile vadi yamaçları arasında gerçekleşen “Boyuna Kemerlenme” olayıdır (Şekil 2). Özellikle dar vadilerde inşa edilen dolgu barajlarda önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2 - Boyuna Kemerlenme [Rezai vd, 2011]

Üçüncüsü ise “Yerel Kemerlenme”dir. Bu kemerlenme de özellikle galeri ve dolu savağın dolgu malzemesiyle birleştiği noktalarda meydana gelir (Şekil 3). Genelde de farklı rijitliğe sahip malzemelerin (beton ve zemin

gibi) olduğu yerlerde görülür. Kemerlenme hadisesinin görüldüğü alanlarda çekme zonları oluşur. Oluşan bu çekme zonları da çekme çatlaklarının oluşumuna sebep olabilir.



Şekil 3 - Yerel Kemerlenme [Rezai vd, 2011]

Kemerlenme olayı kemerlenme katsayısıyla tespit edilebilir. Kemerlenme katsayısı R_L :

$$R_L = \frac{\sigma_v}{\gamma.H} \quad (1)$$

σ_v : Çekirdeğin H derinliğinde oluşan toplam düşey gerilme.

$\gamma.H$: Çekirdeğin H derinliğinde oluşması beklenen toplam örtü yükü.

R_L katsayısı 0 ile 1 arasında değerler alır. 1'den küçük ise kemerlenme hadisesi gelişmiş demektir. Kemerlenme katsayısının 0'a yakın olması şiddetli bir kemerlenmeyi gösterir. Kaçak ve içsel erozyonun görüldüğü ince kil çekirdeğe sahip 26 metre ve 34 metre yüksekliklerindeki Holle ve Harspranget Barajlarındaki kemerlenme oranları 0.5 olarak saptanmıştır [Loftquist, 1951]. Çizelge 1'de hidrolik çatlama nedeniyle göç etmiş barajlar verilmiştir.

Çizelge 1 – Hidrolik çatlamanın gözlemlendiği barajlar [Lo ve Kaniaru, 1990]

Barajlar	Yükseklik(m)	İnşaat süresi(yıl)	Rezervuar dolum hızı(m/ay)
Balderhead	48	4	2
Hyttejuvet	90	1	20
Viddalstavn	70	1	11
Teton	93	3	27
Yard'sCreek	24	2	7

Kil çekirdeğin memba yüzeyindeki asal gerilmelerin azalması ve bu noktalardaki su basıncının asal gerilmelerden büyük olması durumlarında hidrolik çatlama sorunu ortaya çıkmaktadır. Hidrolik çatlama, yeni bir çatlak

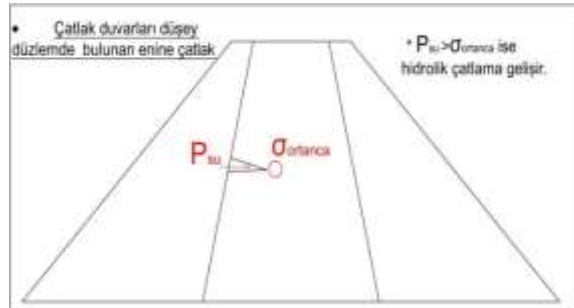
oluşumu veya mevcut olan bir çatlakın büyümesiyle de sonuçlanabilir. Yoğun bir kaçak sonucu barajın göçmesine neden olacağı için 2 veya 3 boyutlu analizlerle önceden tespitinin yapılması gerekmektedir. Hidrolik çatlama; rezervuarın ilk dolumu sırasında sıklıkla görülmüştür. [Wang,2012]'ye göre hidrolik çatlamanın gelişebilmesi için rezervuarın hızlı dolması, çekirdeğin suya doygun olmaması, düşük geçirimsizliğe ve memba yüzeyinde memba-mansap doğrultusunda uzanan bir çatlakla sahip olması gerekmektedir. Son yıllarda inşa edilen dolgu barajlarda yüksekliklerin artmasıyla kil çekirdeğin memba yüzeyinde oluşan su basınçları da artmıştır. Bu nedenle bu şekilde inşa edilen yüksek dolgu barajların hidrolik çatlama potansiyelinin baraj emniyeti açısından belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da Çınarcık Barajı'nın hidrolik çatlama potansiyeli [Nobari vd,1973] tarafından geliştirilen "Normal Gerilme Kriteri" yöntemiyle tahmin edilerek sunulmuştur.

2 NORMAL GERİLME KRİTERİ

Normal gerilme kriteri, memba yüzeyinde oluşan maksimum ve ortanca asal gerilmelerin bu yüzeye etki eden hidrostatik su basıncıyla kıyaslanması esasına dayanır. Dolgu barajlarda [Lowe,1970]'e göre; dört tip çatlak gelişir. Bunlar;

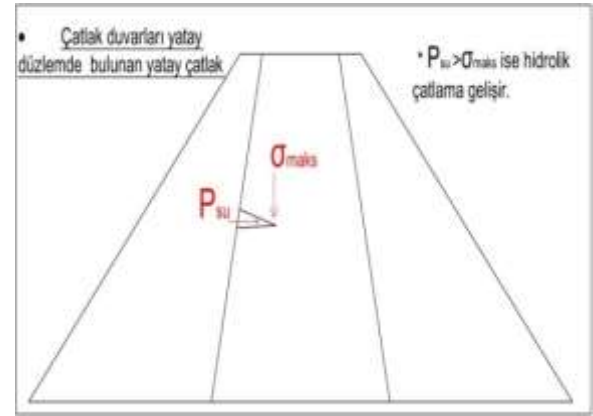
- Enine çatlak
- Boyuna çatlak
- Yatay çatlak
- Büzülme çatlak

Hidrolik çatlama açısından en kritik çatlak türleri enine çatlak ve yatay çatlaktır. Enine çatlaklar genelde; dolgunun boyuna farklı oturmasından kaynaklanır. Sismik kaynaklı yer hareketleri ve boyuna kemerlenme sonucu gerçekleşen enine çatlaklarda görülmüştür. Enine çatlaklarda çatlak duvarları düşey düzlemindedir. Bu tür çatlaklarda, hidrolik çatlama gelişebilmesi için hidrostatik su basıncının ortanca asal gerilmesinden büyük olması gerekir(Şekil 4).



Şekil 4 - Enine çatlakta hidrolik çatlama gelişimi

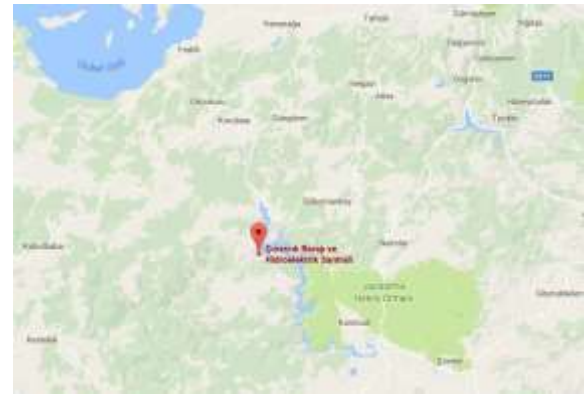
Yatay çatlaklar; büyük çoğunlukla enine kemerlenme sonucu oluşurlar. Yatay çatlaklarda çatlak duvarları yatay düzlemindedir ve bu tür çatlaklarda hidrolik çatlamanın gelişebilmesi için şekil 5'de görüldüğü gibi çatlak içerisindeki hidrostatik su basıncının maksimum asal gerilmeden büyük olması beklenir. Bir dolgu barajda; maksimum asal gerilme düşey yönde, minimum asal gerilme memba-mansap doğrultusunda ve ortanca gerilme ise baraj aksı doğrultusunda gelişir. Hidrolik çatlama; zeminin çekme dayanımının da aşılmasıyla gerçekleşen bir olaydır. Bu çalışmada gerilme kıyaslamaları yapılırken kil çekirdeğin çok küçük olan çekme dayanımı ihmal edilmiştir. Çınarcık Barajı'nda hidrolik çatlama ile oluşabilecek veya gelişebilecek yatay ve enine çatlaklar için normal gerilme kriteri dikkate alınarak analizler yapılmıştır.



Şekil 5 - Yatay çatlakta hidrolik çatlama gelişimi

3 ÇINARCIK BARAJI

Bursa'da Orhanlı ve M.Kemalpaşa ilçeleri sınırları içerisinde kalmaktadır. İçme suyu, sulama ve enerji amaçlı inşa edilmiştir.



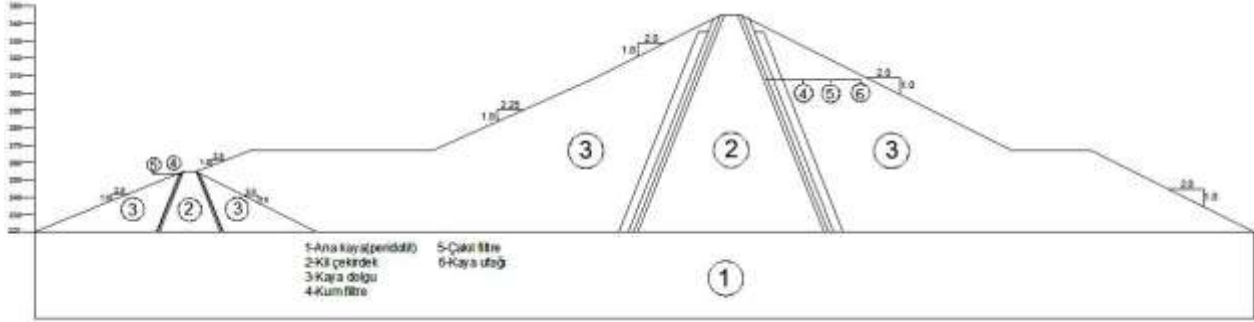
Şekil 6 - Çınarcık Barajı lokasyon haritası

Kil çekirdekli kaya dolgu şekilde enkesite sahip olan Çınarcık Barajı'nın memba tarafındaki kaya dolgusu 1/2 ve 1/2.25 eğimlerinde olacak şekilde iki farklı eğimde inşa edilmiştir. Memba batardosunun kret kotu deniz seviyesinden +242.5 m iken dolgunun kret kotu ise +333.0 m'dir. Maksimum, işletme ve ölü hacim seviyeleri ise sırasıyla +330.0, +304.75 ve +291.70 m kotları olarak belirlenmiştir. Mansap tarafındaki kaya dolgu ise palyeli inşa

edilmiştir. Aşağıdaki çizelge 2'de barajla ilgili teknik veriler sunulmuştur.

Çizelge 2 – Teknik veriler [DSİ,1986]

Gövde Hacmi	4771 dam ³
Yükseklik(talvegden)	125 m
Normal su kotunda göl hacmi	373 hm ³
Normal su kotunda göl alanı	10 km ²
Sulama alanı	6597 ha
Güç	120 MW
Yıllık üretim	540 GWh



Şekil 7- Çınarcık Barajı enkesiti

Şekil 7'de Çınarcık Barajı'nın enkesiti verilmiştir. Barajda filtre tasarımında kum, çakıl ve kaya ufağından oluşan [USBR,2011]'de belirtilen çatlak durdurucu filtre inşa edilmiştir. Çatlak durdurucu filtreler; genelde sismik kaynaklı yer hareketlerinin çok güçlü beklendiği yerlerde dolguda oluşabilecek çatlakların gelişip barajın içsel erozyona bağlı göçmesine neden olacağı durumlarda önerilmektedir. Çatlak durdurucu filtrelerde dikkat edilmesi gereken nokta filtrenin kendisinin çatlak oluşturma potansiyelinin olmamasıdır. Bunun içinde kullanılacak olan kum ve çakıl filtrelerdeki plastik veya plastik olmayan ince dane oranının % 5'den fazla olması istenmez. Barajın kil çekirdeğinde CL türü(LL=45, PI=27) zemin kullanılmıştır. Dolgu barajın temelinde çok az alüvyona rastlanmış bu da sıyırma kazısıyla kaldırılmıştır. Bunun dışında temelde peridotit türü magmatik kayaç bulunmaktadır. Çınarcık Barajı'nın genel görünümü de şekil 8'de görülmektedir.

4 NÜMERİK MODEL

Çınarcık Barajı'nın sayısal modellemesi iki boyutlu olarak GEOSTUDIO 2007 paket programının SIGMA/W modülünde yapılmıştır. Bu programda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

4.1 Modelin Geometrisi

Çınarcık Barajı'nın en büyük enkesitinin basitleştirilerek geometrik modellemesi

gerçekleştirilmiştir. 3776 birleşim noktası ve 3652 hücreden oluşan model şekil 9'da görülmektedir.

4.2 Malzeme Özellikleri

Modellemede altı farklı zemin türü tanımlanmıştır. [DSİ, 1986]'da belirtilen zemin parametreleri de göz önünde tutularak zeminler için makul tasarım parametreleri dikkate alınmıştır. Malzemeler lineer elastik davranış modelinde tanımlanmıştır. Çizelge 3'de bu değerler verilmiştir



Şekil 8 - Çınarcık Barajı

Çizelge 3 - Malzeme tasarım parametreleri

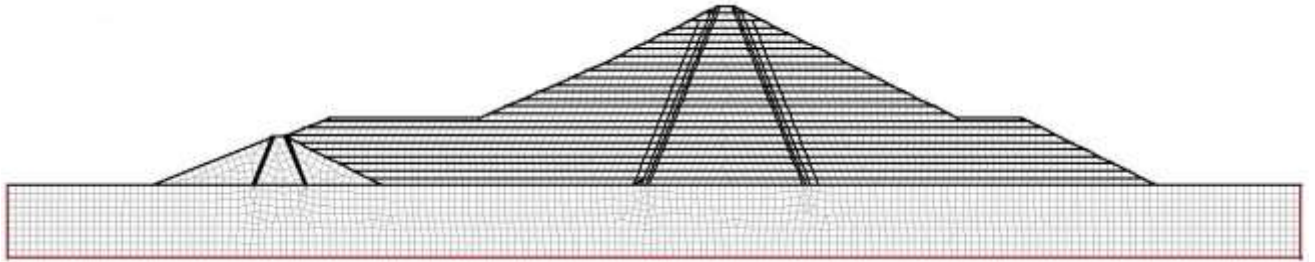
Malzeme	$E(kN/m^2)$	$\gamma_n(kN/m^3)$	ν
Kil çekirdek	2×10^4	18,5	0,45
Kaya dolgu	2×10^5	16,5	0,25
Kaya ufağı	12×10^4	17	0,3
Kum filtre	15×10^3	17,5	0,35
Çakıl filtre	12×10^3	18	0,35
Anakaya	1×10^6	16	0,15

4.3 Analiz Aşamaları

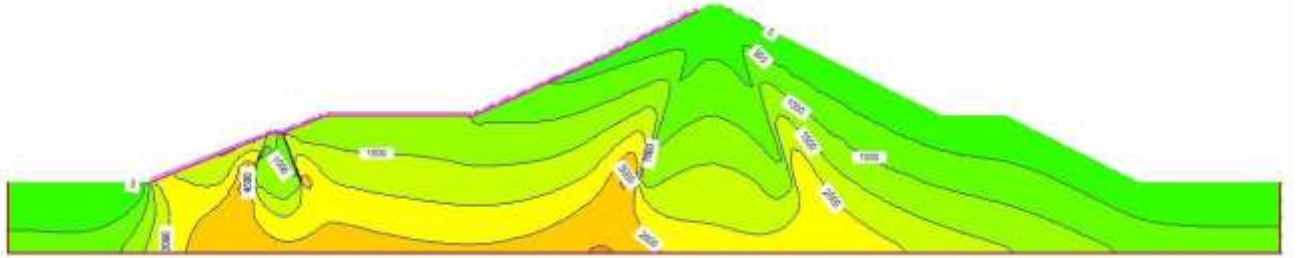
Sayısal modellemede yapılan çözümlemede dolgu barajın gerçekte inşasından işletmeye alımına kadar ki geçen dönemdeki gerilme-deformasyon davranışı benzetilmeye

çalışılmıştır. Bunun için de analiz aşağıdaki bahsedilen aşamalar halinde yapılmıştır:

- Temelde bulunan anakayadaki gerilmelerin oluşumu.
- Memba batardosunun modellenmesi
- Ana dolgunun 25 tabaka halinde modellenerek gerilmelerin aşama aşama oluşturulması.
- Rezervuarda su tutulmasının 3 aşamada gerçekleştirilmesi ve dolgunun memba yüzeyindeki kaya dolguya kaldırma kuvvetlerinin etki edilmesi.



Şekil 9 - Çınarcık Barajı'nın sayısal geometrik modeli

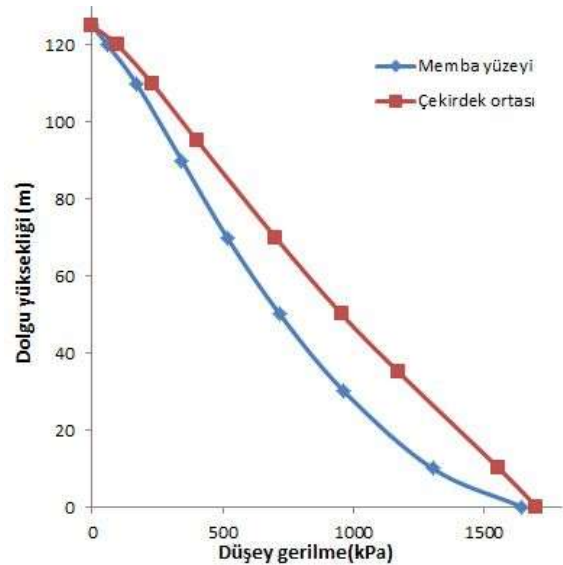


Şekil 10 - Çınarcık Barajı'nda oluşacak düşey gerilmeler

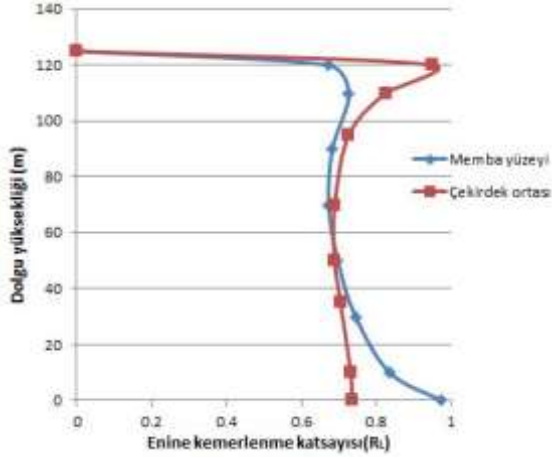
5 NÜMERİK ANALİZ

Yapılan analizler sonucunda Çınarcık Barajı'nda oluşacak düşey gerilmelerin durumu şekil 10'da gösterilmiştir. Kil çekirdeğin memba yüzeyindeki düşey gerilmeler; çekirdeğin ortasındaki düşey gerilmelerden daha küçüktür (Şekil 11).

Enine kemerlenme katsayılarının dolgu yüksekliği ile değişimi şekil 12'de verilmiştir. En küçük enine kemerlenme katsayıları memba yüzeyinde 0,67 iken çekirdek ortasında 0,69'dur. Çekirdek ortasındaki kemerlenme; memba yüzeyine göre dolgunun derin kısımlarında daha düşük olmasına rağmen hidrolik çatlama açısından kritik olan memba yüzeyindeki enine kemerlenmedir. Bunun sebebi; rezervuardaki su basıncına doğrudan maruz kalan kısmın memba yüzeyi olmasıdır.



Şekil 11 - Düşey gerilmeler



Şekil 12 - Enine kemerlenme katsayısı

Çınarcık Barajı; hidrolik çatlama açısından "Normal Gerilme" kriterine göre değerlendirildiğinde hidrolik çatlamanın yatay çatlak halinde oluşması veya mevcut yatay çatlakların hidrolik çatlama ile gelişmesi mümkün değildir. Dolgu yüksekliği boyunca mamba yüzeyine etki eden hidrostatik su basıncı, maksimum asal gerilmeden küçük kalmaktadır (Şekil 13).

Düzlemsel deformasyon gösteren bu nümerik modelden baraj aksı doğrultusunda oluşan ortanca asal gerilmeyi doğrudan elde edemeyiz. Ortanca asal gerilmeyi bulmak için; [Nobari vd,1973]'de belirtilen aşağıdaki formül kullanılır.

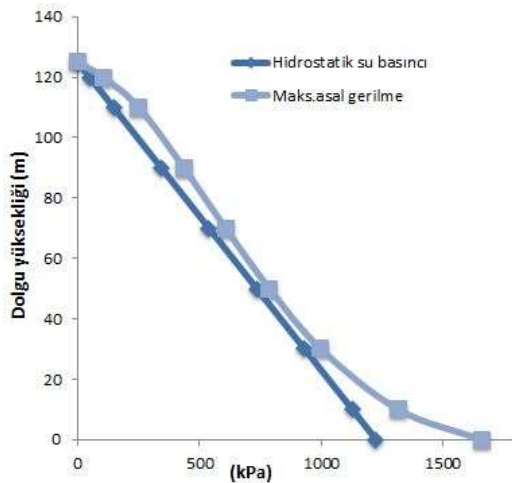
$$\sigma_2 = \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2)$$

σ_2 : Ortanca asal gerilme

σ_1 : Maks. asal gerilme

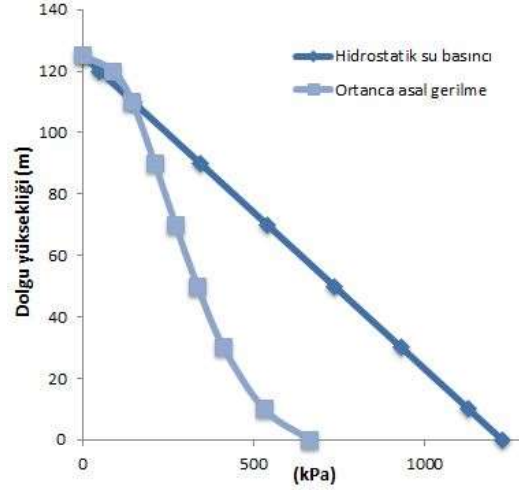
σ_3 : Minimum asal gerilme

ν : Kil çekirdeğin poisson oranı



Şekil 13 - Mamba yüzeyindeki hidrostatik su basıncı ve maksimum asal gerilmenin değişimi

Şekil 14'de görüldüğü gibi ortanca asal gerilme ile hidrostatik su basıncı kıyaslandığında hidrolik çatlamanın enine çatlak halinde oluşması veya mevcut enine çatlakların hidrolik çatlama ile gelişmesi ihtimal dâhilindedir.



Şekil 14 - Mamba yüzeyindeki hidrostatik su basıncı ve ortanca asal gerilmenin değişimi

6 DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Çınarcık Barajı için yapılan iki boyutlu sayısal analizden elde edilen sonuçlara göre; birçok yüksek kil çekirdekli kaya dolgu barajda olduğu gibi talvegten yüksekliği 125 m olan Çınarcık Barajı'nda da hem mamba yüzeyi hem de kil çekirdeğin ortası için enine kemerlenme olayı tahmin edilmiştir. Çatlak duvarları yatay düzlemde olan yatay çatlakların oluşması imkansız iken, çatlak duvarları düşeyde olan enine çatlakların hidrolik çatlama mekanizması ile oluşması ve gelişmesi tahmin edilmektedir. Çınarcık Barajı'nda şimdiye kadar bu konuda bildirilen bir sorunun olmayışı, çatlak durdurucu filtrenin oluşabilecek çatlakların gelişimini engellediğini göstermektedir. Bunun dışında bir diğer etken de Çınarcık Barajı'nın rezervuarının yavaş doldurulması gösterilebilir. Çınarcık Barajı gibi yüksek kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda tasarım ve inşaat aşamalarında aşağıda belirtilenlere dikkat edilerek hidrolik çatlama mekanizmasının ve bu çatlama mekanizmasının yol açacağı problemlerin önüne geçilebilir:

- Kil çekirdek malzemesi ıslak tarafta sıkıştırılarak zemin malzemesine esneklik ve yoğrulma kabiliyeti kazandırılır, böylelikle çatlak oluşmasına engel olunur. Bunun yanında da hidrolik çatlama için; kuru tarafta sıkıştırılarak kabuk ile kil çekirdek arasındaki rijitlik farkı azaltılarak kemerlenmenin önüne geçilmiş olunur.

- Rezervuarın oldukça yavaş doldurulmasıyla memba yüzeyinde oluşmuş çatlakların içerisine girecek suyun kısıtılmasının önüne geçilir.
- Filtreler NEF(No Erosion Filter) testi ile performansları test edilerek çatlaklarda meydana gelen içsel erozyonun önüne geçilebilir.
- Kil çekirdek eğimli inşa edilerek kemerlenmenin oluşmasına engel olunabilir.
- Kil çekirdeğin gövde genişliği artırılabilir.
- Kil çekirdek ile kaya dolgu arasında filtreler ile geçiş zonu oluşturulabilir.

7 TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan veri ve bilgileri paylaşan Bursa DSİ 1. Bölge Müdürlüğü'ne ve çalışanlarına teşekkür ederim.

8 KAYNAKLAR

- [1] DSİ. 1986 "Çınarcık Barajı Planlama Raporu ve Paftaları", DSİ I. Bölge Müdürlüğü, Bursa.
- [2] Lo KY, Kaniaru K. 1990. "Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams". Canadian Geotechnical Journal 27: 496-506.
- [3] Lofquist, B. 1951. "Earth pressure in a thin impervious core". In 4th International Congress on Large Dams, ICOLD, New Delhi, India (Vol. 1, pp. 99-109).
- [4] Lowe J. 1970. "Recent development in the design and construction of earth and rockfill dams", Montreal, Canada, 11-23
- [5] Nobari, E. S., Lee, K. L., & Duncan, J. M. 1973. Hydraulic Fracturing in Zoned Earth and Rockfill Dams: A Report of an Investigation (No. TE-73-1). CALIFORNIA UNIV BERKELEY COLL OF ENGINEERING.
- [6] Rezaei, M. M., & Salehi, B. 2011. "The Effect of Changing the Geometry and Compaction Degree on Arching of Earth Dams". In Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering (pp. 3207-3216).
- [7] US Bureau of Reclamation 2011. Design Standads No.13 Chapter 5: Protective Filters Phase 4, Washington DC.
- [8] Wang J,. 2012. Hydraulic fracturing in Earth-Rockfill Dam, Water publication, China