

## Dolgu Barajlarda Çekme Çatlaklarının Duvarına Etkiyen Gerilmelerin Fiziksel Olarak Modellenmesi

Sadettin Topçu<sup>1</sup> , Hasan Tosun<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Mudanya Üniversitesi, Rektörlük, Bursa, Türkiye

**Öz** – Dolgu barajların güvenliği, inşaatında kullanılan malzemelerin su akımıyla taşınması olarak tanımlanan içsel erozyon ile tehdit edilmektedir. Özellikle geçirimsiz perde inşaatında kullanılan kil zeminlerde gelişen çekme çatlaklarında oluşan içsel erozyon türlerinden olan kaçak erozyon, çekme çatlaklarının derinliği ve genişliği ile ilgili hidrolik parametrelerle kontrol edilir. Ek olarak kil zeminin içsel erozyon direncini kapsayan malzeme özellikleri de göz önünde tutulur. Bu çalışmada bu kontrol faktörlerine ilave olarak çatlama sonrası çatlak duvarlarında gelişen gerilme koşullarının da dikkate alınabilmesi için dolgu barajlardaki çatlak mekanizmasından faydalanılarak yeni bir yaklaşım üretilmiştir. Bu yaklaşımın da laboratuvar koşullarında fiziksel olarak modellenmesi için nümerik analiz yardımıyla yeni bir test cihazı; Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Test Cihazı (MGÜET), tanımlanmıştır. Duvarları tam düşey ve tam yatayda olan çekme çatlaklarının çatlama sonrası duvarlarında toplam gerilme esasında oluşan asal gerilme koşulları, bu test cihazıyla laboratuvar koşullarında oluşturulabilmiştir. Dolgu barajlarda gelişen çekme çatlakları, silindirik zemin örneğinde oluşturulan dairesel bir delik ile modellenmiştir. Böylece, içi boş silindirik cisimlerin mekaniğinden faydalanılarak çekme çatlaklarının çatlama sonrası duvar gerilmeleri, dairesel deliğin duvarında gelişen gerilmeler ile açıklanabilmektedir.

### Makale Tarihi

Gönderim: 17 Ekim 2023

Kabul: 20 Aralık 2023

Yayın: 25 Haziran 2023

### Araştırma Makalesi

**Anahtar Kelimeler** – Çatlak, dolgu baraj, içsel erozyon, ansys workbench, üç eksenli gerilme

## Physical Modelling of Stresses Affecting the Walls of Tensile Cracks in Embankment Dams

<sup>1</sup>Department of Construction, Kütahya Technical Sciences Vocational School, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Rectorate, Mudanya University, Bursa, Türkiye

**Abstract** – The safety of embankment dams is threatened by internal erosion, defined as the transporting materials used in their construction by water flow. One of the types of internal erosion, such as Concentrated Leak Erosion that occurs in tension cracks that develop in clay soils used in impervious zone construction, is controlled by hydraulic parameters related to the depth and width of the tension crack. Also, material properties, including the clay soil's internal erosion resistance, are considered. This study produced a new approach by utilizing the crack mechanism in an embankment dam to evaluate the stress conditions developing in the crack walls after cracking. To physically model this approach under laboratory conditions, a new test equipment was designed with the help of numerical analysis, i.e., Modified Stress Control Triaxial Equipment (MSCTE). The principal stress conditions occurring based on total stress in the post-cracking walls of tensile cracks with fully vertical and fully horizontal walls could be created under laboratory conditions with this test equipment. Tensile cracks developing in embankment dams were modeled with a circular hole formed in a cylindrical soil sample. Thus, by utilizing the mechanics of hollow cylindrical materials, the post-cracking wall stresses of tensile cracks can be explained by the stresses developing on the wall of the circular hole.

### Article History

Received: 17 Oct 2023

Accepted: 20 Dec 2023

Published: 25 Jun 2024

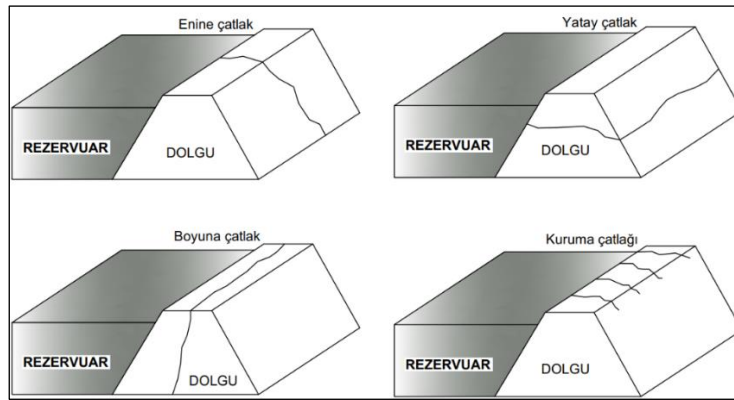
### Research Article

**Keywords** – Crack, embankment dam, internal erosion, ansys workbench, triaxial stress

<sup>1</sup>sadettin.topcu@dpu.edu.tr (Corresponding Author); <sup>2</sup>hasantosun26@gmail.com

## 1. Giriş

Dolgu barajlarda meydana gelen çatlaklar, bu toprak yapıların kısa ve uzun dönemli güvenliğini tehdit eden en önemli faktörlerden biridir. Dolgu barajlarda Lowe'a [1] göre genel olarak dört tip çatlak gelişir: enine çatlak, yatay çatlak, boyuna çatlak ve kuruma çatlakları (Şekil 1). Dolgu barajların göçmesine neden olarak ön plana çıkan çatlaklar ise memba-mansap doğrultusunda uzanıp rezervuardaki su seviyesinin altında kalan enine ve yatay çatlaklardır. Enine çatlaklarda çatlak duvarları düşey düzlemde iken yatay çatlaklarda ise çatlak duvarları yatay düzlem boyunca uzanır [2]. Dolgu barajların göçme mekanizmalarından biri olan "İçsel erozyon" kısaca dolgu inşaatında kullanılan malzemelerin sızma ve basınçlı boru akımları etkisiyle taşınması olarak tanımlanır. Yıkılan dolgu barajların %30~50'si içsel erozyon mekanizması sonucu göçmüştür [3]. İçsel erozyonun memba-mansap doğrultusunda uzanan bu çatlaklarda gelişen biçimine "kaçak erozyonu" adı verilir. Kaçak erozyonunda çatlak duvarlarındaki kohezyonlu malzeme basınçlı boru akımının etkisiyle aşınarak barajın mansabına doğru taşınır [4]. Eğer dolgu barajın çekirdeğinde kullanılan ince daneli malzeme USBR [5] ve ICOLD'da [6] belirtilen partikül tutulma, drenaj ve boşluksuz derecelendirme kriterlerine uygun bir granüler filtre ile korunursa kaçak erozyon başlangıç aşamasında durdurulur. Bu granüler filtre koruması yoksa kaçak erozyon gelişerek barajın gediklenerek göçmesine neden olur. Buna örnek olarak, homojen dolgu tipinde inşa edilen Teton Barajı'nın 5 Haziran 1976 tarihinde göçmesi gösterilebilir [7].



Şekil 1. Dolgu barajlarda görülen çatlak tipleri

Dolgu barajlarda çatlak mekanizmasını tetikleyen etkenler iki başlık halinde toplanabilir: 1) Gerilme nedenli oluşan çatlaklar, 2) Malzeme kaynaklı oluşan çatlaklar. Gerilme nedenli oluşan çatlaklar; farklı oturma, zayıf sıkıştırma, hareketli yükler, hidrolik çatlama ve sismik hareketlerden dolayı gelişebilir. Dolgu barajlar, nihai oturmalarının % 80-90'ını inşaat aşamasında tamamlar [8]. Bu nihai oturmaların tamamlanması esnasında barajın inşa edildiği vadi yamaçlarının dik ve dike yakın olması, baraj temelini yerleştirildiği taban profilinin basamaklı veya temel farklı dayanıma sahip malzemelerden oluşması durumunda farklı oturmalarından kaynaklı enine çatlaklar gelişebilmektedir [9]. Yine farklı oturma etkisiyle gerilme nedenli enine çatlaklar, baraj temel tabanının yüzey profilindeki süreksizliklerin çıkıntı şeklinde, dolgu yüksekliğinin % 3~5'ini aşacak uzunluklara sahip olması durumunda da oluşabilmektedir [10]. Bunun yanında dar tipte inşa edilmiş zonlu dolgu barajlarda, kil çekirdeğin kuru tarafta zayıf sıkıştırılması ve çekirdek genişliğinin dolgunun yüksekliğinin dörtte birinden küçük olması durumunda da gerilme nedenli çatlakların oluşabileceği belirlenmiştir [11].

Yukarıda da anlatıldığı gibi gerilme nedenli çatlakları tetikleyen faktörler olarak; dolgunun geometrisi, dolgunun inşa edildiği vadinin geometrisi ve dolguda geçirimsiz perde oluşturmak için kullanılan ince daneli zeminlerin çekme dayanımlarının düşük olması gösterilebilir. Dolgu barajlarda boyuna kemerlenme sonucunda enine çatlaklar, enine kemerlenme sonucunda ise yatay çatlaklar oluşabilmektedir [2]. Bu çatlaklar

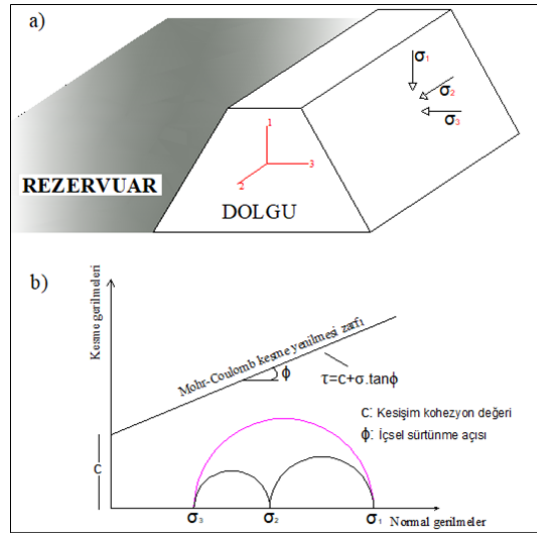
çoğu zaman hidrolik çatlama işleminin katkısıyla da oluşabilmektedir [12]. Gövde içerisine sızan suyun hidrostatik basıncıyla memba-mansap doğrultusunda uzanan mevcut çatlağın ilerlemesi veya hidrostatik su basıncıyla dolgu içerisindeki düşük gerilme zonlarında gelişen çatlama mekanizmasına “hidrolik çatlama” adı verilir [13]. Deprem kaynaklı gelişen çatlakların büyük çoğunluğu boyuna çatlaklardır. Çok az vakada nedeni bilinmemekle birlikte memba-mansap doğrultusunda uzanan çatlaklar gözlemlenmiştir [14].

Memba-mansap doğrultusunda uzanan çatlakların malzeme kaynaklı olmasının esası, geçirimsiz perdede kullanılan ince daneli zeminlerin yoğurulma kabiliyeti ile ilişkilendirilir. Dolgu inşaatında kullanılan ince daneli zeminlerin plastisite indeksinin (PI) 15’ten küçük ve dane çaplarının 0.002 mm ve 1.20 mm arasında olması çatlak oluşma riskini arttırmaktadır [15]. Yine Londe’ye [16] göre, dolgunun sıkıştırma su muhtevası ve plastisite indeksi enine çatlakların gelişmesinde ön plana çıkan iki önemli faktör olarak değerlendirilmiştir. Dolguda kullanılan ince daneli zeminlerin çatlama potansiyelinin azaltılabilmesi için genel olarak bu zeminlerin ıslak tarafta sıkıştırılması önerilmektedir. Bunun yanında birçok dolgu baraj tasarım rehberi geçirimsiz perdeyi oluşturacak zeminin plastisite indeksinin 14~15’ten büyük olmasını istemektedir.

Dolgu barajlarda kaçak erozyonu sonucu göçmeye varan durumlarla karşılaşılmasına neden olan memba-mansap doğrultusundaki çatlaklar için son yıllarda yapılan çalışmalar, sismik ve statik koşullarda gelişen çatlağın olduğu derinlik ile çatlağın genişliği arasındaki ilişkiye yoğunlaşmıştır [9,17]. Bunun yanında nümerik modellerle yardımcıyla bu çatlakların derinliğini, konumunu ve genişliğini belirleyen yaklaşımlarda vardır [18]. Daha önceki çalışmaların özellikle çatlak derinliği ve genişliği konularına eğilmesinin sebebi, kaçak erozyonunun başlamasına ve gelişmesine neden olan hidrolik parametrelerin (hidrolik eğim, akımın hızı vs..) bu verilerle hesaplanabilmesidir. Kaçak erozyonunun başlamasına etki eden faktörler, malzemelerin içsel erozyon direnci ve akımın hidrolik parametreleridir. Kohezyonlu zeminlerin içsel erozyon direncini; kuru yoğunluk-su muhtevası [19], sıkıştırma enerjisi [20], plastisite indeksi-likit limit [21] gibi fiziksel ve geoteknik karakteristikler etkilemektedir. Bunlara ilaveten, bu çalışmada; enine ve yatay çatlakların duvarlarında gelişen gerilmelerin de kaçak erozyon mekanizmasına etki eden bir faktör olduğu düşünülerek bu çatlakların duvarlarında çatlama sonrası oluşabilecek gerilmeleri belirleyecek yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımla belirlenen gerilme şartlarını laboratuvar koşullarında modellemek için yeni bir test cihazı tanımlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

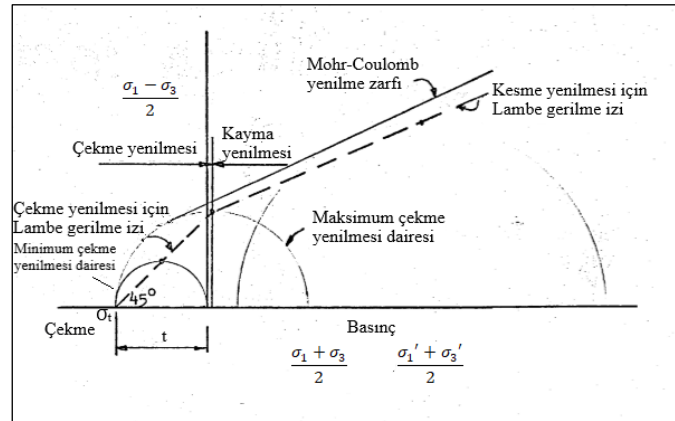
Dolgu barajlardaki enine-yatay çatlakların duvarlarında oluşan gerilme koşullarının belirlenmesi ve modellenmesinde Coulomb tarafından geliştirilen sürtünme kanununun, Otto Mohr tarafından bulunan ve Mohr daireleri ile birleştirilerek zeminlere uygulandığı Mohr-Coulomb teorisi kullanılmıştır. Mohr-Coulomb teorisinde kesme gerilmelerinin sıfır olduğu doğrultudaki normal gerilmelere asal gerilmeler adı verilir. Dolgu barajlarda maksimum asal gerilmeler ( $\sigma_1$ ) yerçekimi doğrultusunda; ortanca asal gerilmeler ( $\sigma_2$ ) baraj aksı doğrultusunda; minimum asal gerilmeler ( $\sigma_3$ ) ise baraj aksına dik doğrultuda yani memba-mansap doğrultusunda gelişirler (Şekil 2). Mohr-Coulomb’da zeminlerin kesme yenilmesi; minimum ve maksimum asal gerilmeleri birleştiren yarım daire ve zeminlerin kesme dayanımı parametreleri olan kesişim kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değeriyle belirlenen kesme yenilmesi zarfi tarafından kontrol edilir. Ortanca asal gerilmelerin zeminlerin yenilmesine bir etkisi yoktur [22].



Şekil 2. a) Dolgu barajlarda oluşan asal gerilmeler b) Mohr-Coulomb teorisi

## 2.1. Dolgu Barajlarda Çatlak Mekanizması ve Çekme Yenilmesi

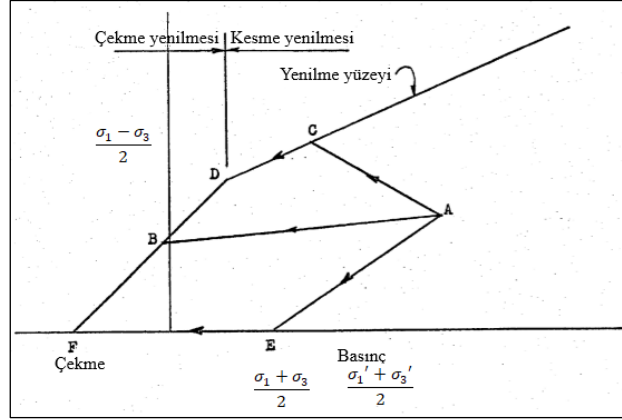
Dolgu barajlarda çatlaklar, barajın geçirimsiz perdesinde kullanılan ince daneli zeminler için gerilme temelinde çekme ve kesme çatlakları olmak üzere iki farklı şekilde gelişir. Çekme çatlaklarının gelişebilmesi için zeminin çekme dayanımının; kesme çatlaklarının gelişebilmesi için ise kesme dayanımının yenilmesi gerekir. Truscott'a [23] göre kesme yenilmesinde çekme yenilmesinde olduğu gibi suyun akabileceği bir kanalcık oluşmaz. Kesme yenilmesinde genelde örselenmiş, suyun geçişine kapalı bir göçme düzlemi oluşur. Bu nedenle dolgu barajlarda kaçak erozyonu için çekme yenilmesi sonucu oluşan çekme çatlaklarının oluş mekanizması daha kritiktir. Lambe [24], ince daneli zeminlerde kesme ve çekme yenilmeleri için Şekil 3' deki gerilme izlerini tanımlamıştır.



Şekil 3. Kesme ve çekme yenilmeleri için gerilme izi [24]

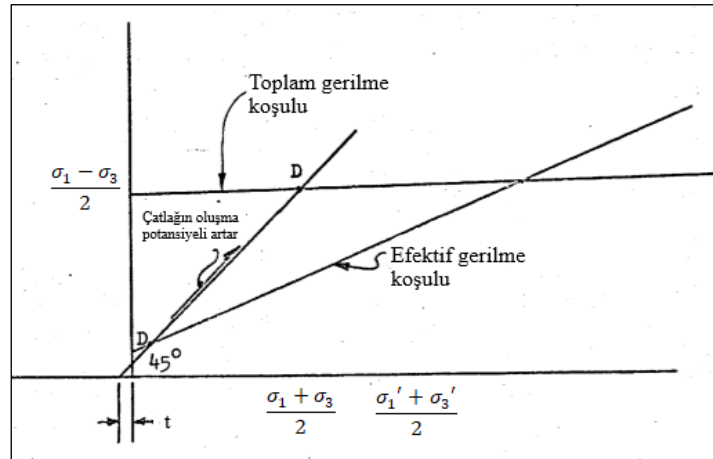
Maksimum çekme yenilmesi dairesinde çevre basıncı sıfırdan büyüktür. Bishop ve Garga [25] çevre basıncının sıfırdan büyük olması durumunda da killerde çekme yenilmesinin oluşabileceğini ifade etmişlerdir. Çekme yenilmesi için Lambe gerilme izi, zeminlerin çekme dayanımından ( $\sigma_t$ ) başlayıp minimum çekme yenilmesi dairesini oluşturan asal gerilmelerin ortalamasından geçerek maksimum çekme yenilmesi dairesini oluşturan asal gerilmelerin ortalamasında sonlanmıştır. Minimum çekme yenilmesi dairesinin çapı,  $t$  ile gösterilmektedir. Zeminlerin çekme dayanımı olan,  $\sigma_{te}$  ise ihmal edilebilecek düzeyde çok düşüktür [26]. Bu nedenle minimum asal gerilmelerin çekme gerilmeleri halinde etkimesi durumunda da muhafazakar bir yaklaşımla çekme çatlaklarının oluşabileceği kabul edilebilir. Dolguda kretten daha derinlere doğru gidildikçe enine ve boyuna kemerlenme etkisiyle düşük gerilme zonları oluşabilir. Diğer bir ifade ile düşey gerilmelerin azalmasıyla da

zeminlerin kesişim kohezyon değerine bağlı olarak çekme çatlakları oluşabilir. Fell vd. [9] dolgu barajların içsel erozyona bağlı göçmelerinin olasılıksal olarak tahmin edilmesinde dikkate alınan enine çatlakların derinliklerini hidrolik çatlamlar hariç kret seviyesinden 10 m ile sınırlandırmışlardır. Bu derinliğin altında meydana gelen enine çatlakların içsel erozyon açısından bir problem ortaya çıkarmayacağını belirtmişlerdir. Truscott [23], [24]'te verilen gerilme izlerinden yola çıkarak bir dolgu barajda meydana gelecek çekme çatlakları için oluşması gereken gerilme izlerini Şekil 4 'de göstermiştir.



Şekil 4. Çekme çatlaklarının oluşmasına neden olan gerilme izleri [23]

Zeminin başlangıç gerilme koşulları A noktasındadır. Çekme çatlaklarının oluşabilmesi için ACD, AB ve AEF gibi üç farklı gerilme izi oluşabilir. ACD gerilme izinde önce kesme yenilmesi oluşur. Daha sonra ortalama asal gerilmelerin azalmasıyla çekme çatlakları oluşur. AB gerilme izinde direk çekme çatlakları meydana gelir. AEF gerilme izinde önce; maksimum ve minimum asal gerilmelerin farkı sıfır olur (E noktası) ve daha sonra ortalama asal gerilmelerin değeri azalarak F noktasında çekme çatlakları gerçekleşir. Böyle bir durum teorikte mümkündür fakat pratikte gerçekleşmesi mümkün değildir. D noktası kesme ve çekme yenilme düzlemlerini ayıran noktadır. D noktasının yerini zeminlerin kesişim kohezyon değeri belirler. D noktasının pozitif yönde orijinden uzaklaşması kesme yenilmesi potansiyelini azaltırken çekme yenilmesi potansiyelini artırır. D noktası toplam gerilme koşullarında orijinden uzaklaşır; efektif gerilme koşullarında ise orijine yaklaşır (Şekil 5). Bundan dolayı dolgu inşaatı sırasında ve hemen sonrasında toplam gerilme koşulları hâkim olduğu için çekme çatlaklarının oluşma potansiyeli daha yüksektir. Barajın işletme sırasında ise zamanla konsolidasyon olayının gerçekleşmesiyle efektif gerilme koşulları geçerli olacağı için çekme çatlaklarının oluşma potansiyeli oldukça azalmaktadır.

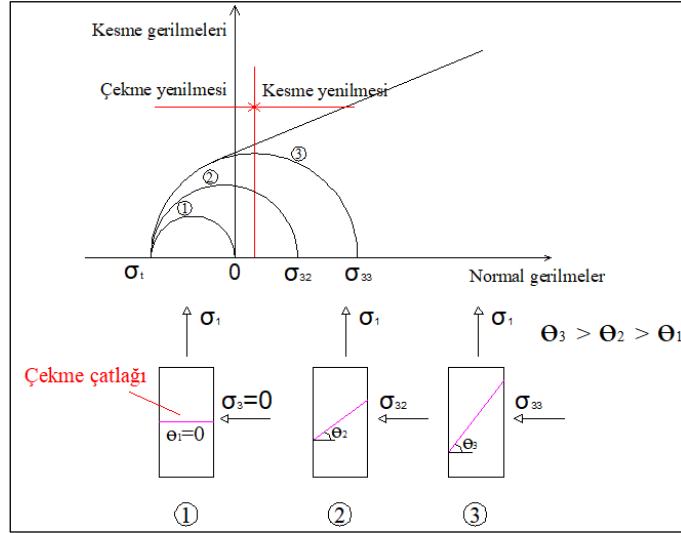


Şekil 5. Çekme çatlaklarının toplam ve efektif gerilme koşullarına göre oluşma potansiyeli [23]

### 3. Bulgular ve Tartışma

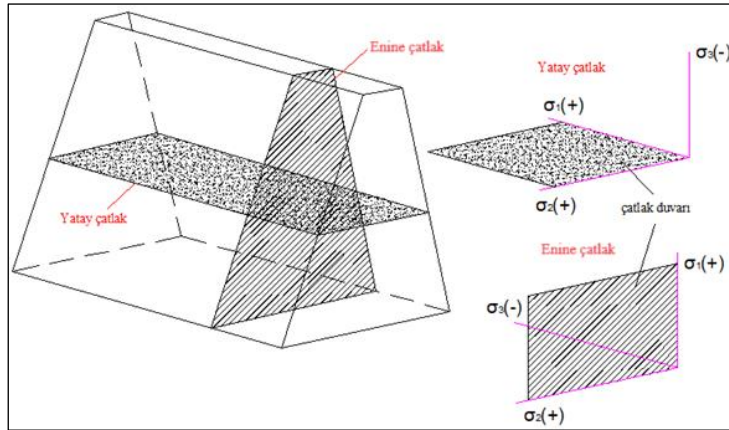
#### 3.1. Çatlak Duvarlarındaki Asal Gerilmelerin Modellenmesi

Üç eksenli gerilme koşullarında çekme çatlaklarının oluştuğu gerilme koşulları ve çatlak doğrultularının çekme gerilmesinin düzlemi ile yaptıkları açılar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Üç eksenli gerilme koşullarında çekme çatlaklarının oluştuğu gerilme koşulları

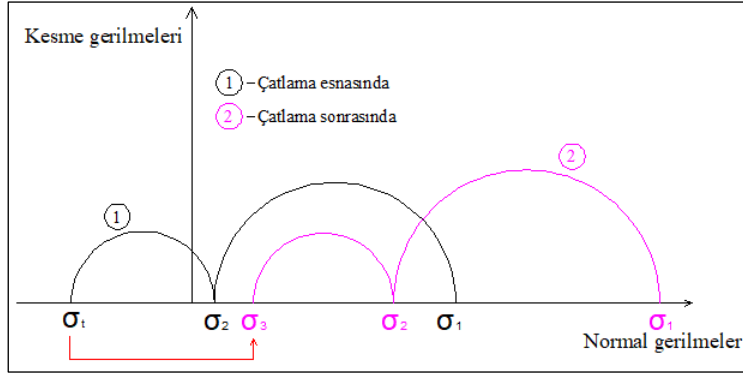
Bir dolgu barajda kret civarında düşey gerilmeler çok küçük olduğu için 1 nolu çekme yenilmesi daresi oluşabilir. Dolguda derinlik arttıkça düşey gerilmeler arttığı için sırası ile 2 ve 3 nolu çekme yenilmesi daresi ile gösterilen memba-mansap doğrultusunda uzanan diyagonal çekme çatlakları görülebilir. Çatlak duvarlarında oluşan asal gerilmelerin basitçe belirlenebilmesi için bu çalışmada  $\Theta=0^\circ$  durumu göz önünde tutulmuştur. Buna göre; dolgu barajlarda çatlak duvarları, sırasıyla tam düşeyde ve tam yatayda oluşan enine ve yatay çatlakların oluşması esnasındaki çatlak duvarlarına etki eden gerilmeler Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Dolgu barajlarda  $\Theta=0^\circ$  durumu için çatlak oluşması esnasındaki çatlakların duvarlarına etki eden gerilmeler

Dolgu barajlarda maksimum asal gerilmeler düşey düzlemde; ortanca asal gerilmeler baraj aksı düzleminde; minimum asal gerilmeler ise baraj aksına dik doğrultuda memba-mansap doğrultusunda gelişirler.  $\Theta=0^\circ$  durumu için, çatlak duvarları yatayda olan yatay çatlakların gelişebilmesi için düşey gerilmelerin; çatlak duvarları düşeyde olan enine çatlakların gelişebilmesi için ise baraj aksı doğrultusunda etki eden gerilmelerin çekme gerilmesi halinde etkimesi gerekir. Bu yönlere gerilmeler; çekme gerilmeleri halinde etkiyince doğal olarak minimum asal gerilmeler olur. Diğer iki yönde etkiyen gerilmeler ise büyüklüklerine göre maksimum

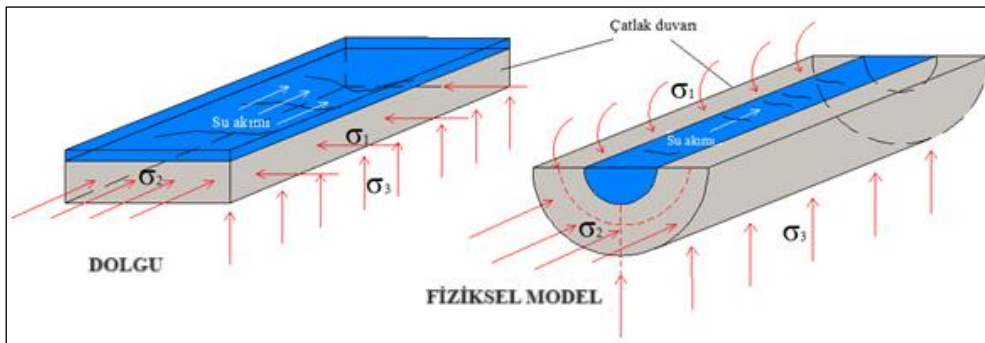
ve ortanca gerilmeler halini alır. Her iki çatlakta da akım doğrultusunda duvarlara etki eden gerilmeler memba-mansap doğrultusundaki ortanca asal gerilmelerdir. Çatlak duvarında, akım doğrultusuna dik etki eden gerilmeler ise yatay çatlakta baraj aksı doğrultusundaki gerilmelerdir. Enine çatlakta ise yerçekimi yönünde etkiyen gerilmelerdir. Bu gerilmeler çatlama esnasında maksimum asal gerilmeler olur. Truscott'a [23] göre çatlaklar aniden gelişir ve çatlak çevresindeki gerilme koşulları çatlak oluşmadan önceki durumuna geri dönmeye çalışır. Bununla birlikte Sanchez vd. [27] çatlağın oluşmasına neden olan çekme gerilmelerinin, çatlak oluşuktan sonra çatlak açıklığına ve duvarına basınç gerilmeleri halinde etkiyerek çatlağın kapanmasına (iyileşmesine) neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Buna göre, enine ve yatay çatlakların oluşması esnasındaki ve sonrasındaki çatlak duvarlarına etki eden gerilme koşulları Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Çatlakların duvarında çatlama esnasında ve sonrasında oluşan gerilme koşulları

Çatlama sonrasında yatay çatlaklarda, düşey yönde çekme gerilmeleri halinde etkiyen gerilmeler çatlak duvarına basınç olarak etkiyen minimum asal gerilmeler olur. Akıma dik doğrultuda baraj aksı doğrultusunda etkiyen gerilmeler ise maksimum asal gerilmeler olur. Akım doğrultusunda etkiyen gerilmeler ise ortanca gerilmelerdir. Enine çatlaklarda ise baraj aksı doğrultusunda çekme gerilmeleri halinde etkiyen gerilmeler, basınç olarak etkiyen minimum asal gerilmeler olur. Yatay çatlaklarda olduğu gibi akıma dik doğrultuda etkiyen düşey gerilmeler maksimum asal gerilme; akım doğrultusunda etkiyen gerilmeler ise ortanca gerilmeler olur. Her iki çatlak türü için çatlama sonrası çatlak duvarlarına etkiyen asal gerilmelerin oryantasyonu birbirinin aynısı olur.

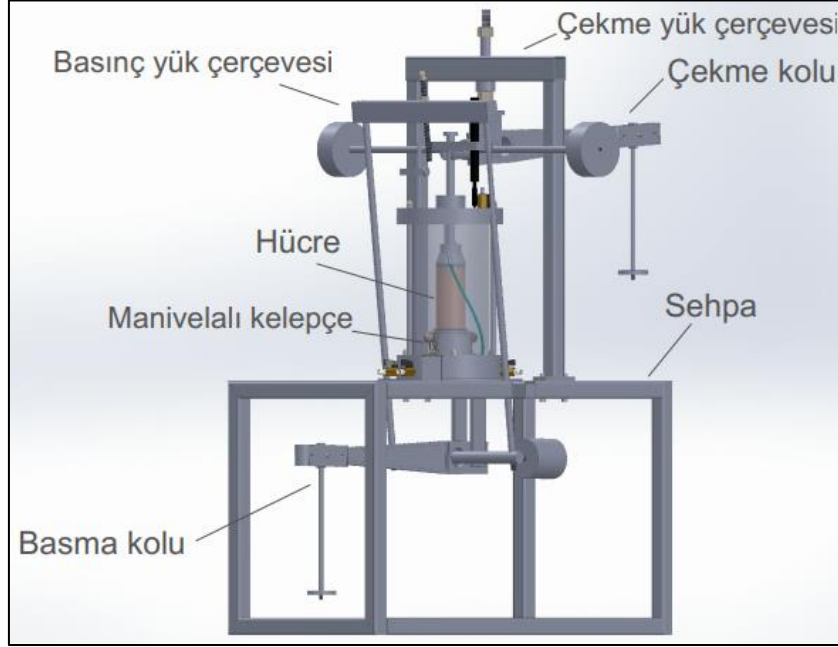
Bu çalışmada yukarıda anlatılanlar doğrultusunda; dolguda memba-mansap doğrultusunda uzanan çatlakların çatlama sonrasında duvarlarında gelişen asal gerilmeler, laboratuvar koşullarında fiziksel bir modele dönüştürülebilmesi için silindirik bir zemin örneğinde çatlağın dairesel bir delik olduğu kabulüyle Şekil 9'da olduğu gibi sunulmuştur. İçi boş silindirik bir cisme, eksenel ve çevre basınçları uygulandığında delik duvarında eksenel, teğetsel ve radyal gerilmeler oluşur [28]. Buna göre fiziksel modelde delik duvarındaki maksimum asal gerilmeler, teğetsel gerilme ( $\sigma_t$ ); ortanca asal gerilmeler, eksenel gerilme ( $\sigma_a$ ) ve minimum asal gerilmeler radyal gerilme ( $\sigma_r$ ) olmaktadır.



Şekil 9. Dolguda ve fiziksel modellemede çatlak duvarlarında gelişen asal gerilmeler

### 3.2. Yeni Test Cihazının Tanımlanması

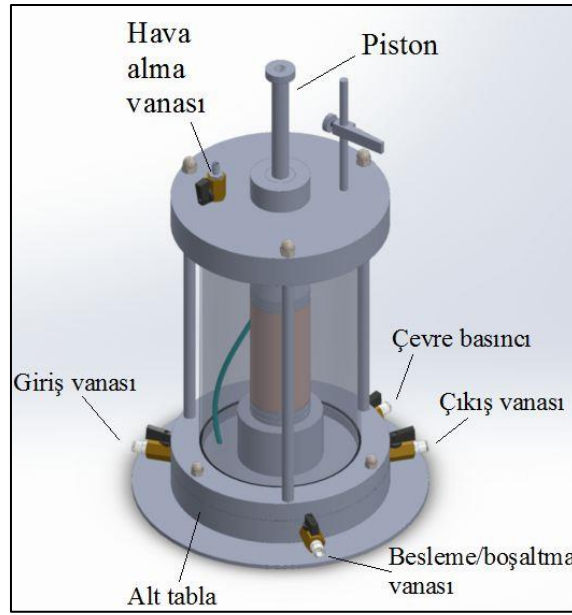
Bir önceki bölümde çatlak duvarı için anlatılan asal gerilme koşullarının; laboratuvar koşullarında anlamlı, kullanılabilir ve uyumlu bir fiziksel modele dönüştürülebilmesi için Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Test Cihazı (MGÜET) geliştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Modifiye edilmiş gerilme kontrollü üç eksenli test cihazı (MGÜET)

Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Test Cihazında zemin örneklerinde çevre basıncı oluşturmak için Yağ/su Sabit Basınç Ünitesi kullanılmıştır. Analog manometreye sahip, 1700 kPa'ya kadar çevre basıncı oluşturabilecek bir Yağ/su sabit basınç ünitesi kullanılmıştır. Çevre basıncı aynı zamanda kalibre edilmiş basınç transmitter ile data logger aracılığıyla ölçülmüştür. Zemin örneğine uygulanan üç eksenli yüklemeler sonucunda örnekte oluşan aksel şekil değiştirmeler yine data logger yardımıyla deplasman transdüseri ile monitörden takip edilmiştir. MGÜET ile zemin örneğine çevre basıncı yanında aksel doğrultuda hem çekme gerilmeleri hem de basınç gerilmeleri uygulanabilmektedir. Çekme kuvvetleri; çekme kolu ile 1:5 oranında, basınç kuvvetleri ise basınç kolu ile 1:10 oranında büyütülerek zemin örneğine aktarılmaktadır. Cihaz, basınç gerilmeleri için 50-300 kPa ve çekme gerilmeleri için ise 25-150 kPa aralıklarında çalışabilecek şekilde kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Yükleme esnasında hücrenin stabil ve hareketsiz halde kalması için hücre, iki adet manivelalı kelepçe ile alt tablaya sabitlenebilmektedir. Hücre, 70 veya 100 mm çaplı silindirik örnekler için kullanılabilen üç eksenli deney hücresidir (Şekil 11). Hücre, 1000 kPa hidrostatik basınca dayanıklı kalabilecek pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Hücrenin üzerine oturtulduğu alt tablada dört ve hücrenin üst kısmında bir adet olmak üzere toplamda beş adet vana vardır. Bu vanalardan giriş ve çıkış vanaları zemin örneğinde oluşturulan deliğe gönderilen su akımının hücreye giriş ve çıkış yaptığı noktalarda yer almaktadır. Zemin örneğinde çevre basıncı oluşturmak için hücre içerisine suyun dolumu/boşaltımı, besleme/boşaltma vanası ile yapılmaktadır. Zemin örneğine Yağ/su sabit basınç ünitesinde oluşturulan çevre basıncı, çevre basıncı vanasıyla verilmekte ve örneğe çevre basıncı verilmeden hücre içerisinde bulunan hava da, hava alma vanasıyla dışarıya atılmaktadır.





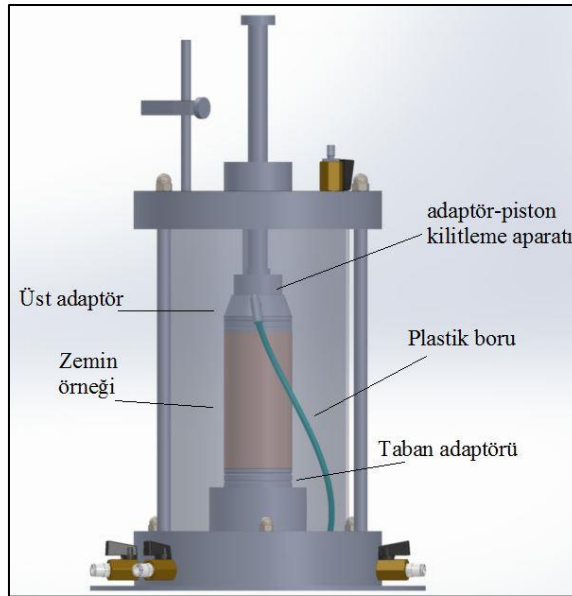
Şekil 11. Deney hücresi

Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Test Cihazı'nda yüklemeye maruz bırakılacak zemin örnekleri içi boş silindirik bir şekilde hazırlanmaktadır. Çatlak olarak kabul edilen dairesel deliğin çapı 2 mm ve akımın geçtiği bu dairesel deliğin uzunluğu 115 mm'dir. Deliğe akımın verilebilmesi için 25 mm uzunluğa ve sırasıyla 6 ve 14 mm, iç ve dış çapa sahip bir nozül yuvası bırakılmıştır. Böylelikle içi boş silindirik modelin çapı 70 mm ve toplam yüksekliği de 140 mm olarak dikkate alınmıştır (Şekil 12). Dolgu barajlarda çekme gerilmeleri esnasındaki çatlama mekanizmasının, toplam gerilme koşullarında ve kısmi doygunluk şartlarında gelişmesinden dolayı boşluk suyu basıncı ölçümlerinin alınmasına gerek duyulmamıştır. Bu nedenle, çalışma kapsamında yapılan tüm önermelerin "toplam gerilme" esnasında yapıldığı belirtilmelidir.



Şekil 12. Zemin örneği

Giriş vanasından alınan su akımının hücredeki çevre basıncından etkilenmemesi için, su akımı et kalınlığı fazla ve malzemesi sert plastik bir boru yardımıyla üst adaptörden nozüle, oradan da zemin örneğinde oluşturulan deliğe aktarılır (Şekil 13). Zemin örneğine çevre basıncı altında uygulanan aksiyel yüklerin, eksiksiz bir şekilde örneğe aktarılmasına dikkat edilmiş ve pistonun, üst adaptör ile birleşiminde kilitleme aparatı kullanılmıştır. Kilitleme aparatının üzerinde pistonun anahtar gibi tek bir yönde girebileceği bir yuva vardır. Bu yuvaya giren piston sağa veya sola 90° kadar çevrildiğinde tam bir kilitleme sağlanmaktadır.



**Şekil 13.** Hücre içerisindeki zemin örneğinin görüntüsü

Geliştirilen yeni test cihazıyla zemin örneklerinde sadece çevre basıncı etkisi altında izotropik yükleme koşulları, çevre basıncıyla birlikte çekme ve basınç kollarına konulacak ağırlık ile de sırasıyla anizotropik-genleşme ve anizotropik-sıkışma yükleme koşulları oluşturulabilmektedir. Bu yükleme koşulları altında içi boş silindirik zemin örneğinde delik duvarındaki asal gerilmeleri belirlemek için ANSYS v14. Programının Workbench modülü kullanılmış ve asal gerilmeler sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak üç boyutlu modelleme ile belirlenmiştir [29]. Fiziksel model altında, Tablo 1'deki seçilen yükleme koşulları için dört farklı zemin örneğindeki eksenel şekil değiştirmeler ölçülmüştür.  $\sigma_{1d}$ : Eksenel basınç.  $\sigma_{3d}$ : Çevre basıncı.

**Tablo 1.** Yükleme koşulları

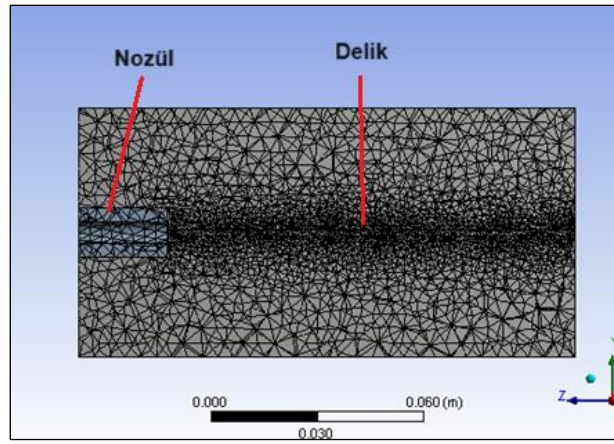
| Yükleme no. | $\sigma_{1d}$ (kPa) | $\sigma_{3d}$ (kPa) | Yükleme koşulu       |
|-------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 1           | 66.7                | 100                 | Anizotropik-genleşme |
| 2           | 100                 | 100                 | İzotropik            |
| 3           | 150                 | 100                 | Anizotropik-sıkışma  |

Lineer-elastik malzeme modeli kabulüyle, üç farklı yükleme koşulu altında dört farklı zemin örneğinin elastisite modüllerini hesaplamak için anizotropik yüklemelerde [30]'da ve izotropik yüklemelerde ise [31]'de verilen yaklaşım kullanılmıştır (Tablo 2).

**Tablo 2.** Nümerik modellemelerde kullanılan elastisite modülleri

| Yük.no. | Elastisite Modülü, E, (kPa) |         |              |                |
|---------|-----------------------------|---------|--------------|----------------|
|         | Afyon-1                     | Afyon-2 | Çatören Brj. | Kunduzlar Brj. |
| 1       | 10122                       | 17254   | 9514         | 8495           |
| 2       | 20896                       | 13333   | 18421        | 14894          |
| 3       | 12500                       | 13514   | 15576        | 16234          |

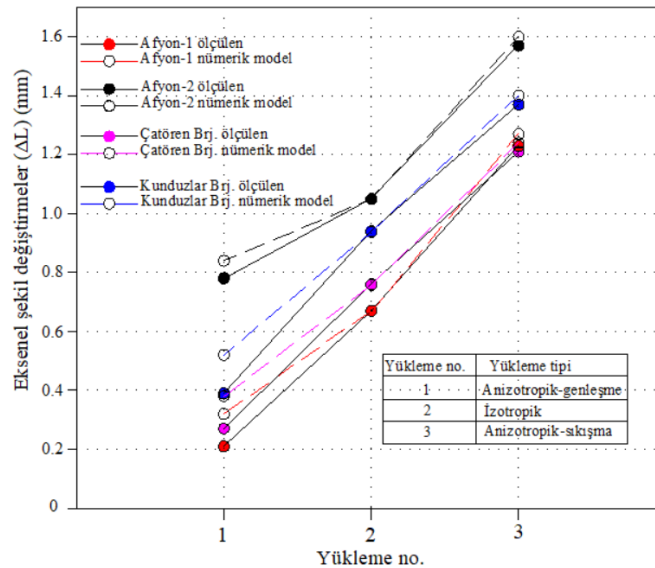
Zemin örneklerinde poisson oranı, anizotropik yüklemeler için suya doygunluk derecesine bağlı olarak Oh ve Vanapalli'ye [32] göre 0.47; izotropik yükleme için ise 0 olarak dikkate alınmıştır. Nozül yuvasının sınır koşulları, silindirik mesnet ile tanımlanmıştır. Nozülün, örnek ile temas ettiği yüzeylerin teğeti ve normali yönündeki hareketi kısıtlanmıştır. Örneğin alt yüzeyi, tüm doğrultularda deplasman ve dönmelere karşı da sınırlandırılmıştır. 130763 düğüm noktası ve 94051 dört üçgen yüzlü (tetrahedron) elemanlardan oluşan geometrik model (Şekil 14), ortalama çarpıklık ölçütüne ( $n=0.239$ ) göre mükemmel kalitede oluşturulmuştur [33].



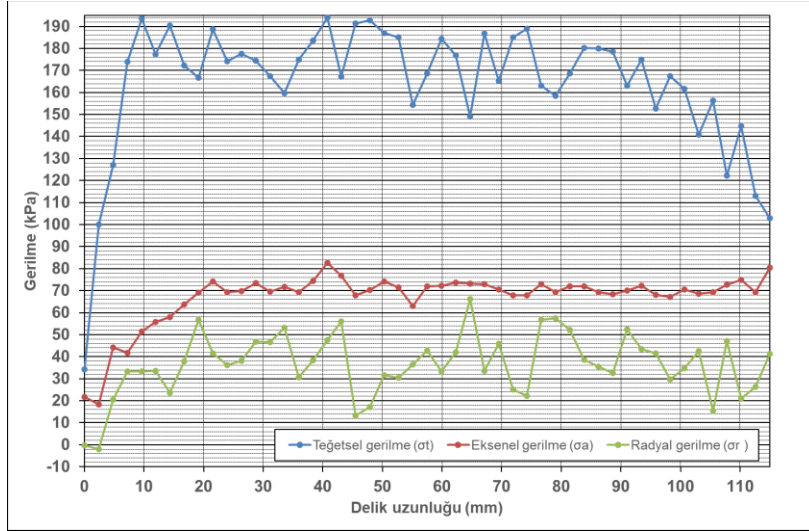
Şekil 14. Geometrik modelin boykesiti

Gerçekleştirilen analizler sonucunda seçilen üç farklı yükleme koşulunda dört farklı zemin örneği için elde edilen aksenal şekil değiştirmeler, fiziksel modelde ölçülenler ile birbirine yakındır (Şekil 15). Özellikle izotropik yükleme koşulları için tüm örneklerde nümerik analiz sonucu elde edilen şekil değiştirmeler ve deney esnasında ölçülen şekil değiştirmeler aynıdır. Buna rağmen özellikle anizotropik-genleşme yüklemesi için bu değerlerin farklılık arz ettiği görülmüştür. Bu farklılık ise anizotropik-sıkışma yüklemesi için daha az gerçekleşmiştir.

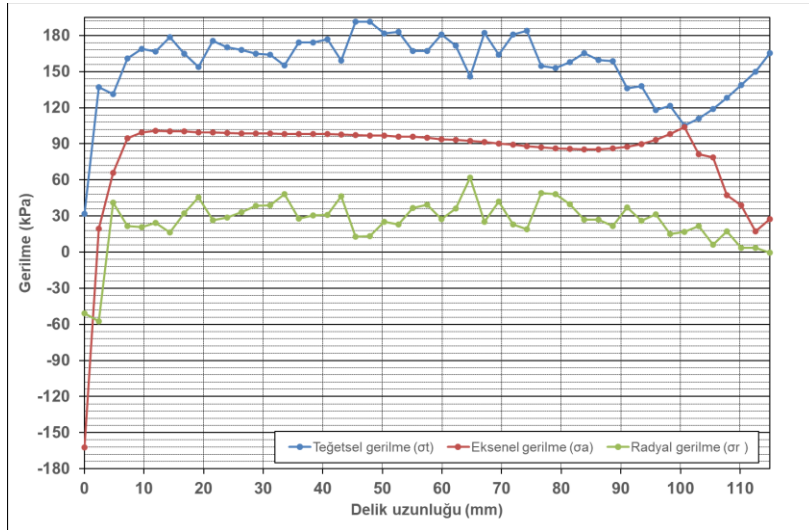
Nümerik analizlerde asal gerilmelerin delik uzunluğu boyunca değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 16-18). Bunun nedeni olarak nozül kalınlığı dışında kalıp, gerilmelerin etkiyemediği delik üst yüzey kısmının varlığı gösterilebilir. Çatlağın dairesel bir delik olarak kabul edilmesiyle modellenen asal gerilme koşulları (bkz. şekil 9) beklendiği gibi tüm yükleme koşullarında gerçekleşmiştir. Delik duvarına etki eden teğetsel gerilmeler maksimum asal gerilme; aksenal gerilmeler ortanca asal gerilme; radyal gerilmeler ise minimum asal gerilmeler olmuştur. Anizotropik-genleşme yüklemesi için aksenal ve radyal gerilmeler birbirine yakın iken, anizotropik-sıkışma yüklemesinde ise teğetsel ve aksenal gerilmeler birbirine yakın elde edilmiştir. Anizotropik-genleşme yüklemesinde deliğin nozül tarafındaki kısmında radyal gerilmeler çok küçük değerlerde de olsa çekme gerilmeleri halinde etkimektedir. İzotropik yüklemesi için aksenal ve radyal gerilmeler deliğin bu kısmında yine çekme gerilmeleri halinde etkidiği görülmüştür. Anizotropik-sıkışma yüklemesi için ise tüm gerilme değerleri deliğin nozül tarafındaki bölümünde çekme gerilmeleri halinde etkimektedir.



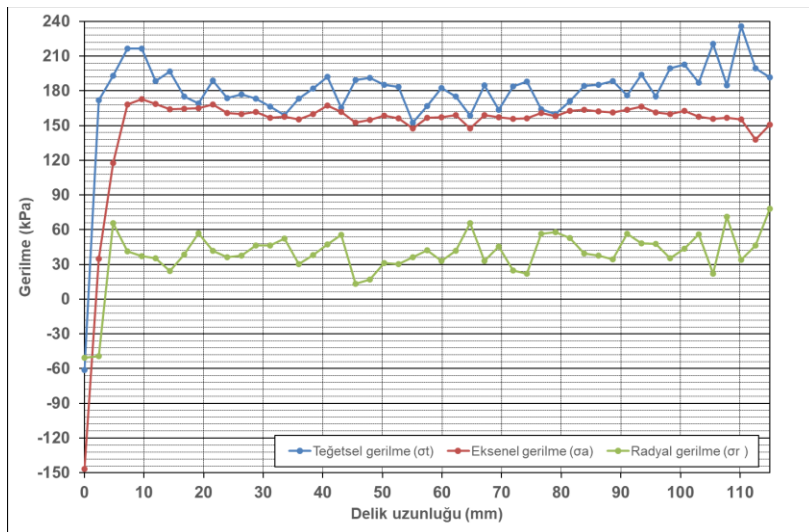
Şekil 15. Deneysel ölçülen ve nümerik modelde belirlenen aksenal şekil değiştirmeler



Şekil 16. Yükleme no.1 için nümerik analizde delik duvarı boyunca oluşan gerilmeler



Şekil 17. Yükleme no.2 için nümerik analizde delik duvarı boyunca oluşan gerilmeler



Şekil 18. Yükleme no.3 için nümerik analizde delik duvarı boyunca oluşan gerilmeler

## 4. Sonuçlar

Bu çalışmada; dolgu barajlarda çekme çatlağı olarak gelişen yatay ve enine çatlakların, çatlama sonrası duvarlarında oluşan asal gerilmeler yeni bir yaklaşımla belirlenerek, bu gerilmelerin nümerik analiz desteğiyle laboratuvar koşullarında fiziksel bir modele dönüştürülmesi için yeni bir test ekipmanı olan Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Test Cihazı (MGÜET) başarıyla tanımlanmıştır.

Çalışmadan ıkarılan sonuçlar ve öneriler özetlenmiştir: Dolgu barajlarda geçirimsiz perde olarak kullanılan kil zeminlerde içsel erozyona neden olarak göçmeye neden olacak çatlakları, silindirik zemin örneklerinde oluşturulan dairesel bir delikle modellemek mümkün olmaktadır. Çatlama sonrası çatlak duvarlarında oluşan asal gerilme koşulları ile laboratuvarda geliştirilen cihazda yüklenen zemin örneklerindeki deliğin duvarlarında gelişen asal gerilme koşulları aynı olmaktadır. Bu durumun nümerik analiz ile de sağlaması yapılmıştır. Yeni geliştirilen test cihazında izotropik, anizotropik-genleşme ve anizotropik-sıkışma yükleme koşulları; geleneksel üç eksenli test cihazındaki deplasman kontrollü yerine gerilme kontrollü bir şekilde oluşturulabilir. İzotropik yükleme koşullarında silindirik örneklerin eksenel ve radyal şekil değiştirmeleri birbirine eşit olduğundan enkesit alanları değişmemektedir. Bu nedenle bu yükleme koşulu için poisson oranı 0 olarak dikkate alınmalıdır. Yüklenen zemin örneklerindeki delikten geçirilecek su akımının hidrolik yükü, yüksekliliği ayarlanabilir taşırma kabıyla veya manometreli pompaj ile basınçlandırılarak sağlanabilir.

## Yazar Katkıları

Tüm yazarlar bu çalışmaya eşit katkı sağlamıştır. Tüm yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamıştır.

## ıkar atışması

Yazarlar hiçbir çıkar atışması olmadığını beyan etmektedir.

## Kaynaklar

- [1] J. Lowe, *Recent development in the design and construction of earth and rockfill dams*, 10th International Congress on Large Dams, Montreal, Canada, 1970, pp. 11–23.
- [2] S. Topçu, *Kil ekirdekli kaya dolgu barajlarda hidrolik çatlama potansiyelinin tahmin edilmesi*, DSI Teknik Blten 125 (2017) 1–7.
- [3] M. Foster, R. Fell, M. Spannagle, *The statistics of embankment dam failures and accidents*, Canadian Geotechnical Journal 37 (5) (2000) 1000–1024.
- [4] S. Topçu, *Comparative analysis of internal erosion behaviour for fine grained soils under different stress state*, Doctoral Dissertation Eskişehir Osmangazi University (2021) Eskişehir.
- [5] United States of Burea of Reclamation (USBR), Design Standard No. 13. Embankment Dams, Protective Filters (2011), <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/designstandards-datacollectionguides/finals-pdfs/DS13-5.pdf>, Accessed 17 Oct 2023.
- [6] International Comission of Large Dams (ICOLD), Bulletin No. 95: Embankment Dams: Granular Filters and Drains – Review and Recommendations, Paris, 1994.
- [7] H. Tosun, S. Topçu, *Toprak Dolgu Barajlarda Hidrolik atlama*, *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Gvenliği Sempozyumu*, Elazığ, 2014, pp. 519–530.
- [8] G. Hunter *The deformation behaviour of embankment dams and landslides in natural and constructed soil slopes*, Doctoral Dissertation The Universty of New South Wales (2003) Australia.

- [9] R. Fell, M. A. Foster, J. Cyganiewicz, G. L. Sills, N. D. Vroman, R. R. Davidson, Risk analysis for dam safety: a unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping, URS Australia, Sydney, 2008.
- [10] Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Jukla Sekundaerdam Lkkaasjer, Reparasjoner, Pavingning av erosjonskanaler Gjennom Tetningskjernen, Internal Report 53600-1, Oslo, 1984.
- [11] H. Bui, R. Fell, C. Song, Two and Three Dimensional Numerical Modelling of the Potential for Cracking of Embankment Dams during Construction, UNICIV Report 426, The University of New South Wales (2004) Sydney.
- [12] J. G. Zhu, J. J. Wang, *Investigation to arching action and hydraulic fracturing of core rock-fill dam*, Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering New Developments in Dam Engineering, Nanjing, 2004, pp. 1171–1180.
- [13] J. J. Wang, Hydraulic Fracturing in Earth-Rock Fill Dam, Water Publication of China, China, 2012.
- [14] S. Pells, R. Fell, Damage and Cracking of Embankment Dams by Earthquakes and the Implications for Internal Erosion and Piping, University of New South Wales, 2002.
- [15] J. L. Shrerard, Influence of Soil Properties and Construction Methods on the Performance of Homogeneous Earth Dams, USBR Tech Memo No.645, Denver, 1953.
- [16] P. Londe, La fissuration des Nouveaux. Proc. 10th ICOLD, Montreal, vol. IV, 1970.
- [17] F. C. Fong, W. J. Bennett, *Transverse cracking in earth dams due to earthquakes*, Proc. Western Regional Conference, American Society of State Dam Safety Officials, Red Lodge, 1995.
- [18] K. He, C. Song, R. Fell, *Numerical modelling of transverse cracking in embankment dams*, Computers and Geotechnics 132 (2021) 104028.
- [19] V. N. Nguyen, J. R. Courivaud, P. Pinettes, H. Souli, J. M. Fleureau, *Using an improved jet-erosion test to study the influence of soil parameters on the erosion of a silty soil*, Journal of Hydraulic Engineering 143 (8) (2017) 04017018.
- [20] B. Burns, G. S. Ghataora, *Internal erosion of kaolin*, in A. J. Puppala, N. Hudyma, W. J. Likos (Eds.), Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization, Colorado, 2007, 1–8.
- [21] H. J. Gibbs, *A Study of erosion and tractive force characteristics in relation to soil mechanics properties*, U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Colorado, Report No. EM-643, 1962.
- [22] M. A. Tekinsoy, Zeminlerde kırılma ve denge (Mukavemet’de odömetre tekniği), Şırnak Üniversitesi Yayınları, Şırnak, 2018.
- [23] E. G. Truscott, *Behaviour of embankment dams*, Doctoral Dissertation University of London (1977) London.
- [24] W. T. Lambe, *Stress path method*, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 93 (6) (1967) 309–331.
- [25] A. W. Bishop, V. K. Garga, *Drained tension tests on London clay*, Geotechnique 19 (2) (1969) 309–313.
- [26] F. H. Kulhawy, T. M. Gurtowski, *Load transfer and hydraulic fracturing in zoned dams*, ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division 102 (9) (1976) 963–974.
- [27] R. L. Sanchez, A. I. Strutynsky, M. L. Silver, *Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using the laboratory triaxial erosion test procedure (No. WES/TR/GL-83-4)*, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab, 1983.
- [28] W. Fairbairn, Two lectures, on the construction of boilers, and on boiler explosions, with the means of prevention: Delivered before the Leeds’ Mechanics’ Institution, April 23 and 24, 1851: also a paper on

the consumption of fuel and prevention of smoke, read before the British association for the advancement of science, Simpkin, Marshall, and Co., 1851.

- [29] T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto, *Engineering analysis with ANSYS software*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [30] M. H. Farzin, R. J. Krizek, R. B. Corotis, *Evaluation of modulus and poisson's ratio from triaxial tests*, Transportation Research Record 537 (1975) 69–80.
- [31] J. L. Briaud, *Introduction to soil moduli*, Geotechnical News 19 (2) (2001) 54–58.
- [32] W. T. Oh, S. K. Vanapalli, *Relationship between Poisson's ratio and soil suction for unsaturated soils*, 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils Bangkok, Thailand, 2011, 239–245.
- [33] M. Ozen, *Mesh Metric Spectrum Quality, California*, Journal of Physics of Fluid 48 (2012) 236–267.