

## BETON AĞIRLIK BARAJLARIN KIRILMA MEKANİĞİ PRENSİPLERİYLE ANALİTİK İNCELENMESİ

Ragıp İNCE

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ  
e-mail: rince@firat.edu.tr

### ÖZET

Beton ağırlık barajlarda, hidrasyon ısı, rötre, aşırı iklimsel değişiklikler, birleşim bölgelerindeki zayıf bağlantılar, sınırlandırılmış deformasyonlar, hacim değişiklikleri ve sismik yüklemelerden dolayı çatlaklar oluşabilmektedir. Çatlamış bir yapı, ancak kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir. 1980'lere kadar yapılan deneysel çalışmalar, Lineer Elastik Kırılma Mekanizmasının (LEKM) beton gibi yarı-gevrek malzemelerde geçersiz olduğunu gösterdi. Bunun sebebi çatlağın gerisinde büyük yer işgal eden ve gerilme transferini mümkün kılan aşırı çatlaklı Kırılma Süreci Bölgesinin (KSB) varlığıdır. Bu sebeple şartnameler ve araştırmacılar tarafından lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları geliştirilmiştir. Ancak baraj gibi kütle betonlarda, KSB ihmal edilebilecek seviyede küçük olduğundan LEKM kanunları bu tip yapılarda geçerlidir. Sunulan çalışmada, gövde ağırlığı, hidrostatik yük ve çatlak bölgesinde kaldırma kuvvetine maruz çatlaklı üçgen beton ağırlık barajlar, LEKM e göre analitik olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış ve müspet sonuçlar elde edilmiştir.

### ABSTRACT

The cracks in dam concrete may be occurred due to some effects such as heat of hydration, creep, excessive change of climate, volumetric change and earthquake. A cracked structure can be well investigated by fracture mechanics. The experimental studies on fracture mechanics of concrete until 1980s revealed that classical linear elastic fracture mechanics (LEFM) was invalid for quasi-brittle materials such as concrete. This inapplicability of LEFM is due to existence of an inelastic zone with large scale and full cracks in front of the crack tip in concrete. This so-called fracture process zone is ignored by LEFM. For this reason, many non-linear fracture models have been developed by design codes and investigators. However, LEFM can be used in mass concrete such as dam. In this study, the cracked triangular dams subjected to dead load, reservoir load and full uplift pressure were investigated according to LEFM, theoretically. The results of analysis look viable and very promising.

## 1. GİRİŞ

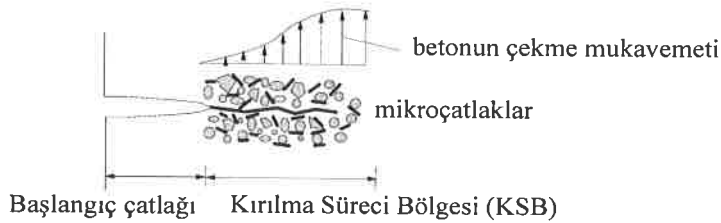
Beton ve betonarme yapıların göçme analizi için birçok lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak özellikle sismik yüklemelere maruz beton/betonarme yapılarda göçme meydana gelmeden taşıyıcı sistemlerde yerleşen çatlak veya çatlaklar oluşabilmekte ve malzeme yumuşama adı verilen mukavemet kaybına uğrayabilmektedir. Çatlamış bir yapı, ancak kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde analiz edilebilir.

Kırılma mekaniği 1920 lerde Griffith [1] tarafından ilk olarak ortaya atılmış ve II. Dünya savaşında meydana gelen feci mühendislik kazaları sonucu bu konuya olan ilgi artmıştır. 1950 li yıllarda metallere ve 1960 lı yıllarda betona uygulanan Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kavramları ile birçok mühendislik problemine çözüm getirilmiştir [2-3]. Ancak 1970 li yıllarda deneysel ve teorik alandaki gelişmeler, betonda neme ve zamana bağlı olarak elastik sabitlerin değişimi ve bünyesel kusurlardan dolayı meydana gelen boyut etkisi, LEKM kanunlarının betonda yetersiz olduğunu göstermiştir [4]. Bu amaçla birçok araştırmacı tarafından teknolojik ve nümerik alanlardaki gelişmelere paralel olarak, lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları geliştirilmiştir.

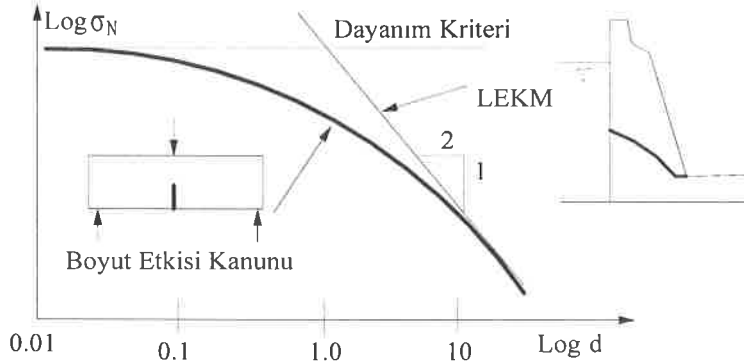
Bu yaklaşımlar temelde, Şekil 1 de görüldüğü gibi, çatlamış bir beton kesitte gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesinin (KSB) varlığını dikkate alırlar. Yapı şartnameleri ve LEKM tarafından ihmal edilen bu bölge, metallerde plastik bölgenin yanında çok küçük olmasına karşın, betonda 100 mm'nin üzerinde değerler alarak büyük yer işgal ederler [5]. Diğer taraftan bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölgeden farklı olarak sabit kalmayıp azalmaktadır. Davranış ve güvenliği olumsuz etkileyen bu gerilmedeki düşüşün sebebi büyük olasılık ile boyut etkisidir [6].

Boyut etkisi kabaca, geometrik olarak benzer numunelerde nominal dayanım (Kırılma yükünün kesit alanına oranı) ile numune boyutu arasındaki negatif eğimli ilişki olarak tanımlanabilir. Bu etki sünek malzemelerde de görülmesine karşın, gevrek malzemelerde çok daha belirgindir [6].

Bazant [7], maksimum yükte çatlakın ilerlemesi sonucu serbest kalan şekil değiştirme enerjisi ile çatlamış beton yüzey tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit denge bağıntısını boyut analizi yardımı ile kurarak kendi adı ile anılan, Boyut Etkisi Kanununu geliştirmiştir. Lineer olmayan kırılma mekaniğinin temeli olarak kabul edilen bu kanun, Şekil 2 de görüldüğü gibi, küçük yapılarda sünek malzemelerde geçerli olan klasik teoriye (dayanım veya akma kriteri) büyük yapılarda ise gevrek malzemelerde kullanılan LEKM teorine asimptotik davranış sergilemektedir. Uygulamadaki mühendislik yapıları bu iki kriter arasında kalırken, baraj gibi büyük boyutlu yapılarda, KSB nin boyutu 700 mm civarında olabildiğinden ve bu değer yapı boyutunun yanında relatif olarak küçük olduğundan dolayı şüphesiz LEKM kanunlarının kullanılabilceği sonucuna varılabilir [8].



Şekil 1. Betonda kırılma süreci bölgesi ve gerilme dağılımı



Şekil 2. Beton yapılarda Boyut Etkisi Kanunu

Beton ağırlık barajlarda çeşitli sebeplerden dolayı çatlaklar oluşabilmektedir. İlk olarak Chappell ve Ingraffea [9] Fontana barajını ayrıık çatlak yaklaşımı kullanarak LEKM prensiplerine göre analiz etmişlerdir. Ardından Ingraffea ve Saouma [10] çatlamış barajlarda kırılma mekaniği prensiplerinin kullanımı üzerine bir tartışma oluşturmuşlardır. Linsbauer [11], sayısal yöntemler kullanarak farklı açılarda çatlak içeren trapez numunelerde birimsiz gerilme şiddet çarpanı fonksiyonunu elde ederek LEKM prensiplerine göre beton ağırlık barajların analizini yapmış ve pratikte kullanılabilecek bir abak önermiştir. Ayari ve Saouma [12] ayrıık çatlak yaklaşımı kullanarak beton ağırlık barajların kırılma mekaniği tabanlı sismik analizini yapmıştır. Kumar ve Nayak [13], sonlu elemanlar yöntemi kullanarak farklı geometrilere sahip beton ağırlık barajlarda, temel ve baraj gövdesinin rijitliklerini değiştirerek çatlak gelişimini incelemiştir. Lohrasbi ve Attarnejad [14], kohezif ve ayrıık çatlak yaklaşımı kullanarak beton ağırlık barajlarda çatlak yayılımını araştırmışlardır.

Görüldüğü gibi, beton ağırlık barajların çatlak analizinde, nümerik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Sunulan çalışmada, statik yüklemeler altındaki (burada sadece hidrolik basınç ve barajın kendi ağırlığı dikkate alınmıştır) üçgen enkesitli beton ağırlık barajlar, LEKM e göre analitik olarak incelenmiştir. Bu amaçla ilk önce, klasik elastisite teorisine göre kusursuz üçgen ağırlık barajlar incelenmiş ve ardından klasik teoriden elde edilen gerilme bağıntıları kullanarak kusurlu (çatlaklı) barajlar LEKM prensipleri kullanarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla [11, 15] karşılaştırılmış ve müspet sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla ihmal edilen, kesme modu (Mod II) bu çalışmada dikkate alınarak, ağırlık barajların çatlak analizi için Linsbauer [11] tarafından önerilen abak analiz sonuçlarına göre yeniden düzenlenmiştir.

## 2. ÇATLAMIŞ BETON AĞIRLIK BARAJLARIN LİNEER ELASTİK ANALİZİ

Beton ağırlık barajlarda, hidrasyon ısı, rötre, aşırı iklimsel değişiklikler, yapı birleşim bölgelerindeki zayıf bağlantılar, çentik ve köşe birleşimlerde yetersiz tasarımlar, sınırlandırılmış deformasyonlar, hacim değişiklikleri ve sismik yüklemelerden dolayı çatlaklar oluşabilmektedir [11]. Kırılma mekaniğine göre, çatlamış bir yapının analizini yapabilmek için, ilk önce çatlaksız yani kusursuz yapının davranışının bilinmesi gerekir. Sonuç olarak, kusursuz yapıda oluşan gerilmeler kullanılarak, süperpozisyon kuralı gereğince çatlaklı barajın LEKM bağıntıları hesaplanabilir.

## 2.1. Beton Ağırlık Barajların Elastisite Teorine Göre Analizi (Kusursuz Yapı)

Bir x-y düzlem elastisite problemi,  $\Phi(x,y)$  Airy gerilme fonksiyonu adı verilen ve aşağıda tanımlanan biharmonik denklemin sınır-değer problemi olarak ifade edilebilir.

$$\Delta\Delta\Phi = \frac{\partial^4\Phi(x,y)}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4\Phi(x,y)}{\partial x^2\partial y^2} + \frac{\partial^4\Phi(x,y)}{\partial y^4} = 0 \quad (1)$$

Problemın gerilme bileşenleri, Airy gerilme fonksiyonundan İfade (2) deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial y^2} - Xx \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial x^2} - Yy \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial x\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

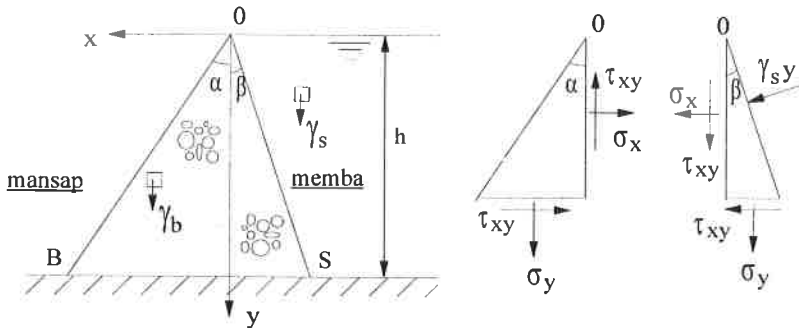
Burada  $X$  ve  $Y$  sırasıyla x ve y yönündeki kütle kuvvetleridir. Şekil 3 te detaylandırılan üçgen tipli beton ağırlık barajın elastisite teorisine göre hesabı için, 3. dereceden bir Airy gerilme fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir [16].

$$\Phi(x,y) = \frac{1}{6}Ax^3 + \frac{1}{2}Bx^2y + \frac{1}{2}Cxy^2 + \frac{1}{6}Dy^3 \quad (3)$$

İfade (3) levha denklemini gerçekler ve 0B (yüksüz) ve 0S (hidrostatik yük) sınırları üzerinde tanımlanan sınır şartlarını sağlaması gereken İfade (4) teki gerilme bileşenlerini verir.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial y^2} = Cx + Dy \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial x^2} - \gamma_b y = Ax + (B - \gamma_b)y \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2\Phi(x,y)}{\partial x\partial y} = -(Bx + Cy) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ve  $D$  Şekil 3 te görülen 0 noktası civarında alınan küçük üçgen elemanların dengesinden hesaplanabilen katsayılarıdır. İfade (4) te  $\gamma_b$  ve  $\gamma_s$  sırasıyla betonun ve suyun birim hacim ağırlıklarıdır. Bu katsayılar  $m=\text{tg}\alpha$  ve  $n=\text{tg}\beta$  olmak üzere İfade (5) te verilmiştir.



Şekil 3. Tipik bir beton ağırlık barajın karakteristikleri ve 0 noktasında gerilme elemanları

$$\begin{aligned}
A &= (m-n) \frac{\gamma_b}{(m+n)^2} + (n^2 + 3mn - 2) \frac{\gamma_s}{(m+n)^3} \\
B &= 2mn \frac{\gamma_b}{(m+n)^2} + (-2m^2n + m - n) \frac{\gamma_s}{(m+n)^3} \\
C &= -mn(m-n) \frac{\gamma_b}{(m+n)^2} + mn(m^2 - mn + 2) \frac{\gamma_s}{(m+n)^3} \\
D &= -2m^2n^2 \frac{\gamma_b}{(m+n)^2} + m^2(2mn^2 - m - 3n) \frac{\gamma_s}{(m+n)^3}
\end{aligned} \tag{5}$$

## 2.2. Kusurlu (Çatlamış) Beton Ağırlık Barajların LEKM Tabanlı Analizi

İki boyutlu çatlaklı bir yapıda, kusursuz yapılarda kullanılan İfade (1) ve İfade (2) yine geçerlidir. Çatlak ucu civarındaki singüler gerilme dağılımı lineer elastik çözümden bulunabilir. LEKM de çatlak ucundaki gerilme singülaritesini tanımlamak için, gerilme şiddet çarpanı adı verilen kavramdan faydalanılır. Gerilme şiddet çarpanı  $K_I$ , çatlak uzunluğunun kareköküyle  $\sqrt{a}$  ve nominal gerilme  $\sigma_N$  ile doğru orantılıdır.

$$K_I = \sigma_N \sqrt{\pi a} Y_1(g, p) \tag{6}$$

Burada  $Y_1$  yapının şekil faktörü olup yapı geometrisine ( $g$ ) ve yükleme ( $p$ ) şartlarına bağlıdır. LEKM e göre  $K_I$  kritik durumda  $K_{Ic}$  malzeme parametresine erişmekte ve çatlak ani olarak yayılmaktadır. İfade (6) daki  $K_I$  çekme modu (Mod I) için geçerlidir ve birçok yapıda etkin durumdur. Bununla beraber sunulan çalışmada, kesme modu da (Mod II) dikkate alınmıştır. Kesme modu için gerilme şiddet çarpanı  $K_{II}$ , aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$K_{II} = \tau_N \sqrt{\pi a} Y_2(g, p) \tag{7}$$

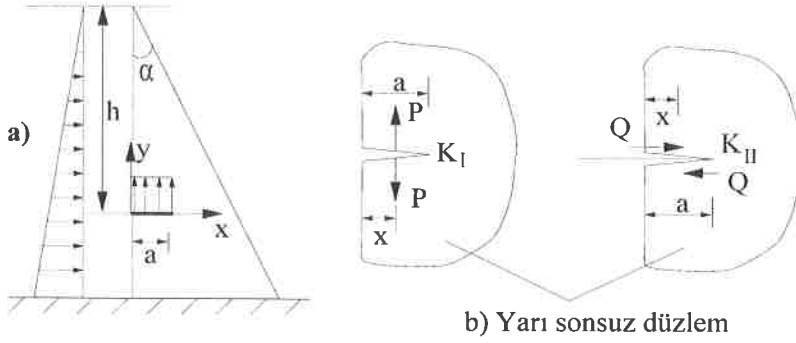
Burada  $\tau_N$  nominal kayma gerilmesi ve  $Y_2$  mod II durumuna ait şekil faktörüdür. Belirli geometriler için  $Y_1$  ve  $Y_2$  şekil faktörleri LEKM el kitaplarından bulunabilir [17].

Sunulan çalışmada, Şekil 3 de verilen tipik beton baraj gövdesi,  $\beta=n=0$  durumu için modellenmiştir. Bu durum için, çatlamış bir baraj gövdesi, Şekil 4a da görülen yatay hidrostatik basınç ve çatlak boyunca etkiyen kaldırma kuvvetine maruzdur. Bu kuvvetlere maruz kalan baraj, kendi ağırlığı ile dengede kalmaya çalışmaktadır. Böyle bir baraj gövdesi ve yükleme durumu için LEKM kaynaklarında [17]  $Y_1$  ve  $Y_2$  şekil faktörleri direkt olarak bulunmamaktadır. Ancak Şekil 4b deki tekil yüklü konfigürasyonlar kullanılarak (ki bunlar Green fonksiyonları kullanılarak elde edilirler), yükün etkidiği sınırlar üzerinden alınan integraller yardımıyla bu değerler elde edilebilir.

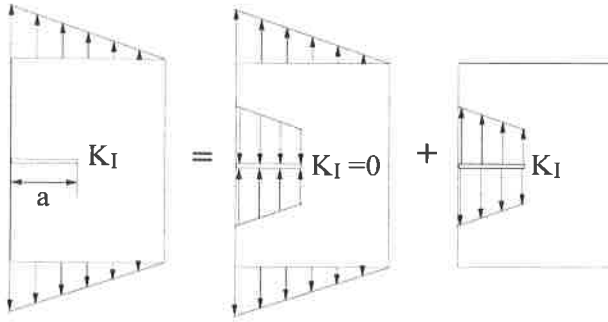
Şekil 4b deki tekil yüklü yarı sonsuz düzlem probleminde, Mod I ve Mod II durumları için gerilme şiddet çarpanının değerleri, İfade (8) deki gibi tanımlanabilir [17].

$$\begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} \frac{(1.3 - 0.3(x/a)^{5/4})}{\sqrt{1 - (x/a)^2}} \tag{8}$$

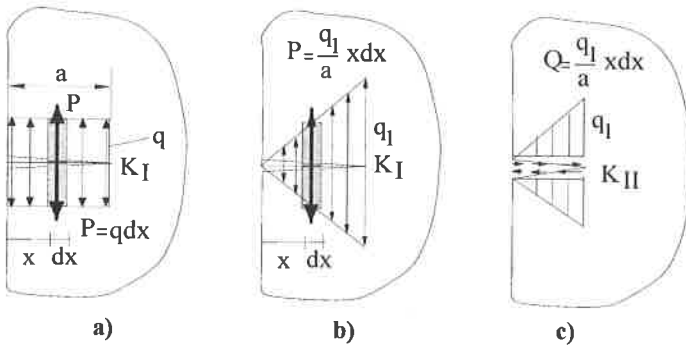
Baraj gövdesine etkiyen hidrostatik basınçtan dolayı, hem Mod I ve hem de Mod II durumları oluşur. Diğer taraftan çatlak yüzeyinde oluşan kaldırma kuvveti ve baraj gövdesinin ağırlığından dolayı, sadece Mod I durumu meydana gelecektir. Gövde ağırlığı ve hidrostatik basınçtan dolayı çatlak kesitinde oluşan gerilmeler İfade (4) ve İfade (5) ten hesaplanabilir. Bu gerilmelerden oluşan gerilme şiddet çarpanlarının değerleri ( $K_I$  ve  $K_{II}$ ) Şekil 5 te tanımlanan süperpozisyon prensibiyle bulunabilir.



**Şekil 4. a)** Tipik bir çatlamış beton ağırlık barajda hidrostatik kuvvetler  
**b)** Yarı sonsuz düzlemde tekil kuvvetlere maruz sınır çatlak problemleri



**Şekil 5.** Gerilme şiddet çarpanının hesabında süperpozisyon kuralı



**Şekil 6.** Yayılı yükleme durumları için gerilme şiddet çarpanının hesabı

Şekil 4 ve Şekil 5 ten görülebileceği gibi, barajın çatlak seviyesinde meydana gelen gerilmeler, aslında Şekil 6 da tanımlanan tekil yüklü konfigürasyonların çatlak düzlemi üzerinde alınan integrallerle hesaplanabilir. Çatlak seviyesinde oluşan kaldırma kuvvetinden dolayı çatlak yüzeyinde sadece düzgün yayılı yüklenme durumu meydana gelecektir. Diğer taraftan, baraj gövdesinin ağırlığından dolayı çatlakta basınç olarak etkiyecek gerilmeler, çatlak ucuna doğru azalan trapez yüklenme durumu meydana getirecektir. Benzer olarak barajın memba kısmında oluşan hidrostatik basınçtan dolayı, çatlak seviyesinde yine çatlak ucuna doğru azalan ancak bu sefer çekme gerilmelerinden müteşekkil trapez gerilme durumu oluşacaktır. Ayrıca hidrostatik basınçtan dolayı, İfade (4) ve İfade (5) ten çatlak ağzında sıfır ve çatlak ucuna doğru gittikçe artan üçgen yüklenme tipinde kayma gerilmeleri meydana gelecektir. Sonuç olarak, çatlak seviyesinde normal gerilmeler, Şekil 6a ve 6b deki düzgün yayılı yüklenme ve üçgensel yüklemelerin süperpozisyonuyla rahatlıkla bulunabilir.

Çatlak kesitinde kusursuz baraj gövdesinde ağırlıktan dolayı oluşan gerilme, barajın boş olması durumu için İfade (4) ve İfade (5) te  $\gamma_s=0$  alınarak belirlenebilir. Benzer olarak, hidrostatik basınçtan dolayı çatlak kesitinde oluşan gerilme değerleri, İfade (4) ve İfade (5) te  $\gamma_b=0$  alınarak hesaplanabilir. Sonuç olarak, İfade (8) in Şekil (6) ta tanımlanan şekliyle düzgün yayılı ve üçgensel yüklemelerden oluşan gerilme şiddet çarpanlarının ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K_I = \frac{2q}{\sqrt{\pi a}} \int_0^a \frac{(1.3 - 0.3(x/a)^{1.25}) dx}{\sqrt{1 - (x/a)^2}} \quad (9)$$

$$K_{I}, K_{II} = \frac{2q_1}{a\sqrt{\pi a}} \int_0^a \frac{(1.3 - 0.3(x/a)^{1.25}) x dx}{\sqrt{1 - (x/a)^2}}$$

İfade (9) da verilen integraller gerekli dönüşümler yapılarak aşağıda tanımlanan Beta fonksiyonu yardımıyla bulunabilir:

$$B(m, n) = \int_0^1 x^{m-1} (1-x)^{n-1} dx = \frac{\Gamma(m)\Gamma(n)}{\Gamma(m+n)} \quad (10)$$

Burada  $\Gamma$  Gamma fonksiyonudur. Sonuç olarak, düzgün yayılı ve üçgensel yüklemelerden oluşan gerilme şiddet çarpanlarının formülleri İfade (10) da sırasıyla verilmiştir.

$$K_I = 1.122q\sqrt{\pi a} \quad (11)$$

$$K_{I}, K_{II} = 0.683q_1\sqrt{\pi a}$$

Ancak yukarıda hesaplanan gerilme şiddet çarpan değerleri, yarı sonsuz düzlem levhalar için geçerlidir. Bununla beraber sonlu levha boyutları, çatlak ucu gerilme alanını etkiler. Ayrıca baraj gövdesi belirli bir açıda değişmektedir. Sınır çatlaklı birçok mühendislik probleminde, sonlu boyutun etkisini dikkate almak için,  $1/(1-a/d)^{1.5}$  çarpanı kullanmak yeterli yaklaşım sağlamaktadır [17] (burada  $d$  çatlak seviyesindeki baraj gövdesinin genişliğidir). Burada yapılan hesaplamalarda, İfade (11) için  $1/(1-a/d)^{1.5}$  çarpanını kullanmak kaydıyla  $a/d \leq 0.15$  durumları için kabul edilebilir sınırlar içerisinde probleme yeterli yaklaşım sağladığı gözlenmiştir.  $a/d > 0.15$  durumları için ise, çatlak ağzının aşırı açılmasından dolayı, serbest yüzeyin rotasyonel faktörleri için içine girmektedir. Bu durumların analizi için ise, analitik yöntemler çoğunlukla yetersiz kalmakta ve sonlu elemanlar ve sınır elemanlar gibi yöntemler kullanılarak yaklaşık çözümler elde edilebilmektedir. Diğer taraftan sunulan çalışmada, Mod II durumu için herhangi bir düzeltme faktörü dikkate alınmamıştır.

### 3. GELİŞTİRİLEN ANALİTİK YÖNTEMİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sunulan çalışmada geliştirilen analitik yöntemin yeterli yaklaşım sağlayıp sağlamadığını görmek amacıyla, Linsbauer [11] tarafından geliştirilen abak kullanılmıştır. Bu abak, Şekil 3 deki geometri dikkate alındığında  $\beta=n=0$  ve  $m=\tan(\alpha=0.8/1)$  olan baraj gövdeleri için geliştirilmiştir. Linsbauer, gerilme şiddet çarpanının değerleri için, Linsbauer ve Rossmannith [18] tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen denklemleri kullanılmıştır. Abak, çatlak seviyesinin derinliği ( $\nu$ ), kritik çatlak boyu ( $a_c$ ) ve kritik gerilme şiddet çarpanı ( $K_{Ic}$ ) değerlerine göre tasarlanmıştır. Linsbauer, çalışmasında bir malzeme parametresi olan  $K_{Ic}$  değerini 0.3-4.0 MPa $\sqrt{m}$  aralığında değiştirmiştir.

Linsbauer[11] tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geliştirilen abaktan alınan bazı değerler için, bu çalışmada geliştirilen kırılma mekaniği tabanlı yaklaşımın sonuçları Tablo 1 de karşılaştırılmıştır. Tablo 1 de,  $h$  çatlakın krete olan mesafesi,  $a_c$  kritik çatlak boyu,  $K_I^h$  ve  $K_{II}^h$  sırasıyla hidrostatik basınçtan dolayı meydana gelen Mod I ve Mod II için gerilme şiddet çarpanının değerleri,  $K_I^k$  kaldırma kuvvetinden oluşan gerilme şiddet çarpanı ve  $K_I^s$  baraj gövdesinin ağırlığından oluşan gerilme şiddet çarpanıdır. Analizlerde, suyun ve betonun birim ağırlıkları sırasıyla  $\gamma_s=10$  kN/m<sup>3</sup> ve  $\gamma_b=24$  kN/m<sup>3</sup> alınmıştır.

Mod II durumunun katkısı için, Irwin [2] tarafından önerilen G-Kriteri kullanılmıştır. Karışık mod yüklemde kullanılan bu kriter, enerji salıverme oranı ( $G_I = K_I^2/E$ , burada E elastisite modülüdür) değerinin toplamı üzerine oturmaktadır. G-Kriterinin kullanımı İfade (12) de tanımlandığı gibidir.

$$G_I = G_I^h + G_{II}^h \rightarrow EG_I = (K_I^h)^2 + (K_{II}^h)^2 \rightarrow K_I = \sqrt{(K_I^h)^2 + (K_{II}^h)^2} \quad (G\text{-Kriteri}) \quad (12)$$

Tablo 1 den görülebileceği gibi, bir malzeme parametresi olan  $K_{Ic}$  her iki yöntemde de oldukça yaklaşık sonuçlar vermiştir. Burada  $K_{Ic}$ , direngen kuvvetlerden oluşan  $K$  değerleri ile barajı devirmeye çalışan kuvvetlerin oluşturduğu  $K$  değerleri dengesinden aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

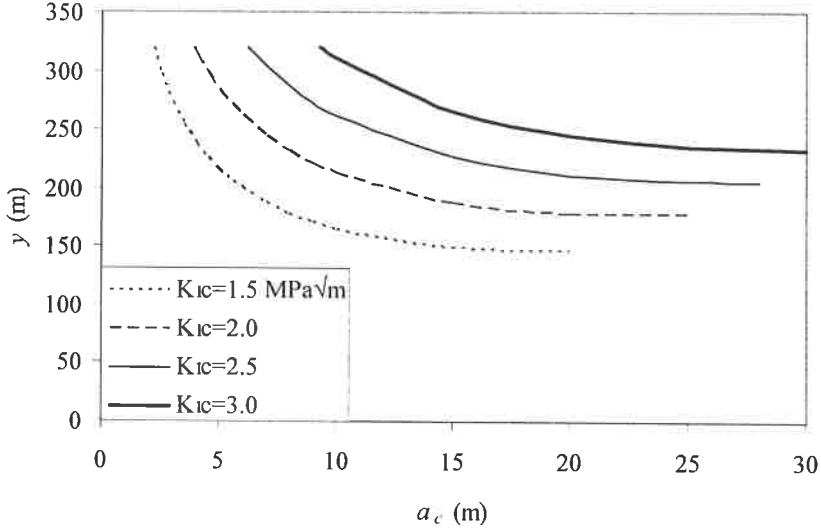
$$K_I^s + K_{Ic} - K_I^k - \sqrt{(K_I^h)^2 + (K_{II}^h)^2} = 0 \quad (13)$$

Sunulan çalışmada Linsbauer tarafından geliştirilen abak, Mod II nin de katkısı dikkate alınarak, Şekil 7 deki gibi analitik çalışma için yeniden düzenlenmiştir. 1980 lerin sonlarında yapılan araştırmalarda, baraj betonlarının kritik şiddet çarpan değerinin  $K_{Ic}=1.5-3$  MPa $\sqrt{m}$  aralığında değiştiğini göstermiştir [19]. Bu sebeple abak bu aralık için düzenlenmiştir. Şekil 7 göstermektedir ki, geliştirilen analitik yöntemin Linsbauer'in sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen ve sadece Mod I durumunun dikkate alındığı sonuçlara çok yakın değerler vermiştir.

**Tablo 1.** Referans [11] ve [15] ile analitik yaklaşımın sonuçlarının karşılaştırılması

| Referans [11] ve [15]<br>(Sonlu elemanlar yöntemi) |              |                               | Analitik yaklaşım            |                              |                              |                                 |                               |
|--|--------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| h<br>(m)   | $a_c$<br>(m) | $K_{Ic}$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_I^h$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_I^k$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_I^s$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_{II}^h$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_{Ic}$<br>(MPa $\sqrt{m}$ ) |
| 100  | 1            | 0.26                          | 3.117                        | 2.026                        | 4.825                        | 0.019                           | 0.32                          |
| 170  | 1            | 0.44                          | 5.291                        | 3.417                        | 8.164                        | 0.019                           | 0.54                          |
| 100  | 5            | 0.55                          | 7.069                        | 4.897                        | 11.305                       | 0.211                           | 0.66                          |
| 170  | 5            | 0.92                          | 11.930                       | 7.993                        | 18.754                       | 0.211                           | 1.17                          |





Şekil 7. Linsbauer [11] yaklaşımının geliştirilen analitik yöntemle düzenlenmesi

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, hidrostatik yüklemeler ve kendi ağırlığına maruz üçgen kesitli çatlamış beton ağırlık barajların lineer elastik kırılma prensiplerine göre analitik olarak incelenmiştir. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- 1) Geliştirilen analitik yöntem, literatürdeki sonlu eleman yöntemiyle yapılan çalışmalarla karşılaştırılmış ve yöntemin yeterli yaklaşım sağladığı gözlenmiştir.
- 2) Geliştirilen kırılma mekaniği tabanlı yaklaşımda, sadece Mod I durumu dikkate alınmamış, aynı zamanda Mod II kırılmasının katkısı araştırılmıştır. Hidrostatik yüklemelerden oluşan gerilme şiddet çarpanına Mod II nin katkısı, ortalama % 3 olduğu tespit edilmiştir.
- 3) Bu çalışmada elde edilen, gerilme şiddet çarpanı ifadelerinde,  $1/(1-a/d)^5$  çarpanını kullanmak kaydıyla relatif çatlak boyu  $a/d \leq 0.15$  durumu için kabul edilebilir sınırlar içerisinde probleme yeterli yaklaşım sağladığı gözlenmiştir.  $a/d > 0.15$  durumu için sonlu eleman ve sınır eleman gibi sayısal yöntemlere başvurulmalıdır.
- 4) Linsbauer'in abağında çatlak kesiti baraj tabanından itibaren yüksekliğin  $1/4$  ü yüksekliğinde alınmıştır. Elastisite teorisine göre, kusursuz bir barajın gerilme denklemlerinin çıkarımında ise, baraj temeli için herhangi bir sınır şart ileri sürülmektedir. Bu sebeple kırılma mekaniği tabanlı yaklaşımda, baraj gövdesi ile baraj temeli arasında herhangi bir etkileşim dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak, elde edilen sonuçlar ancak, dikkate alınan çatlakın temel seviyesinden belirli bir mertebe uzaklıkta yer aldığı durumlarda yeterli yaklaşım sağlayacaktır. Daha hassas hesabın gerektiği durumlarda, sayısal yöntemlere başvurmak gerekir.

## KAYNAKLAR

- [1] Griffith A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids", *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A221 163-198, 1920.
- [2] Irwin G. R., "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate" *Journal Appl. Mech.* 24 361-363, 1957.
- [3] Kaplan M. F., "Crack propagation and the fracture of concrete", *Journal of ACI*, 58 591-610, 1961.
- [4] Kesler C. E., D. J. Naus and J. L. Lott, "Fracture mechanics its applicability to concrete", *International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, Kyoto*, V. 4 113-124, 1971.
- [5] Hillerborg A., M. Modeer and P. E. Petersson, "Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", *Cement & Concrete Research*, 6 773-782, 1976.
- [6] Bazant Z. P. and Y. Xi, "Statistical Size Effect in Concrete Structures: Nonlocal Theory" *Evanston*, 1990.
- [7] Bazant Z. P., "Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal" *ASCE J. Engng. Mech.* 110 518-535, 1984.
- [8] Karihaloo B.L., "Fracture mechanics and structural concrete", First Ed. Longman Scientific and Technical, Essex, 1995.
- [9] Chappell, J. F. and A. R. Ingraffea, "A fracture mechanics investigation of the cracking of Fontana dam", *Department of Structural Engineering Report 81-7, Cornell University, Ithaca, New York*, 1981.
- [10] Ingraffea A. R. and V. E. Saouma, "Numerical modeling of discrete crack propagation in reinforced and plain concrete" *Proceeding of Fracture Mechanics of Concrete: Structural Application and Numerical Calculation, The Netherlands*, 171-225, 1985.
- [11] Linsbauer H. N., "Fracture mechanics models for characterizing crack behavior in gravity dams" 15<sup>th</sup> *ICOLD, Lausanne, V.2*. 279-291, 1985.
- [12] Ayari M. and V. E. Saouma, "A fracture mechanics based seismic analysis of cracked concrete gravity dams using discrete cracks", *International Conference of Fracture Mechanics of Concrete and Rocks, Vienna*, 1988.
- [13] Kumar R. and G. C. Nayak, "Numerical modeling of tensile crack propagation in concrete dams", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 120 1053-1074, 1994.
- [14] Lohrasbi A. R. and R. Attarnejad, "Crack growth in concrete gravity dams based on discrete crack method", *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 1 339-343, 2008.
- [15] Widmann R., "Fracture mechanics and its limits of application in the field of dam construction", *Engineering Fracture Mechanics*, 35 531-539, 1990.
- [16] İnan M., "Düzlemde elastisite teorisi", *Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul*, 1969.
- [17] Tada H., P. C. Paris and G. R. Irwin, "The stress analysis of cracks handbook", Third Ed. *ASME Press*, 2000.
- [18] Linsbauer H. N. and H. P. Rossmanith, "Back face rotation correction for trapezoidal specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, 19 195-205, 1984.
- [19] Linsbauer H. N. and A. R. Ingraffea, "Simulation of cracking in large dam: Part I", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115 1599-1615, 1989.