SARSMA TABLASI TESTİ İLE BETON BARAJLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ PARAMETRELERİ KALİBRASYONU

B.F. Soysal[1] ve Y. Arıcı[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Doçent Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: fesoysal@metu.edu.tr

ÖZET:

Ülkemizde ve dünyada silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajlar yapım sürecinin kolaylığı sebebiyle diğer baraj tiplerine tercih edilmektedir. Güncel beton karışım tasarımlarıyla elde edilen yüksek çekme dayanımları, sismik alanlarda da SSB barajların kullanılmasını sağlamaktadır. Bu barajların tasarımında çoğunlukla yapı-zemin etkileşimi ve rezervuar etkisi göz önünde bulundurularak doğrusal analizler yapılmaktadır. Ancak doğrusal olmayan analizler, mevcut barajların değerlendirilmesinde olduğu kadar yeni yapılan barajların tasarımında da artarak kullanılmaktadır. Doğrusal modelleme ve sonuç değerlendirmedeki tecrübe ve belirlenmiş kriterlerin aksine doğrusal olmayan analizlerden elde edilecek davranışların değerlendirilmesinde bir konsensüs bulunmamaktadır. Bu anlamda kullanılan materyal modelleri ve onların limitasyonlarının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada deprem etkisi altında barajların doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesinde kullanılabilecek malzeme modellerinden biri olan döner çatlak modeli, sarsma tablası üzerinde test edilen ölçekli test sonuçları ile kalibre edilmiştir. Değişik deprem hareketleri altındaki yüklemelerde bu barajın davranışı incelenmiş, bu tip analizlerde kullanılan doğrusal olmayan modellerden olan döner çatlak modelinin analiz parametreleri gerçekçi sismik davranış elde edilmesi açısından değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Silindirle sıkıştırılmış beton baraj, doğrusal olmayan analiz, dinamik analiz, kalibrasyon, çatlak modeli.

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve diğer gelişmekte olan ülkelerde pek çok sayıda barajın tasarımı ve inşaatı yapılmaktadır. Yapım sürecinin konvansiyonel beton ağırlık barajlarından daha kolay olmasından dolayı silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajlar, diğer baraj tiplerine göre daha çok tercih edilmektedir. Elastik lineer öngörüler kullanarak tasarlanan barajlar çok güvenli tarafta boyutlandırılmaktadır, bunun önemli sebeplerinden biri de ağırlık barajları için doğrusal olmayan analizlerin değerlendirilmesinde fazla bir tecrübe bulunmamasıdır.

Bu çalışmanın amacı, deprem etkisi altında beton barajların doğrusal olmayan davranışlarını belirlemek için ölçekli bir sarsma tablası deneyinin (Tinawi v.d. (2000)) sonuçlarıyla malzeme modellerini ve analiz parametrelerini kalibre etmektir. Deney numunesi ve sarsma tablası etkisi gerçekçi olarak modellenerek, beton malzeme modelinde dayanım ve enerji kapasitesinin, sonlu eleman modeli seçimlerinin, çatlama modeli öngörülerinin ve analiz seçimlerinin gerçekçi davranış elde edilmesi için optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu çalışmanın birincil kriteri beton ağırlık barajlarının performanslarının değerlendirilmesinde öncelikli olarak kullanan çatlak lokasyonları ve yayılma davranışıdır; ikinci olarak zaman aşımlı değişmesi nedeni ile elde edilmesi oldukça güç olan çatlak açılması ele alınmıştır.

Aşağıda öncelikle çalışmanın ana kısmını oluşturan malzeme modelinin kısa bir özeti sunulmaktadır. Çalışmanın üçüncü bölümünde kalibrasyon için baz olarak kullanılan deney çalışmasının detayları ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Gerçekçi sonuçlar elde edilmesi için yapılması gereken model, malzeme ve analiz seçimlerinin irdelenmesi dördüncü bölümde yapılmaktadır.

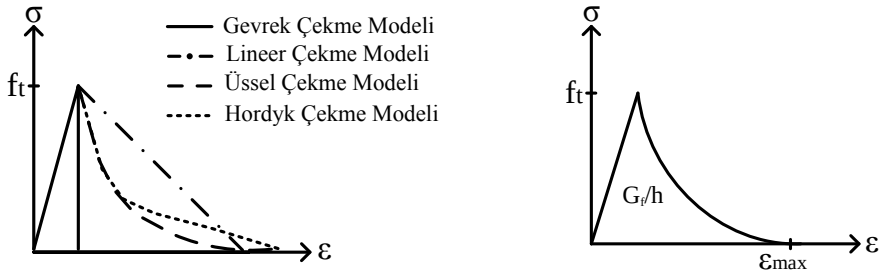
2. MALZEME MODELİ

Beton çatlak modelleri ayrık (discrete) ve yayılı (smeared) çatlak olmak üzere iki ana kategoride toplanabilir. Ayrık çatlak modelinde çatlak geometrik bir süreksizlik olarak tanımlanırken yayılı modelde kırılmış beton sürekliliğini korumaktadır (Rots, 1988). Bu çalışmada yayılı çatlak modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Yayılı çatlak modelinde, malzeme başta isotropik davranırken çatlak oluşumundan sonra ortotropik kanuna uymaya başlar ve Poisson etkisi, çekme rijitliği için azaltma faktörü ve kesme rijiditesi azaltma faktörü hesaba katılır (Rots, 1988).

Çok yönlü sabit çatlak modelinde toplam deformasyon, beton deformasyonu ve çatlak deformasyonu olmak üzere ikiye ayrılmakta ve çatlak deformasyonu da kendi içinde ayrılarak her yöndeki deformasyonların katkısı toplanmaktadır. Toplam deformasyon sabit çatlak ve döner çatlak modelinde çatlak yönündeki asal gerilmeye göre belirlenmektedir. Sabit çatlak modelinde oluşan ilk çatlakla elde edilen yön değişmemektedir, döner çatlak modelinde ise kırığın yönü asal gerilmenin yönüne bağlı olarak değişmektedir (Rots, 1988).

Betonun çekme davranışını modellemek için gevrek, lineer, üssel ve Hordyk gibi çekme modelleri kullanılabilir. (Rots, 1988). Bu modeller, betonun çekme dayanımına ulaştıktan sonra yumuşama sırasında gösterdikleri farklı davranışlarla ayrılır (Şekil 1). Gevrek çekme modelinde maksimum dayanımdan sonra taşıma gücü aniden düşmekte iken lineer, üssel ve Hordyk modellerinde taşıma gücü çekme enerji katsayısına (G_f) ve sonlu eleman büyüklüğüne (h) bağlı olarak azalmaktadır (Şekil 1).



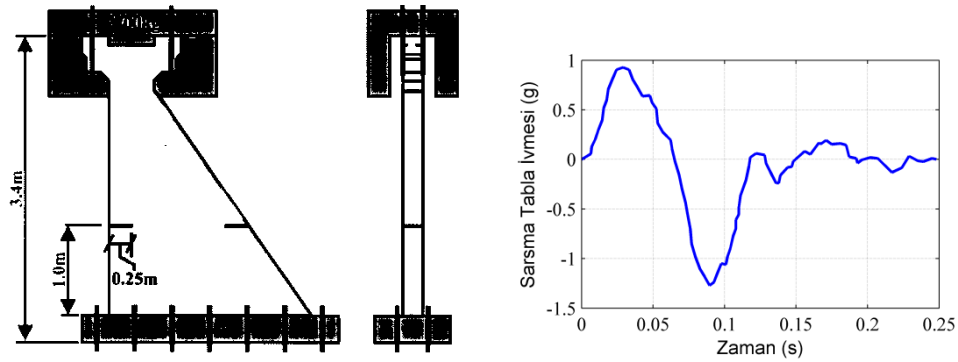
Şekil 1. Beton Çekme Davranışı Modelleri

3. ÖLÇEKLİ BARAJIN ANALİZİ

3.1. Sarsma Tablası Testi

SSB barajların deprem sırasındaki davranışlarını yansıtabilecek malzeme modellerinin kalibrasyonunu yapmak için Tinawi v.d. (2000)'nin gerçekleştirdiği ölçekli beton baraj deneyi Diana (TNO DIANA, 2010) genel amaçlı sonlu eleman programında simüle edilmiştir. Bu deney ölçekli bir ağırlık barajın deprem sırasındaki çatlama davranışını belirlemek için sarsma tablası üzerinde gerçekleştilmiştir. Deney numunesi 3.4 m yüksekliğindeki olup memba eğimi dik, mansap eğimi ise 0.7m olarak imal edilmiştir. Düzlemsel gerilmede tasarlanan

numunenin kalınlığı 0.25 m´dir. Betonun ciddi heterojenliği nedeni ile bu çeşit deneylerde genelde yapıldığı gibi çatlak yerini önceden belirlemek için modelin mansap ve memba yüzeyinde 10 mm kalınlığında ve 250 mm uzunluğunda iki çentik yapılmıştır. Modelin doğal frekansını azaltmak için krete çelik ağırlıklar yardımı ile 2700 kg'lık ek kütle bağlanmıştır. Tinawi v.d. (2000) tarafından testi yapılan ölçekli baraj modeli Şekil 2'de verilmiştir.



(a) (b)

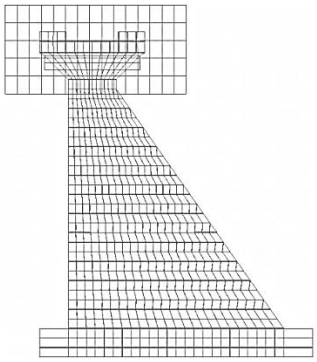
Şekil 2. (a) Ölçekli Baraj Modeli (Tinawi v.d., 2000) (b) Deprem İvmesi (Tinawi v.d., 2000)

Beton baraj modelinin Şekil 2'de gösterilen ivme kayıdı ile deneyi yapılmıştır. Bu titreşim, kayıdın ilk maksimum ivme değeri 0.87g, 0.94g ve 0.98g olacak şekilde ölçeklendirilmiş ve oluşturulan bu üç kayıtla numune sırası ile hasar biriktirerek yüklenmiştir. Deneyde kullanılan bu üçgen ivme titreşimi, herhangi bir depremin bir döngüsünde oluşan karakteristik bir titreşim olarak düşünülmüş ve yapıya zarar verebilecek boyutlarda ölçeklendirilmiştir. Böylece baraj modelinin, herhangi bir deprem hareketinin tek bir döngüsündeki davranışı gözlenerek gerçekçi sismik davranışı elde edilmektedir.

Tinawi v.d. (2000)´de olduğu gibi, bu çalışmada da ilk maksimum ivme değeri 0.94g olan test ilk çatlak testi ve 0.98g olan test ise ikinci çatlak testi olarak adlandırılacaktır. Deney sürecinin ilk testi olan 0.87g ivmesi ölçeklemesi ile yapılan ilk testte çatlama görülmemiştir, dolayısıyla da bu çalışmanın odağında yer almamaktadır.

3.2 Analiz Sonuçları

Diana'da oluşturulan baraj modeli Şekil 3'te gösterilmektedir. Düzlemsel gerilme koşulu ile yapılan bu modeldeki eleman boyutları yaklaşık 10 cm ve her elemanın arasında yatay ve dikey arayüz elemanları bulunmaktadır. Tinawi v.d. (2000)'nin analizleri baz alınarak sönümleme oranları, ilk çatlak testi için %1 ve ikinci çatlak testi için %10 alınmıştır. Analizlerde rijitliğe bağlı Rayleigh sönümleme kullanılmıştır. Barajın, döner çatlak modeli ile doğrusal olmayan dinamik analizi yapılmıştır.



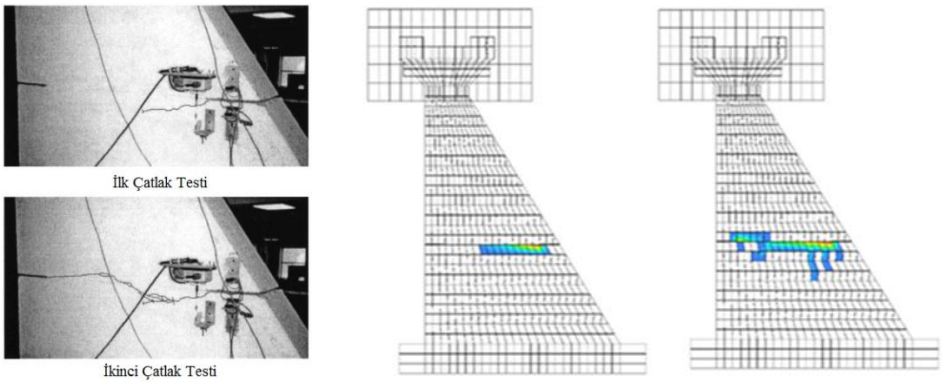
Şekil 3. Diana'da Oluşturulan Baraj Modeli

Tinawi v.d. (2000)'nin yapmış olduğu M2 Modeline benzer olarak, Diana'da yapılan analizlerde sarsma tablasının etkisini katmak için barajın en alt düğüm noktalarında toplam 7 adet yay tanımlanmıştır. Bu yay rijitlikleri, sarsma tablası deneyindeki ilk doğal frekansı elde etmek için 230 kN/mm olarak alınmıştır. Diana modelinin toplam ağırlığının Tinawi v.d. (2000)'nin çalışması ile aynı fakat temel rijitliğinin daha fazla olması, Diana'da modellenen baraj gövdesinin daha yumuşak olduğu sonucunu göstermektedir. İlk beş mod için elde edilen doğal frekanslar, deney sonucu ve M2 Modeli ile Tablo 1' de karşılaştırılmıştır. Bu tabloya göre, Diana modelinde elde edilen frekansların, sarsma tablası testindeki değerlere çok yakın olduğu ve özellikle yüksek modlarda M2 Modelinden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 1. İlk Beş Doğal Frekans (Hz)

	Laboratuvar Testi Tinawi v.d. (2000)	**M2 Modeli Tinawi v.d. (2000)**	**Diana Modeli**
$\mathbf{f_1}$	16.4	16.4	16.33
$\mathbf{f_2}$	30.0	-	-
$\mathbf{f_3}$	60.0	57.5	63.23
$\mathbf{f_4}$	105.0	72.0	103.14
$\mathbf{f_5}$	150.0	145.3	146.93

Basınç dayanım değeri Tinawi v.d. (2000)'nin çalışmasındaki değer ile aynı olup 14.8 MPa olarak alınmış ve elastisite modülü için Tinawi v.d. (2000)'nin kullandığı 1.25 dinamik amplifikasyon faktörü kullanılarak analizler 14.8 GPa elastisite modülü ile yapılmıştır. İlk çatlak testinde çatlak oluşabilmesi için çekme dayanım değeri 3.25 MPa olarak alınmış ve gevrek çekme modeli kullanılmıştır. Bu modelde maksimum dayanımdan sonra taşıma gücü aniden düşer. Tinawi v.d. (2000)'de dayanım değerinin dinamik amplifikasyon faktörü olarak kullanılan 1.75 değerine yakın bir faktör (1.53) bu çalışmada yapılan analizlerde de kullanılmıştır. İkinci çatlak deneyi ve ilk maksimum ivme değeri 0.87g olan analizlerde de bu değerler kullanılmıştır. Tinawi v.d. (2000)'nin yapmış olduğu gibi, ilk maksimum ivme değeri adım adım arttırılmış ve bu değer 0.87g'ye ulaştığında hiçbir çatlak oluşmamıştır. İlk maksimum ivme değeri 0.94g olduğunda mansap yüzeyindeki çentikte kısmi çatlak oluşmuş ve 0.98g'de ise bu iki çentik arasında tam bir çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. İlk ve ikinci çatlak testleri sonrası oluşan çatlak şeması, Tinawi v.d. (2000)'nin deney sonuçlarıyla birlikte Şekil 4'te gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

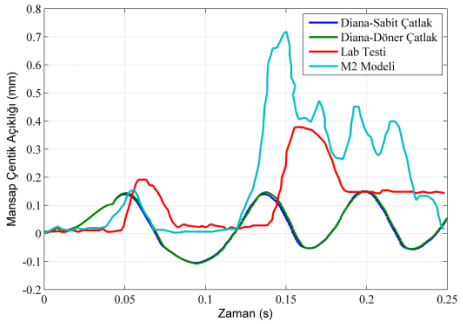
Şekil 4. Çatlak Şeması (a) Tinawi v.d. (2000)'nin deney sonuçları (b) ilk çatlak testi (c) ikinci çatlak testi

4. MODEL DUYARLILIĞI İNCELEMESİ

Yukarıda verilen çalışma örnek niteliğindedir: bu çalışmanın ana amacı olan gerçekçi çatlama davranışı elde edilmesi için modelleme ve malzeme modellerinin irdelenmesi bu bölümde sunulacaktır. Çatlama modeli çeşidi, artık kesme rijiditesinin analiz sonuçlarına etkisi, sönümleme, yumuşama eğrisinin ve model büyüklüğünün çatlama davranışına etkisi araştırılmıştır.

4.1. Döner ve Sabit Çatlak Modelleri Etkisi

Malzeme modelinin analizlere olan etkisini görmek amacıyla toplam deformasyon döner çatlak modeli ve toplam deformasyon sabit çatlak modeli kullanılarak ilk çatlak testi için analizler yapılmıştır. Bu iki analiz sonunda baraj modelinin davranışında pek bir farklılık görülmemiştir. Şekil 5'te bu iki analiz için elde edilen mansap yüzeyindeki çentik açıklığı değerleri laboratuvar testi ve M2 Modeli (Tinawi v.d. 2000) ile karşılaştırılmıştır. İki modelin farklı sonuçlar vermemesi deney geometrisi ve çentikler yüzünden kırılma düzlemlerinin çok belirgin olmasına bağlanabilir.

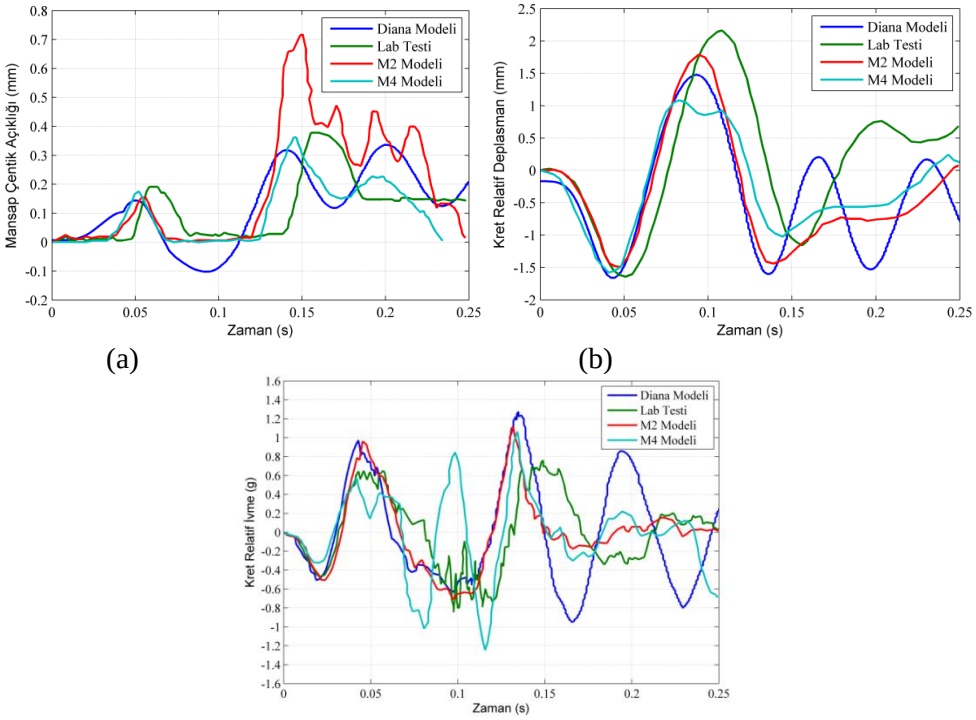


Şekil 5. Döner Çatlak ve Sabit Çatlak Modeli Karşılaştırması

4.2. Çatlakta Artık Kesme Rijiditesi Etkisi

Şekil 4 ve 5'te görüldüğü üzere, çatlak ilerlemesi doğru olarak modelde yansıtıldığı durumda bile, çatlak açılmasının doğru tahmini için model parametreleri yeterli değildir. Çatlak genişliğinin daha yüksek tahmin edilmesi için çatlak üzerinde kesme gerilmesi transferini değiştirecek olan rijitlik değerinin azaltılması yoluna gidilmiştir. Toplam deformasyon ilkesi ile çalışan döner çatlak modelinde kesme rijiditesi düşürülmemekte, azaltma faktörü β=1 olarak alınmaktadır. Ancak, Rots ve Borst (1987)'a göre, simetrik olmayan bir yükleme olduğunda çatlak hem açılıp hem de kayacağı için bu azaltma faktörünün göz önünde bulundurulması

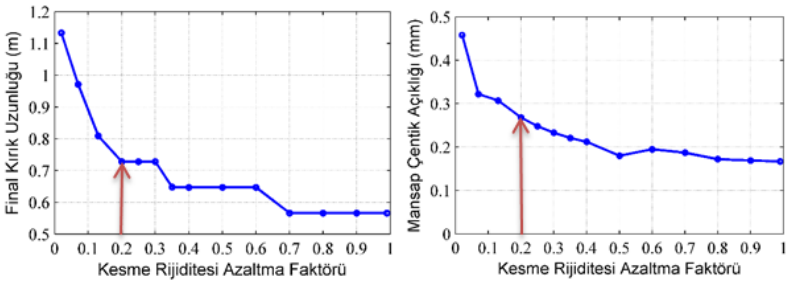
gerekmektedir. Bu sebeple, toplam deformasyon sabit çatlak modeli ve çok yönlü sabit çatlak modeli kullanılarak ve β sabit ve 0.2 alınarak analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, toplam deformasyon sabit çatlak modeli kullanıldığında sonuçlarda bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Fakat çok yönlü sabit çatlak modeli kullanıldığında ilk çatlak testi için sonuçların Tinawi v.d. (2000)'nin çalışmasına yakın olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6´da elde edilen sonuçlar Tinawi v.d. (2000) tarafından kullanılan iki analitik model ve deney sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.



Şekil 6. Çok Yönlü Sabit Çatlak Modelinin Tinawi v.d. (2000) M2 ve M4 modeli Sonuçları ile Karşılaştırılması (a) Mansap Çentik Açıklığı (b) Kret Relatif Deplasmanı (c) Kret Relatif İvmesi

Diana baraj modelinin davranışının, Tinawi v.d. (2000)'nin sonuçlarına yakın olduğu Şekil 6'da görülmektedir. Bununla birlikte kret davranışının deney davranışı aksine harmonik salınıma devam ettiği gözlenmiştir. Modelde sönüm eksikliği nedeni ile oluştuğu düşünülen bu etki bölüm 4.3'te açıklanacaktır. Tinawi v.d. (2000)'nin çalışmasına yakın sonuçlar verebilecek mansap çentik açıklığı oluşan çatlağın yayılmasının teste göre çok daha uzun olduğu durumda elde edilmiştir, dolayısı ile mevcut modelin deney sonuçlarına göre daha güvenli tarafta sonuç verdiği söylenebilir.

Çatlak oluştuktan sonra çatlak düzleminde kesme gerilmesi dağılımını düzenleyen kesme rijiditesi azaltma faktörünün çatlağın toplam uzunluğuna ve mansap çentik açılmasının değerine olan etkisi Şekil 7´de gösterilmektedir. Artan β değeriyle birlikte çatlakta kesme gerilmesinin daha çok taşınması ile çatlak uzunluğunun ve mansap çentik açıklığının azaldığı görülmüştür. β faktörü seçilirken bu iki grafik göz önüne alınmıştır. Her ne kadar Tinawi v.d. (2000) değişken kesme rijiditesi azatma faktörü kullanmış ve Rots ve Borst (1987) kesme rijiditesi azaltma fonksiyonu önermiş olsa da bu çalışmada sabit β faktörünün 0.2 olarak alınmasının da tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Artık kesme rijiditesi değerinin yüksek alınmasının çatlak yayılmasını engelleyeceği için analizlerde güvenli tarafta olmayacak sonuçların alınmasını sağlayabileceği görülmüştür.

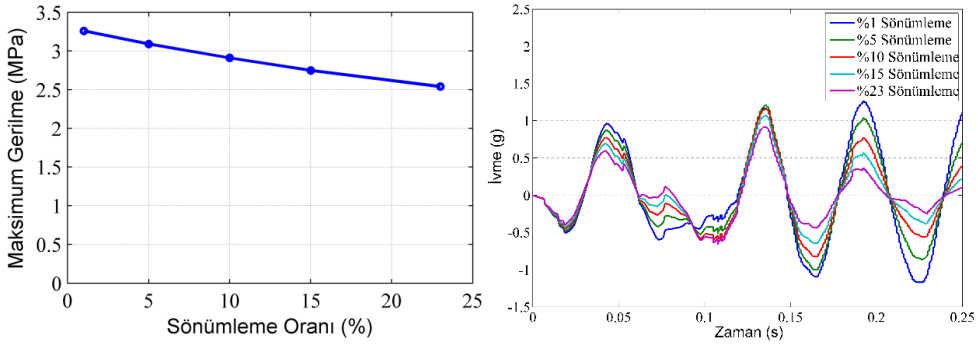


(a) (b)

Şekil 7. Kesme Rijiditesi Azaltma Faktörünün (a) Final Çatlak Uzunluğuna Etkisi (b) İkinci Maksimumda Mansap Çentik Açıklığına Etkisi

4.3. Sönümleme Etkisi

Sönümlemenin sistem davranışı üzerinde etkisini araştırmak için Rayleigh sönümleme parametreleri %1, %5, %10, %15 ve %23 olmak üzere ilk mod için beş farklı sönümleme oranı elde edecek şekilde değiştirilerek ilk çatlak testi için analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucu mansap çentikte oluşan maksimum çekme gerilmesi ve kret ivme davranışı incelenmiştir (Şekil 8). Beklendiği gibi, sönümleme oranının artmasıyla birlikte oluşan maksimum gerilme azalmaktadır. Kret ivme davranışı da buna paralel bir şekilde olup, artan sönümleme oranıyla beraber krette oluşan ivmenin azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 0.15 saniyeden sonra, yani çatlak düzlemleri oluşup deprem hareketi bittikten sonra sönümleme oranının etkisi daha fazla görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 8. Sönümleme Oranının (a) Mansap Çentikte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesine Etkisi (b) Kret İvmesine Etkisi

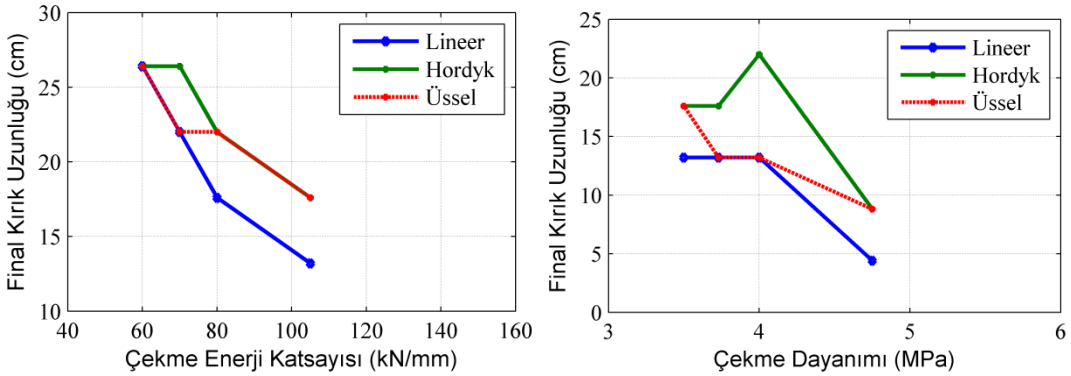
Sönüm oranının artması ile maksimum gerilme doğrusal bir yönde azalmaktadır. Kabaca %1 sönüm oranında elde edilen gerilme değerine göre maksimum gerilmenin arttılan sönüm oranı kadar azaldığı söylenebilir.

İkinci çatlak testi sonucu oluşan çatlak memba ve mansap arasında birleşerek Tinawi v.d. (2000)'nin bulmuş olduğu sonuç doğrulanmıştır. Bununla birlikte mansap çentikteki çatlak açılması laboratuvar deneyine göre küçük elde edilmiştir. Bu deneyin simülasyonunda kesme rijiditesi azaltma faktörünün çatlak uzunluğu ve açıklığı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Tinawi v.d. (2000)'nin bu deneyi simüle etmek için yaptığı analitik modellerde kırılan elemanların sönümleme oranı %1'den %23'e çıkarılmıştır. Özellikle çatlamadan sonra çatlak içerisinde olan enerji kaybını elde etmek için kullanılan bu yöntem Diana modelinde de uygulanmış, Rayleigh sönümünün arttırılmasının (%1 ile %23 arasında değişen sönümleme oranlarıyla) davranışta önemli bir etki yaratmadığı görülmüştür.

Yamaguchi v.d. (t.y.)'nin yapmış olduğu çalışmaya göre baraj kret davranışındaki ani sönümlenme, Rayleigh sönümlemesi ile değil geçici sönümleme ile modellenmelidir. Geçici sönümleme, elemanın o anki sekant rijitlik matrisine uygun olarak hesaplanabilir. Yamaguchi v.d. (t.y)'nin yapmış olduğu analizler Rayleigh sönümlemesi kullanıldığında barajın harmonik salınıma devam ettiğini, geçici sönümleme kullanıldığında ise kret relatif deplasman ve relatif ivmenin ani sönümlenmesinin doğru bir şekilde modellenebildiğini göstermiştir. Diana'da yapılan analizler Rayleigh Sönümleme kullanılarak yapıldığı için ilk çatlak testinde baraj modeli harmonik salınıma devam etmektedir. Ayrıca Yamaguchi v.d. (t.y.) tamamen ilerleyen çatlaklarda geçici sönümlemenin Rayleigh Sönümlemeye göre daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Analitik modellerinde Tinawi v.d. (2000) sonlu elemanlar için anlık sönümleme oranları kullanmıştır; aynı deneyin analizlerini yapan Kimata v.d. (2008) de rijitliğe bağlı sönümlemeyi zamana bağlı olarak değiştirerek deney sonuçlarını doğrulamıştır. Bu sebeple Rayleigh sönümlemesi kullanılan Diana analizlerinde çatlak uzunluğu doğru elde edilmekte, çatlama yaşandıktan sonra olan davranış ise deneylerden farklı olmaktadır.

4.4. Yumuşama Davranışı Etkisi

Çeşitli çekme dayanım, çekme enerji katsayısı değerleri ve çekme yumuşaması fonksiyonları kullanılarak yapılan analizlerle bu özelliklerin ilk çatlak testi sonunda oluşan final çatlak uzunluğuna olan etkileri araştırılmıştır. Tinawi v.d. (2000) analitik modellemede çekme dayanımını 3.73 MPa ve çekme enerji katsayısını 105 kN/mm olarak kullandığı için bu değerlerin sırasıyla sabit tutulmasıyla yapılan analizlerin sonucu Şekil 9'da verilmiştir. Toplam deformasyon formülasyonlu döner çatlak modeli kullanılan bu analizlerde betonun maksimum dayanımına ulaştıktan sonra izleyeceği yolu belirleyen yumuşama fonksiyonu sırası ile lineer, Hordyk (TNO Diana, 2010) ve üssel olarak seçilmiştir.



(a) (b)

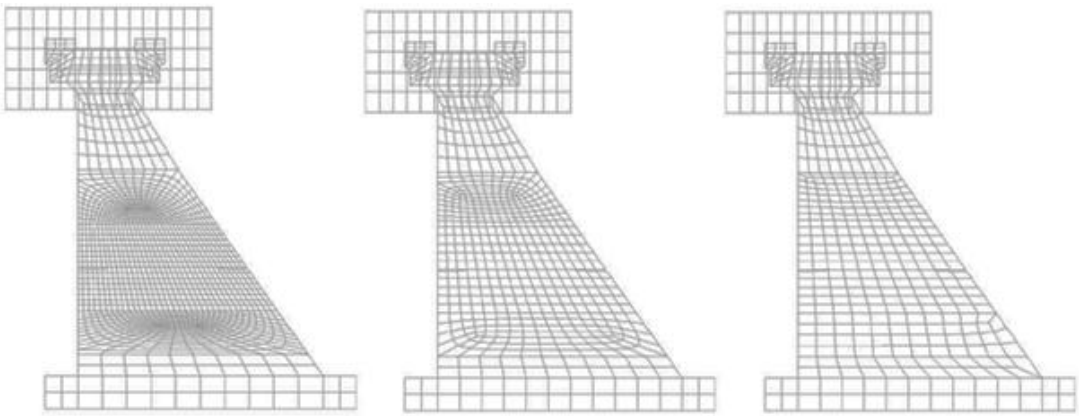
Şekil 9. Final Çatlak Uzunluğu (a) Çekme Dayanımı 3.73 MPa (b) Çekme Enerji Katsayısı 105 kN/mm

Şekil 9'da görüldüğü gibi çekme enerji katsayısı ve çekme dayanımı arttıkça çatlağın ilerleme uzunluğu azalmaktadır. Lineer çekme yumuşaması fonksiyonu kullanılınca çatlak uzunluğu en az ve Hordyk yumuşama fonksiyonuyla çatlak uzunluğu en fazla bulunmuştur. Dolayısıyla yumuşamadan durumunda dayanımın hızlı veya yavaş düşüşü de çatlak genişlemesi sürecinin doğru elde edilmesi açısından önemlidir. Hızlı dayanım kaybeden modellerin bu deneyi tekrar etmede daha başarılı olduğu görülmüştür. Diğer bir ilgi çekici sonuç ise davranış tahmininin materyel modelinde değişik dayanım ve enerji katsayısı kombinasyonları ile benzer elde edilebilmesidir.

Dayanımın ya da çekme enerjisinin benzer katsayı ile yükseltilmesi analiz sonuçlarını aynı yönde etkilemektedir. Her iki değeri birden büyütülmesi ise çatlağın ilerlememesi ve yerel olarak çentik civarında kalması sonucunu doğurmaktadır.

4.5. Sonlu Eleman Boyutunun Etkisi

Sonlu eleman ağının model sonuçları üzerine etkisi özellikle doğrusal olmayan davranışın tahmin edilmeye çalışıldığı durumlarda dikkatle değerlendirilmelidir. Barajlar hacim olarak çok büyük yapılardır: dolayısıyla çok detaylı ağlarla analiz yapmak günümüzde iki boyutlu modellerle bile çok ağır işlemci yükü getirmektedir. Bu anlamda bu küçük numune üzerinde eleman boyutunun ilk ve ikinci çatlak testlerindeki çatlağın ilerleme davranışına etkisini incelemek amacıyla eleman boyutları yaklaşık 5 cm, 10 cm ve 15 cm olan üç model yapılmıştır. Bu modeller sırasıyla Model 1, Model 2 ve Model 3 olarak adlandırılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Farklı Eleman Boyutlu Diana Modelleri

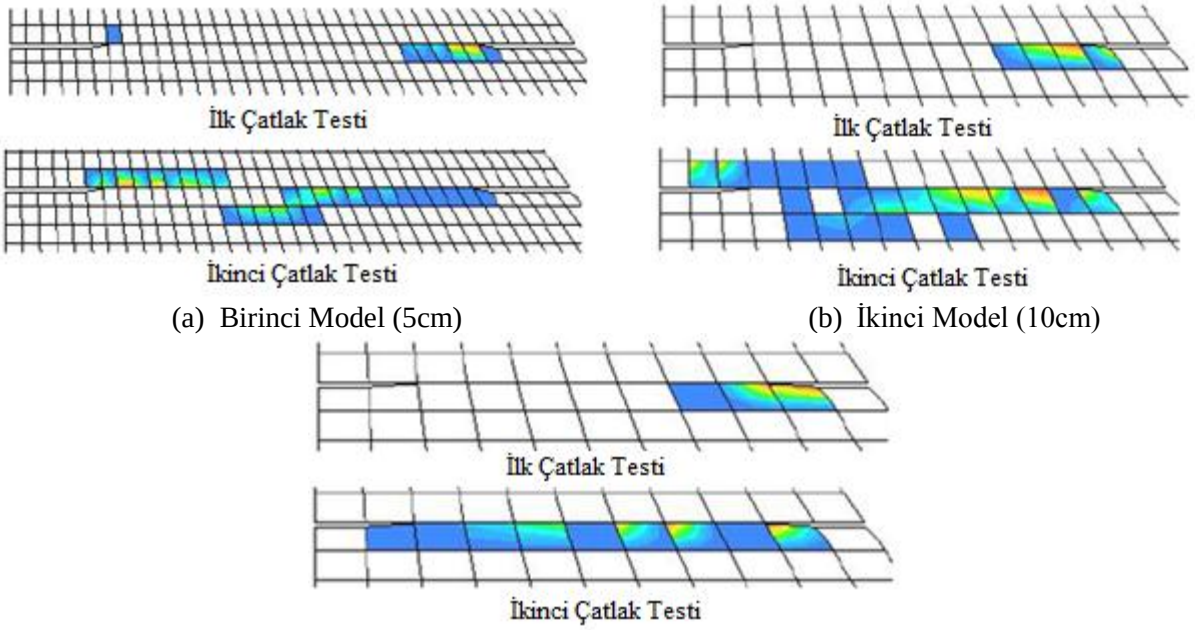
Bu modellerde birinci doğal frekansı 16.4 Hz olarak elde etmek için her bir yayın rijitliği Model 1, Model 2 ve Model 3 için sırasıyla 193 kN/mm, 205 kN/mm ve 210 kN/mm olarak alınmıştır. Memba ve mansaptaki çentiklerde oluşan maksimum çekme gerilmelerini bulmak bu modellerle doğrusal elastik analizler yapılmıştır (Tablo 2). Bu tabloya göre, eleman boyutu küçüldükçe çentiklerin en yakınında olan integrasyon noktasında elde edilen gerilmelerin arttığı gözlenmektedir. Elemanlar küçüldükçe oluşan bu gerilme yoğunluğu gerilme kapasitesine olan ihtiyacı arttırmaktadır.

Tablo 2. Maksimum Çekme Gerilmeleri

Model 1		**Model 2**		**Model 3**	
Maksimum Gerilme (MPa)		**Maksimum Gerilme (MPa)**		**Maksimum Gerilme (MPa)**	
Memba Çentik	**Mansap Çentik**	**Memba Çentik**	**Mansap Çentik**	**Memba Çentik**	**Mansap Çentik**
4,0	5,5	2,8	3,8	2,8	3,4

Modelde eleman boyu yaklaşık 10cm olarak kullanıldığında çatlak uzunlukları çekme dayanımı 3.73 MPa ve çekme enerji katsayısı 80 kN/mm olarak kullanıldığında laboratuvar sonuçlarını doğrulamaktadır (Şekil 11). Bu çekme dayanımı değeri Tinawi v.d. (2000)'nin analitik modeli ile aynı, çekme enerji katsayısı da oldukça yakındır. Model boyutu 15cm´ye değiştirildiğinde ise çekme dayanımı 3.3 MPa ve çekme enerji katsayısı 80 kN/mm olarak alındığında deney sonuçlarına uygun davranış elde edilmiştir. Modellerde çatlama genelde çentik bölümüne en yakın integrasyon noktasındaki gerilmeden dolayı ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ise model büyüdükçe elde edilen gerilme dağılması ya da model küçüldükçe elde edilen gerilme konsantrasyonu özellikle çatlağın başlama zamanını ciddi miktarda etkileyebilmektedir. Yayılı çatlak modelinde, çatlak başlangıcı ve ilerlemesi betonun çekme dayanımıyla doğrudan alakalıdır (Zhang ve Ohmachi, 2000). Son modelde oluşan

maksimum gerilmenin diğer iki modele göre daha az olması sebebiyle 3.7 MPa dayanım kullanımında çatlak başlaması görülmemiştir. Bu modellere ait çatlama şemaları Şekil 11'de gösterilmektedir.



(a) Birinci Model (5cm) (b) İkinci Model (10cm)

(c) Üçüncü Model (15cm)

Şekil 11. Çatlak Şeması Model 1,2 ve 3

5. ÖZET VE SONUÇLAR

Tinawi v.d. (2000)'nin gerçekleştirdiği 3.4 m boyunda ölçekli beton baraj deneyi Diana isimli genel amaçlı sonlu eleman programında simüle edilerek SSB barajların analizi için kalibrasyon yapılmıştır.

- Çatlama zamanının ve gelişme sürecinin doğru tahmininde beton dayanım değeri kadar çekme enerjisi ve kullanılan yumuşama fonksiyonu da önemlidir.
- Çatlak açılma miktarının doğru bir şekilde modellenmesi çatlak içerisinde davranış mekanizmasının daha doğru yansıtılmasını gerekmektedir. Çok yönlü sabit çatlak modeli kullanıldığında çatlaktaki kesme rijiditesinin azaltılmasının çatlak ilerlemesi ve açılmasını arttırdığı görülmektedir.
- Çatlamadan sonra sistem hareketinin gerçekçi elde edilmesi özellikle çatlak içerisinde gelişecek sönümün modele doğru yansıtılmasını gerekmektedir. Rayleigh sönümlemesinin hareket boyunca sabit olarak kullanılması özellikle çatlamadan sonra çatlak içerisinde görülen enerji harcanımını yansıtamamaktadır. Çatlama hareketine bağlı olarak yerel sönüm koşulları tanımlanması gerekmektedir.
- Eleman boyutu azaltıldığında integrasyon noktalarında elde edilen gerilmelerde ciddi yükselmeler görülmektedir. Bu durumda gerçekçi davranış elde edilmesi için gerilme kapasitesine olan ihtiyaç da artmaktadır.

KAYNAKLAR

Rots J.G. (1988). Computational Modeling of Concrete Fracture, Doktora Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, Delft Üniversitesi

Tinawi R., Leger P., Leclerc M. ve Cipolla G. (2000). Seismic Safety of Gravity Dams: From Shake Table Experiments to Numerical Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 518-529

Rots J.G. ve Borst R. (1987). Analysis of Mixed-Mode Fracture in Concrete. *Journal of Engineering Mechanics* 113:11, 1739-1758

Yamaguchi Y., Sasaki T., Iwashita T., Sasaki S. Ve Kurahashi H. Evaluation of Tensile Cracks in Concrete Dams by Shaking Table Tests and Non-linear FEM Analyses with Smeared Crack Model, 1-14

Kimata H., Fujita Y., Niimi K., Miyamoto D., Nakayam K. Ve Ushida Y. (2008). Seismic Safety of Concrete Gravity Dams Based on Dynamic Crack Propogation Analysis During Large-Scale Earthquakes, 1-8

Zhang H. Ve Ohmachi T. (2000). Seismic Cracking and Strengthening of Concrete Gravity Dams, 1-8

TNO DIANA. User's Manual R. 9.4.3; 2010