

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi

Yusuf CALAYIR*

Muhammet KARATON**

ÖZ

Bu çalışmada, betonun lineer olmayan malzeme özelliğinin kemer barajların dinamik davranışına etkisi incelenmektedir. Baraj betonunun lineer olmayan malzeme modeli için Drucker-Prager yaklaşımı seçilmiştir. Dinamik analizde baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri göz önüne alınmıştır. Euler yaklaşımı kullanılarak, sıvı-yapı dinamik etkileşim probleminin sonlu eleman formülasyonu verilmiştir. Sayısal uygulama için Karakaya kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Rezervuar ve temel ortamları lineer elastik kabul edilmiştir. Dinamik etki olarak, 21 Temmuz 1952 Taft depreminin S69E ivme bileşeni seçilmiş olup, barajın mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Karakaya kemer barajının lineer ve lineer olmayan çözümleri elde edilerek sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deprem etkisiyle baraj gövdesinde oluşan hasar bölgeleri belirlenmiştir.

ABSTRACT

Non-linear Dynamic Analysis of Arch Dams Using Drucker-Prager Approach

In this study, the effects of the material non-linearity of concrete on the dynamic response of arch dams are investigated. Drucker-Prager approach is selected for non-linear model of the dam concrete material. Dam-reservoir and dam-foundation interaction effects are considered in the dynamic analysis. Finite element formulation of dynamic fluid-structure interaction problem is given by using the Eulerian approach. For numerical application, linear and non-linear dynamic analyses of Karakaya arch dam are performed. The reservoir and the foundation domains are assumed as linear elastic. For the dynamic input, the S69E component of 21 July 1952 Taft earthquake is used as the horizontal component, acting in the downstream-upstream direction of the dam. Linear and non-linear dynamic solutions of the Karakaya arch dam are obtained and the results are compared

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 26.02.2001 günü ulaşmıştır.
- 30 Nisan 2004 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Fırat Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23279, Elazığ - ycalayir@firat.edu.tr

** Fırat Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23279, Elazığ - mkaraton@firat.edu.tr

with each other. Damage regions on the dam body occurred by the effects of earthquake ground motion are determined.

1. GİRİŞ

Dünyada inşa edilen barajların yaklaşık % 17' sini beton ağırlık, kemer ve payandalı barajlar oluşturmaktadır. Beton barajların inşası ve kullanımı sırasında bazı nedenlerden (Rötire, sünme, oturma vb.) dolayı baraj betonunda çeşitli çatlaklar oluşabilmektedir. Ancak bu çatlakların bir çoğu barajların güvenliğini tehlikeye sokabilecek büyüklükte değildir. Genellikle deprem gibi dinamik bir dış etki altında baraj betonunda oluşan kırılma ve çatlama önem arz etmektedir [1-5]. Bu sebeple, ülkemiz gibi deprem kuşağı üzerinde bulunan bölgelerde inşa edilecek barajların deprem tasarımlarının kırılma, çatlama ve hasar davranışlarını dikkate alan gelişmiş tekniklerle yapılması gereksinimi vardır [4-8].

Barajlar memba tarafında büyük miktarda su depoladıkları için sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda yapı sıvının, sıvı da yapının dinamik davranışını önemli ölçüde etkiler. Sonuçta sıvı ortamında hidrodinamik basınçlar, yapı ortamında ise bu basınçlardan dolayı ilave yükler oluşmaktadır. Sıvı-yapı sistemlerinin dinamik etkileşim problemleri Euler, Lagrange ve Kütle Ekleme yöntemlerinden biriyle modellenebilir [7,9,10]. Bu yöntemlerden Euler yaklaşımında, sıvı ortamında basınçlar (veya hız potansiyelleri), yapı ortamında yer değiştirmeler değişken olarak alınmaktadır. Lagrange yaklaşımında ise, hem yapı hem de sıvı ortamlarında değişken olarak yer değiştirmeler kullanılır. Sıvı ortamının baraj üzerindeki hidrodinamik basınçlarını barajın memba yüzeyi üzerinde toplanan ilave kütlelere eşdeğer olarak kabul eden yaklaşım Kütle Ekleme Yöntemi olarak bilinir [11].

Bu çalışmada, betonun lineer olmayan malzeme özelliğinin kemer barajların dinamik davranışına etkisi incelenmektedir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sonlu eleman modeli Euler yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Baraj betonu için lineer ve lineer olmayan malzeme modelleri kullanılmıştır. Lineer olmayan model olarak Drucker-Prager modeli seçilmiştir. Rezervuar ve temel ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Sayısal uygulama olarak Karakaya kemer barajının, 21 Temmuz 1952 Taft depreminin S69E yatay ivme bileşeni etkisindeki lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak yapılmıştır. Lineer olmayan davranışın çözümler üzerindeki etkisi lineer ve lineer olmayan çözümler karşılaştırılarak irdelenmiştir. Deprem etkisiyle baraj gövdesinde oluşan hasar bölgeleri belirlenmiştir.

2. BARAJ GÖVDESİ İÇİN MALZEME MODELİ

Beton barajlarda yer hareketi gibi dinamik bir etki sonucunda baraj gövdesinde betonun çekme ve basınç mukavemetini aşan gerilmeler oluşabilir; bunun sonucu olarak, baraj gövdesinde hasarlar ortaya çıkar ve bu hasarlardan dolayı gerilmelerde yeniden bir dağılım olur. Bu nedenle beton, malzeme olarak lineer olmayan bir şekil değiştirme davranışıyla karakterize edilir. Malzemenin lineer olmayan davranışı betonun çekmede çatlama, basınçta ise plastikleşmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Drucker-Prager yaklaşımı bu etkilerin göz önüne alınabildiği bir elasto-plastik malzeme modelidir [12-14]. Bu yaklaşım, von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde genelleştirilmesinden elde

edilmiştir. c kohezyonu ve ϕ içsel sürtünme açısına bağlı olarak ifade edilen Drucker-Prager yaklaşımının akma yüzeyi dik bir koni biçiminde olup Şekil 1' de sunulmuştur. Bu grafiksel gösterim malzemenin çekme ve basınçtaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 1' de geçen σ_1 , σ_2 ve σ_3 büyüklükleri asal gerilmeleri temsil etmektedir. Drucker-Prager yaklaşımında plastik şekil değiştirme hacimdeki değişimle birlikte ortaya çıkmaktadır. Bu modelde eşdeğer gerilme,

$$\sigma_e = 3 \beta \sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

olarak verilir [13]. Burada, σ_m ortalama gerilmeyi (Hidrostatik gerilme), $\{S\}$ deviatorik gerilme vektörünü, $[M]$ diyagonal dışı terimleri sıfır olan sabitler matrisini göstermektedir. β ise bir malzeme sabiti olup,

$$\beta = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad (2)$$

bağıntısıyla belirtilebilir. $[M]$ matrisi ve $\{S\}$ deviatorik gerilme vektörü sırasıyla,

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\{S\} = \{\sigma\} - \sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

eşitlikleri ile verilebilir. Denklem (4)' de $\{\sigma\}$ gerilme vektörünü belirtmektedir. Malzemenin akma gerilmesi σ_y ,

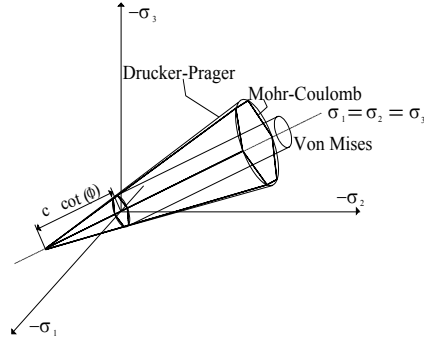
$$\sigma_y = \frac{6 c \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad (5)$$

formunda yazılabilir. Buradan akma yüzeyini belirten akma kriteri,

$$F = \sigma_e - \sigma_y = 0 \quad (6)$$

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan

olarak ifade edilebilir. Akma yüzeyi; Şekil 1’ de görüldüğü gibi altıgen olan Mohr-Coulomb akma yüzeyinin köşelerine temas ederek çevreleyecek şekilde malzeme parametrelerine sahip bir koni biçimindedir [13,14].



Şekil 1. Drucker-Prager, Mohr-Coulomb ve von Mises akma yüzeyleri.

3. SIVI-YAPI SİSTEMİNİN EULER YAKLAŞIMINA GÖRE FORMÜLASYONU

Bu çalışmada sıvı-yapı etkileşim problemi Euler yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, barajlar ve su depoları gibi sıvı-yapı etkileşimine maruz sistemlerin sonlu ve sınır eleman yöntemleriyle analizinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Sıvı-yapı sistemlerinin Euler yaklaşımıyla analizinde, yapının hareketi yer değiştirmeler cinsinden, sıvının hareketi ise basınçlar cinsinden ifade edilmektedir [7,9,10]. Sıvı-yapı ara yüzeyindeki etkileşimden dolayı ortak hareket meydana gelmektedir. Bu nedenle, çözüm için özel ara yüzey elemanlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu kısımda önce sıvı hareketi ile ilgili bağıntılar ve bunların sonlu eleman formu ve daha sonra sıvı-yapı sisteminin ortak denklemleri verilecektir.

Lineer sıkışabilir, viskoz olmayan ve rotasyonsuz bir sıvının küçük yer değiştirmeler altındaki üç boyutlu hareketi,

$$P_{,xx} + P_{,yy} + P_{,zz} = \frac{1}{C^2} P_{,tt} \quad (7)$$

dalga denklemiyle verilmektedir [7,13-17]. Burada x,y,z kartezyen koordinatları, t zamanı, C sıvıdaki basınç dalgası hızını ve $P_{,ii}$ ise hidrodinamik basıncın i değişkenine göre iki kez kısmi türevini ifade etmektedir. Her hangi bir etki sonucu sıvı sisteminde (rezervuarda) oluşan hidrodinamik basınçlar denklem (7)' nin uygun sınır şartları altında çözülmesiyle elde edilir. Bu sınır şartları,

$$P=0 \quad (\text{sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgaları yoksa}) \quad (8)$$

$$P = \rho g u_z \quad (\text{sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgaları varsa}) \quad (9)$$

$$P_{,n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (\text{sıvı-yapı ara yüzeyinde}) \quad (10)$$

$$P_{,n} = -\rho \ddot{u}_{ng} - q \dot{P} \quad (\text{sıvı-temel ara yüzeyinde})$$

(11)

$$P = 0 \quad (\text{teorik olarak sonsuza uzanan sıvının arka yüzeyinde})$$

(12)

olarak tanımlanabilir [16]. Burada, ρ sıvının kütle yoğunluğunu, g yer çekim ivmesini, u_z sıvı serbest yüzeyinin düşey doğrultudaki yer değiştirmesini, n sıvı yüzey dış normalini, \ddot{u}_n bu yüzey normali doğrultusundaki ivmeyi, $P_{,n}$ hidrodinamik basıncın n normali doğrultusundaki türevini, \dot{P} hidrodinamik basıncın zamana göre türevini ve \ddot{u}_{ng} sıvı-temel ara yüzeyinde sıvı yüzeyi dış normali doğrultusundaki yer ivmesini göstermektedir. q ise sıvı-temel ara yüzeyindeki dalga sönümlenme katsayısını belirtmekte olup, temel ortamının sadece esnekliği dikkate alınır ve söz konusu ortamda sıvı-temel ara yüzeyine normal doğrultuda bir boyutlu dalga yayılışının meydana geldiği kabul edilirse bu katsayı,

$$q = \frac{(1-\alpha)}{C(1+\alpha)} \quad (13)$$

eşitliğiyle verilebilir [17]. α katsayısı sıvı-temel ara yüzeyinden yansıyan dalganın gelen dalgaya oranını göstermektedir. $\alpha=1.0$ ara yüzeyin rijit haline karşılık gelmektedir. $\alpha=0.0$ ise ilgili ara yüzeye gelen dalganın tamamen sönümlendiğini belirtmektedir.

Sonlu eleman uygulamalarında, sıvı ortamı mansap-memba doğrultusunda sonlu uzunlukta alınabilir. Bu durumda ilgili yüzey için (12) denklemi ile verilen sınır şartı yerine, bir dalga yayılma sınır şartı kullanılmalıdır. Bu çalışmada, sisteme sönüm sağlayarak giden dalgalardaki enerji kaybını temsil eden ve

$$P_{,n} = -\frac{\dot{P}}{C} \quad (14)$$

eşitliğiyle verilen Sommerfeld yayılma şartı uygulanmıştır [13, 14].

Sıvı ortamının sonlu eleman denklemleri varyasyonel ilkeye dayalı sonlu eleman yaklaşımından elde edilecektir. Bu çalışmada sıvı yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul edilmektedir. Böylece, sıvı hareketini temsil eden (7) denkleminin, (8), (10), (11) ve (14) eşitlikleri ile verilen sınır şartları altında çözümü için bir fonksiyonelin tanımlanması gerekir. Bu problemle ilgili fonksiyonel,

$$\Pi = \int_V \left(\frac{P_{,x}^2 + P_{,y}^2 + P_{,z}^2}{2} + \frac{1}{C^2} P \ddot{P} \right) dV + \int_{S_t} \frac{P \dot{P}}{C} dS + \int_{S_i} \rho \ddot{u}_n P dS + \int_{S_b} (\rho \ddot{u}_{ng} + q \dot{P}) P dS \quad (15)$$

şeklinde yazılabilir [15]. Bu eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral hacim üzerinde, ikinci integral sonlu eleman ağının kesildiği sıvı arka yüzeyi üzerinde, üçüncü integral sıvı-yapı

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan

ara yüzeyi üzerinde ve dördüncü integral ise sıvı-temel ara yüzeyi üzerinde geçerlidir. Denklem (15) ile verilen eşitliğin stasyoner olma şartı, (7), (10), (11) ve (14) bağıntılarını verecektir. P , \dot{P} , \ddot{P} , \ddot{u}_n ve \ddot{u}_{ng} büyüklükleri sonlu eleman yaklaşımı kullanılarak,

$$P = \{N\}^T \{P_e\} \quad (16)$$

$$\dot{P} = \{N\}^T \{\dot{P}_e\} \quad (17)$$

$$\ddot{P} = \{N\}^T \{\ddot{P}_e\} \quad (18)$$

$$\ddot{u}_n = \{n\}^T \{N'\}^T \{\ddot{U}_{fs}^e\} \quad (19)$$

$$\ddot{u}_{ng} = \{n\}^T \{N'\}^T \{\ddot{U}_{fbg}^e\} \quad (20)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada $\{N\}$ ve $\{N'\}$ sırasıyla, basınç ve yer değiştirmeler için eleman şekil fonksiyonlarını belirtmektedir. $\{P_e\}$ eleman basınç vektörünü; $\{\ddot{U}_{fs}^e\}$ sıvı-yapı ara yüzeyinde eleman bazında yapı toplam ivmeleri vektörünü; $\{\ddot{U}_{fbg}^e\}$ ise sıvı-temel ara yüzeyinde eleman bazında yer ivmesi vektörünü; $\{n\}$ ilgili yüzeydeki sıvı dış yüzeyi normali doğrultusundaki birim vektörü belirtmektedir. Büyüklüklerin üzerindeki T üst indisi ise ilgili büyüklüğün transpozisini göstermektedir. (16)-(20) eşitlikleri kullanılarak (15) bağıntısı,

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \{P\}^T [K_f^p] \{P\} + \{P\}^T [M_f^p] \{\dot{P}\} + \{P\}^T [C_f^p] \{\dot{P}\} \\ & + \rho \{P\}^T [R_i] \{\ddot{U}_{fs}^e\} + \rho \{P\}^T [R_b] \{\ddot{U}_{fbg}^e\} \end{aligned} \quad (21)$$

olarak yazılabilir. Burada $[M_f^p]$, $[C_f^p]$ ve $[K_f^p]$ sırasıyla sıvı ortamın kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $[R_i]$, sıvı-yapı ara yüzeyi ile ilgili bir matris olup; yapı ortamında oluşan ivmelerden sıvı yük vektörünü ve sıvı ortamında oluşan basınçlardan yapı düğüm noktası ilave kuvvetlerini belirlemede kullanılır. $[R_b]$, sıvı-temel ara yüzeyinde oluşan yer ivmelerinden dolayı sıvı yük vektörünü belirlemede kullanılan bir matristir. $\{\ddot{U}_{fs}^e\}$ vektörü sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı düğüm noktası toplam ivmelerini; $\{\ddot{U}_{fbg}^e\}$ vektörü ise sıvı-temel ara yüzeyindeki düğüm noktası yer ivmelerini temsil etmektedir. Sıvı ortama ait rijitlik, kütle ve sönüm matrisleri,

$$[K_f^p] = \sum_{e=1}^k \int_{V_e} \left(\{N_{,x}\} \{N_{,x}\}^T + \{N_{,y}\} \{N_{,y}\}^T + \{N_{,z}\} \{N_{,z}\}^T \right) dV \quad (22)$$

$$[M_f^p] = \sum_{e=1}^k \int_{V_e} \frac{1}{C^2} (\{N\} \{N\}^T) dV \quad (23)$$

$$[C_f^p] = \sum_{e=1}^l \int_{S_i^e} \frac{1}{C} (\{N\} \{N\}^T) dS + \sum_{e=1}^n \int_{S_b^e} q (\{N\} \{N\}^T) dS \quad (24)$$

eşitlikleri ile elde edilebilir. $[R_i]$ ve $[R_b]$ matrisleri ise,

$$[R_i] = \sum_{e=1}^m \int_{S_i^e} \{N\} \{n\} \{N\}^T dS \quad (25)$$

$$[R_b] = \sum_{e=1}^n \int_{S_b^e} \{N\} \{n\} \{N\}^T dS \quad (26)$$

bağıntılarından hesaplanabilir. (22)-(26) denklemlerindeki toplam simgeleri üzerinde geçen k, l, m ve n indisleri sırasıyla sıvı ortama, sıvı arka yüzeyine, sıvı-yapı ara yüzeyine ve sıvı-temel ara yüzeyine ait eleman sayılarını göstermektedir. Denklem (21) ile verilen ifadenin stasyonere olma şartı ($\partial \Pi = 0$) kullanılırsa sıvı sisteminin hareketini temsil eden,

$$[M_f^p] \{\ddot{P}\} + [C_f^p] \{\dot{P}\} + [K_f^p] \{P\} = -\rho \left([R_i] \{\ddot{U}_{fs}\} + [R_b] \{\ddot{U}_{fbg}\} \right) \quad (27)$$

eşitliği bulunur.

Yapı ortamının dinamik hareketine ait sonlu eleman denklemleri için,

$$[M_s] \{\ddot{U}_s\} + [C_s] \{\dot{U}_s\} + [K_s] \{U_s\} = \{F\} + \{F_{fs}\} \quad (28)$$

bağıntısı kullanılabilir. Burada $[M_s]$, $[C_s]$ ve $[K_s]$ sırasıyla yapı ortamına (baraj+temel) ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{\ddot{U}_s\}$, $\{\dot{U}_s\}$ ve $\{U_s\}$ büyüklükleri de yapı ortamına ait bağıl ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini temsil etmektedir. $\{F\}$ yapının dış yük vektörünü; $\{F_{fs}\}$ ise sıvı ortamında oluşan hidrodinamik basınçlardan ötürü yapıya gelen ek dış yük vektörünü belirtmektedir. $\{F_{fs}\}$ ifadesi virtüel iş ilkesinden faydalanılarak,

$$\{F_{fs}\} = [R_i]^T \{P\} \quad (29)$$

olarak ifade edilebilir. Böylece lineer haldeki sıvı-yapı sistemine ait ortak hareket denklemleri (27) ve (28) denklemlerinin,

$$\begin{bmatrix} [M_s] & [0] \\ [M_{fs}] & [M_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_s\} \\ \{\dot{P}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & [0] \\ [0] & [C_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_s\} \\ \{\dot{P}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & [K_{fs}] \\ [0] & [K_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{F_{fg}\} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

şeklinde birleştirilmesiyle elde edilebilir. Burada,

$$[M_{fs}] = \rho[R_i] \quad (31)$$

$$[K_{fs}] = -[R_i]^T \quad (32)$$

$$\{F_{fg}\} = -\rho \left([R_i] \{\ddot{U}_{fsg}\} + [R_b] \{\ddot{U}_{fbg}\} \right) \quad (33)$$

eşitlikleri ile tanımlanmaktadır. Burada, $\{F_{fg}\}$ sıvı-yapı ve sıvı-temel ara yüzeylerindeki rijit ivmelenmelerden ötürü ortaya çıkan sıvı yük vektörünü, $\{\ddot{U}_{fsg}\}$ ise sıvı-yapı ara yüzeyindeki düğüm noktası yer ivmeleri vektörünü temsil etmektedir.

Yapı sisteminin lineer olmayan davranış göstermesi halinde sıvı-yapı sisteminin ortak hareketini temsil eden (30) denklemi,

$$\begin{bmatrix} [M_s] & [0] \\ [M_{fs}] & [M_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_s\} \\ \{\ddot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & [0] \\ [0] & [C_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_s\} \\ \{\dot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] & [K_{fs}] \\ [0] & [K_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{F_s^i\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{F_{fg}\} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

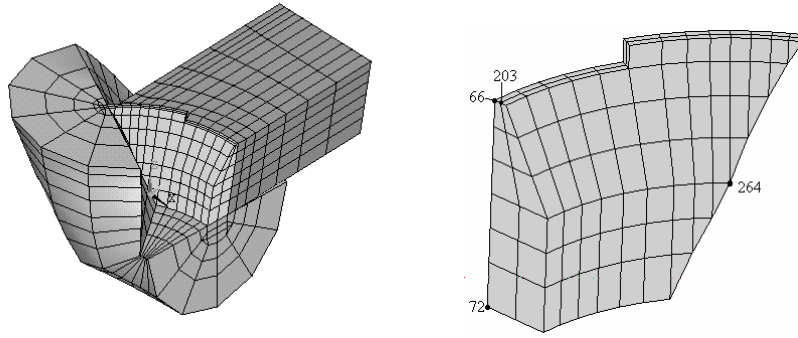
haline dönüşür. Burada $\{F_s^i\}$, yapının içsel kuvvet vektörünü belirtmektedir. (30) ve (34) eşitlikleri ile verilen denklem takımları zaman alanında uygun bir sayısal integrasyon yöntemiyle çözülebilir [14].

4. SAYISAL UYGULAMA

Sayısal uygulama için Karakaya kemer barajı seçilmiştir. Bu baraj, 173 m yüksekliğinde tek eğrilikli bir kemer baraj olup 430 m kret uzunluğuna sahiptir. Barajın memba kısmındaki eğrilik yarıçapı 225 m ve kret seviyesindeki kalınlığı 10 m, taban kısmında ise 50 m dir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sol yarı parçası Şekil 2' de sunulmuştur. Baraj sonlu eleman modelinde 28 adet üçgen prizmatik ve 228 adet dikdörtgen prizmatik eleman kullanılmıştır. Şekil 2' de ayrıca bu sonlu eleman ağında yer değiştirme ve gerilmelerin zamanla değişim grafiklerinin çizildiği dört düğüm noktası gösterilmiştir.

Temel kayası esnek ve kütsüz olarak kabul edilmiş olup; barajla temelin birleşim ara yüzeyinde merkezi baraj orta düzleminin oturduğu eğri üzerinde bulunan ve yarıçapı baraj yüksekliği kadar olan yarım daire düzlemi şeklinde seçilerek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modelde 96 adet üçgen prizmatik ve 528 adet dikdörtgen prizmatik eleman kullanılmıştır. Sıvı ortam (rezervuar) sonlu kabul edilmiş olup barajın mansap-memba doğrultusundaki boyutu baraj yüksekliğinin iki katı kadar alınmıştır. Rijit temele oturduğu kabul edilen sıvı ortamın sonlu eleman modelinde 84 adet üçgen prizmatik ve 714 adet dikdörtgen prizmatik eleman kullanılmıştır. Sıvı sonlu eleman modelinde mansap-memba doğrultusunda ağın kesildiği arka yüzeye Sommerfeld dalga yayılma sınır şartı uygulanmıştır. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sonlu eleman modelinde toplam olarak 208 adet üçgen prizmatik ve 1386 adet dikdörtgen prizmatik sonlu eleman vardır. Barajın dinamik analizi için Kaliforniya eyaletinin Kern ilçesi 21 Temmuz 1952 Taft depremi

sırasında Taft Lincoln okulu tüneline kaydedilen yer hareketinin S69E yatay ivme bileşeni seçilmiş ve baraj-rezervuar-temel sistemine mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Maksimum ivmesi 0.18g olan bu ivme bileşeni Şekil 3’ de sunulmuştur. Baraj betonu için lineer ve Drucker-Prager malzeme modelleri seçilmiştir. Betonunun elastisite modülü 30.23×10^3 MPa, birim hacim ağırlığı 24.350 kN/m^3 ve Poisson oranı 0.2 alınmıştır. Barajın lineer olmayan analizinde betonun çekme ve basınç dayanımları sırasıyla, 2.7 MPa ve 25 MPa kabul edilerek, kohezyon 2.109 MPa ve içsel sürtünme açısı, $\phi = 38^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Sıvının birim hacim ağırlığı $\rho=1.0 \text{ t/m}^3$ ve hacimsel elastisite modülü 2070 MPa olarak alınmıştır. Buna göre sıvıdaki basınç dalgası hızı $C = 1438.75 \text{ m/s}$ olmaktadır.



a) Sistemin sonlu eleman modeli.

b) Seçilen düğüm noktaları.

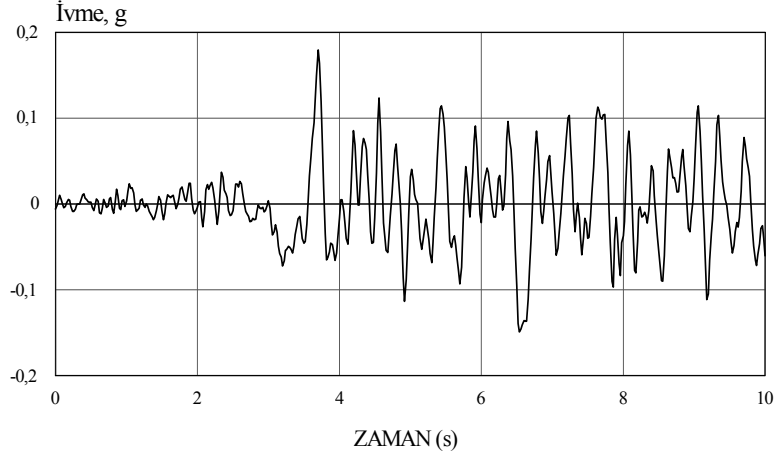
Şekil 2. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sonlu eleman modeli ve büyüklüklerin (yer değiştirme ve gerilme) zamanla değişim grafiklerinin çizildiği düğüm noktaları.

Temel kayasının elastisite modülü 17.358×10^3 MPa ve Poisson oranı 0.2 kabul edilmiştir. Rayleigh sönüm sabitleri 3.3147 Hz (sistemin ilk frekansı) ve 25 Hz’ lik frekanslarda %5’ lik bir sönümü sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. İlk frekans rezervuarın boş olduğu kabulüne göre hesaplanan sistemin temel frekansını belirtmektedir. Çözümde kullanılan integrasyon zaman adımı 0.001 sn olarak seçilmiştir. Hesaplamalar, ANSYS 5.6 programı kullanılarak elde edilmiştir [13].

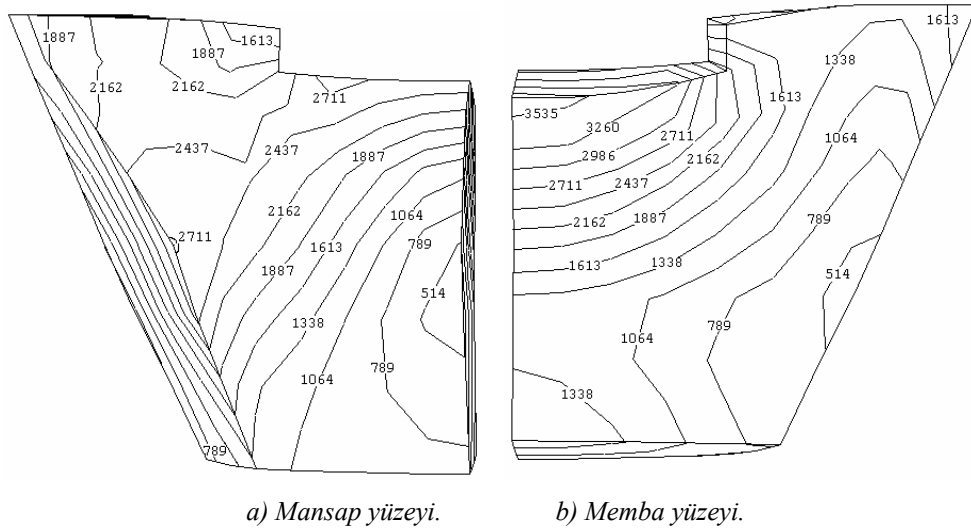
Baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak Karakaya kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Lineer analizden elde edilen baraj memba ve mansap yüzeyleri maksimum ve minimum asal eş gerilme eğrileri, sırasıyla Şekil 4 ve 5’ te verilmiştir. Eğriler üzerinde belirtilen sayısal değerler kN/m^2 cinsinden verilmiştir. Söz konusu bu gerilmeler, tüm zaman adımlarındaki maksimum ve minimum asal gerilmelerin ekstrem değerleridir. Maksimum asal gerilmeler barajın memba yüzeyinde taban ve yamaçlardan krete doğru genelde artış göstermekte ve krete yakın orta konsol bölgesinde maksimum değerler almaktadır. Mansap yüzeyinde ise eğimin değiştiği yamaç orta bölgesi ile kret arasında asal maksimum gerilmelerin büyük değerler aldığı gözlenmektedir. Maksimum asal gerilmeler, memba yüzeyinde krete yakın orta konsol bölgesinde; mansap yüzeyinde ise kret bölgesinin dolu savak yan kenarı ile orta konsol arasında ve eğimin değiştiği yamaç orta bölgesinde betonun çekme dayanımını aşmaktadır.

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan

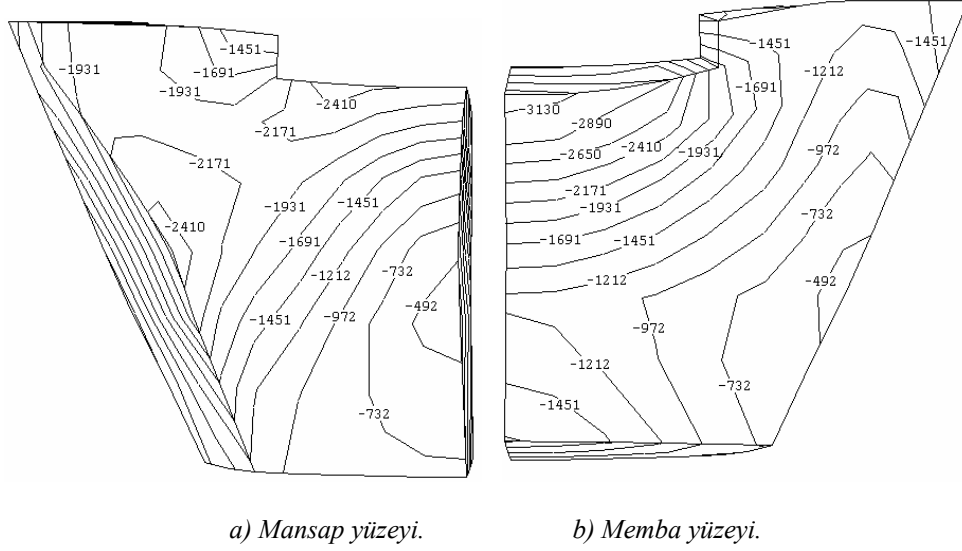
Bu bölgelerde hasarların ortaya çıkacağı açıktır. Minimum asal gerilmelerin yayılışı da maksimum asal gerilmelere benzer olarak ortaya çıkmaktadır.



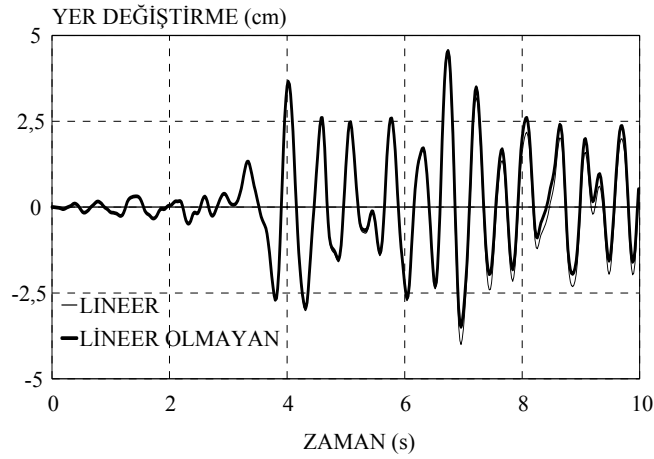
Şekil 3. 21 Temmuz 1952 Taft depreminin S69E yatay ivme bileşeni.



Şekil 4. Lineer analizden elde edilen maksimum asal eş gerilme eğrileri.



Şekil 5. Linear analizden elde edilen minimum asal eş gerilme eğrileri.

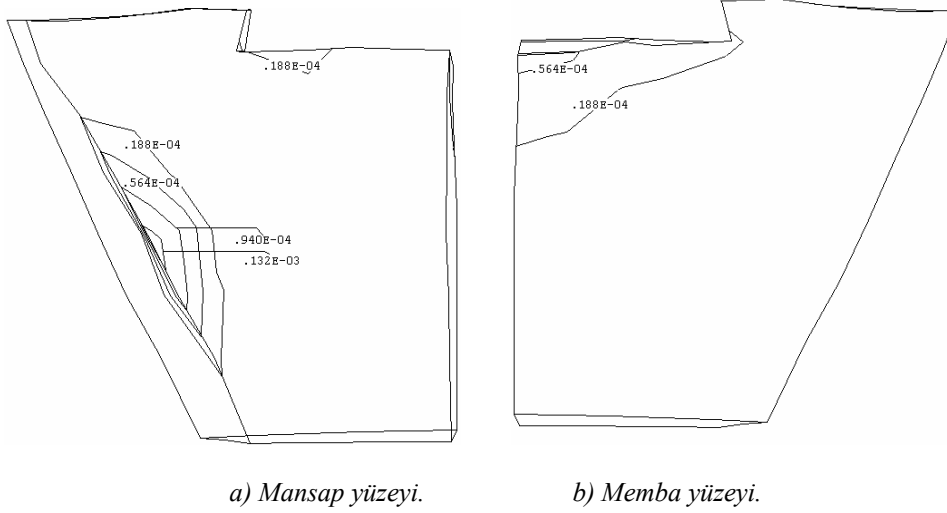


Şekil 6. Linear ve lineer olmayan analizlerden elde edilen 203 nolu düğüm noktasının radyal yer değiştirmesinin zamanla değişimi.

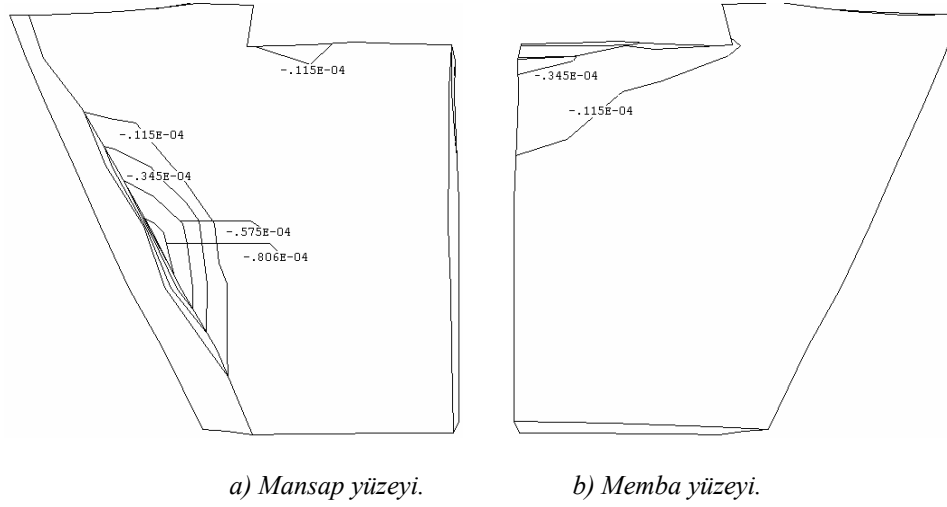
Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen barajın kretinde yer alan 203 nolu düğüm noktasının radyal yer değiştirme grafikleri Şekil 6' da sunulmuştur. Her iki analizden elde edilen yer değiştirme değerleri genelde bir birine yakın seyretmektedir.

Lineer olmayan analizde gerilmeler, betonun çekme dayanımını 264 nolu düğüm noktası civarında 4.0' üncü saniyede aşmakta ve bunun sonucu olarak bu bölgede baraj betonunda hasarlar oluşmaya başlamaktadır. 264 nolu düğüm noktası barajın mansap yüzeyinde

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan



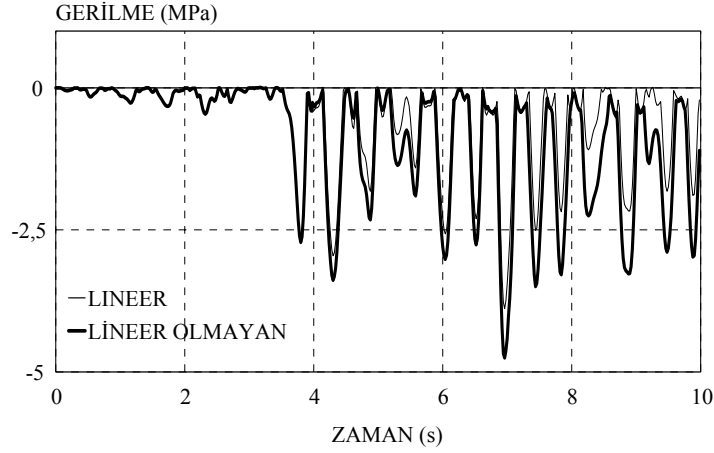
Şekil 7. Lineer olmayan analizden elde edilen asal maksimum eş hasar eğrileri.



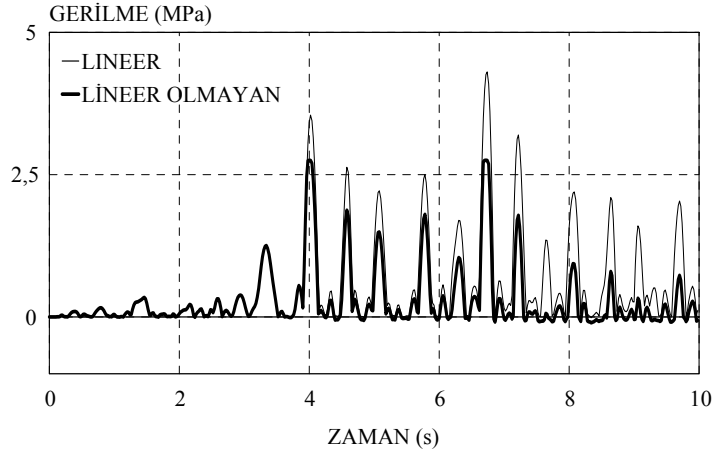
Şekil 8. Lineer olmayan analizden elde edilen asal minimum eş hasar eğrileri.

eğimin değiştiği yamaç bölgesi orta kısmında bulunmaktadır. Bir zaman adımı sonra barajın krete yakın orta konsol bölgesinde de hasarlar meydana gelmektedir. Söz konusu hasar bölgeleri zamana bağlı olarak artış göstermektedir. Hasarlar, barajda oluşacak gerilmelerde yeniden bir dağılıma sebep olmaktadır. Barajın memba ve mansap yüzeyleri için maksimum ve minimum eş hasar (plastik şekil değiştirme) eğrileri sırasıyla Şekil 7 ve 8' de sunulmuştur. Eğriler üzerinde belirtilen değerler metre cinsindedir. Şekil 7' den görüldüğü gibi maksimum eş hasar bölgeleri barajın memba yüzeyinde krete yakın orta

konsol civarında geniş bir bölge, mansap yüzeyinde ise yamaç kısmında geniş bir bölge ve krete yakın orta konsol civarında nispeten daha dar bir bölge olarak ortaya çıkmaktadır. Minimum eş hasar eğrileri de maksimum eş hasar eğrilerine benzer bir yayılış sergilemektedir.



a) Maksimum asal gerilme.



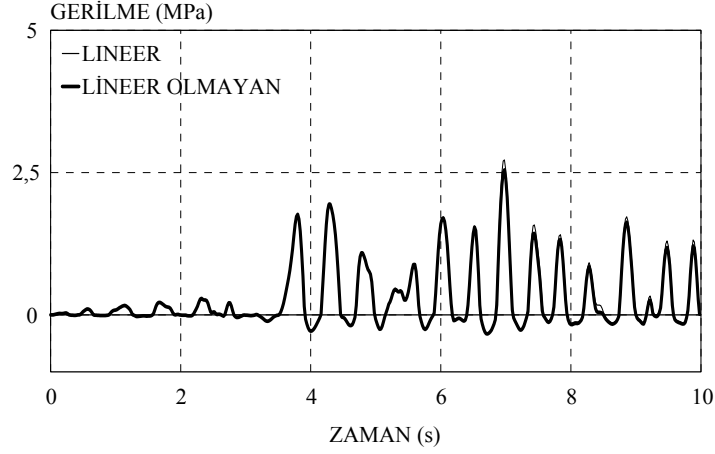
b) Minimum asal gerilme.

Şekil 9 Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen 66 nolu düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.

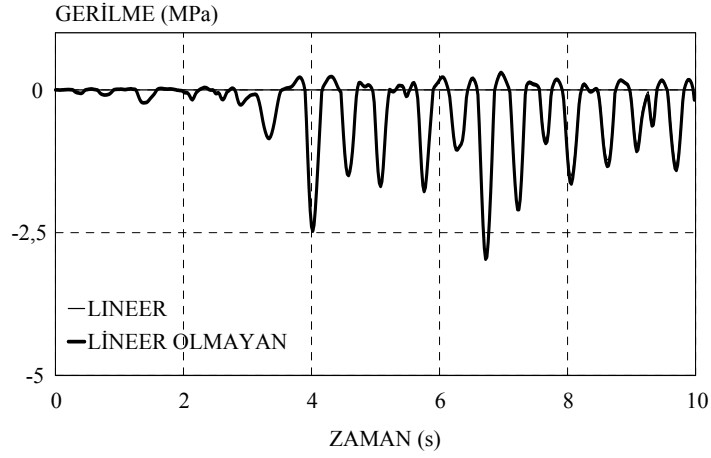
Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen 66, 72 ve 264 nolu düğüm noktaları maksimum ve minimum asal gerilme grafikleri Şekil 9, 10 ve 11’ de sunulmuştur. 66 ve

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan

72 nolu düğüm noktaları barajın memba yüzeyinde, 264 nolu düğüm noktası ise barajın



a) Maksimum asal gerilme.

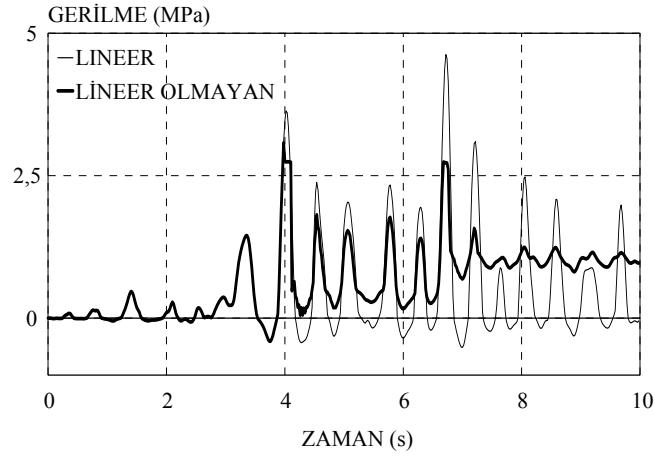


b) Minimum asal gerilme.

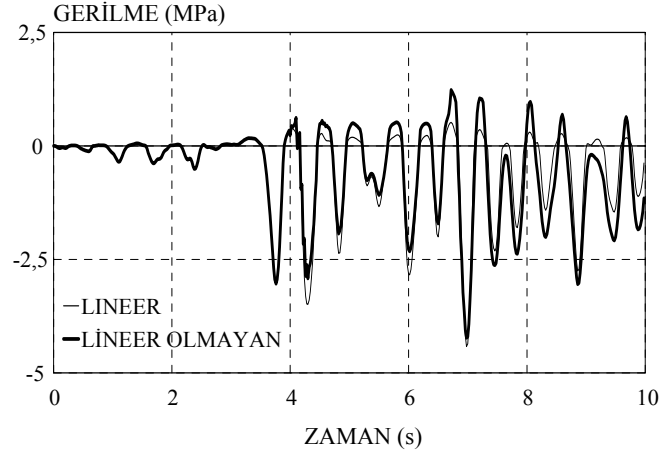
Şekil 10 Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen 72 nolu düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.

mansap yüzeyinde bulunmaktadır. Bu grafiklerden, barajda hasarın olduğu 4.0'üncü saniye anından itibaren 66 nolu düğüm noktasında lineer olmayan analizden hesaplanan asal maksimum gerilme değerleri lineer analiz sonuçlarına göre azalım; asal minimum gerilme değerleri ise artış göstermektedir. Bu düğüm noktası hasarın yoğun olduğu kret

orta konsol bölgesinde yer almaktadır. Söz konusu bölgede betonun çekme dayanımını aşan çekme gerilmelerinden dolayı hasarın oluşmasıyla gerilme yeniden dağılım meydana gelmektedir. Hasarın oluşmadığı orta konsolun topuk bölgesinde bulunan 72 nolu düğüm noktasında asal maksimum ve asal minimum gerilme değerlerinde genelde bir değişiklik olmamaktadır. Mansap yüzeyinde eğimin değiştiği yamaç orta bölgesinde yer alan 264 nolu düğüm noktasında ise asal maksimum gerilme değerlerinde azalma olmasına karşılık, asal minimum gerilme değerlerinde önemli bir değişiklik izlenmemektedir.



a) Maksimum asal gerilme.

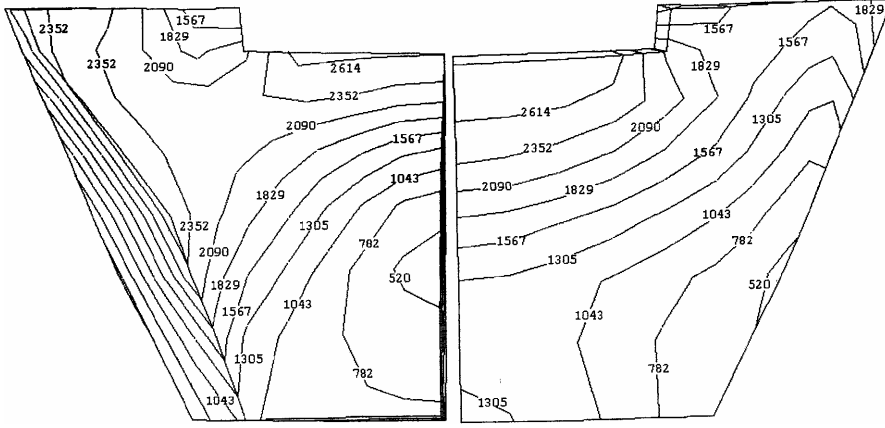


b) Minimum asal gerilme.

Şekil 11 Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen 264 nolu düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.

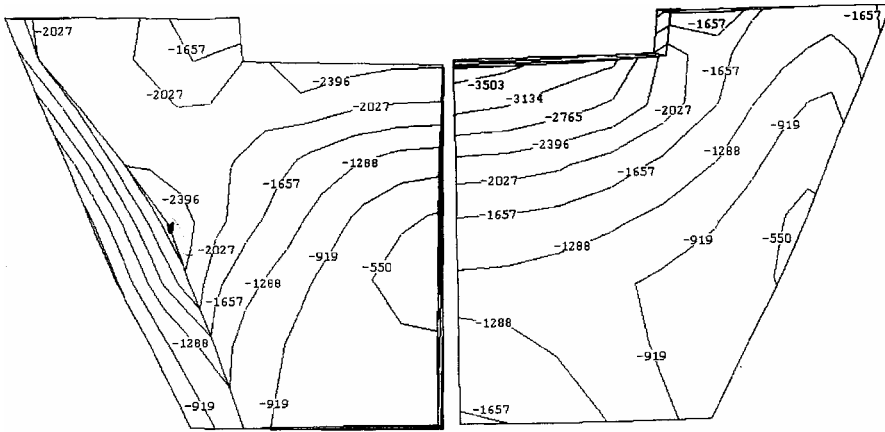
Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan

Lineer olmayan analize göre memba ve mansap yüzeyleri için çizilen asal maksimum ve minimum eş gerilme eğrileri sırasıyla Şekil 12 ve 13 ' de sunulmuştur. Gerilmelerin dağılımı açısından lineer analize benzer bir durum sergilemektedir. Hasarın olduğu bölgelerde özellikle memba yüzeyinde çekme gerilmelerinde genelde azalma, basınç gerilmelerinde ise artış olmaktadır.



a) Mansap yüzeyi. b) Memba yüzeyi.

Şekil 12. Lineer olmayan analizden elde edilen maksimum asal eş gerilme eğrileri.



a) Mansap yüzeyi. b) Memba yüzeyi.

Şekil 13. Lineer olmayan analizden elde edilen minimum asal eş gerilme eğrileri.

5. SONUÇLAR

Kemer barajların deprem etkisi altında lineer analizlerinden elde edilen asal çekme gerilmeleri genellikle betonun çekme dayanımını aşmaktadır. Bu nedenle çatlak, ezilme veya hasarın dikkate alındığı beton malzeme modellerinin deprem analizlerinde kullanılması gerekir. Bu çalışmada, baraj betonunun lineer olmayan malzeme modeli için elasto-plastik özelliğe sahip Drucker-Prager yaklaşımı kullanılmıştır. Betonun lineer olmayan malzeme özelliğinin kemer barajların dinamik davranışına etkisini incelemek ve barajda oluşabilecek hasar bölgelerini belirlemek amacıyla, baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak Karakaya kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Euler yaklaşımı kullanılarak problemin sonlu eleman modeli kurulmuştur. Sıvı ve temel ortamlarının lineer davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Dinamik etki olarak, 21 Temmuz 1952 Taft depreminin S69E ivme bileşeni seçilmiş olup, barajın mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Yapılan çözümler asal çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aştığını ve bunun sonucu olarak barajda hasarların oluştuğunu göstermiştir. Barajın geometrisine bağlı olarak krete yakın orta konsol civarında ve eğimin değiştiği yamaç kısımlarında hasarlar meydana gelmektedir. Hasarlar gerilmelerde yeniden bir dağılıma sebep olmaktadır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında kemer barajların tasarım veya yeniden gözden geçirme analizlerinde betonun lineer olmayan davranışını hesaba katan malzeme modellerinin kullanılması önerilmektedir.

SEMBOLLER LİSTESİ

c	: Kohezyon
C	: Sıvıdaki ses hızını
$[C_f^p]$: Sıvı ortamın sönüm matrisi
$[C_s]$: Yapı ortamın (baraj + temel) sönüm matrisi
F	: Akma Kriteri
$\{F\}$: Yapının dış yük vektörü
$\{F_{fg}\}$: Sıvı-yapı ve sıvı-temel ara yüzeylerindeki rijit ivmelenmelerden ötürü ortaya çıkan sıvı yük vektörü
$\{F_{fs}\}$: Sıvı-yapı ara yüzeyinde sıvı ortamdan yapıya gelen ek dış yük vektörü
$\{F_s^i\}$: Yapının içsel kuvvet vektörü
g	: Yer çekimi ivmesi
$[K_f^p]$: Sıvı ortamın rijitlik matrisi
$[K_s]$: Yapı ortamın (baraj + temel) rijitlik matrisi
$[M_f^p]$: Sıvı ortamın kütle matrisi

Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan

$[M_s]$: Yapı ortamın (baraj + temel) kütle matrisi
$\{N\}$: Basınç değişkeni için eleman şekil fonksiyonları vektörü
$\{N'\}$: Yer değiştirme değişkeni için eleman şekil fonksiyonları matrisi
n	: Sıvı-yapı ara yüzeyindeki sıvı yüzeyi normalini,
P	: Hidrodinamik basınç
$P_{,ii}$: Hidrodinamik basıncın i' değişkenine göre iki kez kısmi türevi
$\{P\}$: Hidrodinamik basınç vektörü
$\{\dot{P}\}$: Hidrodinamik basınç vektörünün zamana göre iki kez kısmi türevi
q	: Sıvı-temel ara yüzeyindeki dalga sönümlenme katsayısı
$\{S\}$: Deviatorik gerilme vektörü
x,y,z	: Kartezyen koordinatları
t	: Zaman
u_z	: Sıvı serbest yüzeyinin düşey doğrultudaki yer değiştirmesi
\ddot{u}_n	: Sıvı-yapı ara yüzeyindeki sıvı yüzey normali doğrultusundaki ivme
\ddot{u}_{ng}	: Sıvı-temel ara yüzeyinde sıvı yüzeyi dış normal doğrultusundaki yer ivmesi
$\{\ddot{u}_{fbg}\}$: Sıvı-temel ara yüzeyindeki düğüm noktası yer ivmeleri vektörü
$\{\ddot{u}_{fs}\}$: Sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı toplam ivmeleri vektörü
$\{\ddot{u}_{fsg}\}$: Sıvı-yapı ara yüzeyindeki düğüm noktası yer ivmeleri vektörü
$\{\ddot{u}_s\}, \{\dot{u}_s\}$ ve $\{U_s\}$: Yapının (baraj + temel) ivme, hız ve yer değiştirme vektörleri
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ρ	: Sıvının kütle yoğunluğunu
σ_e	: Eşdeğer gerilme
σ_m	: Ortalama gerilmeyi
σ_y	: Malzemenin akma gerilmesi
$\{\sigma\}$: Gerilme vektörü

Kaynaklar

- [1] Dowling, J. M, "Non-linear Analysis of Arch Dams", Earthquake Engineering Research Laboratory, Report No: EERL 87-03, University of California, Berkeley, 1987.
- [2] Manfredi, C. G., and Ramasco, R., "The use of Damage Functionals in Earthquake Engineering: a Comparison between Different Methods", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22(10), 855-868, 1993.

- [3] Rajgelj, S., Amadio, C., and Nappi, A., “*An Internal Variable Approach Applied to the Dynamic Analysis of Elastic-Plastic Structural Systems*”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22(10), 885-903, 1993.
- [4] Carvera, M., and Oliver, J., “*Seismic Evaluation of Concrete Dams Via Continuum Damage Models*”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1225-1245, 1995.
- [5] Lee, J., and Fenves, G. L., “*A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams*”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27(9), 937-956, 1998.
- [6] Rodriguez, M. E., and Aristizabal, J. C., “*Evaluation of a seismic damage parameter*”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(5), 463-477, 1999.
- [7] Karaton, M., “*Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi*”, Y. Lisans Tezi, Fırat Üniv. Fen Bil. Ens., Elazığ, 1998.
- [8] Vatani, O. A. ve Dumanoglu, A. A., “*Çatlakların Beton Ağırlık Barajların Dinamik Davranışına Etkisi*”, TMMOB Teknik dergi, Cilt: 8, Sayı: 3, Sayfa: 1457-1470, Tem. 1997.
- [9] Calayır, Y., Dumanoglu, A. A. and Bayraktar, A., “*Earthquake Analysis of Gravity Dam-Reservoir Systems Using the Eulerian and Lagrangian Approaches*”, Computer and Structures, 59, 5, 877-890, 1996.
- [10] Wilson, E. L., and Khalvati, M., “*Finite Element for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems*”, Int. J. Num. Methods Eng., 19, 1657-1668, 1983.
- [11] Westergard, H. M., “*Water Pressures on Dams During Earthquakes*”, Transactions, ASCE, 98, 1835, 418-433, 1933.
- [12] Bangash, M. Y. H., “*Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications*”, Middlesex Polytechnic Faculty of Engineering, London, Elsevier Applied Science, 1989.
- [13] Swanson Analysis System, “*ANSYS 5.6 Volume Theory User's Manual*”, Chapter 8.1-8.5, 1996.
- [14] Zeinkiewicz, O. C., and Taylor Taylor, R. L., “*Finite Element Method*”, Vol.2, McGraw-Hill, 1991.
- [15] Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., “*Concept and Applications of Finite Element Analysis*”, John Wiley and Sons., Singapore, 1989.
- [16] Yang, R., Tsai, C. S. and Lee, G. C., “*Procedure for Time-domain Seismic Analyses of Concrete Dams*”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 122, 2, 116-122, 1996.
- [17] Fok, K. L. and Chopra, A. K., “*Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility*”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 114, 155-184, 1986.