

Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi: Euler ve Lagrange Çözümleri

Yusuf CALAYIR, Muhammet KARATON

*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Elazığ-TÜRKİYE
e-mail : ycalayir@firat.edu.tr*

Geliş Tarihi 12.03.2001

Özet

Bu çalışmada, sıvı-yapı sistemlerinin dinamik etkileşim problemi için Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre sonlu eleman formülasyonları verilmiştir. Euler ve Lagrange yaklaşımlarının etkinliklerini ortaya koymak amacıyla, Karakaya kemer barajının lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Baraj betonu için lineer olmayan malzeme modeli olarak Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır. Sıvı ve temel ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Karakaya barajı Türkiye deprem bölgeleri haritasında birinci derece deprem bölgesinde yer almakta olup, barajın bulunduğu alanda yapı ömrü içerisinde beklenen etkin pik ivme değeri 0,55g civarındadır. Sunulan çalışmadaki çözümler için dinamik etki olarak, 21 Temmuz 1952 Taft depreminin S69E ivme bileşeni seçilmiş olup, baraj-rezervuar-temel sistemine mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak elde edilen çözümler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen tepki büyüklükleri frekans açısından benzerlik arz etmektedir. Genliklerde ise kabul edilebilir farklar oluşmaktadır. Lagrange yöntemi kullanılarak sıvı-yapı sistemlerinin dinamik etkileşim problemlerinin bilgisayar programlanması ve mevcut bilgisayar programlarına uyarlanması Euler yöntemine göre daha basittir. Buna karşılık, Lagrange yaklaşımında daha fazla serbestlik derecesi söz konusu olduğundan bilgisayar hafızası ve çözüm zamanına olan ihtiyaç artar.

Anahtar Sözcükler: Sıvı-yapı etkileşimi, Euler yaklaşımı, Lagrange yaklaşımı, Drucker-Prager akma kriteri ve Dinamik analiz.

Non-Linear Dynamic Analysis of Arch Dams: Eulerian and Lagrangian Solutions

Abstract

In this study, Eulerian and Lagrangian finite element formulations are given for the dynamic interaction problem of a fluid-structure system. Non-linear dynamic analyses of Karakaya arch dam were performed to obtain the effectiveness of the Eulerian and Lagrangian approaches. The Drucker-Prager yield criterion was used for the non-linear model of dam concrete. The fluid and foundation domains were considered to be linearly elastic. The Karakaya Dam is located in the first zone of Turkey's seismic zone map. The expected effective peak acceleration value at the dam site is about 0.55g over its structural life. For the dynamic input used in the solutions of the presented study, the S69E component of the 21 July, 1952 Taft earthquake was selected as the horizontal component, acting in the downstream-upstream direction of the dam-reservoir-foundation system. The Eulerian and Lagrangian solutions were compared with each other. The results obtained from both methods were similar in terms of frequency. However, acceptable differences in amplitudes occurred. The programming of the dynamic interaction problems of fluid-structure systems

using the Lagrangian approach and incorporating this programme into existing computer programs are simpler with respect to that of the Eulerian approach. Nevertheless, the requirement for computing memory and time are increased because the Lagrangian approach requires the use of significantly more degrees of freedom.

Key Words: Fluid-structure interaction, Eulerian approach, Lagrangian approach, Drucker-Prager yield criterion, Dynamic analysis.

Giriş

Barajlar, genelde sulama ve enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yapılırlar. Arkalarında büyük miktarda su biriktiren bu yapıların inşasına halen devam edilmekte ve gelecekte de devam edilmesi beklenmektedir. Ülkemiz gibi deprem riskinin yüksek olduğu ve güçlü yer sarsıntılarının meydana geldiği bölgelerde bu tip yapıların hasar görmesi veya yıkılması ekonomik ve sosyal açıdan telafisi çok güç olan sonuçlar doğurabilir. Bu sebeple güçlü yer sarsıntılarının olduğu ve beklendiği bölgelerde inşa edilen ve projelendirilen barajların, çatlak, kırılma ve hasar gibi davranışları dikkate alan gelişmiş tekniklerle analiz edilmesi ve buna göre önlemlerin alınması gerekmektedir (Carvera ve Oliver, 1995; Dowling, 1987; Karaton, 1998; Lee ve Fenves, 1998; Manfredi ve Ramasco, 1993; Rodriguez ve Aristizabal, 1999; Vatani ve Dumanoğlu, 1997).

Barajlar sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda yapı sıvının, sıvı da yapının dinamik davranışını önemli ölçüde etkiler. Sıvı ortamında hidrodinamik basınçlar (hidrostatik basınç fazlası), yapı ortamında ise bu basınçlardan dolayı ilave yükler oluşmaktadır. Sıvı-yapı etkileşim problemi Euler, Lagrange ve Kütle Ekleme yaklaşımlarından biriyle modellenabilir (Calayır, 1994; Calayır ve arkadaşları, 1996; Olson ve Bathe, 1983; Wilson ve Khalvalti, 1983). Euler yaklaşımında, sıvı ortamında basınçlar (veya hız potansiyelleri), yapı ortamında ise yer değiştirmeler değişken olarak seçilir. Lagrange yaklaşımında, hem yapı ve hem de sıvı ortamlarında yer değiştirmeler değişken olarak alınır. Sıvı ortamının hidrodinamik basınçlarını barajın memba yüzeyi üzerinde toplanan bir ilave kütleyle eşdeğer olarak kabul eden yaklaşım ise Kütle Ekleme metodu olarak bilinir (Westergard, 1933).

Bu çalışmada, sıvı-yapı sistemlerinin dinamik etkileşim problemi için Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre sonlu eleman formülasyonları sunulmuştur. Yaklaşımların etkinliklerini ortaya koymak amacıyla, Karakaya kemer barajının lineer olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Baraj beto-

nunun lineer olmayan malzeme modeli için Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır (Bangash, 1989). Sıvı ve temel ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği ve sonlu uzunluğa sahip olduğu kabul edilmiştir. Temel ortamı ise kütsüz alınmıştır. Karakaya barajı Türkiye deprem bölgeleri haritasında birinci derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Risk analizinde A.B.D.'de R_i yıllık risk değeri baraj yapıları için %5 olarak alınmaktadır (Algermissen ve Perkins, 1976). Bu tür yapılar için ekonomik ömür 50~75 yıl arasında değişmektedir. Ekonomik ömür 50 yıl alındığında %5 aşılma olasılığıyla barajın bulunduğu alanda beklenen pik ivme değeri 0.55g civarında olmaktadır (Gülkan ve arkadaşları, 1993). Barajların tasarım veya yeniden gözden geçirme analizlerinde yukarıda verilen değere yakın pik ivmeye sahip ve frekans içeriği yönünden uygun depremler kullanılmalıdır. Farklı iki yaklaşımın çözümlerini karşılaştırmak amacıyla hazırlanmış olan bu makalede dinamik etki olarak, Kaliforniya eyaletinin Kern ilçesi 21 Temmuz 1952 Taft depremi sırasında Taft Lincoln okulu tüneline kaydedilen yer hareketinin S69E ivme bileşeni seçilmiş ve baraj-rezervuar-temel sistemine mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Karakaya kemer barajının Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre lineer olmayan çözümleri elde edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin etkinlikleri irdelenmiştir.

Sıvı-Yapı Etkileşimi için Euler Yaklaşımı

Euler yaklaşımı, barajlar ve su depoları gibi sıvı-yapı etkileşimine maruz sistemlerin sonlu ve sınır eleman yöntemleriyle analizinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sıvı-yapı sistemlerinin Euler yaklaşımıyla analizinde, yapının hareketi yer değiştirmeler cinsinden, sıvının hareketi ise basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Sıvı-yapı ara yüzeyindeki etkileşimden dolayı ortak hareket meydana gelmektedir. Bu nedenle, çözüm için özel ara yüzey denklemlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu kısımda önce sıvı hareketi ile ilgili temel bağıntılar ve bunların sonlu eleman formu ve daha

sonra sıvı-yapı sistemi için ortak denklemler verilecektir.

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

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

dalga denklemiyle verilmektedir (Cook ve arkadaşları, 1989; Zienkiewicz ve Taylor, 1991). Burada x,y,z Kartezyen koordinatları, t zamanı ve C sıvıdaki basınç dalgası hızını (buna sıvıdaki ses dalgası hızı da denmektedir) belirtmektedir. $P_{,ii}$ ise hidrodinamik basıncın i değişkenine göre iki kez kısmi türevini göstermektedir. Her hangi bir etki sonucu sıvı sisteminde oluşan hidrodinamik basınçlar (1) denkleminin uygun sınır şartları altında çözümlenmesiyle elde edilir. Bu sınır şartları,

$$P = 0 \quad (2)$$

(sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgaları yoksa)

$$P = \rho g u_{sf} \quad (3)$$

(sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgaları varsa)

$$P_{,n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (\text{sıvı-yapı ara yüzeyinde}) \quad (4)$$

olarak tanımlanabilir. Burada, ρ sıvının kütle yoğunluğunu, g yer çekim ivmesini, n sıvı-yapı ara yüzeyindeki sıvı yüzey normalini, \ddot{u}_n bu yüzey normaline doğrultusundaki ivmeyi ve u_{sf} ise sıvı serbest yüzeyinin düşey doğrultudaki yer değiştirmesini ifade etmektedir.

Baraj-rezervuar sistemlerinde sıvı yüzey dalgalarının çözümler üzerindeki etkisi ihmal edilebilir mertebede olduğundan (Chopra, 1967), bu çalışmada sıvı yüzey dalgalarının etkisi göz önüne alınmamaktadır. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra sıvı sistemine ait sonlu eleman hareket denklemleri matris formunda,

$$\left[M_f^p \right] \left\{ \ddot{P} \right\} + \left[K_f^p \right] \left\{ P \right\} = -\rho [R]^T \left\{ \ddot{U}_{fs} \right\} \quad (5)$$

olarak yazılabilir. Burada $\left[M_f^p \right]$ ve $\left[K_f^p \right]$ sırasıyla sıvı ortamın kütle ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $[R]$ ise 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. Bu denklemdaki $\left\{ \ddot{U}_{fs} \right\}$ sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmelerini, $\left\{ P \right\}$ hidrodinamik basınç vektörünü ve $\left\{ \ddot{P} \right\}$ ise bu vektörün zamana göre iki kez kısmi türevini göstermektedir.

Yapı ortamının dinamik hareketine ait sonlu eleman denklemleri,

$$\left[M_s \right] \left\{ \ddot{U}_s \right\} + \left[C_s \right] \left\{ \dot{U}_s \right\} + \left[K_s \right] \left\{ U_s \right\} = \left\{ F \right\} + \left\{ F_{fs} \right\} \quad (6)$$

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

$$\left\{ F_{fs} \right\} = [R] \left\{ P \right\} \quad (7)$$

olarak ifade edilebilir. Böylece sıvı-yapı sistemine ait ortak hareket denklemleri (5) ve (6) denklemlerinin,

$$\left[\begin{array}{cc} \left[M_s \right] & [0] \\ \left[M_{fs} \right] & \left[M_f^p \right] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \left\{ \ddot{U}_s \right\} \\ \left\{ \ddot{P} \right\} \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{cc} \left[C_s \right] & [0] \\ [0] & [0] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \left\{ \dot{U}_s \right\} \\ \left\{ \dot{P} \right\} \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{cc} \left[K_s \right] & \left[K_{fs} \right] \\ [0] & \left[K_f^p \right] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \left\{ U_s \right\} \\ \left\{ P \right\} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \left\{ F \right\} \\ \left\{ 0 \right\} \end{array} \right\} \quad (8)$$

şeklinde birleştirilmesiyle elde edilebilir. Burada,

$$\left[M_{fs} \right] = \rho [R]^T \quad (9)$$

$$\left[K_{fs} \right] = -[R] \quad (10)$$

eşitlikleri ile tanımlanmaktadır.

Sıvı-Yapı Etkileşimi için Lagrange Yaklaşımı

Euler yaklaşımında sıvı ve yapı ortamındaki değişkenler farklı olduğundan, sıvı-yapı sistemlerinde özel ara yüzey denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Buna karşılık, Lagrange yaklaşımında, hem sıvı ve hem de yapı ortamlarında aynı değişkenler (yer değiştirmeler) kullanıldığı için özel ara yüzey denklemlerinin oluşturulmasına gerek yoktur. Dolayısıyla, sistemin ara yüzeyindeki sonlu eleman düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır (Calayır,

1994; Calayır ve arkadaşları, 1996; Wilson ve Khalvalti, 1983). Burada önce lineer-elastik, rotasyonsuz ve viskoz olmayan bir sıvının küçük yer değiştirmeler yapması hali için temel denklemler sunulacak ve daha sonra sonlu eleman formülasyonuna geçilecektir. Böyle bir sıvıda oluşan basınç,

$$P = \beta \varepsilon_v \quad (11)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Bu bağıntıda P basıncı (Çekme pozitif), β hacimsel elastisite modülünü, ε_v ise hacimsel şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. Hacimsel şekil değiştirme üç boyutlu kartezyen koordinatlarda ,

$$\varepsilon_v = U_{x,x} + U_{y,y} + U_{z,z} \quad (12)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada, $U_{i,j}$ i. yer değiştirme bileşeninin j doğrultusuna göre kısmi türevini ifade etmektedir. Sıvının gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına rotasyonlar ve bu rotasyonlarla ilgili uygun kısıtlama parametreleri yerleştirilmektedir. Bu parametrelerin büyük değerde seçilmesiyle sıvı rotasyonsuz hale yaklaşacaktır. Üç boyutlu durumda sıvının rotasyon ifadeleri,

$$\begin{aligned} W_x &= \frac{1}{2} (U_{y,z} - U_{z,y}) \\ W_y &= \frac{1}{2} (U_{z,x} - U_{x,z}) \\ W_z &= \frac{1}{2} (U_{x,y} - U_{y,x}) \end{aligned} \quad (13)$$

formunda yazılabilir. Burada W_i , i eksenine etrafındaki rotasyonu göstermektedir. Söz konusu rotasyonlarla ilgili gerilmeler,

$$P_i = \alpha_i W_i \quad i = x, y, z \quad (14)$$

denklemleri ile verilebilir. Bu denklemde P_i ve α_i sırasıyla, W_i ile ilgili gerilme ve kısıtlama parametresini belirtmektedir. Sıvının matris formundaki üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (11) ve (14) denklemleri kullanılarak,

$$\begin{bmatrix} P \\ P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_v \\ W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

veya

$$\{\sigma\} = [D]\{e\} \quad (16)$$

olarak yazılabilir. Denklem (16)' da $\{\sigma\}$ ve $\{e\}$ sıvının gerilme ve şekil değiştirme vektörlerini, $[D]$ ise elastisite matrisini göstermektedir.

Bu çalışmada, sıvı sisteminin hareket denklemleri enerji prensiplerinden yararlanılarak elde edilmektedir. Böyle bir sıvı sisteminin şekil değiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int \{e\}^T [D] \{e\} dV \quad (17)$$

denklemleri ile verilebilir. Sıvı sistemlerinin önemli davranışlarından birisi de, hacimde bir değişim olmadan yer değiştirme yapabilmeleridir. Rezervuar ve sıvı tankları için bu hareket, yer değiştirmenin düşey olduğu yüzey dalgaları şeklindedir. Bu hareketle ilgili sıvı enerjisi,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \int \rho g u_{sf}^2 dA \quad (18)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Sonuç olarak sistemin toplam potansiyel enerjisi için,

$$\pi_t = \pi_e + \pi_s \quad (19)$$

eşitliği yazılabilir. Sıvı sistemine ait kinetik enerjinin tanımlanması ile sıvı sisteminin davranışı ile ilgili enerji bağıntıları tamamlanmış olacaktır. Bir sıvı sisteminin üç boyutlu halde toplam kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \int \rho (\dot{U}_x^2 + \dot{U}_y^2 + \dot{U}_z^2) dV \quad (20)$$

denklemleri ile verilebilir. Bu bağıntıdaki \dot{U}_i , i. hız bileşenini göstermektedir. Sonlu eleman yaklaşımındaki temel adımlar kullanılarak, (17) denklemleri ile verilen sıvı sisteminin şekil değiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \{U_f^d\}^T [K_f^d] \{U_f^d\} \quad (21)$$

olarak elde edilebilir. Bu formüldeki, $[K_f^d]$ ve $\{U_f^d\}$ sırasıyla sıvı sistemin rijitlik matrisini ve düğüm noktası yer değiştirme vektörünü göstermektedir. Sıvı yüzey hareketi ile ilgili (18) denklemleri,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \{U_{sf}^d\}^T [S_f^d] \{U_{sf}^d\} \quad (22)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $\{U_{sf}^d\}$ ve $[S_f^d]$ sıvı serbest yüzeyinin sırasıyla, düşey yer değiştirme vektörünü ve rijitlik matrisini belirtmektedir. Sıvı

sisteminin kinetik enerjisini temsil eden (20) denklemi benzer şekilde,

$$T = \frac{1}{2} \{ \dot{U}_f^d \}^T [M_f^d] \{ \dot{U}_f^d \} \quad (23)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemdeki $\{ \dot{U}_f^d \}$ sıvı sistemin düğüm noktası hız vektörünü, $[M_f^d]$ ise sıvı sistemin kütle matrisini ifade etmektedir.

Sıvı sisteminin sonlu eleman hareket denklemlerini elde etmek için (21), (22) ve (23) bağıntıları, Lagrange denkleminde (Calayır, 1994) kullanılıp gerekli işlemler yapıldıktan sonra,

$$[M_f^d] \{ \ddot{U}_f^d \} + [K_f^d] \{ U_f^d \} + [S_f^d] \{ U_f^d \} = \{ F_f \} \quad (24)$$

veya

$$[M_f^d] \{ \ddot{U}_f^d \} + [K_f^d]^* \{ U_f^d \} = \{ F_f \} \quad (25)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\{ \ddot{U}_f^d \}$ sıvı sisteminin düğüm noktası ivme vektörünü, $[K_f^d]^*$ sıvı serbest yüzeyi rijitliğini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisini, $\{ F_f \}$ ise zamana bağlı düğüm noktası kuvvet vektörünü ifade etmektedir. Sonlu eleman matrislerinin sayısal elde edilmesinde Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen indirgenmiş integrasyon mertebeleri kullanılmaktadır. İndirgenmiş integrasyonun kullanılması, elde edilecek sonuçların gerçeğe daha yakın olmasını sağlamaktadır. Lagrange sıvı sonlu elemanlar kullanılarak yapılan nümerik testlerde; bu elemanların bir çok sıvı-yapı etkileşim problemi için başarıyla kullanılabileceği belirtilmektedir (Calayır, 1994; Greeves, 1991; Olson ve Bathe, 1983).

Yapı ortamının sönümlü haldeki hareket denklemi,

$$[M_s] \{ \ddot{U}_s \} + [C_s] \{ \dot{U}_s \} + [K_s] \{ U_s \} = \{ F_s \} \quad (26)$$

formunda yazılabilir. Sıvı-yapı sisteminin ortak hareket denklemlerini elde etmek için (25) ve (26) denklemlerine ek olarak ara yüzey şartlarının da kullanılması gerekir. Sıvı-yapı ara yüzeyinde ara yüzeye dik doğrultudaki yer değiştirmeler birbirine eşit olmaktadır. Bu şart kullanılarak, sıvı-yapı sisteminin ortak hareket denklemleri,

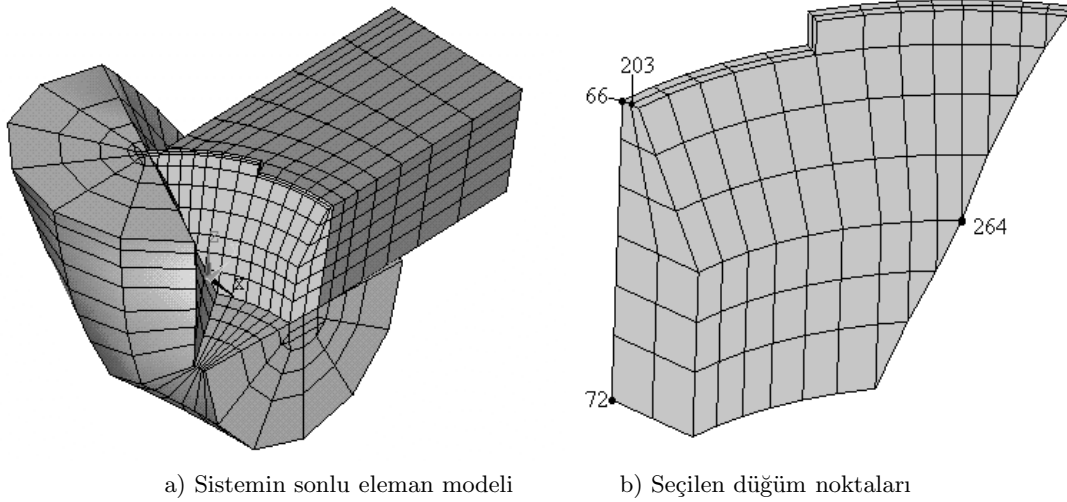
$$[M_c] \{ \ddot{U}_c \} + [C_c] \{ \dot{U}_c \} + [K_c] \{ U_c \} = \{ F_c \} \quad (27)$$

olarak elde edilebilir. Burada, $[M_c]$, $[C_c]$ ve $[K_c]$ ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{ \ddot{U}_c \}$, $\{ \dot{U}_c \}$ ve $\{ U_c \}$ ifadeleri ise aynı sistemin rölatif ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini temsil etmektedir. $\{ F_c \}$ ortak sistemin yük vektörüdür.

Sayısal 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 yarı çapı 225 m ve kret seviyesinde kalınlığı 10 m, taban kısmında ise 50 m dir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sol yarı parçası Şekil 1' de sunulmuştur. Şekil 1' de ayrıca bu sonlu eleman ağında yer değiştirme ve gerilmelerin zamanla değişim grafiklerinin çizildiği dört düğüm noktası gösterilmiştir. Baraj sonlu eleman modelinde 28 adet üçgen prizmatik ve 228 adet dikdörtgen prizmatik eleman kullanılmıştır.

Temel kayası esnek ve kütesiz 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 sonlu kabul edilmiş olup barajın mansap-memba doğrultusunda baraj yüksekliğinin iki katı kadar alınmıştır. Sıvı ortamın her iki yaklaşım için oluşturulan sonlu eleman modelinde de 84 adet üçgen prizmatik ve 714 adet dikdörtgen prizmatik eleman kullanılmıştır. Her iki yaklaşımda kullanılan toplam düğüm noktası sayısı eşittir. Euler yaklaşımı için 4011 yer değiştirme serbestliği ve 952 basınç serbestliği olmak üzere toplam 4963 adet serbestlik derecesi ve Lagrange yaklaşımında ise sadece yer değiştirme serbestlikleri olup toplam 6867 adet serbestlik derecesi vardır. Dolayısıyla, sistemin Lagrange sonlu eleman modeli için daha fazla bilgisayar hafızası alanı gerekmektedir. Barajın dinamik analizi için Kaliforniya eyaletinin Kern ilçesi 21 Temmuz 1952 Taft depremi sırasında Taft Lincoln okulu tüneline kaydedilen yer hareketinin S69E ivme bileşeni seçilmiş ve baraj-rezervuar-temel sistemine mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Maksimum ivmesi 0,18g olan bu ivme bileşeni Şekil 2' de sunulmuştur.



a) Sistemin sonlu eleman modeli

b) Seçilen düğüm noktaları

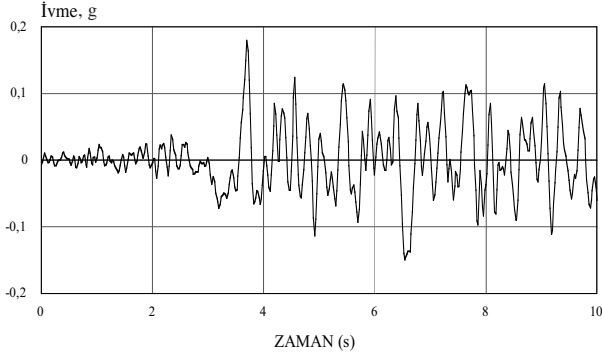
Şekil 1. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sonlu eleman modeli ve büyüklüklerin (yer değiştirme ve gerilme) zamanla değişim grafiklerinin çizildiği düğüm noktaları.

Beton, malzeme olarak lineer olmayan bir şekil değiştirme davranışıyla karakterize edilir. Malzemenin lineer olmayan davranışı betonun çekmede çatlaması, basınçta ise plastikleşmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Drucker-Prager yaklaşımı bu etkilerin göz önüne alınabileceği bir malzeme modelidir (Bangash,1989). Bu yaklaşım, von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde geliştirilmesinden elde edilmiştir. c kohezyonu ve ϕ içsel sürtünme açısına bağlı olarak ifade edilen Drucker-Prager yaklaşımının akma yüzeyi dik bir koni biçiminde olup Şekil 3' te sunulmuştur. Bu grafiksel gösterim malzemenin çekme ve basınçtaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 3' te geçen σ_1 , σ_2 ve σ_3 büyüklükleri asal gerilmeleri temsil etmektedir. Drucker-Prager yaklaşımında plastik şekil değiştirme hacimdeki değişimle birlikte ortaya çıkmaktadır. Çalışmada kullanılan betonunun elastisite modülü $30,23 \times 10^3$ MPa, birim hacim ağırlığı $24,350$ kN/m³ ve Poisson oranı $0,2$ alınmıştır. 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. Suyun birim hacim ağırlığı $\rho=1,0$ t/m³ ve hacimsel elastisite modülü 2070 MPa olarak alınmıştır. Buna göre sudaki basınç dalgası hızı (veya sudaki ses dalgası hızı) $C = 1438,75$ m/s olmaktadır. Lagrange yaklaşımında kullanılan sıvı rotasyon kısıtlama parametreleri hacimsel elastisite modülünün bin katı alınmıştır. Temel kayasının elastisite modülü $17,358 \times 10^3$ MPa ve Poisson oranı $0,2$ kabul edilmiştir. Rayleigh sönüm sabit-

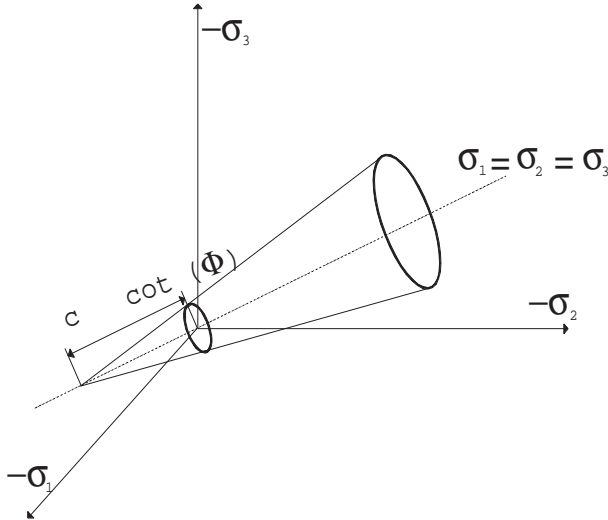
leri $3,3147$ Hz (sistemin ilk frekansı) ve 25 Hz' lik frekanslarda $\%5$ ' lik bir sönümü sağlayacak şekilde hesaplanmıştır. İlk frekans rezervuarın boş olduğu kabulüne göre hesaplanan sistemin temel frekansını belirtmektedir. Çözümde kullanılan integrasyon zaman adımı $0,001$ sn olarak seçilmiştir. Hesaplamalar, ANSYS 5.6 programı kullanılarak elde edilmiştir (Swanson analysis system, 1989).

Baraj-rezervuar ve baraj-temel etkileşimleri dikkate alınarak Karakaya kemer barajının sözü edilen depremin etkisindeki Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre lineer olmayan dinamik çözümleri yapılmıştır. Hesap zamanı açısından, Lagrange çözümleri Euler çözümlerine göre yaklaşık olarak $\%50$ civarında daha fazla zaman almaktadır. Her iki çözümden elde edilen 203 nolu düğüm noktası yer değiştirmesinin zamanla değişimi Şekil 4' te sunulmuştur. Her iki çözüm genelde birbirine benzer seyretmektedir. 4 üncü saniye civarına kadar aralarında fark gözlenmezken, bu andan sonra genlikler arasındaki farklar belirginleşmektedir. Euler ve Lagrange çözümlerinde 4 üncü s.' de barajda hasarlar (plastik şekil değiştirme) ortaya çıkmaya başlamaktadır. İlk hasar, birinci yaklaşımda barajın mansap yüzünde eğimin değiştiği ambuantman orta bölgesinde; ikinci yaklaşımda ise memba yüzünde krete yakın orta konsol bölgesinde meydana gelmektedir. Hasarlar, gerilmeye yeniden bir dağılıma sebep olduğundan çözümleri etkilemesi doğaldır. Yer değiştirme genliklerinde $\%15$ ' e varan lokal farklar oluşabilmektedir. 66, 72 ve 264 nolu düğüm noktalarında Euler ve Lagrange çözümlerinden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin

zamanla değişimleri sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7' de sunulmuştur. 66 ve 72 nolu düğüm noktaları barajın memba yüzünde, 264 nolu düğüm noktası ise barajın mansap yüzünde bulunmaktadır. Bu düğüm noktalarına ait maksimum ve minimum asal gerilmeler karşılaştırıldığında Euler ve Lagrange çözümleri birbirine benzerlik arz etmektedir. Her iki çözümün genlikleri arasındaki lokal maksimum fark % 15 civarında ortaya çıkmaktadır. Lagrange çözümleri genlik açısından genelde daha büyük değer almaktadır.



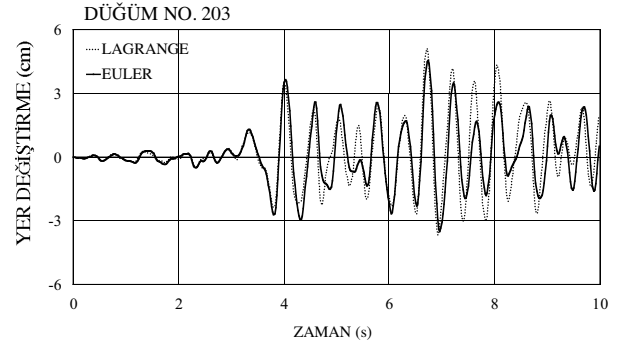
Şekil 2. 21 Temmuz 1952 Taft depreminin S69E yatay ivme bileşeni.



Şekil 3. Drucker-Prager yaklaşımının asal gerilme uzayındaki akma yüzeyi.

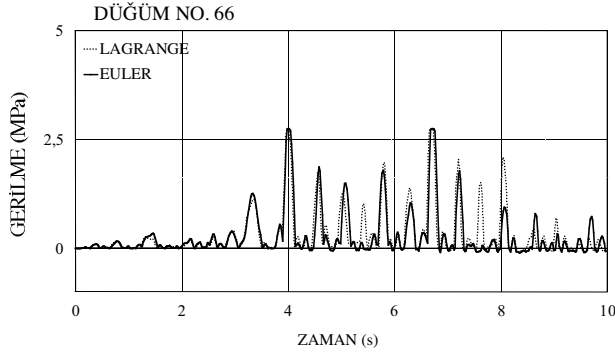
Euler çözümlerine ait baraj memba ve mansap yüzeyleri maksimum ve minimum asal eş gerilme eğrileri, sırasıyla Şekil 8-9' da verilmiştir. Eğriler üzerinde belirtilen sayısal değerler kN/m² cinsinden verilmiştir. Söz konusu bu gerilmeler, tüm zaman adımlarındaki maksimum ve minimum asal

gerilmelerin ekstrem değerleridir. Maksimum asal gerilmeler memba yüzeyinde taban ve ambuantmanlardan krete doğru genelde artış göstermekte ve krete yakın orta konsol bölgesinde maksimum değerler almaktadır. Mansap yüzeyinde ise eğimin değiştiği ambuantmanların orta bölgesinden krete doğru asal maksimum gerilmelerin büyük değerler aldığı gözlenmektedir. Minimum asal gerilmelerin yayılışı da maksimum asal gerilmelere benzer olarak ortaya çıkmaktadır. Lagrange yaklaşımından elde edilen baraj memba ve mansap yüzeyleri maksimum ve minimum asal eş gerilme eğrileri ise, sırasıyla Şekil 10-11' de verilmiştir. Maksimum ve minimum asal gerilmeler genelde Euler yaklaşımına benzer bir yayılış sergilemektedir. Gerilmelerin büyüklüğü açısından değerlendirildiğinde; maksimum asal gerilmeler için Lagrange çözümleri, Euler çözümlerine göre yaklaşık olarak % 3, minimum asal gerilmeler için ise % 15 civarında daha büyüktür.

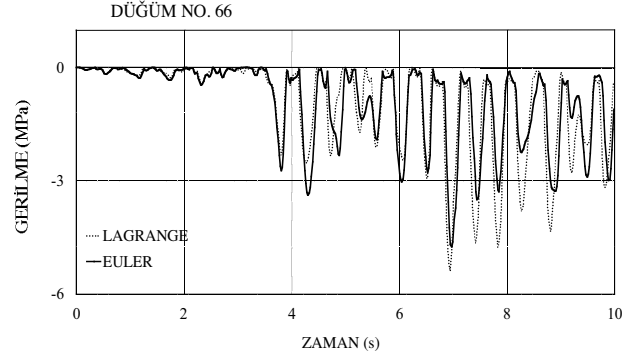


Şekil 4. Lineer olmayan Euler ve Lagrange çözümlerinden elde edilen 203 nolu düğüm noktasının radyal yer değiştirmesinin zamanla değişimi.

Euler çözümünde 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 eğimin değiştiği ambuantman 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. Barajın memba ve mansap yüzeyleri için maksimum ve minimum eş hasar eğrileri sırasıyla Şekil 12 ve 13' de sunulmuştur. Şekilde verilen hasar değerleri metre cinsindedir. Maksimum eş hasar bölgeleri; barajın memba yüzeyinde krete yakın orta konsol civarında geniş bir bölge, mansap yüzeyinde

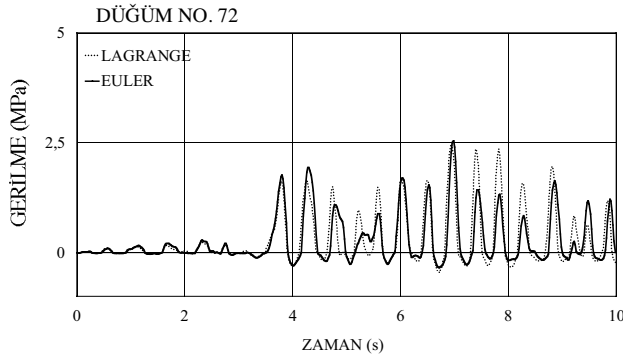


a) Maksimum asal gerilme

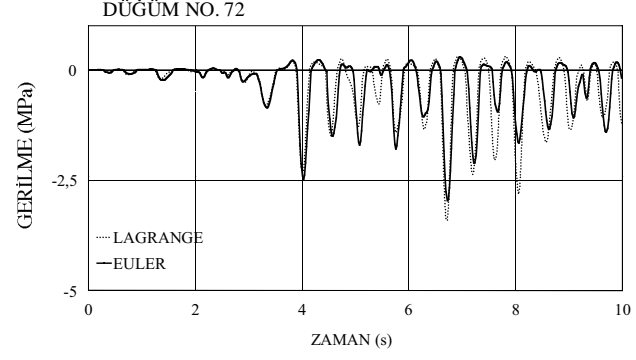


b) Minimum asal gerilme

Şekil 5. Lineer olmayan Euler ve Lagrange çözümlerinden elde edilen 66 nolu düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.

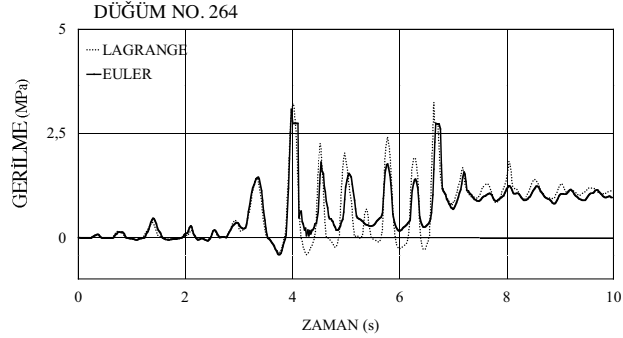


a) Maksimum asal gerilme

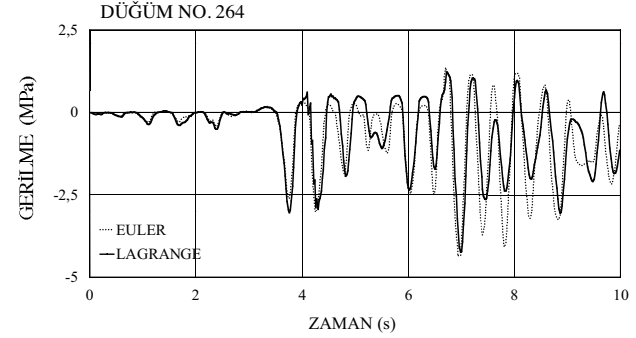


b) Minimum asal gerilme

Şekil 6. Lineer olmayan Euler ve Lagrange çözümlerinden elde edilen 72 nolu düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.



a) Maksimum asal gerilme



b) Minimum asal gerilme

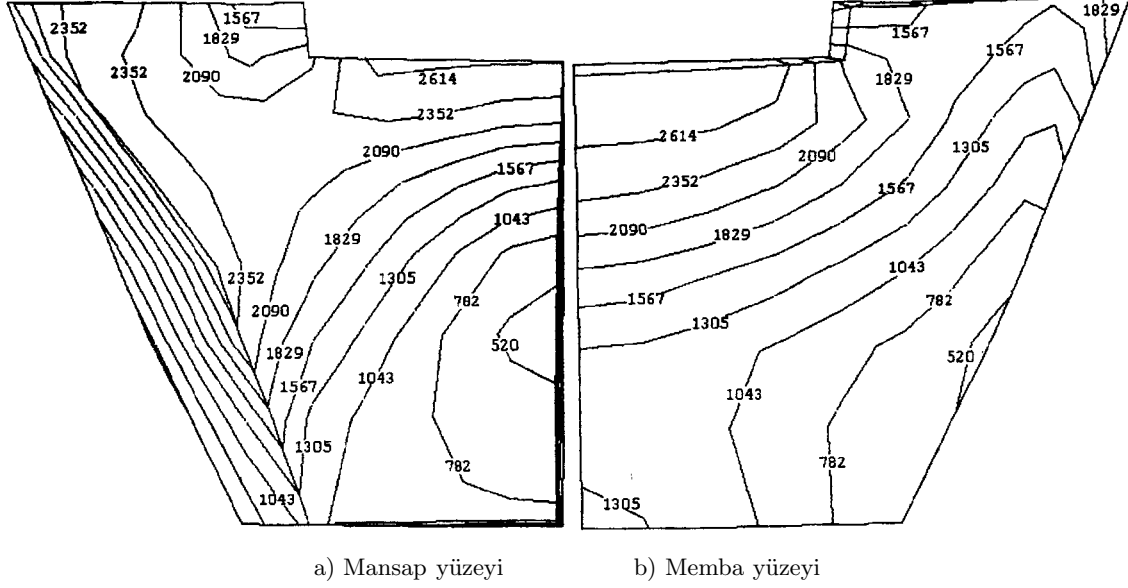
Şekil 7. Lineer olmayan Euler ve Lagrange çözümlerinden elde edilen 264 nolu düğüm noktasına ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.

ise ambuantman 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. La-

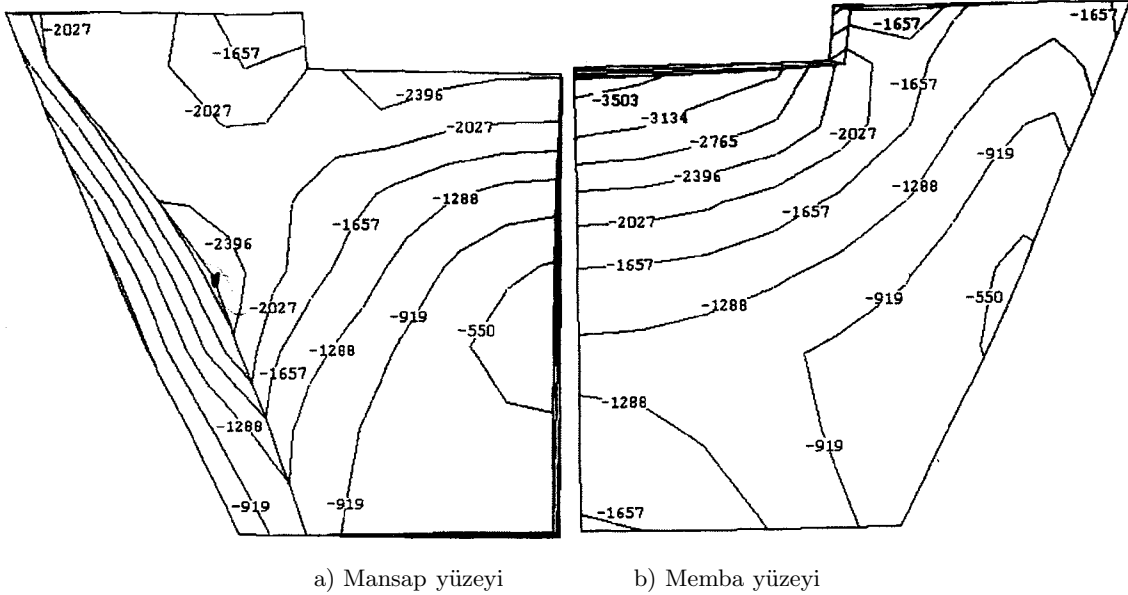
grange çözümünde ise gerilmeler 4,0' üncü saniyede betonun çekme dayanımını 66 nolu düğüm noktası civarında aşmakta ve buna bağlı olarak bu bölgede baraj betonunda hasarlar oluşmaya başlamaktadır. Bir zaman adımı sonra barajın mansap yüzünde

eğiminin değiştiği ambuantman orta bölgesinde de hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasar bölgeleri zamana bağlı olarak artış göstermektedir. Lagrange çözümünden elde edilen baraj memba ve mansap yüzeyleri maksimum ve minimum eş hasar eğrileri sırasıyla Şekil 14 ve 15’ de sunulmuştur. Söz konusu maksimum ve minimum eş hasar bölgeleri, Euler çözümüne ait eş hasar bölgelerine benzer

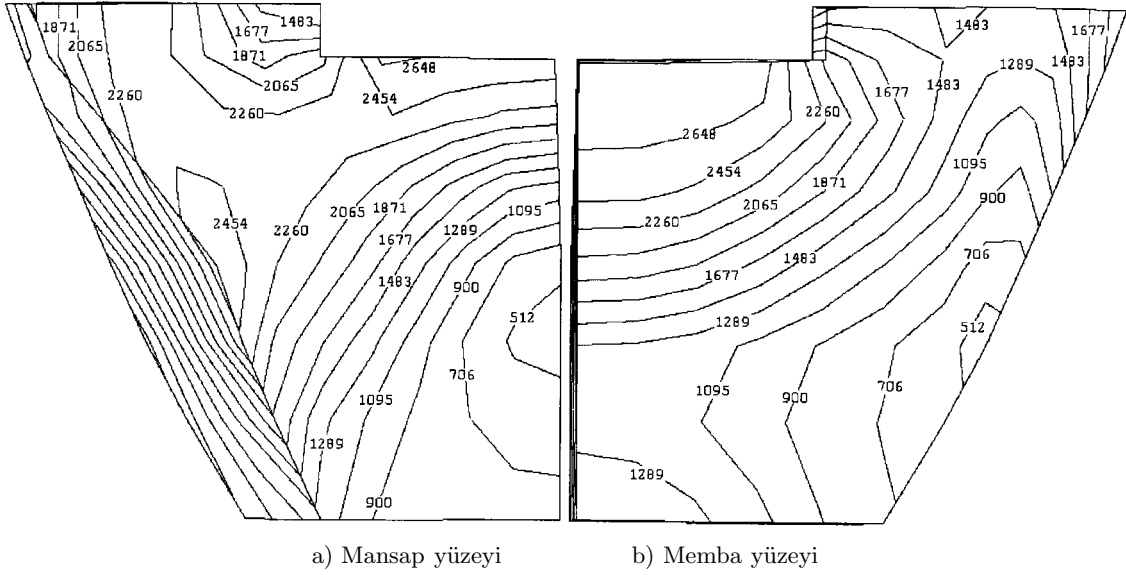
bir yayılış sergilemektedir. Lagrange çözümüne ait hasar bölgelerinin yayıldığı alan barajın memba yüzeyinde Euler çözümüne göre daha geniş, mansap yüzeyinde ise hemen hemen aynıdır. Hasarın şiddeti açısından değerlendirilecek olursa; maksimum hasar değerlerinde Lagrange çözümleri, Euler çözümlerine göre yaklaşık olarak % 8, minimum hasar değerleri için ise % 10 civarında daha büyüktür.



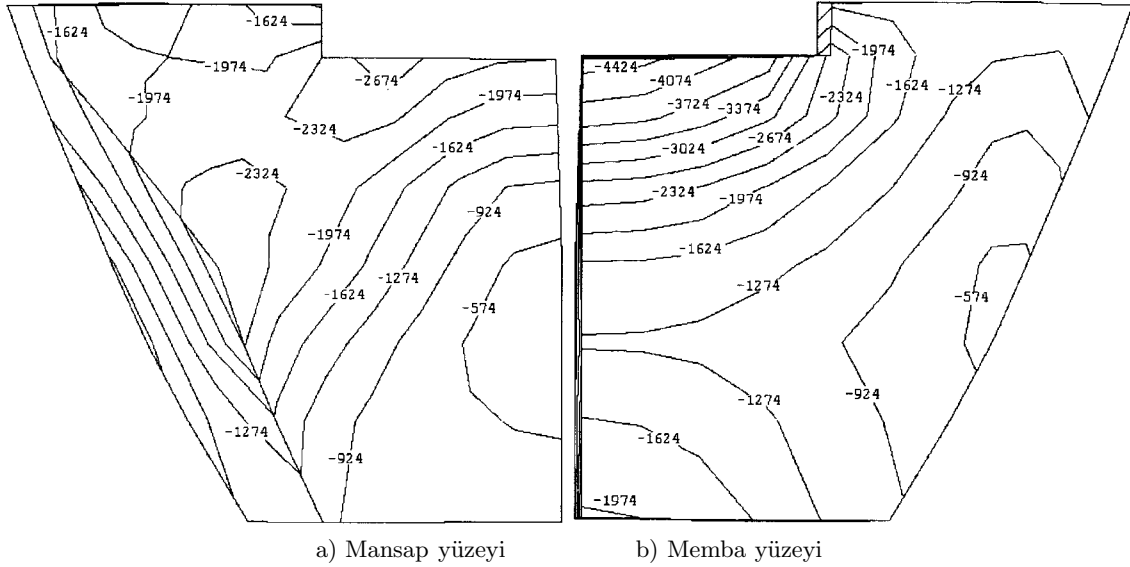
Şekil 8. Linear olmayan Euler çözümlerinden elde edilen maksimum asal eş gerilme eğrileri.



Şekil 9. Linear olmayan Euler çözümlerinden elde edilen minimum asal eş gerilme eğrileri.



Şekil 10. Lineer olmayan Lagrange çözümlerinden elde edilen maksimum asal eş gerilme eğrileri.



Şekil 11. Lineer olmayan Lagrange çözümlerinden elde edilen minimum asal eş gerilme eğrileri.

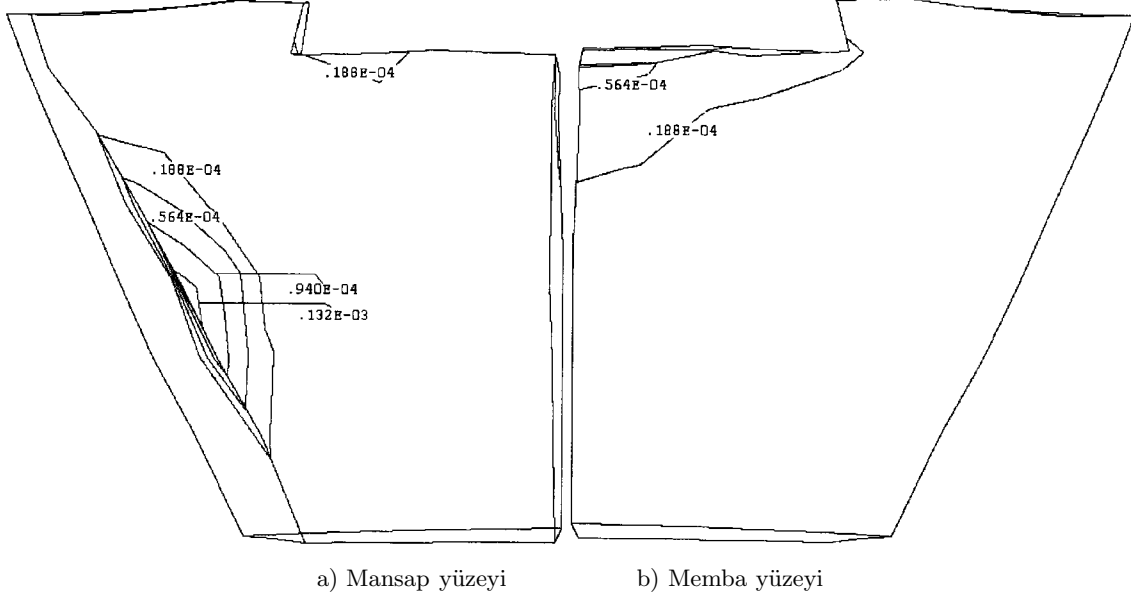
Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, sıvı-yapı sistemlerinin dinamik etkileşim problemi için Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre sonlu eleman formülasyonları verilmiştir. Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak Karakaya kemer barajının lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Baraj gövdesi için lineer olmayan malzeme modeli olarak Drucker-Prager akma kriteri kullanılmıştır. Sıvı ve temel ortamlarının lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Dinamik etki olarak, 21 Temmuz 1952

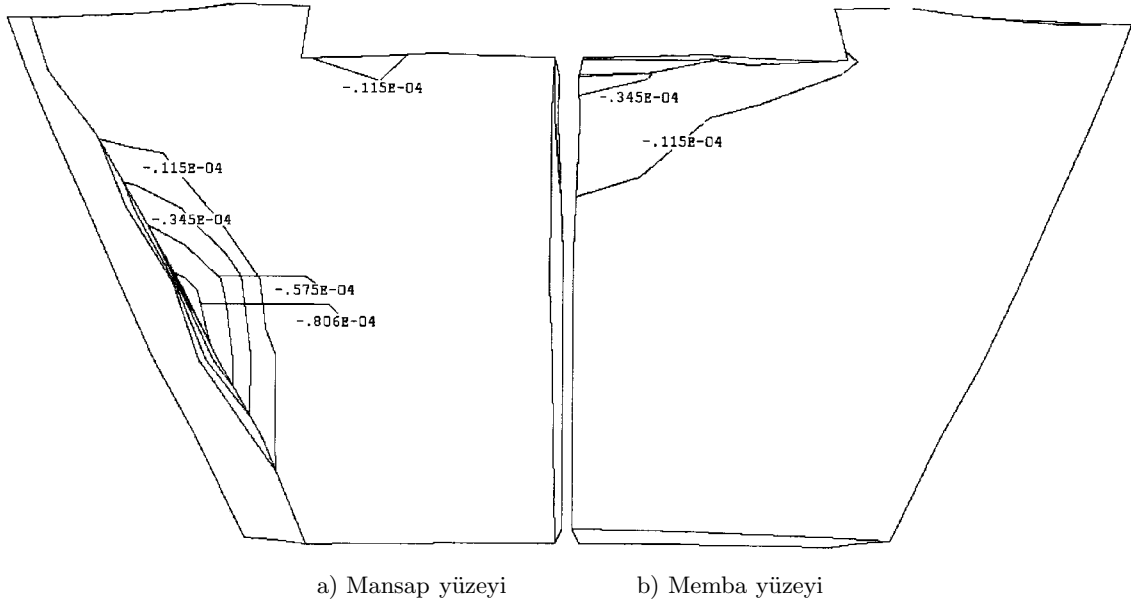
Taft depreminin S69E ivme bileşeni seçilmiş olup baraj-rezervuar-temel sistemine mansap-memba doğrultusunda etki ettirilmiştir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin Lagrange ve Euler sonlu eleman modellerinde düğüm noktası sayısı eşit seçilmesine rağmen serbestlik derecesi sayısı farklı olmaktadır. Lagrange modelinde serbestlik derecesi sayısı daima daha fazladır. Doğal olarak, Lagrange çözümleri daha fazla hesap zamanı ve bilgisayar hafızası gerektirmektedir. Euler ve Lagrange çözümleri için çizilen (yer değiştirme ve gerilme) zamanla değişim

grafikleri frekans açısından genellikle birbirine benzer davranış sergilemekte; genliklerde ise global olarak küçük, lokal olarak biraz daha büyük farklar oluşmaktadır. Asal maksimum ve minimum eş gerilme eğrileri ile asal maksimum ve minimum eş hasar eğrilerinde Euler ve Lagrange çözümleri genelde birbirine benzer bir yayılış göstermektedir. Ekstrem değerler açısından kullanılan deprem için Lagrange

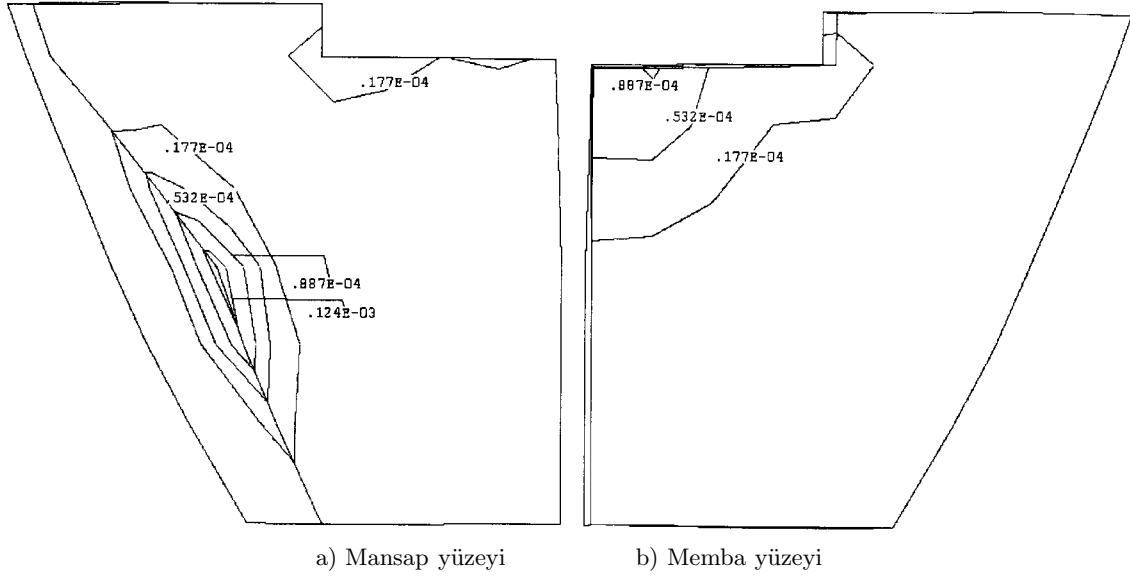
çözümleri Euler çözümlerinden daha büyük olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuçlar arasındaki farkların iki sebepten dolayı ortaya çıktığı düşünülmektedir. En önemli sebep olarak, Lagrange sıvı sonlu elemanların sıvı davranışını tam olarak temsil edemeyişi; diğer bir sebep ise Euler yaklaşımında sıvı yüzey dalgaları etkisinin ihmal edilmesi söylenebilir.



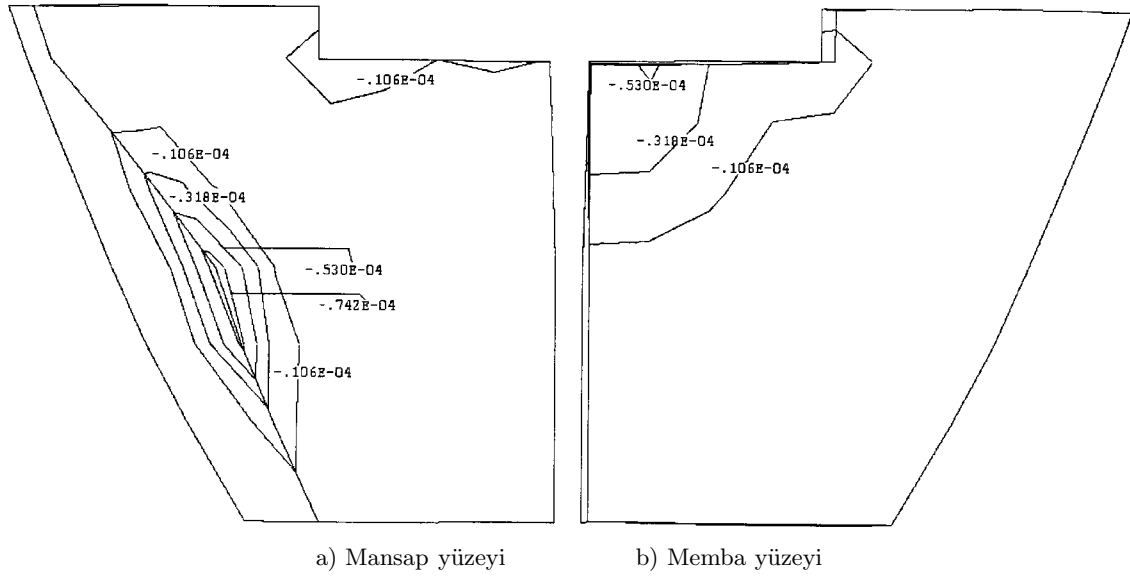
Şekil 12. Lineer olmayan Euler çözümlerinden elde edilen asal maksimum eş hasar eğrileri.



Şekil 13. Lineer olmayan Euler çözümlerinden elde edilen asal minimum eş hasar eğrileri.



Şekil 14. Linear olmayan Lagrange çözümlerinden elde edilen asal maksimum eş hasar eğrileri.



Şekil 15. Linear olmayan Lagrange çözümlerinden elde edilen asal minimum eş hasar eğrileri.

Burada bir hususa işaret etmekte yarar vardır. Mevcut çalışmada kullanılan deprem ivmesi kaydının pik değeri Karakaya barajının yer aldığı bölgede beklenen pik ivme değerine göre küçüktür. Söz konusu baraj, Türkiye deprem bölgeleri haritasında birinci derece deprem bölgesinde yer almakta olup, barajın yer aldığı alanda yapı ömrü içerisinde beklenen etkin pik ivme değeri yaklaşık olarak 0,55g dir. Barajların tasarım veya yeniden gözden geçirme analizlerinde yukarıda verilen değere yakın pik ivmeye sahip ve frekans içeriği yönünden uygun depremler kul-

lanılmalıdır.

Semboller Listesi

C	: sıvıdaki basınç dalgası hızı
$[C_c]$: Lagrange yaklaşımında ortak sistemin sönüm matrisi
$[C_s]$: yapı ortamın (baraj+temel) sönüm matrisi
$[D]$: sıvının elastisite matrisi
$\{e\}$: sıvının şekil değiştirme vektörü
$\{F\}$: yapının dış yük vektörü

$\{F_f\}$: Lagrange yaklaşımında sıvı ortamın düğüm noktası kuvvet vektörü	$\{U_c\}$: Lagrange yaklaşımında ortak sistemin rölatif yer değiştirme vektörü
$\{F_{fs}\}$: sıvı-yapı ara yüzeyinde sıvı ortamdan yapıya gelen ek dış yük vektörü	$\{U_f^d\}$: Lagrange yaklaşımında düğüm noktası yer değiştirme vektörü
$[K_c]$: Lagrange yaklaşımında ortak sistemin rijitlik matrisi	$U_{i,j}$: sıvının i. yer değiştirme bileşeninin j doğrultusuna göre kısmi türevi
$[K_s]$: yapı ortamının (baraj+temel) rijitlik matrisi	u_{sf}	: sıvı serbest yüzeyinin düşey doğrultudaki yer değiştirmesi
$[K_f^d]$: Lagrange yaklaşımında sıvı sistemin rijitlik matrisi	$\{U_{sf}^d\}$: sıvı serbest yüzeyinin düşey yer değiştirme vektörü
$[K_f^d]^*$: Lagrange yaklaşımında sıvı serbest yüzeyi rijitliğini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisi	$\{\dot{U}_c\}$: Lagrange yaklaşımında ortak sistemin rölatif hız vektörü
$[K_f^p]$: Euler yaklaşımında sıvı ortamın rijitlik matrisi	\ddot{u}_n	: sıvı-yapı ara yüzeyindeki sıvı yüzey normal doğrultusundaki ivme
$[M_c]$: Lagrange yaklaşımında ortak sistemin kütle matrisi	$\{\ddot{U}_c\}$: Lagrange yaklaşımında ortak sistemin rölatif ivme vektörü
$[M_f^d]$: Lagrange yaklaşımında sıvı sistemin kütle matrisi	$\{\ddot{U}_f^d\}$: Lagrange yaklaşımında sıvı sisteminin düğüm noktası ivme vektörü
$[M_f^p]$: Euler yaklaşımında sıvı ortamın kütle matrisi	$\{\ddot{U}_{fs}\}$: sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmeleri
$[M_s]$: yapı ortamının (baraj+temel) kütle matrisi	W_i	: sıvının i doğrultusundaki rotasyonu
P	: hidrodinamik basınç	α_i	: Lagrange yaklaşımında sıvının W_i ile ilgili kısıtlama parametresi
P_i	: i. rotasyon bileşeni ile ilgili gerilme	β	: hacimsel elastisite modülü
$P_{,ii}$: hidrodinamik basıncın i değişkenine göre iki kez kısmi türevi	ε_v	: sıvının hacimsel şekil değiştirmesi
$[S_f^d]$: Lagrange yaklaşımında sıvı serbest yüzeyinin rijitlik matrisi	$\{\sigma\}$: sıvının gerilme vektörü
		π_e	: sıvı sisteminin şekil değiştirme enerjisi
		π_s	: sıvı sisteminin yüzey dalgaları yer değiştirme enerjisi
		π_t	: sıvının toplam potansiyel enerjisi
		ρ	: sıvının kütle yoğunluğu

Kaynaklar

Algermissen, S.T., and Perkins, D. M., "A Probabilistic Estimate of Maximum Acceleration in Rock in the Contiguous United States", U.S. Geological Survey, Open File Report, 76-416, 1976.

Bangash, M. Y. H., "Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications", Middlesex Polytechnic Faculty of Engineering, London, Elsevier Applied Science, 1989.

Calayır, Y., "Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 1994.

Calayır, Y., Dumanoglu, A. A. and Bayraktar, A., "Earthquake Analysis of Gravity Dam-Reservoir Systems Using The Eulerian and Lagrangian Ap-

proaches", Computers and Structures, 59, 5, 887-890, 1996.

Carvera, M, and Oliver, J., "Seismic Evaluation of Concrete Dams Via Continuum Damage Models", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1225-1245, 1995.

Chopra A. K., "Hydrodynamic Pressures on Dams During Earthquakes", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 93, EM6, 205-223, 1967.

Cook, R. D., Malkus, D. S., and Plesha, M. E., "Concept and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley and Sons., Singapore, 1989.

Dowling, J. M., "Non-linear Analysis of Arch Dams", Earthquake Engineering Research Laboratory, Report No: EERL 87-03, University of California, Berkeley, 1987.

- Greeves, E. J., "The Modelling and Analysis of Linear and Non-linear Fluid-Structure Systems with Particular Reference to Concrete Dams", Ph.D. Thesis, University of Bristol, Bristol, 1991.
- Gülkan, P., Koçyiğit, A., Yüçemen, S., Doyuran, V. ve Başöz, N., "En son Verilere Göre Hazırlanan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası", ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Rapor 93-01, 1993.
- Karaton, M., "Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi", Y. Lisans Tezi, Fırat Üniv. Fen Bil. Ens., Elazığ, 1998.
- 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.
- 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.
- Olson, L.G., and Bathe, K. J., "A Study of Displacement-Based Fluid Finite Elements For Calculating Frequencies of Fluid and Fluid-Structures Systems", *Nuclear Engineering Design*, 76, 137-151, 1983.
- Rodriguez, M. E., and Aristizabal, J. C., "Evaluation of a Seismic Damage Parameter", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 5, 463-477, 1999.
- Swanson Analysis System, "ANSYS 5.6 Volume Theory User's Manual", Chapter 8.1-8.5, 1996.
- Vatani, O. A. ve Dumanoglu, A. A., "Çatlakların Beton Ağırılık Barajların Dinamik Davranışına Etkisi", *TMMOB Teknik dergi*, 8, 3, 1457-1470, 1997.
- Westergard, H. M., "Water Pressures on Dams During Earthquakes", *Transactions, ASCE*, 98, 1835, 418-433, 1933.
- 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.
- Zeinkiewicz, O. C., and Taylor, R. L., "Finite Element Method", 2, McGraw-Hill, 1991.