

BARAJ-REZERVUAR SİSTEMLERİNİN LİNEER TEORİYE GÖRE DİNAMİK ANALİZİ

DYNAMIC ANALYSIS OF DAM-RESERVOIR SYSTEMS WITH LINEAR THEORY

Yusuf Calayır¹, Alemdar Bayraktar² & A.Aydın Dumançoğlu³

SUMMARY

The dam-reservoir problem is a fluid-structure interaction problem. For this reason, it is firstly given the basic principles of the added mass, Eulerian and Lagrangian approaches used for linear analysis of fluid-structure systems. The dynamic analysis of the Sarıyar concrete gravity dam is carried out according to the East-West component of the 1992 Erzincan earthquake using above mentioned approaches. The results obtained from three methods are compared.

ÖZET

Baraj-rezervuar problemi bir sıvı-yapı etkileşim problemidir. Bu nedenle, başlangıçta sıvı-yapı sistemlerinin lineer analizlerinde kullanılan eklenmiş kütle, Eulerian ve Lagrangian yaklaşımlarının temel esasları verilmektedir. Bu yaklaşımlar kullanılarak Sarıyar beton ağırlık barajının 1992 Erzincan depremi Doğu-Batı bileşenine göre dinamik analizi yapılmaktadır. Her üç yaklaşımdan elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

GİRİŞ

Barajlar arkalarında büyük miktarda su biriktiren büyük ve monolitik yapılardır. Bu yapıların yıkılışları hem ekonomik hem de can kaybı bakımından büyük felaketlere sebep olabileceğinden, iyi projelendirilmeleri ve özellikle deprem analizlerinin gelişmiş tekniklere göre yapılması önem arz etmektedir.

Barajların dinamik analizi sıvı-yapı sistemleri için geliştirilen teknikler kullanılarak yapılmaktadır. Dinamik etkiye maruz bir sıvı-yapı sisteminde sıvı ve yapı arasında

¹ Arş.Gör. K.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

² Arş.Gör. K.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

³ Prof.Dr. K.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

etkileşim meydana gelmektedir. Sıvı-yapı sistemlerinin lineer analizlerinde eklenmiş kütle, Eulerian ve Lagrangian yaklaşımları olmak üzere üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, lineer davranışlı sıvı-yapı sistemlerinin dinamik analizinde kullanılan üç yaklaşımın temel esasları verilmekte ve bu yaklaşımlara göre Sarıyar barajının 1992 Erzincan depremi Doğu-Batı bileşenine göre dinamik analizi yapılmaktadır. Baraj-rezervuar sisteminin titreşim frekansları, barajın menba yüzeyi deplasmanları ve aynı yüzeyde oluşan hidrodinamik basınçlar elde edilmektedir. Her üç yaklaşımdan elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

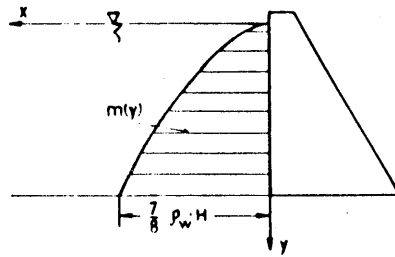
SIVI-YAPI SİSTEMLERİNİN DİNAMİK ANALİZİNDE KULLANILAN YAKLAŞIMLAR

Eklenmiş Kütle Yaklaşımı

Eklenmiş kütle yaklaşımı ilk olarak Westergaard [1] tarafından ortaya atılmıştır. Bu yaklaşımda dinamik etki sonucunda oluşan hidrodinamik basınç barajla beraber titreşen bir kütle olarak gözönüne alınabilmektedir. Bu kütlenin baraj menba yüzeyi boyunca dağılımı Şekil 1 de verilmekte ve

$$m(y) = \frac{7}{8} \rho_w \sqrt{H y} \quad (1)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada $m(y)$ su yüzeyinden itibaren y derinliğindeki hidrodinamik basınca eşdeğer kütleyi, ρ_w suyun kütle yoğunluğunu ve H ise rezervuar yüksekliğini göstermektedir.



Şekil 1 Westergaard eşdeğer kütle dağılımı

Şekil 1 de verilen kütle dağılımı tekil kütleler halinde barajın menba yüzeyindeki nodların (Sonlu eleman analizi) kütlelerine eklenerek rezervuarın hidrodinamik etkisi dikkate alınmaktadır. Tekil kütlelerin hesabında, tekil kütlenin ekleneceği noddaki baraj menba yüzeyi normali ile deprem doğrultusu arasındaki açı gözönünde bulundurulmalıdır [2]. Sonuçta yer hareketine maruz

ortak sistemin hareket denklemi,

$$(M + M_a) \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = - (M + M_a) a_g \quad (2)$$

haline gelmektedir. Burada M barajın kütle matrisini; M_a eklenmiş su kütlesi matrisini; C sönüm matrisini; K rijitlik matrisini; a_g yer ivmesi vektörünü; Z , $\dot{Z}$ ve $\ddot{Z}$ ise sırasıyla relatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini temsil etmektedir.

Eulerian Yaklaşımı

Eulerian yaklaşımında baraj-rezervuar sistemi iki ayrı sistem olarak gözönüne alınmaktadır. Barajın hareketi deplasmanlar cinsinden, rezervuarın hareketi ise basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Yer hareketine maruz barajın hidrodinamik etkileri de içerecek şekilde sonlu eleman hareket denklemi [3],

$$M \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = - M a_g + F \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada F hidrodinamik basınçlarla ilgili nodal kuvvet vektörünü göstermektedir. Denklem (3) te geçen diğer büyüklükler ise daha önce tanımlandığı gibidir. Rezervuardaki hidrodinamik basınçlar sıvı için yazılan dalga denkleminin belirli sınır şartları altında çözümüyle belirlenmektedir.

Viskoz olmayan ve sıkışamaz bir sıvının küçük hareketler altındaki dalga denklemi,

$$P_{,xx} + P_{,yy} = 0 \quad (4)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Burada $P_{,jj}$ P hidrodinamik basıncının j doğrultusuna göre iki defa kısmi türevinin alındığını göstermektedir. Rezervuar sınırlarında

$$P_{,n} + \rho a_n = 0 \quad (5)$$

sınır şartı geçerlidir. Burada ρ sıvının kütle yoğunluğunu, n yüzey normalinin doğrultusunu, $P_{,n}$ hidrodinamik basıncın yüzey normali doğrultusundaki kısmi türevini, a_n ise yüzey normali doğrultusundaki ivmeyi göstermektedir. Sıvının serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının olmadığı kabul edilirse, sıvı yüzeyinde

$$P = 0 \quad (6)$$

olmaktadır. Sonlu eleman yaklaşımında Denklem (4-6) matris formunda [3],

$$H P = B \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada H sıvının rijitlik matrisini; P nodal basınç vektörünü; B ise yük vektörünü temsil etmektedir.

Denklem (3) deki F ve denklem (7) deki B, baraj ve rezervuar arasındaki ortak etkileşimi belirlemektedir. Hidrodinamik basınçlardan oluşan nodal kuvvetler aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir [3]:

$$F = L P \quad (8)$$

Burada L nodal basınçlardan nodal kuvvetleri belirlemede kullanılan bir dönüşüm matrisidir. Yatay yer hareketinden dolayı Denklem (7) deki B vektörü,

$$B = -\rho L^T (a_g + \ddot{Z}) \quad (9)$$

formunda yazılabilir [3]. $(a_g + \ddot{Z})$ vektörü yer hareketinden dolayı baraj-rezervuar sisteminin arayüzeyinde oluşan toplam ivmeyi; T ise ilgili matrisin transpozisini göstermektedir. Denklem (8) ve Denklem (9) sırasıyla Denklem (3) ve Denklem (7) de yerlerine yazılırsa sistemin hareket denklemleri,

$$M \ddot{Z} + C \dot{Z} + K Z = -M a_g + L P \quad (10)$$

$$H P = -\rho L^T (a_g + \ddot{Z}) \quad (11)$$

haline gelir. Sistemin davranışı belirli bir yer hareketi altında (10) ve (11) denklemlerinin çözülmesiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada Dunga [4] algoritması kullanılarak çözümler elde edilmektedir.

Lagrangian Yaklaşımı

Lagrangian yaklaşımında hem baraj ve hem de rezervuarın hareketi deplasmanlar cinsinden ifade edilmektedir. Dolayısıyla, her iki sistemin arayüzeyinde bulunan nodlarda uygunluk ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır. Aşağıda önce rezervuardaki sıvının deplasmana dayalı formülasyonu Kaynak [5,6] da olduğu gibi verilmekte ve daha sonra ortak sistemin hareket denklemleri yazılmaktadır.

Rezervuardaki sıvı lineer sıkışabilir, rotasyonsuz ve viskoz olmayan kabul edilmektedir. Böyle bir sıvı için basınçla hacimsel şekildeğiştirme arasında,

$$P = \beta \epsilon_v \quad (12)$$

bağıntısı vardır. Burada P basıncı göstermekte ve ortalama gerilmeye eşit olarak alınmaktadır. ϵ_v hacimsel şekildeğiştirmeyi ve β ise Bulk modülünü göstermektedir. Hacimsel şekildeğiştirme iki boyutlu analiz durumunda,

$$\epsilon_v = U_{x,x} + U_{y,y} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir [6]. Burada $U_{i,j}$ i. ci deplasman bileşeninin j doğrultusuna göre türevini göstermektedir. Sıvının rotasyonsuzluğu çeşitli elastisite problemlerinde olduğu gibi bir "penalty" metoduyla hesaba katılmaktadır. Rotasyonel kısıtlama için aşağıdaki rotasyon tanımlanmaktadır.

$$w = \frac{1}{2} (U_{x,y} - U_{y,x}) \quad (14)$$

Bu rotasyonla ilgili gerilme ve rijitlik,

$$P_w = \alpha w \quad (15)$$

denklemleriyle verilebilir [6]. Burada α rotasyon kısıtlama parametresidir. Denklem (12-15) in sıvı sisteminin şekildeğiştirme enerjisi ile ilgili bağıntıda kullanılmasıyla,

$$\pi_e = \frac{1}{2} U^T K_f U \quad (16)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada π_e sıvı sisteminin şekildeğiştirme enerjisini, U deplasman vektörünü ve K_f ise sıvının rijitlik matrisini göstermektedir. Sıvı sistemlerinin önemli davranışlarından biri de hacimde bir değişme olmadan yüzey dalgalarının oluşabilmesidir. Bununla ilgili enerji,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \int \rho g U_s^2 dA \quad (17)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada g yerçekimi ivmesini, U_s sıvı yüzeyi düşey deplasmanını ve dA ise bu sıvı yüzeyi üzerindeki sonsuz küçük alan elemanını göstermektedir. Sonlu eleman yaklaşımından, Denklem (17),

$$\pi_s = \frac{1}{2} U_s^T S_f U_s \quad (18)$$

formunda yazılabilir. Burada S_f sıvı yüzeyi rijitlik matrisini, U_s ise serbest yüzey düşey nodal deplasman vektörünü temsil etmektedir. Aynı şekilde sıvı sisteminin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} V^T M_f V \quad (19)$$

bağıntısı ile verilebilir. Burada M_f sıvı sisteminin kütle

matrisini ve V nodal hız vektörünü göstermektedir. Denklem (16,18 ve 19) un Lagrange denkleminde [7] kullanılmasıyla sıvı sistemi için aşağıdaki denklem takımı elde edilmektedir.

$$M_f \ddot{U} + K_f^* U = R \quad (20)$$

Burada K_f^* sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı rijitlik matrisini ve R ise zamana bağlı nodal yük vektörünü temsil etmektedir. Sıvı sisteminin eleman matrisleri Wilson ve Khalvati [5] tarafından önerilen integrasyon mertebeleri kullanılarak elde edilmektedir.

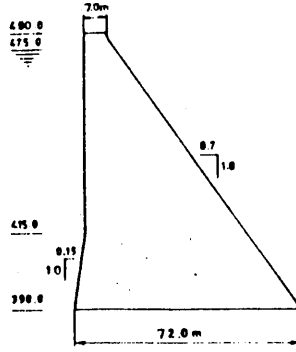
Sıvı sisteminin hareket denklemi, Denklem (20), yapı sisteminin hareket denklemiyle aynı formda olmaktadır. Yalnız burada sistemin arayüzey şartını belirlemek gerekir. Baraj-rezervuar sisteminin arayüzeyinde sadece arayüzeye dik deplasmanlar sürekli olmaktadır. Bu şart kısıtlama denklemleriyle sağlanmaktadır. Arayüzey şartları dikkate alınarak baraj-rezervuar sisteminin yer hareketi altındaki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$M_C \ddot{Z}_C + C_C \dot{Z}_C + K_C Z_C = -M_C a_g \quad (21)$$

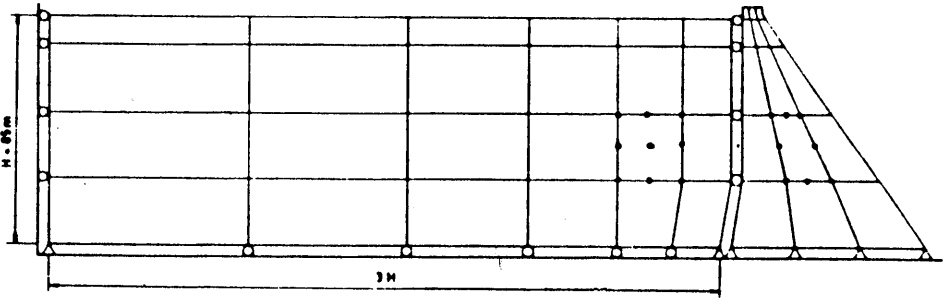
şeklinde yazılabilir. Burada M_C , C_C ve K_C sırasıyla ortak sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. Z_C , $\dot{Z}_C$ ve $\ddot{Z}_C$ ise ortak sistemin deplasman, hız ve ivme vektörleridir.

SARIYAR BARAJININ DİNAMİK ANALİZİ

Örnek uygulama için, Ankara'nın 120 km kuzey batısında Sakarya nehri üzerinde 1956 yılında beton ağırlık baraj olarak inşa edilmiş olan Sarıyar barajı seçilmiştir. Baraj betonunun birim hacim ağırlığı 24000 N/m^3 , Elastisite modülü $35 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ve Poisson oranı ise 0.15 olarak seçilmektedir[8]. Aynı şekilde, rezervuardaki suyun birim hacim ağırlığı 9810 N/m^3 ve Bulk modülü $207 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ olarak alınmaktadır. Barajın boyutları ve analiz için seçilen sonlu eleman modeli Şekil 2 de verilmektedir. Sonlu eleman modelinde rezervuar uzunluğu yüksekliğinin üç katı alınmakta ve rezervuarın sabit derinlikte olduğu kabul edilmektedir. Özdeğer analizinden yapı-sıvı sisteminin frekansları ve mod şekilleri elde edilmekte ve daha sonra baraj malzemesi için 0.05 lik bir sönüm oranı (Lagrangian yaklaşımında rezervuar için de aynı sönüm oranı alınmaktadır) alınarak mod süperpozisyon yöntemiyle ortak sistemin 1992 Erzincan depremi Doğu-Batı bileşeni altındaki davranışı elde edilmektedir. Tablo 1 de Sarıyar barajı için değişik yaklaşımlardan elde edilen bazı karakteristik değerler verilmektedir. Baraj-rezervuar etkileşiminin ne derece önemli olduğu hem barajın



(a) Barajın boyutları [8]



(b) Seçilen sonlu eleman modeli

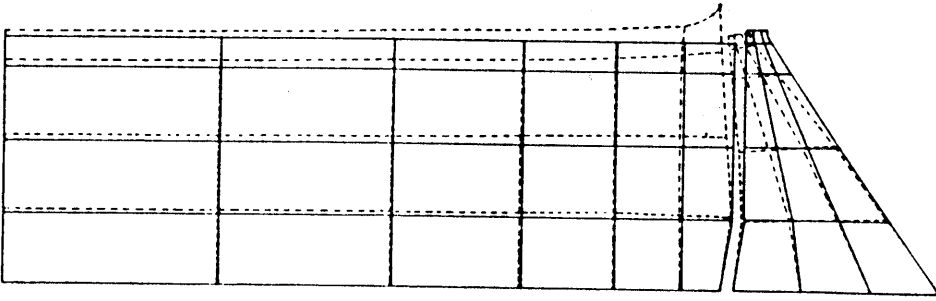
Şekil 2 Sarıyar barajının boyutları ve analiz için seçilen sonlu eleman modeli

Tablo 1. Sarıyar barajının değişik yaklaşımlardan elde edilen bazı karakteristik değerleri

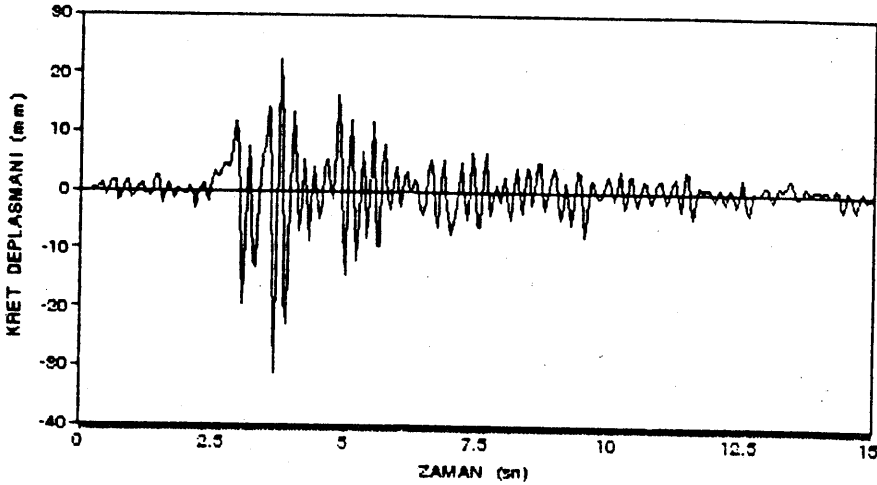
Karakteristik değerler	Boş baraj	Eklenmiş kütle yaklaşımı	Eulerian yaklaşımı	Lagrangian yaklaşımı
Birinci yanıl frekans (Hz)	5.125	4.251	4.494	3.995
Maksimum deplasman (mm)	21.829	29.027	31.911	31.310

birinci yanıl deplasman modu frekansında ve hem de barajın maksimum deplasmanında belirgin bir şekilde görülmektedir.

Eulerian ve Lagrangian yaklaşımlarından elde edilen maksimum baraj deplasmanları hemen hemen aynı değeri alırken, barajın birinci yanal deplasman moduyla ilgili frekanslar biraz farklı olmaktadır. Yukarıda ifade edildiği gibi Eulerian yaklaşımda rezervuardaki su sıkışamaz kabul edilmesine karşı, Lagrangian yaklaşımda suyun sıkışabilirliği gözönüne alınmaktadır. Suyun sıkışabilirliğinin içerilmesi çözümleri etkilemektedir [9]. Eklenmiş kütle yaklaşımdan elde edilen sonuçlar Tablo 1 den de görüleceği gibi diğer iki yaklaşımdan elde edilenlere yakın çıkmaktadır. Baraj-rezervuar sisteminin Lagrangian yaklaşımdan elde edilen birinci yanal deplasman modu Şekil 3 de verilmektedir. Bu mod baraj ve baraja yakın rezervuar kısmında daha

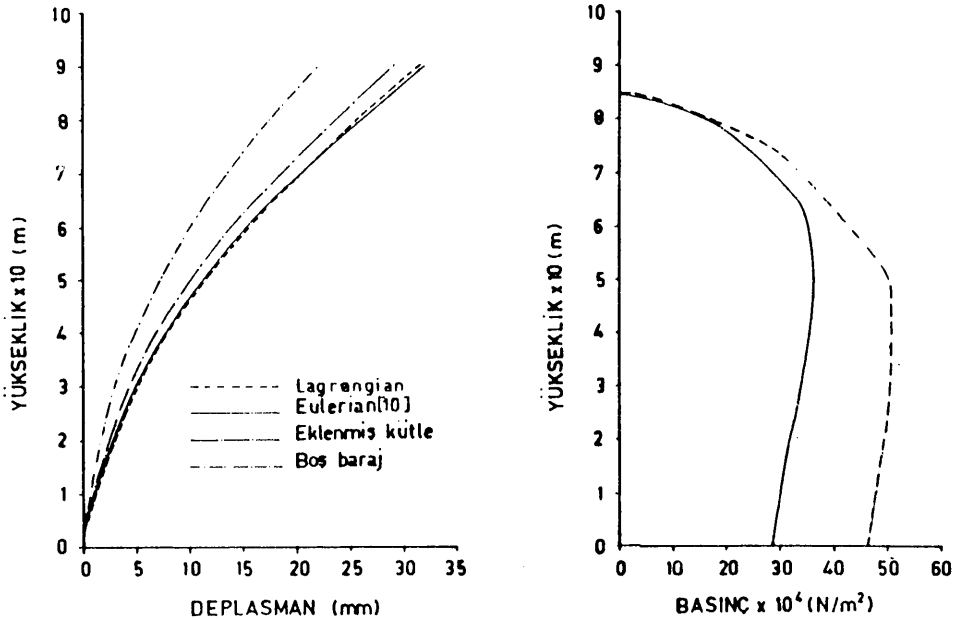


Şekil 3 Baraj-rezervuar sisteminin Lagrangian yaklaşımdan elde edilen birinci yanal deplasman modu (3.995 Hz)



Şekil 4 Baraj kret deplasmanının zamanla değişimi

etkili olmaktadır. Şekil 4 te Lagrangian yaklaşımından elde edilen baraj kret deplasmanının zamanla değişimi görülmektedir. Maksimum deplasman 31.310 mm dir. Şekil 5 te ise baraj-rezervuar sisteminin değişik yaklaşımlardan elde edilen arayüzey yanal deplasman eğrileri ile aynı arayüzeyde oluşan hidrodinamik basınç eğrileri verilmektedir. Bu eğriler nodal mutlak maksimumlardan faydalanılarak çizilmiştir. Eulerian ve Lagrangian yaklaşımlarından elde edilen deplasmanlar birbirine çok yakın olurken, hidrodinamik basınçlar epey farklı olmaktadır. Lagrangian yaklaşımı çözümleri daha büyüktür.



Şekil 5 Baraj-rezervuar sisteminin arayüzey yanal deplasman ve basınç eğrileri

SONUÇLAR

Bu çalışmada sıvı-yapı sistemlerinin lineer teoriye göre dinamik analizinde kullanılan yaklaşımlar genel hatlarıyla verilmekte ve Sarıyar barajının bu yaklaşımlara göre dinamik analizi yapılmaktadır. Sarıyar barajının Lagrangian ve Eulerian çözümleri deplasmanlar açısından birbirine yakın çıkmaktadır. Fakat basınç ve frekans değerleri dağılımı açısından birbirinden farklı olmaktadır. Her bir yöntemde yapılan kabuller ve suyun

sıkışabilirlik etkilerinin içerilip ya da içerilmemesi çözümleri etkilemektedir. Ayrıca, Sarıyar barajının eklenmiş kütle yaklaşımı çözümlerinin diğer iki yöntemin çözümlerine epeyce yaklaştığı analiz sonuçlarından görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Westergaard, H.M. (1933) "Deprem Sırasında Barajlar Üzerindeki Su Basınçları", Transactions, ASCE, Vol.98, No.1835, pp.418-433, (İngilizce).
2. Priscu, R., Popovici, A., Stenatiu, D., Stere, C., (1985), Büyük Barajlar için Deprem Mühendisliği, Editura Academiei, Bucureşti, (İngilizce).
3. Saini, S.S., Bettess, P., Zienkiewicz, O.C. (1978) "Beton Ağırlık Barajların Sonlu ve Sonsuz Elemanlar Kullanarak Hidrodinamik Davranışlarının Etüdü", Earthq. Engng. Struct. Dyn., Vol.6, pp.363-374, (İngilizce).
4. Dungar, R. (1978) "Yapıların Dinamik Analizinde Etkili Bir Sıvı-Yapı Etkileşim Metodu", Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 13, pp.93-107, (İngilizce).
5. Wilson, E.L., Khalvati, M. (1983) "Sıvı-Katı Sistemlerinin Dinamik Analizi İçin Sonlu Elemanlar", Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.19, pp.1657-1668, (İngilizce).
6. Calayır, Y., Dumanoglu, A.A. (1992) "Sıvı-Yapı Sistemlerinin Statik ve Dinamik Davranışlarının Lagrangian Metoduyla İncelenmesi", İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı III. Sempozyumu, Cilt 1, ss.248-261, İstanbul.
7. Clough, R.W., Penzien, J., (1975), Yapı Dinamiği, Mc Graw-Hill, New York, (İngilizce).
8. Bayraktar, A., (1991), Beton Ağırlık Barajlarda Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilişi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
9. Chopra, A.K. (1968) "Rezervuar-Baraj Sistemlerinin Deprem Davranışı", J.Engng. Mech. Div., ASCE, Vol.94, No.EM6, pp.1475-1500, (İngilizce).
10. Greeves, E.J., Dumanoglu, A.A., (1989), Eulerian Yaklaşımı Kullanılarak Sıvı-Yapı Etkileşimi için Etkili Bir Kompüter Analizinin SAPIV ile Gerçekleştirilmesi, Report no. UBCE-EE-89-10, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol, (İngilizce).