

Makalenin Geliş Tarihi : 26.04.2009
Makalenin Kabul Tarihi : 01.08.2009

BARAJ GÖLLERİNDE DEPREM SIRASINDA OLUŞAN HİDRODİNAMİK BASINÇLARIN SAYISAL BENZETİMİ

Ender DEMİREL¹, İsmail AYDIN²

ÖZET: Deprem sırasında baraj-hazne sisteminde oluşan hidrodinamik basınçların benzetimi için serbest yüzey ve sıkışma etkilerini içeren bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Navier-Stokes denklemleri ve basınç denklemi boyutsuzlaştırılarak boyutsuz sayılar tanımlanmıştır. Hareket denklemleri sonlu hacim metodu ile çözülmüştür. Serbest yüzeyin konumu derinlik boyunca integre edilmiş süreklilik denklemi ile takip edilmiştir. Basınç ve yüzey dalgalarının gölün mansabından yansiyarak geri dönmesini önlemek için yansımayan sınır koşulu ve sönümleyici bölge metodu eş zamanlı uygulanmıştır. Baraj yüzeyinde oluşan hidrodinamik basınçlar sıkışır ve sıkışmaz durumlar için hesaplanmış ve sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Deprem, baraj gölü, serbest yüzey, sonlu hacim, yansımayan sınır.

NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMIC PRESSURE IN DAM-RESERVOIRS DURING EARTHQUAKES

ABSTRACT: A computational model is developed to simulate hydrodynamic pressure in dam-reservoir during earthquakes including free-surface and compressibility effects. Navier-Stokes equations and pressure equation are non-dimensionalized and relevant dimensionless numbers are identified. Governing equations are discretized using finite volume method. Free-surface position is tracked using depth-integrated continuity equation. Non-reflecting boundary condition and dissipation zone method are applied simultaneously to prevent the pressure and surface waves reflecting from the boundary back into the domain. Hydrodynamic pressures on dam-face are computed for compressible and incompressible cases and results are compared to data available in the literature.

KEYWORDS: Earthquake, dam reservoir, free-surface, finite volume, non-reflecting boundary.

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Blm., Meşelik Kamp., 26480 ESKİŞEHİR

² Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnönü Bulvarı, 06531 ANKARA

I. GİRİŞ

Barajlar büyük miktarda suyu depolayan yapılardır. Ülkemizde inşaatı tamamlanmış ve inşa edilmesi planlanan pek çok baraj vardır. Barajların tüm doğal risklere karşı doğru bir şekilde projelendirilmesi yaşamsal önem taşır. Barajların projelendirilmesinde, maruz kaldıkları statik yüklerin yanında deprem, toprak kayması gibi olası dinamik etkilerin de dikkate alınması zorunludur. Ülkemizin bir deprem ülkesi olduğu göz önüne alındığında, barajların öngörülen kullanım ömrü içinde bir veya birden fazla büyük depremle karşılaşma olasılığı oldukça yüksektir. Depremın gerçekleşmesi halinde baraj yapısının nasıl davranacağı ve hasar görme olasılıklarının önceden bilinmesi yakın çevrenin güvenliği bakımından önemlidir. Barajın yıkılması sadece yapının kaybına değil, baraj mansabındaki yerleşim alanlarını beklenmedik bir taşkınla karşı karşıya bırakması nedeniyle çok daha büyük mal ve can kayıplarına neden olabilir. Baraj haznelerinde çok büyük miktarlarda su biriktiğinden, gövdenin yıkılması durumunda, doğal koşullarda beklenmeyecek büyüklükte ani taşkınlara neden olabilir.

Bu çalışmada deprem sırasında baraj haznesinde meydana gelen hidrodinamik basınçları tüm fiziksel etkileri dikkate alarak hesaplayan NASSLARD adında bir hesaplama modeli ve bilgisayar programı geliştirilmiştir. Serbest yüzey, hazne içindeki toplam su hacmini koruyan derinlik boyunca integre edilmiş süreklilik denklemi ile hareket ettirilmiştir [1-4]. Baraj yüzeyindeki hidrodinamik basınçlar sıkışır ve sıkışmaz durumlar için hesaplanmış ve literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.

II. MATEMATİK MODEL VE SAYISAL ÇÖZÜM

Baraj haznesi içindeki sıvının hareketi düşey düzlemdeki 2 boyutlu sıkışabilir boyutsuz NS denklemleri, süreklilik denklemi ve serbest yüzey denklemi ile ifade edilmiştir [5].

$$\frac{1}{S_t} \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} (u + u_0) dV + \int_{CS} u \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_{CV} \left[-\frac{1}{F_r^2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3R_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dV + \frac{1}{R_e} \int_{CS} \vec{\nabla} u \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

$$\frac{1}{S_t} \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} (w + w_0) dV + \int_{CS} w \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_{CV} \left[-\frac{1}{F_r^2} \left(1 + \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{1}{3R_e} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dV + \frac{1}{R_e} \int_{CS} \vec{\nabla} w \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

$$-\frac{1}{S_t F_a^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} p dV = \int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

$$\frac{1}{S_t} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dz = 0 \quad (4)$$

Burada u ve w akışkanın sırayla x - ve z - yönündeki hız bileşenleri, u_0 ve w_0 yatay ve düşey yöndeki yer hızları, \vec{V} hız vektörü, t zaman, $\vec{\nabla}$ del operatörü, CV kontrol hacmi, CS kontrol yüzeyi, dV hücrenin hacmi, $d\vec{A}$ ilgili yüzey alanı, p basınç, S_t Strouhal sayısı, F_r Froude sayısı, R_e Reynolds sayısı ve F_a Akustik Froude sayısıdır. Hesap alanının ve referans koordinat sisteminin yer ile birlikte hareket ettiği düşünülerek yer hızları hareket denklemlerine katılmıştır. Deprem etkisindeki baraj-hazne sistemi şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Denklemlerdeki boyutsuz sayılar aşağıdaki gibi tanımlanmışlardır.

$$S_t = \frac{v_m T}{h_0}, \quad F_r = \frac{v_m}{\sqrt{gh_0}}, \quad R_e = \frac{\rho v_m h_0}{\mu}, \quad F_a = \frac{a}{\sqrt{gh_0}} \quad (5)$$

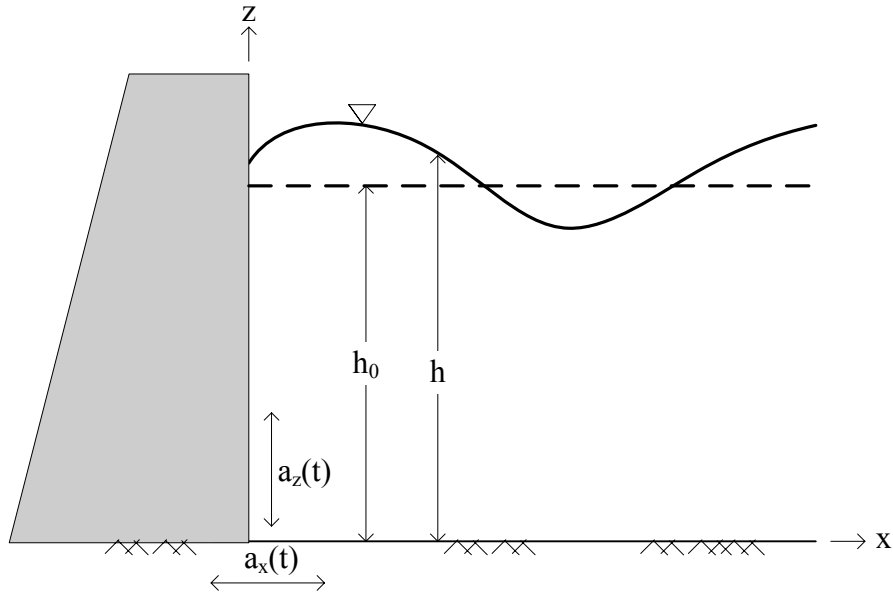
Burada v_m deprem sırasında meydana gelen en büyük yer hızı, T deprem ivmesinin periyodu, h_0 haznede depremden önceki su derinliği, g yer çekimi ivmesi, ρ suyun yoğunluğu, μ dinamik viskozite katsayısı ve a su içindeki ses hızıdır. Su içindeki ses hızı 1438 m/s alınmıştır. Hareket denklemleri kaydırılmış hesaplama ağı üzerinde ayrıklaştırılarak sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir [1, 6].

Deprem sırasında serbest yüzeyde oluşan yüzey dalgalarının ve hazne içindeki basınç dalgalarının haznenin uzak-kenarında yansiyarak geri dönmesini önlemek için Sommerfeld yansımayan sınır koşulu ve sönümleyici bölge metodu eş zamanlı uygulanmıştır [7-8].

$$\frac{1}{St} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + a_x \right) + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

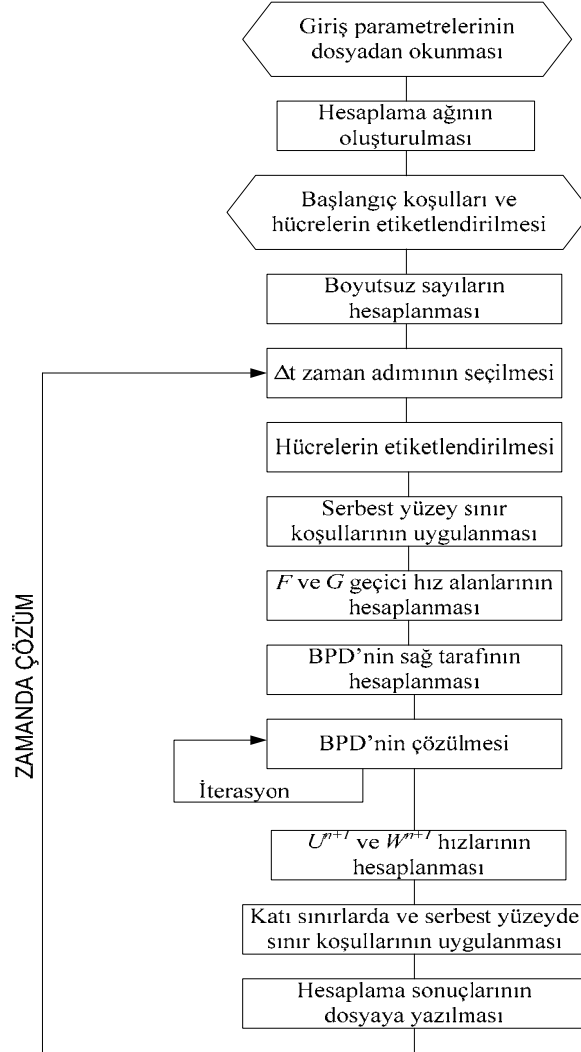
$$p_{damp} = St \cdot \alpha(x) \cdot w(x, h, t) \quad (7)$$

Burada ϕ dalga formunda ilerleyen yatay ve düşey hız bileşeni, a_x yatay yöndeki deprem ivmesi ve c dalga hızıdır. Buradaki ϕ fiziki büyüklüğü hesaplama bölgesinde c dalga hızı ile seyahat eder ve bu hızla bölgeyi terk eder. Derin denizlerde ve sıg sularda ilerleyen düzenli dalgaların dalga hızları için analitik formüller vardır [9].



Şekil 1. Deprem etkisindeki baraj-hazne sisteminin görünüşü.

NASSLARD'ın akış diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi NASSLARD öncelikle bir veri giriş dosyasından giriş parametrelerini okur, hesaplama ağını oluşturur. Problemin başlangıç koşulları uygulanır ve hücreler etiketlenilerek boyutsuz sayılar hesaplanır. Stabilité şartına göre Δt zaman adımı hesaplanır. Serbest yüzeyin konumuna göre hücreler etiketlenir, serbest yüzey sınır koşulları uygulanır, F ve G geçici hız alanları hesaplanır, Basınç Poisson Denklemi'nin (BPD) sağ tarafı hesaplanır ve çözüm PSOR (Point Successive Over Relaxation) metodu kullanılarak yapılır. Sonra $n+1$ zaman adımındaki hızlar hesaplanarak problemin çözümü zamanda adım adım gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. NASSLARD'ın akış diyagramı.

Şekil 2’de verilen akış şemasında bilgisayar koşturma süreleri açısından en uzun zamanı BPD’nin sayısal çözümü almaktadır. Özellikle sıkışma etkilerinin önemli olduğu durumlarda basınç çözümünün yakınsamasının uzun zaman aldığı gözlenmiştir.

III. BOYUTSUZ SAYILAR VE HAZNE DİNAMİĞİ

Deprem sırasında meydana gelen en büyük yer hızının, deprem periyodunun ve hazne su derinliğinin aşağıdaki aralıklarda verilen değerleri kullanılarak analizler yapılmıştır.

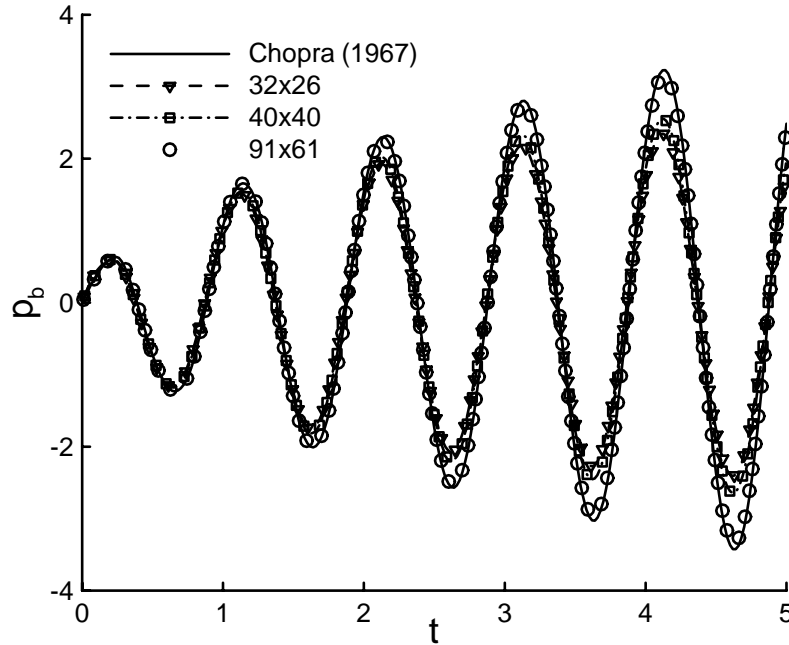
$$0.1 \leq T \leq 3.0 s \quad 0.1 \leq v_m \leq 3.0 m/s \quad 10 \leq h_0 \leq 1000 m \quad (8)$$

Yukarıdaki verilerin sınır değerlerine göre giriş parametrelerinin en büyük ve en küçük değerlerinin birleşiminden oluşan 8 farklı fiziki durum ortaya çıkar ve bu durumlar için boyutsuz sayılar hesaplanarak Çizelge 1’de gösterilmiştir. Bu 8 duruma ilave özel bir durum olarak rezonans durumu da Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Baraj-hazne probleminde incelenen durumlar

Durum	v_m (m/s)	T(s)	h_0 (m)	Fa	Fr	St	Re
1	0,10	0,1	10	145,19	0,010	0,00100	$1,00 \times 10^6$
2	0,10	0,1	1000	14,52	0,001	0,00001	$1,00 \times 10^8$
3	0,10	3,0	10	145,19	0,010	0,03000	$1,00 \times 10^6$
4	0,10	3,0	1000	14,52	0,001	0,00030	$1,00 \times 10^8$
5	3,00	0,1	10	145,19	0,303	0,03000	$3,00 \times 10^7$
6	3,00	0,1	1000	14,52	0,030	0,00030	$3,00 \times 10^9$
7	3,00	3,0	10	145,19	0,303	0,90000	$3,00 \times 10^7$
8	3,00	3,0	1000	14,52	0,030	0,00900	$3,00 \times 10^9$
Rezonans	0,79433546	0,5087622	182,9	33,95	0,019	0,00221	$1,45 \times 10^8$

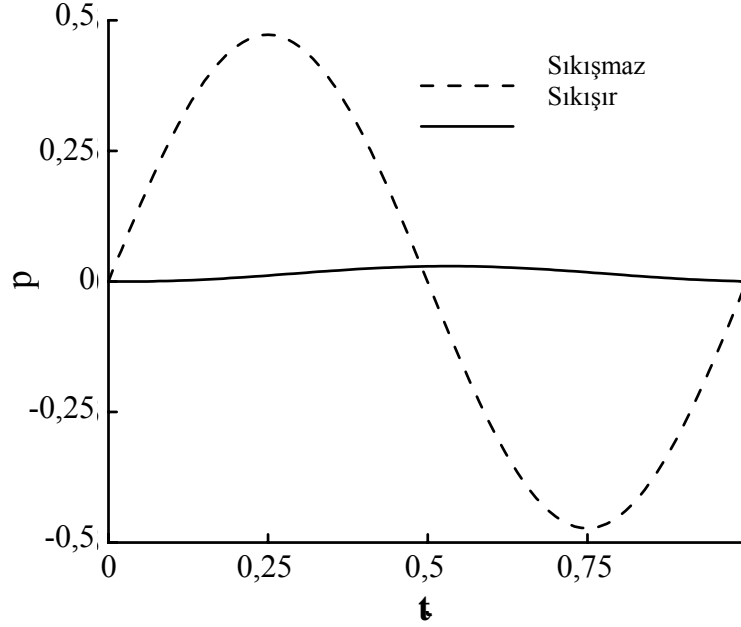
Şekil 3'te rezonans durumu için $t = 5T$ süresince farklı ağ düzenlemeleri kullanılarak baraj topuğundaki basıncın (p_b) zamanla değişimi verilmiş ve Chopra'nın [10] analitik çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi rezonans durumunda sıkışma etkileri nedeniyle baraj topuğundaki hidrodinamik basınçlar zamanla artmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, 91x61 ağ düzenlemesi kullanıldığında analitik sonuçlar ile sayısal sonuçlar uyumludur ve NASSLARD baraj topuğundaki hidrodinamik basınçları başarılı bir şekilde hesaplayabilmektedir.



Şekil 3. Baraj topuğundaki basıncın farklı ağ düzenlemeleri için zamanla değişimi.

Hazne içindeki sıkışma etkilerinin sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmak için Çizelge 1'deki Durum 2 alınmış ve sıkışma etkilerinin dahil edildiği ve ihmal edildiği durumlar için baraj topuğuna komşu hesaplama hücreesindeki hidrodinamik basınçların değişimi Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Sıkışmaz durumda hazne içindeki su rijit katı bir cisim gibi davrandığı için hidrodinamik basınçlar deprem ivmesi gibi sinüzoidal formdadır ve sıkışmaz durumda basınç dalgalarının hızı sonsuz büyüklükte olduğundan gerçek dışı bir basınç değişimi ortaya çıkmıştır. Ele alınan problemde hazne su derinliği ve deprem frekansı en büyük olduğu için sıkışma etkileri de büyük olacaktır. Sıkışır durumda hazne içindeki basınç dalgaları sonlu hızda seyahat

eder ve baraj topuğundaki basınç değişimi deprem ivmesi ile aynı formda değildir [5, 10]. Burada görüldüğü gibi deprem etkisindeki baraj-hazne sisteminde hazne içindeki sıkışma etkilerinin baraj yüzeyinde oluşan basınçlar üzerinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 4. Sıkıştır ve sıkışmaz durumlarda baraj topuğundaki basıncın zamanla değişimi.

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deprem etkisindeki baraj haznesinde meydana gelen hidrodinamik basınçları hassas bir şekilde hesaplayan bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Model sıkıştır Navier-Stokes denklemleri, süreklilik denklemi ve derinlik boyunca integre edilmiş süreklilik denkleminin sonlu hacimler metodu ile eş zamanlı çözümüne dayanır. Haznenin uzak-kenarında serbest yüzey dalgalarını ve basınç dalgalarını yansıtmayan Sommerfeld yansımayan sınır koşulu ve sönümleyici bölge metotlarının birleşiminden oluşan bir sınır koşulu uygulanmıştır. Rezonans durumunda baraj topuğundaki hidrodinamik basınçların zamanla değişimi elde edilmiş ve sonuçların literatür verileri ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Deprem sırasında şoklardan dolayı hazne içinde meydana gelen sıkışma etkilerinin hidrodinamik basınçlar üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] E. Demirel and İ. Aydın, "Total volume conservation in simulation of unsteady free-surface flows", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol.31, pp. 311-321, 2007.
- [2] E. Demirel ve İ. Aydın, "Zamanda Değişken Serbest Yüzeyle Akımların Benzetiminde Hacim Korunumu", *III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu*, 10-14 Eylül 2007, İzmir, Bildiri Kitabı, ss. 75-86.
- [3] V. Casulli, "A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free surface flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol .30, pp. 425-440, 1999.
- [4] V. Casulli and P. Zanolli. "Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for enviromental problems", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.36, pp.1131-1149, 2002.
- [5] E. Demirel, "Baraj Göllerinde Deprem Sırasında Oluşan Hidrodinamik Basınçların Analizi", ESOĞÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 2008.
- [6] M. Griebel, T. Dornseifer and T. Neunhoffer, "Numerical Simulation in Fluid Dynamics". *SIAM: Philadelphia, 1998*.
- [7] K.M.T. Kleefsman, G. Fekken, A.E.P. Veldman, B. Iwanowski and B. Buchner, "A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems", *Journal of Computational Physics*, Vol. 206, pp. 363-393, 2005.
- [8] J.H. Westhuis, "The Numerical Simulation of Nonlinear Waves in a Hydrodynamic Model Test Basin", Doktora Tezi, University of Twente, The Netherlands, 2001.
- [9] M. Rahman, "Water Waves", Oxford University Press Inc., New York, 1995.
- [10] A.K. Chopra, "Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes", *Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.93, pp. 205-223, 1967.