

Ardıl Baraj Yıkılmasının Mansapta Bulunan Elastik Yapı Üzerindeki Etkisinin Yapı-Sıvı Etkileşim Yöntemi ile İncelenmesi

Ali Ersin DİNÇER^{1*}, Abdullah DEMİR¹

ÖZET: Bu çalışmada yazarlar tarafından geliştirilen bir yapı-sıvı etkileşim yöntemi idealize edilmiş ardıl baraj yıkılması problemi için test edilmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen yöntemde, sıvı kısım yumuşatılmış tanecik hidrodinamiği (smoothed particle hydrodynamics - SPH) ile, katı kısım ise sonlu elemanlar (finite element – FE) yöntemi ile modellenmiş ve katı ile sıvı arasındaki akupaj, kontak mekanik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı geometrideki ardıl barajlar aralarında mesafe bırakmaksızın yerleştirilmiştir. En yüksek konumdaki barajın doluluk oranındaki değişim dikkate alınmıştır. Yıkılan barajların mansaptaki elastik bir yapıya etkisi hem yapının deformasyonu yönünden hem de akışkandaki basınç dağılımları yönünden test edilmiştir. Ayrıca serbest akışkan yüzeyi profilleri ve su hızı profilleri de çalışmada sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yumuşatılmış Tanecik Hidrodinamiği, Kontak Mekanik, Yapı-Sıvı Etkileşimi, Ardıl baraj yıkılması.

Investigation of the Effect of Sequential Dam-Break Problem on the Elastic Structure Located Downstream with a Fluid-Structure Interaction Method

ABSTRACT: In the present study, a fluid-structure interaction (FSI) method developed by the authors is tested for an idealized sequential dam-break problem. In the proposed method, fluid part is modelled by smoothed particle hydrodynamics (SPH) and structure part is modelled by finite element method (FEM) and the coupling between fluid and structural domains are implemented by contact mechanics. Reservoirs having same geometry are positioned without interspace. The change in capacity usage of the most higher dam is investigated. The effect of dam-break flow on an elastic structure located at the downstream is tested in terms of the deformation of the structure and the pressure distributions of the fluid. In addition, free-surface profiles and velocity distribution of fluid are presented.

Keywords: Smoothed particle hydrodynamics, Contact Mechanics, Fluid-Structure Interaction, Sequential dam break.

¹Ali Ersin Dinçer (Orcid ID: 0000-0002-4662-894X) Abdullah Demir (Orcid ID: 0000-0002-6392-648X), Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: A. Ersin Dinçer, e-mail: ersin.dincer@agu.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 25-12-2019

Kabul tarihi / Accepted: 22-06-2020

GİRİŞ

Barajların sağladığı yararların yanı sıra, yıkılma potansiyellerinden dolayı can ve mal kaybına uğratma riski de vardır. Barajların işletmesinden sorumlu uzmanlar, olası problemleri engellemek için barajları doğru analiz etmeleri gereklidir. Günümüze kadar farklı sebeplerle meydana gelen en büyük baraj felaketleri olarak, South Fork (1889), Tigra (1917), Panshet (1961), Vajont (1963), Banqiao ve Shimantan (1975), Machchu-2 (1979), Köprü (2012), Dakrong 3 (2012), Tokwe Mukorsi (2014) ve Germano maden (2015) baraj yıkılmaları gösterilebilir. Gelişen bilim ve teknoloji sayesinde can kayıpları ciddi miktarda azaltılmıştır. Erken uyarı sistemlerinin doğru bir şekilde uygulanması ve baraj yıkılması sonrası suyun davranışının deneysel ve matematiksel yöntemlerle modellenmesi baraj felaketlerinden dolayı oluşacak zararları azaltmaya yardımcı olmaktadır. Literatürde, baraj yıkılması problemlerinin gerek deneysel olarak gerekse de sayısal modellenmesine birçok bilim insanı tarafından ilgi gösterilmiş ve önemli çalışmalar sunulmuştur. Adami ve ark. (2012) statik ve hareketli duvarlarında sınır koşulları için yeni bir formülasyon geliştirmiştir. Lobovský ve ark. (2014) çalışmasında baraj yıkılma problemini deneysel olarak ayrıntılı bir şekilde irdelemiştir. Dinçer ve ark. (2016) Bunlara ek olarak ardıl baraj yıkılması Demir ve Dinçer 2017 yılındaki çalışmalarında incelenmiştir. Baraj yıkılması sonrası gerçekleşen durumlar için yapılan çalışmalar da mevcuttur. (Dinçer, ve ark., 2016; Demir ve ark., 2019)

Bu çalışmada, ardıl baraj yıkılmasının mansapta bulunan elastik bir yapıya olan etkisini sayısal olarak modellemek için yumuşatılmış tanecik hidrodinamiği (SPH) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı yapı-sıvı etkileşim (FSI) yöntemi kullanılmıştır ve kontak mekanik ile akupaj sağlanmıştır. Literatürde SPH-FEM akupajı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır. İlk çalışma, Attaway ve ark. (1994) tarafından gerçekleştirilen yapı-yapı çarpışma modeli ile ilgilidir. Daha sonra De Vuyst ve ark. (2005) bu yöntemi yapı-sıvı etkileşimine uygulamışlardır. Aynı yaklaşım Fernandez-Mendez ve ark. (2005) ve Zhang ve ark. (2010) tarafından da çalışmalarında kullanılmıştır. Hu ve ark. (2014) ise SPH-FEM akupaj yöntemini geliştirerek yeni bir arama algoritması geliştirmiştir. Serbest yüzey ve elastik yapı içeren şiddetli yapı-sıvı etkileşimi modelleri Fourey ve ark. (2010) ve Groenenboom ve Cartwright (2010) tarafından SPH-FEM akupaj yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Fourey ve ark. (2017) çalışmalarında yapı-sıvı etkileşimini, SPH ile elde edilen yapının üzerinde oluşacak kuvvetleri FE yöntemine ileterek ve FEM ile bulunan yeni yapı pozisyonunu SPH yönteminde sınır koşulu olarak uygulayarak sağlamışlardır. Long ve ark. (2017) SPH-FEM akupaj yöntemine hayalet parçacık metodunu entegre ederek karmaşık geometrilerde yapı-sıvı etkileşimi problemlerini çözmüşlerdir. Hayalet parçacık metodunun en önemli dezavantajı hesaplama süresinin uzunluğudur.

Araştırmacılar önceki çalışmalarında akupajın kontak mekanik yöntemi ile sağlandığı yeni bir SPH-FEM yöntemi geliştirip, bu yöntemi farklı deneyler ile doğrulamışlardır (Dinçer ve ark., 2019; Demir ve ark. 2019). Araştırmacıların bu çalışmalarında geliştirilen SPH-FEM akupaj yöntemleri benzer olsa da temelde SPH parçacıklarının yapıdan uzaklaştırılma şekli farklıdır. İlk çalışmada SPH parçacıkları yapıdan deplasman tabanlı ötelenmiş (Dinçer., 2019), ikinci çalışmada ise kuvvet tabanlı ötelenmiştir (Demir ve ark., 2019). Geliştirilen yöntemler yapı-sıvı etkileşiminde kontak mekaniğin akupaj tekniği olarak kullanılması açısından yenilikçi yöntemlerdir. Kontak mekanik daha çok yapı-yapı etkileşimlerinde kullanılmış olup geliştirilen yöntemler ile ilk olarak yapı-sıvı etkileşiminde kullanılmıştır. Sıvı kısmın modellenmesi için kullanılan birçok farklı parçacık tabanlı yöntem vardır (MPS, SPH vs.). Kullanılan yöntemi diğer hibrit yöntemlerden farklı kılan yönü kullanılan farklı yöntemlerin akupajının sağlanma şeklidir. Literatürde önerilen çoğu yöntemde sıvı ve yapı ayrı olarak çözülmekte ve iki taraflı akupaj uygulanmaktadır. Bu tip yöntemlerde iterasyon sayısı artmaktadır. Buna

karşın geliştirilen yöntemlerde yapı ile etkileşim halindeki sıvı parçacıkları yapı ile beraber tek bir hareket denklem seti içinde çözülmektedir. Bu çalışmada deplasman tabanlı SPH-FEM akupaj yöntemi ardıl baraj yıkılması durumu için test edilmiştir.

Bir sonraki kısımda, modelde kullanılan SPH denklemleri verilmiştir. Daha sonraki kısımda ise akupaj yönteminden bahsedilmiş olup, SPH-FEM denklemleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Sonraki bölümde sayısal model düzeneği gösterilmiştir ve sayısal modelde kullanılan parametreler tanımlanmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçlar sunulmuştur ve yorumlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Yapı-sıvı etkileşimi için bu çalışmada kullanılan yöntem, yapı ve sıvının aynı anda çözülmesine olanak sağlar. Sıvı kısım SPH ile katı kısım ise FE yöntemi ile modellenmiştir. İki kısım arasındaki etkileşim için ise kontak mekanik kullanılmıştır. Ayrıca, problem sınır koşulları SPH parçacıklarıyla sağlanarak da modellenmiştir. Özetle, bu ikinci yöntemde, sıvı kısım SPH ile katı kısım ise SPH'nin sınır parçacıkları olan ve sanal parçacıklar olarak isimlendirilen yöntem ile sınır koşulu olarak modellenmiştir.

SPH Yöntemi

SPH denklemleri hidrodinamik problemleri için geliştirilmiş olup, yoğunluk ve hız gibi değişkenler, kısmi diferansiyel denklemleri ile tanımlanır. SPH'nin formülleştirilmesinde iki önemli adım vardır. Birincisi integral gösterimi ya da kernel yaklaşımı, ikincisi ise parçacık yaklaşımıdır (Liu ve Liu, 2003). Aşağıda SPH yönteminde kullanılan genel formül verilmiştir. Ayrıntılı bilgiye Dinçer ve ark. (2018)'nin çalışmalarından ulaşılabilir.

$$f(x) = \int f(\mathbf{r}') \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte f , bir pozisyon vektörünün (\mathbf{r}), fonksiyonu iken $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ ise dirac delta fonksiyonudur (Liu ve Liu, 2003). Bu integral gösterimi, dirac delta fonksiyonunu kernel fonksiyonu olarak değiştirerek ($\mathbf{W}(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) = \mathbf{W}_{ij}$) ve bazı dönüşümler yapılarak aşağıdaki toplam şeklinde ifade edilebilir (Liu ve Liu, 2003; Dinçer, 2017).

$$f(x) = \sum \frac{m_j}{\rho_j} f_j \mathbf{W}_{ij} \quad (2)$$

Denk. (2)'de m_j ilgili parçacığın çevresindeki herhangi bir parçacığın kütlesi ve ρ_j ilgili parçacığın çevresindeki herhangi bir parçacığın yoğunluğudur. Bu çalışmada aşağıda formülü verilen kübik kernel fonksiyonu kullanılmıştır.

$$W(R) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2} R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6} (2 - R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

Denk. (3)'te iki boyut için ampirik katsayı, $\alpha_d = 15/7\pi h^2$ alınır (Liu ve Liu, 2003), h değeri kernel fonksiyonun yumuşatma uzunluğudur (smoothing length) ve bu çalışmada başlangıçtaki iki parçacık arasındaki mesafenin 1.33 katı olarak alınmıştır. R iki parçacık arasındaki göreceli mesafedir.

Sırasıyla kütle ve momentumun korunumu parçacık biçiminde aşağıdaki şekillerde yazılabilir (Monaghan, 1992).

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \nabla_i \mathbf{W}_{ij} \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) \nabla_i \mathbf{W}_{ij} + \mathbf{g} \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{u}_i + 0.05 \sum_j m_j \left(\frac{\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j}{\bar{\rho}_i} \right) \mathbf{W}_{ij} \quad (6)$$

Bu eşitliklerde \mathbf{u} parçacıkların hızı, P parçacıkların basıncı, \mathbf{g} yerçekimi ivmesi, π_{ij} ise viskozite etkisini gösteren ampirik bir terimdir ve eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\pi_{ij} = - \frac{\phi \mu_{ij} \bar{c}_{ij} - \varphi_{ij}^2}{\bar{\rho}_{ij}} \quad (7)$$

$$\mu_{ij} = \frac{h \mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}}{\|\mathbf{r}_{ij}\|^2 + 0.001h^2} \quad (8)$$

Denk. (7)'de ϕ ve φ ampirik katsayılar olup sırasıyla 1 ve 0.2 olarak alınmıştır (Monaghan, 1992). Yapay viskozite, π_{ij} , sıvı parçacıkların birbiri içine girmesini engellemek için gereklidir.

Hesaplamalı akışkan dinamiği problemlerinde, akışkan genel olarak sıkıştırılmaz kabul edilir ve Poisson denklemleri çözülerek akışkanın basıncı hesaplanır. Hesaplama hızını arttırmak için, akışkanı az miktarda sıkıştırılabilir kabul ederek, Poisson denklemleri kullanılmadan, basınç aşağıdaki formülden hesaplanır (Monaghan, 1994).

$$P = P_0 \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right) \quad (9)$$

Denk. (9)'da P_0 başlangıçtaki basınç olup, hidrostatik basınç olarak akışkana dağıtılmıştır, ρ_0 ise başlangıç yoğunluğu olup suyun yoğunluğu olan 1000 kg/m^3 alınmıştır.

Dinamik çözümde zaman diskritizasyonu için Leap-Frog algoritması kullanılmıştır (Liu ve Liu, 2003). Zaman adımı Courant durumu (CFL) ile kontrol edilir (Anderson, 1995; Hirsch, 1988).

Suyun serbest yüzeyinin basıncı sıfır olmalıdır ve serbest yüzey takibi SPH tarafından herhangi bir işleme gerek olmadan kendiliğinden yapılır. Duvar sınır koşulu için ise çalışmada iki farklı sınır yöntemi kullanılmıştır. İlk yöntemde sınır durumu yapı elemanlarıyla tanımlanmış olup, SPH-FEM akupajı ile çözüm yapılmıştır. İkinci yöntemde ise SPH parçacıkları kullanılarak çözüm yapılmıştır. İki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.”

SPH yöntemiyle duvar sınır koşulunu modellemek için ayna parçacık yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, sınıra yakın parçacıkların sınıra göre ayna görüntüsü alınır ve bu görüntüye göre ayna parçacıkları olarak adlandırdığımız sınır parçacıkları oluşturulur. Dolayısı ile sıvı parçacığı sınıra yaklaştıkça, ayna parçacığı da ters taraftan sınıra yaklaşır ve sıvı parçacığının sınıra girişi önlenir. Bu yöntemde kernel tamamlandığı için kernel kesme hatası azdır.

Diğer sınır yöntemi olan SPH-FEM akupajı sonraki kısımlarda anlatılmıştır.

Akupaj Yöntemi

Giriş kısmında da bahsedildiği gibi literatürde çeşitli akupaj yöntemleri vardır. Bu çalışmada iki farklı alanın aynı anda çözülmesine olanak sağlayan kontak mekanik kullanılmıştır. Akupajda yapı modeli için kullanılan FEM yöntemi konvansiyonel bir yöntemdir. Bu çalışmada uygulanan kuvvetler altında kullanılan malzemeler doğrusal elastik davranış gösterse de tüm doğrusal olmayan etkiler (geometrik ve malzeme) hesaba katılmıştır. Ağ tabanlı bir yöntem olan FEM ile parçacık tabanlı bir yöntem olan SPH, kontak mekanik kullanılarak etkileşim içine sokulmuştur. Bathe ve Chaudhary (1985) tarafından iki boyutta iki yapının çizgi-çizgi etkileşimi için tanımlanan potansiyel, SPH-FEM akupajı

için nokta-çizgi etkileşim formuna dönüştürülmüştür. Denklemin derivasyonu için yazarların önceki çalışması takip edilebilir (Dinçer ve ark. 2019).

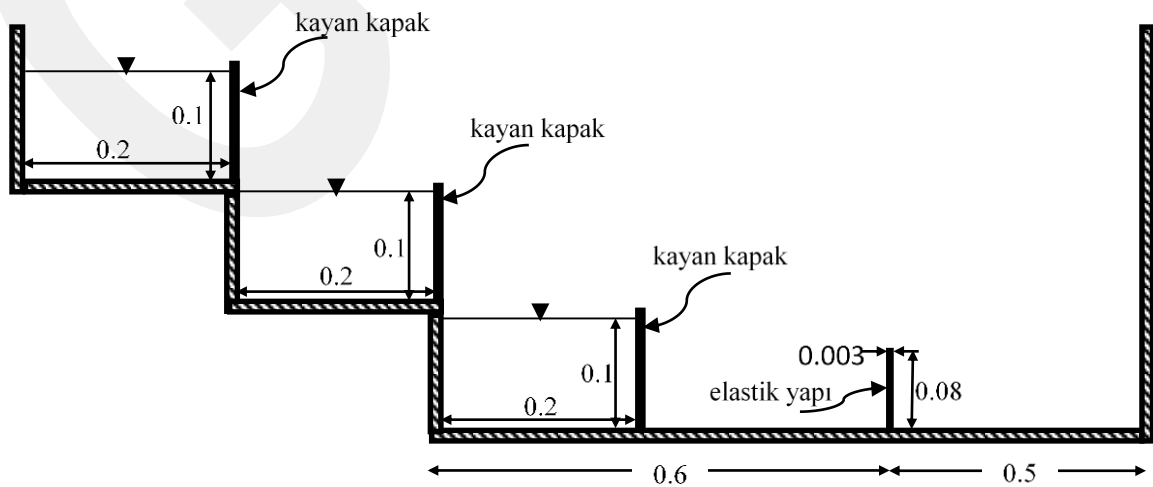
$$\begin{bmatrix} [{}^{t+\delta t}K_{solid}^{(i-1)} & \underline{0} \\ \underline{0} & \frac{2}{\Delta t^2} {}^{t+\delta t}M_p^{(i-1)} \\ [{}^{t+\delta t}K_c^{(i-1)}]^T & \underline{0} \end{bmatrix} [{}^{t+\delta t}K_c^{(i-1)}] \begin{bmatrix} \Delta \vec{U}_{solid}^{(i)} \\ \Delta \vec{U}_p^{(i)} \\ \Delta \vec{\lambda}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{t+\delta t}\vec{R} \\ \underline{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^{t+\delta t}\vec{F}^{(i-1)} \\ \underline{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^{t+\delta t}\vec{R}_c^{(i-1)} \\ {}^{t+\delta t}\vec{\Delta}_c^{(i-1)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Denk. (10)'da $\Delta \vec{U}_{solid}^{(i)}$ ve $\Delta \vec{U}_p^{(i)}$ sırasıyla yapının ve su parçacıklarının artımsal deplasmanıdır. Bu denklemde $[{}^{t+\delta t}K_{solid}^{(i-1)}]$ yapının rijitlik matrisi, $[{}^{t+\delta t}K_c^{(i-1)}]$ kontak rijitlik matrisi, $\Delta \vec{U}^{(i)}$ artımsal deplasman vektörü, $\Delta \vec{\lambda}^{(i)}$ artımsal kontak kuvvet vektörü, ${}^{t+\delta t}\vec{R}$ uygulanan toplam harici yük vektörü, ${}^{t+\delta t}\vec{F}^{(i-1)}$ eşlenik düğüm noktası kuvvet vektörü, ${}^{t+\delta t}\vec{R}_c^{(i-1)}$ kontak kuvvet vektörü, ${}^{t+\delta t}\vec{\Delta}_c^{(i-1)}$ parçacıkların hedef yüzeye girme miktarları vektörü.

Denk. (10)'a yapının kütle katılımı ve sönümlenme matrisi eklenerek Wilson teta ($\theta = 1.42$) yöntemi ve Rayleigh damping (sönümlenme) yöntemi kullanılarak çözüldüğünde SPH parçacıklarında ve yapıda oluşan deplasmanlar bulunur.

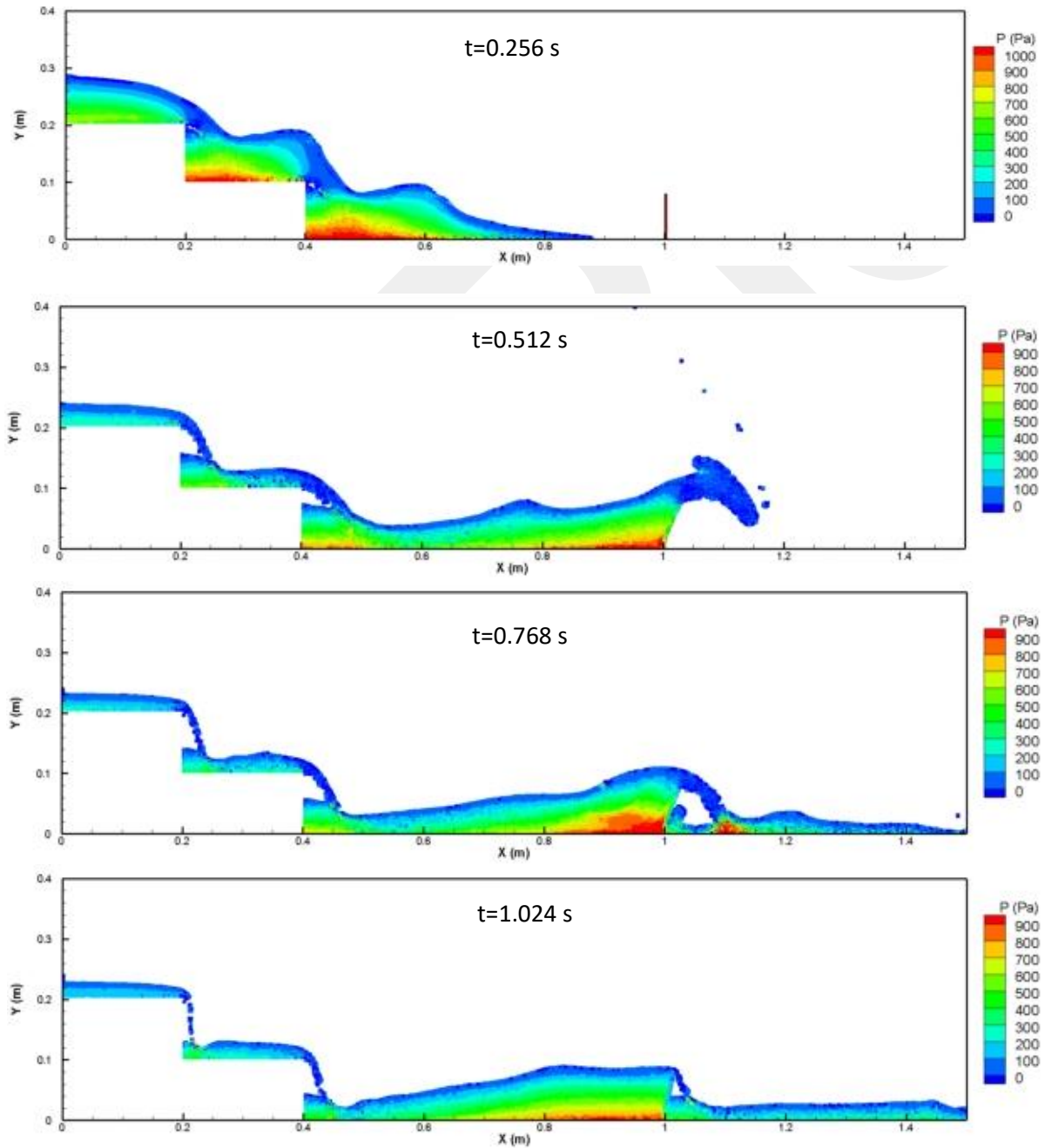
BULGULAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen FSI yöntemi, Şekil 1'de gösterilen sayısal model ile test edilmiştir. Genişliği 0.2 m, yüksekliği 0.1 m olan su kolonları içeren üç idealize edilmiş baraj şeklinde gösterildiği gibi ardıl olarak yerleştirilmiştir. Kayan kapaklar aynı anda kaldırılarak suyun hareketi sağlanmıştır. Sayısal yöntemde, kayan kapağın anlık olarak kaldırıldığı varsayılmıştır. Modelde sıvı olarak yoğunluğu 1000 kg/m^3 ve dinamik viskozitesi $1 \times 10^{-3} \text{ Pas}$ olan su kullanılmıştır. Su, alt barajın mansabından 0.4 m uzaklıkta olan elastik yapıya çarpıp, yapıyı deforme eder. Yapının elastisite modülü ortalama 10 MPa, genişliği 3 mm ve uzunluğu 8 cm'dir. Sayısal modelde, farklı zamanlarda gözlemlenen su serbest yüzeyleri ve basınçları ve yapının deformasyonu ölçülmüştür.

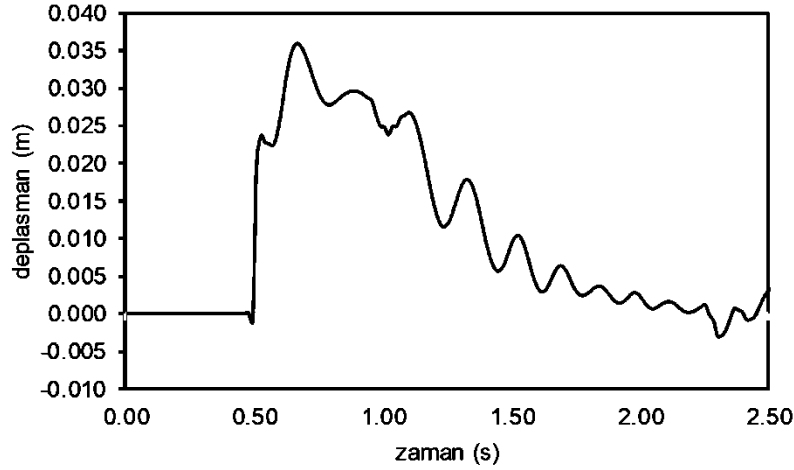


Şekil 1. Sayısal model düzeneği (bütün birimler m cinsindedir)

Şekil 2’de üç idealize edilmiş barajın anlık yıkılması sebebiyle oluşan su yüzü profilleri ve yapı deformasyonları verilmiştir. Su yüzü profilleri her $t = 0.256$ s’de gösterilmiştir. Şekilde su yüzeyinde oluşan basınç dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3’te ise suyun çarpmasıyla yapının sol üst köşesinde meydana gelen zamana bağlı deplasman grafiği verilmiştir. Yapının üst köşesinin deplasmanı önce negatif yönde bir deplasman yapıp daha sonra pozitif yönde hareketine devam etmiştir. Bunun sebebi suyun yapıya ilk başta alt tarafından vurması olup, alt taraftan darbe alan yapının alt bölgesi pozitif yönde deplasman yaparken, üst tarafı ise negatif yönde deplasman yapmaktadır. Yapıya çarpan su kütlesi arttıkça, yapının tamamı pozitif yönde deplasman yapmıştır. Görüleceği üzere üç ardıl barajın yıkılması durumunda elastik yapının üst köşesi 3.5 cm deplasman yapmıştır. Bu deplasman yapının boyunun %44’üne tekabül etmektedir.



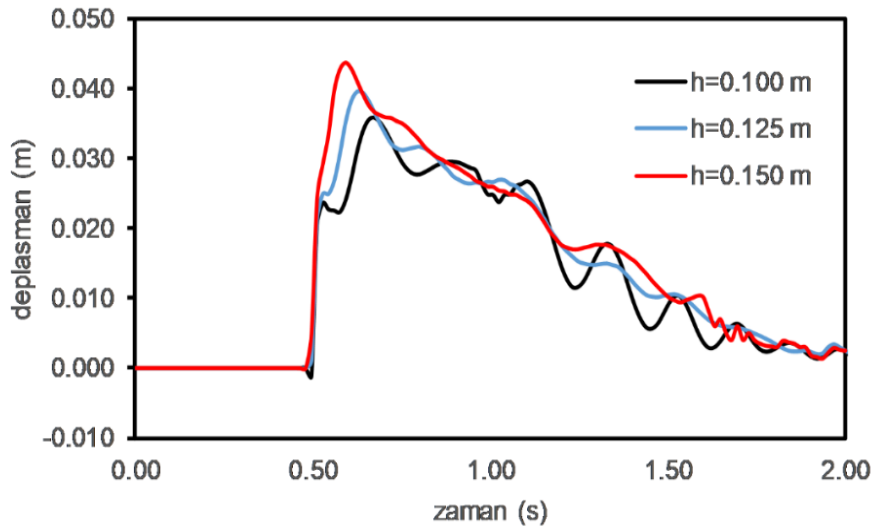
Şekil 2. Su serbest yüzeyleri



Şekil 3. Yapının sol üst köşesinin yaptığı deplasman

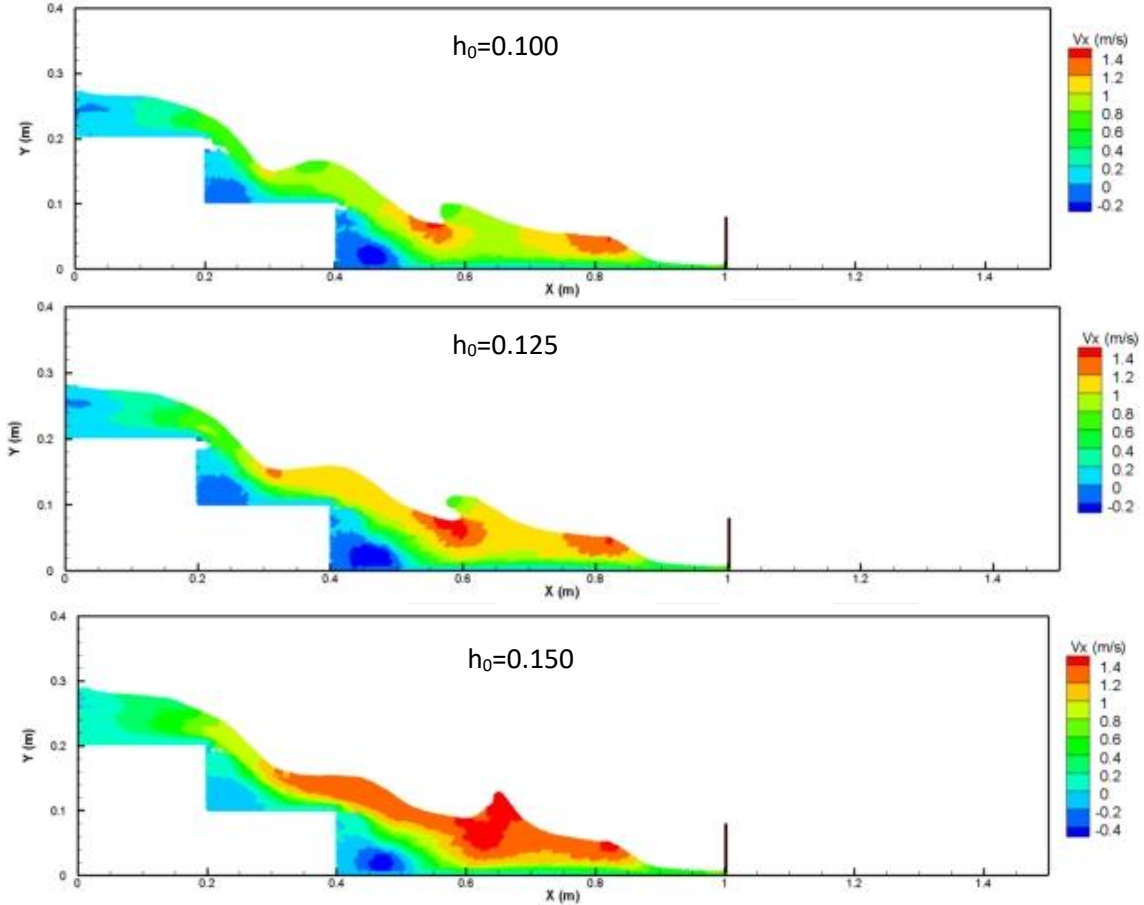
Barajdaki su yüksekliğinin mansaptaki yapının deformasyonuna etkisini görmek için, en üstteki barajın su seviyesi değiştirilmiştir. En üstteki barajın su yüksekliğinin 0.100 m, 0.125 m ve 0.150 m olduğu durumlar için Şekil 4'te yapının üst köşesinde oluşan deplasmanlar verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, üst barajdaki su seviyesinin %25 arttığı durumda yapıdaki deplasman yaklaşık %10 artarken, su seviyesi %50 arttığı zaman, yapı deplasmanı %19.5 artmıştır. Bu durum sistemin enerjisi ile açıklanabilir. En üstteki barajdaki su seviyesi %25 arttırılırsa, sistemdeki toplam enerji %8.3 arttırılmış olur. Benzer olarak en üstteki barajdaki su seviyesi %50 arttırıldığı zaman, ardıl barajlardaki toplam enerji yaklaşık %16.7 arttırılmış olur. Görüleceği üzere yapının deplasmanı, enerji artışından daha fazla artış göstermektedir.

Su kütleleri, üç farklı su seviyesi için de aynı anda elastik yapıya ulaşırlar. Yapının en yüksek deplasman değerine ulaşma süresinin, üst barajdaki su seviyesiyle ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca su seviyesi 0.100 m ve 0.125 m iken, yapının deplasmanı artmaya başlayıp, sonra bu artış azalıp son olarak da tekrar deplasman yaparak pik değerine ulaşır. Üst barajdaki su 0.150 m iken deplasmandaki bu duraklama gözlemlenmez. Bunun sebebi üst barajdaki suyun, yapıya hızlı bir şekilde ulaşmasıdır. Alt barajdan gelen su, yapıda deplasman oluşturmaya devam ederken, üst barajdaki hızlı bir şekilde yapıya ulaşır, yapıda daha fazla deplasman yaratmıştır.



Şekil 2. En üstteki barajdaki farklı su yükseklikleri için hesaplanan yapının deplasmanı

Üç farklı üst baraj su seviyesi için, suyun yapıya tam ulaştığı andaki serbest su yüzeyi profilleri ve su hızı profilleri Şekil 5'te verilmiştir. Üst barajdaki su seviyesi arttıkça, su yüzeyinde gözlemlenen yatay hızlar da beklenildiği üzere artmaktadır. Barajların menbasında eksi hızlar gözlemlenmektedir, yani vorteks oluşumu modelde yakalanmıştır.



Şekil 3. Farklı su seviyeleri için su yüzü profilleri

SONUÇ

Bu çalışmada, literatürde fazla incelenmeyen ardıl baraj yıkılması problemi sayısal olarak araştırılmıştır. İncelenen ardıl baraj yıkılması problemi araştırmacılar tarafından geliştirilen akupajın kontak mekanik ile sağlandığı SPH-FEM yapı-sıvı etkileşimi yöntemi ile modellenmiştir. Çalışmada üç ardıl baraj kullanılmış olup, en üstteki barajın su seviyesi değiştirilerek, mansaba yerleştirilen elastik bir yapının deplasmanları ölçülmüştür. Yapıdaki deplasmanın oransal olarak, enerji artma oranından daha fazla arttığı gözlemlenmiştir. Enerji ile deplasman arasındaki ilişkinin doğrusal olmamasının sebeplerinden biri yapının yaptığı yüksek deplasmanlardan dolayı yapıdaki doğrusal olmayan etkilerin olması diğeri yapıdaki şekil değişiminden dolayı su akış yönünün değişmiş olmasıdır. Yapı ve sıvının birbirilerinden etkilenerken gerçekleştirdikleri davranış değişiklikleri enerji deplasman ilişkisinin doğrusallığını bozmuştur.

Türkiye'de birçok ardıl baraj bulunmakta olup, bu barajların olası yıkılma simülasyonları yapılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır. Bu çalışmada geliştirilen FSI yönteminin kapasitesi incelenmiş ve ardıl baraj problemlerine uygulanabilirliği teorik olarak test edilmiştir. Geliştirilen FSI yöntemi kullanılarak, gerçek ölçekli barajlar için çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Ayrıca baraj yıkılması sonrası oluşan sediment akışının ve sedimentli akışın mansaptaki baraj gövdesine ya da elastik yapılara vereceği zararların incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adami S, Hu XY, Adams NA, 2012. A Generalized Wall Boundary Condition for Smoothed Particle Hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 231 (21): 7057–75.
- Anderson JD, (1995). *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Mc Graw-Hill.
- Attaway S, Heinstein M, Swegle J, 1994. Coupling of smooth particle hydrodynamics with the finite element method. *Nuclear Engineering and Design*, 150 (2-3): 199-205.
- Bathe K, Chaudhary A, 1985. A solution method for planar and axisymmetric contact problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21: 65-88.
- DeVuyst T, Vignjevic R, Campbell JC, 2005. Coupling between meshless and finite element methods. *International Journal of Impact Engineering*, 31(8): 1054–1064.
- Demir A, Dinçer AE, Bozkuş Z, Tijsseling AS, 2019. Numerical and experimental investigation of damping in a dam-break problem with fluid-structure interaction, *Journal of Zhejiang University*, 20 (4):, 258-271.
- Demir A, Dinçer AE, 2017. MPS ve FEM Tabanlı Akışkan-Yapı Etkileşimi Modelinin Çoruh Nehri Üzerindeki Ardıl Baraj-Yıkılma Problemine Uygulanması. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 90(312): 1–6.
- Dinçer AE, Bozkuş Z, Şahin AN, 2016. Effect of Downstream Channel Slope on Numerical Modelling of Dam Break Induced Flows. In *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change - Proceedings of the 4th European Congress of the International Association of Hydroenvironment Engineering and Research*, Belgium, July 27-29, 2016.
- Dinçer AE, 2017. Numerical investigation of free surface and pipe flow problems by smoothed particle hydrodynamics, METU, PhD Thesis (printed).
- Dinçer AE, Demir A, Bozkuş Z, Tijsseling AS, 2019. Fully Coupled Smoothed Particle Hydrodynamics-Finite Element Approach for Fluid-Structure Interaction Problems with Large Deflections, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 141(8): 081402-081415.
- Fernandez-Mendez S, Bonet J, Huert, A, 2005. Continuous blending of SPH with finite elements. *Computers and Structures*, 83: 1448-1458.
- Fourey G, Hermange C, LeTouzé D, Oger G, 2017. An efficient FSI coupling strategy between Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element methods, *Computer Physics Communications*, 217: 66-81.
- Fourey G, Oger G, Touzé DL, Alessandrini B, 2010. Violent Fluid-Structure Interaction simulations using a coupled SPH/FEM method, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 10: 012041.
- Groenenboom PHL, Cartwright BK, 2010. Hydrodynamics and fluid-structure interaction by coupled SPH-FE method, *Journal of Hydraulic Research*, 48: 61-73.
- Hirsch C, 1988. *Numerical Computation of Internal and External Flows*. Volume 1, Wiley-Interscience publication.
- Hu D, Long T, Xiao Y, Han X, Gu Y, 2014. Fluid–structure interaction analysis by coupled FE–SPH model based on a novel searching algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 276: 266-286.
- Liu GR, Liu MB, 2003. *Smoothed particle hydrodynamics: A mesh-free particle method*. World Scientific, Singapore.
- Lobovský L, Botia-Vera E, Castellana F, Mas-Soler J, Souto-Iglesias A, 2014. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break. *Journal of Fluids and Structures*, 48: 407-434.
- Long T, Hu D, Wan D, Zhuang C, Yang G, 2017. An arbitrary boundary with ghost particles incorporated in coupled FEM–SPH model for FSI problems, *Journal of Computational Physics*, 350: 166-183.
- Monaghan J, 1992. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30 (1): 543-574.
- Monaghan, J, 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110(2): 399-406.
- Zhang Z, Qiang H, Gao W, 2010. Coupling of smoothed particle hydrodynamics and finite element method for impact dynamics simulation. *Engineering Structures*, 33: 255-264.