

## شبیه‌سازی عددی امواج ضربه‌ای با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر

صاحب منصوررضایی<sup>۱</sup>، بهزاد عطایی آشتیانی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

\* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۱۱۳۶۵

ataie@sharif.edu

**چکیده** - هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی عددی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش‌ها در مخازن سدها با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر<sup>۱</sup> (C-SPH) می‌باشد. روش SPH ابتدا در مسائل اخترشناسی استفاده شد و سپس در زمینه‌های گوناگونی از جمله جریان‌های با سطح آزاد بررسی شد. این روش، کاملاً لاگرانژی است و در آن به هیچ نوع شبکه‌بندی نیاز نیست و با توجه به قابلیت روش در شبیه‌سازی حرکت سیال با تغییرات زیاد در بسیاری از مسائل با موفقیت به‌کار رفته است. در زمینه بررسی امواج ضربه‌ای، مطالعات آزمایشگاهی جامعی در دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف انجام شده و وضعیت‌های مختلف زمین لغزش - لغزش فوق سطحی و لغزش زیر سطحی - شکل‌های گوناگون گوه لغزنده، اجسام لغزنده تغییر شکل‌پذیر و مانند آن. بررسی شده است. در این مقاله ابتدا مشخصات اجزای آزمایشها توصیف و سپس به طور خلاصه، شرحی از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر و مدل عددی مورد استفاده (SPHysics) ارائه و در نهایت نتایج شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی به‌دست آمده از مدل عددی با نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه خواهد شد.

**کلید واژگان:** روشهای لاگرانژی، هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر، امواج ضربه‌ای، لغزش دیواره.

### ۱- مقدمه

موج‌های ضربه‌ای در مخازن سدها یا در اقیانوس‌ها به‌وسیله عوامل متعددی ایجاد می‌شوند که مهمترین آنها را می‌توان وقوع زمین لغزه‌ها، سقوط بهمن، پرتاب شدن صخره به درون آب و جریان‌های چگال حاوی گل و لای برشمرد (Ataie-Ashtiani and Najafi-Jilani, 2006). شیب‌های بسیار تند در بستر دریا، روان‌گرایی و بار ناشی

از حرکت امواج، مهمترین عوامل وقوع زمین لغزه‌ها هستند (Imran et al., 2001a). وقوع این پدیده‌ها به دو طریق می‌تواند باعث ایجاد خرابی‌های وسیع شوند: اول از طریق انتقال مصالح با حجم هزاران کیلومتر مکعب که می‌تواند باعث از بین بردن خطوط انتقال موجود در بستر دریا و سازه‌های ساخته شده در دریا شوند

1. Compressible Smooth Particles Hydrodynamics  
2. <http://civil.sharif.edu/~ataie/ ImpWave/SubmarinExp>.

که در روش C-SPH، تراکم‌پذیری اندکی برای سیال در نظر گرفته شده و با استفاده از معادله حالت و چگالی سیال، فشار ذرات سیال محاسبه می‌شود، با اعمال این فشار در معادله مومنتم، سرعت و موقعیت ذرات در گام زمانی بعدی به دست می‌آید.

بر اساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر، عطایی آشتیانی و شبیری (2007) روش اصلاح شده M-I-SPH را معرفی کردند. در این روش سعی شده با اصلاح قسمتی از معادلات I-SPH، معادله پواسن فشار برای ذرات سطح آزاد به کار رود که این تصحیح همراه با شکل جدید عبارت منبع، تأثیر قابل توجهی بر افزایش دقت و پایداری روش M-I-SPH دارد. روش M-I-SPH برای شبه‌سازی مسائل گوناگونی مانند امواج ناشی از لغزش جسم صلب در راستای سطح شیبدار، امواج ناشی از حرکت جسم مستغرق شکل‌پذیر و موج ضربه‌ای ناشی از برخورد قائم جعبه‌ای سنگین با سطح آب به کار گرفته شد. عطایی آشتیانی و جلالی فراهانی (2007) به تحقیق در باره کاربرد روش M-I-SPH در مدل‌سازی امواج ناشی از شکست سد و همچنین امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش زیرسطحی با تمرکز بر انتخاب تابع کرنل مناسب پرداختند. برای این منظور هشت تابع کرنل مختلف بررسی شده است. بررسیها نشان داد که در مسائل امواج ضربه‌ای، تابع کرنل درجه دو دقت بیشتری نسبت به بقیه توابع کرنل دارد. در نهایت با استفاده از تابع کرنل منتخب، مدل آزمایشگاهی جامعی در زمینه زمین لغزش زیر سطحی بررسی شده است.

در این مقاله ابتدا به توصیف آزمایشهای مربوط به موج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش زیرسطحی - که در دانشگاه صنعتی شریف انجام شده - پرداخته می‌شود، سپس در مورد اصول روش SPH توضیح مختصری داده خواهد

(Imran et al., 2001b) و دوم از طریق ایجاد موج‌هایی با ارتفاع زیاد. امواجی که بدین طریق ایجاد می‌شوند، به علت ماهیت ضربه‌ای، طول موج زیاد و تناوب کوتاه، سرعت بالا و نیروی تخریبی بزرگی دارند.

با توجه به اهمیت تخمین خسارت ناشی از به زیر آب رفتن زمینهای مجاور خط ساحلی بر اثر امواج ضربه‌ای، تحت اثر زلزله یا سقوط جسم خارجی در درون توده آب، و خسارت فراوانی که بر اثر برخورد این امواج به دیواره مخازن، بدنه سدها و سازه‌های هیدرولیکی مجاور مانند سرریزها و سایر تأسیسات واقع در اطراف دریاچه سد وارد می‌شود، ضرورت بررسی ایجاد، انتشار و بالاروی این امواج با استفاده از روشهای دقیق مشخص می‌شود. یکی از این روشها که به علت توانایی خوب در مدل سازی جریان‌های سطح آزاد، به تازگی مورد توجه قرار گرفته، روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) است. این روش، کاملاً لاگرانژی بوده و در آن به هیچ نوع شبکه‌بندی نیاز نیست. با توجه به قابلیت این روش در شبه‌سازی حرکت سیال با تغییرات زیاد، از آن در بسیاری از مسائل با موفقیت استفاده شده است. در این راستا، از سال ۲۰۰۰، برخی از محققان سعی داشتند ابزاری مهندسی را توسعه دهند تا در زمینه‌هایی مثل شکست و انتشار موج‌هایی با درجه غیر خطی بالا، قابل استفاده باشد. این تلاشها موجب شد که در آگوست سال ۲۰۰۷ مدلی برای مطالعه جریان‌های با سطح آزاد ارائه شود تا در مسائلی که روشهای اوپلری قابلیت استفاده نداشت، به کار برده شود (User Guide for the SPHysics code).

روش SPH را می‌توان به دو دسته تراکم‌پذیر (C-SPH) و تراکم‌ناپذیر<sup>۱</sup> (I-SPH) طبقه‌بندی کرد. در روش I-SPH سیال کاملاً تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود، در حالی

1. Incompressible Smooth Particles Hydrodynamics

فشار دینامیکی (ST1 تا ST8) نشان داد شده است (Ataie-Ashtiani and Najafi-Jilani, 2008).

### ۳- شبیه‌سازی عددی - روش

#### هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر

در این بخش ابتدا معادلات حاکم بر جریان و سپس خلاصه‌ای از نحوه عملکرد مدل SPHysics که بر مبنای C-SPH کار می‌کند، ارائه می‌شود. مدل SPHysics با مشارکت پژوهشگرانی از دانشگاه جان-هاپکینز<sup>۱</sup> آمریکا، دانشگاه ویگو<sup>۲</sup> اسپانیا، دانشگاه منچستر<sup>۳</sup> انگلستان و دانشگاه رم<sup>۴</sup> ایتالیا در آگوست ۲۰۰۷ به منظور شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی پدیده‌هایی مانند شکست سد در بستر خشک و مرطوب، برخورد موج ایجاد شده توسط پارو با ساحل، برخورد موج ناشی از شکست سد با ستون و موج سونامی ایجاد شده ناشی از لغزش گوه مستطیلی تهیه شد. مدل عددی SPHysics، قابلیت به‌کارگیری تابع کرنل گوسی<sup>۵</sup>، تابع کرنل درجه ۲ (کوادریتیک)<sup>۶</sup>، تابع کرنل درجه ۳ (کیوبیک)<sup>۷</sup> و تابع کرنل درجه ۴ (کوئینتیک)<sup>۸</sup> را دارد. همچنین در مدل SPHysics، شرایط مرزی پویا و شرایط مرزی دفع کننده برای شبیه‌سازی مرزهای جامد قابل استفاده است.

#### ۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان عبارتند از معادله بقای جرم و مومنتم که به صورت معادلات دیفرانسیلی ۱ و ۲ بیان می‌شوند.

شد و در نهایت مدل عددی SPHysics برای شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی موج ناشی از زمین لغزش به‌کار گرفته می‌شود.

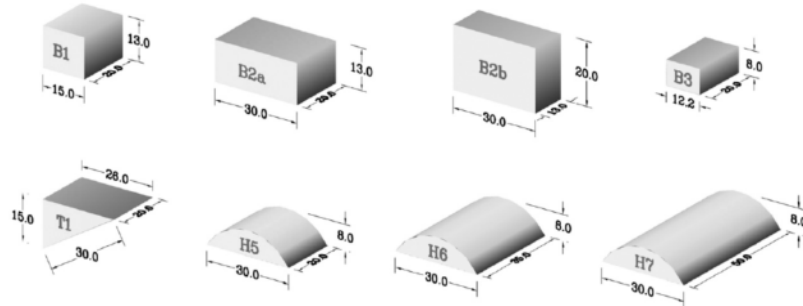
### ۲- آزمایشهای امواج ضربه‌ای ناشی از

#### لغزش زیر سطحی

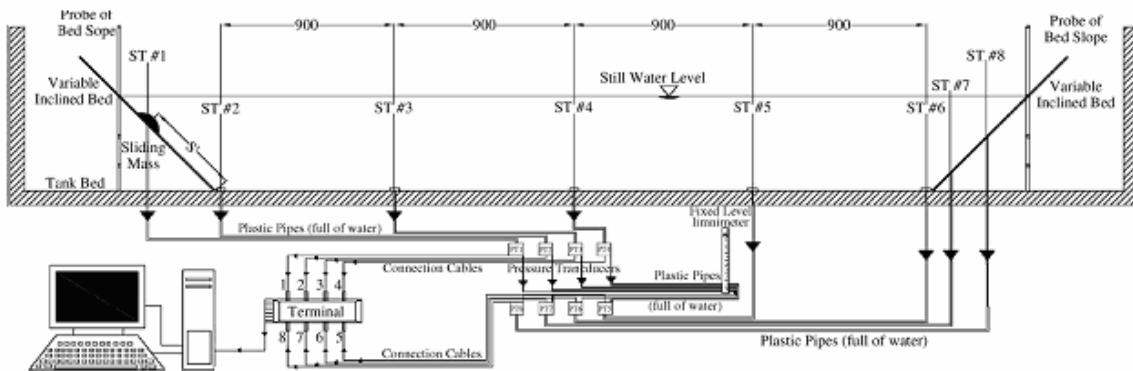
در این مجموعه آزمایشها که در آزمایشگاه صنایع دریایی دانشگاه صنعتی شریف انجام شد، به مطالعه امواج ایجاد شده ناشی از لغزش توده‌ای صلب به درون آب پرداخته شد. توده لغزنده صلب بر روی شیب ابتدایی فلوم مستقر و از وضعیت اولیه خود رها می‌شد. گوه‌های لغزنده به‌کار رفته در آزمایش دارای مقاطع مثلثی، مستطیلی و هذلولوی شکل بود. در شکل ۱ مشخصات هندسی این گوه‌ها نشان داده شده است.

طول مخزن موج برابر ۲۵ متر، عرض آن برابر ۲/۵ متر و عمق آن برابر ۱/۸ متر بود. در نیمه میانی این مخزن و در محدوده‌ای با طول ۴ متر، دو سطح شیبدار مستقر شد. هر یک از این سطوح شیب دار قابلیت تغییر زاویه نسبت به افق را دارد، به گونه‌ای که یکی از چهار زاویه ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق برای آن قابل تنظیم بود. آزمایشها با استفاده از گوه با مقاطع متفاوت و سطوح شیبدار مختلف، عمق آب آرام برابر ۰/۸ و ۰/۵ متر و مقادیر مختلف استغراق انجام شد. ابزارهای اندازه‌گیری شامل حساسه‌های فشار دینامیکی در همین قسمت از مخزن موج نصب شده بود که به برداشت تراز سطح آب در طول زمان می‌پرداخت. دیواره مخزن در برخی از قسمتها به صورت شفاف ساخته شد تا امکان مشاهده پروفیل سطح آب و برداشت تصاویر از مخزن فراهم شود. دو دوربین دیجیتالی حرکت توده لغزنده را ثبت می‌کرد. در شکل ۲ طرحواره کلی مخزن آزمایش و محل نصب حساسه‌های

1. Johns Jopkins  
2. Vigo  
3. Manchester  
4. Rome  
5. Gaussian  
6. Quadratic  
7. Cubic Spline  
8. Quintic



شکل ۱ مشخصات هندسی گوه‌های صلب به‌کار رفته در مدل آزمایشگاهی



شکل ۲ طرحواره کلی مخزن آزمایش (محل نسب حساسه‌های فشار دینامیکی با ST مشخص شده است)

با  $A(\vec{r}) = \int A(\vec{r}')w(\vec{r} - \vec{r}', h)d\vec{r}'$  تقریب زده می‌شود که در آن طول هم‌وار و  $w_{ab} = w(\vec{r}_a - \vec{r}_b, h)$  تابع وزن‌گذاری یا تابع کرنل است. این رابطه پس از آنکه در نقطه  $a$  به صورت جمع زدن<sup>۱</sup> تقریب زده شد، به شکل زیر در می‌آید:

$$A(\vec{r}) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} w_{ab} \quad (3)$$

که در آن زیرنویس  $b$  مربوط به ذرات مجاور ذره اصلی و  $m_b$  و  $\rho_b$  نشان‌دهنده چگالی و جرم ذره است (Gómez and Dalrymple, 2004). بیان معادلات پیوستگی و معادله مومتم در شکل SPH در روابط (۷) و (۸) ارائه شده است. متداول‌ترین شکل معادله مومتم، استفاده از لزجت مصنوعی است که اغلب به‌علت سادگی

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} + \vec{\Theta} \quad (2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $t$  زمان،  $\vec{V}$  سرعت جریان،  $g$  شتاب ثقل،  $P$  فشار و  $\vec{\Theta}$  جمله نفوذ است.

### ۳-۲- گسسته‌سازی معادلات حاکم با استفاده

#### از روش SPH

به‌منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم به روش SPH، ابتدا معادلات دیفرانسیلی به‌کمک توابع کرنل به معادلات انتگرالی تبدیل می‌شود و در ادامه این معادلات انتگرالی به‌صورت مجموع بر روی یک سری ذرات مجاور، تقریب زده می‌شود. به بیان دیگر در روش SPH، تابع  $A(\vec{r})$

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (7)$$

که  $\gamma = 7$  و  $B$  تابعی از چگالی و سرعت صوت است (Dalrymple and Rogers, 2007).

#### ۴- نتایج مدل عددی

ابعاد و اندازه‌های مورد نیاز مدل عددی مطابق آزمایش‌های توصیف شده، تنظیم شد. جسمی با مقطع مستطیلی با طول ۰/۳ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۱۳ متر به‌عنوان جسم لغزنده انتخاب شد. عمق آب برابر ۰/۵ متر، زاویه سطح شیب‌دار با افق برابر ۳۰ درجه و عمق استغراق اولیه گوه برابر ۵ سانتی‌متر تنظیم شد. برای اعمال شرایط مرزی، دو روش شرایط مرزی پویا (Dalrymple and Knio, 2000) و شرایط مرزی دفع‌کننده (Monaghan, 1994) مد نظر قرار گرفت.

۱- شرایط مرزی پویا: در این روش دو ردیف از ذرات به‌عنوان ذرات مرز در نظر گرفته می‌شود. معادلات پیوستگی، مومنتم و معادله حالت توسط این ذرات مرزی ارضاء می‌شود، اما به این ذرات اجازه حرکت داده نمی‌شود و ذرات از معادله حرکت تبعیت نمی‌کنند.

۲- شرایط مرزی دفع‌کننده: (Monaghan, 1994) برای مطمئن شدن از این که ذرات سیال از مرز جامد عبور نمی‌کنند، این تعریف را از شرایط مرزی ارائه کرد. در این حالت مشابه نیروهای بین ملکولی، ذراتی که مرزها را تشکیل می‌دهند نیرویی به طرف مرکز ذرات سیال اعمال می‌کنند.

برای اینکه یکی از این دو روش به‌عنوان روش مناسب‌تر برای مسائل زمین‌لغزش، در مدل عددی اعمال شود، در

از آن استفاده می‌شود. در این روش لزجت به صورت یک جمله مصنوعی در رابطه گرادیان فشار وارد می‌شود (Monaghan, 1992):

$$\frac{d\bar{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \bar{V}_a w_{ab} + \bar{g} \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \bar{V}_{ab} \bar{V}_a w_{ab} \quad (5)$$

که در این روابط  $\Pi_{ab}$  جمله لزجت تابعی از محل و سرعت ذرات  $a$  و  $b$  و همچنین طول  $h$  است.

عملکرد روش SPH به مقدار زیادی به انتخاب تابع کرنل مناسب وابسته است. عطایی آشتیانی و جلالی فراهانی (2007) با بررسی چندین تابع کرنل نشان دادند که در مسائل امواج ضربه‌ای، تابع کرنل درجه ۱۲ دقت بیشتری نسبت به بقیه توابع کرنل دارد:

$$w_{ab} = w(\bar{r}_a - \bar{r}_b, h) = \alpha_N (q^2 / 4 - q - 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (6)$$

که در آن  $r_{ij} = |\bar{r}_i - \bar{r}_j|$ ،  $q = r_{ij} / h$  طول هموار و  $\alpha_N$  در مسائل دوبعدی  $\frac{3}{2\pi h^2}$  است.

#### ۳-۳- معادله حالت<sup>۲</sup>

در روش C-SPH، برای سیال، تراکم‌پذیری اندکی در نظر می‌گیرند و با استفاده از معادله حالت، فشار سیال را از روی چگالی به‌دست می‌آورند. سرعت صوت فرضی در معادله حالت باید به اندازه‌ای کوچک شود که گام‌های زمانی مدل، منطقی شود. شرط دیگر آن است که سرعت صوت باید از ۱۰ برابر بیشینه سرعت سیال بیشتر باشد تا تغییرات چگالی در سیال کمتر از یک درصد شود. با این توصیفات، رابطه بین چگالی و فشار به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

3. Dynamics Boundary Conditions  
4. Impulsive Boundary Conditions

1. Quadratic  
2. Equation of State

دید می‌شود. به منظور برطرف ساختن این تفاوتها، در پارامترهای تأثیرگذار در روش SPH و همچنین پارامترهای مؤثر بر معادلات حرکت سیال، تغییراتی به شرح زیر داده و تأثیر این تغییرات در نتایج مدل عددی بررسی شد:

۱- با مشاهده سری زمانی تغییرات سطح سیال در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی به نظر می‌رسید که کاهش لزجت می‌تواند باعث تطابق بیشتر نتایج شود. بدین منظور لزجت سیال اندکی کاهش داده و تأثیر آن بر نتایج مدل بررسی شد.

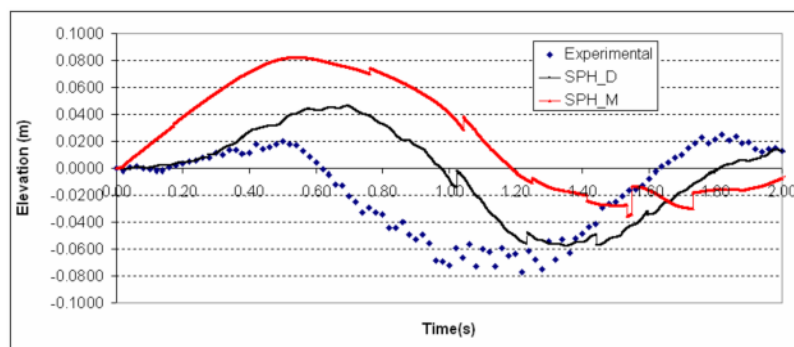
۲- همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، در روش C-SPH برای سیال، تراکم‌پذیری اندکی در نظر می‌گیرند و با استفاده از معادله حالت، فشار سیال را از روی چگالی به دست می‌آورند. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در معادله حالت، سرعت صوت (C) است که با توجه به قیود موجود، مقدار آن با سرعت واقعی صوت متفاوت است. به منظور تطابق نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی، ضریب C چندین بار تغییر داده شد تا بهترین جواب به دست آید و تأثیر تغییر این ضریب در نتایج مدل بررسی شد.

۳- نتایج روش SPH متأثر از طول هموار ذرات (h) است. این طول با توجه به ابعاد ذرات (dx, dz) از رابطه (A) به دست می‌آید که در آن ضریب Coef. بسته به نوع مسئله باید تعیین شود:

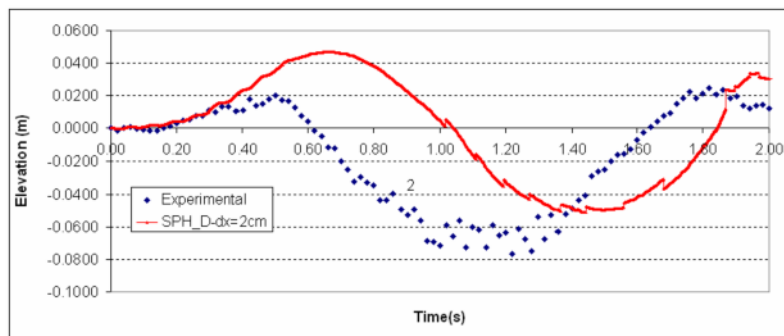
ابتدای کار بین نتایج این دو روش و نتایج آزمایشگاهی مقایسه‌ای انجام شد. شکل ۳ تغییرات تراز سطح سیال را در فاصله ۹۰۰ میلی‌متری از انتهای شیبی که گوه از روی آن می‌لغزد (ST2) نشان می‌دهد. نمودارهای ترسیم شده مربوط به نتایج آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی با شرایط مرزی دفع‌کننده و نتایج مدل عددی با استفاده از شرایط مرزی پویا است. از مقایسه نتایج دو روش، مشاهده می‌شود که روش شرایط مرزی پویا، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. بنابراین، این روش به‌عنوان روش مناسب در مسائل امواج ضربه‌ای انتخاب شد.

در شکل ۴ تغییرات تراز سطح سیال در مدل عددی (با استفاده از شرایط مرزی پویا) با نتایج آزمایشگاهی در ایستگاه‌های ST2, ST3 و ST4 تا زمان ۲ ثانیه مقایسه شده است. همچنین نتایج شبه‌سازی ایجاد و انتشار موج ناشی از زمین‌لغزه، در زمان‌های ۰/۰۶، ۰/۸۲۵، ۱/۰۵، ۱/۲ و ۱/۳۵ ثانیه، در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد. این نتایج بیانگر قابلیت خوب روش‌های لاگرانژی بدون شبکه در شبه‌سازی امواج، به‌ویژه امواج ضربه‌ای است. قابل ذکر است که گام‌های زمانی، ۰/۰۰۱۷ ثانیه در نظر گرفته شده و شبه‌سازی ۱۳/۵ ساعت به طول انجامید.

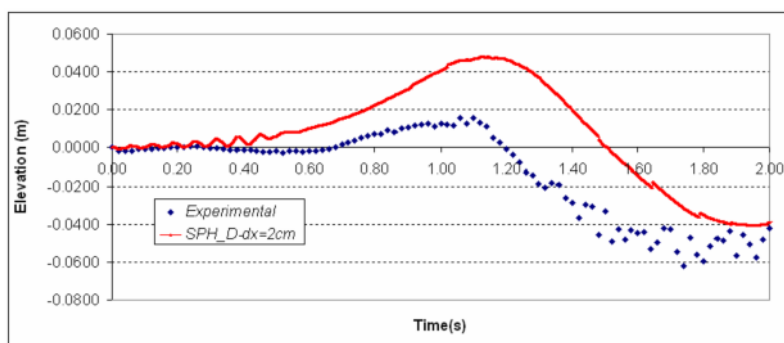
با وجود شباهت نتایج روش عددی به نتایج آزمایشگاهی، مقداری اختلاف دامنه و اختلاف فاز در نتایج شکل ۴



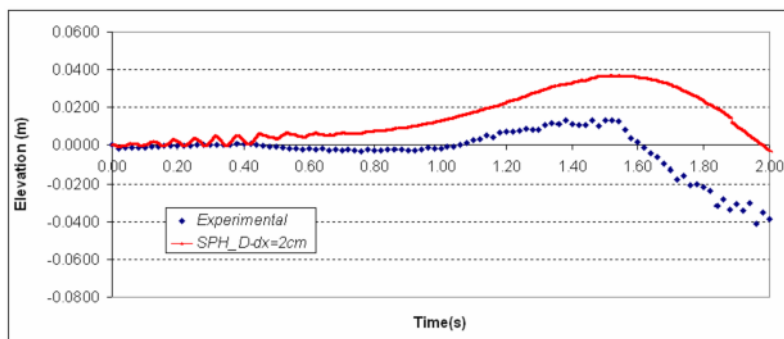
شکل ۳ مقایسه نتایج مدل عددی با شرایط مرزی پویا (SPH-D)، نتایج مدل عددی با شرایط مرزی دفع‌کننده (SPH-M) و نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در ST2.



الف- ایستگاه ST2



ب- ایستگاه ST3



ج- ایستگاه ST4

شکل ۴ مقایسه نتایج مدل عددی (ذرات ۲ سانتی متری) و نتایج اندازه گیری شده در آزمایشگاه

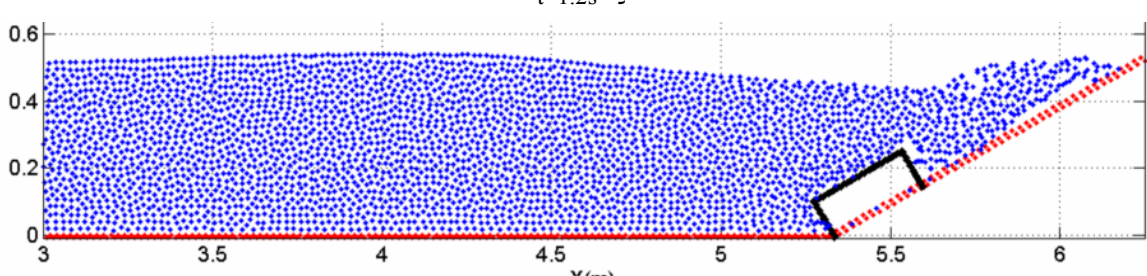
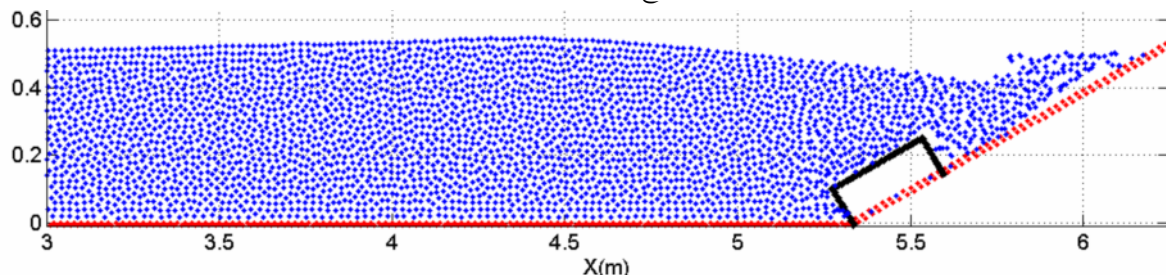
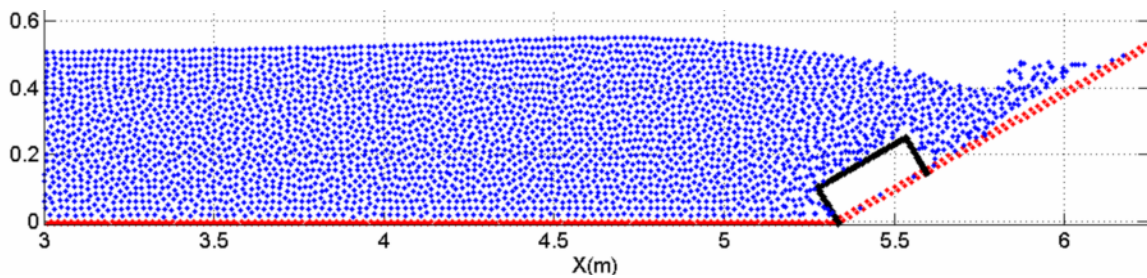
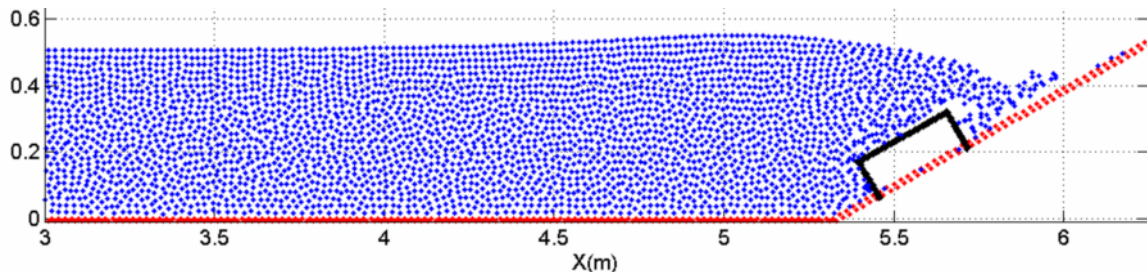
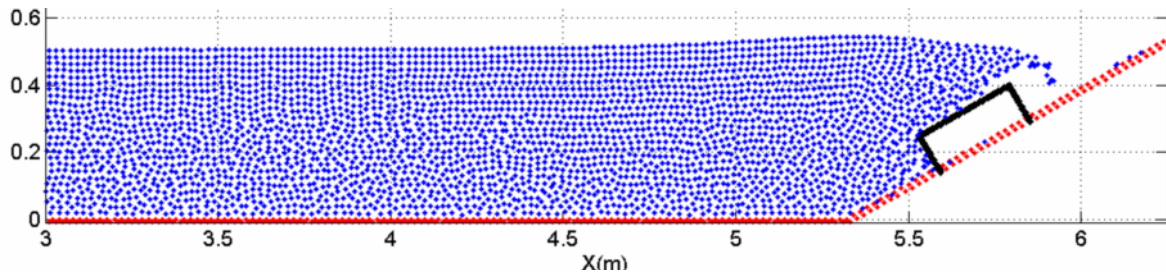
مدل دارای توجیه فیزیکی است؛ برای مثال افزایش طول هموار ذرات، ذره فرضی  $a$  را تحت تأثیر ذرات بیشتری قرار می‌دهد، که این باعث می‌شود مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر شود. همچنین افزایش ضریب سرعت صوت در معادله حالت منجر به تراکم‌پذیری کمتر و کاهش خطا خواهد شد.

$$h = coef. \times \sqrt{(dx^2 + dz^2)} \quad (۸)$$

به منظور همگرایی بیشتر نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، اثر تغییر این ضریب در نتایج مدل بررسی شد. برای این منظور، Coef. برابر ۰/۸۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۲ در نظر گرفته شد.

قابل ذکر است که تغییرات صورت گرفته در پارامترهای





شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی با استفاده از روش C-SPH. در زمان‌های مختلف



مورد نیاز به شدت زیاد می‌شود و از سوی دیگر با توجه به کوچک بودن ارتفاع موج به دست آمده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی، ذرات باید به اندازه‌ای انتخاب شوند که مدل توانایی شبیه‌سازی این موج را داشته باشد. با توجه به این مسائل، از ذرات ۸ سانتی‌متری برای شبیه‌سازی سه‌بعدی استفاده شد. در شکل ۶ نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در ST2 و ST3 مقایسه شده است. با مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی سه‌بعدی، مشاهده می‌شود که مسأله اختلاف دامنه و اختلاف فاز تا حد زیادی برطرف شده است.

پس از تحلیل حساسیت برای پارامترهای تأثیرگذار در مدل، مشابه آنچه برای شبیه‌سازی دوبعدی انجام شد، به نظر می‌رسد که در شبیه‌سازی سه‌بعدی، همگرایی بیشتر نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی، فقط با استفاده از ذراتی با ابعاد کوچکتر (تعداد ذرات بیشتر) امکان‌پذیر خواهد بود. دستیابی به این هدف نیازمند به کار بردن روشهایی برای کاهش زمان اجرا است. قابل ذکر است که در شبیه‌سازی سه‌بعدی، از شرایط مرزی پویا استفاده شد. سرعت صوت برابر ۱۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. ضریب Coef. در معادله (۸)، برابر  $0/866$  در نظر گرفته شد. همچنین تابع کرنل مورد استفاده، درجه ۲ انتخاب شد. گام‌های زمانی  $0/00005$  ثانیه بود و شبیه‌سازی سه‌بعدی ۷ ساعت به طول انجامید.

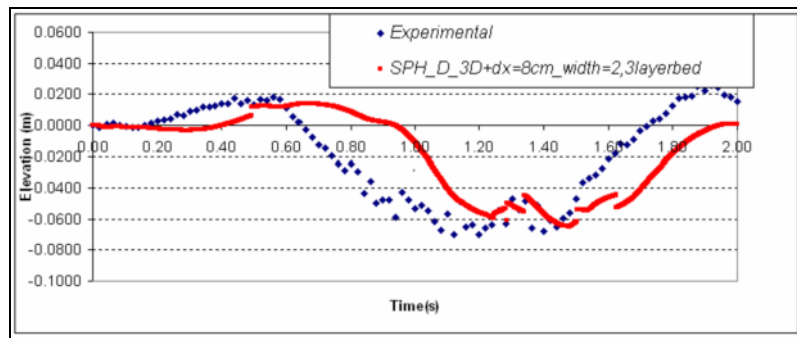
#### ۶- نتیجه‌گیری

روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر برای شبیه‌سازی موج ناشی از لغزش گوه‌ای مستطیلی مطابق آزمایشهای انجام شده، مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که نشان‌دهنده توانایی بالای روشهای لاگرانژی در شبیه‌سازی این گونه مسائل است.

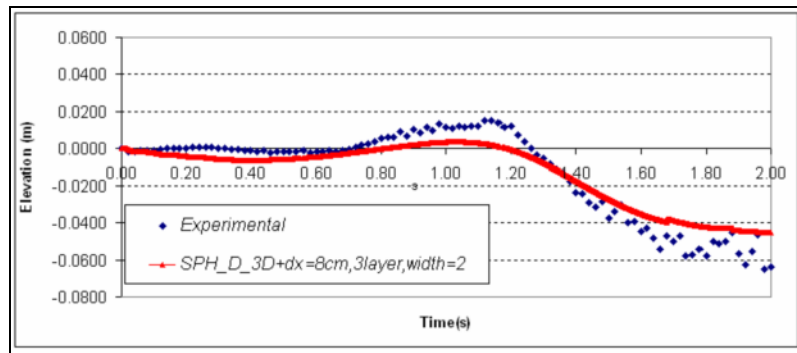
تحلیل حساسیتی که به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مدل انجام شد، نشان داد که این تغییرات، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر همگرایی بیشتر نتایج مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی ندارد. به نظر می‌رسد که علت اصلی این اختلاف‌ها شبیه‌سازی دوبعدی امواج ناشی از زمین لغزه باشد. در آزمایشهای مربوط که به صورت سه‌بعدی صورت گرفته، موج تقریباً به شکل دایره‌ای انتشار پیدا می‌کند، اما در مدل عددی که از فرض دوبعدی بودن در آن استفاده شده، موجی با عرض واحد ایجاد و منتشر می‌شود.

#### ۵- شبیه‌سازی سه‌بعدی

پس از بررسی‌های انجام شده بر روی پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج مدل عددی دوبعدی و با توجه به ماهیت سه‌بعدی آزمایشها، در این بخش از مدل سه‌بعدی SPHysics برای شبیه‌سازی آزمایشها استفاده می‌شود و نتایج به دست آمده از این مدل سه‌بعدی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه خواهد شد. به منظور مدل‌سازی موج ناشی از زمین‌لغزش، شرایط مرزی و شرایط اولیه مدل مطابق با تنظیمات آزمایشگاهی تغییر داده شد. عرض فلووم در مدل سه‌بعدی متغیری بود که باید مقدار آن تعیین می‌شد. با توجه به این واقعیت که با افزایش عرض فلووم تعداد ذرات زیاد می‌شود، این عرض تا حد ممکن باید کم‌تر انتخاب می‌شد. در ابتدا عرض کانال برابر  $1/2$  متر در نظر گرفته شد، اما پس از مشاهده نتایج، دیده شد که در همان لحظات اول موج ایجاد شده تحت تأثیر مرزهای فلووم قرار می‌گیرد. نهایتاً برای به حداقل رساندن اثر مرزها، عرض کانال ۲ متر در نظر گرفته شد. مسأله مهم دیگر در استفاده از مدل سه‌بعدی SPHysics، ابعاد ذرات است. با توجه به بزرگ بودن ابعاد فلووم آزمایشگاهی و با توجه به سه‌بعدی بودن مدل، باید اندازه‌ای مناسب برای ذرات انتخاب شود، زیرا با کاهش ابعاد ذره، تعداد ذرات



(الف)



(ب)

شکل ۶ مقایسه نتایج مدل سه‌بعدی SPHysics و نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در ST2(a), ST3(b).

پدیده زمین‌لغزش و موج ناشی از آن به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. نتایج مدل سه‌بعدی، نسبت به مدل دوبعدی، انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. به نظر می‌رسد که استفاده از ذرات با ابعاد ریزتر، به تطابق بیشتر منجر می‌شود.

اختلافی بین نتایج مدل عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به صورت اختلاف فاز و اختلاف دامنه مشاهده می‌شد. برای حذف این اختلافها در پارامترهای مؤثر بر روش SPH تغییراتی داده شد. تحلیل حساسیتی که به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مدل انجام شد، نشان داد که این تغییرات، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر همگرایی بیشتر نتایج مدل عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی ندارد. به نظر می‌رسد که علت اصلی این اختلافها شبیه‌سازی دوبعدی پدیده امواج ناشی از زمین‌لغزه باشد. در آزمایشها، موج تقریباً به صورت دایره‌ای انتشار پیدا می‌کند اما در مدل عددی که از فرض دوبعدی بودن در آن استفاده شده، موجی با عرض واحد ایجاد و منتشر می‌شود. برای بررسی بیشتر این مسأله،

#### ۷- فهرست علائم

$\rho_b$	چگالی ذره
$m_b$	جرم ذره
$P_b$	فشار ذره
$t$	زمان
$\vec{v}$	سرعت جریان
$g$	شتاب ثقل
$\vec{\Theta}$	جمله نفوذ

Dalrymple, R.A. and Knio, O. (2000). "SPH modelling of water waves", Proc. Coastal Dynamics, Lund.

Dalrymple, R.A. and Rogers, B.D. (2006). "Numerical modeling of water waves with the SPH method", Coastal Engineering, 53, pp. 141-147.

User Guide for the SPHysics code. <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/Downloads>

Gómez-Gesteira, M. and Dalrymple, R. (2004). "Using a 3D SPH method for wave impact on a tall structure", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 130(2), pp. 63-69.

Imran, J., Harff, P. and Parker, G. (2001a). "A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface", Computers and Geosciences, 27(6), pp. 721-733.

Imran, J., Parker, G., Locat, J. and Lee, H. (2001b). "1D Numerical Model of muddy subaqueous and subaerial debris flow", Journal of Hydraulic Engineering, 27(7), pp. 959-968.

Monaghan, J.J. (1994). "Simulating free surface flows with SPH", Journal of Computational Physics, 110, pp. 399-406.

Monaghan, J.J. (1992). "Smoothed particle hydrodynamics", Annu. Rev. Astron. Astrophys, 30, pp. 543-574.

$\Pi_{ab}$	جمله لزجت
$h$	طول هموار ذرات
Coef.	ضریب محاسبه طول هموار
$W_{ab}$	تابع وزن گذاری یا تابع کرنل
$B$	ضریب معادله حالت
$dx, dz$	ابعاد ذرات

## ۸- منابع

Ataie-Ashtiani, B. and Jalali-Farahani, R. (2007). "Improvement and application of I-SPH method in the simulation of impulsive waves", Proceedings of the Int. Conf. on Violent Flows, Fukuoka, Japan pp. 116-121.

Ataie-Ashtiani, B. and Najafi-Jilani, A. (2008). "Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide", Coastal Engineering, doi:10.1016/j.coastaleng.2008.03.003 (in print).

Ataie-Ashtiani, B. and Najafi-Jilani, A. (2006). "Prediction of submerged landslide generated waves in dam reservoirs: an applied approach", Dam Engineering, 17(3), pp. 135-155.

Ataie-Ashtiani, B. and Shobeiry, G. (2007). "Numerical simulation of landslide impulsive waves by modified smooth particle hydrodynamics", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 56(2), pp. 209-232.