

شبیه سازی عددی زمین لغزش بر روی شیب‌های غیر صلب به وسیله روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر سه مرحله‌ای صریح

سید عرفان حسینی مبرا^۱، رسول قبادیان^{۲*}، فردین روزبهانی^۳

۱- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

* rsghobadian@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۵/۱۲

چکیده

پدیده زمین‌لغزش در دریاچه سدها و رودخانه‌ها، و تولید و انتشار امواج حاصل از آن، به عنوان یکی از مسائل مهم و پیچیده در زمینه مهندسی هیدرولیک مطرح است. امروزه بسط و گسترش روابط عددی و فرآیند مدل‌سازی توانسته تا حدودی به درک منطقی از این پدیده‌ها برسد. در این مقاله از یک روش لاگرانژی برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده شده است. در ابتدا روش هیدرودینامیکی ذرات هموار تراکم‌ناپذیر سه مرحله‌ای صریح تعریف می‌شود. به منظور معتبرسازی روش، از مسئله شکست سد روی بستر خشک و مسئله زمین‌لغزش زیر سطحی استفاده شده است. در مسئله اول، رسیدن به ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۸، متوسط خطای مطلق ۰/۰۵۴۲ و ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف ۰/۹۷۴ برای پارامترهای مورد محاسبه، نشان می‌دهد مدل با دقت مناسبی کالیبره شده است که حاکی از قابلیت بالای این روش در شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد و پدیده‌های مربوط به امواج می‌باشد. همچنین از مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با آزمایشگاهی در قسمت شبیه‌سازی زمین‌لغزش زیر سطحی، مقادیر آماری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا بترتیب ۰/۹۵ و ۰/۰۰۷۱ بدست آمدند که این نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل در محاسبه نیم‌رخ سطح آب ناشی از زمین‌لغزش زیرسطحی است. سپس سه سناریو برای مدل‌سازی زمین‌لغزش طراحی و اجرا شد. در این پژوهش به شیب‌ها و جسم غیر صلب، به عنوان یک ماده رئولوژیکی (سیال شبه‌پلاستیک) نگاه شده و تحت سیال غیر نیوتنی کاریویاسودا در مدل‌سازی وارد شدند. در واقع ذرات خاک بستر شیبدار غیرصلب بصورت دانه‌هایی که با خود مشخصات سیال را حمل می‌کنند مدل‌سازی شده‌اند. در نهایت نتایج در زمان‌های ۰/۳ و ۰/۶ ثانیه آورده شده و تحلیل شدند.

کلیدواژگان کلیدی: هیدرودینامیک ذرات هموار، سیال غیر نیوتنی، زمین لغزش، روش لاگرانژی

۱- مقدمه

پدیده زمین لغزش یکی از مخاطرات طبیعی است که همواره با میلیارد‌ها ریال خسارات مالی و جانی همراه است. شناخت عوامل ایجاد و گونه‌های مختلف آن برای زمین‌شناسان و مهندسین عمران از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از مخاطرات مهم طبیعی، پدیده زمین لغزش و تولید و انتشار امواج (در بعضی موارد خلق سونامی‌ها) در دریاچه سد و سواحل است [1, 2]. تاج سد و سرریزهای جانبی تعبیه شده متناسب با مطالعات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی سرشاخه‌های بالادست و بر اساس هیدروگراف سیل طراحی شده و ارزیابی‌های سازه‌ای می‌شود. در این میان ناپایداری دیواره دریاچه مخزن و ریزش ناگهانی آن، دو پی‌آمد مهم را بوجود می‌آورد. اولین و مهمترین نتیجه آن، بوجود آمدن امواج با طول موج بلند و ارتفاع امواج بالا است که این امواج در پایین دست خود خطرات جدی به دنبال دارد. دوم سقوط و ریزش حجم توده خاک به داخل مخزن سد سبب انباشت و تغییر مختصات هیدرومتری کف مخزن سد می‌گردد که این عامل سبب تغییر در حجم مرده سد و مشکلات آبیگری از دریچه‌های پایینی سد می‌شود.

روش‌های مرسوم تحلیل پایداری شیب به منظور ارزیابی شرایط تعادل و ایمنی شیب‌ها را می‌توان به سه گروه تحلیل سینماتیک، تحلیل تعادل حدی و شبیه‌سازهای ریزش سنگ تقسیم کرد [3].

کاربرد اصلی روش‌های سینماتیک، تعیین حالت شکست احتمالی در توده سنگ است. برای اجرای این تحلیل، باید ساختار توده سنگ و هندسه ناپیوستگی‌های دخیل در ناپایداری بلوک مورد نظر را با دقت ارزیابی شود.

در روش‌های تعادل حدی، احتمال لغزش توده سنگ یا خاک بر اثر نیروی جاذبه بررسی می‌شود. این تحلیل با سطح لغزش و توده لغزشی سروکار دارد. مبنای تمام روش‌های تعادل حدی،

مقایسه نیروهای مقاوم (نیروها، گشتاورها یا تنش‌های مقاوم در برابر حرکت توده) نسبت به نیروهای محرک (نیروها، گشتاورها یا تنش‌های به وجود آورنده حرکت ناپایدار) است.

به منظور ارزیابی جنبه‌های ایمنی مورد نیاز در نزدیکی یا اطراف سازه‌هایی که در معرض ریزش سنگ قرار دارند، از تحلیل پایداری شیب‌های سنگی استفاده می‌شود. شبیه‌سازهای ریزش سنگ، مسیر حرکت بلوک‌های ناپایدار و جدا شده از سطح شیب‌های سنگی را مشخص می‌کنند. این روش تحلیلی که توسط هانگر و همکاران [4] توسعه یافته است. در واقع هر بلوک سنگی به عنوان یک نقطه دارای جرم و سرعت در نظر گرفته می‌شود که با توجه به پتانسیل تماس با سطح شیب، روی یک خط بالستیک حرکت می‌کند.

یکی از این روش‌های لاگرانژی بدون شبکه که به صورت گسترده‌ای استفاده شده و قادر به تحلیل مسائلی همچون بررسی حرکت مخلوط آب-رسوب چسبنده (جریان غلیظ)، حرکت ذرات دانه‌ای و ماسه‌ای، بررسی مدل‌های چندفازی ذرات غیرچسبنده به همراه آب و هوا و موارد دیگر، مدل هیدرودینامیک ذرات هموار ۲ است. این روش برای اولین بار در حدود ۳۰ سال پیش برای حل مسائل نجوم توسط لوسی [5]، و سپس گینگلد و مناهان [6] مورد استفاده قرار گرفت، زیرا حرکت جمعی این ذرات شبیه به حرکت یک سیال بود. چند سال بعد، مناهان در سال ۱۹۹۴ [7] برای اولین بار روش SPH را برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد سیال غیرقابل تراکم به کار برد. پژوهشگران بعدی مشابه این روش، شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیک سطح آزاد را ارتقا دادند [8-11]. بر پایه این روش‌ها و توافق خوبی که بین مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی بدست آمد، پدیده زمین لغزش به عنوان یکی از پدیده‌های فیزیکی درگیر با محیط‌های پیچیده از سوی پژوهشگران بررسی شد [12-16]. همچنین دیگر پژوهشگران بررسی امواج را با روش هیدرودینامیک ذرات هموار بررسی

برقرار است.

✓ تغییر فاز رخ نمی‌دهد. واکنش شیمیایی و تغییر غلظت محلول‌ها وجود ندارد.

✓ محیط سیال پیوسته است.

✓ در سطح مشترک دو سیال انتقال جرم وجود ندارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش هیدرودینامیک ذرات هموار

۲-۲- فرمولاسیون روش هیدرودینامیک ذرات هموار

موناگان برای اولین بار روش SPH را برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد سیال غیرقابل تراکم به کار برد. این روش با جایگزین کردن سیال توسط مجموعه‌ای از ذرات، حل تقریبی از معادلات دینامیک سیالات را ارائه می‌دهد. در این شبیه‌سازی یک سری نقاط درونیابی با توزیع دلخواه وجود دارند که می‌توانند ذرات سیال فرض شوند. کلیه متغیرها به وسیله این نقاط و توسط یک تابع درونیابی محاسبه می‌شود. هر نقطه یک جرم، یک سرعت و بستگی به ویژگی‌های مسئله، دیگر مشخصه‌ها را با خود حمل می‌کند.

درون‌یابی

هر مشخصه‌ای از ذره i ، که می‌تواند برداری یا اسکالر باشد، به وسیله جمع مستقیم از مشخصه‌های مربوطه از ذرات همسایه‌اش i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi_i = \sum_j \rho_j(r_j) \varphi_j \quad (1)$$

در این معادله ϕ کمیتی دلخواه در نقطه r ، با $r=(x,y)$ است و h طول هموار سازی و W تابع درونیابی است. m جرم و ρ وزن مخصوص ذره، و i و j به ترتیب به ذره اصلی و ذره همسایه اشاره دارد.

توابع کرنل

توابع درونیابی در روش SPH نقش کلیدی دارند. این توابع که در واقع نوعی تابع وزن می‌باشند، چگونگی تقریب زدن مقدار یک کمیت و همچنین اندازه ناحیه تحت تأثیر هر ذره را بیان می‌کنند.

خواص زیر باید برای تابع هموارسازی صدق کند:

کردند [17-21]. در مبحث انتقال رسوبات (جریان دو فازی آب و رسوب) و شبیه‌سازی جریان ماسه (به عنوان یک سیال غیر نیوتنی) نیز پژوهش‌هایی صورت گرفت [22-25]، که اعتماد به این روش را در بسط و توسعه مدل‌سازی پدیده زمین لغزش در شیب‌های غیر صلب و تولید و انتشار امواج حاصل از آن مشخص شد.

به علت ماهیت پیچیده حرکت توده ذرات که با تعامل با یکدیگر انتقال می‌یابند، بررسی آن‌ها با مدل‌های رفتاری تنشی میان آنها می‌تواند حائز اهمیت باشد و از طرف دیگر تلفیق این روش‌ها با معادلات اساسی جریان گستردگی و اهمیت این معادلات را نشان می‌دهد. همچنین متغیرهای استفاده شده در این روابط همچون سرعت و فشار، درک واضح‌تری را برای پژوهشگر ایجاد خواهد کرد و هزینه‌های زیاد آزمایشگاهی را برای بررسی‌های بیشتر به شدت کاهش می‌دهد.

در این مقاله برای شبیه‌سازی زمین لغزش روی شیب غیر صلب از روش شبیه‌سازی ریزش سنگ استفاده شد. در واقع ذرات خاک بستر شیبدار غیر صلب به صورت دانه‌هایی که با خود مشخصات سیال را حمل می‌کنند مدل‌سازی شده‌اند.

بررسی جابه‌جایی شیب‌های غیر صلب در اثر زمین‌لغزش، سقوط و ریزش جسم غیر صلب واقع روی آنها و همچنین چگونگی انتشار امواج حاصل از آنها موضوعی است که در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از اینرو در این پژوهش از روش هیدرودینامیک ذرات هموار سه مرحله‌ای صریح به شبیه‌سازی و بررسی آن پرداخته شد. از طرفی، انتخاب سیال غیر نیوتنی کاریو یاسودا برای شبیه‌سازی حرکت شیب‌ها و جسم غیر صلب، از دیگر جنبه‌های نوآوری این پژوهش به شمار می‌رود.

برای انجام این پژوهش، فرضیات زیر بکار گرفته شده است:

- ✓ خواص سیال‌ها از جمله وزن مخصوص و لزجت در زمان و مکان ثابت است.

- ✓ شرط تراکم ناپذیری برای سیال.

- ✓ هیچگونه تفاوت جرمی در مرز میانی دوفاز وجود ندارد و همواره تعادل در آن برقرار است. همچنین تعادل ترمودینامیکی همیشه برای محلول در مرز میانی دو فاز

است که از صفر شدن مخرج در حین محاسبات جلوگیری می کند و معمولاً برابر $0.1h$ (h طول هموارسازی کرنل) در نظر گرفته می شود.

معادلات حاکم

در حالت کلی معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله بقای جرم و بقای ممنتوم می باشند. در چارچوب لاگرانژی می توان نوشت:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{D}{Dt} \left(\rho \mathbf{v} \right) = - \nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (11)$$

معادله (۱۰)، معادله بقای جرم در حالت تراکم پذیر و معادله (۱۱) معادله بقای ممنتوم است. وزن مخصوص (ρ) عمداً در معادلات نگه داشته شده است تا بتوان تراکم ناپذیری سیال را اعمال نمود.

معادله پیوستگی در فرم SPH به شکل زیر نوشته می شود:

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_j m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \mathbf{v}_{ij} W_{ij} \quad (12)$$

با استفاده از یک معادله ساختاری مناسب برای مدل تانسور تنش برشی τ ، می توان معادلات ۱۰ و ۱۱ را برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی حل نمود. معادله ممنتوم شامل سه ترم نیرویی است، از جمله نیروی حجمی (در اینجا نیروی حاصل از شتاب گرانش)، نیروی ناشی از دیورژانس تانسور تنش و گرادیان فشار است که باید همراه با قید تراکم ناپذیری به کار گرفته شوند. در روش SPH معادلات فوق باید برای هر ذره در هر گام زمانی حل شوند.

اعمال اثر لزجت

اگرچه لوسی اولین نفری بود که جمله لزجت را در معادلات SPH معرفی کرد، بسیاری از کاربردهای لزجت در شبیه سازی های SPH توسط گینگلد و موناگان مرسوم شد. ترم لزجی که توسط گینگلد و موناگان معرفی شده است، این مزیت را دارد که شامل یک جمله سرعت خطی است که لزجت برشی و حجمی را تولید می کند، به همین ترتیب یک جمله

$$\int W_h(r-r', h) dr = 1 \quad (2)$$

$$W_h(|r-r'|) = 0 \quad \text{ذره در خارج از دامنه مؤثر است} \quad (3)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} h W_h(r-r', h) = o(r-r') \quad (4)$$

$$W_h(r-r') > 0 \quad (5)$$

که در آن δ تابع دلتای دیراک است.

در این مقاله از h ثابت استفاده شده است، پس باید متناسب با مسأله مورد بررسی، h انتخاب شود.

در این شبیه سازی از تابع کرنل اسپیلاین مکعبی استفاده شده است.

$$W_h(r-r') = \begin{cases} \frac{27}{32} \left(\frac{r-r'}{h} \right)^3 \left(\frac{r-r'}{h} + 2 \right) & \text{if } 0 \leq \frac{r-r'}{h} \leq 1 \\ 0 & \text{if } \frac{r-r'}{h} > 1 \end{cases} \quad (6)$$

که در اینجا $q=r/h$ ، d تعداد بعد کرنل و β عددی ثابت است.

گرادیان، دیورژانس و لاپلاسیان

فرمولاسیون ترم گرادیان در معادلات ناویر استوکس شکل های مختلفی دارد که بستگی دارد که از کدام مشتق گیری استفاده شده است.

گرادیان و دیورژانس برای محاسبه مقدار یک خاصیت دلخواه (A) کمیت اسکالر و V کمیت برداری) که برحسب خواص ذرات مجاور تعریف شده است به ترتیب به صورت های زیر نوشته می شود:

$$\rho_i \frac{dA_i}{dt} = \sum_j m_j \left(A_j - A_i \right) \frac{\mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla A_i}{|\mathbf{r}_{ij}|} W_{ij} \quad (7)$$

$$\rho_i \frac{dV_i}{dt} = \sum_j m_j \left(V_j - V_i \right) \frac{\mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla V_i}{|\mathbf{r}_{ij}|} W_{ij} \quad (8)$$

برای جلوگیری از ناپایداری فشار و واگرایی حل از روش زیر استفاده می شود:

$$\frac{A_{ij} \mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla W_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2 + \eta^2} \quad (9)$$

در این رابطه $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$ و $A_{ij} = A_i - A_j$ و η عدد کوچکی

صورت زیر محاسبه نمود:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial r} \right)_i = \frac{\rho_j}{\rho_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{W_{ij}}{W_i} \|r_j - r_i\| dr \quad (20)$$

$$\left(\frac{\partial y}{\partial r} \right)_i = \frac{\rho_j}{\rho_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{W_{ij}}{W_i} \|r_j - r_i\| dr \quad (21)$$

در نتیجه با ترکیب معادلات بالا، معادله ۱۳ را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\sum_j \frac{4m_j (\mu_i + \mu_j) r_{ij} \cdot V_i W_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^2 (|\vec{r}_{ij}|^2 + \eta^2)} (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \quad (22)$$

که در آن $\eta = 0.1h$ برای جلوگیری از صفر شدن مخرج است. با استفاده از معادلات ۷ و ۲۲، معادله به شکل زیر در می آید:

$$+ \sum_j \frac{4m_j (\mu_i + \mu_j) r_{ij} \cdot V_i W_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)^2 (|\vec{r}_{ij}|^2 + \eta^2)} (\vec{V}_i - \vec{V}_j) \quad (23)$$

۳-۲- الگوریتم سه مرحله‌ای حل سیال به روش SPH تراکم ناپذیر

در این قسمت بر پایه مطالعات منظری و همکاران (۲۰۰۷) یک الگوریتم سه مرحله‌ای کاملاً صریح، برای نشان دادن ترتیب مراحل انجام محاسبه معادلات حاکم بر سیال (معادلات بقای جرم و مومنتم) ارائه می‌شود [26]. در گام اول این الگوریتم، معادله مومنتم با اعمال نیروهای حجمی و بدون در نظر گرفتن سایر نیروها حل می‌شود و یک سرعت میانی بدست می‌آید. در صورتی که تنها نیروی حجمی مؤثر بر سیال، نیروی جاذبه زمین باشد، خواهیم داشت:

$$u_* = u_t + g_x \Delta t \quad (24)$$

$$v_* = v_t + g_y \Delta t \quad (25)$$

که $\vec{V}_* = (u_*, v_*)$ سرعت میانی ذرات، $g = (g_x, g_y)$ شتاب گرانشی و Δt گام زمانی است. این سرعت‌های میانی، سرعت‌های نهایی هر گام نیستند و در هر مرحله با شتاب‌های دیگر و نیز جابه‌جایی مجازی اصلاح می‌شوند.

در گام دوم، از سرعت‌های میانی محاسبه شده در مرحله قبل، برای محاسبه $|D|$ استفاده می‌شود تا از این طریق،

سرعت درجه دوم در معادله SPH، معادل لزجت مجازی است که در روش‌های المان محدود استفاده می‌شود.

جمله لزجت در معادله (۱۱) نیز از ترکیب مشتق اول SPH با یک تقریب دیفرانسیل محدود برای مشتق اول به دست می‌آید. با استفاده از تعریف SPH برای دیورژانس جمله لزجت به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\left(\rho^{-1} \right)_i = \frac{1}{\rho_i} \left(\rho_i^2 + \rho_j^2 \right)^{-1/2} \quad (13)$$

برای محاسبه τ ، در این مقاله از رابطه آن با نرخ کرنش استفاده می‌شود. نرخ کرنش برشی در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{1}{2} \quad (14)$$

که در اینجا $V = (u, v)$ بردار سرعت می‌باشد. هر دو دیدگاه فیزیکی و ریاضی، تنش برشی سیال تراکم‌ناپذیر را تابعی از نامتغیر اصلی دوم D یعنی $|D|$ می‌دانند:

$$\tau = \mu(|D|)D \quad (15)$$

به طوری که رابطه بین تنش برشی و نرخ کرنش برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \mu(|D|)D \quad (16)$$

در صورتی که این معادله برای سیالات نیوتنی استفاده شود. به شکل زیر خواهد شد:

$$\tau = 2\mu D \quad (17)$$

بردار گرادیان سرعت را در حالت دو بعدی به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (18)$$

و بنابراین:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (19)$$

چون در SPH تنها فاصله ذرات متغیر مستقل است و متغیرهای دیگر وابسته به آن هستند، گرادیان‌های سرعت را می‌توان به

دیورژانس تنش برشی محاسبه شود. با توجه به اینکه تنش برشی به شکل تانسوری است، دیورژانس آن یک بردار خواهد شد که در اینجا به شکل زیر نوشته می شود:

$$(\rho^{**})_i = \rho_{x^*}^{**} + \rho_{y^*}^{**} \quad (26)$$

بنابراین با اعمال دیورژانس تنش برشی از معادله مومنتم، سرعت میانی مرحله دوم هر ذره به شکل زیر بدست می آید:

$$u_{**} = u_* + S_x \Delta t \quad (27)$$

$$v_{**} = v_* + S_y \Delta t \quad (28)$$

در این مرحله با استفاده از این سرعت های میانی، جابه جایی ذرات با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$x_* = x_t + u_{**} \Delta t \quad (29)$$

$$y_* = y_t + v_{**} \Delta t \quad (30)$$

موقعیت نهایی ذرات نیز با استفاده از دیفرانسیل مرکزی روی ذره بدست می آید:

$$r_{t+\Delta t} = r_t + \frac{1}{2}(v_{t+\Delta t} + v_t) \quad (31)$$

برای کاهش حجم محاسباتی و بالابردن سرعت اجرای برنامه کامپیوتری، از یک الگوریتم درختی برای یافتن همسایه های هر ذره استفاده شده است.

این دو گام را مراحل پیش بینی می نامند؛ اما تاکنون هیچ شرطی برای تراکم ناپذیری سیال، اعمال نشده است و سرعت های بدست آمده، معادله بقای جرم را ارضاء نمی کنند. بنابراین انتظار می رود که چگالی ذرات در طول این دو مرحله اندکی تغییر کرده باشند. برای محاسبه این تغییر چگالی از معادله پیوستگی کمک گرفته و یک چگالی موقتی برای ذره بدست می آید. در نتیجه، با استفاده از معادله (۱۲) خواهیم داشت:

$$\rho_* = \rho_0 \left(\frac{V_0}{V_*} \right) \quad (32)$$

در معادله فوق ρ_* چگالی لحظه ای سیال در پایان مرحله پیش بینی اولیه و ρ_0 چگالی ثابت سیال است.

اکنون باید میدان سرعت ذره دوباره محاسبه شود تا چگالی

سیال به مقدار اولیه خود اصلاح شود. برای این منظور، در گام سوم که مرحله تصحیح الگوریتم است، گرادین فشار در معادله مومنتم با معادله پیوستگی به شکل زیر ادغام می شود:

$$\rho_0 \Delta t \quad (33)$$

$$(\rho_*) \quad (34)$$

در معادلات بالا $\bar{V} = (\bar{u}, \bar{v})$ میدان سرعت تصحیح شده می باشد. با ترکیب معادلات فوق، معادله پواسون فشار به شکل زیر بدست می آید:

$$\rho_* \Delta t^2 \quad (35)$$

ترم منبع معادله ۳۵ که در واقع ترم لاپلاسیان است را می توان با استفاده از معادلات SPH با دو بار مشتق گیری از تابع درونیابی به دست آورد ولی این فرم از ترم لاپلاسیان هنگامی که ذرات پراکنده باشند منجر به ناپایداری در محاسبه فشار و سرعت می شود. شائو (۲۰۰۵) با یک تقریب تفاضل محدود از مشتق اول، فرمی از معادله لاپلاسیان را ارائه کرده است که از این ناپایداری جلوگیری می کند.

$$(\rho_* \Delta t^2)_{ij} = (\rho_i + \rho_j) \left(|r_{ij}| + \eta \right) \quad (36)$$

که $\bar{r}_{ij} = \bar{r}_i - \bar{r}_j$ ، $P_{ij} = P_i - P_j$ و η یک مقدار کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج معادله ۳۶ است که برابر $0.1h$ است.

در صورتی که معادله ۳۵ به شکل SPH نوشته شود، فشار هر ذره را در یک گام زمانی می توان محاسبه نمود:

$$\times \left(\sum_j m_j \frac{8}{(\rho_i + \rho_j)^2} \frac{\bar{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \eta^2} \right) \quad (37)$$

با استفاده از معادله ۳۶ و محاسبه فشار هر ذره، سرعت اصلاحی، مطابق زیر بدست می آید:

$$v_i = v_i + \frac{1}{\rho_i} \sum_j m_j \left(\rho_i^2 - \rho_j^2 \right) \bar{r}_{ij} \quad (38)$$

که ρ_* چگالی ذرات در گام پیش بینی است. در نهایت سرعت نهایی ذرات در پایان گام زمانی به صورت زیر محاسبه می شود:

محدوده نرخ برش بیشتری پیش‌بینی کند.

$$u_{t+\Delta t} = u_{**} + \bar{u} \quad (39)$$

$$v_{t+\Delta t} = v_{**} + \bar{v} \quad (40)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۱- اعتبارسنجی مدل

در این قسمت با استفاده از الگوریتم سه مرحله‌ای صریح در قالب یک کد فرتن، دو مسئله شکست سد روی بستر خشک و امواج ناشی از زمین‌لغزش زیر سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی و عددی درستی‌آزمایی می‌شوند.

۳-۱-۱-۱- شکست سد در بستر خشک

سقوط ستون سیال بر روی یک سطح افقی در اصطلاح شکست سد نامیده می‌شود و یک مسئله معیار کلاسیک برای ارزیابی روش‌های مدل‌سازی سطح آزاد است.

کار تجربی شکست سد کوماتینا و همکاران [27] در این قسمت مدل‌سازی می‌شود. مسئله متشکل از یک ستون سیال مستطیلی شکل محدود بین یک دیواره ثابت و یک دیواره‌ی موقت (سد) با شیب خفیف است. در زمان $t=0$ سد برداشته شده و به ستون سیال اجازه داده می‌شود تحت اثر گرانش سقوط کند. در این شبیه‌سازی ستونی از سیال به طول ۲ متر و ارتفاع ۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. سیال درون مخزنی به طول ۷ متر و ارتفاع ۲ متر قرار دارد. در کار حاضر، فاصله اولیه بین ذرات $L_0 = 0.005m$ ، طول هموارسازی $h = 1.5L_0$ و گام زمانی $d_t = 0.00003s$ در نظر گرفته شده است. تعداد ۸۰۰۰ ذره‌ی سیال و ۶۶۱۲ ذره‌ی جامد (سه لایه برای هر مرز جامد) برای مرزها در شبیه‌سازی به کار گرفته شده است. در سطح آزاد هیچ عملیات اضافی اعمال نشده و به صورت خودکار ردیابی شده است. در ضمن بستر سیال نسبت به افق شیب یک درصد دارد.

برای درستی‌آزمایی نمودار زمان بی‌بعد برحسب موقعیت بدون بعد نقطه جلوی موج (جبهه موج) مقایسه می‌شود. زمان بی‌بعد برحسب موقعیت بی‌بعد برای آب با مشخصات $\rho = 1000 kg/m^3$ و $\mu = 0.001 pa.s$ در شکل (۱) رسم

سرعت نهایی ذرات را با استفاده از ضریب XSPH می‌توان اصلاح نمود تا تضمین شود که یک ذره با سرعتی نزدیک به سرعت میانگین ذرات همسایه‌اش حرکت می‌کند. بدین ترتیب از ایجاد بی‌نظمی در حرکت ذرات جلوگیری می‌شود.

موقعیت نهایی ذرات نیز با استفاده از دیفرانسیل مرکزی روی ذره بدست می‌آید:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + \frac{(u_{t+\Delta t} + u_t)}{2} \quad (41)$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + \frac{(v_{t+\Delta t} + v_t)}{2} \quad (42)$$

الگوریتم بیان شده، برای هر ذره در هر گام زمانی است، بنابراین باید برای تمام ذرات انجام شود تا حرکت کل سیال برای یک گام زمانی به وجود آید. برای شبیه‌سازی حرکت سیال در یک زمان مشخص، این پروسه تا برآورده کردن زمان مورد نظر ادامه می‌یابد.

۳-۲- سیال غیر نیوتنی کاریو-یاسودا

با استفاده از نظریه شبکه مولکولی در سال ۱۹۷۲، کاریو رابطه زیر را به عنوان مدلی برای سیالات شبه پلاستیک ارائه داد:

$$\frac{\mu}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (\lambda |\dot{\gamma}|)^n] \quad (43)$$

در رابطه فوق μ_∞ لزجت در نرخ برش بی‌نهایت، μ_0 لزجت در نرخ برش صفر، n توان نمایی و ثابت زمانی مدل است. اگر در مدل کاریو-یاسودا به جای n ، مقدار یک قرار داده شود، مدل به سیال نیوتنی تبدیل می‌شود.

مهم‌ترین ویژگی این مدل استفاده از مقدار ویسکوزیته در نرخ برش صفر و نرخ برش بی‌نهایت است. پس این مدل دیگر ضعف مدل توانی در پیش‌بینی مقدار ویسکوزیته در نرخ برش صفر و برش بی‌نهایت را نخواهد داشت. همچنین در رابطه فوق همواره $n < 1$ است و λ و n پارامترهای تجربی می‌باشند. این مدل می‌تواند رفتار سیالات شبه پلاستیک را با دقت بیشتر و در

شده است.

در جدول (۱) مقایسه آماری پیشانی موج برای سیال نیوتنی محاسبه شده در محل شکست سد برای مدل عددی حاضر با مقادیر تحلیلی آورده شده است.

جدول ۱. مقایسه آماری عمق آب اندازه گیری شده در محل شکست سد برای مدل عددی حاضر با مقادیر تحلیلی

NRMSE	NSE	RMSE	MAE	R
0.168	0.974	0.0003	0.0542	0.9998

Table 1. Comparison of calculated water depth at dam break point for present numerical model with analytical values

همان گونه که ملاحظه می شود مدل عددی نتایج حل تحلیلی را خوب تقریب زده و نتایج مدل حاضر برای عمق جریان در محل شکست، به حل تحلیلی نزدیک است. هم چنین ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای نرمال برای پارامترهای مورد محاسبه نشان می دهد مدل با دقت مناسبی کالبره شده است و مدل مذکور توانایی شبیه سازی عمق و دبی آب را دارد.

۳-۱-۲- امواج ناشی از زمین لغزش زیر سطحی

دومین مسأله ای که در این مقاله برای درستی آزمایشی بررسی می شود، هندسه مسأله ای است که هینریچ برای مطالعه آزمایشگاهی زمین لغزش زیر سطحی استفاده کرده است [28]. آزمایش ها در کانالی به طول ۲۰ متر، عرض ۵۵ سانتی متر و عمق ۱/۵ متری در آزمایشگاه ملی هیدرولیک چاتو فرانسه انجام شد. آزمایش ها شامل خلق امواج آب بوسیله حرکت مایل آزادانه یک جسم صلب در صفحه شیب دار با زاویه ۴۵ درجه صورت پذیرفت. شکل (۲) چگونگی آماده سازی موقعیت آزمایش را نشان می دهد.

شکل ۲. تجهیزات آزمایشگاهی مدل زمین لغزش زیر سطحی

شکل ۱. زمان بی بعد بر حسب موقعیت بی بعد جبهه موج برای سیال نیوتنی

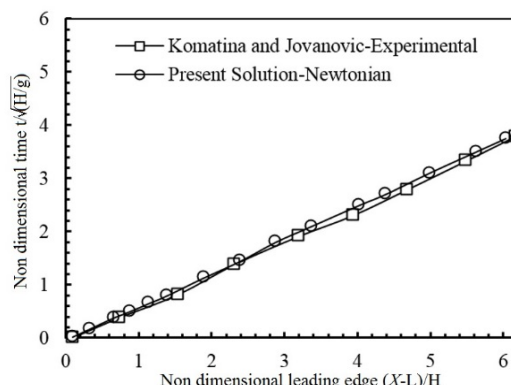


Fig. 1. Non dimensional time according to non dimensional leading edge for the Newtonian Fluid

برای بی بعد سازی زمان از رابطه $t \times \sqrt{g/h}$ ، و جهت بی بعد سازی موقعیت جلوی موج (پیشانی موج) از رابطه $(x-L)/H$ استفاده شده است که مقدار $H=0.1m$ ، $L=2m$ و $g=9.81m/s^2$ است. شکل (۱) نشان می دهد که نتایج حاصل از روش عددی حاضر هماهنگی خوبی با کار تجربی مذکور دارد.

به منظور مقایسه آماری جبهه موج برای سیال نیوتنی محاسبه شده در محل شکست سد برای مدل عددی حاضر، میانگین مطلق خطا در معادله (۴۶)، جذر میانگین مربعات خطا در معادله (۴۷)، ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف ۳ در معادله (۴۸) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال در معادله (۴۹) محاسبه شده است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_m - u_p) \quad (44)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_m - u_p)^2}{N}} \quad (45)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (h_m - \bar{h}_m)^2}{\sum_{i=1}^N h_m^2} \quad (46)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N h_m^2}{N}} \quad (47)$$

که در آن N تعداد داده ها، h_m مقدار عمق آب اندازه گیری شده و h_p مقدار عمق آب برآورد شده است.

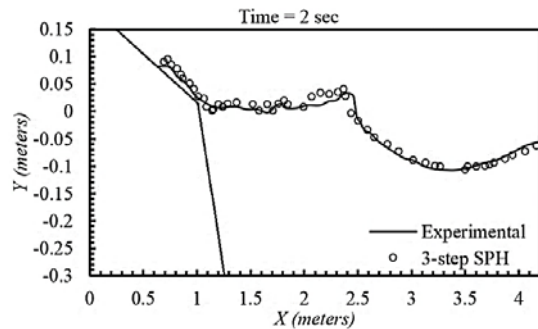


Fig. 3. Comparison between laboratory and numerical wave profiles for submerged landslides at 0.5 and 2 seconds (the scale between x and y is different)

اختلاف بوجود آمده توسط حرکت بسیار آشفته در این قسمت از مدل سازی تعبیر می شود.

در زمان های بعد از ۲ ثانیه، امواج عددی به سمت انتشار بیشتر از حالت آزمایشگاهی آن با اختلافی بین خط الراس ۵ الی ۱۰ سانتی متری گرایش پیدا می کند. سرعت موج حدود ۳ متر در ثانیه است. آشفتگی سطح آزاد آب سبب جریانی پیچیده می شود. برای وزن های کمتر جسم و اعماق بیشتری از استغراق، این اختلاف ها در دامنه کمتر خواهد شد.

به منظور مقایسه آماری در شکل (۴) رقوم سطح آب اندازه گیری شده در مقابل رقوم محاسباتی در زمان های مختلف آورده شده است.

شکل ۴. مقایسه آماری رقوم سطح آب اندازه گیری شده با رقوم سطح آب آزمایشگاهی در زمان های مختلف

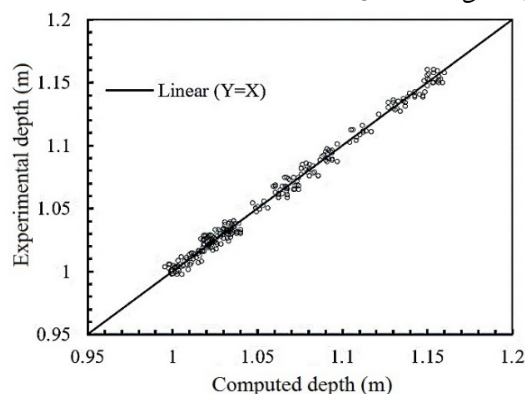


Fig. 4. Statistical comparison of measured water level with laboratory water level at different times

از مقایسه نتایج اندازه گیری شده با آزمایشگاهی، مقادیر آماری r و RMSE به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۰۰۷۱ بدست آمدند.

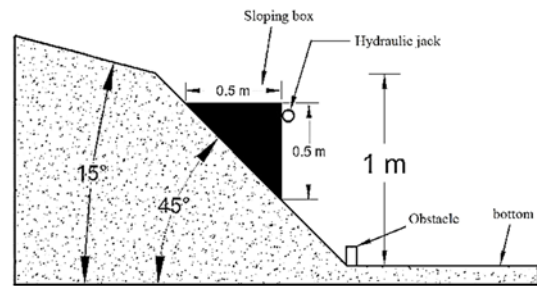
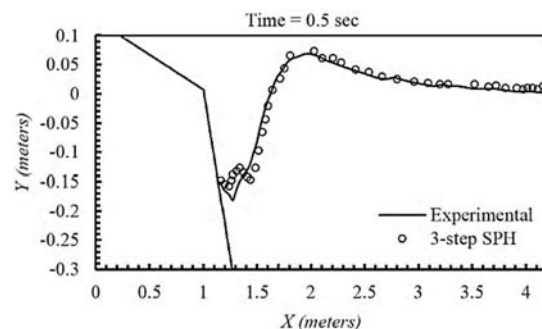


Fig. 2. Laboratory equipment of the Submarine Landslide model

جسم در مقطع عرضی، مثالی طراحی شده (۰/۵ متر در ۰/۵ متر)، و عرض آن به اندازه عرض کانال تنظیم شد. جسم به چهار غلطک مجهز شده بود که تنها تحت تاثیر نیروی گرانش به داخل آب سر می خورد و زمانی که به کف می رسید توسط یک مانع پلاستیکی بطور ناگهانی متوقف شد. جسم در موقعیت اولیه خود به وسیله یک جک هیدرولیکی نگه داشته شده بود و این جک این امکان را می داد که جسم فوراً توسط کنترل الکتریکی جک رها شود. بعد از رها شدن جک، امواج توسط سقوط جسم، تولید و به انتهای کانال حرکت می کرد و پروفیل امواج ثبت شد.

عمق آب یک متر است و کل جسم در ابتدای آزمایش مستغرق است. وزن جسم ۱۴۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص ذرات سیال برابر 1000 kg/m^3 و وزن مخصوص توده لغزنده برابر 2000 kg/m^3 است. در شکل (۳) نیمرخ های موج آزمایشگاهی رقومی شده با مدل عددی حاضر در زمان های ۰/۵ و ۲ ثانیه مقایسه شده است.

شکل ۳. مقایسه بین نیمرخ های موج آزمایشگاهی و عددی برای زمین لغزش های مستغرق در زمان های ۰/۵ و ۲ ثانیه (مقیاس X و Y متفاوت است).



غیرنیوتنی از سیال غیر نیوتنی کاریو یاسودا طبق مشخصات جدول (۲) استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات سیال غیرنیوتنی کاریو یاسودا

$\mu_0 (pa.s)$	λ	n
5	0.036	0.9

Table 2. Characteristics of the Careau Yasuda non-Newtonian fluid

برای بررسی پدیده زمین لغزش جسم غیر صلب روی شیب های غیر صلب، سه سناریو در نظر گرفته شده است که در هر سه سناریو مشخصات سیال غیر نیوتنی یکسان است و فقط وزن مخصوص قسمت ها، طبق جدول (۳) قرار داده شده اند.

جدول ۳. وزن مخصوص قسمت های مختلف (kg/m^3)

No.	Non rigid object	First non-rigid slope	Second non-rigid slope
Scenario 1	1400	4000	2500
Scenario 2	4000	1400	2500
Scenario 3	4000	2500	1400

Table 3. Density of different parts (unit : kg/m^3)

در این پژوهش، کمترین وزن مخصوص ۱۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است که مربوط به خاک های کشاورزی غیر مرطوب و همچنین خاک های رمبده است. هر چه دانه های خاک درشت و خوب دانه بندی و شکسته و حاوی مواد ریز دانه بیشتر و رطوبت بیشتر باشد وزن مخصوص بیشتر می شود. اگر خاک حاوی مواد ریزدانه کم و شن های درشت باشد وزن مخصوص آن از ۲۲۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و در مواقعی بیشتر هم می شود. در نظر گرفتن وزن مخصوص ۴۰۰۰ دو دلیل را دنبال می کند. اول اینکه توانمندی مدل را در شبیه سازی ریزش خاکی با وزن مخصوص بسیار بالا نشان می دهد که مدل حتی با این وزن مخصوص بالا واگرا نمی شود. دوم اینکه تغییرات فرم شیب ها به دلیل اختلاف وزن مخصوص ها کاملاً مشهود و قابل درک باشد و تغییرات سطح آب بطور مشخص در این ابعاد نشان داده شود.

طبق سناریوی اول، موقعیت ذرات در زمان های ۰/۳ و ۰/۶ ثانیه از شروع زمین لغزش در شکل ۶ آمده است.

این نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در محاسبه نیمرخ سطح آب ناشی از زمین لغزش زیرسطحی است.

۲-۳- بررسی زمین لغزش روی شیب های غیر صلب

در قسمت قبل سقوط جسم صلب از روی شیب صلب به داخل آب مورد بررسی و مدلسازی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی داشتند. در این قسمت امواج حاصل از ریزش توده زمین لغزش به داخل آب از روی شیب غیر صلب بررسی شد.

در طبیعت زمین لغزش هایی که رخ می دهد بدلیل چند لایه بودن بستر مناطق شیب دار، با دانه بندی های مختلفی از خاک روبرو خواهیم بود. چون این روش مدلسازی با ذرات سر و کار دارد، برای شبیه سازی ریزش خاک با دانه بندی های مختلف، از تغییر وزن مخصوص ذرات استفاده شده است.

در این قسمت شیب غیر صلب به همراه خود جسم غیر صلب با سه وزن مخصوص مختلف شبیه سازی شده است که مدل گرافیکی مدل در شکل (۵) آمده است. در این شکل، قسمت سبز رنگ، جسم غیر صلب، قسمت قرمز رنگ، شیب غیر صلب اول و قسمت زرد رنگ، شیب غیر صلب دوم است.

شکل ۵. نمایش مدل زمین لغزش جسم غیر صلب بر روی دو شیب غیر صلب

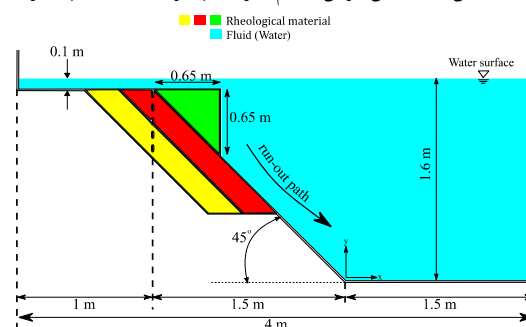


Fig. 5. View of non-rigid object landslide model on two non-rigid slopes

برای شبیه سازی حرکت ذرات آب، از سیال نیوتنی با مشخصات $\mu = 0.0001 pa.s$ و $\rho = 1000 kg / m^3$ استفاده شده است و برای شبیه سازی شیب ها و جسم غیر صلب

شکل ۶. نمایش سناریوی اول

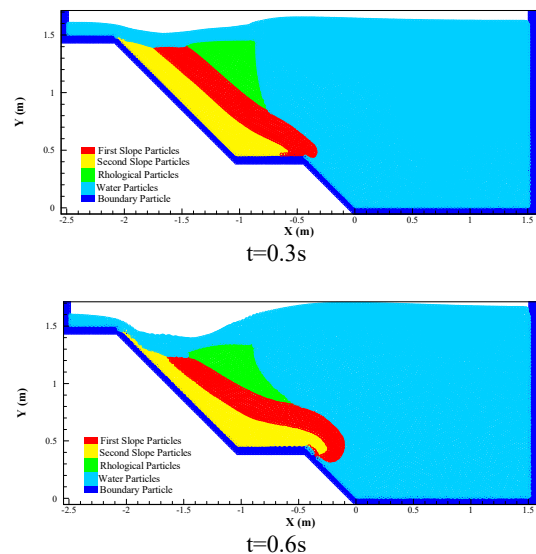


Fig. 6. Illustration of the first scenario

شکل ۷. نمایش سناریوی دوم

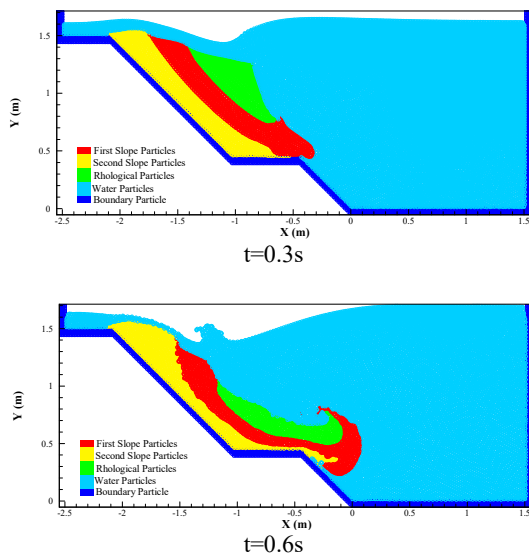


Fig. 7. Illustration of the second scenario

شکل (۷) بیانگر این است که شیب قسمت اول با توجه به وزن مخصوص کمتری که نسبت به دو قسمت رئولوژی دیگر دارد مقاومت کمتری در برابر نیروهای وارد شده به خود را دارد و زودتر سرازیر می‌شود. در مقایسه با شکل‌های سناریوی اول، در اینجا نوسانات سطح آب بیشتر است که یکی از دلایل مهم آن را می‌توان پایداری کمتر شیب اول عنوان کرد. در واقع پایین‌بودن وزن مخصوص این قسمت باعث شده که علاوه بر نیروهای وارد شده از طرف آب و شیب دوم بر آن، وزن بالای جسم غیر صلب سبب فشار بیشتر بر آن و سرازیری سریع‌تر این قسمت شود. از طرفی همان‌گونه که دیده می‌شود شیب قسمت دوم از سطح اولیه خود کمی بالاتر رفته است. دلیل این پدیده را اینطور می‌توان عنوان کرد که نیروهای وارد شده از طرف آب و جسم غیر صلب و شیب قسمت اول به شیب قسمت دوم باعث شده که توزیع نیروها در جهت عمودی به سمت بالا به نیروهای وزن غلبه کرده و ذرات به سمت بالا کشیده شوند. البته بالا رفتن ذرات ذکر شده موقتی است و با فرو رفتن ذرات شیب اول و جسم غیر صلب به داخل آب، از فشار نیروهای این قسمت‌ها به ذرات شیب دوم کاسته شده و در نتیجه این قسمت نیز تحت اعمال نیروهای آب و وزن خود

همانطور که از شکل (۶) مشخص است به دلیل اینکه مصالح و مواد شیب اول نسبت به شیب دوم و جسم غیر صلب رئولوژیکی سنگین‌تر است دیرتر تحت تاثیر نیروهای وزن آب و جسم غیر صلب قرار گرفته و به داخل آب سرازیر می‌شود. از طرفی چون مواد شیب دوم نسبت به شیب اول سبک‌تر است تحت تاثیر نیروهای وزن خود، وزن مواد شیب اول و همچنین آب و جسم غیر صلب زودتر به حرکت در آمده که نسبت به شیب اول از روانی بیشتری برخوردار است.

جسم غیر صلب در این سناریو نسبت به دو شیب اول و دوم، دیرتر تغییر شکل پیدا کرده است و این به دلیل آن است که تنها تحت تاثیر نیروی وزن خود (که نسبت به دو مواد رئولوژی دیگر سبک‌تر است) و سطح آب اندک تاثیرگذار بر آن است که نسبت به شیب اول و دوم، کمتر به آن نیرو وارد شده است.

در شکل (۷) سناریوی دوم شبیه‌سازی شده است و موقعیت ذرات در زمان‌های ۰/۳ و ۰/۶ ثانیه از شروع زمین لغزش را نشان می‌دهد.

در هر دو سناریو جسم غیر صلب دارای وزن مخصوص یکسانی است متنها در سناریوی دوم پایین تر بودن وزن مخصوص شیب اول نسبت به سناریوی سوم سبب شده که مقاومت این قسمت به نیروهای وارد شده کمتر باشد و ذرات این قسمت با سرعت بیشتری به داخل آب فرو روند. این عمل شبیه شده که در تمامی شکل های سه سناریوی شبیه سازی شده، نوسانات سطح آب در لحظات آغازین زمین لغزش بیشتر شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله از یک مدل عددی بدون شبکه که دارای دیدگاه لاگرانژی است به نام هیدرودینامیک ذرات هموار سه مرحله ای صریح استفاده شده است. خواص سیال ها از جمله وزن مخصوص و لزجت در زمان و مکان ثابت در نظر گرفته شده است.

به منظور درستی آزمایی این مدل، دو مسئله شکست سد بر روی بستر خشک و پدیده زمین لغزش زیر سطحی جسم انجام گرفت و نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. بررسی نتایج شکست سد نشان داد که مدل، حل تحلیلی را خوب تقریب زده است. رسیدن به ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۸، متوسط خطای مطلق ۰/۰۵۴۲ و ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف ۰/۹۷۴ برای پارامترهای مورد محاسبه، نشان می دهد مدل با دقت مناسبی کالبره شده است که حاکی از قابلیت بالای این روش در شبیه سازی جریان های با سطح آزاد و پدیده های مربوط به امواج است. همچنین از مقایسه نتایج اندازه گیری شده با آزمایشگاهی در قسمت شبیه سازی زمین-لغزش زیر سطحی، مقادیر آماری r و RMSE به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۰۷۱ بدست آمدند که این نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در محاسبه نیمرخ سطح آب ناشی از زمین لغزش زیرسطحی است.

پس از اعتبار سازی مدل و بررسی خطای مدل سازی، با اعتماد به نتایج آن، سه سناریو برای پدیده زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفتند. در این سناریوها از سه جنس متفاوت خاک با در نظر گرفتن وزن مخصوص های متفاوت بکار گرفته شد.

به داخل آب فرو می رود.

نمونه ای از توزیع فشار در سناریوی دوم در زمان ۰/۶ ثانیه در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل ۸. توزیع فشار در لحظه $t=0.6s$

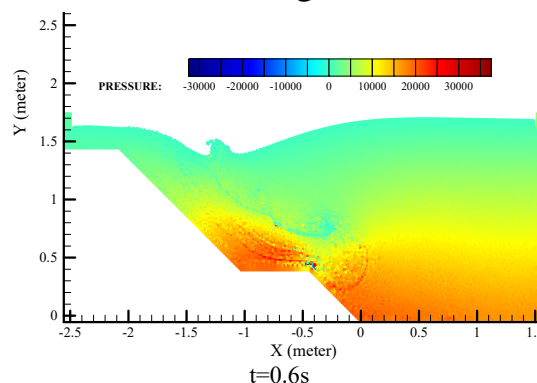


Fig. 8. Pressure distribution at $t=0.6s$

در شکل (۹) ذرات شبیه سازی شده در سناریوی سوم نمایش داده شده است.

شکل ۹. نمایش سناریوی سوم

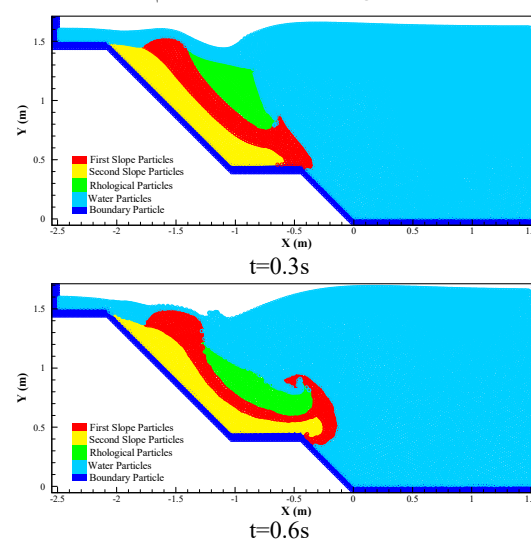


Fig. 9. Illustration of the third scenario

بالا بودن وزن مخصوص جسم غیر صلب در این سناریو نسبت به وزن مخصوص شیب اول سبب شده که نیروهای وارد بر ذرات شیب اول مانع از فرو ریزی موقت آنها به داخل آب شود. همان گونه که در شکل (۹) دیده می شود ذرات شیب اول موقتاً به سمت بالا کشیده شده اند. شکل های سناریوی دوم در مقایسه با سناریوی دوم اختلاف در پیشروی ذرات شیب اول را نشان می دهد.

- application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society*, vol. 181, pp. 375-389.
- [7] Monaghan, J. J. 1994 Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics*, vol. 110, pp. 399-406.
- [8] Lo, E. Y. and Shao, S. 2002 Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method. *Applied Ocean Research*, vol. 24, pp. 275-286.
- [9] Shao, S. and Lo, E. Y. 2003 Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface. *Advances in water resources*, vol. 26, pp. 787-800.
- [10] Khayyer, A., Gotoh, H., and Shao, S. D. 2008 Corrected Incompressible SPH method for accurate water-surface tracking in breaking waves. *Coastal Engineering*, vol. 55, pp. 236-250.
- [11] Rouzbahani, F. and Hejranfar, K. 2017 A truly incompressible smoothed particle hydrodynamics based on artificial compressibility method. *Computer Physics Communications*, vol. 210, pp. 10-28.
- [12] Geist, E. L., Lynett, P. J., and Chaytor, J. D. 2009 Hydrodynamic modeling of tsunamis from the Currituck landslide. *Marine Geology*, vol. 264, pp. 41-52.
- [13] Khayyer, A., Gotoh, H., and Shao, S. 2009 Enhanced predictions of wave impact pressure by improved incompressible SPH methods. *Applied Ocean Research*, vol. 31, pp. 111-131.
- [14] Capone, T., Panizzo, A., and Monaghan, J. J. 2010 SPH modelling of water waves generated by submarine landslides. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 48, pp. 80-84.
- [15] Ataie-Ashtiani, B. and Yavari-Ramshe, S. 2011 Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs. *Landslides*, vol. 8, pp. 417-432.
- [16] Yavari-Ramshe, S. and Ataie-Ashtiani, B. 2015 A rigorous finite volume model to simulate subaerial and submarine landslide-generated waves. *Landslides*, pp. 1-19.
- [17] Girolamo, P., Wu, T., Liu, P., Panizzo, A., Bellotti, G., and Risio, M. 2006 Numerical simulation of three dimensional tsunamis water waves generated by landslides: comparison between physical model results, VOF, SPH and depth-integrated models.
- از سیال غیر نیوتنی کاریو یاسودا برای رفتار شیب‌ها و جسم غیر صلب استفاده شد. تاثیرات اختلاف وزن مخصوص شیب‌ها و جسم غیر صلب بر روی سطح آب بخوبی شبیه‌سازی و مشخص شد. نتایج نشان داد که کم بودن وزن مخصوص مصالح شیب سطحی خاک (اولین شیب)، در موقع زمین‌لغزش امواج سطحی بزرگ‌تر با ارتفاع موج بلندتری را نسبت به سایر حالات ایجاد می‌کند. در واقع با کم بودن وزن مخصوص این قسمت و بالا بودن وزن مخصوص جسم غیر صلب، زیر جسم غیر صلب ناگهانی خالی شده و این قضیه سبب تغییرات ناگهانی و شدید در سطح آب شد. همچنین مشخص شد در صورت متفاوت بودن وزن مخصوص شیب‌ها بالا آمدگی موقتی مصالح شیب رخ می‌دهد که این پدیده به علت وارد شدن نیروهایی در خلاف جهت وزن شیب به آن است.

۵- مراجع

- [1] Watts, P., Grilli, S., Kirby, J., Fryer, G., and Tappin, D. 2003 Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards And Earth System Science*, vol. 3, pp. 391-402.
- [2] Fine, I., Rabinovich, A., Bornhold, B., Thomson, R., and Kulikov, E. 2005 The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: preliminary analysis and numerical modeling. *Marine Geology*, vol. 215, pp. 45-57.
- [3] Stead, D., Eberhardt, E., Coggan, J., and Benko, B. Year Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis—applications and limitations. in *International conference on landslides-causes, impacts and countermeasures*, pp. 615-624.
- [4] Evans, S. and Hungr, O. 1993 The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian geotechnical journal*, vol. 30, pp. 620-636.
- [5] Lucy, L. B. 1977 A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The astronomical journal*, vol. 82, pp. 1013-1024.
- [6] Gingold, R. A. and Monaghan, J. J. 1977 Smoothed particle hydrodynamics: theory and

- propagation. *Computers and Geotechnics*, vol. 114, p. 103-153.
- [24] Nour bakhsh, A. Roozbahani, F. Kouhini Tafreshi, M 2019 Simulation of sand particles flow with weakly compressible smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Mechanic Engineering*, vol. 49, pp.337-346 (in Persian).
- [25] Omidvar, P. Kheirkhahan, M. Hosseini, Kh 2018 Development of Smoothed Particle Hydrodynamics for simulating two-phase water-sediment flow using μ (I) rheological model. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 05, pp. 207-216, 2018 (in Persian).
- [26] Hosseini, S., Manzari, M., and Hannani, S. 2007 A fully explicit three-step SPH algorithm for simulation of non-Newtonian fluid flow. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 17, pp. 715-735.
- [27] Komatina, D. and Jovanovic, M. 1997 Experimental study of steady and unsteady free surface flows with water-clay mixtures. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 35, pp. 579-590.
- [28] Heinrich, P. 1992 Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides. *Journal of Waterway ,Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 118, pp. 249-266.
- [18] Huang, B., Wang, S., and Zhao, Y. 2017 Impulse waves in reservoirs generated by landslides into shallow water. *Coastal Engineering*, vol. 123, pp. 52-61.
- [19] Shi, C., An, Y., Wu, Q., Liu, Q., and Cao, Z. 2016 Numerical simulation of landslide-generated waves using a soil–water coupling smoothed particle hydrodynamics model . *Advances in Water Resources*, vol. 92, pp. 130-141.
- [20] Khoolosi, V. and Kabdaşlı, S. 2016 Numerical Simulation of Impulsive Water Waves Generated by Subaerial and Submerged Landslides Incidents in Dam Reservoirs. *Civil Engineering Journal*, vol. 2 ,pp. 497-519.
- [21] Farhadi, A., Emdad, H., and Rad, E. G. 2016 Incompressible SPH simulation of landslide impulse-generated water waves. *Natural Hazards*, vol. 82, pp. 1779-1802.
- [22] Tan, H., Xu, Q., and Chen, S. 2018 Subaerial rigid landslide–tsunamis: Insights from a block DEM-SPH model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 95, pp. 297-314.
- [23] Lin, C., Pastor, M., Li, T., Liu, X., Lin, C., Qi, H., et al. 2019 A PFE/IE–SPH joint approach to model landslides from initiation to

Numerical simulation of landslide on non-rigid slopes by an explicit three-step incompressible smoothed particle hydrodynamic

Seyed Erfan Hosseini Mobara¹, Rasool Ghobadian^{2*}, Fardin Roozbahani³

1- Ph. D in Hydraulic Structure Engineerig, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Associate professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

* rsghobadian@gmail.com

Abstract

The coastal waves caused by landslide in the lake of reservoir dams can threaten the safety of the dam. Therefore, the exact recognition of hydraulic flow due to coastal waves has always been of interest to researchers. So far, extensive laboratory and numerical research has been devoted to it. Also, the phenomenon of landslide in the lake of dams and rivers, and the production and propagation of waves resulting from it, is one of the most important and complex issues in the field of hydraulic engineering. Today, the expansion of numerical relations and the modeling process have somewhat contributed to a rational understanding of these phenomena. In this research, a Lagrangian method is used for solving governing equations. Initially, the hydrodynamic method is defined as an explicit three-step incompressible smoothed particle hydrodynamic. This method, by replacing the fluid with a set of particles, provides an approximate solution to the fluid dynamics equations. In this simulation, there are a series of arbitrary interpolation points that can be assumed to be fluid particles. All variables are calculated by these points and are calculated by an interpolation function. In order to validate the method, the dam break problem on dry bed and the subsurface landslide problem have been used. In the first issue, the correlation coefficient of 0.9998, the mean absolute error of 0.5426 and the efficiency coefficient of the Nash-Sutcliffe model 0.974 for the calculated parameters indicate that the model is accurately calibrated, which demonstrates the high capability of this method in simulating free surface fluids and wave-related phenomena. Also, comparing the measured results with the experimental data in the subsurface landslide simulation showed that the correlation and mean square error correlation coefficients were 0.95 and 0.0071 respectively, which indicates the high accuracy of the model in calculating the water surface profile caused by landslide subsurface. The results showed that at times after 2 seconds, numerical waves tended to release more than its experimental state, with a difference between the ranges of 5 to 10 cm. This is due to the turbulence of the free surface of water causing the flow of complexity. For smaller body weights and deeper depths of submergence, these differences will be lower in scope.

Then three landslide modeling scenarios were designed and implemented. In this study, slopes and non-rigid bodies were considered as a rheological material (pseudoplastic fluid) and entered into modeling as Carreau Yasuda non-Newtonian fluid. The results were reported at 0.3 and 0.6 seconds, and then they were analyzed.

The innovation aspect of this research is that the study of non-rigid slopes during landslide and falling and sliding of non-rigid bodies on them, as well as the production and propagation of waves from it, have not been investigated so far. The purpose of this paper is simulation and review it by an explicit three-step incompressible smoothed particle hydrodynamic. On the other hand, the choice of non-Newtonian Carreau Yasuda fluid to simulate the slope and non-rigid body is another aspect of the innovation of the present study.

Keywords: Smoothed particle hydrodynamics, Non-Newtonian Fluid, Landslide, Lagrangian Method