

مدل سازی عددی رانش تکیه گاه در مخازن سدها با استفاده از روش SPH

مهران خیرخواهان^۱

خسرو حسینی*^۲

چکیده

در نتیجه اشباع شدن توده خاک در مخازن سدها، تکیه گاه‌ها ناپایدار گردیده و به داخل مخزن ریزش می کنند. حرکت و تغییر شکل توده خاک در محیط اشباع و موج حاصل از آن می تواند سبب تغییرات در پارامترهای هیدرولیکی مخزن سد گردد. در این رابطه اندرکنش آب و توده رسوبی در حال لغزش در مخزن سد مورد توجه مهندسين سد می باشد. در تحقیق حاضر حرکت ذرات رسوبی مستغرق بر سطح شیب دار (رانش زمین) به صورت سیال غیر نیوتنی مدل سازی شده است که در اندرکنش با یک سیال نیوتنی (آب) قرار گرفته است. بدین منظور از توسعه کد لاگرانژی بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) اسفیزیکس دوبعدی بهره گرفته شده است. برای مدل سازی رسوبات و بررسی نحوه حرکت آن‌ها از مدل غیرنیوتنی ویسکوپلاستیک هرشل بالکی پاناستاسیو (HBP) استفاده شده است. ابتدا صحت سنجی مدل رئولوژیکی با نتایج آزمایشگاهی شکست سد دانه‌ای انجام گرفت، سپس رانش زمین به صورت مستغرق مدل سازی گردید و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل توسعه یافته حاضر نشان دهنده دقت قابل قبول برای شبیه سازی این دسته از مسائل دوفازی است که به طور وسیعی در مهندسی هیدرولیک و مکانیک خاک مورد توجه محققین می باشد.

واژه‌های کلیدی:

SPH، مدل رئولوژیکی HBP، رانش زمین، شکست سد دانه‌ای

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه سمنان.

*۲. دانشیار. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه سمنان. khhoseini@semnan.ac.ir

مقدمه

رانش زمین در سطوح شیب‌داری همچون کوه‌ها، مخازن و کناره‌های اقیانوس‌ها و خلیج‌ها رخ می‌دهد. علت رانش زمین ناپایداری بخشی از سطوح و حرکت و لغزیدن توده خاک به سمت پایین شیب است. امروزه با توسعه شهرها و تأسیسات آن‌ها در مناطق کوهستانی، رانش زمین منجر به خسارات فراوانی در این نواحی می‌گردد. با توجه به اهمیت موضوع، بررسی دقیق این پدیده به کمک روابط مکانیک خاک و هیدرولیک می‌تواند موجب شناخت عوامل دخیل در آن شود که در نهایت منجر به شناخت بهتر پارامترهای مؤثر در این پدیده می‌شود تا راه‌حل‌های مقابله با آن پیش‌بینی گردند. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و عددی گسترده‌ای در این باره انجام شده است که می‌توان با بهره‌گیری از آن‌ها و بهبود نتایج مدل‌های عددی، مسیر شناخت این پدیده پیچیده را هموارتر ساخت (هلر^۱، ۲۰۱۳).

روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) یک روش لاگرانژی بدون شبکه است که برای به‌دست آوردن حل‌های عددی معادلات حرکت سیالات (معادلات ناویراستوکس) استفاده می‌شود. این روش سیال را به مجموعه‌ای از نقاط تقسیم می‌نماید که در فاصله مشخصی از هم تأثیر می‌پذیرند. با توجه به عدم وجود شبکه، این روش قادر است تغییر شکل‌های بزرگ و مرز مشترک بین دو سیال و همچنین سطح آزاد را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. روش‌های بدون شبکه تاکنون برای حل بسیاری از مسائل همچون رانش زمین، شکست سد و مسائلی از این قبیل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از این مسائل رانش توده مستغرق می‌باشد که به‌صورت دوفازی شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل‌ها ماهیت پیچیده حرکت رسوبات با مدل‌های رفتاری تنشی میان آن‌ها (سیالات غیرنیوتنی ویسکوپلاستیک) در کدهای لاگرانژی اعمال می‌شوند. همچنین اندرکنش این ذرات با ذرات سیال که منجر به حرکت ذرات رسوب و تغییر شکل بستر رسوبی می‌گردد، از جنبه‌های پراهمیت این روش‌ها است.

بسیاری از جریان‌های دانه‌ای همانند حرکت رسوبات درشت‌دانه و یا ذرات شیشه و موادی از این قبیل اصطلاحاً دارای رفتار ویسکوپلاستیک می‌باشند. مدلسازی جریان‌های دانه‌ای به کمک مدل‌های ویسکوپلاستیک همچون بینگهام، هرشل بالکی، کراس و دیگر مدل‌های رئولوژیکی که دارای یک آستانه حرکت در تنش برشی می‌باشند، تاکنون مورد استفاده بسیاری از محققین قرار گرفته است. این مدل‌ها تا قبل از رسیدن تنش برشی به آستانه‌ای معین، رفتار همانند ماده جامد دارند و پس از این آستانه، همانند سیال جاری می‌شوند.

در زمینه استفاده از مدل‌های ویسکوپلاستیک و همچنین مدل‌های دوفازی آب-رسوب با استفاده از نگرش لاگرانژی می‌توان به مدلسازی‌های جریان رسوبات تحت جریان‌های سریع همچون شکست سد و یا به رانش زمین اشاره کرد. ژورکوویچ و همکاران^۲ (۱۹۹۷) به کمک مدل دوبعدی شبکه مبنا و استفاده از مدل بینگهام برای مدلسازی فاز رسوبات، رانش در زیر دریا را مدلسازی نمودند. در این مطالعه آن‌ها پارامترهای مؤثر در مدل رئولوژی به کار گرفته شده در روش خود را مورد بررسی قرار دادند. عطایی آشتیانی و شبیری (۲۰۰۸) با استفاده از روش ISPH^۳ (روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر) قسمت لغزنده بر روی سطح شیب‌دار را هم به‌صورت صلب و هم به‌صورت رسوب (سیال غیرنیوتنی) مدلسازی نمودند. آن‌ها برای مدل کردن فاز رسوبات از ترکیب مدل رئولوژیکی بینگهام با کراس استفاده کردند. فو و جین^۴ (۲۰۱۵) از مدل لاگرانژی MPS برای بررسی پدیده رانش زمین استفاده کردند. آن‌ها در مطالعات خود در ابتدا حرکت گوه‌های صلب با شکل‌های مختلف را به داخل آب بررسی کردند. پس از آن حرکت رسوبات مستغرق و غیر مستغرق را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها برای گوه صلب و رانش مستغرق قابل قبول و برای رانش غیرمستغرق به دور از واقعیت بود. فورتاکاس و راجرز^۵ (۲۰۱۶) جریان دوفازی آب-رسوب ناشی از شکست سد را با مدل موازی تراکم‌پذیری کم اسفیزیکس^۶، مدلسازی کردند و اثر واحد پردازنده گرافیکی^۷ را در سرعت اجرای برنامه بررسی کردند.

۵. Fourtakas and Rogers

۶. SPHysics

۷. GPU

۱. Heller

۲. Rzedkiewicz et al.

۳. Incompressible SPH

۴. Fu and Jin

آزمایشگاهی شکست سد دانه‌ای استفاده شده است که در مدل توسعه داده شده برای بهبود حرکت ذرات ویسکوپلاستیک از میانگین‌گیری هارمونیک میان ویسکوزیته آن‌ها استفاده شده است. در ادامه با توسعه کد، مسئله دوفازی رانش زمین حل گردیده است. برای مدل کردن این سیستم دوفازی، به علت وجود اختلاف چگالی میان فازها از معادلات توسعه‌یافته جریان توسط گرنیر و همکاران^۳ (۲۰۰۹) در مرز حدفاصل میان ذرات استفاده گردید و در نهایت نیز برای تعامل ذرات از دو فاز مختلف که دارای ویسکوزیته مختلف در حدفاصل یکدیگر هستند، رابطه اُون^۴ به کار گرفته شد.

معادلات حاکم

معادلات حاکم در جریان‌ها، پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند که در شکل لاگرانژی به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند (خانپور و همکاران، ۲۰۱۶).

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

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla \bar{\tau} + \mathbf{F} \quad (2)$$

در روابط بالا \mathbf{u} سرعت، ρ چگالی، P فشار، $\bar{\tau}$ تنسور تنش آشفتگی (SPS^۵)، μ ویسکوزیته، \mathbf{F} دیگر نیروهای مؤثر در حرکت سیال و t زمان هستند.

در این روابط هیچ‌گونه جمله شتاب جابجایی در معادله بقای جرم و مومنتوم وجود ندارد.

روش SPH

فرم کلی معادلات جریان در روش SPH به‌وسیله تقریب‌های کرنل و ذره‌ای به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) در خواهد آمد (لیو و لیو، ۲۰۱۰).

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_j m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \frac{F}{\rho_i} - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j m_j \left(\frac{4v_{ij}u_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)(|r_{ij}|^2 + \epsilon^2)} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j m_j \left(\frac{\bar{\tau}_i}{\rho_i^2} + \frac{\bar{\tau}_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (4)$$

در پژوهش این محققین، رفتار رسوبات با استفاده از مدل رئولوژیکی هرشل-بالکی مدل‌سازی گردیده است. آن‌ها توانستند نتایج مدل را نسبت به کارهای قبلی بهبود بخشند. خانپور و همکاران (۲۰۱۶) جهت بررسی و مدل‌سازی آبخستگی و فلاشینگ رسوبات به‌وسیله جریان سریع آب از روش SPH با تراکم‌پذیری کم و مدل ویسکوپلاستیک بینگهام را برای رسوب استفاده کردند. شفتس (۲۰۱۷) به کمک روش SPH حرکت ذرات دانه‌ای را به کمک مدل رئولوژیکی کراس برای مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی بررسی کرد و نتایج کار خود را با داده‌های آزمایشگاهی و خروجی‌های DEM و FEM مقایسه کرد. نتایج کار ایشان بیان‌گر دقت مناسب مدل‌های عددی به کار گرفته‌شده با مدل عددی بود. برای امیدوار و نیک‌اقبالی (۲۰۱۷) در مدل‌سازی جریان سریع ناشی از شکست سد با بستر فرسایش‌پذیر در SPH از مدل بینگهام برای مدل‌سازی رسوبات استفاده کردند و تغییرات سطح بستر رسوبی را نسبت به کارهای قبل بهبود بخشیدند. خیرخواهان و حسینی (۱۳۹۶) برای بررسی حرکت ذرات دانه‌ای به صورت تک فاز از مدل رئولوژیکی $\mu(I)$ در روش SPH استفاده کردند و نشان دادند که با توجه به وجود پارامترهای فیزیکی ذرات دانه‌ای مورد استفاده در معادلات این روش، این روش دارای ویژگی منحصر به فردی است.

در این مقاله با تغییرات اساسی و توسعه کد اسفیزیکس که به زبان فرترن و برای سیال تک فاز نیوتنی نوشته شده است، مدل‌سازی جریان و رسوب برای رانش زمین صورت گرفته است (گومز-گستیرا و همکاران^۱، ۲۰۱۲).

در این تحقیق در ابتدا به بررسی حرکت رسوبات دانه‌ای در مدل تک‌فازی پرداخته شده و در ادامه رانش زمین به صورت دوفازی مدل‌سازی گردیده است. برای بررسی حرکت ذرات رسوبی، مدل غیرنیوتنی ویسکوپلاستیک HBP^۲ در کد توسعه داده شد که به صورت تک ضابطه‌ای می‌باشد و برخلاف مدل‌های دو رابطه‌ای دچار جدایش میان مرز آستانه حرکت و ذرات بدون حرکت نمی‌باشد. برای بررسی عملکرد مدل رئولوژیکی مورد استفاده در این مقاله از مدل

۴. Owen
۵. Sub-Particle Scale

۱. Gomez-Gesteira et al.
۲. Herschel Bulkley Papanastasiou
۳. Grenier et al.

در این مطالعه از ذرات مرزی دافعه استفاده شده است. این نوع از ذرات مرزی ابتدا توسط موناغان و کاس^۲ (۱۹۹۹) در SPH مورد استفاده قرار گرفتند و سپس توسط راجرز و همکاران (۲۰۰۸) توسعه داده شدند. این نوع از ذرات مرزی به این صورت عمل می‌کنند که یک نیروی نرمال به ذرات سیال وارد می‌کنند. مقدار این نیرو از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$f = n \times R(\psi)P(\xi)\varepsilon(z, u) \quad (9)$$

که در این رابطه n واحد عمود، $R(\psi)$ تابع دافعه که ψ فاصله عمود ذره از دیواره است. $P(\xi)$ تابعی است که به گونه‌ای انتخاب می‌شود که ذرات آب هنگامی که به صورت موازی دیوار حرکت می‌کنند نیروی دافعه ثابتی را تجربه کنند و $\varepsilon(z, u)$ ضریب تعدیلی است که توسط موناغان و کاس (۱۹۹۹) به رابطه اضافه گردیده است تا بزرگی نیروی دافعه را مطابق عمق سیال و سرعت ذرات سیال عمود بر مرز تعدیل کند.

مدل رئولوژیکی

در این تحقیق با توسعه کد اسفیزیکس و اعمال مدل رئولوژیکی HBP رفتار فاز رسوبات مدل‌سازی گردید. این مدل همانند دیگر مدل‌های ویسکوپلاستیک برای تنش‌های کمتر از تنش آستانه حرکت همانند مواد جامد بدون حرکت و برای مقادیر بیشتر از آن جاری خواهد شد. مدل هرشل-بالکی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\tau = \eta \dot{\gamma}_{\alpha\beta}$$

در این رابطه مقدار η به صورت زیر برای عدم حرکت و حرکت سیال تعریف می‌شود.

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} + \mu_0 (|\dot{\gamma}|)^{n-1} & |\tau| \geq \tau_y \\ \infty & |\tau| < \tau_y \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، μ_0 و n شاخص‌های پایداری و رفتار جریان هستند. این مقادیر تابع خصوصیات رسوب از جمله اندازه دانه و چگالی می‌باشند.

$\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$ تنسور کرنش می‌باشد که از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

$$\dot{\gamma}_{\alpha\beta} = \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial u_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} \quad (12)$$

در این رابطه P_i و P_j به ترتیب فشار ذره‌های i و j می‌باشند و u_{ij} اختلاف سرعت دو ذره i و j ، m_j جرم ذره j ، u ویسکوزیته سینماتیکی سیال، $r_{ij} = |x_i - x_j|$ ، τ_{ij} مقداری بسیار کوچک برای جلوگیری از بی‌نهایت شدن رابطه است m_j جرم ذره j و تعریف بقیه پارامترها در رابطه‌های قبلی آمده است.

در سمت راست رابطه (۴)، ترم اول بیانگر نیروهای مؤثر، ترم دوم گرادیان فشار، ترم سوم ویسکوزیته لایه‌ای است که توسط موریس و همکاران^۱ (۱۹۹۷) ارائه شد و ترم آخر تنش آشفته‌گی SPS می‌باشد که در این رابطه مقدار تنش آشفته‌گی توسط رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\frac{\tau_{\alpha\beta}}{\rho} = u_t \left(2\dot{\gamma}_{\alpha\beta} - \frac{2}{3}k\delta_{\alpha\beta} \right) - \frac{2}{3}C_1\Delta^2\delta_{\alpha\beta}|\dot{\gamma}_{\alpha\beta}|^2 \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $\tau_{\alpha\beta}$ تنسور تنش SPS می‌باشد. u_t ویسکوزیته آشفته‌گی است که از مدل اسمگورینسکی به صورت $u_t = [\min(C_s\Delta)]^2 |\dot{\gamma}_{\alpha\beta}|$ به دست می‌آید که در آن ثابت اسمگورینسکی $C_s = 0.12$ است. $\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$ تنسور کرنش و $|\dot{\gamma}_{\alpha\beta}|$ مقدار آن می‌باشد. k انرژی سینماتیکی آشفته‌گی SPS و $C_1 = 0.0066$ می‌باشند. α و β اندیس‌های تنسور تنش و کرنش برای حالت‌های دو و سه‌بعدی می‌باشند.

در این مطالعه به علت وجود ذرات با چگالی متفاوت در فصل مشترک آب و رسوب، از روش پیشنهادی گرنیر و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است. در نتیجه معادله پیوستگی و گرادیان فشار در رابطه مومنتوم به صورت رابطه‌های (۶) و (۷) بیان خواهند گردید.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_{ji} \nabla_i W_{ij} \quad (6)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + R_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (7)$$

ترم R_{ij} عامل تعادل میان دو فاز با چگالی‌های متفاوت است. این ترم توسط رابطه (۸) قابل محاسبه است.

$$R_{ij} = K \left(\frac{\rho_d - \rho_l}{\rho_d + \rho_l} \right) \left| \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} \right| \quad (8)$$

در این رابطه ρ_d و ρ_l به ترتیب برابر با چگالی‌های مرجع دو فاز با مقادیر بیشتر و کمتر می‌باشند. K ضریبی است عددی که بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود.

شرایط مرزی

محاسبه فشار

در این مطالعه از روش دینامیک ذرات هموار با تراکم‌پذیری کم استفاده شده است که در آن مقادیر فشار به وسیله معادله حالت و بر اساس تابعی از چگالی و به صورت صریح با استفاده از رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$P_i = B \left(\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، مقدار فشار ذره i و γ ثابتی است که برابر γ در نظر گرفته می‌شود و ρ_0 چگالی مرجع و ρ_i چگالی ذره i است. برای تعیین مقدار B ، چنانچه از رابطه فوق نسبت به چگالی مشتق گرفته شود، مربع سرعت صوت مطابق رابطه (۲۰) به دست می‌آید (موناقان، ۱۹۹۴).

$$c^2(\rho) = \frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{B\gamma}{\rho_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma-1} \quad (20)$$

با جایگذاری ρ_0 در رابطه (۲۰)، رابطه (۲۱) حاصل می‌گردد.

$$c_0^2 = c^2(\rho_0) = \frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} = \frac{B\gamma}{\rho_0} \quad (21)$$

که از آن ثابت B برابر $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ به دست می‌آید. c_0 سرعت صوت در چگالی مرجع است. طبق یافته موناقان (۱۹۹۴) برای سیالات می‌توان سرعت صوت را به صورت مصنوعی به مقدار قابل توجهی کاهش داد، به گونه‌ای که تأثیری در حرکت سیال نداشته باشد. ضمن این که حداقل این سرعت باید ۱۰ برابر حداکثر سرعت قابل انتظار جریان باشد تا تغییرات زیادی در چگالی مشاهده نشود.

الگوریتم حل

روش پیشروی زمانی در این مطالعه به صورت سیمپلکتیک^۲ می‌باشد. در این روش ابتدا افزایش چگالی و موقعیت در نیمه گام زمانی به صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (موناقان، ۲۰۰۵).

$$\begin{cases} \rho_i^{n+\frac{1}{2}} = \rho_i^n + \frac{\Delta t}{2} G_i^n \\ r_i^{n+\frac{1}{2}} = r_i^n + \frac{\Delta t}{2} H_i^n \end{cases} \quad (22)$$

در این رابطه $H = \frac{dr_i}{dt}$ و $F = \frac{dv_i}{dt}$ ، $G = \frac{d\rho_i}{dt}$ به ترتیب معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و مکان ذره هستند. سپس P^{n+1} از ρ^{n+1} محاسبه می‌شود و در مرحله‌ی

اندازه این تنسور را می‌توان از رابطه (۱۳) به دست آورد.

$$|\dot{\gamma}| = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\gamma}_{\alpha\beta} \dot{\gamma}_{\alpha\beta}} \quad (13)$$

در اینجا برای تعیین تنش تسلیم حرکت ذرات دانه‌ای از معیار موهر-کولومب به صورت زیر استفاده شده است.

$$\tau_y = p \sin\phi + C \cos\phi \quad (14)$$

در رابطه بالا C چسبندگی خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و p فشار مؤثر وارده از سربار بالای هر ذره خاک می‌باشد.

در این مقاله از قانون نمایی ارائه شده توسط ژو و همکاران^۱ (۲۰۰۵) استفاده شده است که به صورت رابطه (۱۷) بیان می‌شود.

$$\eta = \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} (1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|) + \mu_0 |\dot{\gamma}|^{n-1}) \quad (15)$$

در این رابطه m رشد نمایی تنش را کنترل می‌کند. این معادله برای هر دو ناحیه تسلیم و غیرتسلیم کاربرد دارد.

همچنین برای بهبود نتایج در این مقاله به علت غیرنیوتنی بودن ذرات فاز رسوب (دانه‌ای) که تنش‌های برشی مختلف منجر به نرخ کرنش‌های مختلف در آن‌ها می‌شود، از میانگین‌گیری هماهنگ بین ویسکوزیته ذرات مدل طبق رابطه (۱۶) استفاده شده است.

$$\eta_{ij} = \eta_{ji} \cong \frac{2\eta_i \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \quad (16)$$

در این مطالعه برای محاسبه مقادیر ویسکوزیته در لایه حداقل میان ذرات دو فاز مختلف معادله اُون در کد توسعه داده شد که در آن مقدار ویسکوزیته از رابطه (۱۷) قابل محاسبه است.

$$v_{mix} = \frac{v_{fluid}}{1 + C \frac{\rho_s}{\rho_f}} \quad (17)$$

که در آن ρ_s و ρ_f به ترتیب مقادیر چگالی آب و رسوب می‌باشند و C غلظت مواد جامد است و مقدار آن از رابطه (۱۸) به دست می‌آید.

$$C = \frac{\sum_{j \neq i} \delta_{sf} W_{ij}}{\sum_{j \neq i} \delta_{sf} W_{ij} + \sum_{j \neq i} (1 - \delta_{sf}) W_{ij}} \quad (18)$$

که در آن δ_{sf} برای ذرات سیال برابر صفر و برای ذرات جامد برابر یک می‌باشد.

شکل (۱): موقعیت اولیه ذرات و ابعاد مخزن سد به صورت دو-بعدي

ستون مواد دانه‌ای با استفاده از یک دریچه که به صورت عمودی جابجا می‌شود، از پایین دست جدا شده است. این دریچه باعث ایجاد یک مخزن می‌شود که اجازه انتشار ناگهانی جریان دانه‌ای را فراهم می‌کند. در این مطالعه ضرایب مدل HBP یعنی μ_0 ، m و n به ترتیب برابر با $0.1/5 \text{ pa.s}$ ، 50 و 0.25 قرار داده شده‌اند.

در شکل (۲) سطح آزاد ذرات در مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی در زمان‌های مختلف مقایسه شده‌اند. برای مدل‌سازی از میانگین‌گیری هماهنگ برای ویسکوزیته بین ذرات دانه‌ای استفاده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی تطابق مناسبی را با یکدیگر دارند.

در شکل (۳) موقعیت، سرعت و فشار ذرات در گام‌های زمانی مختلف نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، حرکت ذرات در ابتدا از پایین‌ترین نقطه و چسبیده به دریچه که دارای بالاترین سرعت می‌باشد، شروع شده و پس از آن ذرات بالایی با لغزیدن بر ذرات پایینی به سمت پایین حرکت کرده و جریان شکل می‌گیرد. در تمامی گام‌های زمانی ذرات واقع بر سطح توده دارای بیشترین سرعت و تعدادی از ذرات بدون حرکت باقی می‌مانند که محل قرارگیری آن‌ها در ناحیه داخلی و بین کف و دیواره ثابت انتهایی ذرات است چراکه این ذرات تحت بیشترین فشار در هر گام زمانی قرار دارند.

همچنین این مدل توانایی مدل‌سازی صحیح نحوه حرکت ذرات را داراست. زیرا همان‌طور که در شکل (۳) با استفاده از داده‌های سرعت مشخص می‌شود، ذراتی که دارای بیشترین فشار از طرف سربار هستند، دارای بیشترین مقاومت برشی هستند که توسط دیگر ذرات و در ناحیه میان دیواره انتهایی و کف (مرزهای بدون لغزش) و ذرات بالایی آن محصور شده‌اند و هیچ حرکتی را در طول مدل‌سازی نخواهند داشت که این موضوع با واقعیت پدیده تطابق کامل دارد. شکست ذرات و شروع حرکت آن‌ها در قسمت پایینی

بعد $F_i^{n+\frac{1}{2}}$ به طور رفت و برگشت روی ذرات محاسبه شده و در نهایت با استفاده از معادلات زیر سرعت و موقعیت در انتهای گام زمانی به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} V_i^{n+1} = V_i^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} F_i^n \\ r_i^{n+1} = r_i^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} V_i^n \end{cases} \quad (23)$$

اکنون G_i^{n+1} با استفاده از V_i^{n+1} و r_i^{n+1} محاسبه شده و در مرحله‌ی آخر فشار از رابطه‌ی مربوطه محاسبه می‌شود.

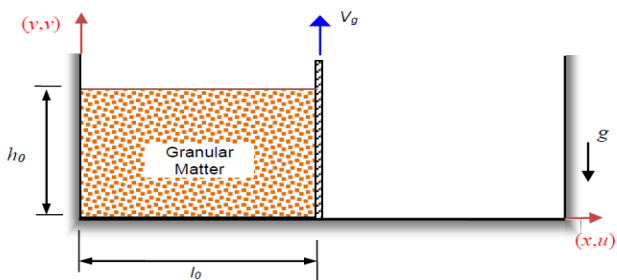
نتایج و بحث

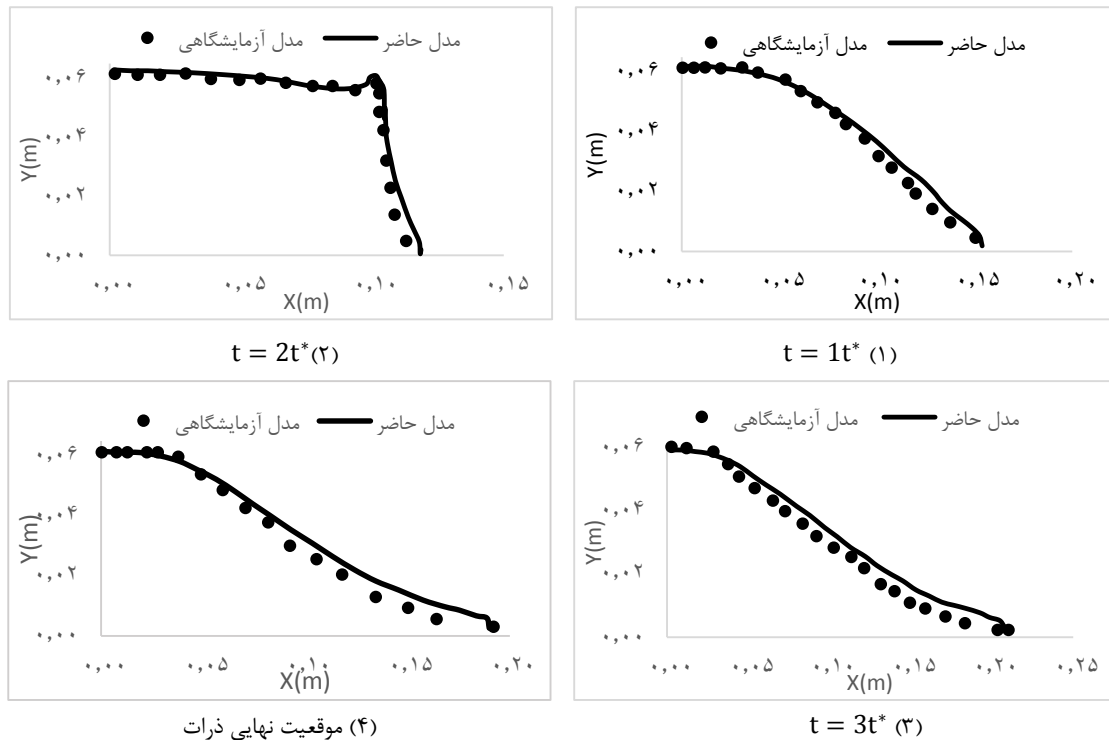
مدل‌سازی حرکت ذرات دانه‌ای

در این مقاله برای صحت‌سنجی مدل ویسکوپلاستیک از داده‌های آزمایشگاهی شکست سد دانه‌ای لاجئونس و همکاران^۱ (۲۰۰۶) با ذرات گوی شیشه‌ای با مشخصات زیر استفاده شده است:

$$\phi = 22^\circ \text{ و } \rho_0 = 2500 \text{ kg/m}^3, D = 1.15 \text{ mm}$$

برای بررسی آزمایشگاهی روند شکست و ریزش توده دانه‌ای از پارامترهای $a = h_0/l_0$ و $t^* = \sqrt{g/h_0}$ استفاده شده است که به ترتیب نسبت ارتفاع اولیه به عرض اولیه مصالح دانه‌ای و زمان بدون بعد می‌باشند. پارامتر a (نسبت ارتفاع به طول مخزن) پارامتر مؤثر در حرکت دانه‌ای ذرات می‌باشد به‌صورتی که نتایج حاصل از مقادیر مختلف h_0 و l_0 ولی با نسبت مساوی a یکسان می‌باشند. برای مدل‌سازی از $a = 0.6$ با طول اولیه 0.053 متر استفاده شده است. فاصله ذرات در دو جهت عمود بر هم x و y برابر با 0.02 متر قرار داده شده است که منتج به 3816 ذره گردیده است. مدل به صورت شماتیک که شامل یک مخزن مستطیل شکل با بستر افقی است در شکل (۱) نشان داده شده است.





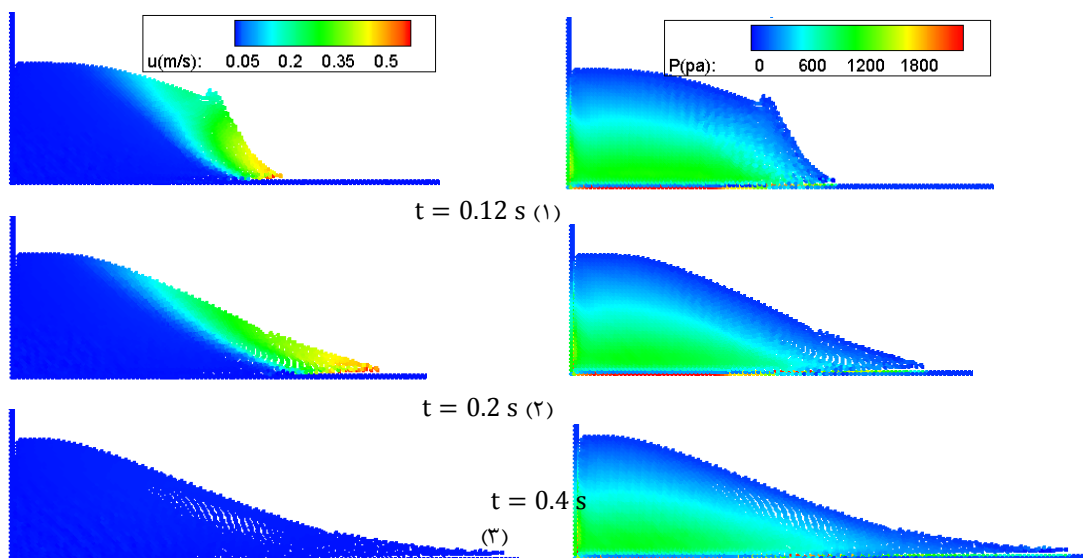
شکل (۲): موقعیت سطح آزاد ذرات در گام‌های زمانی مختلف و مقایسه آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی

قابل توجه است که علاوه بر اختلاف چگالی میان فازها، رفتار هر یک از فازها نیز متفاوت از یکدیگر است. مدل‌سازی آب با رفتاری نیوتنی و رسوبات با رفتاری غیرنیوتنی و تعامل ذرات این دو در حدفاصل دوفاز از چالش‌های این مسئله می‌باشد که علاوه بر اختلاف چگالی، ویسکوزیته نیز متغیر است. در نتیجه، مدل‌سازی این نوع پدیده‌ها از موضوعات موردعلاقه محققین می‌باشد.

سمت راست توده رخ خواهد داد که در این محل ذرات دارای بیشترین سرعت هستند.

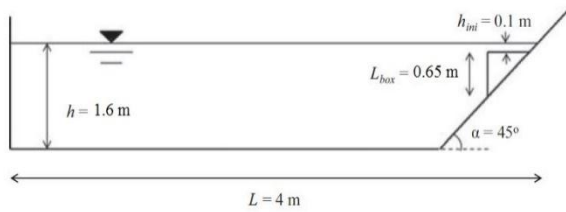
مدل‌سازی رانش زمین به صورت مستغرق

یکی از مسائل موردتوجه در علم هیدرولیک، بررسی حرکت ذرات رسوبی بر روی سطح شیب‌دار و تغییرات سطح رسوبات و موج ناشی از آن بر سطح آب است. مدل‌سازی جریان آب-رسوب از آن جهت در روش هیدرودینامیک ذرات هموار



شکل (۳): موقعیت ذرات، فشار (سمت راست) و سرعت (سمت چپ)

جریان و موج ایجادشده در سطح آب مخزن را مدل‌سازی نماید.



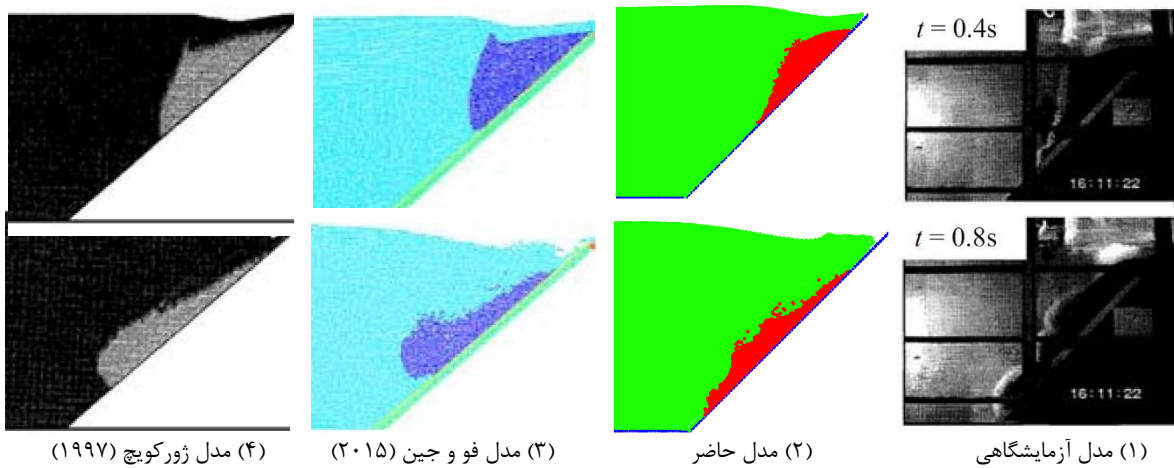
شکل (۴): ابعاد مدل رانش زمین مستغرق رسوبات اشباع

در شکل (۷) تغییرات سطح رسوبی مدل در گام‌های زمانی ۰/۴ ثانیه و ۰/۸ ثانیه پس از شروع حرکت با داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی فو و جین (۲۰۱۵) و ژورکویچ (۱۹۹۷) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود عملکرد مدل حاضر نسبت به مدل‌های دیگر بهتر است.

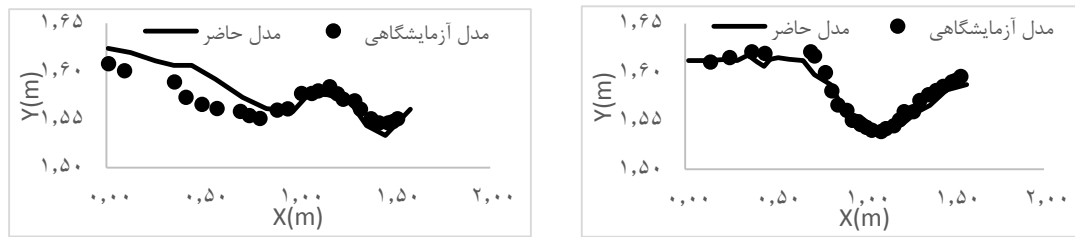
پس از ارزیابی مدل عددی، نحوه حرکت رسوبات در دامنه شیب‌دار با بررسی مقدار سرعت برای فاز آب و فاز رسوب صورت گرفته است. در شکل (۸) مقادیر سرعت u ، v و قدر مطلق برآیند سرعت $|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$ برای دو فاز در زمان‌های ۰/۴ و ۰/۸ ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، حرکت رسوبات به‌مرور به توده ساکن آب منتقل گردیده و درنهایت سبب تولید موج در سطح آب می‌گردد. در شروع حرکت، پیشانی توده رسوب دارای سرعت زیاد بوده که با تعامل با آب ساکن از سرعت آن به‌مرور کاسته می‌شود و انتقال مومنوم به آب صورت گرفته و سبب حرکت توده آب می‌گردد. حرکت توده آب به‌نوبه خود در مراحل بعدی سبب تغییراتی در سطح رسوبات در حال حرکت ایجاد می‌نماید. سطح رسوب با دو برآمدگی در زمان ۰/۸ ثانیه از شروع حرکت مرتبط با حرکت رو به بالای آب و حرکت رو به پایین رسوبات ایجاد می‌گردد. موج ایجادشده در سطح آب نیز در نتیجه برخورد توده رسوب در حال حرکت و آب جایگزین شده می‌باشد. از سرعت رسوبات در حین حرکت به سمت پایین شیب به‌مرور کاسته شده و درنهایت توده رسوبی متوقف می‌گردد.

در این تحقیق به کمک مدل توسعه‌یافته شده در خصوص رفتار دانه‌ای فاز رسوبی ذرات و همچنین تغییرات موردنظر در کد که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، بررسی عملکرد مدل توسط داده‌های آزمایشگاهی رانش زمین به‌صورت مستغرق هینریچ^۱ (۱۹۹۲) صورت گرفت. در این آزمایش ذرات رسوب دارای چگالی بالک 1950 kg/m^3 و زاویه اصطکاک داخلی $\phi = 22^\circ$ است. تصویر شماتیکی از شرایط آزمایشگاهی این مدل در شکل (۴) قابل مشاهده است. در این شکل گوه رسوبات اشباع با ارتفاع و عرض ۰/۶۵ متر بر دیواره شیب‌داری با زاویه ۴۵ درجه در مخزن آبی با ارتفاع آب ۱/۶ متر قرار دارد که آب بالای این گوه ۰/۱ متر است. در این مدل‌سازی فاصله ذرات در دو راستای x و y برابر با ۰/۰۲ متر در نظر گرفته شد که منجر به تعداد ۲۶۰۰۰ ذره گشته است.

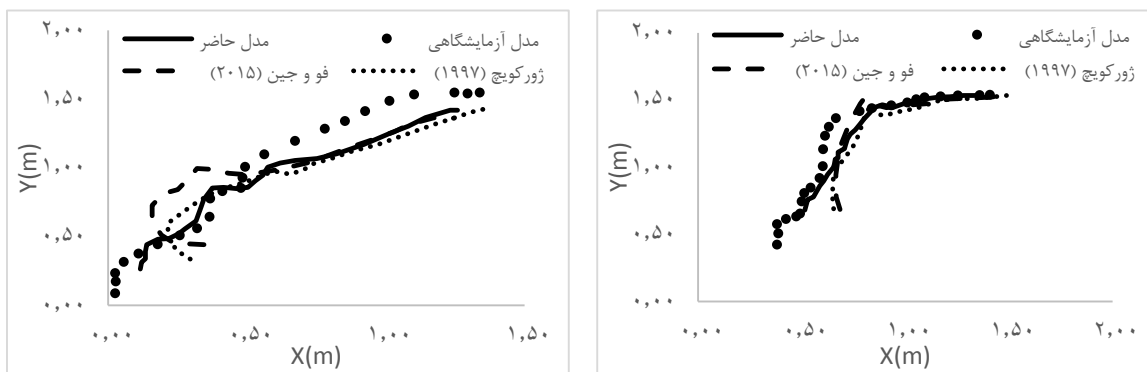
در شکل (۵) نتایج حاصل از خروجی مدل و داده‌های آزمایشگاهی به همراه مدل‌های عددی فو و جین (۲۰۱۵) و ژورکویچ (۱۹۹۷) در گام‌های زمانی ۰/۴ ثانیه و ۰/۸ ثانیه پس از شروع حرکت رسوبات روی دامنه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با شروع حرکت ذرات رسوبی، در سطح آب موج شکل می‌گیرد. در مدل حاضر، حرکت ذرات در گام زمانی ۰/۴ ثانیه از پایین‌ترین نقطه متصل به کف شیب‌دار مخزن شروع می‌شود که نسبت به دو مدل دیگر، نشان‌دهنده مدل‌سازی بهتر حرکت ذرات در روی شیب است. در این گام زمانی همان‌طوری که به‌صورت کیفی در این شکل دیده می‌شود میزان حرکت ذرات به سمت پایین نسبت به دو مدل دیگر بیشتر بوده که با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی بیشتری دارد. در گام زمانی ۰/۸ ثانیه نیز در مدل حاصل دو برآمدگی در سطح رسوبات ایجادشده و حرکت ذرات به سمت پایین شیب نیز نسبت به دو مدل قبلی بیشتر است که نشانگر دقت بیشتر مدل حاضر نسبت به دو مدل قبلی است. شکل (۶) مقایسه دقیق‌تری میان سطح آب در مدل آزمایشگاهی و مدل حاضر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل عددی توانسته به‌صورت مطلوبی تغییرات سطح آزاد



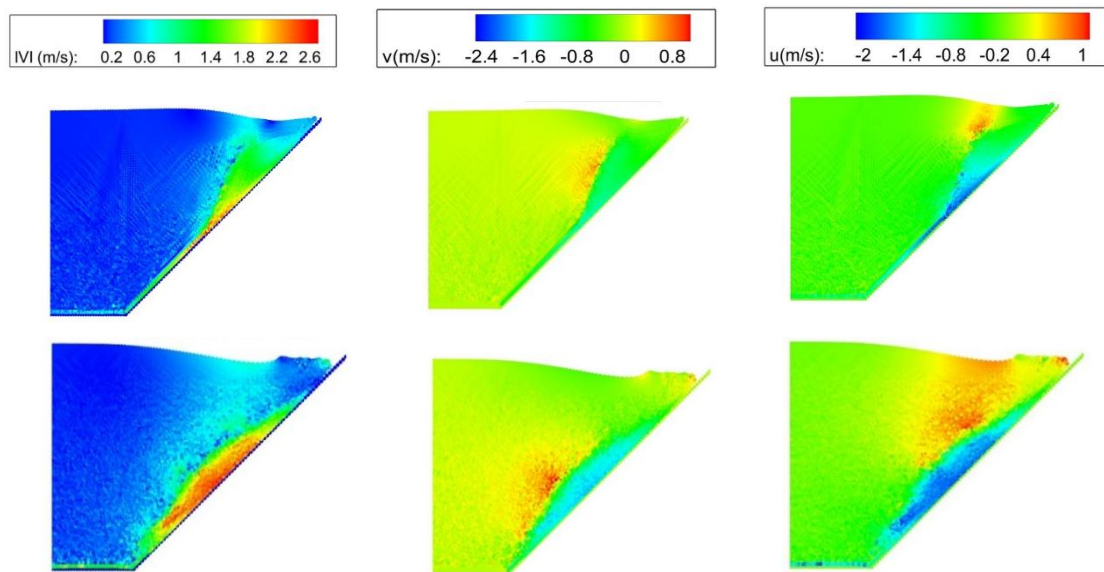
شکل (۵): مقایسه روند لغزش رسوب مستغرق بر روی دامنه شیب‌دار و موج حاصله میان مدل آزمایشگاهی، مدل عددی حاضر و دیگر مدل‌های عددی پیشین



شکل (۶): مقایسه میان سطح آزاد آب مدل آزمایشگاهی و مدل عددی حاضر در زمان‌های ۰/۴ ثانیه (سمت راست) و ۰/۸ ثانیه (سمت چپ) پس از شروع حرکت



شکل (۷): مقایسه میان سطح رسوبات میان مدل آزمایشگاهی، مدل عددی حاضر و دیگر مدل‌های عددی پیشین در زمان‌های ۰/۴ ثانیه (سمت راست) و ۰/۸ ثانیه (سمت چپ) پس از شروع حرکت



شکل (۸): مقادیر سرعت از راست به ترتیب u ، v و V در زمان‌های 0.4 ثانیه (بالا) و 0.8 ثانیه (پایین)

نتیجه‌گیری

همچنین موج ایجادشده در سطح آب مخزن در نتیجه حرکت و ریزش رسوبات در شیب بررسی گردیده است. مشخص گردید که با بررسی الگوی جریان در فصل مشترک توده رسوبی و آب مخزن می‌توان تغییر شکل‌های ایجادشده و موج حاصله در سطح آب را تفسیر نمود.

در این مقاله رانش توده رسوبی مستغرق به وسیله روش هیدرودینامیک ذرات هموار مدل‌سازی شده است. از مدل رئولوژیکی HBP برای مدل‌سازی رفتار ذرات کمک گرفته شده است. این مدل برخلاف دیگر مدل‌های ویسکوپلاستیک پیشین همچون بینگهام و هرشل بالکی به صورت تک رابطه‌ای است که برای قبل و بعد از حرکت ذرات کاربرد دارد. نتایج مدل‌سازی شکست سد تک فاز با ذرات غیرچسبنده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشانگر قابلیت بالای مدل رئولوژیکی مورد استفاده در مدل‌سازی حرکت دانه‌ها و فیزیک پدیده از جمله مدل کردن ذرات بدون حرکت در ناحیه داخلی را دارد.

مراجع

۱- خیرخواهان، م؛ و حسینی، خ. (۱۳۹۶). "مدل‌سازی جریان دانه‌ای به کمک مدل رئولوژیکی $\mu(I)$ در روش SPH"، نشریه هیدرولیک ایران، ۴۳-۵۵: (۱۲)۴.

2-Assier Rzdakiewicz, S. Mariotti, C. and Heinrich, P. (1997). "Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 123(4): 149-159.

3-Ataei-Ashtiani, B. Shobeyri, G. and Farhadi, L. (2008). "Modified incompressible SPH method for simulating free surface problems". Fluid Dynamics Research, 40: 637-661.

4-Fourtakas, G. and Rogers, B.D. (2016). "Modelling multi-phase liquid-sediment scour and resuspension induced by rapid flows using Smoothed Particle Dynamics (SPH) accelerated with a Graphic Processing Unit (GPU)". Adv. Water Resour, 92: 186-199.

5-Fu, L. and Jin, Y. (2015). "Investigation of nondeformable and deformable landslides using meshfree method". Journal of Ocean Engineering, 109: 192-206.

6-Gomez-Gesteira, M. Crespo, A.J.C. Rogers, B.D. Dalrymple, R.A. Dominguez, J.M. and Barreiro, A. (2012). "Sphysics-Development of a Free-Surface Fluid Solver-Part 2: efficiency and test cases". Compu Geosci. <http://www.Sphysics.org>

در ادامه برای بررسی کد دوفازی توسعه یافته از مدل آزمایشگاهی حرکت رسوبات اشباع بر سطح شیب‌دار استفاده گردید. برای توسعه کد در این مرحله، به علت وجود اختلاف چگالی در مرز مشترک دو فاز از روابط پیشنهادی موجود جهت اصلاح و جلوگیری از واگرایی مدل از جمله مدل اُون استفاده شد. در ادامه مدل‌سازی رانش زمین ذرات رسوبی نیز انجام گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه نتایج نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل توسعه یافته در شبیه‌سازی جریان و رسوب است.

در نهایت با بررسی الگوی سرعت فازهای آب و رسوب در مدل عددی، تغییر شکل‌های ایجادشده در توده رسوبی و

7-Grenier, N. Antuono, M. Colagrossi, A. Le Touze, D. and Alessandrini, B. (2009). "An Hamiltonian interface SPH formulation for multifluid and free surface flows", *J Comput Phys*, 228: 8380–8393.

8-Heinrich, P. (1992). "Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides". *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng*, 118 (3): 249–266.

9-Heller, V. and Spinneken, J. (2013). "Improved landslide-tsunami prediction: effects of block model parameters and slide model". *J. Geophys. Res. C*, 118: 1489–1507.

10-Khanpour, M. Zarrati, A.R. Kolahdoozan, M. Shakibaeinia, A. and Amirshahi, S.M. (2016). "Mesh-free SPH modeling of sediment scouring and flushing". *J. Computer and fluids*, 129: 67-78.

11-Lajeunesse, E. Monnier, J. and Homsy, G. (2005). "Granular slumping on a horizontal surface". *Phys. Fluids*, 17(10): 1-15.

12-Liu, M.B. Liu, G.R. (2010). "Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments". *Arch Comput Methods Eng*, 17: 25–76.

13-Monaghan, J.J. (1994). "Simulating free surface flows with SPH". *J. Comput. Phys.* 110: 399-406.

14-Monaghan, J.J. (2005). "Smoothed Particle Hydrodynamics", *Rep Prog Phys*, 68: 1703–1759.

15-Morris, J.P. Fox, P.J. and Zhu, Y. (1997). "Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH", *J Comput Phys*, 136: 214–226.

16-Omidvar, P. and Nikeghbali, P. (2017). "Simulation of violent water flows over a movable bed using smoothed particle hydrodynamics", *J Mar Sci Technol*, 22(2): 270-287.

17-Rogers, B.D. Dalrymple, R.A. and Stansby, P.K. (2008). "SPH modeling of floating bodies in the surf zone", In: *Proceeding of 31st International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, Germany, 204-215.

18-Szewc, K. (2017). "Smoothed particle hydrodynamics modeling of granular column collapse". *Granular Matter*, 19(1), 3: 1-13.

19-Zhu, H. Kim, Y.D. and De Kee, D. (2005). "Non-Newtonian fluids with a yield stress", *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, 129: 177–181.