



Modeling Two Phase Dense Flow Containing Cohesive Sediments in Water Environment Using SPH Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kheirkhahan M.¹ PhD,
Hosseini Kh.^{*1} PhD,
Omidvar P.² PhD

How to cite this article

Kheirkhahan M, Hosseini Kh, Omidvar P. Modeling Two Phase Dense Flow Containing Cohesive Sediments in Water Environment Using SPH Method. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1245-1254.

ABSTRACT

Investigating dense flows containing cohesive sediments (turbidity currents) in the water environment has been the main interest for researchers in hydraulic and fluid mechanic science. This kind of flow streams at the bed surface because of higher density than water and penetrate to overhead water, which causes turbidness. In the present research, this kind of flow has been modeled using two-phase simulation with smoothed particle hydrodynamics Lagrangian method. A SPHysics2D code has been developed for modeling, in which pressure value is calculated using the equation of state. Also, Herschel-Bulkley-Papanastasiou single relation non-Newtonian viscoplastic model has been used for modeling the cohesive sediment phase. After that for investigating the amount of penetration of cohesive sediment mixture in limpid water, the advection-diffusion equation was used for developing code. Finally, one and two-phase results obtained from the present model were compared to experimental models. The study shows that the present developed model is able to model these flows desirably and could be utilized for studying concentration amount, dense flow penetration and their propagation in the water environment.

Keywords Two Phase SPH Model; Dense Flow; Non-Newtonian Phase of Cohesive Sediments; Herschel-Bulkley-Papanastasiou Model; Advection-Diffusion Equation

¹Water Engineering & Hydraulic Structures Department, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Yasouj University, Yasouj, Iran

*Correspondence

Address: Water Engineering & Hydraulic Structures Department, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran. Postal Code: 3513119111
Phone: +98 (23) 31535205
Fax: -
khoseini@semnan.ac.ir

Article History

Received: July 29, 2019

Accepted: November 17, 2019

ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Gravity currents: A personal perspective [2] Turbidity currents and their deposits [3] Sediment deposition from turbidity currents [4] A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [5] Simulating free surface flows with SPH [6] Smoothed particle hydrodynamics for the interaction of Newtonian and non-Newtonian fluids using the $\mu(I)$ model [7] Investigation of non-deformable and deformable landslides using meshfree method [8] Improved multiphase Lagrangian method for simulating sediment transport in dam-break flows [9] Modelling multi-phase liquid-sediment scour and resuspension induced by rapid flows using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) accelerated with a Graphics Processing Unit (GPU) [10] Mesh-free SPH modeling of sediment scouring and flushing [11] Development of two incompressible SPH methods to simulate sediment-laden free surface flows [12] Comparison of the $\mu(I)$ and HBP models for simulating granular media [13] Modeling granular flow using $\mu(i)$ rheological model in SPH method [14] Simulation of violent water flows over a movable bed using smoothed particle hydrodynamics [15] Application of the sph method to breaking and undular tidal bores on a movable bed [16] Simulation of waves on boom and oil plume rising using smoothed particle hydrodynamics [17] SPHysics—development of a free-surface fluid solver—part 1: Theory and formulations [18] An Hamiltonian interface SPH formulation for multi-fluid and free surface flows [19] Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH [20] Solitary waves on a Cretan beach [21] SPH modeling of floating bodies in the surf zone [22] Non-Newtonian fluids with a yield stress [23] Ueber diffusion [24] Experimental study of steady and unsteady free surface flows with water-clay mixtures [25] Laboratory testing of mathematical models for high-concentration fluid mud turbidity currents

مدل‌سازی دوفازی جریان چگال حاوی رسوبات چسبنده در محیط آبی به روش هیدرودینامیک ذرات هموار

مهران خیرخواهان PhD

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

خسرو حسینی* PhD

گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

پوریا امیدوار PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

یکی از مطالعات مورد علاقه محققین در علم هیدرولیک و مکانیک سیالات بررسی جریان‌های چگال حاوی رسوبات چسبنده (جریان‌های گل آلود) در محیط آبی است. این نوع از جریان‌ها به علت داشتن چگالی بیشتر نسبت به آب در بستر جریان می‌یابند و در آب بالای خود نفوذ کرده و منجر به کدر شدن (گل‌آلود شدن) آن می‌شوند. در مقاله حاضر این نوع جریان‌ها به کمک شبیه‌سازی دوفازی در روش لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار مدل‌سازی گشته است. برای مدل‌سازی از توسعه کد دوبعدی اسفیزیکس بهره گرفته شده است که در آن مقادیر فشار به صورت صریح و به کمک معادله حالت محاسبه می‌شوند. همچنین برای مدل‌سازی فاز رسوبات چسبنده از مدل غیرنیوتنی ویسکوپلاستیک تک رابطه‌ای هرشل بالکی پاپاناستاسیو استفاده شده است. در ادامه برای بررسی میزان نفوذ مخلوط رسوبات چسبنده در آب زلال، از معادله نفوذ و جابجایی در توسعه کد استفاده شد. در نهایت نتایج حاصل از مدل حاضر به صورت تک‌فازی و دوفازی با مدل‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها حاکی از آن است که مدل توسعه داده شده در تحقیق حاضر به طور مطلوبی قادر به مدل‌سازی این نوع از جریان‌ها است و می‌تواند برای بررسی میزان غلظت، نفوذ جریان‌های چگال و همچنین میزان پیشروی آنها در محیط‌های آبی به کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: مدل دوفازی SPH، جریان چگال، فاز غیرنیوتنی رسوبات چسبنده، مدل هرشل بالکی پاپاناستاسیو، معادله نفوذ و جابجایی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۲۶

*نویسنده مسئول: khhoseini@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

جریان‌های گل‌آلود حاوی رسوبات چسبنده (Turbidity currents) دسته‌ای از جریان‌های چگال هستند که در آنها برخلاف دیگر جریان‌های چگال، رفتار رسوبات چسبنده به صورت غیرنیوتنی است. این جریان‌ها در محیط آبی به علت بالاتر بودن مقدار چگالی آنها نسبت به آب، در بستر شروع به حرکت می‌کنند و آب را به سمت بالا هدایت می‌کنند. این نوع جریان‌ها با نفوذ و پخش در محیط آبی گسترش یافته و غلظت‌های مختلفی را در آب ایجاد می‌کنند. از موارد مورد بحث در خصوص جریان‌های چگال گل‌آلود که موجب پیچیدگی بررسی رفتار آنها در محیط آبی می‌گردد، تغییرات غلظت آن است. تغییرات جریان‌های گل‌آلود به طور وسیعی در محیط

زیست، صنعت و تغییرات کف دریاها (ریخت‌شناسی) و سواحل هم به صورت طبیعی و هم به صورت مصنوعی رخ می‌دهند^[1,2]. همان طور که گفته شد یکی از مواردی که این پدیده به وقوع می‌پیوندد در بستر دریاها است. حرکت مخلوط رسوبات ریزدانه در بستر محیط آبی در طبیعت می‌تواند در مسافت‌های طولانی ادامه یافته و در نهایت در منطقه‌ای خاص با توجه به شرایط فیزیکی جریان و یا تغییرات شیمیایی محیط آبی موجب ته‌نشینی گشته و فرم بستر منطقه را دچار تغییرات کند. توزیع و ته‌نشینی این رسوبات در اعماق و یا سواحل دریاها اساس شکل‌گیری ماسه سنگ‌ها در این مناطق می‌گردد که در مبحث زمین‌شناسی مورد بررسی قرار می‌گیرند که از نمونه اثرات این نوع جریان‌ها هستند^[3].

امروزه با ارتقا سرعت محاسبات در کامپیوترهای پیشرفته، مدل‌سازی رفتار دقیق سیالات به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌هایی که در دهه اخیر بسیار به کار گرفته شده است، روش‌های لاگرانژی بدون شبکه نظیر SPH و MPS هستند. این روش‌ها تاکنون برای حل بسیاری از مسایل همچون زمین لغزش‌ها، ریزش بهمن و مسایلی از این دست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکست سد با محیط دوفازی دارای بستر فرسایش‌پذیر و مدل‌های دوفازی حاوی رسوبات و پدیده‌هایی از این دست، از مسایل استاندارد برای بررسی عملکرد کدهای موجود در زمینه مدل‌های لاگرانژی هستند. در این مدل‌ها ماهیت پیچیده حرکت رسوبات با مدل‌های رفتاری تنش میانی آنها (سیالات غیرنیوتنی ویسکوپلاستیک) در کد 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. در نهایت به کمک نتایج این مدل‌ها همچون سرعت و فشار درک بهتری برای تحلیل مساله ایجاد خواهد شد و همچنین به کارگرفتن روش‌های عددی منجر به کاهش هزینه‌های زیاد آزمایشگاهی برای بررسی‌های بیشتر خواهد شد.

یکی از روش‌های لاگرانژی بدون شبکه که به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته مدل دینامیک ذرات هموار یا SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics; SPH) است. این روش قادر به تحلیل مسایلی 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 مواردی از جمله هیدرولیک دریا است. این روش ابتدا توسط لوسی^[4] در اخترفیزیک به منظور مطالعه برخورد کهکشان‌ها مورد استفاده قرار گرفت و بعدها توسط مونافان^[5] گسترش یافته و در مسایل حرکت سیال با سطح آزاد مورد استفاده قرار گرفت.

همان طور که اشاره شد، بسیاری از جریان‌های حاوی رسوبات ریزدانه اصطلاحاً دارای رفتار ویسکوپلاستیک هستند. مدل‌سازی این نوع جریان‌ها به کمک مدل‌های ویسکوپلاستیک همچون بینگهام، هرشل بالکی و دیگر مدل‌های رئولوژیکی که دارای یک آستانه حرکت در تنش برشی هستند، تاکنون مورد استفاده بسیاری از محققین

کردند و برای کاهش پخش شدن آن در نواحی ساحلی استفاده از بوم (Boom) ثابت را پیشنهاد دادند.

در این مقاله از کد اسفیزیکس دوبعدی استفاده شده که این کد به زبان فترن (Fortran) و به صورت متن باز در اختیار و توانایی مدل‌سازی جریان برای سیالات نیوتنی را دارد [17].

در این تحقیق پس از توسعه کد، در ابتدا به بررسی جریان تک‌فازی حرکت رسوبات چسبنده و در ادامه به مدل‌سازی جریان دوفازی حرکت رسوبات در محیط آبی پرداخته شده است. برای بررسی حرکت ذرات از مدل رئولوژیکی هرشل-بالکی-پاپاناستاسیو (Herschel-Bulkley Papanastasiou; HBP) استفاده شده است که برخلاف مدل‌های دو رابطه‌ای دچار جدایش میان مرز آستانه حرکت و ذرات بدون حرکت است و به صورت تک رابطه‌ای تعریف می‌گردد و در نتیجه در ناحیه حفاصل میان آستانه حرکت و عدم حرکت ذرات دچار تکینگی نخواهد شد. برای بررسی عملکرد مدل رئولوژیکی مورد استفاده در این مقاله از مدل آزمایشگاهی شکست سد رسوبات چسبنده استفاده شده است که در مدل توسعه داده شده برای بهبود حرکت ذرات از میانگین‌گیری هارمونیک میان لزجت ذرات استفاده شده است. در ادامه برای مدل‌کردن سیستم دوفازی آب-رسوبات چسبنده به علت وجود اختلاف چگالی میان آنها از معادلات توسعه یافته جریان توسط گزنیر و همکاران [18] در مرز حفاصل میان دوفاز استفاده شد و همچنین با اعمال معادلات نفوذ و جابجایی میزان پخش شدن رسوبات در آب و غلظت آنها نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل تک‌فازی حاکی از توانایی مدل ویسکوپلاستیک به کار گرفته شده برای مدل‌سازی حرکت رسوبات است. همچنین نتایج حاصل از مدل دوفازی نیز بیانگر آن است که کد توسعه یافته، قابلیت بالایی در تحلیل مسایل نفوذ رسوبات چسبنده در آب را دارد.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم در جریان‌ها، پیوستگی و اندازه حرکت هستند که در شکل لاگرانژی به صورت رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \nabla \bar{\tau} + \vec{F} \quad (۲)$$

$$\frac{D\vec{r}}{Dt} = \vec{u} \quad (۳)$$

در روابط بالا u سرعت، ρ چگالی، P فشار، $\bar{\tau}$ تانسور تنش آشفستگی مقیاس زیر ذره (SubParticle Scale; SPS)، μ لزجت، F دیگر نیروهای موثر در حرکت سیال، t زمان و r مکان ذره هستند.

۳- روش SPH

روش SPH از درون‌یابی انتگرالی تابع f بر دامنه Ω حاصل می‌شود. که موجب تخمین تابع f براساس مقادیر موجود در اطراف دامنه آن می‌گردد. مقدار تابع f با استفاده از تابع پیچشی (Convolution) به صورت رابطه (۴) قابل بیان است.

$$f(x) \approx \langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (۴)$$

قرار گرفته است. این مدل‌ها تا قبل از رسیدن تنش برشی به آستانه‌های معین، رفتاری 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 زمین لغزش‌ها اشاره کرد. حسینی و همکاران [6] به کمک روش SPH و مدل رئولوژیکی $\mu(I)$ شکست سد بر بستر متحرک و همچنین رانش زمین به صورت مستغرق و غیرمستغرق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آنها بیاگر عملکرد مناسب این روش در تحلیل چنین مسایلی بود. فو و جین [7] از مدل لاگرانژی ام‌پی‌اس 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 غیرمستغرق را بررسی کردند. آنها با روش ام‌پی‌اس مدل‌سازی سیستم دوفازی آب-رسوب برای شکست سد را نیز مورد بررسی قرار دادند. آنها برای مدل‌سازی فاز رسوب از مدل رئولوژیکی هرشل-بالکی استفاده نمودند [8]. فورتنکاس و راجرز [9] به کمک مدل‌سازی جریان دوفازی آب-رسوب با مدل موازی تراکم‌پذیر کم اسفیزیکس دوبعدی (SPHysics2D)، اثر جی‌پی‌یو (GPU) را در سرعت اجرای برنامه بررسی کردند. آنها رفتار رسوبات را با استفاده از مدل رئولوژیکی هرشل-بالکی مدل‌سازی نمودند. خانپور و همکاران [10] جهت بررسی و مدل‌سازی آبشستگی و فلاشینگ رسوبات به وسیله جریان سریع آب از روش SPH با تراکم‌پذیری کم و مدل ویسکوپلاستیک بینگهام برای شبیه‌سازی رفتار رسوب استفاده کردند. فرزین و همکاران [11] با استفاده از روش SPH تراکم‌ناپذیر به مدل‌سازی دوفازی شکست سد پرداختند. آنها در این مطالعه فاز رسوب را به صورت مدل بینگهام مدل‌سازی نمودند. خیرخواهان و حسینی [12] برای بررسی حرکت ذرات دانه‌ای به صورت تک‌فاز 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 منحصربه‌فردی است. آنها در مطالعه‌ای دیگر به اثر لزجت تعامل و همچنین اثر وجود دریاچه در رفتار ذرات دانه‌ای با استفاده از روش SPH پرداختند [13]. امیدوار و نیک/قبالی [14] 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. آنها در مقاله‌ای دیگر تغییرات بستر رسوبی در اثر موج معکوس ناشی از جزر و مد دریا به داخل رودخانه را با استفاده از روش SPH مورد بررسی قرار دادند [15]. رستمی‌حسین‌خانی و همکاران [16] در مطالعات خود، صعود قطره روغن در محیط آبی را مورد بررسی قرار دادند. آنها اثرات مقدار نفوذ و جابجایی را نیز در تحقیقات خود بررسی کردند. در نهایت نیز حرکت روغن را با وجود موج بررسی

با گسسته‌سازی به‌صورت تقریب ذره‌ای رابطه (۴) به رابطه (۵) تبدیل می‌گردد.

$$f(x_i) = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h) = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (5)$$

در این رابطه W_{ij} تابع کرنل و h طول هموار هستند. m_j و ρ_j به‌ترتیب جرم و چگالی ذره در نقطه j هستند.

در نهایت، فرم کلی معادلات جریان در روش SPH به وسیله تقریب‌های کرنل و ذره به‌صورت رابطه‌های (۶) و (۷) در خواهد آمد.

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

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = \frac{F}{\rho_i} - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j m_j \left(\frac{4v_{ij}u_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)(|r_{ij}|^2 + \epsilon^2)} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j m_j \left(\frac{\bar{\tau}_i}{\rho_i^2} + \frac{\bar{\tau}_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (7)$$

در این رابطه P فشار ذره و u_{ij} اختلاف سرعت دو ذره i و j ، v لزجت سینماتیکی سیال، $r_{ij} = |x_i - x_j|$ مقدار بسیار کوچک برای جلوگیری از بی‌نهایت شدن رابطه است و تعریف بقیه پارامترها در رابطه‌های قبلی آمده است.

در سمت راست رابطه (۷)، جمله اول بیانگر نیروهای موثر، جمله دوم گرادین فشار، جمله سوم لزجت لایه‌ای است که توسط موریس و همکاران [19] ارائه شد و جمله آخر تنش آشفتگی SPS است که در این رابطه مقدر تنش آشفتگی به‌صورت رابطه (۸) به‌دست می‌آید.

$$\frac{\tau_{\alpha\beta}}{\rho} = v_t \left(2\dot{\gamma}_{\alpha\beta} - \frac{2}{3} k \delta_{\alpha\beta} \right) - \frac{2}{3} C_I \Delta^2 \delta_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}_{\alpha\beta}|^2 \quad (8)$$

در رابطه (۸)، $\tau_{\alpha\beta}$ تنسور تنش SPS است. v_t لزجت آشفتگی است که از مدل اسماکورینسکی به‌صورت $v_t = [\min(C_s \Delta l)]^2 |\dot{\gamma}_{\alpha\beta}|$ به‌دست می‌آید که در آن ثابت اسماکورینسکی $C_s = 0.12$ است. $\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$ تنسور کرنش و $|\dot{\gamma}_{\alpha\beta}|$ مقدار آن است. k انرژی سینماتیکی آشفتگی SPS و $C_I = 0.066$ هستند. در تحقیق حاضر، برای مدل دوفازی در هر دوفاز از مدل آشفتگی ارائه شده در این بخش استفاده شده است.

در این مطالعه به‌علت وجود ذرات با چگالی متفاوت در حفاصل، از روش پیشنهادی گرینیر و همکاران [18] استفاده شده است. در این روش معادله پیوستگی و گرادین فشار در رابطه مومنتوم به‌صورت رابطه‌های (۹) و (۱۰) در خواهند آمد.

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (9)$$

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = \frac{F}{\rho_i} - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + R_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j m_j \left(\frac{4v_{ij}u_{ij}}{(\rho_i + \rho_j)(|r_{ij}|^2 + \epsilon^2)} \right) \nabla_i W_{ij} + \sum_j m_j \left(\frac{\bar{\tau}_i}{\rho_i^2} + \frac{\bar{\tau}_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} \quad (10)$$

جمله R_{ij} عامل تعادل میان دوفاز با چگالی‌های متفاوت است. این جمله به وسیله رابطه (۱۱) قابل محاسبه است.

$$R_{ij} = K \left(\frac{\rho_d - \rho_l}{\rho_d + \rho_l} \right) \left| \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} \right| \quad (11)$$

در این رابطه ρ_l و ρ_d به‌ترتیب برابر با چگالی‌های مرجع دوفاز با مقادیر بیشتر و کمتر هستند. K ضریبی است عددی که بین ۰/۰ تا ۰/۱ است. در این تحقیق مقدار K برابر با ۰/۸ قرار داده شده است و همچنین از تابع میان‌یاب کیوبیک (Cubic) استفاده شده است.

۳-۱- شرایط مرزی

در این مطالعه از ذرات مرزی دافعه استفاده شده است. این نوع از ذرات مرزی ابتدا توسط موناکان و کاس [20] در SPH مورد استفاده قرار گرفتند و سپس توسط راجرز و همکاران [21] 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 (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$f = n \times R(\psi) P(\xi) \mathcal{E}(z, u) \quad (12)$$

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 به‌صورت موازی دیوار حرکت می‌کنند نیروی دافعه ثابتی را تجربه کنند و $\mathcal{E}(z, u)$ ضریب تعدیلی است که توسط موناکان و کاس [20] به رابطه اضافه شده است تا بزرگی نیروی دافعه را مطابق عمق سیال و سرعت ذرات سیال عمود بر مرز تعدیل کند.

۴- مدل رئولوژی

در این تحقیق از مدل رئولوژیکی HBP برای مدل‌سازی رفتار فاز رسوبات در کد استفاده شده است. این مدل همانند دیگر مدل‌های ویسکوپلاستیک برای تنش‌های کمتر از تنش آستانه حرکت مانند مواد جامد بدون حرکت، و برای مقادیر بیشتر از آن جاری خواهد شد. مدل هرشل- بالکی به‌صورت زیر بیان می‌شود [10].

$$\tau = \eta \dot{\gamma}_{\alpha\beta} \quad (13)$$

در این رابطه مقدار η به‌صورت زیر برای عدم حرکت و حرکت سیال تعریف می‌شود [22].

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} + \mu_o (|\dot{\gamma}|)^{n-1} & |\tau| \geq \tau_y \\ \infty & |\tau| < \tau_y \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، μ_o و n شاخص‌های پایداری و رفتار جریان هستند. این مقادیر تابع خصوصیات رسوب از جمله اندازه دانه و چگالی هستند.

$\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$ تنسور کرنش است که از رابطه (۱۵) قابل محاسبه است [10].

$$\dot{\gamma}_{\alpha\beta} = \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \quad (15)$$

اندازه این تنسور را می‌توان به وسیله رابطه (۱۶) به‌دست آورد [10].

$$|\dot{\gamma}| = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\gamma}_{\alpha\beta} \dot{\gamma}_{\alpha\beta}} \quad (16)$$

همان طور که در رابطه (۱۴) مشخص شده است، برای ارائه مدل رفتاری رسوب از توابعی گسسته (دو ضابطه‌ای) استفاده شده است که در این توابع زمانی که نرخ برش به سمت صفر میل می‌کند، نرخ کرنش نیز به صفر نزدیک می‌شود. برای اجتناب از نواحی تسلیم و غیرتسلیم از معادلات با شکل‌های پیوسته منظم استفاده می‌شود.

$$c^2(\rho) = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{B\gamma}{\rho_o} \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right)^{\gamma-1} = \frac{B\gamma}{\rho_o^\gamma} \rho^{\gamma-1} \quad (23)$$

با جایگذاری ρ_o در رابطه (۲۳)، رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$c_o^2 = c^2(\rho_o) = \frac{\partial p}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_o} = \frac{B\gamma}{\rho_o} \quad (24)$$

که از آن ثابت B برابر با $c_o^2 \rho_o / \gamma$ به دست می‌آید که حدی برای ماکزیمم تغییرات چگالی تعیین می‌کند. c_o سرعت صوت در چگالی مرجع است. انتخاب مقدار B اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. چنانچه B برحسب مقدار واقعی سرعت صوت در آب در نظر گرفته شود، در مدل‌سازی عددی به‌ناچار مجبور به استفاده از گام‌های زمانی کوتاه خواهیم بود. طبق یافته موناکان و کاس^[20] برای سیالات می‌توان سرعت صوت را به‌صورت مصنوعی به مقدار قابل توجهی کاهش داد، به‌گونه‌ای که تاثیری در حرکت سیال نداشته باشد. ضمن این‌که حداقل این سرعت باید ۱۰ برابر حداکثر سرعت قابل انتظار جریان باشد تا تغییرات زیادی در چگالی مشاهده نشود (کمتر از ۱٪).

۷- الگوریتم حل

روش پیشروی زمانی در این مطالعه به‌صورت سیمپلکتیک است. چون الگوریتم SPH معادلات دیفرانسیل جزئی پیوسته اصلی را به معادلات دیفرانسیل اصلی تبدیل می‌کند، هر الگوریتم گام زمانی پایداری می‌تواند برای معادلات دیفرانسیل معمولی مورد استفاده قرار بگیرد. این الگوریتم می‌تواند برای حفظ کردن خصوصیات معادلات لاگرانژی زمانی که اتلاف وجود ندارد به‌کار گرفته شود^[6]. در این روش ابتدا افزایش چگالی و موقعیت در نیمه‌گام زمانی به‌صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد^[6]:

$$\begin{cases} \rho_i^{n+1/2} = \rho_i^n + \frac{\Delta t}{2} G_i^n \\ r_i^{n+1/2} = r_i^n + \frac{\Delta t}{2} H_i^n \end{cases} \quad (25)$$

در این رابطه $G = \frac{d\rho_i}{dt}$ ، $F = \frac{dv_i}{dt}$ و $H = \frac{dr_i}{dt}$ به‌ترتیب معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و مکان ذره هستند. سپس P^{n+1} از $\rho^{n+1/2}$ محاسبه می‌شود و در مرحله بعد $F_i^{n+1/2}$ به‌طور 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^[6].

$$\begin{cases} v_i^{n+1} = v_i^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} F_i^n \\ r_i^{n+1} = r_i^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} v_i^n \end{cases} \quad (26)$$

اکنون G_i^{n+1} با استفاده از v_i^{n+1} و r_i^{n+1} محاسبه شده و در مرحله آخر فشار از رابطه مربوطه محاسبه می‌شود.

۷-۱- گام زمانی متغیر

کنترل گام زمانی به جمله‌های نیرویی، شرط کورانت- فردریچ- لوی (CFL) و جمله پخش لزجت بستگی دارد. شرط جمله‌های نیروی داخلی و خارجی به این دلیل اعمال می‌شود که از در هم فرورفتن ذرات همسایه در طی حرکت، زمانی که نیروهای داخلی و خارجی را تجربه می‌کنند، جلوگیری شود^[6].

$$\delta t_{forces} = \min \left(\frac{h}{|f_i|} \right) \quad (27)$$

در این مقاله از قانون نمایی ارایه شده توسط ژرو و همکاران^[22] استفاده شده است که به‌صورت رابطه (۱۷) بیان می‌شود.

$$\eta = \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} (1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|)) + \mu_o |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (17)$$

در این رابطه m رشد نمایی تنش را کنترل می‌کند. این معادله برای هر دو ناحیه تسلیم و غیرتسلیم کاربرد دارد. باید توجه داشت، چنانچه در این رابطه مقدار n برابر با یک گردد، این رابطه تبدیل به مدل غیرنیوتنی بینگهام (Bingham) و اگر τ_y برابر با صفر گردد، این رابطه به مدل غیرنیوتنی قانون توانی تبدیل خواهد شد. همچنین برای بهبود نتایج در این مقاله به‌علت غیرنیوتنی بودن ذرات فاز رسوب از میانگین‌گیری هارمونیک بین لزجت این ذرات طبق رابطه (۱۸) استفاده شده است.

$$\eta_{ij} = \eta_{ji} \cong \frac{2\eta_i\eta_j}{\eta_i + \eta_j} \quad (18)$$

۵- معادلات نفوذ و جابجایی

پدیده نفوذ توسط قانون فیک توصیف می‌شود^[23]. با بسط فوریه معادله حرارت، فیک به توصیف معادله نفوذ و تحلیل آن پرداخت. با توجه به این قانون تناسبی بین پخش شار جرمی و گرادیان غلظت برقرار است. اگر از پدیده جابجایی صرف‌نظر کنیم معادله نفوذ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{DC}{Dt} = D \nabla^2 C \quad (19)$$

که در این معادله، C غلظت و D ضریب نفوذ است. اما معمولاً در سیالات نفوذ به همراه جابجایی اتفاق می‌افتد. معادله توام نفوذ و جابجایی به‌صورت زیر است^[16]:

$$\frac{DC}{Dt} = D \nabla^2 C - \nabla \cdot (vC) \quad (20)$$

معادله نفوذ و جابجایی را می‌توان به فرم روش هیدرودینامیک ذرات هموار نوشت، در نتیجه معادله (۲۰) به فرم روش SPH به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{DC_i}{Dt} = \sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} \frac{4D_i D_j}{D_i + D_j} (\rho_i + \rho_j) \frac{r_{ij} W_{ij}}{r_{ij}^2 + \eta^2} C_{ij} - \sum_j m_j \frac{c_i}{\rho_i} v_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (21)$$

مقدار η^2 برای جلوگیری از صفرشدن مخرج کسر است و هنگامی که دو ذره خیلی به هم نزدیک باشند، به‌کار می‌رود.

۶- محاسبه فشار

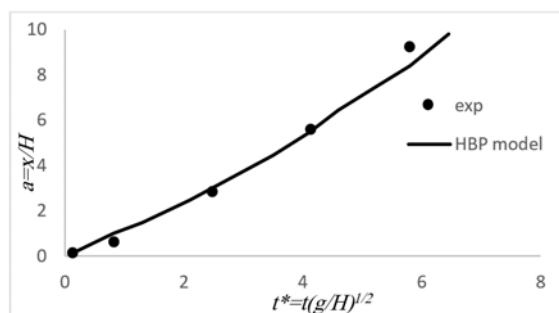
در این مطالعه از روش دینامیک ذرات هموار با تراکم‌پذیری کم استفاده شده است که در آن مقادیر فشار به وسیله معادله حالت و براساس تابعی از چگالی و به‌صورت صریح با استفاده از رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$P_i = B \left(\left(\frac{\rho_i}{\rho_o} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (22)$$

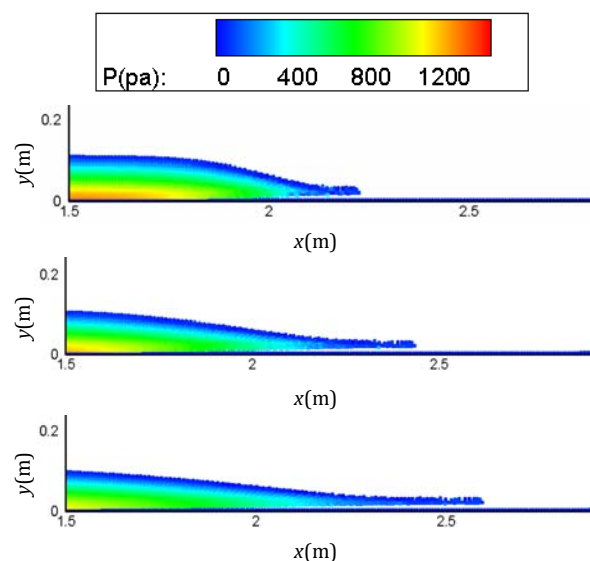
در رابطه (۲۲)، P_i مقدار فشار ذره i و γ ثابتی است که برابر ۷ در نظر گرفته می‌شود و ρ_o چگالی مرجع و ρ_i چگالی ذره i است. برای تعیین B ، مشتق رابطه فوق برحسب چگالی (مربع سرعت صوت) همانند رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود^[6].

همان طور که قبلاً اشاره شد، برای مدل‌سازی از میانگین‌گیری هارمونیک بین لزجت ذرات رسوبی استفاده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی تطابق مناسبی را با یکدیگر دارند.

در نمودار ۲ مقادیر فشار ذرات در زمان‌های مختلف ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ ثانیه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود فشار زیاد ذرات در پای توده موجب حرکت ذرات می‌گردد و پس از آن با افزایش سرعت ذرات به حرکت خود ادامه می‌دهند تا جایی که تنش‌های وارده از سیال بزرگتر از تنش تسلیم باشند. به محض این‌که این تنش‌ها کوچک‌تر از تنش آستانه شوند جریان از حرکت باز می‌ایستد.



نمودار (۱) مقایسه میان پیشانی موج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی برای شکست سد رسوبات چسبنده



نمودار (۲) مقادیر فشار برای زمان‌های ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ ثانیه (از بالا به پایین)

۲-۸- مدل‌سازی حرکت جریان چگال گل‌آلود (رسوبات چسبنده) در آب زلال

در این مقاله برای مدل‌سازی دوفازی حرکت رسوبات در داخل آب از داده‌های آزمایشگاهی چاودوری و تستیک [25] استفاده شده است که در آن سیال غیرنیوتنی مخلوط آب با رس (رسوبات چسبنده) با برداشته شدن سریع دریاچه مقابل آن به علت آنکه مخلوط رسوبات دارای چگالی بیشتری نسبت به آب هستند در کف فوم تحت اثر

f_i که به نیروهای داخلی و خارجی وارد بر ذره i بر واحد جرم اشاره دارد و h طول هموار است که در این مطالعه، $1/3$ برابر فاصله اولیه ذرات قرار داده شده است. ترکیب شرایط ویسکوز و CFL روابط زیر را می‌دهد [6].

$$\delta t_{cv} = \min\left(\frac{h}{c_s + \mu_a}\right) \quad (28)$$

که در آن μ_a به صورت زیر به دست می‌آید [6].

$$\mu_a = \max\left(\frac{h V_{ab} r_{ab}}{r_{ab}^2}\right) \quad (29)$$

گام زمانی نهایی به صورت زیر نوشته می‌شود [6].

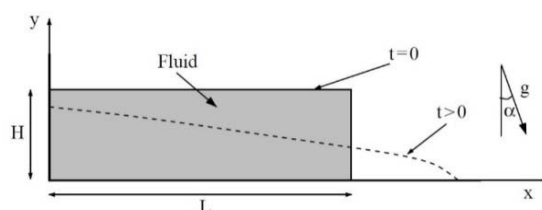
$$\delta t = c_r \min(\delta t_{forces}, \delta t_{cv}) \quad (30)$$

که c_r عدد کورانت است.

۸- نتایج و بحث

۸-۱- مدل‌سازی حرکت ذرات دانه‌ای

در این مقاله برای صحت‌سنجی مدل ویسکوپلاستیک از داده‌های آزمایشگاهی کوماتینا و جونویج [24] استفاده شده است که در آن شکست سد سیال غیرنیوتنی مخلوط آب با رس (رسوبات چسبنده) همانند شکل ۱ رخ می‌دهد. پارامترهای مدل رئولوژیکی استفاده شده در این شبیه‌سازی عبارتند از: $\mu_0 = 0.071 \text{ Pa.s}$ ، $\tau_y = 23.5 \text{ Pa}$ ، $n = 1$ و $m = 100$ [24].

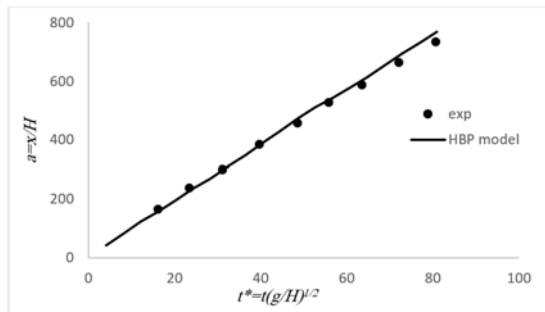


شکل (۱) طرحی شماتیکی از موقعیت اولیه و نهایی سیال در مدل آزمایشگاهی شکست سد رسوبات چسبنده

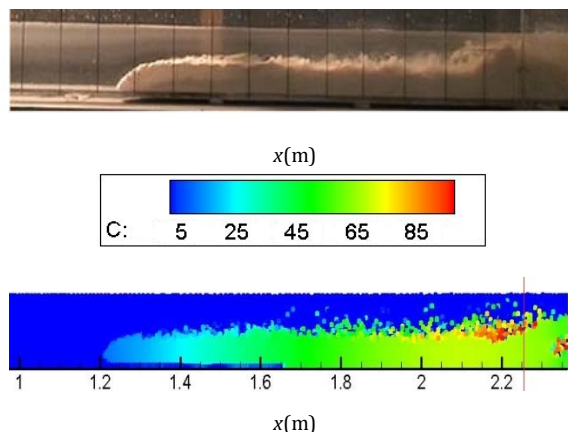
در این آزمایش درصد حجمی رسوبات نسبت به آب برابر با $27/4\%$ است که موجب چگالی بالک برابر با 1452 kg/m^3 و مگسب گشته است. چگالی خشک خاک ریزدانه برابر با 2650 kg/m^3 مگسب است. در این مدل فیزیکی مقدار ارتفاع اولیه رسوبی H برابر با $1/8$ متر و عرض اولیه L برابر با 2 متر است. همچنین در این آزمایش شیب بستر برابر با $1/10\%$ لحاظ شده است. برای بررسی آزمایشگاهی روند شکست و ریزش توده رسوبات چسبنده از پارامترهای $a = x/H$ و $t^* = t\sqrt{g/H}$ استفاده شده است که به ترتیب پیشانی حرکت توده رسوبی بی‌بعد و زمان بی‌بعد هستند. در این دو پارامتر x پیشانی حرکت توده، t زمان و g شتاب ثقل هستند. فاصله ذرات در مدل عددی در دو جهت عمود بر هم X و Z برابر با $8/100$ متر قرار داده شده است که منتج به 6921 ذره شده است. همچنین مدت زمان اجرا برای مدل‌سازی یک ثانیه پدیده برابر با 175 ثانیه توسط رایانه مورد استفاده با مشخصات Windows 10/CPU Intel core i7 6800K/RAM 16GB است.

در نمودار ۱ مقادیر پیشانی بی‌بعد در مقابل زمان بی‌بعد برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی حاضر نشان داده شده است.

رسوبی ۱۰۵ سانتی‌متر مشخص می‌شود [25]، در مدل عددی نیز محل اولیه مرز میان دوفاز به کمک خط قرمز رنگی مشخص شده است که پس از آن توده رسوبی مدل تقریباً ۱ متر و ۵ سانتی‌متر به جلو حرکت کرده است که تطابق مناسب میان مدل آزمایشگاهی و مدل عددی را نشان می‌دهد.



نمودار (۳) مقایسه میان پیشانی موج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی برای مدل دوفازی



نمودار (۴) مقادیر غلظت برای زمان ۹ ثانیه برای مدل آزمایشگاهی (بالا) و مدل عددی (پایین)

لازم به ذکر است که مقادیر نشان داده شده در کانتور رنگی براساس درصد غلظت اولیه (۷۵ گرم بر لیتر) است، برای مثال صفر درصد بیانگر آب خالص است. از ویژگی‌های مدل‌سازی انجام شده در تحقیق حاضر تعیین غلظت ذرات در آب است چرا که به دست آوردن این مقادیر در کارهای آزمایشگاهی بسیار زمان‌بر است و نیاز به صرف هزینه بالا برای تهیه تجهیزات دارد در حالی که در مدل‌های عددی می‌توان برای تعیین این مقادیر به صورت قابل ملاحظه‌ای در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرد.

نمودارهای ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر غلظت و سرعت را برای زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. با حرکت توده به سمت جلو از میزان غلظت ذرات نسبت به ذرات قبل از آن کاسته می‌شود و توده تنها در اثر اختلاف چگالی خود نسبت به آب به سمت جلو حرکت کرده و در آن پخش می‌شود. همچنین ذرات رسوبی که در پیشانی توده و در تعامل با آب خالص هستند شکل پیشانی انحنا داری به خود

وزن خود شروع به حرکت می‌کنند و وارد آب زلال شده و در آن پخش می‌شوند. مقادیر اولیه مدل عددی در شکل ۲ نشان داده شده است. در مدل آزمایشگاهی قبل از قرارگیری رسوبات چسبنده در مخزن خود، مخلوط به طور مداوم با دستگاه همزده می‌شود تا به صورت همگن باقی بماند و ذرات خاک در آب به صورت یکنواخت توزیع گردند. پارامترهای مدل رئولوژیکی استفاده شده در این شبیه‌سازی عبارت است از: $\mu_o = 0.034 \text{ Pa.s}$, $\tau_y = 0 \text{ Pa}$ و $n = 0.52$ [25]. در این مدل‌سازی چگالی و لزجت آب به ترتیب برابر با $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\mu_w = 0.001 \text{ Pa.s}$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۲) طرحی شماتیکی از موقعیت اولیه مدل آزمایشگاهی جریان چگال

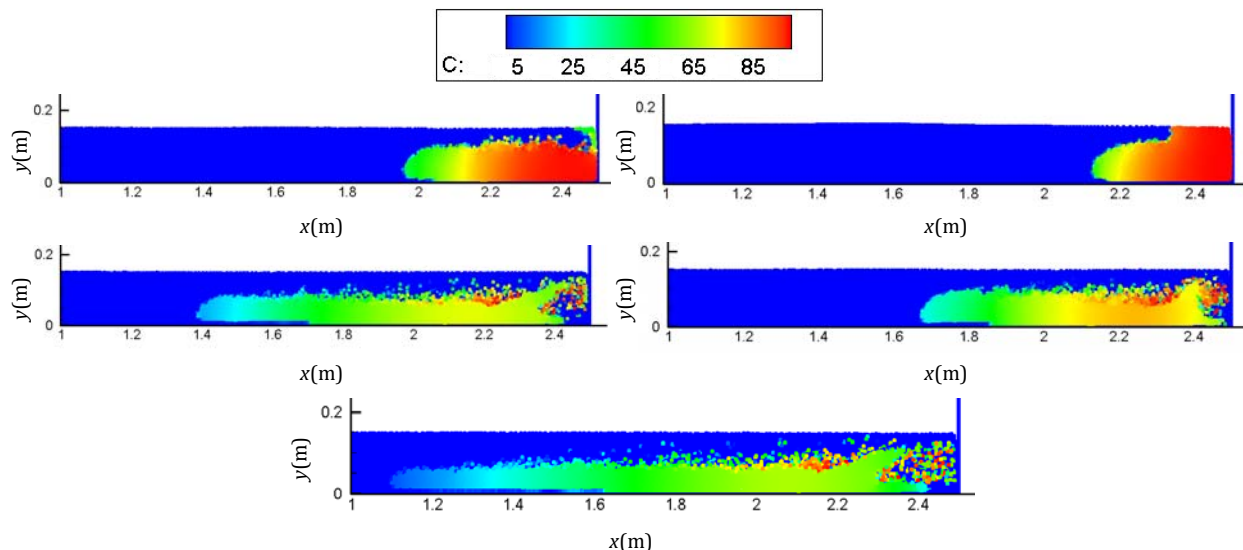
در این آزمایش درصد حجمی رسوبات نسبت به آب برابر با ۲/۸٪ است که موجب چگالی بالک برابر با ۱۰۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب گشته است. چگالی خشک خاک ریزدانه برابر با ۲۶۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. در مدل فیزیکی همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقدار ارتفاع اولیه توده رسوبی H برابر با ۱۵/۰ متر و عرض اولیه L برابر با ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. مقدار x_0 یا همان عرض مخزن رسوبات برابر با ۲۴/۵ سانتی‌متر است و x پیشانی حرکت رسوبات از دریچه (حداصل اولیه دوفاز) است. برای بررسی آزمایشگاهی روند شکست و ریزش توده رسوبات چسبنده از پارامترهای $a = x/H$ و $t^* = t\sqrt{g/H}$ استفاده شده است که به ترتیب پیشانی حرکت توده رسوبی بی‌بعد و زمان بی‌بعد هستند. فاصله ذرات در مدل عددی در دو جهت عمود بر هم X و Z برابر با ۰۰۷ متر قرار داده شده است که منتج به ۱۵۴۷۵ ذره شده است. مدت زمان اجرا برای مدل‌سازی ده ثانیه از پدیده برابر با ۸۱۴۵ ثانیه گشته است.

در نمودار ۳ مقادیر پیشانی بی‌بعد در مقابل زمان بی‌بعد برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی حاضر نشان داده شده است. همان طور که در این شکل قابل مشاهده است، مدل عددی توانسته است به نحو مناسبی حرکت توده رسوبی در داخل آب را مدل‌سازی نماید و نتایج قابل قبولی را ارائه نماید.

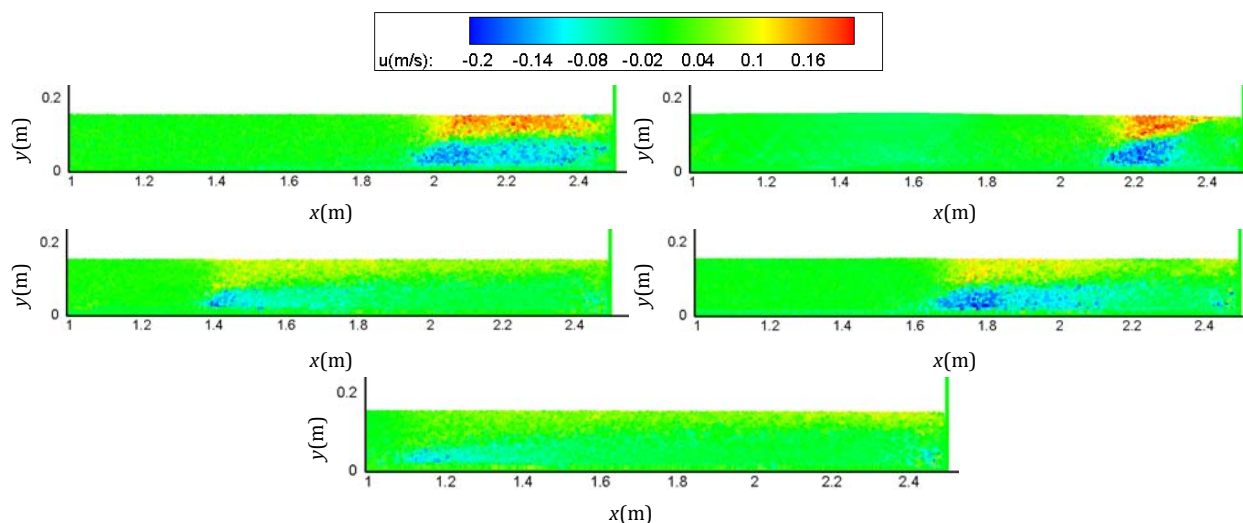
در نمودار ۴ مقایسه‌ای شماتیکی میان حرکت توده رسوبی در زمان ۹ ثانیه میان تصویر آزمایشگاهی و خروجی مدل عددی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود نحوه پخش ذرات و پیشروی آنها در آب زلال به صورت مطلوبی مدل‌سازی شده است. در تصویر مدل آزمایشگاهی، پس از دریچه خطوطی با فواصل ۱۰ سانتی‌متری مشخص شده‌اند که بر این اساس حرکت پیشانی توده

می‌گیرند و در ضمن این ذرات به علت اندرکنشی که با آب دارند سرعت خود را به آب منتقل کرده و ذرات آب را نیز دارای حرکت می‌کنند. نکته قابل توجه دیگری که در حرکت جریان‌های چگال در محیط آبی رخ می‌دهد آن است که به علت عدم حرکت آب، سطح رسوبات در تماس با آب (ناحیه حدفاصل) به سمت عقب رانده

می‌شوند که این پدیده به صورت کامل در مدل حاضر اتفاق افتاده است. در ضمن، همان طور که در نمودار ۶ مشخص است با گذشت زمان از سرعت توده رسوبی کاسته می‌شود تا در نهایت رسوبات از حرکت باز می‌ایستند.



نمودار (۵) مقادیر غلظت برحسب درصد برای زمان‌های ۱، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ ثانیه (از بالا به پایین)



نمودار (۶) مقادیر سرعت در راستای x برای زمان‌های ۱، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ ثانیه (از بالا به پایین)

هرشل بالکی پاپاناستاسیو مدل‌سازی گشته و معادله نفوذ و جابجایی برای تعیین میزان غلظت رسوبات در آب در مدل دوفازی حل شد. برای بررسی عملکرد مدل غیرنیوتنی از مدل آزمایشگاهی حرکت مخلوط آب با خاک ریزدانه (رسوب چسبنده) به صورت تک‌فازی بهره گرفته شد. سپس برای بررسی مدل دوفازی از مدل آزمایشگاهی جریان چگال استفاده شد که برای بررسی میزان پخش رسوبات در آب و تعیین غلظت رسوبات، معادله نفوذ و جابجایی در کد توسعه داده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی برای هر دو حالت تک‌فاز و دوفاز بیانگر عملکرد مناسب کد توسعه داده شده است. در

۹- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اندرکنش میان دو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار صورت گرفت. رسوبات چسبنده که نوعی از جریان‌های چگال محسوب می‌شوند تحت اثر وزن خود که نسبت به وزن آب بیشتر است در محیط آبی شروع به حرکت می‌کنند. رفتار رسوبات چسبنده به صورت مدل‌های غیرنیوتنی توصیف می‌شوند. در تحقیق حاضر برای بررسی حرکت رسوبات چسبنده در محیط آبی از توسعه کد اسفیزیکس دوبعدی استفاده شد. بدین صورت که رسوبات به کمک مدل غیرنیوتنی تک رابطه‌ای

- 3- Middleton GV. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1993;21(1):89-114.
- 4- Lucy LB. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astronomical Journal. 1977;82:1013-1024.
- 5- Monaghan JJ. Simulating free surface flows with SPH. Journal of Computational Physics. 1994;110(2):399-406.
- 6- Hosseini K, Omidvar P, Kheirkhahan M, Farzin S. Smoothed particle hydrodynamics for the interaction of Newtonian and non-Newtonian fluids using the $\mu(I)$ model. Powder Technology. 2019;351:325-337.
- 7- Fu L, Jin YC. Investigation of non-deformable and deformable landslides using meshfree method. Ocean Engineering. 2015;109:192-206.
- 8- Fu L, Jin YC. Improved multiphase Lagrangian method for simulating sediment transport in dam-break flows. Journal of Hydraulic Engineering. 2016;142(6):04016005.
- 9- Fourtakas G, Rogers BD. Modelling multi-phase liquid-sediment scour and resuspension induced by rapid flows using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) accelerated with a Graphics Processing Unit (GPU). Advances in Water Resources. 2016;92:186-199.
- 10- Khanpour M, Zarrati AR, Kolahdoozan M, Shakibaeinia A, Amirshahi SM. Mesh-free SPH modeling of sediment scouring and flushing. Computers & Fluids. 2016;129:67-78.
- 11- Farzin S, Hassanzadeh Y, Aalami MT, Fatehi R. Development of two incompressible SPH methods to simulate sediment-laden free surface flows. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(12):91-103. [Persian]
- 12- Kheirkhahan M, Hosseini K. Comparison of the $\mu(I)$ and HBP models for simulating granular media. International Journal of Modern Physics C. 2018;29(07):1850050.
- 13- Kheirkhahan M, Hosseini K. Modeling granular flow using $\mu(i)$ rheological model in SPH method. Journal of Hydraulics. 2018;12(4):43-55. [Persian]
- 14- Omidvar P, Nikeghbali P. Simulation of violent water flows over a movable bed using smoothed particle hydrodynamics. Journal of Marine Science and Technology. 2017;22(2):270-287.
- 15- Nikeghbali P, Omidvar P. Application of the sph method to breaking and undular tidal bores on a movable bed. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2017;144(2):04017040.
- 16- Rostami Hosseinkhani M, Omidvar P, Allahyaribeik S, Torabi Azad M. Simulation of waves on boom and oil plume rising using smoothed particle hydrodynamics. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2020;13(1):39-54.
- 17- Gomez-Gesteira M, Rogers BD, Crespo AJ, Dalrymple RA, Narayanaswamy M, Dominguez JM. SPHysics—development of a free-surface fluid solver—part 1: Theory and formulations. Computers & Geosciences. 2012;48:289-299.
- 18- Grenier N, Antuono M, Colagrossi A, Le Touzé D, Alessandrini B. An Hamiltonian interface SPH formulation for multi-fluid and free surface flows. Journal of Computational Physics. 2009;228(22):8380-8393.
- 19- Morris JP, Fox PJ, Zhu Y. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH. Journal of Computational Physics. 1997;136(1):214-226.
- 20- Monaghan JJ, Kos A. Solitary waves on a Cretan beach. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1999;125(3):145-155.

نهایت می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که روش لاگرانژی SPH توسعه داده شده در این مقاله قابلیت بالایی در مدل‌سازی جریان‌های چگال دارد و می‌تواند برای بررسی مسایل مشابه در هیدرولیک رسوب و جریان‌های دوفازی همراه با پدیده پخش‌شدگی مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: مهران خیرخواهان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه / روش‌شناس / پژوهشگر اصلی / تحلیلگر آماری / نگارنده بحث (۴۰٪)؛ خسرو حسینی (نویسنده دوم)، روش‌شناس / پژوهشگر کمکی / تحلیلگر آماری (۳۰٪)؛ پوریا امیدوار (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

۱۰- فهرست علائم

ρ	چگالی
u	سرعت
t	زمان
P	فشار
F	نیرو
W_{ij}	تابع کرنل
h	طول هموار
m	جرم ذره-ضریب در معادله رئولوژی
B	ثابت معادله حالت
γ	ثابت معادله حالت
ρ_o	چگالی مرجع
τ	تنش برشی
ρ_d	فاز با چگالی بیشتر
ρ_l	فاز با چگالی کمتر
$\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$	تنسور کرنش
$ \dot{\gamma} $	اندازه تنسور کرنش
η	ضریب تنسور کرنش
R_{ij}	عامل تعادل
τ_y	تنش تسلیم
n	ضریب در معادله رئولوژی
C	غلظت
D	ضریب پخشی
μ	لزجت
r	فاصله مکان ذرات از مبدا
c_s	سرعت صوت
H	ارتفاع اولیه ذرات
L	عرض اولیه ذرات

منابع

- 1- Huppert HE. Gravity currents: A personal perspective. Journal of Fluid Mechanics. 2006;554:299-322.
- 2- Meiburg E, Kneller B. Turbidity currents and their deposits. Annual Review of Fluid Mechanics. 2010;42(1):135-156.

1855;170(1):59-86.

24- Komatina D, Jovanovic M. Experimental study of steady and unsteady free surface flows with water-clay mixtures. *Journal of Hydraulic Research*. 1997;35(5):579-590.

25- Chowdhury MR, Testik FY. Laboratory testing of mathematical models for high-concentration fluid mud turbidity currents. *Ocean Engineering*. 2011;38(1):256-270.

21- Rogers BD, Dalrymple RA, Stansby PK. SPH modeling of floating bodies in the surf zone. Conference: Coastal Engineering 2008 - 31st International Conference. World Scientific Publishing: Singapore; 2009. pp. 204-215

22- Zhu H, Kim YD, De Kee D. Non-Newtonian fluids with a yield stress. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2005;129(3):177-181.

23- Fick A. Ueber diffusion. *Annalen der Physik*.