شبیه سازی آبشستگی پشت دیوارههای ساحلی به روش لاگرانژی با استفاده از مدل رئولوژی ($\mu(\mathbf{I})$

احسان جعفری ندوشن'، عطا اله شیرزادی^{**}

۱– استادیار گروه مهندسی عمران، پردیس بیجار، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. ۲– استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

چکیدہ

حرکت سریع و پیجیده رسوبات در محیطهای رودخانهای و ساحلی با جریان بسیار فرسایشی و گذرا مشکلات زیادی را برای مهندسان رودخانه در موضوع ژئومورفولوژی رودخانههای آبرفتی ایجاد میکند. پیش بینی دقیق این پیچیدگیها در سیستم آب-رسوب (یک سیستم جریان دانهای متراکم چند فازی) هنوز یک چالش عمده برای مدلهای مبتنی بر شبکه است. با توجه به توانایی روش های لاگرانژی بدون شبکه در مدلسازی تغییر شکلهای بزرگ و ناپیوستگیها، روشهای لاگرانژی بدون شبکه می توانند یک فرصت منحصر به فرد برای مقابله با چنین پیچیدگی فراهم کنند. تحقیق حاضر قابلیتهای مدل نيمه ضمني ذرات متحرك با تراكم ضعيف semi-implicit moving particle-weak compactness (WC-MPS) در مدلسازی برهمکنش خاک-سیال را توسعه میدهد تا امکان مدلسازی انتقال رسوب و اثرات آبشستگی را در پشت دیوارههای ساحلی فراهم کند. در این روش مواد دانهای به صورت یک سیال غیر نیوتنی و ویسکو پلاستیک در نظر گرفته شده است. برای پیش بینی رفتار غیر نیوتنی فاز دانهای، از مدل رئولوژیکی (l) µ استفاده گردیده است. به منظور تأیید کاربرد مدل حاضر در شبیهسازی برهمکنش فازهای مایع و جامد، ابتدا مسئله پرکاربرد شکست سد بر روی بستر فرسایش پذیر مدلسازی گردید. متوسط خطای مدل مورد نظر تقریبا ۶ درصد محاسبه شد که نشاندهنده کارایی و دقت مدل مورد نظر در این مسئله می باشد. در انتها، آب شستگی دیواره های ساحلی شبیه سازی گردید. بررسی ها نشان داد که فرآیندهای مرتبط با فرسایش و آبشستگی به خوبی توسط روش لاگرانژی حاضر قابل مدلسازی بوده و نتایج عددی با اندازه گیری های آزمایشگاهی مطابقت بسیار خوبی (با متوسط خطای مدل برابر با ۱۰ درصد) را نشان داد.

واژگان کلیدی: عمق آبشستگی، روش لاگرانژی، جریان دانهای چند فازی غیر نیوتنی، انتقال رسوب، مهندسی رودخانه

مقدمه

امواج بزرگ و سیلابها میتوانند سازههای مهندسی حفاظت و کنارههای رودخانه از جمله سدها و دایکها را فراگرفته و با شکست آنها منجر به سیلهای ناگهانی شوند (۲ و۳). پیشبینی عمق آبشستگی به منظور جلوگیری از تخریب بستر رودخانه و حفظ پایداری سازههای کنترل جریان امری ضروری است. سازههای حفاظت سواحل (شمعها، موجشکنها و دیوارههای ساحلی) معمولاً در معرض اثر ترکیبی جریانها و امواج قرار میگیرند و در نتیجه فرآیندهای آبشستگی پیچیدهتری نسبت به سازههای مهندسی رودخانهها ایجاد میکنند و پایداری آنها را تهدید میکنند. جریانهای مداوم موج سونامی شدید ممکن است باعث فرسایش طولانی مدت در قسمت یشتی سازههای حفاظتی ساحلی گردد که اعتقاد بر این است یکی از دلایل اصلی آسیب این نوع سازهها میباشد (۲۰، ۲۶ و ۲۸). برای تخمین کمّی عمق نهایی حفره آبشستگی در پشت دیواره دریا به دلیل سرریز مداوم سونامی، ممکن است روابط تجربی بر اساس دادههای آزمایشات فلوم ایجاد شود (۱). هاشمی و همکاران اثر زاویه انحراف گروه پایه نسبت به جهات جریان بر بیشینه عمق آبشستگی و توسعه زمانی آن پیرامون پایه های پل را به روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. و دریافتند که بیشینه عمق آبشستگی گروه پایه در زاویـه انحراف ۳۰ درجه به وقوع می پیوندد(۱۰). یئو و همکاران (۳۰) حتی فرمولی برای پیشبینی تغییرات زمانی عمق آبشستگی در پاییندست سرریزها پیشنهاد کردند. با این حال، برای آشکار کردن مکانیسم فرآیند فرسایش زمانی، مدل ریاضی ممکن است مؤثرتر باشد. بنابراین درک پدیده آبشستگی و اثرات آن بر محیط طبیعی و ساخته شده مستلزم ایجاد ابزارهای شبیهسازی عددی کافی است که قبل از استفاده برای پیش بینی مورد آزمایش و اعتبارسنجی قرار گرفته باشند. در این زمینه به طور سنتی مدلسازی عددی آب شستگی و انتقال رسوب با استفاده از روابط تجربی و یا نیمه تجربی صورت می گرفته است (۱۹). اثبات شده است که مدل های دو فازی، که در آن فاز رسوبی به صورت یک فاز جداگانه رفتار میکند، برای مدلسازی عددی انتقال رسوب موثر می باشند. روش های عددی یا مبتنی بر شبکه (اویلری) می باشند (مانند؛ مدل Finite Element Method (FEM) یا Finite Volume (Method (FVM) که سیال و رسوب را به صورت پیوسته توصیف (۱۸)، یا لاگرانژی هستند (مانند؛ روش المان گسسته، (Discrete Element Method (DEM) که مواد را به صورت گسسته در نظر می گیرند. روش های مبتنی بر شبکه به رغم موفقیتهای مختلف، در جریانهای سطح آزاد با هندسه پیچیده، و تغییر شکلهای بزرگ بعضاً با مشکلاتی روبرو هستند. همچنین برخی روشهای اویلری، در شبیهسازی جریان، با پخش یا نوسانات غیر فیزیکی ناشی از جمله جابجایی در معادلات ناویر -استوکس همراه میباشند. برای حل چالشهای فوق، روشهای بدون شبکه در مدلسازی و حل مسائل شامل سطح آزاد و جریانهای تکفاز و چندفازی توسعه پیدا کردهاند. هیدرودینامیک ذرات هموار (Smoothed Particle (SPH) Hydrodynamicsو روش نیمه ضمنی ذرات متحرک (MPS) Moving Particle Semi-implicit دو نوع از معروفترین این روش ها میباشند (۹ و ۱۷). روش MPS کاملاً لاگرانژی بوده که به سیال به دید مجموعهای از ذرات مینگرد. مدلهای برهمکنش ذرات برای عملگرهای دیفرانسیلی همچون گرادیان، دیورژانس و لاپلاسین تعریف شده و معادلات حاکم به معادلات برهمکنش ذرات متحرک تبدیل می گردند. شکیبایینیا و جین (۲۳) یک نسخه ضعیف تراکمپذیر از روش -WC MPS را برای بهبود کارایی و همچنین نوسانات عددی مرتبط با MPS اصلی پیشنهاد کردند. شکیبایینیا و جین (۲۴) یک روش MPS چند فازی را برای سیستمهای چند ویسکوزیته چند دانسیته پیشنهاد کردند. آنها با ترکیب مدل MPS چند فازی

خود با روابط رئولوژیکی مختلف، کاربرد مدل خود را به جریانهای چند فازی جامد-مایع گسترش دادند. جعفری ندوشن و همكاران (۱۵) يک روش لاگرانژي بدون شبکه مبتني بر فرمولاسيون نيمهضمني ذرات متحرک ضعيف تراکميذير توسعه دادند و آن را برای شبیهسازی جریان بر روی سرریزها بکار بردند. جعفری ندوشن و همکاران (۱۲) و تاجنسایی و همکاران (۲۷) یک مدل WC-MPS چند فازی را برای جریانهای رسوب محور توسعه دادند و به طور کامل رفتار رسوب را توصیف کردند. جعفری ندوشن و شکیبایی نیا (۱۴) از مدل چند فازی بدون شبکه برای مدلسازی آب شستگی موضعی با رئولوژی (µ(I) استفاده کردند. وانگ و همکاران (۲۹) آبشستگی پشت دیوار ساحل به دلیل سرریز آب ناشی از سونامی در چارچوب روش (ISPH) Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics را شبیه سازی کردند. گالانو و همکاران (۸) روش المان محدود ذرات (Particle Finite Element Method (PFEM را جهت مدلسازی انتقال رسوب و اثرات آبشستگی توسعه دادند. همچنین جعفری ندوشن (۱۱) به مدلسازی جریان دانهای در سیلو به روش نیمهضمنی ذرات متحرک با تراکم ضعیف (WCMPS) با مدل رئولوژیکی هرشل بالکی نمایی پرداخت و نشان داد که این مدل به خوبی می تواند حرکت جریان دانه داخل سیلو را شبیهسازی کند. در حالی که مدلهای کلی ویسکو-پلاستیک مانند بینگهام-پلاستیک و هرشل-بولکلی دو مدل يركاربرد در مطالعات گذشته بودهاند، توجه جديدتر به مدل رئولوژيک µ(I) معطوف شده است. جوپ و همكاران (۱۶). در این مدل، خواص رئولوژیکی به طور واضح با خواص فیزیکی مواد دانهای (به عنوان مثال، اندازه و چگالی دانه) مرتبط است و رژیمهای جریان دانهای (رژیمهای شبه استانیک، اینرسی و ویسکوز) در نظر گرفته میشوند. علاوه بر این، تاجنسایی و همکاران (۲۷) نشان داد که مدل µ(I) نتایج کمی دقیق تر از مدل هرشل-بالکلی تولید میکند. اخیراً جعفری و همکاران (۱۳) یک مدل عددی مبتنی بر ذرات را بر اساس روش MPS با تراکم ضعیف (WC-MPS) برای شبیهسازی زمین لغزشهای نیمه غوطهور دو بعدی و سه بعدی با استفاده از رئولوژی μ(I) توسعه دادند. با توجه به اهمیت آبشستگی دیوارههای ساحلی و همچنین کارآیی مدل رئولوژی (µ(I) در شبیهسازی و رفتار مواد دانهای و رسوب در این تحقیق به بررسی آبشستگی دیوارههای ساحلی به روش WC-MPS با استفاده از مدل رئولوژی (I)µ پرداخته شده است.

مواد و روشها

معادلات حاكم

معادلات حاکم برای یک سیستم جریان چند فازی در یک قاب لاگرانژی شامل بقای جرم و تکانه و حرکت در مختصات لاگرانژی به شرح زیر است:

(1)

 $\begin{cases} \frac{\mathbf{D}\rho}{\mathbf{D}t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0\\ \frac{\mathbf{D}\mathbf{u}}{\mathbf{D}t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{g}\\ \frac{\mathbf{D}\mathbf{r}}{\mathbf{D}t} = \mathbf{u} \end{cases}$

که در آن t زمان، (r = r(x,y بردار موقعیت، (u=u(u,v بردار سرعت، p چگالی، g شتاب جاذبه، p فشار و **t** تنش برشی است. تانسور تنش به صورت زیر تعریف می گردد.

$\boldsymbol{\tau} = 2\eta \mathbf{E} + \boldsymbol{\xi} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}$

که در آن I تانسور واحد، η ویسکوزیته موثر مواد (که توسط مدل رئولوژیکی ارائه شده است)، کځ دومین ضریب ویسکوزیته، و Ε نرخ تانسور کرنش است. در اینجا در این مطالعه جریان با تراکمپذیری ضعیف در نظر گرفته می شود و یک معادله حالت، فشار را با استفاده از میدان چگالی (p=f(ρ) پیشبینی میکند.

رئولوژی رسوب

(٢)

برای محاسبه تانسور تنش، باید ویسکوزیته موثر **π** را محاسبه کرد. در حالی که ویسکوزیته مؤثر فاز آب به صورت ثابت (مستقل از زمان و تنش) است، فاز رسوب از طریق مدل رئولوژیکی تعیین می شود. در میان مدل ها و نظریه های رئولوژیکی توسعه یافته برای جریان های دانه ای و رسوبی، یک مدل اصطکاکی مبتنی بر قانون (I) اخیراً توجه گسترده ای را به خود جلب کرده است. مدل رئولوژیکی (I) از تجزیه و تحلیل تعداد زیادی از داده های آزمایشگاهی و عددی مشتق شده است، که یک چارچوب کلی برای توصیف طیف گسترده ای از رفتار مواد دانه ای ارائه می دهد. مدل (I) یک مدل ویسکوپلاستیک است که در آن ماده برای تنش های کمتر از تنش تسلیم، τν مانند جسم صلب رفتار می کند و برای تنش های بزرگتر از ۲۰ به عنوان سیال چسبناک

$$\eta = \begin{cases} \frac{\mu(I)p_s}{2\|\mathbf{E}\|} & \text{if } \|\mathbf{\tau}\| > \tau_y \\ \infty & \text{if } \|\mathbf{\tau}\| < \tau_y \end{cases}$$
(7)

که در آن (I) ضریب اصطکاک وابسته به اینرسی است و P_s فشار مکانیکی (تنش نرمال) بین دانههای رسوب است. در اینجا تنش تسلیم، ע*T* از معیار تسلیم دراکر-پراگر محاسبه میشود (۳)، که برای مواد بدون چسبندگی به صورت $\tau_y = \mu_I Ps$ محاسبه میشود به طوری که *I* از نشان دهنده اولین ضریب اصطکاک است. ضریب اصطکاک (*I*) به عددی بدون بعد I بستگی دارد که میشود به طوری که *I* نشان دهنده اولین ضریب اصطکاک است. ضریب اصطکاک (*I*) به عددی بدون بعد I بستگی دارد که میشود به طوری که این نشان دهنده اولین ضریب اصطکاک است. ضریب اصطکاک (*I*) به عددی بدون بعد I بستگی دارد که عدد اینرسی نامیده میشود، که به عنوان نسبت بین مقیاسهای زمانی میکروسکوپی و ماکروسکوپی تعریف میشود و به رژیمهای جریان دانه ای بستگی دارد. ضریب اصطکاک توسط جوپ و همکاران (۱۶) به صورت زیر نشان داده شده است. (۴)

به طوری که µ2 ضریب اصطکاک دوم، µ1 و µ2 نشان دهنده حد بالا و پایین Io ، µ(I) یک عدد اینرسی مرجع است (ضریب ثابتی است که معمولاً از طریق آزمایش تعیین میشود). برای یک جریان دانهای غوطهور با سیال محیطی با ویسکوزیته کم عدد اینرسی توسط فورتر و پولیکون (۶) به صورت زیر داده شده است:

(۵)

$$I = \frac{\|\mathbf{E}\|d_s}{\sqrt{p_s / (\rho_f c_d)}}$$
So the construction of the form o

$$\eta = \frac{\mu_1 p_s}{2 \|\mathbf{E}\|} + \frac{(\mu_2 - \mu_1) d_s \sqrt{\rho_f c_d}}{I_0 + \|\mathbf{E}\| d_s / \sqrt{p_s / (\rho_f c_d)}} \frac{\sqrt{p_s}}{2}$$
(7)

این معادله بسیار شبیه به روابط رئولوژیکی ویسکو-پلاستیک تعمیم یافته مانند هرشل-بالکلی و بینگهام است (به شکیبایی نیا و جین (۲۳) و تاج نسایی و همکاران، (۲۷) مراجعه کنید). با این وجود، رئولوژی پس از شکست را به یک اصطلاح قابل تأیید مرتبط میکند، که نه تنها به عملکرد صریح خواص مواد، بلکه به فشار و نرخ کرنش نیز مربوط می شود. معادله (۶) مفرد است و زمانی که نرخ کرنش به صفر می رسد (E→O) متوقف می شود، بنابراین نمی توان آن را مستقیماً در مدل عددی استفاده کرد. برای جلوگیری از این موضوع، باید از یک فرم پیوسته منظم استفاده شود که در این مطالعه از یک منظم سازی نمایی پرکاربرد

$$\eta = \frac{\mu_1 p_s \left(1 - \exp\left(-m \|\mathbf{E}\|\right)\right)}{2 \|\mathbf{E}\|} + \frac{(\mu_2 - \mu_1) d_s \sqrt{\rho_f c_d}}{I_0 + \|\mathbf{E}\| d_s / \sqrt{p_s / (\rho_f c_d)}} \frac{\sqrt{p_s}}{2}$$

که در آن m یک توان است که رشد ویسکوزیته را کنترل میکند. این معادله برای تنشهای کوچکتر و بزرگتر از تنش تسلیم معتبر است و پیوسته است زیرا برای E→0 ویسکوزیته مؤثر به مقدار حداکثر $(m\mu_1 p_s + (\mu_2 - \mu_1)d_s\sqrt{
ho_f c_d p_s}/I_0)$ میرود.

روش عددی

(λ)

(Y)

روش عددی بدون مش این مطالعه بر اساس فرمول ذرات متحرک نیمهضمنی (MPS) است. در MPS، حوزه محاسباتی با مجموعهای از گرههای محاسباتی آزاد به حرکت، که ذرات نامیده می شوند، نمایش داده می شود و گسسته می شود (شکل ۱). متغیر میدان به هر ذره اختصاص داده می شود. درونیابی مقادیر و ادغام مشتقات فضایی بر روی هر ذره از طریق یک فرآیند میانگین وزنی بین ذره هدف و همسایهاش، در شعاع نفوذ، انجام می شود. تابع وزن (تابع هسته)، (W(rij,re، اثر یک ذره همسایه j با بردار موقعیت j را بر روی ذره هدف i با بردار موقعیت تعیین می کند، که در آن [rj-ri] فاصله بین دو ذره است. این مطالعه از تابع هسته چند جمله ای مرتبه ۳ استفاده می کند که توسط شکیبایی نیا و جین (۲۳) پیشنهاد شده است:

$$W(r_{ij}, r_e) = \begin{cases} (1 - r_{ij} / r_e)^3 & 0 \le (r_{ij} / r_e) < 1 \\ 0 & (r_{ij} / r_e) \ge 1 \end{cases}$$



شکل۱. شماتیک از تقریب عددی MPS

در اینجا </ حملگر میانگین وزن است. تقریب MPS مشتقات فضایی (درونیابی، گرادیان، واگرایی و لاپلاسین) برای

که در آن، co یک سرعت صوتی مصنوعی (عددی) است که برای نکه داشتن تراکمپدیری (تغییر چکالی) کمتر از مقدار قابل قبول (معمولاً کمتر از ۱ درصد) انتخاب شده است. سپس گرادیان فشار با استفاده از فرمول اصلاح شده گرادیان MPS به صورت تقریبی تخمین زده می شود: (۱۷)

$$\left\langle \nabla p \right\rangle_{i} = \frac{D}{n_{0}} \sum_{i \neq j} \left\{ \frac{p_{j} - p_{i}}{r_{ij}} \frac{\mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i}}{r_{ij}} W(r_{ij}, r_{e}) \right\};$$

$$where \ \widehat{p}_{i} = \min\left(p_{i}, p_{i}\right); \ j \in \left\{r_{ij} \le r_{e}\right\}$$

شرايط مرزى

سطح آزاد

فشار سطح آزاد به مرزهای سطح آزاد اختصاص داده می شود. برای تعیین مکان ذرات سطح آزاد از مقدار چگالی عدد ذرات استفاده می شود. تعداد ذرات در حالی که به سطح آزاد نزدیک می شود کاهش می یابد. این به عنوان معیاری برای تشخیص ذرات سطح آزاد استفاده می شود. یک ذره به عنوان یک ذره سطح آزاد تعیین می شود که چگالی عدد ذره آن کمتر از β برابر چگالی متوسط تعداد ذرات اولیه باشد در این مقاله مقدار β، ۹۴/۰ توصیه شده توسط شکیبایی نیا و جین (۲۳) استفاده شده است.

نشریه علوم آب و خاک



شکل۲. ذرات روی سطح آزاد

مرزهای صلب

برای مرزهای صلب (تخت و دیوارها)، چند لایه از ذرات به اصطلاح مجازی در خارج از مرز در نظر گرفته می شوند تا مقادیر مرزی را تعیین کنند و از کمبود چگالی ناخواسته در نزدیکی مرز جلوگیری کنند. فشار ذرات مجازی از داخل حوزه محاسباتی برون یابی می شود (برای اطمینان از نیروی دافعه مرزی). برای ذرات درون لایه مرزی، از پروفیل سرعت لگاریتمی استفاده می شود. جزئیات در مورد شرایط مرزی را می توان در جعفری-ندوشن و همکاران یافت. (۱۵).



شکل۳. ذرات روی مرز جامد و ذرات مجازی

مرزهای باز

روش این مطالعه برای اجرای مرزهای باز (مرزهای ورودی و خروجی) بر اساس نسخه اصلاح شده جعفری و همکاران (۱۴) است. برای شرط مرزی با سرعت معلوم جریان ورودی، تعدادی ذره با توجه به مشخصات سرعت مرز ورودی به جریان ورودی افزوده می شود. به بیان دیگر، بسته به توزیع سرعت جریان ورودی در عمق، در هر چند گام زمانی طبق رابطه (۱۸)، یک ذره در همان عمق به جریان ورودی اضافه می گردد، جعفری و همکاران (۱۵). (۱۸)

$$k(y) = \frac{\Delta l}{u(y)\Delta t}$$

که در آن k مقاطع زمانی افزودن ذرات محاسباتی، u(y) سرعت جریان ورودی در عمق، Δt گام زمانی و Δl فاصله اولیه بین ذرات است. برای شرط مرزی با فشار یا عمق معلوم جریان خروجی، ذراتی که در مجاورت ذرات مجازی مرز خروجی قرار می گیرند، حذف شده و به ذرات ذخیره می پیوندند. به نحوی که عمق ذرات مجازی مرز برابر شرط مرزی عمق خروجی خواهد بود.



شکل۴. روش اجرای مرز باز برای مرز خروجی و ورودی

روش حل ادغام زمان و روش حل بر اساس یک الگوریتم تصحیح پیشبینی است که در آن هر مرحله زمانی به دو مرحله فرعی پیشبینی و تصحیح تقسیم میشود. سرعت در یک مرحله زمانی جدید (t+1) از مجموع سرعت پیشبینیشده (*u) و سرعت تصحیح شده ('u) محاسبه می گردد:

$$\mathbf{u}_{i}^{*+*} = \mathbf{u}_{i} + \mathbf{u}_{i}^{*}$$

$$\mathbf{u}_{i}^{*} = \mathbf{u}_{i}^{k} + \frac{\Delta t}{\rho_{i}} \left(\mathbf{g} + \eta_{ij} \nabla^{2} \mathbf{u}_{i}^{k} - (1 - \alpha) \nabla p_{i}^{k} \right)$$

$$(\Upsilon \cdot)$$

$$\mathbf{u}_{i}^{*} = \mathbf{u}_{i}^{k} + \frac{\Delta t}{\rho_{i}} \left(\mathbf{g} + \eta_{ij} \nabla^{2} \mathbf{u}_{i}^{k} - (1 - \alpha) \nabla p_{i}^{k} \right)$$

$$(\Upsilon \cdot)$$

k+1

$$\mathbf{u}' = -\frac{\alpha \, \Delta i}{\rho_i} \, \nabla p_i^{k+1}$$

ضریب آرامش α بین • و ۱ انتخاب می شود که در اینجا مقدار ۵/۰ در نظر گرفته شد. این ضریب در هر مرحله زمانی از مدل رئولوژیکی برای محاسبه ویسکوزیته مؤثر و سپس برای پیش بینی سرعت استفاده می شود. برای محاسبه اثر جریان رینولدز بالا، به ویژه در فاز آب، یک مدل آشفتگی برای محاسبه ویسکوزیته گردابی اعمال می شود که سپس به ویسکوزیته مؤثر اضافه می شود. در اینجا یک مدل (SPS) شبیه سازی گردابی بزرگ (LES) استفاده شده است. برای دسترسی به جزئیات مفهوم مدل MPS شکیبایی نیا و جین (۲۲) پیشنهاد می گردد. این مدل به این دلیل استفاده شده است که برای روش های ذرات به خوبی آزمایش شده است. اندازه گام زمانی باید شرایط پایداری (CFL) و همچنین پایداری معادله انتشار را برآورده کند (۵):

$$\Delta t \le \min\left\{C\frac{d_p}{c_0 + |U|_{\max}}, \frac{\rho d_p^2}{2D\eta_{\max}}\right\}$$
(Y1)

که در آن dp فاصله بین ذرات (اندازه ذرات) و C عدد کورانت و η_{max} حداکثر ویسکوزیته است.

نشریه علوم آب و خاک

نتايج و بحث

اعتبارسنجی و مدلسازی عددی

به منظور تأیید کاربرد مدل حاضر در شبیهسازی برهمکنش فازهای مایع و جامد، ابتدا مسئله پرکاربرد شکست سد بر روی بستر فرسایش پذیر، که سبب انتقال رسوب پشت مخزن سد و تغییرات سریع بستر می شود مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مدل فیزیکی فراکارلو و کاپارت (۷) با استفاده از مدل پیشنهادی مورد شبیهسازی و تحلیل قرار گرفت. گلوله های PVC با قطر ۵۰۰۰۰۰ متر با ضخامت ۵ سانتی متر به صورت افقی در بالادست و پایین دست سد قرار گرفته است. عمق اولیه آب بالادست ۱۰ سانتی متر تنظیم شده است. چگالی اولیه ذرات عددی برای گلوله های ۱۵۴۰ PVC کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. شکل ۵ مقایسه نتایج شبیهسازی شده با استفاده از مدل حاضر با عکس های آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل۶. مقایسه نتایج کمی سطح آزاد و موقعیت سطح رسوب در مدل عددی و آزمایشگاهی

t=13 و t=0.75 ، t=0.50s ، t=0.25s می سازی سطح بستر رسوب و آب در چهار زمان مشخص t=0.25s ، t=0.50s ، t=0.25s و t=15 و t=15 مراب المال ممال المال المال المال الم

(۲۲)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_n - x_p)^2}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{x}}$$

در این رابطه x_n مقادیر اندازه گیری شده و x_p پیشبینی شده، N تعداد دادهها و \overline{x} میانگین دادههای اندازه گیری شده است. مقدار این خطا در زمانهای ۲۵/۰ ، ۵/۰، ۵/۰، ۹/۰ و ۱ ثانیه محاسبه شده است و نمودار پراکندگی پروفیل سطح در شکل (۷) نشان داده شده است. در مجموع متوسط خطای NRMSE برای چهار زمان مورد نظر به ترتیب ۵/۷، ۵/۲، ۷ و ۶/۶ درصد است که این نشان دهنده کارایی و دقت مدل مورد نظر در این مسئله می باشد.



شکل۷. نمودار پراکندگی پروفیل سطح رسوب مدل عددی و آزمایشگاهی در زمان های ۰/۲۵ ، ۰/۵، ۱/۵۰ و ۱ ثانیه

شبیهسازی آبشستگی پشت دیوارههای ساحلی

با توجه به اهمیت آبشستگی دیوارههای ساحلی ناشی از امواج در این بخش با استفاده از روش عددی WCMPS و مدل رئولوژیکی (I) به بررسی پدیده آبشستگی پرداخته شده است. لذا از دادههای آریکاوا و همکاران (۱) جهت مدلسازی فرایند آبشستگی استفاده شده است. این آزمایش در یک فلوم به طول ۱۰۵ متر و عرض ۰۸ متر انجام شد. بستر متحرک از شن و ماسه با اندازه دانه ۲۱/۰ میلیمتر ساخته شده بود و در پشت دیواره پخش شده است. پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی در پشت دیواره به صورت زیر می باشد، به طوری که ارتفاع از سطح بستر متحرک تا بالای دیوار عمودی (Zf) ۲۴

نشریه علوم آب و خاک

سانتی متر، عمق سرریز در بالای دیوار عمودی (δ) ۵ سانتی متر، دبی جریان (q) پنجاه هزارم متر مکعب بر ثانیه، سرعت جریان در بالای دیوار عمودی (v) یک متر بر ثانیه، ارتفاع اولیه آب (ho) پنج و نیم سانتی متر و ds حداکثر عمق آب شستگی است. شماتیک از مجموعه آزمایشی در شکل ۸ نشان داده شده است. چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته سینماتیکی سیال ⁶⁶ 10 متر مربع بر ثانیه تنظیم شدند. ماده قابل فرسایش مورد استفاده ماسه با چگالی 2650 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد.



شکل ۸. شماتیک مدل آزمایشی که همه متغیرهای هندسی مرتبط و عمق آبشستگی را نشان میدهد (ds)

شماتیک مدل ساخته شده توسط ذرات که شامل یک مخزن مستطیل شکل با بستر افقی می باشد در شکل (۹) نشان داده شده است. در مدل حاضر با کاهش قطر ذرات دقت مدل افزایش خواهد یافت اما کاهش بیش از اندازه قطر ذرات باعث افزایش حجم و زمان محاسبه های می شود و در دقت نتایج تأثیر محسوسی ندارد. بنابراین مقرون به صرفه نبوده و برعکس افزایش قطر ذرات باعث کاهش دقت مدل می شود. انتخاب قطر بهینه نیاز به سعی و خطا دارد. در این مطالعه قطر بهینه ۱۰۰۰ متر برای ذرات در نظر گرفته شده است. لذا مدل مورد نظر دارای ۲۳۵۵۹ ذره به قطر ۱۰۰۰ متر می باشد.



شکل ۹. موقعیت اولیه ذرات سیال، رسوب، دیواره و مجازی برای مدل ۳ با جزئیات دقیق شکل ۱۰. یک نمونه عکس فوری از ویسکوزیته شبیهسازی شده، بزرگی سرعت، بردار سرعت و کسر حجمی در t=5 ثانیه را ارائه میکند. الگوی گردش جریان نیز در این شکل برجسته شده است. هنگامی که جریان جت به سطح رسوب برخورد میکند، به دو شاخه تقسیم میشود: (۱) جریان قوی در خلاف جهت عقربههای ساعت و (۲) جریان ضعیف به سمت عقب (در جهت عقربههای ساعت) در خلاف جهت جریان رسوب جت. این جریانها مواد رسوبی را فرسایش میدهند و یک حفره آب شستگی

ایجاد میکنند با گذشت زمان، سوراخ آبشستگی بزرگ میشود. در جاهایی که تنش برشی ناشی از این جریانها از تنش تسلیم بیشتر میشود (یعنی مناطق با ویسکوزیته کم)، مواد رسوبی شروع به حرکت کرده و از بستر جدا میشوند. این ماده توسط جریان حمل میشود و در پاییندست تحت وزن آنها رسوب میکند..



شکل ۱۱. مقایسه پروفیلهای بستر تجربی و عددی در در زمان های ۲۰ ۱۵ و ۴۷ ثانیه برای مدل۳

مقدار خطای پروفیل های گودال آبشستگی در زمان های 120 k=40, 80, 12 ثانیه محاسبه شده است و نمودار پراکندگی پروفیل سطح در شکل ۱۲ نشان داده شده است. خطایNRMSE برای سه زمان مورد نظر به ترتیب ۴/۴ ، ۱۲ و ۱۴ درصد میباشد که این نشان دهنده کارایی و دقت مدل مورد نظر در این مسئله میباشد.



شکل ۱۲. نمودار پراکندگی گودال آبشستگی مدل عددی و آزمایشگاهی در زمان های ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ ثانیه در شکل ۱۳ عمق آبشستگی در زمانهای مختلف در مدل لاگرانژی با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانگونه که در شکل مشخص است با افزایش زمان عمق آبشستگی افزایش یافته است که این افزایش در زمانهای ابتدایی روند سریعتری دارد با افزایش زمان شدت فرسایش کاهش می یابد. مقایسه مدل عددی حاضر با مدل آزمایشگاهی نشاندهنده این است که مدل مورد نظر به خوبی توانسته است عمق آبشستگی رو شبیه سازی کند.



نتيجهگيرى

هدف از این مطالعه، توسعه و ارزیابی مدل لاگرانژی بدون شبکه، نیمهضمنی ذرات متحرک با تراکم ضعیف با مدل با رئولوژی μ(I) جهت شبیهسازی آبشستگی پشت دیوارههای ساحلی است. ماده رسوبی به عنوان یک سیال ویسکوپلاستیک غیر نیوتنی در نظر گرفته شده است که رفتار آن با استفاده از یک مدل رئولوژیکی μ(I) پیش بینی می شود. مدل عددی پیشنهادی توانسته است. شکل و اندازه سوراخ آبشستگی را با موفقیت بازتولید کند. نتایج تجربی و عددی برای آبشستگی کاملاً سازگار هستند (به ویژه برای عمق سوراخ آبشستگی) نتایج نشان داد که چگونه جریان و گردشهای بسیار فرسایشی می تواند ناحیهای با ویسکوزیته کم در سطح زنجیره رسوب ایجاد کنند، جایی که تنش برشی می تواند از تنش تسلیم فراتر رود و رسوب می تواند

برای تشکیل حفره آبشستگی فرسایش یابد. همچنین نتایج عمق آبشستگی با گذشت زمان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید و نتایج حاکی از دقت بالای مدل در پیش بینی عمق آبشستگی دارد به طور کلی نتایج این مطالعه توانایی روش WCMPSبرای مدلسازی آبشستگی را به وضوح نشان میدهد.

 Arikawa, T., Ikeda, T. & Kubota, K. (2014)"Experimental study on scour behind seawall due to tsunami overflow," J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Eng.) 70(2), I 926–I 930 (in Japanese).

منابع

- Briaud, J.-L. Chen, H.-C. Govindasamy, A. Storesund, R. (2008). Levee erosion by overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane, J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 134 (5) 618–632.
- 3. Chen, C. L., & Ling, C. H. (1996). Granular-flow rheology: role of shear-rate number in transition regime. Journal of engineering mechanics, 122(5), 469-480.
- 4. Coleman, S.E. Melville, B.W. (2001). Case study: New Zealand bridge scour experiences, J. Hydraul. Eng. 127 (7), 535–546.
- 5. Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. IBM J. Res. Develop. 11(2), 215–234.
- Forterre, Y., Pouliquen, O. 2008. Flows of dense granular media. Annu Rev Fluid Mech; 40:1-24
- 7. Fraccarollo, L. Capart, H. (2008). Riemann wave description of erosional dam-break flows, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 461, pp. 183-228.
- 8. Galano, N., Moreno-Casas, P. A., & Abell, J. A. (2021). Extending the Particle Finite Element Method for sediment transport simulation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 380, 113772.
- 9. Gingold RA, Monaghan JJ.(1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Mon Not R Astron Soc .181:375–89.
- Hashemi L, Kashefipour S M, Ghomeshi M, Bahrami Yarahmadi M. Experimental Investigation of the Effect of the Pier Group Skew Angle on Local Scour Around the Piers under Steady Flow. jwss 2024; 28 (2) :1-16
- jafari nodoushan E. (2023). Modeling of Granular Flow in a Silo Using the Moving Particle Semi-implicit Method (MPS) with the Exponential Herschel-Balky Rheological Model. MCEJ 2023; 23 (3) :173-187
- 12. Jafari Nodoushan E, Shakibaeinia A, Hosseini K. (2018) A multiphase meshfree particle method for continuum-based modeling of dry and submerged granular flows. Powder Technol.;335:258-274.
- 13. Jafari Nodoushan E, Tajnesaie M, Shakibaeinia A. (2024) Two- and three-dimensional multiphase mesh-free particle modeling of transitional landslide with μ (I) rheology. Int J Numer Meth Fluids.;1-28. doi: 10.1002/fld.5274

نشریه علوم آب و خاک

- 14. Jafari Nodoushan E, Shakibaeinia A. (2018) Multiphase mesh-free particle modeling of local sediment scouring with $\mu(I)$ rheology. J Hydroanfom. ; 21(2): 279-294. doi:10.2166/hydro.2018.068
- Jafari Nodoushan, E. Hosseini, Kh. Shakibaeinia, A. Mousavi, S,F. (2015). Meshless particle modelling of free surface flow over spillways, Journal of Hydroinformatics 10.2166/hydro.2015.096
- Jop, P., Forterre, Y., Pouliquen, O. 2006. A constitutive law for dense granular flows. Nature;441(7094):727-730.
- 17. Koshizuka, S. Oka, Y. (1996). Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol. 123, No. 3, pp. 421-434.
- McTigue, D. F. (1981). Mixture theory for suspended sediment transport. Journal of the Hydraulics Division, 107(6), 659-673.
- 19. Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. IAHR.
- Nakamura, T. & Mizutani, N. (2013) "Sediment transport calculation considering laminar and turbulent resistance forces caused by infiltration/exfiltration and its application to tsunamiinduced local scouring," J. Offshore Mech. Arctic Eng. 136(1), 190–198.
- Noguchi, K., Sato, S. & Tanaka, S. (1997) "Large scale experiment on scour of overflow in front of seawall by tsunami climbing up," Vol. 44, in Proc. of Coast. Eng., pp. 196– 300 (in Japanese).
- 22. Papanastasiou, T.C. (1987). Flows of materials with yield, J. Rheol. 31 385-404.
- 23. Shakibaeinia, A. Jin, Y.C. (2010). A weakly compressible MPS method for simulation of open-boundary free-surface flow, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 63, No. 10, pp. 1208–1232.
- 24. Shakibaeinia, A. Jin, Y.C. (2012). MPS mesh-free particle method for multiphase flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 229–232, pp. 13-26.
- 25. Shibata, K. Koshizuka, S. 2007. Numerical analysis of shipping water impact on a deck using a particle method, Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 585-593,
- 26. Sugano, T., Nozu, A., Kohama, E., Shimosako, K. & Kikuchi, Y. (2014). "Damage to coastal structures," Soils Found. 54(4), 883–901.
- 27. Tajnesaie, M., Shakibaeinia, A., & Hosseini, K. (2018). Meshfree particle numerical modelling of sub-aerial and submerged landslides. Computers & Fluids, 172, 109-121.
- 28. Takahashi, H., Sassa, S. I., Morikawa, Y., Takano, D. & Maruyama, K. (2014) "Stability of caissontype
- Wang, D., S. Li, T. Arikawa., and H. Gen. 2016. "ISPH Simulation of Scour behind Seawall Due to Continuous Tsunami Overflow." Coastal Engineering Journal 58 (3): 1–23. doi:10.1142/S0578563416500145.
- Yeo, C. G., Lee, S., Yoon, S. E. & Song, J. W. (2011) "Temporal variation of local scour depth in the downstream of weir with shapes," J. Korean Soc. Civil Eng. 31(4B), 353–360 (in Korean)



Simulation of scouring behind coastal walls by Lagrangian method Using the μ (I) rheology model

Ehsan Jafari Nodoushan¹, Ataollah Shirzadi^{2*}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bijar Campus, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

2- Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of kurdistan, Sanandaj, Iran.

a.shirzadi@uok.ac.ir

Abstract

The rapid and complex movement of sediments in rivers and coastal areas with highly erosive and unsteady flows presents river engineers with numerous problems in the geomorphology of alluvial rivers. The accurate prediction of these complex processes in the water-sediment system (a multiphase, dense, granular flow system) is still a major challenge for mesh-based models. Due to the ability of meshless Lagrangian methods to model large deformations and discontinuities, meshless Lagrangian methods can provide a unique way to deal with this complexity. In the current research, the capabilities of the Weakly compressibility moving particle semi-implicit (WC-MPS) model in soil-fluid interaction modeling are developed to enable the modeling of sediment transport and erosion effects behind coastal walls. In this method, granular material is considered as a non-Newtonian and viscoplastic fluid. To predict the non-Newtonian behavior of the granular phase, the $\mu(I)$ rheological model has been used. In order to verify the application of the present model in simulating the interaction of liquid and solid phases, first the widely used problem of dam break on an erodible bed was modeled. The NRMSE model was calculated to be approximately 6%, which indicates the efficiency and accuracy of the target model in this problem. At the end, the scouring of coastal walls was simulated by WC-MPS method using $\mu(I)$ rheology model. Investigations show that the processes related to erosion and scouring can be well modeled by the current Lagrangian method and the numerical results show a very good agreement with the laboratory measurements. It should be noted that the average error of the mentioned model is estimated to be 10%.

Keywords: scour depth, Lagrangian method, non-Newtonian multiphase flow, sediment transport, river engineering