



شبیه سازی عددی انتقال رسوب در شرایط غیر ماندگار با تغییرات سریع در یک میدان جریان دو بعدی قائم

محسن ابراهیمی^۱، پیمان بدیعی^۲

۱ و ۲- دانشکده ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران.

ebrahimim@ut.ac.ir

خلاصه

با استفاده از یک مدل جریان دوبعدی قائم کاملاً دینامیک که قابلیت شبیه سازی عددی جریانات غیرماندگار با تغییرات سریع میدان سرعت و سطح آب را داراست، یک مدل انتقال رسوب توسعه داده شده که توانایی ملحوظ نمودن این گونه شرایط را در محاسبه غلظت رسوبات معلق، دارد. مدل مذکور معادله انتقال و پخشودگی رسوبات را با روش عددی احجام محدود و در دستگاه مختصات منطبق با مرزها حل می‌نماید. اثر آشفتگی بر تعلیق رسوبات توسط مدل $k - \epsilon$ در انجام مدل‌سازیها ملحوظ گردیده است. غلظت مینا با استفاده از روشهای مختلف از جمله روابط تصادفی (stochastic)، محاسبه شده است. در نهایت نتایج حاصل از مدل توسعه یافته با اندازه گیریهای آزمایشگاهی مقایسه شده است. این مقایسه انطباق نسبتاً رضایبخش نتایج عددی با اندازه گیری ها را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: روش حجم محدود، انتقال، پخشودگی، آشفتگی، غلظت مینا.

مقدمه

در مطالعه و تحلیل پدیده آبشستگی^۳ که در اثر فرسایش سریع و کوتاه مدت بستر در اطراف سازه های آبی و دریایی در مقیاس زمانی وقوع یک سیل و یا طوفان روی می‌دهد، نیازمند مدل‌های انتقال رسوبی هستیم که بتواند تغییرات زمانی و مکانی غلظت بار معلق را در حضور یک میدان جریان غیرماندگار و با تغییرات سریع سرعتها محاسبه نماید. مقاله‌ی حاضر به معرفی چنین مدلی می‌پردازد که از ترکیب دو زیر مدل محاسباتی جریان و انتقال رسوب حاصل شده است.

زیر مدل جریان، مبتنی بر مدل توسعه یافته توسط (Ahmadi et al. (2007 است که در فضای دوبعدی قائم معادلات ناویر استوکس با سطح آزاد آب را به شکل کاملاً دینامیک حل می‌نماید. در این مدل در راستای قائم از شبکه بندی منطبق بر مرزها استفاده شده است و قابلیت شبیه سازی عددی جریانات غیرماندگار با تغییرات سریع میدان سرعت و سطح آب وجود دارد. در مدل‌سازی آشفتگی^۴ از مدل دو معادله ای $k - \epsilon$ استفاده شده است. اکثر مدل‌های عددی انتقال رسوب موجود به بررسی این پدیده در میدانهای جریان ماندگار و یکنواخت پرداخته اند، که این امر شبیه سازی پدیده‌ی انتقال رسوب را در شرایطی که با میدانهای متغیر سریع مواجه هستیم دچار مشکل می‌نماید. اما در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به مدل جریان مورد استفاده، امکان مدل سازی پدیده‌ی انتقال رسوب در شرایط مورد نظر فراهم می‌شود. غلظت مینا^۵ توسط روابط تجربی موجود محاسبه شده است. توزیع غلظت در عمق بر مبنای حل معادله‌ی انتقال-پخشودگی^۶ غلظت محاسبه، و با اندازه گیری های موجود آزمایشگاهی مقایسه شده است.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران
^۲ استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران

^۳ Scouring
^۴ Turbulence
^۵ Reference Concentration
^۶ Advection-Diffusion



معادلات حاکم

در صورتی که فرض کنیم که عرض جریان، در راستای عمود بر بردار سرعت، به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، می‌توانیم پدیده‌ی انتقال رسوب را در حالت دو بعدی قائم (صفحه‌ی $x - y$) شبیه سازی کنیم. در این صورت معادله‌ی حاکم بر غلظت حجمی رسوب، c ، عبارتست از:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (1)$$

که در آن u و v مولفه‌های سرعت در جهات x و y ، ϵ_s ضریب آشفتگی (لزجت گردابه‌ای) رسوب، و w_s سرعت سقوط ذرات رسوب می‌باشد. با افزایش غلظت، سرعت سقوط بواسطه‌ی اندرکنش آب و رسوب کاهش می‌یابد و اصلاح زیر، که توسط Richardson and Zaki (1954) پیشنهاد شده، بر روی آن اعمال می‌گردد.

$$\frac{w_{se}}{w_s} = (1 - c)^m \quad (2)$$

که در آن w_{se} سرعت سقوط موثر می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر مقدار $m=4$ فرض شده است. رابطه‌ی میان ϵ_s و ϵ_f (لزجت گردابه‌ای آب) نیز عبارتست از

$$\epsilon_s = \beta \epsilon_f \quad (3)$$

در این مطالعه مقدار β با کالیبراسیون و با رعایت محدودیت $1 < \beta < 2$ تعیین شده است. در بالادست جریان، از شرط مرزی مقدار غلظت معلوم استفاده شده است که بسته به شرایط، غلظت ورودی برابر صفر یا مبتنی بر پروفیل توزیع غلظت متعادل Rouse در نظر گرفته شده است. در سطح آب، شار رسوبی عمود بر سطح صفر می‌باشد و عبارت دیگر

$$\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial n} + w_s c \sin \alpha = 0 \quad (4)$$

که در آن \bar{n} بردار یک‌ه‌ی عمود بر سطح (بسمت خارج)، و α زاویه‌ی میان این بردار و افق می‌باشد. در پایین دست که باندازه‌ی کافی دوراز ناحیه‌ی مورد بررسی قرار دارد، مشتقات غلظت در راستای افق، برابر صفر در نظر گرفته شده است. در مرز بستر (تراز $y=a$)، دو نوع شرط مرزی می‌توان در نظر گرفت (Van Rijn 1986):

$$c = c_a \quad (5-1)$$

$$E_a = -\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} = w_s c_a \quad (5-2)$$

که در آن a تراز مبنا (که تراز جدایی بار بستر از بار معلق است) و c_a غلظت مبنا می‌باشد. بر اساس نظر Van Rijn (1986)، در بسترهای با شیب تند استفاده از شرط مرزی نوع اول، که از نوع مقدار معلوم است، ممکن است باعث ایجاد گردادیان‌های مثبت غلظت ($\partial c / \partial y > 0$) در نزدیکی بستر گردد. در مطالعه‌ی حاضر از شرط مرزی نوع دوم استفاده شده است. غلظت مبنا در این مطالعه به دو روش تعین (deterministic) و تصادفی (stochastic) محاسبه می‌گردد. در روش تعین از رابطه‌ی تجربی ارائه شده توسط Van Rijn (1987) استفاده شده است:

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50} T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad (6)$$

که در آن d_{50} قطر میانگین ذرات بستر، T پارامتر بدون بعد تنش برشی، و D_* پارامتر بدون بعد ذرات می‌باشد.

$$T = \frac{\tau'_b - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \quad (7)$$

که در آن τ'_b تنش برشی موثر بستر می‌باشد:

$$\tau'_b = \mu \tau_b \quad ; \quad \mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{1.5} \quad (8)$$

و در آن C ضریب شزی و C' ضریب شزی مربوط به دانه‌ها می‌باشد. $\tau_{b,cr}$ تنش برشی بحرانی بستر (طبق شیلدز) می‌باشد:

$$\tau_{b,cr} = (\rho_s - \rho) g d_{50} \theta_{cr} \quad (9)$$

که در آن ρ و ρ_s به ترتیب چگالی آب و رسوب، و θ_{cr} پارامتر بحرانی شیلدز می‌باشد که مقدار آن بر اساس مقدار D_* تعیین می‌گردد.



$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (10)$$

در رابطه‌ی فوق s چگالی نسبی رسوب و ν لزجت آب می باشد. در میدانهای جریان پیچیده که جدایی^۱ و معکوس شدن جریان^۲ رخ می دهد، استفاده از رابطه‌ی تعینتی (6) باعث می شود که در نقاطی که متوسط زمانی تنش برشی صفر است (نقاط جدایی و اتصال مجدد جریان به بستر)، غلظت مینا برابر صفر گردد، که این امر از نظر فیزیکی درست نیست، زیرا در این نقاط آشفتگی زیاد احتمالاً منجر به برداشت نسبتاً زیاد رسوب از بستر می شود (Van Rijn (1986)). در این حالات استفاده از روش تصادفی که اثرات آشفتگی را از طریق قبول تغییرات در تنش برشی اعمال می کند، توصیه می شود. در این روش غلظت مینا از رابطه زیر بدست می آید:

$$c_a = 0.03 \frac{d_{50} \overline{T}^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad (11)$$

که در آن $\overline{T}^{1.5}$ پارامتر تنش برشی متوسط (زمانی) می باشد:

$$\overline{T}^{1.5} = \frac{1}{(2\pi)^{0.5}} \left[\left(\frac{\sigma}{\tau_{b,cr,1}} \right)^{1.5} |I_1| + \left(\frac{\sigma}{\tau_{b,cr,2}} \right)^{1.5} |I_2| \right] \quad (12)$$

$\tau_{b,cr,1}$ و $\tau_{b,cr,2}$ تنشهای برشی بحرانی، به ترتیب در جهت غالب جریان و در خلاف این جهت می باشند، و در حالتی که شیب بستر را هم مدنظر قرار دهیم:

$$\begin{aligned} \tau_{b,cr,1} &= \tau_{b,cr} \frac{\sin(\phi + n\theta)}{\sin \phi} \\ \tau_{b,cr,2} &= -\tau_{b,cr} \frac{\sin(\phi - n\theta)}{\sin \phi} \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی، θ زاویه‌ی شیب بستر، و $n=1$ برای شیب رو به بالا و $n=-1$ برای شیب رو به پایین می باشند. در رابطه‌ی (12) استفاده از قدر مطلق برای انتگرالهای I_1 و I_2 نشانگر این مفهوم است که تنشهای برشی مثبت و منفی، بطور یکسان در بلند کردن رسوبات از بستر تاثیر دارند.

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{\infty} x^{1.5} \exp\left[-\frac{1}{2}(x-r)^2\right] dx \quad ; \quad r = \frac{\overline{\tau}'_b - \tau_{b,cr,1}}{\sigma} \\ I_2 &= \int_0^{\infty} x^{1.5} \exp\left[-\frac{1}{2}(x-p)^2\right] dx \quad ; \quad p = \frac{-\overline{\tau}'_b + \tau_{b,cr,2}}{\sigma} \end{aligned} \quad (14)$$

(Van Rijn (1986) انحراف معیار σ را به تنش برشی متوسط جریان در مرز ورودی مربوط، و آن را در دامنه‌ی محاسباتی ثابت فرض کرده است.

$$\sigma = 0.4 \overline{\tau}_{b,0} \quad (15)$$

مهمترین عامل در محاسبه‌ی غلظت مینا، نحوه‌ی محاسبه‌ی تنش برشی بستر است. وقتی جریان یکنواخت باشد، استفاده از رابطه‌ی $\overline{\tau}'_b = \rho g \left(\frac{\overline{u}}{C_r} \right)^2$ نتایج مناسبی می دهد. اما در حالاتی که میدان جریان پیچیده تر باشد ممکن است این رابطه جوابهای مناسبی ندهد. بعنوان مثال در حالتی که جریان برگشتی وجود داشته باشد، ممکن است سرعت متوسط در عمق، \overline{u} ، آنقدر کوچک شود که میزان تنش برشی را به کمتر از تنش بحرانی لازم برای تحرک رسوب (یا بسیار نزدیک به آن) کاهش دهد، و این در حالی است که در نزدیکی بستر سرعتهای منفی قابل توجه وجود دارد که می تواند باعث برداشت رسوبات گردد. در این حالات از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی تنش برشی بستر استفاده شده است:

$$\tau_b = \rho \varepsilon_s \frac{u \cos \theta + \nu \sin \theta}{dl} \quad (16)$$

که در آن θ زاویه‌ی شیب بستر، $u \cos \theta$ و $\nu \sin \theta$ مولفه‌ی سرعت در راستای موازی با بستر، و dl فاصله‌ی قائم مولفه‌ی های فوق تا بستر می باشد.

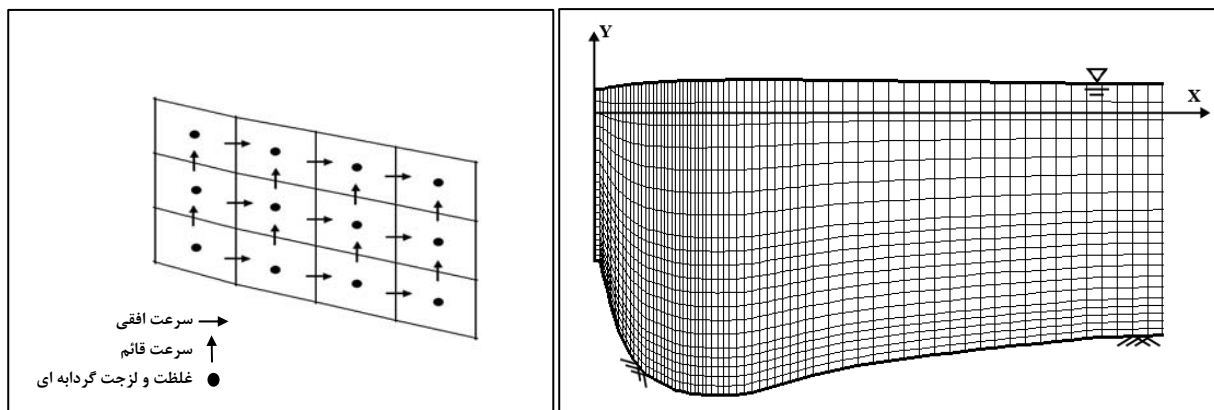
¹ Flow separation

² Flow reversal

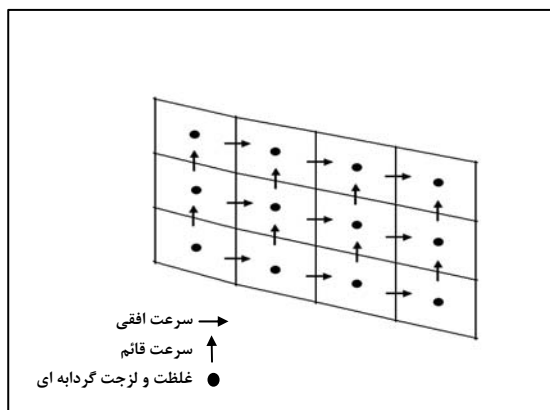
روش عددی

در این مطالعه، برای حل معادله‌ی (1) از روش احجام محدود جهت منفصل سازی معادله و شرایط مرزی استفاده شده است. شبکه مورد استفاده یک شبکه‌ی یک در میان^۱ منطبق با مرز^۲ می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. در جهت قائم، ابعاد شبکه به سمت بستر کوچک می‌شود، تا دقت بیشتری در نقاطی که گرادبان غلظت بیشتر است، ایجاد شود. مقادیر غلظت در مرکز المانهای چهارضلعی شبکه تعریف شده اند. ضمن اینکه مدل جریان، مقادیر سرعت را در وجه هر المان و مقادیر لزجت گردابه ای آب را، که توسط مدل $k - \epsilon$ محاسبه شده اند، در مرکز المان می‌دهد. شکل ۲ محل تعریف و محاسبه‌ی مقادیر مذکور را نشان می‌دهد.

تکنیک مورد استفاده برای حل معادله‌ی فوق، شیوه‌ی منفصل سازی زمانی^۳ می‌باشد. در این حالت فرض می‌شود که کل تغییرات غلظت در هر گام زمانی، برابر مجموع تغییرات ناشی از پدیده‌های انتقال و پخشودگی در هر یک از جهات x و y می‌باشد. بدین ترتیب معادله‌ی (1) به چهار معادله‌ی مجزا گسسته می‌شود. این روش ضمن کاهش پیچیدگی‌های محاسبه، دقت را نیز حفظ می‌کند (Namin (2003). ترمهای انتقال، توسط الگوی صریح^۴ و ترمهای پخشودگی با الگوی ضمنی^۵ و توسط الگوریتم جاروی دو مرحله ای^۶ محاسبه شده اند.



شکل ۱- شبکه‌ی منطبق با مرز



شکل ۲- تعریف متغیرها در شبکه‌ی یک در میان

تایید مدل

نتایج مدل انتقال رسوب، با نتایج حاصل از اندازه گیری‌های آزمایشگاهی در سه حالت میدان جریان ماندگار و یکنواخت، جریان غیر یکنواخت روی ترانسه، و جریان غیر یکنواخت روی یک بستر فرسایش یافته، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

آزمایش تطبیق پروفیل غلظت در حالت یکنواخت و ماندگار

شرایط واقعی آزمایش انجام شده توسط Van Rijn (1986) در مدل‌سازی بکار گرفته شده اند. جریان یکنواخت و ماندگار، با عمق ۲۵ سانتیمتر و سرعت متوسط ۰/۶۷ متر بر ثانیه مطابق شکل ۳ روی بستر رسوبی بر قرار می‌گردد. مقادیر d_{50} و d_{90} به ترتیب ۲۳۰ و ۳۲۰ میکرومتر بوده، و سرعت سقوط برابر ۰/۰۲۲ متر بر ثانیه منظور شده است. زبری بستر (k_s) در بخش فرسایش پذیر برابر ۰/۰۱ متر و در بخش غیر قابل فرسایش برابر با ۰/۰۰۵ متر می‌باشد و تراز مبنای a نیز برابر ۰/۱۲۵ متر در نظر گرفته شده است. در این حالت $\tau_{b,cr} = 0.1937 N/m^2$ و تنش برشی موثر بر اساس رابطه‌ی $\bar{\tau}'_b = \rho g \left(\frac{\bar{u}}{C}\right)^2$ محاسبه شده است. مقدار غلظت مبنای c_a با استفاده از رابطه‌ی (6) و مقدار β در رابطه‌ی (3) طوری کالیبره شده اند تا بهترین نتیجه حاصل شود. بر این اساس مقدار c_a حدود ۵۶۰۰ میلی گرم بر لیتر و مقدار β برابر ۱/۱ بدست آمده است. شکل ۴ نتایج محاسباتی را در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده در چهار مقطع مختلف از کانال نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نتایج از دقت خوبی برخوردار است.

¹ Staggered grid

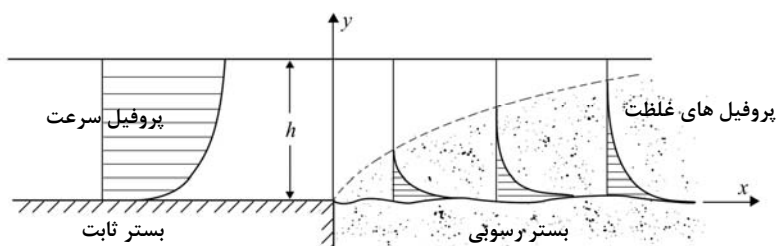
² Boundary fitted

³ Time splitting

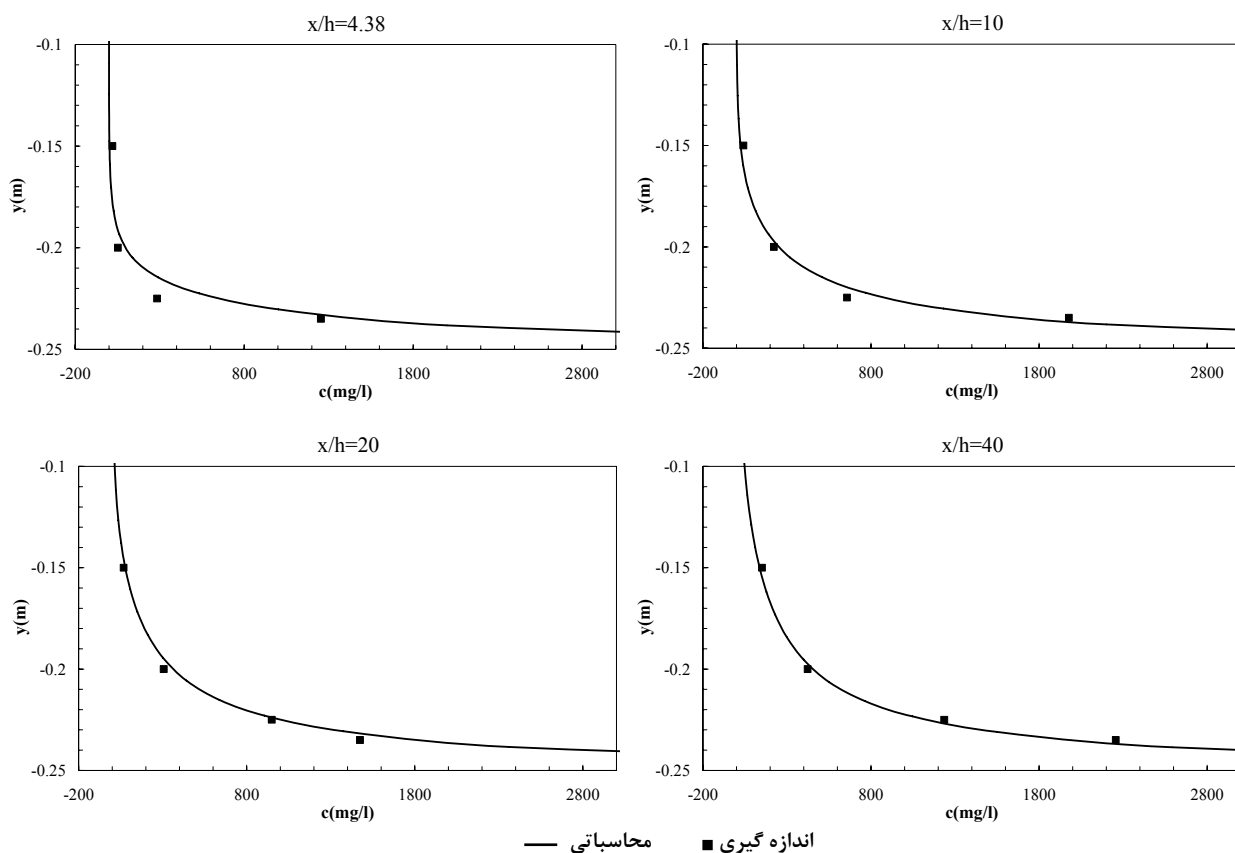
⁴ Explicit

⁵ Implicit

⁶ Double sweep algorithm



شکل ۳- شمای کلی آزمایش تطبیق پروفیل غلظت



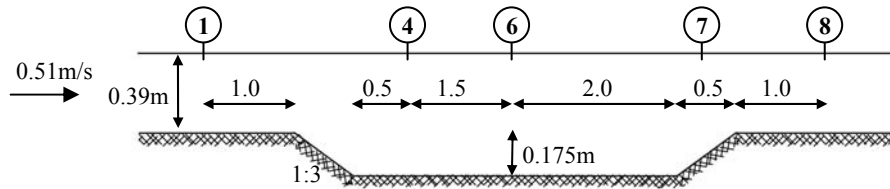
شکل ۴- مقایسه‌ی غلظت‌های محاسبه شده با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش تطبیق پروفیل غلظت

انتقال رسوب در جریان روی ترانشه

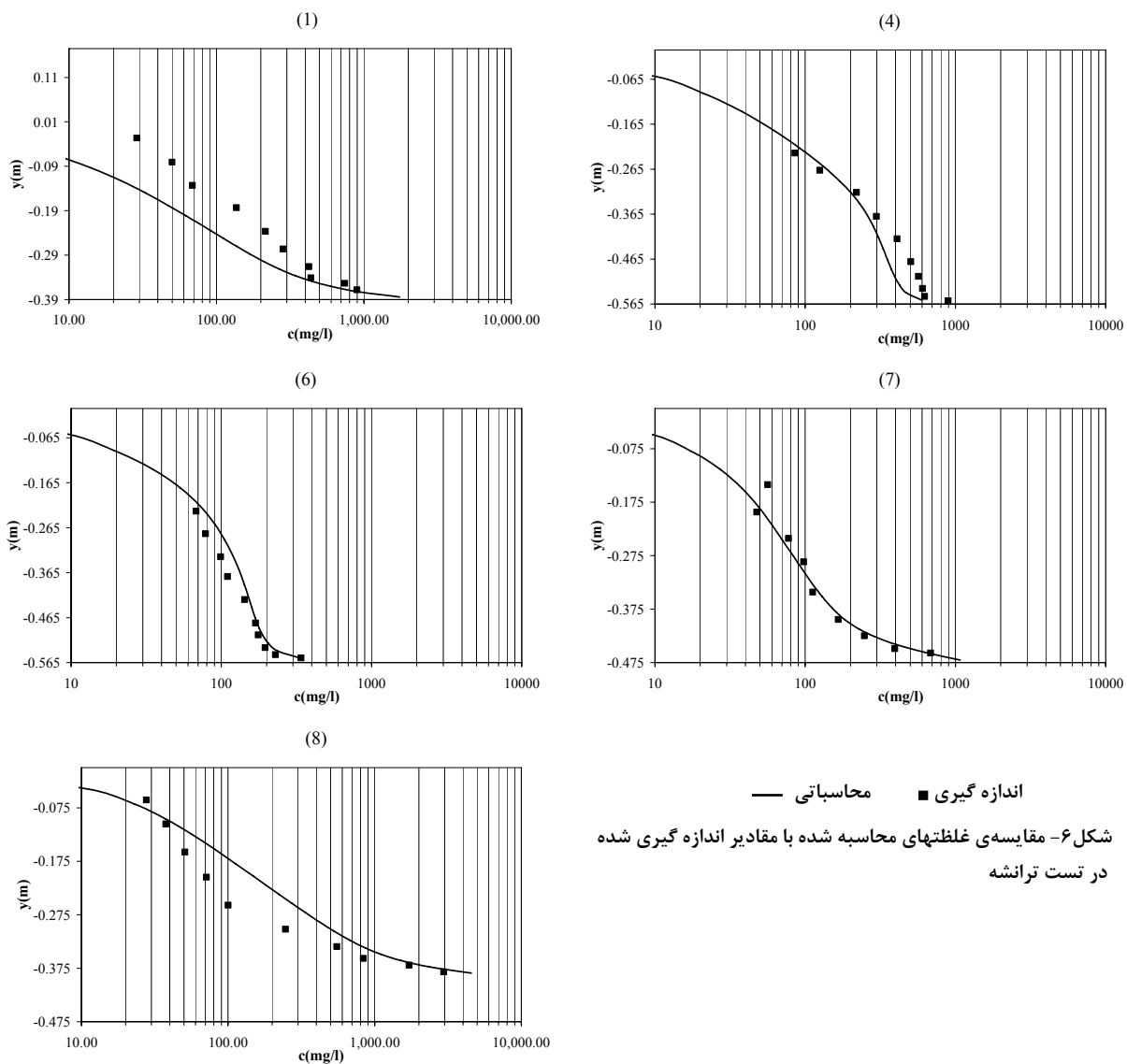
در این آزمایش که توسط Van Rijn (1986) گزارش شده است، مطابق با شکل ۵، جریان با عمق اولیه ۳۹ سانتی متر، به ترانشه ای با شیب ۱:۳ و عمق ۱۷/۵ سانتی متر می‌رسد. سرعت متوسط در بالادست برابر ۰/۵۱ متر بر ثانیه و d_{90} و d_{50} به ترتیب ۱۶۰ و ۲۰۰ میکرومتر می‌باشد. سرعت سقوط برابر ۰/۱۳ متر بر ثانیه، k_s برابر ۰/۰۲۵ متر، و تراز مبنای a برابر ۰/۰۱۲۵ متر در نظر گرفته شده است. برای حفظ شرایط متعادل (عدم رسوبگذاری یا فرسایش) در بالادست ترانشه، بار رسوبی 0.04 kg/sm اعمال شده است، که در آن بار معلق $S_s = 0.03 \text{ kg/sm}$ و بار بستر $S_b = 0.01 \text{ kg/sm}$ می‌باشند. در مطالعه‌ی حاضر در بالادست از پروفیل تعادلی Rouse بعنوان غلظت ورودی استفاده شده است و غلظت مینا در بالادست طوری کالیبره شده تا بار معلق 0.03 kg/sm حاصل شود. برای محاسبه‌ی غلظت مینا در این حالت، همانطور که قبلاً اشاره شد، استفاده از رابطه‌ی (6) مناسب نیست، زیرا در این رابطه تاثیر سرعت‌های برگشتی و خلاف جهت جریان دیده نمی‌شود. در این حالت از رابطه‌ی (11) برای



محاسبه‌ی غلظت مینا استفاده می‌کنیم. از طرفی مشاهده شد که با استفاده از رابطه $\bar{\tau}'_b = \rho g \left(\frac{\bar{u}}{C}\right)^2$ غلظتهای مبنایی حاصل می‌شود که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی غیرقابل قبول می‌باشد. بنابر این در این حالت از روابط (16) و (8) برای محاسبه‌ی تنش برشی موثر استفاده گردید. مقدار غلظت مبنایی c_e با استفاده از رابطه‌ی (11) و مقدار β در رابطه‌ی (3) طوری کالیبره شده اند تا بهترین نتیجه حاصل شود ($\beta = 1$). شکل ۶ نتایج عددی حاصل را با مقادیر اندازه گیری شده در پنج مقطع مربوطه، با مقیاس لگاریتمی، مقایسه می‌کند. دقت نتایج قابل قبول به نظر می‌رسد.

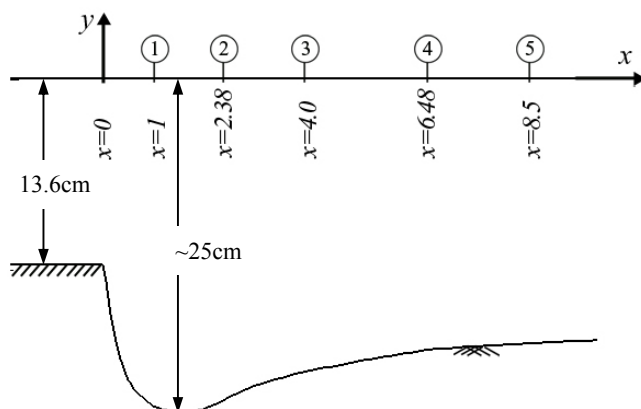


شکل ۵- شمای کلی تست ترانشه



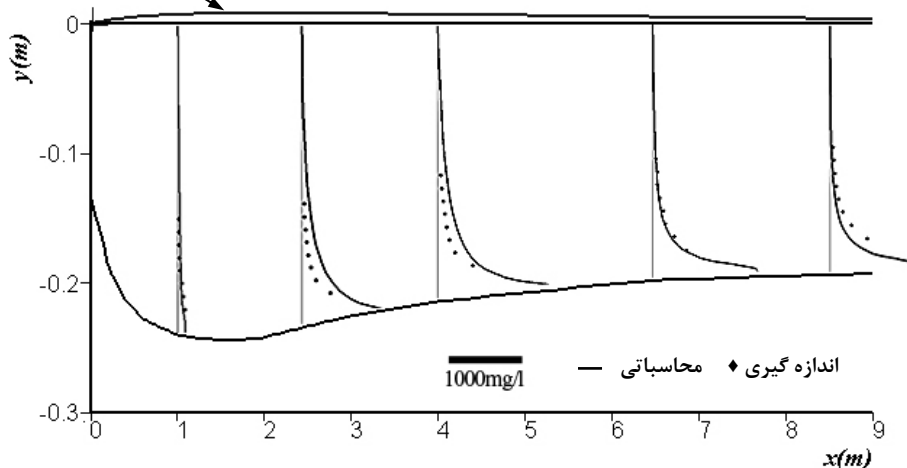
انتقال رسوب بر روی بستر فرسایش یافته

در این حالت برای ارزیابی مدل، از نتایج اندازه گیری گزارش شده توسط Hoffmans (1992) که در اثناء آبشستگی در پایین دست یک بستر صلب صورت گرفته، استفاده شده است. عمق اولیه جریان در بالادست و بر روی بستر ثابت برابر $13/6$ سانتی متر بوده، و بعد از آن بستری فرسایش پذیر با عمق متغیر و حداکثر 25 سانتی متر قرار دارد. مشخصات آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. سرعت متوسط در بالادست برابر $0/52$ متر بر ثانیه و d_{50} و d_{90} به ترتیب 165 و 210 میکرومتر می‌باشند. سرعت سقوط برابر $0/17$ متر بر ثانیه، و تراز مبنای a برابر $0/15$ متر در نظر گرفته شده است. بنابر پیشنهاد Hoffmans (1992)، k_s در بستر ثابت برابر $0/1$ متر، در شیب هموار گودال آبشستگی برابر $0/01$ متر، و در ناحیه‌ی افزایش سرعت، که امواج ریز بستر^۱ در آن تشکیل می‌شوند، برابر $0/15$ متر در نظر گرفته شده و بین دو ناحیه‌ی اخیر تدریجاً مقدار k_s افزایش یافته است. تنش برشی موثر با استفاده از روابط (16) و (8) محاسبه شده است. با توجه به وجود سرعت‌های برگشتی در شیب رو به پایین بستر، غلظت مینا توسط رابطه‌ی (11) محاسبه شده است. مقدار غلظت مینای c_a و مقدار β در رابطه‌ی (3) طوری کالیبره شده اند تا بهترین نتیجه حاصل شود ($\beta = 1.2$) در شکل ۸ مقادیر محاسبه شده با مقادیر اندازه گیری شده در پنج مقطع مقایسه شده اند. دقت نتایج قابل قبول به نظر می‌رسد.



شکل ۷- شمای کلی تست انتقال رسوب بر روی بستر فرسایش یافته

تراز سطح آب در مدل جریان



شکل ۸- مقایسه‌ی مقادیر محاسباتی غلظت با مقادیر اندازه گیری شده بر روی بستر فرسایش یافته

¹ Ripple



نتیجه گیری

یک مدل دو بعدی قائم برای شبیه سازی انتقال رسوب در میدان جریان متغیر سریع معرفی شده است. در بخش جریان، از یک مدل جدید کاملاً دینامیک برای شبیه سازی جریان با سطح آزاد استفاده شده است، که برای مدلسازی آشفتگی از مدل $k - \epsilon$ استفاده می‌کند. برای مدلسازی انتقال رسوب، معادله‌ی انتقال- پخشودگی غلظت، توسط الگوی احجام محدود و استفاده از تکنیک گسسته سازی زمانی، بر روی شبکه‌ی منطبق با مرز حل شده است. برای محاسبات غلظت مینا، بسته به مورد از دو روش تعینی و تصادفی استفاده شده است. تنش برشی نیز بر مبنای مولفه های سرعت موازی بستر محاسبه گردیده است.

نتایج مدل با سه حالت از اندازه گیریهای آزمایشگاهی مقایسه شده است و نشان داده شده که نتایج از دقت قابل قبول برخوردار است. بر اساس نتایج حاصل، نکات زیر قابل توجه است:

۱- در حالت جریان یکنواخت، نتایج از دقت بسیار خوبی برخوردار است و این امر نشان می‌دهد که مدل مکانیسم تعلیق (*entrainment*) رسوب را بخوبی شبیه سازی می‌کند؛

۲- در مدلسازی انتقال رسوب بر روی ترانشه و بستر فرسایش یافته، عمده‌ی اختلاف موجود ناشی از مقدار غلظت مینا می‌باشد. در این حالات بدلیل میدان آشفتگی جریان از روش تصادفی برای محاسبه‌ی غلظت مینا استفاده، و سعی شد تا با کالیبراسیون غلظت مینا جوابهای مناسب بدست آید.

۳- اختلافات موجود در غلظت مینا در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده، عمدتاً ناشی از نحوه‌ی محاسبه‌ی تنش برشی بستر می‌باشد. در جریان یکنواخت استفاده از سرعت متوسط در عمق برای محاسبه‌ی تنش برشی کف جوابهای قابل قبولی می‌دهد، اما در میدانهای پیچیده تر جریان نیازمند روشهایی هستیم که سرعتهای برگشتی و آشفتگی جریان را در محاسبه‌ی تنش برشی مد نظر قرار دهد. در چنین مواردی، در این مطالعه از مولفه‌ی موازی بستر سرعتهای نزدیک بستر برای محاسبه‌ی تنش برشی استفاده شد، که اگرچه نتیجه‌ی حاصل هنوز با مقادیر اندازه گیری شده اختلاف دارد، اما همانطور که در تستهای دوم و سوم دیده شد، مقادیر را به مقادیر اندازه گیری شده بسیار نزدیک می‌کند. در چنین حالاتی استفاده از سرعت متوسط برای محاسبه‌ی تنش برشی، محاسبه‌ی غلظت مینا را دچار مشکل می‌کند، زیرا در نقاطی که جریان برگشتی وجود دارد، اگر چه سرعت متوسط در عمق کم است اما در مقابل آشفتگی زیادی وجود دارد که منجر به بلند شدن رسوبات از کف می‌شود.

۴- پارامتر σ در محاسبه‌ی غلظت مینا به روش تصادفی در میدان جریانات آشفتنه اهمیت زیادی دارد. بررسی دقیق تر تاثیر این پارامتر نیازمند مطالعات بیشتری است.

مراجع

1. Ahmadi A, Badiei P, Namin MM (2007), An implicit two-dimensional non-hydrostatic model for free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 54(9): 1055.
2. Richardson, J.F., Zaki, W.N., 1954. Sedimentation and fluidisation: Part I. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 32 (1), 35–53.
3. Van Rijn, L.C., 1986. Mathematical modeling of suspended sediment in non uniform flows. *J. Hydraul. Eng.* 112 (6), 433–455.
4. Van Rijn, L.C., 1987. Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. *Delft Hydraul. Commun.* 382.
5. Hoffmans, G.J.C.M. (1992), Two-dimensional mathematical modeling of local-scour holes. *Delft University of Technology*. Report No. 92-7
6. Namin M. A fully Three-Dimensional non-Hydrostatic Free Surface Flow Model for Hydro-Environmental Prediction. *PhD thesis submitted to Cardiff University, Cardiff School of Engineering*, 2003.