



مرکز پژوهشی مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



پیمان بدیعی
دانشگاه تهران

محسن ابراهیمی
دانشگاه تهران

pbadie@ut.ac.ir

ebrahimim@ut.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از مسائل چالش برانگیز در مهندسی سواحل، تخمین صحیح نرخ رسوبگذاری در کانالهای دسترسی بنادر و به تبع آن برآورد هزینه انجام عملیات لایروبی می باشد. همچنین تخمین رسوبگذاری در ترانشه هایی که به منظور استقرار خطوط لوله و کابل حفر می شوند، یکی از مسائل مورد علاقه مهندسين محیط های دریایی می باشد. پیش بینی صحیح پدیده ی رسوبگذاری و فرسایش در ترانشه ها شبیه سازی عددی می باشد. تا کنون مدلهای عددی زیادی برای مطالعه ی پدیده ی انتقال رسوب در ترانشه ها و کانالها ارائه شده است. با این حال مدلهای کمی به بررسی رسوبگذاری و تغییرات مورفولوژیک در ترانشه ها پرداخته اند. Van Rijn (1987) با استفاده مدل SUTRENCH که در آن پروفیل های سرعت و ضریب اختلاط رسوب^۱ بر اساس نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل $k-\epsilon$ کالیبره شده اند، به مدلسازی تغییرات تراز بستر در ترانشه ها پرداخته است. (Jensen and Fredsøe (2001) نیز با حل معادلات دو بعدی ناویر-استوکس^۲ برای جریان نوسانی^۳ به مدلسازی رسوبگذاری در ترانشه ها پرداخته اند. مطالعه ی مشابهی نیز توسط Liang et al. (2005) برای شبیه سازی رسوبگذاری در ترانشه های خط لوله تحت جریان ماندگار و جریان نوسانی انجام شده است.

در مطالعه ی حاضر به معرفی مدلی عددی برای شبیه سازی رسوبگذاری در ترانشه ها تحت میدان جریان دو بعدی پرداخته شده و نتایج حاصل با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. شبیه سازی عددی رسوبگذاری در ترانشه ها نیازمند استفاده از زیر مدلهای جریان، انتقال رسوب و تغییر شکل بستر (مورفولوژی) می باشد. مدل جریان که اخیرا توسط (Ahmadi et al. (2007 توسعه داده شده، یک مدل غیرهیدرواستاتیک ضمنی میباشد که با حل معادلات ناویر استوکس به شبیه سازی جریانات با سطح آزاد می پردازد و آشفتگی میدان جریان را با استفاده از مدل $k-\epsilon$ شبیه سازی می کند. محاسبات زیرمدل انتقال رسوب نیز بر مبنای مدل توزیع غلظت که قبلا توسط ابراهیمی و بدیعی (۱۳۸۶) توسعه و توضیح داده شده، انجام گرفته است. مدل اخیر با حل معادله ی انتقال-پخشودگی^۴ غلظت رسوب به شبیه سازی میدان غلظت در یک شبکه ی منحنی الخط منطبق بر مرز می پردازد. در مطالعه ی حاضر زیرمدل محاسبه تغییر شکل بستر تشریح شده است. این مدل از یک شبکه شطرنجی به همراه گام زمانی متغیر مبتنی بر شتاب تغییرات تراز بستر استفاده می کند. نتایج محاسبات مربوط به تغییرات تراز بستر، انطباق منطقی ای را با اندازه گیری های آزمایشگاهی موجود نشان می دهد.

۲. معادلات حاکم

۲.۱. انتقال رسوب

معادلات حاکم بر مدل جریان و توزیع غلظت قبلا توسط (Ahmadi et al. (2007 و ابراهیمی و بدیعی (۱۳۸۶) ارائه شده اند و در این جا صرفا به تشریح معادلات حاکم بر سایر زیر مدلهای پرداخته می شود. با معلوم بودن میدان سرعت جریان و غلظت رسوب از زیرمدلهای جریان و توزیع غلظت، بار رسوبی معلق (q_s) توسط رابطه ی زیر تعیین می شود:

$$q_s = \int_a^h \left[uc - v_s \frac{\partial c}{\partial x} \right] dz \quad (1)$$

که در آن a تراز مبنا، h عمق آب، u سرعت افقی، c غلظت حجمی رسوب و v_s ضریب اختلاط رسوب می باشد. همچنین فرض می شود که در ضخامتی از جریان در نزدیکی بستر ذرات رسوب به صورت بار بستر منتقل می شوند. روابط مختلفی برای محاسبه ی بار بستر وجود دارند که عمدتا تجربی بوده و از نظر پارامترهای بکار گرفته شده و شرایط کاربرد تفاوت های بعضا قابل توجهی با یکدیگر دارند. در یک طبقه بندی،

¹ Sediment mixing coefficient

² Navier-Stokes

³ Oscillatory flow

⁴ Advection-Diffusion

می‌توان روشهای محاسبه‌ی بار بستر را به دو گروه تعیینی^۵ و تصادفی^۶ تقسیم نمود. معمولاً در نقاطی که سرعت جریان کاهش می‌یابد و تنش برشی بستر به صفر نزدیک می‌شود، روش تعیینی مقدار ناچیز یا صفر را برای بار بستر ارائه می‌دهد. این درحالی است که در این نقاط معمولاً نوسانات آشفتنه زیاد بوده و می‌تواند منجر به ایجاد بار بستر شود. بر این اساس Van Rijn (1987) روش تصادفی را ارائه نموده که در آن تاثیر نوسانات سرعت خلاف جهت جریان لحاظ شده است:

$$q_b = 0.1(s-1)^{0.5} g^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} \overline{T_m}^{2.1} \quad (2)$$

در این رابطه s نسبت چگالی رسوب به چگالی آب، g شتاب گرانش، d_{50} قطر متوسط ذرات و D_* پارامتر بدون بعد ذرات می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

که در آن ν لزجت سینماتیک^۷ آب می‌باشد. همچنین $\overline{T_m}^{2.1}$ پارامتر انتقال می‌باشد و عبارتست از (Van Rijn, 2006):

$$\overline{T_m}^{2.1} = \frac{1}{(2\pi)^{0.5}} \left[\left(\frac{\sigma'}{\tau_{b,cr,1}} \right)^{2.1} I_5 + \left(\frac{-\sigma}{\tau_{b,cr,2}} \right)^{2.1} I_6 \right] \quad (4)$$

σ' انحراف معیار تنش برشی تنش برشی موثر بستر، و $\tau_{b,cr,1}$ و $\tau_{b,cr,2}$ تنش‌های برشی بحرانی بستر در جهت جریان و خلاف جهت جریان، و I_5 و I_6 بیانگر سهم انتقال در جهت جریان و خلاف جهت جریان هستند. Van Rijn (1987) برای تنش برشی بستر یک توزیع گوسی فرض نموده و رابطه‌ی زیر را برای انحراف معیار تنش برشی پیشنهاد نموده است:

$$\sigma' = 0.4 \overline{\tau_b} \quad (5)$$

که در آن $\overline{\tau_b}$ تنش برشی موثر بستر می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر از رابطه‌ی فوق استفاده شده است. با اینحال باید توجه داشت که این رابطه برای جریان یکنواخت دقت مناسبی دارد و Van Rijn (2006) آن را برای جریان غیر یکنواخت اصلاح و به انرژی آشفتنه در نزدیکی بستر مربوط نموده است. همچنین وی استفاده از توزیع گوسی برای تنش برشی بستر را سوال برانگیز دانسته است. Cheng (2004) یک توزیع لگ-نرمال برای تنش برشی بستر ارائه داده که نتایج بهتری از توزیع گوسی می‌دهد. با در نظر گرفتن شیب بستر، مقادیر تنش برشی بحرانی بستر در رابطه‌ی (۴) بصورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial x} < 0 : & \quad \tau_{b,cr,1} = \tau_{b,cr} \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin \varphi} \\ & \quad \tau_{b,cr,2} = \tau_{b,cr} \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin \varphi} \\ \frac{\partial h}{\partial x} > 0 : & \quad \tau_{b,cr,1} = \tau_{b,cr} \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin \varphi} \\ & \quad \tau_{b,cr,2} = \tau_{b,cr} \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin \varphi} \end{aligned} \quad (6)$$

در روابط فوق φ زاویه‌ی اصطکاک داخلی ذرات بستر، و α زاویه‌ی شیب بستر می‌باشد. $\tau_{b,cr}$ نیز تنش برشی بحرانی لحظه‌ای برای بستر مسطح می‌باشد و Van Rijn (1987) برای آن مقدار زیر را پیشنهاد داده است:

$$\tau_{b,cr} = 1.5 \overline{\tau_{b,cr}} \quad (7)$$

در این رابطه $\overline{\tau_{b,cr}}$ تنش برشی بحرانی متوسط برای بستر مسطح می‌باشد و طبق رابطه‌ی شیلدز محاسبه می‌گردد:

$$\overline{\tau_{b,cr}} = (\rho_s - \rho) g d_{50} \theta_{cr} \quad (8)$$

ρ_s چگالی رسوب، ρ چگالی آب، و θ_{cr} پارامتر بحرانی شیلدز بوده که بر اساس روابط زیر محاسبه می‌گردد:

⁵ Deterministic

⁶ Stochastic

⁷ Kinematic viscosity

$$\begin{aligned} \theta_{cr} &= 0.115D_*^{-0.5} & ; & \quad 1 < D_* \leq 4 \\ \theta_{cr} &= 0.140D_*^{-0.64} & ; & \quad 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr} &= 0.040D_*^{-0.1} & ; & \quad 10 < D_* \leq 20 \quad (9) \\ \theta_{cr} &= 0.013D_*^{0.29} & ; & \quad 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr} &= 0.055 & ; & \quad D_* < 150 \end{aligned}$$

مقادیر I_5 و I_6 در رابطه ی (۴) نیز بصورت زیر محاسبه می گردند:

$$\begin{aligned} I_5 &= \int_0^{\infty} x^{2.1} e^{-\frac{1}{2}(x-r)^2} dx & ; & \quad r = \frac{\overline{\tau'_b} - \tau_{b,cr,1}}{\sigma'} \\ I_6 &= -\int_0^{\infty} x^{2.1} e^{-\frac{1}{2}(x-p)^2} dx & ; & \quad p = \frac{\overline{\tau'_b} - \tau_{b,cr,2}}{\sigma'} \end{aligned} \quad (10)$$

همانطور که ملاحظه می شود، ترم I_6 دارای تاثیر منفی بر روی پارامتر انتقال است، زیرا بیانگر اثر انتقال ذرات در اثر نوسانات منفی سرعت در خلاف جهت جریان می باشد.

۲.۲. تغییرات تراز بستر

با محاسبه ی بار معلق و بار بستر می توان تغییرات تراز بستر را محاسبه نمود. به طور کلی در ادبیات فنی، دو روش برای محاسبه ی تغییرات تراز بستر موجود است. در روش اول از تعادل جرم رسوب در لایه ی بار بستر استفاده می شود (Brørs, 1999 و Li, 2001):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-p_0} \left[v_s \frac{\partial c}{\partial z} + (w_s - w) c_a - \frac{\partial q_b}{\partial x} \right] \quad (11)$$

که در آن Z_b تراز بستر، p_0 تخلخل، w_s سرعت سقوط ذرات رسوب، w مولفه ی قائم سرعت جریان و c_a غلظت حجمی رسوب در تراز مبنا می باشد. روش دیگر، نوشتن تعادل جرم رسوب در کل عمق می باشد (Hoffmans, 1992):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-p_0} \left[-\frac{\partial q_t}{\partial x} \right] \quad (12)$$

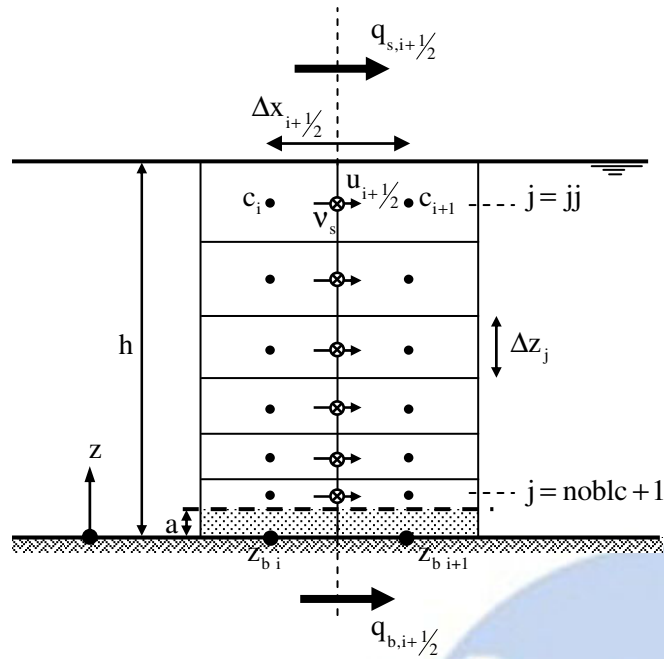
که در آن q_t انتقال رسوب کل و برابر مجموع انتقال بار معلق و بار بستر می باشد. بر اساس یافته های Liang et al. (2005) اگرچه روابط (۱۱) و (۱۲) هر دو بر اساس قانون بقای جرم رسوب نوشته شده اند، اما بکارگیری آنها در مدل های عددی نتایج متفاوتی می دهد. به عنوان مثال محاسبه ی آبستگي بر اساس معادله ی (۱۱) خطاهای عددی بزرگی را در پی خواهد داشت. این خطاها ناشی از کاربرد ترم های پخشودگی $\left(v_s \frac{\partial c}{\partial z} \right)$ و انتقال $\left((w_s - w) c_a \right)$ در نزدیکی بستر می باشد. با توجه به اینکه در نزدیکی بستر گرادیان غلظت بالا بوده و به شدت تغییر می کند، نحوه ی منفصل سازی ترم پخشودگی می تواند تاثیر زیادی در محاسبات داشته باشد. از طرف دیگر ترم انتقال نیز وابسته به مقدار غلظت مبنا (c_a) می باشد که مقدار آن بسته به روش محاسبه تا حد زیادی متغیر خواهد بود. در مقابل معادله ی (۱۲) که بار معلق را نیز شامل می شود، از ترم های انتگرال گیری شده در عمق استفاده می کند و پایدارتر است.

۳. روش عددی

۱.۳. انتقال رسوب

مطابق شکل ۱ با معلوم بودن مقادیر غلظت در هر سلول محاسباتی (c_i) و مقادیر سرعت افقی در مرزهای جانبی هر سلول $(u_{i \pm 1/2})$ مقدار بار معلق در مقطع قائم مستقر بر مرز جانبی سلولها با استفاده از رابطه ی (۱) بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} q_{s,i+1/2} &= \sum_{j=noblc+1}^{ij} \left(u_{i+1/2} c_* - v_{s,i+1/2} \frac{c_{i+1} - c_i}{\Delta x_{i+1/2}} \right) \Delta z_j \\ c_* &= c_i & ; & \quad u_{i+1/2} > 0 \\ c_* &= c_{i+1} & ; & \quad u_{i+1/2} < 0 \end{aligned} \quad (13)$$



شکل ۱. شمای کلی نحوه‌ی محاسبه‌ی انتقال رسوب معلق و بار بستر

که در آن noblc تعداد سلولهای قائم قرار گرفته در لایه‌ی بار بستر، jj تعداد سلولهای شبکه در جهت قائم، $\Delta x_{i+1/2}$ متوسط بعد افقی سلولهای طرفین مرز و Δz_j متوسط بعد قائم سلول زام می‌باشد. بار بستر نیز توسط رابطه‌ی (۲) در مرکز سلولهای محاسباتی تعیین و با درونیابی خطی مقدار آن در مقطع مرزی سلولها محاسبه و به مقدار حاصل از رابطه‌ی (۱۳) افزوده می‌شود تا انتقال رسوب کل (q_t) بدست آید.

۲.۳. تغییرات تراز بستر

در هر گام زمانی مورفولوژیک معادله‌ی (۱۲) حل شده و تراز جدید بستر در هر یک گره‌های محاسباتی مستقر بر روی بستر در دو مرحله محاسبه می‌گردد. در ابتدا بر اساس انتقال رسوب در طرفین گره‌های محاسباتی بستر، یک تراز موقت جدید برای هر گره بدست می‌آید:

$$z_{b\ i}^{tmp} = z_{b\ i}^n - \frac{1}{1-p_0} \left(\frac{q_{t\ i+1/2}^n - q_{t\ i-1/2}^n}{\Delta x_i} \right) \Delta t_{morph} \quad (14)$$

که در آن $z_{b\ i}^n$ و $z_{b\ i}^{tmp}$ به ترتیب تراز جدید موقت و تراز قبلی در گره i و Δt_{morph} گام زمانی مورفولوژیک می‌باشد. در مرحله‌ی بعد ترازیهای جدید موقت بدست آمده برای گره‌های محاسباتی بستر با استفاده از تراز بستر در گره‌های اطراف و بر اساس الگوی کرنک-نیکلسون^۸ هموار می‌شوند:

$$z_{b\ i}^{n+1} = 0.5\gamma [z_{b\ i+1}^{tmp} + z_{b\ i-1}^{tmp}] + (1-\gamma)z_{b\ i}^{tmp} \quad (15)$$

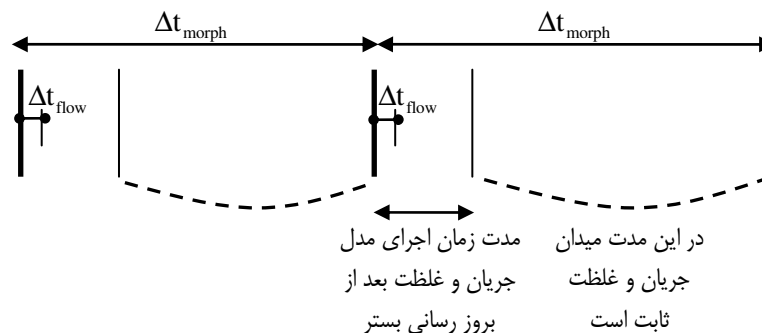
در این عبارت $z_{b\ i}^{n+1}$ تراز جدید گره i ام می‌باشد. γ ضریبی است که تعیین می‌کند تا چه اندازه از گره‌های طرفین در هموارسازی تراز گره موردنظر استفاده شود. مقدار γ و Δt_{morph} در محاسبات بر اساس سعی و خطا تعیین می‌شوند و در بخش بررسی و تایید مدل به ارزیابی تاثیر این پارامترها خواهیم پرداخت.

۳.۳. گام زمانی مورفولوژیک

اگرچه تغییرات مورفولوژیک، جریان و غلظت مستقل از هم رخ نمی‌دهند، اما به منظور به صرفه ساختن شبیه‌سازی عددی مجبوریم این روندها را بطور جداگانه شبیه‌سازی کنیم. دلیل این امر آنست که بطور کلی مقیاس زمانی پدیده‌های مورفولوژیک بسیار بزرگتر از مقیاس زمانی جریان است و میدان جریان و غلظت بسیار سریعتر تغییر می‌کنند. بنابراین می‌توان گام زمانی تغییرات مورفولوژیک را بزرگتر از گام زمانی مدل جریان و غلظت (که با معیار عدد کورانت محدود می‌شود) انتخاب نمود. ضمناً بدلیل سریع بودن تغییرات میدان جریان و غلظت، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده بعد از هر بار به روز رسانی تراز بستر، مدل جریان و غلظت به تعداد محدودی گام زمانی اجرا می‌شوند که این

⁸ Crank-Nicholson

امر هزینه‌ی محاسبات را کاهش می‌دهد. بر اساس بررسی‌های انجام شده مشخص شد که افزایش تعداد این گام‌های زمانی به بیش از ۱۰ تاثیری در دقت محاسبات تغییرات تراز بستر ندارد. همچنین در مطالعه‌ی حاضر برای به صرفه کردن محاسبات از یک گام زمانی متغیر برای تغییرات مورفولوژیک استفاده شده است.



شکل ۲. مقایسه‌ی کیفی گام‌های زمانی مدل جریان (Δt_{flow}) و گام زمانی مورفولوژیک (Δt_{morph})

گام زمانی متغیر برای تغییرات مورفولوژیک قبلاً توسط Hoffmans (1992) و Liang et al. (2004) بکار رفته است. برای اینکار گام زمانی مورفولوژیک بصورت زیر معرفی شده است (هافمن، ۱۹۹۲):

$$\Delta t_{morph} = \gamma_h \frac{h_{max}}{(\Delta z_b / \Delta t)_{max}} \quad (16)$$

که در آن γ_h ضریبی است که تعیین می‌کند حداکثر تغییرات تراز بستر در محدوده‌ی شبیه‌سازی، چه درصدی از عمق باشد. h_{max} عمق ماکزیمم و $(\Delta z_b / \Delta t)_{max}$ ماکزیمم نرخ تغییرات بستر در بین گره‌های محاسباتی می‌باشد که نرخ تغییرات هر یک توسط ترم دوم در سمت راست معادله‌ی (۱۴) بدست آمده است. بنابراین گام زمانی مورفولوژیک متناسب با تغییرات تراز بستر تغییر خواهد نمود. با توجه به آنکه در پدیده‌های مورفولوژیک معمولاً سرعت تغییرات بستر در ابتدا بیشتر است، انتظار داریم که با گذشت زمان گام زمانی مورفولوژیک افزایش یابد. این موضوع خصوصاً در شبیه‌سازی‌های آبستگي که در آنها عمق نیز افزایش می‌یابد قابل توجه است. با این حال در مطالعه‌ی حاضر نیز مشاهده شد که کاهش مخرج کسر در رابطه‌ی (۱۶) بیش از کاهش صورت کسر می‌باشد و این امر باعث می‌شود که بکارگیری گام زمانی متغیر برای تغییرات مورفولوژیک موثر و بصره باشد. مقدار γ_h در رابطه‌ی فوق با سعی و خطا تعیین می‌شود. (Liang et al. (2004) در شبیه‌سازی آبستگي زیر خط لوله این مقدار را ۰/۰۰۱ قطر لوله در نظر گرفته و Hoffmans (1992) در شبیه‌سازی آبستگي بستر مسطح آنرا از مرتبه‌ی 10^{-2} انتخاب کرده است. در مطالعه‌ی حاضر این مقدار برابر ۰/۰۱ انتخاب شده است.

۴.۳. الگوریتم محاسبات

با توجه به مسئله‌ی شبیه‌سازی شده در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا به مدل جریان و توزیع غلظت فرصت کافی داده می‌شود تا ماندگار شوند. این زمان در مقایسه با مدت زمان لازم برای تغییرات مورفولوژیک ناچیز است. ادامه‌ی محاسبات را می‌توان به مراحل تقسیم نمود:

- ۱) مدل جریان و توزیع غلظت به تعداد مشخصی گام زمانی (در اینجا ۱۰) اجرا می‌شوند.
- ۲) با استفاده از نتایج آخرین گام زمانی میدان جریان و غلظت از مرحله‌ی قبلی، بار بستر و بار معلق در هر مقطع محاسبه می‌گردند.
- ۳) ترازهای جدید بستر در گره‌های محاسباتی با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود.
- ۴) محیط جدید شبیه‌سازی شبکه بندی می‌شود.
- ۵) محاسبات از مرحله‌ی ۱ تکرار می‌شود تا هنگامی که زمان اتمام شبیه‌سازی فرا رسد.

۴. ارزیابی مدل

۱.۴. مشخصات آزمایش

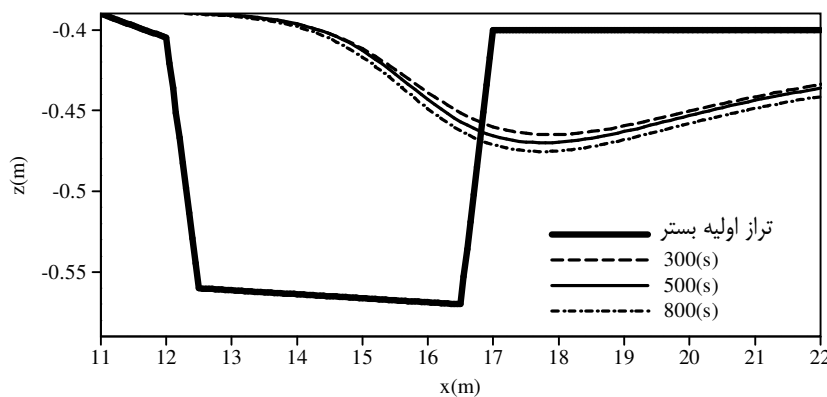
با توجه به اینکه مدل‌های جریان و توزیع غلظت قبلاً توسط Ahmadi et al. (2007) و ابراهیمی و بدیعی (۱۳۸۶) ارزیابی و تایید شده‌اند، در این بخش صرفاً به ارائه‌ی نتایج مدل مورفولوژی پرداخته می‌شود. برای ارزیابی قابلیت مدل در شبیه‌سازی رسوبگذاری و جابجایی ترانشه، سه

تست آزمایشگاهی که قبلاً توسط Van Rijn (1987) انجام شده، توسط مدل شبیه سازی شده اند. عمق و سرعت متوسط جریان در بالادست هر سه ترانشه به ترتیب برابر 0.39m و 0.51m/s بوده و عمق ترانشه‌های حفر شده برابر 0.170m، 0.175m و 0.150m می باشد. شیب دیواره های جانبی ترانشه ها نیز به ترتیب 1:3، 1:7 و 1:10 می باشد. قطرهای مشخصه ی مصالح بستر به ترتیب $d_{50} = 160\mu\text{m}$ و $d_{90} = 200\mu\text{m}$ می باشد. دمای آب 15°C و سرعت سقوط پیشنهادی فن راین برابر $w_s = 0.013\text{m/s}$ (با ۲۵٪ خطا) می باشد. لزجت سینماتیکی آب در دمای فوق برابر $\nu = 1.14 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ می باشد. در آزمایشات انجام شده توسط Van Rijn (1987) برای آنکه هیچ گونه فرسایش یا رسوبگذاری در بالادست ترانشه رخ ندهد، رسوب با نرخ ثابت 0.04kg/ms (با ۱۰٪ خطا) از بالادست وارد شده است. بر اساس اندازه گیری های مقطع بالادست، 0.03kg/ms از این مقدار بار معلق (با خطای ۲۵٪) و بقیه بار بستر بوده است. فرمهای بستر با ارتفاع $0.015 \sim 0.035\text{m}$ و طول $0.1 \sim 0.25\text{m}$ در بالادست ترانشه مشاهده شده اند و فن راین در این تست زبری بستر را برابر 0.025m پیشنهاد داده است.

طول محدوده ی شبیه سازی عددی برابر ۳۵ متر در نظر گرفته شده که حدود ۱۲ متر در بالادست ترانشه و ۱۸ متر نیز در پایین دست ترانشه واقع شده است. بنا به پیشنهاد فن راین از مقدار $a = 0.0125\text{m}$ برای تراز مبنا استفاده شده است. مقدار Δx در محدوده ی شبیه سازی بین 0.1m و 0.2m تغییر کرده و از ۲۰ لایه با ضخامت متغیر در عمق استفاده شده است. در شبیه سازی های انجام شده مشخص شد که ضریب γ تاثیر چندانی در محاسبات ندارد و مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته شد. در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر نتایج پرداخته شده است.

۲.۴. ماکزیمم گام زمانی مورفولوژیک

بر اساس تستهای انجام شده مشخص شد در صورتی که گام زمانی مورفولوژیک محدود نشود، در طی شبیه سازی دائماً افزایش پیدا می کند و این امر باعث ایجاد نوسانات عددی بر روی تراز بستر می شود. برای جلوگیری از این مشکل، گام زمانی مورفولوژی به مقدار ماکزیمی محدود شده، که تاثیر آن در شکل ۳ دیده می شود. همانطور که ملاحظه می شود افزایش ماکزیمم گام زمانی منجر به کاهش رسوبگذاری و افزایش ماکزیمم عمق نهایی می شود. بنابراین تعیین مناسب مقدار این پارامتر بر انطباق مقادیر محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی تاثیر خواهد داشت.

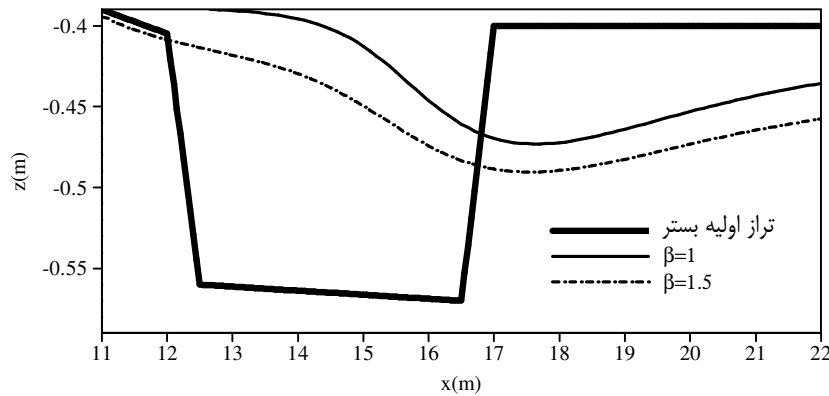


شکل ۳. تاثیر ماکزیمم گام زمانی مورفولوژیک بر تغییرات تراز بستر

۳.۴. ضریب β

این ضریب بیانگر نسبت ضریب اختلاط رسوب به لزجت گردابه ای^۹ آب می باشد و در مدل توزیع غلظت در کل محدوده ی شبیه سازی ثابت در نظر گرفته شده است. افزایش این ضریب مقدار دیفیوژن قائم و نتیجتاً مقادیر غلظت در عمق را افزایش می دهد. در شکل ۴ تاثیر کلی این پارامتر بر تغییرات تراز بستر نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، افزایش ضریب β باعث می شود میزان رسوبگذاری در بالادست کاهش و میزان فرسایش در پایین دست افزایش یابد. دلیل این اختلاف مربوط به تاثیر β بر مقدار انتقال رسوب می باشد. به عبارت دیگر کاهش β باعث می شود انتقال رسوب در محدوده ی کف ترانشه و بالادست آن بیش از سایر نقاط کاهش یابد و نتیجتاً رسوبگذاری بیشتری در این محدوده رخ دهد.

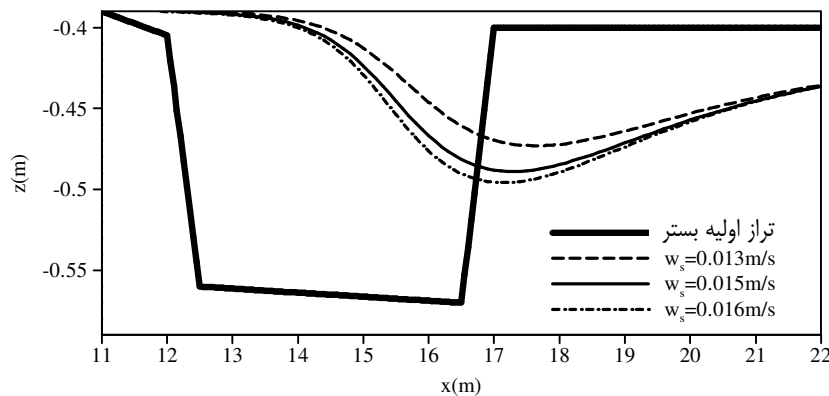
^۹ Eddy viscosity



شکل ۴. تاثیر مقدار ضریب β بر تغییرات پروفیل بستر ترانشه

۴.۴. سرعت سقوط w_s

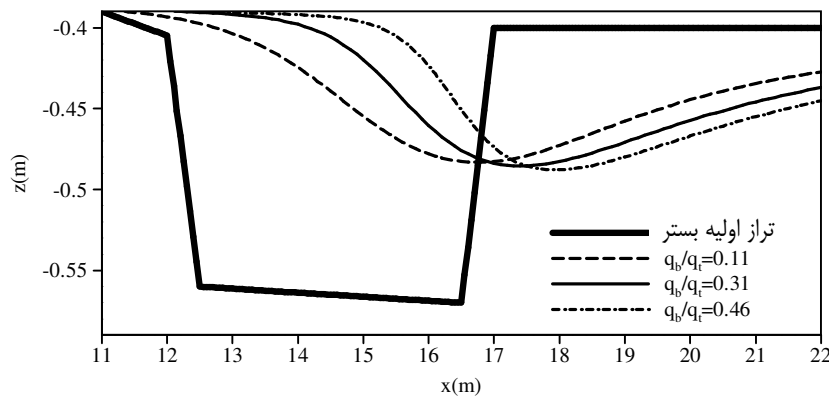
افزایش سرعت سقوط در مدل توزیع غلظت باعث افزایش انتقال رو به پایین غلظت و نتیجتاً کاهش مقدار غلظت در عمق می شود. بنابراین انتظار داریم که این پارامتر بر تغییرات پروفیل بستر نیز موثر باشد. در شکل ۵ پروفیل های بستر در سه حالت محدودده ی میانی ترانشه شده است. $w_s = 0.013, 0.015, 0.016 \text{ m/s}$ با هم مقایسه شده اند. ملاحظه می شود که افزایش سرعت سقوط منجر به کاهش رسوب گذاری در



شکل ۵. تاثیر مقدار سرعت سقوط بر تغییرات پروفیل بستر ترانشه

۵.۴. بار بستر و بار معلق

بر اساس اندازه گیری های آزمایشگاهی بار رسوبی وارد از بالادست برابر 0.04 kg/ms (با 10% خطا) بوده که از این مقدار 0.03 kg/ms سهم بار معلق (با 25% خطا) و بقیه مربوط به بار بستر بوده است. بنابراین نحوه ی اعمال این شرط مرزی در بالادست می تواند در نتایج تاثیرگذار باشد. در شکل ۶ تاثیر سهم بار بستر از بار کل بر تغییرات پروفیل بستر نشان داده شده است. این نسبتها با تغییر در ضرایب محاسبه ی بار بستر و غلظت مینا (که منجر به تغییر بار معلق می شود) بدست آمده اند. ملاحظه می شود که با افزایش سهم بار بستر میزان رسوبگذاری در بالادست، فرسایش در پایین دست و سرعت جابجایی ترانشه افزایش یافته است و این امر نشانگر اهمیت دقت در تعیین سهم بار معلق و بار بستر از بار کل می باشد.



شکل ۶. تاثیر نسبت بار بستر به بار کل بر تغییرات پروفیل بستر ترانشه

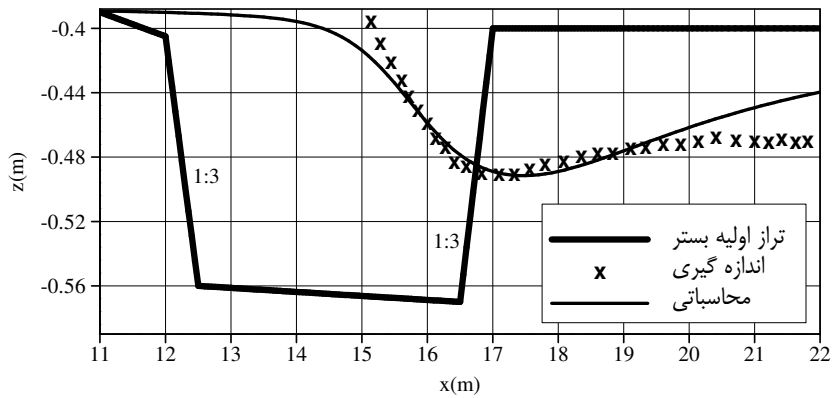
۶.۴. ارزیابی و تایید مدل

بر اساس تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای مختلف، سرعت سقوط در مدل توزیع غلظت برابر 0.016 m/s در نظر گرفته شد. ضرایب محاسبه‌ی غلظت مینا و بار بستر نیز طوری کالیبره شدند که بار معلق و بار بستر در بالادست به ترتیب برابر $q_b = 0.014 \text{ kg/ms}$ و $q_s = 0.023 \text{ kg/ms}$ بدست آیند. بنابراین بار کل $q_t = 0.037 \text{ kg/ms}$ خواهد بود که در محدوده‌ی اندازه‌گیری شده $(q_t = 0.04 \pm 0.004 \text{ kg/ms})$ قرار می‌گیرد. مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بعد از ۱۵ ساعت در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل توانسته پدیده‌ی رسوبگذاری در ترانشه و جابجایی آن را به خوبی شبیه‌سازی کند. الگوی رسوبگذاری بخوبی شبیه‌سازی شده است و مقادیر تراز بستر در محدوده‌ی میانی ترانشه انطباق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. بیشترین اختلاف در محدوده‌ی شبیه‌ها دیده می‌شود. اختلاف موجود در پایین دست، با کاهش شیب ترانشه کاهش یافته و این می‌تواند به دلیل افزایش دقت مدل جریان با کاهش شیب باشد. با این حال ترازهای بستر در بالادست مقداری با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اختلاف دارد.

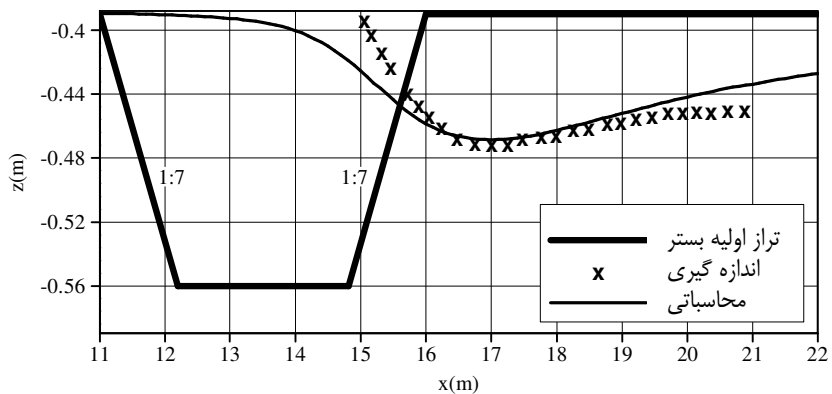
۵. نتیجه‌گیری

با استفاده از یک مدل عددی، پدیده‌ی رسوبگذاری در ترانشه و جابجایی آن در میدان جریان دو بعدی قائم شبیه‌سازی شده و نتایج تغییرات تراز بستر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. بار بستر با استفاده از روابط تجربی و بار معلق بر اساس محاسبات مدل توزیع غلظت و با انتگرال‌گیری در عمق محاسبه شده است. تغییرات تراز بستر با حل معادله‌ی بقای جرم رسوب در عمق محاسبه شده است. برای کاهش حجم محاسبات، در بخش مورفولوژی از یک گام زمانی متغیر مبتنی بر تغییرات تراز بستر استفاده شده است و بعد از هر بار به روز رسانی بستر، مدل‌های جریان و غلظت به تعداد محدودی گام زمانی اجرا شده‌اند. بر اساس نتایج عددی بدست آمده نکات زیر قابل توجه است:

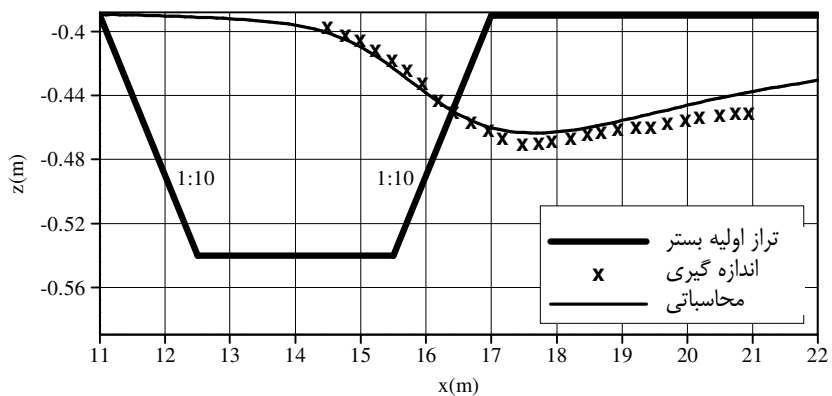
- (۱) زیرمدل مورفولوژی الگوی کلی تغییرات تراز بستر را بخوبی شبیه‌سازی می‌کند. این نکته نشان می‌دهد که مدل قابلیت شبیه‌سازی رسوبگذاری و جابجایی ترانشه را دارد.
- (۲) تغییرات تراز بستر محاسبه شده توسط مدل عددی در بالادست و پایین دست محدوده‌ی شبیه‌سازی، که بر روی شبیه‌های اولیه‌ی ترانشه می‌باشد، با مقادیر آزمایشگاهی اختلاف دارد. این امر ناشی از خطاهای موجود در زیر مدل‌های جریان و توزیع غلظت می‌باشد. مدل جریان در محدوده‌ی شبیه‌های تند مقداری از دقت خود را از دست می‌دهد. خطای زیر مدل توزیع غلظت نیز ناشی از عدم تخمین دقیق غلظت مینا در نقاطی که جریان غیر یکنواختی زیادی دارد، می‌باشد. بنابراین بکارگیری روشهای دقیقتر برای محاسبه‌ی غلظت مینا در جریان‌های غیر یکنواخت توصیه می‌شود.
- (۳) با کاهش شبیه‌های جانبی ترانشه دقت کلی مدل در شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل افزایش دقت مدل جریان باشد.
- (۴) اعمال دقیق شرایط مرزی از قبیل مقادیر غلظت ورودی و بار بستر در بالادست تاثیر قابل توجهی در نتایج دارد. بنابراین وجود اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و میدانی دقیق، و یا روشهای تخمین مناسب برای تعیین شرایط مرزی ضروری به نظر می‌رسد.



الف) ترانشه با شیب 1:3 و عمق متوسط 0.565m



ب) ترانشه با شیب 1:7 و عمق 0.56m



ج) ترانشه با شیب 1:10 و عمق 0.54m

شکل ۷. مقایسه ی تراز های بستر شبیه سازی شده با اندازه گیری های آزمایشگاهی بعد از ۱۵ ساعت

مراجع:

- Van Rijn, L.C. (1987): Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Delft Hydrul. Commun. 382.
- Jensen, J.H., Fredsøe, J. (2001): Sediment transport and Backfilling of trenches in oscillatory flow. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Sep-Oct 2001, 272-281.
- Liang, D., Cheng, L., Yeow, K. (2005): A numerical model for natural backfill of pipeline trenches subjected to unidirectional/oscillatory flows. China Ocean Engineering, 19 (2), 269-286.
- Ahmadi, A., Badieli, P., Namin, M.M. (2007): An implicit two-dimensional non-hydrostatic model for free-surface flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids 54 (9), 1055.
- ابراهیمی، بدیعی، (۱۳۸۶): شبیه سازی عددی انتقال رسوب در شرایط غیر ماندگار با تغییرات سریع در یک میدان جریان دو بعدی قائم، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ۱۳۸۶.
- Van Rijn, L.C. (2006): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas (Part II), Aqua Publication, Amsterdam, Netherlands.

Archive of SID

- Cheng, N.S. (2004): Closure to 'Exponential formula for bedload transport', *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130 (5), 474.
- Brørs, B. (1999): Numerical modeling of flow and scour at pipelines, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASC, 125 (5), 511 –523.
- Li, F. (2001): Local scour around offshore pipelines, PhD thesis, the University of Western Australia, Crawley, Australia.
- Hoffmans, G.J.C.M. (1992): Two Dimensional Mathematical Modelling of Local Scour Holes, PhD dissertation, Communication No.92-7, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft.
- Liang, D., Cheng, L., Li, F. (2004): Numerical Modeling of Flow and Scour below a Pipeline in Currents, Part II. Scour Simulation, *Coastal Engineering*, 52 (1), 43-62.



A TWO-DIMENSIONAL VERTICAL (2DV) NUMERICAL MODEL FOR SIMULATION OF TRENCHES

P. Badieli, University of Tehran

M. Ebrahimi, University of Tehran

Abstract

Accurate estimation of sedimentation rate in the ports' entrance channels, which affects the costs of dredging operations, is a challenging task for coastal engineers. Moreover, assessment of backfilling rates in trenches dredged for pipelines or cables is an issue of interest for marine environment engineers. Accurate prediction of this phenomenon will result in the better design and maintenance of these channels. Numerical simulation is a common and efficient technique for prediction of sedimentation and erosion in trenches. Over last decades, lots of numerical models have been developed to study the sediment transport process in trenches and channels. Nevertheless, a few of these models have addressed sedimentation and morphological changes. Van Rijn (1987) modeled trench migration using SUTRENCH numerical model, which consists of velocity and sediment mixing coefficient profiles calibrated by experimental data and results of $k - \epsilon$ model. Solving 2-D Navier-Stokes equations, Jensen and Fredsøe (2001) simulated backfilling of trenches in oscillatory flow. In a similar study, Liang et al. (2005) simulated backfill of pipeline trenches in both steady and oscillatory flows.

Keywords: *estimation, sedimentation rate, erosion*