

# مقایسه معیارهای قطعی و غیرقطعی آغاز حرکت ذرات رسوب دانه‌ای در حوضچه‌های جزر و مدی

حنیفه ایمانیان<sup>۱</sup>، مرتضی کلاهدوزان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\* تهران، خیابان حافظ، شماره ۴۲۴

mklhdzan@aut.ac.ir

**چکیده-** در این مقاله، نوعی مدل عددی دو بعدی افقی برای پیش‌بینی تغییرات ریخت‌شناسانه در حوضچه‌های جزر و مدی با در نظر گرفتن معیارهای مختلف آغاز حرکت ذرات رسوب، ارائه شده است. معادلات حاکم، شامل معادلات بقای جرم و مومنت برای هیدرودینامیک، معادله انتقال جرم برای بار معلق و معادله بقای جرم برای تغییرات تراز بستر، با استفاده از روش تفاضل محدود در حالت ضمنی منقطع شده و با الگوریتم ADI<sup>۱</sup> حل شده است. مدل عددی دربرگیرنده سه معیار Shields (1936)، Kolahdoozan (1999) و Zanke (2003) برای شروع حرکت ذرات است. علاوه بر روش قطعی، به علت آشفتگی جریان و طبیعت تصادفی مؤلفه‌های آن، فرایند انتقال رسوب با استفاده از روش غیرقطعی نیز محاسبه شده است. برای واسنجی مدل عددی، از مقادیر اندازه‌گیری شده تغییرات تراز بستر در یک بندرگاه استفاده شده است. نتایج محاسباتی با معیارهای مختلف آغاز حرکت ذرات، نشانگر آن است که در شروع حرکت ذرات رسوب در حوضچه‌های جزر و مدی، اثر پارامترهای حاصل از غیرماندگاری جریان، بر اثر پارامترهای حاصل از آشفتگی جریان غلبه دارد.

**کلید واژگان:** آغاز حرکت ذرات رسوب، مدل‌سازی عددی، انتقال رسوب، مدل‌سازی قطعی و غیرقطعی.

## ۱- مقدمه

یکی از اولین و مهمترین بخشهای مدل‌سازی فرایند انتقال رسوب، معرفی شرایط بحرانی است که منجر به حرکت ذرات رسوب می‌شود. از آنجا که عوامل گوناگونی مانند آشفتگی جریان، غیرماندگاری جریان، اندازه، شکل و موقعیت ذرات رسوب بر فیزیک این پدیده تأثیر

می‌گذارد، پژوهشگران مختلفی مانند Shields (1936)، White (1940)، Gessler (1971)، Delft Hydraulics (1972)، Graf and Paris (1977)، Kolahdoozan (1999)، Hager and Oliveto (2002) و Aguirre-pe et al. (2003) معیارهای متفاوتی را برای آغاز حرکت ذرات رسوب

1. Alternating Direction Implicit

از طرفی در جریان‌های غیرماندگار مانند جریان‌های جزر و مدی، نه تنها نیروهای وارد شده به ذرات ناشی از حرکت سیالات (مانند سرعت) اهمیت دارند، بلکه تغییرات زمانی آنها نیز دارای اهمیت است. به همین دلیل در معیار شروع به حرکت ذرات رسوب، این تغییرات نیز باید مد نظر قرار گیرد (Kolahdoozan, 1999).

در این مطالعات سعی شده معیارهای مختلف آغاز حرکت رسوب، با هر دو روش قطعی و غیرقطعی، در نوعی حوضچه جزر و مدی ایده‌آل، برای شناسایی این پدیده مهم - که انتقال رسوب در این حوضچه‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد - مقایسه شود. به همین منظور معیار معروف Shields (1936) برای آغاز حرکت ذرات رسوب، معیار (Kolahdoozan (1999) مخصوص آغاز حرکت ذرات رسوب در جریان‌های غیرماندگار جزر و مدی و معیار Zanke (2003) که نقش نوسانهای پارامترهای جریان بر اثر آشفتگی را در نظر می‌گیرد، انتخاب شده است.

در ادامه بحث، معیارهای بالا شرح داده شده و پارامترهای مهم هر یک معرفی می‌شوند. سپس مدلی عددی با توجه به معیارهای مختلف شروع حرکت رسوبها، توسعه داده شده و نتایج به دست آمده از آن در شرایط مختلف هیدرولیکی، با اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی موجود برای حوضچه‌های جزر و مدی مقایسه میشوند.

## ۲- آغاز حرکت ذرات رسوب

ذرات رسوب زمانی شروع به حرکت می‌کنند که تنش برشی جریان از مقدار بحرانی آن بیشتر شود یا نیروی لحظه‌ای جریان از نیروی مقاوم لحظه‌ای که ناشی از اصطکاک و وزن ذرات است، بیشتر شود (van Rijn, 1993). طبیعت متغیر نیروهای جریان و

معرفی کرده‌اند. (van Rijn, 1993; Kolahdoozan, 1999; Hager and Oliveto, 2002; Aguirre-pe at al., 2003) از نظر بسیاری از محققان، آغاز حرکت ذرات رسوب پدیده‌ای قطعی<sup>۱</sup> و مشخص است و تنش برشی متوسط در زمان، به‌عنوان معیاری برای شروع حرکت ذرات در نظر گرفته می‌شود. Shields (1936) یکی از پیشگامان در این زمینه بود که با اندازه‌گیری میزان رسوبهای منتقل شده در مقادیر مختلف تنش برشی و با روش برونیایی، تنش برشی بحرانی را برای شرایطی که نرخ انتقال رسوب صفر باشد، معرفی کرد.

سپس پژوهشگران دیگری مانند White (1940), Kalinske (1947), Jppen and Verma (1953), Lane (1953), Bogardi (1965), Shulits & Hilt (1986) و Gessler (1971) نتیجه تحقیقات خود را در زمینه شروع حرکت ذرات رسوب منتشر کردند (Van Rijn, 1993) و (Kolahdoozan, 1999).

در مقابل این دیدگاه، بعضی پژوهشگران مانند van Rijn (1993), Cheng and Chiew (1999), Pilotti and Papanicolau et al. (2002), Mendoni (2001), Kleinahns and van Rijn (2002) و Zanke (2003) عقیده دارند که آغاز حرکت رسوبها، طبیعتی آماری<sup>۲</sup> دارد و نمی‌توان آن را مانند پدیده‌ای قطعی در نظر گرفت. بر طبق این نظریه، با توجه به نوسانهای پارامترهای جریان، تنشهای آشفتگی مسؤوول حرکت اولیه ذرات رسوب هستند و این باید در هر نوع رابطه‌ای مد نظر قرار گیرد. به این منظور معمولاً پارامترهای هیدرودینامیکی لحظه‌ای را با توزیعهای آماری آنها جایگزین کرده و رابطه معیار آغاز حرکت ذرات با چشم‌پوشی از اثر متقابل مؤلفه‌های نوسانی، ساده‌سازی می‌شود (Papanicolau et al., 2002).

1. Deterministic  
2. Stochastic

از آنجا که هدف اصلی این مطالعه بررسی تغییرات بستر در حوضچه‌های جزر و مدی است، تغییرات زمانی پارامترها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین معیار دیگری در مدل عددی به کار گرفته شده که معیار کلاهدوزان است که طبیعت غیر ماندگار جریان را با استفاده از قانون دوم نیوتون و تقسیم نیروی محرک به دو مؤلفه ماندگار و غیر ماندگار، در نظر گرفته است. بر اساس تحقیقات انجام شده پارامتر حرکت بحرانی به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (Kolahdoozan, 1999):

$$\theta_{cr} = \frac{4}{3} \frac{g}{C^2(L_1 C_D + L_3 C_L)} \left\{ - \left[ - \frac{A_w}{\omega^2} \sin(\omega t + \phi) + u \frac{\partial u}{\partial x} \right] (L_3 \sin \psi + L_1 \cos \psi) + L_2 \right\} \quad (2)$$

که در آن  $C$  ضریب شزی،  $C_D, C_L$  به ترتیب ضرایب و لیفت و درگ،  $A_w$  دامنه موج جزر و مد،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای،  $t$  زمان،  $\phi$  تأخیر فاز،  $u$  سرعت متوسط در زمان،  $\psi$  زاویه بین جهت نیرو و بستر مسطح،  $\phi$  زاویه استقرار ذرات رسوب و  $L_1, L_2, L_3$  ضرایب معادله است. مطالعات سالهای اخیر نشان داده که طبیعت تصادفی ساختار آشفته‌گی نزدیک بستر، مسؤوول حرکت ذرات رسوب است. معیار معرفی شده توسط زنک با تقسیم تنش برشی مؤثر به دو بخش متوسط در زمان و نوسانهای اضافی و جایگزینی نوسانها با توزیع احتمالی نرمال، اثر آشفته‌گی را در نظر گرفته است. در این حالت پارامتر حرکت بحرانی عبارت است از (Zanke, 2003):

$$\theta_{cr} = \frac{0.7 \operatorname{tg} \left( \frac{\phi}{1.5} \right) k}{\left( 1 + 1.8 \frac{u'_{rms,b}}{u_b} \right)^2 \left( 1 + 0.4 \left( 1.8 \frac{u'_{rms,b}}{u_*} \right)^2 \operatorname{tg} \left( \frac{\phi}{1.5} \right) k \right)} \quad (3)$$

که در آن  $k$  اثر چسبندگی بین ذرات است:

نیروهای مقاوم، تعریف تنش برشی بحرانی شروع حرکت ذرات رسوب را پیچیده ساخته است؛ به‌گونه‌ای که هر یک از محققان به تعداد محدودی از پارامترهای مرتبط توجه کرده و در این راستا معیار خاصی را ارائه کرده‌اند.

همان‌گونه که در مقدمه گفته شد، برای ارائه تخمینی مناسب از تغییرات تراز بستر در حوضچه جزر و مدی، سه معیار معروف آغاز حرکت انتخاب شده و در زیر مدل انتقال رسوب مدل عددی به‌کار گرفته شده است. در هنگام انتخاب معیارها سعی شده با توجه به هدف تحقیق - که انتقال رسوب در آبهای جزر و مدی است - از هر دیدگاه شاخص در این زمینه، نمونه‌ای به‌عنوان معیار آورده شود.

یکی از اولین و پرکاربردترین معیارها، معیار شیلدز است که با فرض نرخ انتقال رسوب صفر در تنش برشی بحرانی به‌دست آمده است. حاصل این کار، منحنی شیلدز است که پس از تقسیم‌بندی به محدوده‌های مختلف، به‌صورت زیر نوشته می‌شود (van Rijn, 1993):

$$\begin{aligned} \theta_{cr} &= 0.24 D_*^{-1} & 1 < D_* \leq 4 \\ \theta_{cr} &= 0.14 D_*^{-0.64} & 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr} &= 0.04 D_*^{-0.1} & 10 < D_* \leq 20 \\ \theta_{cr} &= 0.013 D_*^{0.29} & 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr} &= 0.055 & 150 < D_* \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\theta_{cr}$  پارامتر حرکت بحرانی (بدون بعد) و  $D_*$  قطر بدون بعد ذره است.

با وجود آنکه معیار شیلدز به طور گسترده‌ای استفاده شده، تحقیقات پژوهشگرانی مانند (Grass, Gessler (1965), (1970), (1970), Paintal (1971), Delft Hydraulics (1972), Bathurst et al. (1982) نشان می‌دهد مقدار قابل توجهی از ذرات رسوب در تنشهای برشی بسیار کمتر از حد بحرانی معرفی شده توسط این معیار نیز حرکت می‌کنند ((van Rijn, 1993), Bathurst et al., 1982).

امواج جزر و مدی، می توان توزیع فشار هیدرولیکی را در جهت عمودی هیدروستاتیک فرض کرد. بر طبق این فرض، شتاب عمودی جریان باید بسیار کمتر از شتاب ثقل باشد. از آنجا که می توان فرض کرد در خورها و مناطق ساحلی (حوضچه های جزر و مدی) سیال به خوبی همگن است، لذا چگالی آب در محدوده مورد نظر ثابت فرض می شود. با وارد کردن این فرضها، معادلات متوسط گیری شده در عمق بقای جرم و مومتم برای آبهای کم عمق به صورت زیر نوشته می شود (Lin and Falconer, 1997):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta U^2 H) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta UVH) = fVH - gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{xz_s}}{\rho} - \frac{\tau_{xz_b}}{\rho} + \bar{v}' H \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta UVH) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta V^2 H) = -fUH - gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{yz_s}}{\rho} - \frac{\tau_{yz_b}}{\rho} + \bar{v}' H \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] \quad (12)$$

که در آن  $t$  زمان،  $V, U$  مؤلفه های سرعت متوسط در عمق به ترتیب در جهتهای  $x$  و  $y$ ،  $k$  تراز سطح آب،  $H$  عمق آب،  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی آب،  $f$  ضریب کوریولیس،  $g$  شتاب جاذبه و  $\tau_{yz_s}, \tau_{xz_s}$  مؤلفه های تانسور تنش به ترتیب در صفحه های  $x-z$  و  $y-z$  است.

### ۳-۲- معادلات انتقال رسوب

در مدل انتقال رسوب زیر، هر دو نوع انتقال بار معلق و بار بستر در نظر گرفته شده است. برای تخمین چگالی رسوبهای معلق در خورها و آبهای ساحلی، معمولاً از

$$k = 1 + \frac{3 \times 10^{-18} (kg/m)}{(\rho_s - \rho) d^2}$$

و سایر نسبتهای موجود در معادله به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{u'_{rms,b}}{u_b} = \frac{u'_{rms,b}/u_*}{u_b/u_*} \quad (4)$$

$$\frac{u'_{rms,b}}{u_*} = 0.31 k_s^+ e^{-0.1 k_s^+} + 1.8 e^{-0.88 \frac{d}{H}} \left( 1 - e^{-0.1 k_s^+} \right) \quad (5)$$

$$\frac{u_b}{u_*} = 0.8 + 0.9 \frac{u_{k_s}}{u_*} \quad (6)$$

$$\frac{u_{k_s}}{u_*} = \left[ \frac{e^{-0.08 k_s^+}}{k_s^+{}^2} + \frac{1 - e^{-0.08 k_s^+}}{B^2} \right]^{-0.5} \quad (7)$$

$$B = 2.5 \ln \left[ \frac{1}{0.033 + \frac{0.11}{k_s^+}} \right] \quad (8)$$

$$k_s^+ = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (9)$$

که در آن  $d$  قطر ذرات رسوب،  $H$  عمق آب،  $u'_{rms}$  انحراف معیار توزیع سرعت،  $u_b$  سرعت متوسط در زمان در بستر،  $u_*$  سرعت برشی برابر  $\frac{\sqrt{g\bar{u}}}{c'}$ ،  $\bar{u}$  سرعت متوسط در عمق جریان،  $c'$  ضریب شزی دانه های در بستر،  $18 \log \left( \frac{12h}{3D_{90}} \right)$ ،  $k_s$  ارتفاع زبری بستر،  $u_{k_s}$  سرعت در فاصله زبری معادل بستر و  $\nu$  لزجت سینماتیک است.

## ۳- مدل سازی ریاضی و شبیه سازی عددی

### ۳-۱- معادلات هیدرودینامیک

معادلات حاکم برای توصیف توزیع سرعت در خورها و آبهای ساحلی معمولاً بر پایه معادلات سه بعدی رینولدز در جریانهای آشفتنه، غیر ماندگار و تراکم ناپذیر استوار است. در مدل های دو بعدی افقی برای آبهای کم عمق و

که در آن  $S_b$  بار بستر،  $T$  مرتبه انتقال برابر متوسط گیری شده در عمق را می توان به صورت زیر نوشت (Kolahdoozan, 1999):

$$\frac{\partial SH}{\partial t} + \frac{\partial(HUS)}{\partial x} + \frac{\partial(HVS)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( H(\varepsilon_{s,x} + \varepsilon_{D,x}) \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H(\varepsilon_{s,y} + \varepsilon_{D,y}) \frac{\partial S}{\partial y} \right) + E$$

که در آن  $S$  غلظت متوسط در عمق رسوبها و  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  ضرایب اختلاط رسوب به ترتیب در جهات  $x$  و  $y$  است.

معادله انتقال-انتشار استفاده می شود. معادله انتقال-انتشار متوسط گیری شده در عمق را می توان به صورت زیر نوشت (Kolahdoozan, 1999):

$$\frac{\partial SH}{\partial t} + \frac{\partial(HUS)}{\partial x} + \frac{\partial(HVS)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( H(\varepsilon_{s,x} + \varepsilon_{D,x}) \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H(\varepsilon_{s,y} + \varepsilon_{D,y}) \frac{\partial S}{\partial y} \right) + E$$

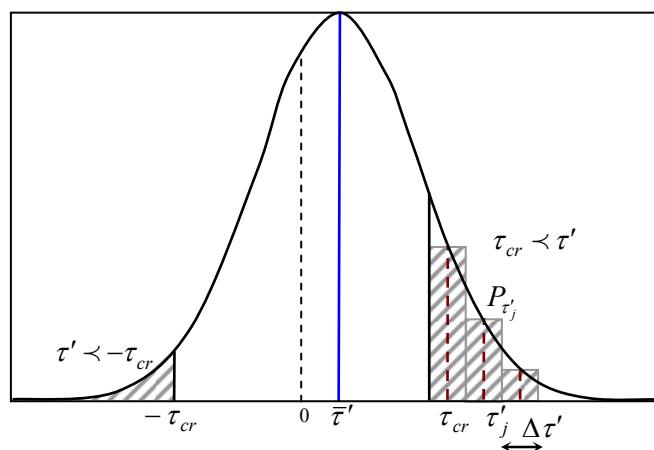
(۱۳)

که در آن  $S$  غلظت متوسط در عمق رسوبها و  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  ضرایب اختلاط رسوب به ترتیب در جهات  $x$  و  $y$  است.

### ۳-۲-۱-۲-۲-۲ روش غیرقطعی

به طور کلی از آنجا که روشهای غیرقطعی محاسبه بار بستر، به طبیعت تصادفی آشفتگی در نیروهای وارد بر ذرات از طرف جریان توجه دارند، از روشهای قطعی به واقعیت نزدیک ترند (Kolahdoozan, 1999). با فرض توزیع نرمال برای تابع چگالی احتمال تنش برشی ذره رسوب (شکل ۱) (Kleinhans and van Rijn, 2002) نوعی تخمینگر غیرقطعی را برای بار بستر پیشنهاد کردند:

$$P_{\tau'_j} = \Delta \tau' \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\tau'}}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\tau'_j - \bar{\tau}'}{\sigma_{\tau'}} \right)^2 \right] \quad (15)$$



شکل ۱ توزیع آماری نرمال

### ۳-۲-۱-۲-۳ معادلات بار بستر

#### ۳-۱-۱-۲-۳ روش قطعی

از میان روابط ارائه شده برای محاسبه بار بستر، رابطه van Rijn (1984) که تابعی از شرایط جریان و خصوصیات رسوب است (Kleinhans and van Rijn, 2002)، در حوضچه های جزر و مدی با موفقیت به کار برده شده است (Lin and Falconer, (Kolahdoozan, 1999), 1997).

$$S_b = 0.1 \sqrt{(s-1)g} \cdot d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{1.5} \quad (14)$$

که در آن  $\varepsilon_{s,x}$ ,  $\varepsilon_{s,y}$  ضرائب اختلاط رسوب به صورت ثابت در افق بوده و با استفاده از پیشنهاد Rutherford (1994) به صورت زیر با لزجت گردابه ای مرتبط شده است (Kolahdoozan, 1999).

$$\varepsilon_s = \beta' \varphi' v_t \quad (22)$$

که در آن  $\beta'$  نشانگر تفاوت انتشار ناشی از آشفتگی ذرات سیال و ذرات رسوب،  $\varphi'$  اثر رسوبها بر ساختار آشفتگی جریان و  $v_t$  لزجت گردابه ای است.

### ۳-۴- روش حل عددی

برای هر دو بخش هیدرودینامیک و انتقال رسوب از مدل دو بعدی در عمق DIVAST که Falconer (1976) پیشنهاد کرده و Lin and Falconer (1997) توسعه داده اند، استفاده شده است. در بخش هیدرودینامیک، معادلات پیوستگی و مومتم متوسط گیری شده در عمق حل می شود تا تراز سطح آب و میدان سرعت در محدوده محاسباتی مشخص گردد. برای حل مجموعه معادلات جبری به دست آمده از روش تفاضل محدود ADI استفاده شده است.

از آنجا که دقت تخمین شار رسوبها برای تخمین تغییرات تراز بستر اهمیت دارد، بهتر است از روشی با دقت بالا برای حل معادلات انتقال رسوب استفاده شود. از آنجا که در خورها و آبهای ساحلی جملات انتقال (با مرتبه  $\Delta x^{-1}$ ) بر جملات انتشار (با مرتبه  $\Delta x^{-2}$ ) غالب هستند، به ویژه برای این بخش از معادله، مهم است که از روش دقیق تری برای گسسته سازی معادله انتقال-انتشار استفاده شود. بر پایه مطالعات انجام شده توسط Cahyono (1992) روش ULTIMATE که اولین بار از سوی Leonard (1991) پیشنهاد شد، گزینه مناسبی به نظر می رسد. Lin and Falconer (1997) در مطالعه ای که برای

که در آن  $\tau'_j$  تنش برشی دانه ای بستر در بازه زام،  $\bar{\tau}'$  میانگین تنش برشی بستر،  $\sigma_{\tau'}$  انحراف معیار تنش برشی و  $P_{\tau'_j}$  احتمال آماری در بازه زام است.

در نتیجه بار بستر را می توان با انتگرال گیری روی تابع چگالی احتمال در محدوده  $|\tau'_j| > |\tau_{cr}|$  به دست آورد (شکل ۱). این انتگرال به شکل زیر نوشته می شود:

$$\Phi = \int_{-\infty}^{-\tau_{cr}} T_j^{1.5} P_{\tau'_j} d\tau_j + \int_{\tau_{cr}}^{+\infty} T_j^{1.5} P_{\tau'_j} d\tau_j \quad (16)$$

$$T_j = \frac{\tau'_j - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (17)$$

که در آن  $T_j$  مرتبه انتقال در بازه زام است.

در نتیجه تخمینگر بار بستر غیرقطعی به دست می آید:

$$S_b = 0.1 \sqrt{(s-1)g} D_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} \Phi \quad (18)$$

### ۳-۳- معادلات تغییرات تراز بستر

از نظر ریاضی، تغییرات تراز بستر را می توان با معادله تعادل جرمی شارهای رسوبی توصیف کرد. با فرض حجم کنترلی در جهت عمودی (ستون آب) در محدوده محاسباتی دو بعدی، معادله متوسط در عمق تعادل جرمی رسوبها به صورت زیر نوشته می شود (Kolahdoozan, 1999):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (hS) + \frac{\partial}{\partial x} (S_{t,x}) + \frac{\partial}{\partial y} (S_{t,y}) \right\} = 0 \quad (19)$$

که در آن  $z_b$  تراز بستر بالای خط مبنا،  $p$  تخلخل مصالح بستر،  $S$  غلظت متوسط رسوبها در عمق،  $S_t$  انتقال کلی برابر  $S_b + S_s$ ،  $S_b$  بار بستر،  $S_s$  بار معلق متوسط در عمق که برابر است با:

$$S_{s,x} = \int_a^h \left( us - \varepsilon_{s,x} \frac{\partial s}{\partial x} \right) dz \quad (20)$$

$$S_{s,y} = \int_a^h \left( vs - \varepsilon_{s,y} \frac{\partial s}{\partial y} \right) dz \quad (21)$$

#### ۴- مدل سازی فیزیکی

برای واسنجی مدل عددی، آزمایشی تجربی در حوضچه جزر و مدی آزمایشگاهی در دانشگاه برادفورد انگلستان انجام شده است (Falconer and Chapman, 1996). این مدل آزمایشگاهی برای مطالعه جریانهای جزر و مدی در بندرگاه ساخته شده است.

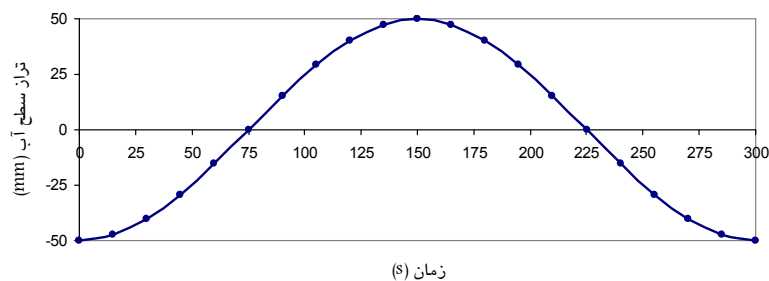
مشخصات موجی که به عنوان نماینده جزر و مد دریا انتخاب شده، در شکل ۲ مشاهده می شود. دوره تناوب این موج ۳۰۰ ثانیه و دامنه آن ۱۰۰ میلی متر بوده و هر سیکل دارای تأخیر فاز  $1/5\pi$  است.

سطح بستر بندرگاه با مصالح یکنواخت غیر چسبنده با مشخصات شکل ۳ پوشیده شده (که در آن  $D_{16}=0/165$ ،  $D_{50}=0/221$ ،  $D_{84}=0/267$  و  $D_{90}=0/290$  همگی بر حسب میلی متر است) و تغییرات تراز بستر داخل بندرگاه پس از ۲۴ دوره جزر و مدی، اندازه گیری شده است (Kolahdoozan, 1999).

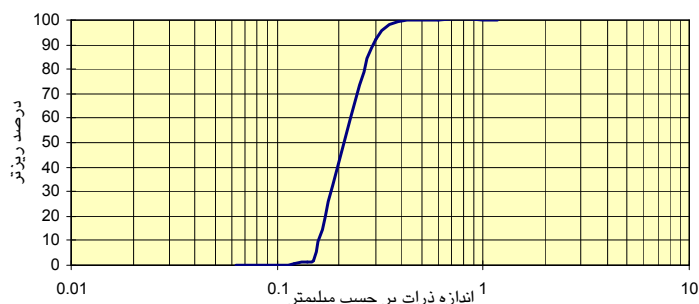
شکل ۴ برای نمونه تغییرات تراز بستر در نتیجه اعمال جزر و مد در مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، بیشتر تغییرات بستر در طول خط میانی ورودی بندرگاه -جایی که در اثر کم شدن عرض ورودی، جریان با سرعت زیادی به بندرگاه وارد می شود- رخ می دهد.

مدلسازی خور به صورت دو بعدی متوسط در عمق انجام دادند، هر دو شیوه *splitting* و *non-splitting* را برای روش QUICKEST مرتبه سوم به صورت ترکیب با ULTIMATE برای تخمین شار رسوبی به کار بردند (Lin and Falconer, 1997), (Kolahdoozan et al., 1998). در این مطالعات روش ULTIMATE QUICKEST برای گسسته سازی جملات انتقال در بخش انتقال رسوب مدل به کار گرفته شد. در ادامه مدل تراز بستر، معادله تعادل جرمی متوسط در عمق با روش تفاضل محدود ADI حل شده است. در محدوده محاسباتی دو بعدی، برای محاسبه شار متوسط رسوبهای معلق در عمق، از شار رسوبی روی کل عمق آب انتگرالگیری شده است (Kolahdoozan, 1999), (Kolahdoozan et al., 1998).

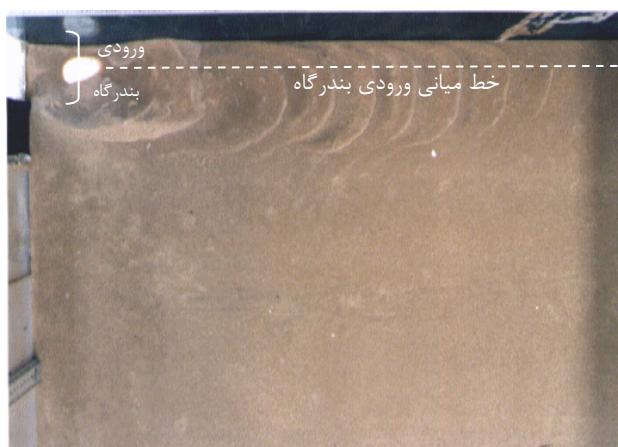
حل این سه دسته معادلات به صورت ناهمزمان، تخمین تغییرات ریخت شناسانه در حوضچه های جزر و مدی را به دست می دهد. در این تحقیق، مدل عددی مذکور به گونه ای توسعه داده شده که معیارهای مختلف شروع حرکت ذرات رسوب مذکور در بخش ۲-۲ را شامل باشد. هر یک از معیارها به صورت تنش برشی بحرانی شروع حرکت ذرات، در بخش محاسبه بار بستر و بار معلق زیر مدل انتقال رسوب وارد می شوند و محاسبات تراز بستر با توجه به انتقال بارهای به دست آمده انجام می شود.



شکل ۲ موج جزر و مدی سینوسی



شکل ۳ منحنی توزیع دانه بندی رسوب بستر



شکل ۴ نمونه تغییرات تراز بستر در خط میانی ورودی بندرگاه در مدل آزمایشگاهی

داشت. عرض ورودی بندرگاه برابر ۶۰ میلی متر فرض شده است.

برای توسعه مدل عددی موجود، سه معیار آغاز حرکت ذرات رسوب که در بخش ۲ به آنها اشاره شد، بر اساس دو روش محاسبه بار بستر به صورت قطعی و غیرقطعی، در مدل به کار گرفته شده است. گزینه های مختلف مدل سازی در جدول ۱ خلاصه شده است. هدف، پیش بینی هر چه دقیق تر تغییرات تراز بستر در مسأله ذکر شده است.

مدل عددی با هر یک از معیارهای فوق در شرایط هیدرولیکی مختلف اجرا شده و چون تغییرات بستر حوضچه پس از ۲۴ دوره جزر و مدی حالت ثابتی به

## ۵- واسنجی مدل

برای واسنجی هر مدل عددی، لازم است نتایج محاسبات مدل با اندازه گیریهای معتبر آزمایشگاهی مقایسه شود. نتایج آزمایشگاهی در نظر گرفته شده برای این تحقیق، شبیه سازی جریان جزر و مدی در حوضچه ای مربعی شکل است که جریان غیر ماندگار جزر و مدی، انتقال رسوبها و تغییرات تراز بستر در آن مورد توجه قرار گرفته است. شکل حوضچه، خصوصیات موج جزر و مدی و مشخصات رسوب در بخش ۴ ارائه شده است.

محدوده محاسباتی شامل مربعی به ابعاد  $1/74 \times 1/74$  متر است که با شبکه های  $30 \times 30$  میلی متر پوشیده شده و در نتیجه در مدل سازی  $57 \times 57$  سلول محاسباتی خواهیم



آب حوضچه (زیر موج جزر ومد) برابر ۶۰ و ۸۰ میلی متر در نظر گرفته شده، به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ ارائه شده است.

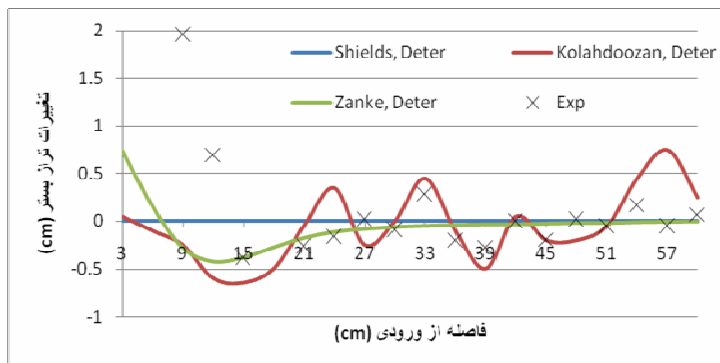
در شکل ۵ معیار شیلدز هیچگونه تغییراتی را در بستر حوضچه نشان نمی دهد. معیار کلاهدوزان به جز در ورودی بندرگاه که بیشتر فرسایش در آنجا رخ می دهد، در سایر نقاط می تواند تا حدودی فرسایش و رسوبگذاری متناوب را به خوبی پیش بینی کند. معیار زنک با آنکه توانایی پیش بینی اولین فرسایش و رسوبگذاری را دارد، در پیش بینی ادامه تغییرات تراز بستر ناتوان است و نمی تواند شکلهای به وجود آمده برای بستر در حوضچه را پیش بینی کند. در شکل ۶، معیار شیلدز مانند حالت قبل هیچ تغییری را در بستر نشان نمی دهد.

خود می گیرد (Kolahdoozan, 1999). پس از گذشت این مدت زمان، نتایج در خط میانی ورودی بندرگاه که در شکل ۴ نشان داده شده، با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شده است.

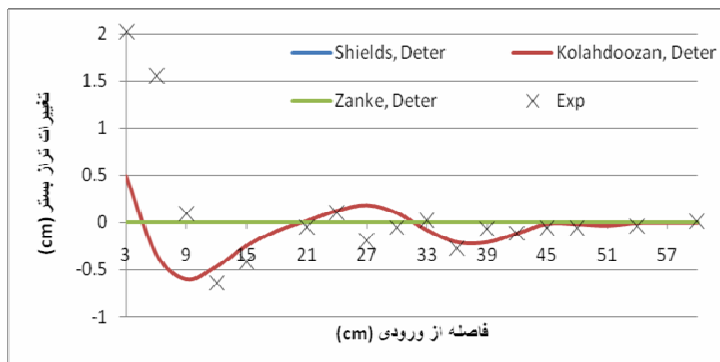
جدول ۱ گزینه های مختلف مدل سازی عددی

معیار آغاز حرکت	Shields	Kolahdoozan	Zanke
روش محاسبه بار بستر			
قطعی	۱	۲	۳
غیرقطعی	۴	۵	۶

نتایج حاصل از کاربرد معیارهای مختلف شروع حرکت ذرات رسوب با روش محاسبه بار بستر قطعی و مقایسه با اندازه گیریهای آزمایشگاهی، هنگامی که حداقل تراز سطح



شکل ۵ تغییرات تراز بستر به روش قطعی با حداقل عمق آب ۶۰ میلی متر



شکل ۶ تغییرات تراز بستر به روش قطعی با حداقل عمق آب ۸۰ میلی متر

سپس رسوبگذاری را در ابتدا پیش‌بینی کرده و در ادامه بستر را بدون تغییر نشان می‌دهند. معیار کلاهدوزان علاوه بر فرسایش و رسوبگذاری ابتدایی، تغییرات دیگری را نیز در طول بندرگاه پیش‌بینی می‌کند.

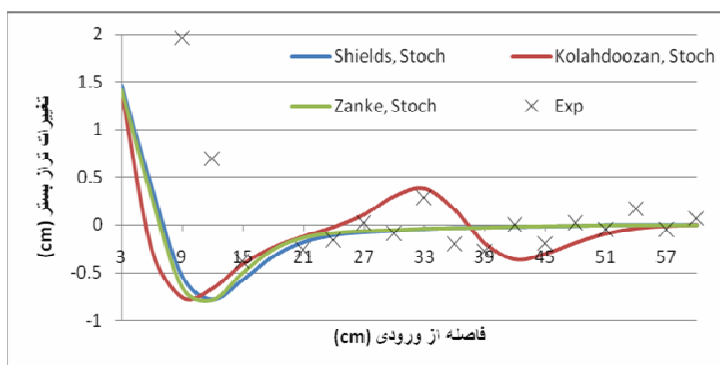
در شکل ۸ معیارهای شیلدز و زنک موفق به پیش‌بینی فرسایش یا رسوبگذاری در بستر نشده‌اند و فقط معیار کلاهدوزان تغییرات تراز بستر ناشی از جریان جزر و مدی را نشان می‌دهد.

در مجموع با کاربرد معیار کلاهدوزان، دقت پیش‌بینی پروفیل بستر از سطح صفر (با معیار شیلدز) تا سطحی که بتواند نوسانهای تراز بستر را تخمین بزند، بهبود یافته است.

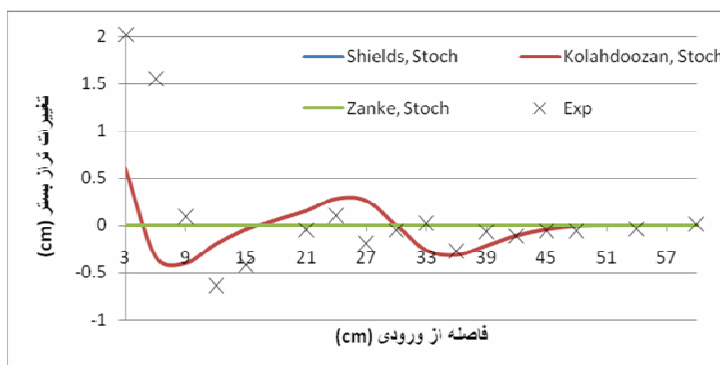
معیار زنک نیز به خلاف حالت قبل، احتمالاً به علت افزایش عمق و در نتیجه ضعیف شدن جریان و پارامترهای آشفتگی، نمی‌تواند تغییرات تراز بستر را نشان دهد، اما معیار کلاهدوزان تا حدودی در پیش‌بینی تغییرات تراز بستر به صورت متناوب موفق است.

محاسبات مشابه، این بار با استفاده از معیارهای مختلف شروع حرکت ذرات رسوب و روش محاسبه بار بستر غیرقطعی در دو حالت حداقل تراز سطح آب حوضچه برابر ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر انجام شده و نتایج مقایسه با اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی، به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

در شکل ۷ معیار شیلدز و معیار زنک تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند؛ به این صورت که هر دو یک فرسایش و



شکل ۷ تغییرات تراز بستر به روش غیرقطعی با حداقل عمق آب ۶۰ میلی‌متر



شکل ۸ تغییرات تراز بستر به روش غیرقطعی با حداقل عمق آب ۸۰ میلی‌متر

نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که با هر دو رابطه بررسی خطا، متوسط خطای گزینه‌های ۴ تا ۶ - که مربوط به روش محاسبه غیرقطعی بار بستر است - نسبت به متوسط خطای گزینه‌های ۱ تا ۳ - که به روش محاسبه قطعی بار بستر مربوط می‌شود - مقدار کمتری را نشان می‌دهد که این به معنای برتری روش غیرقطعی بر روش قطعی است. همچنین متوسط خطای گزینه‌های ۲ و ۵ - که مربوط به معیار آغاز حرکت کلاهدوزان است - نسبت به متوسط خطای سایر گزینه‌ها - که به معیارهای شیلدز و زنک مربوط است - کمتر بوده و این نشانگر برتری معیار کلاهدوزان بر سایر معیارها است.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به گوناگونی پارامترهای مؤثر در پدیده آغاز حرکت ذرات رسوب، معیارهای گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده که هر یک به طور مشخص بر بعضی از خصوصیات جریان و رسوب تمرکز دارد. در این تحقیق، کاربرد معیارهای معرفی شده برای حوضچه‌های جزر و مدی ساحلی - که بیشتر دارای جریان آشفته و همچنین غیرماندگار است - با محاسبه بار بستر به دو روش قطعی و غیرقطعی، از طریق مدلی عددی بررسی شده است. اعمال معیارهای مختلف شروع حرکت ذرات رسوب با دو روش محاسبه بار بستر و مقایسه نتایج محاسباتی با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی، نشان داده که معیار کلاهدوزان - که تأثیر نیروهای ناشی از غیرماندگار بودن جریان را در نظر می‌گیرد - بهتر از معیار زنک - که اثر پارامترهای مربوط به آشفتگی جریان را در نظر می‌گیرد - تغییرات تراز بستر و انتقال رسوب را در حوضچه جزر و مدی پیش‌بینی می‌کند.

اگر چه این رابطه، سطح پیش‌بینی را به میزان قابل توجهی افزایش داده، اما هنوز تفاوت‌هایی بین پیش‌بینی مدل عددی و فیزیکی وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتری در زمینه روشهای به‌کار رفته در مدل‌سازی عددی می‌باشد. مقایسه نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی شکل‌های ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که تغییرات تراز بستر محاسبه شده توسط معیار آغاز حرکت کلاهدوزان، در مقیاس حوضچه جزر و مدی حاضر، واقعی‌تر از دو معیار دیگر بوده است. همچنین با مشاهده نتایج به‌دست آمده از کاربرد معیار کلاهدوزان با دو روش محاسبه بار بستر قطعی و غیرقطعی، می‌توان نتیجه گرفت که روش غیرقطعی نتایج دقیق‌تر و پایدارتری را نسبت به روش قطعی ارائه می‌دهد.

به‌منظور بررسی بهتر دقت نتایج مدل‌سازی با معیارهای مختلف، از پارامترهای آماری جذر میانگین مربع خطاها<sup>۱</sup> و ضریب پراکندگی<sup>۲</sup> برای مقایسه استفاده شده است (تائبی و همکاران، ۱۳۸۴):

شاخص RMSE یکی از مشخصه‌های پراکندگی بوده و واحد آن با واحد متغیر (در اینجا سانتی‌متر) یکسان است. ضریب SI معرف پراکندگی متغیر به صورت مطلق بوده و بدون واحد است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_{calc} - x_{obs})^2}{n}} \quad (22)$$

$$SI = \sqrt{\frac{\sum((x_{calc} - \bar{x}_{calc}) - (x_{obs} - \bar{x}_{obs}))^2}{n}}{\bar{x}_{obs}} \quad (23)$$

که در آن  $x_{obs}$  مقدار مشاهده شده و  $x_{calc}$  مقدار محاسبه شده توسط مدل عددی است.

1. RMSE
2. SI

جدول ۲ خطای گزینه‌های مختلف مدل‌سازی (بر طبق جدول ۱)

گزینه مدل‌سازی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
پارامتر محاسبه خطا						
RMSE	۰/۵۹۴	۰/۵۸۴	۰/۵۸۸	۰/۵۸۹	۰/۵۷۹	۰/۵۸۸
SI	۵/۹۶	۵/۹۹	۵/۸۲	۵/۸۲	۵/۷۳	۵/۸۳

$s$	چگالی نسبی ذرات	همچنین معیار کلاهدوزان با هر دو روش قطعی و غیرقطعی عملکرد مناسبی داشته، اگرچه روش غیرقطعی نتایج دقیقتر و پایدارتری را در مقایسه با روش قطعی ارائه داده است. با مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط گفته شده در این مطالعات، پدیده هیدرودینامیکی که انتقال رسوب و به تبع آن تغییرات تراز بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اثر مؤلفه غیر ماندگار نیروی جزر و مد بر ذرات رسوب بستر است.
$\bar{s}$	غلظت متوسط رسوبها در عمق	
$S_s$	متوسط بار معلق در عمق	
$S_b$	بار بستر	
$S_t$	انتقال کلی	
$t$	زمان	
$T$	مرتبۀ انتقال	
$u$	سرعت متوسط در زمان	
$u_b$	سرعت متوسط در زمان در بستر	
$u_*$	سرعت برشی	
$u_{k_s}$	سرعت در فاصله زبری معادل بستر	
$\bar{u}$	سرعت متوسط در عمق جریان	
$u'_{rms}$	انحراف معیار توزیع سرعت	$A_w$ دامنه موج جزر و مد
$V, U$	متوسط مؤلفه‌های سرعت در عمق	$c'$ ضریب شزی دانه‌ای
$z_b$	تراز بستر بالای خط مبنا	$C$ ضریب شزی
$\epsilon_y, \epsilon_x$	ضرایب اختلاط رسوب	$C_D, C_L$ ضرایب درگ و لیفت
$\zeta$	تراز سطح آب	$d$ قطر ذرات رسوب
$\theta_{cr}$	پارامتر حرکت بحرانی	$D_*$ قطر بدون بعد ذره
$v$	لزجت سینماتیکی	$f$ ضریب کوریولیس
$\rho$	چگالی آب	$g$ شتاب جاذبه
$\sigma_{\bar{\tau}}$	انحراف معیار تنش برشی	$H$ عمق آب
$\bar{\tau}'$	میانگین تنش برشی بستر	$k$ اثر چسبندگی بین ذرات
$\tau'_z$	تنش برشی دانه‌ای بستر در بازه $\lambda_m$	$k_s$ ارتفاع زبری بستر
$\tau_{yz}, \tau_{xz}$	مؤلفه‌های تانسور تنش	$L_1, L_2, L_3$ ضرایب معادله
$\omega$	سرعت زاویه‌ای	$p$ تخلخل مصالح بستر
$\phi$	زاویه استقرار ذرات رسوب	$P$ فشار
$\psi$	زاویه بین جهت نیرو و بستر مسطح	$P_{\tau_i}$ احتمال آماری در بازه $\lambda_m$

## ۷- فهرست علائم

## ۸- منابع

- Kolahdoozan, M. (1999). "Numerical modelling of geomorphological processes in estuarine waters", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bradford, Bradford, UK.
- Kolahdoozan, M., Falconer, R.A. and Chen, Y. (1998). "Geomorphological modelling of coastal waters", Proceeding of the 26<sup>th</sup> International Conference of Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark.
- Lin, B., and Falconer, R.A. (1997). "Tidal flow and transport modelling using ultimate QUICKEST scheme", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 123, No. 4, pp. 303-314.
- Papanicolaou, A.N., Diplas, P., Evaggelopoulos, N. and Fotopoulos, S. (2002). "Stochastic incipient motion criterion for spheres under various bed packing condition", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 128, No. 4, pp. 369-380.
- Pilotti, M. and Menduni, G. (2001). "Beginning of sediment transport of incoherent grains in shallow shear flows", Journal of Hydraulic Research (IHAR), Vol. 39, No. 2, pp. 115-124.
- van Rijn, L.C. (1993). "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas", Aqua Publishing, Amsterdam, The Netherlands.
- Zanke, U.C.E. (2003). "On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion", International Journal of Sediment Research, Vol. 18, No. 1, pp. 17-31.
- تائیبی، س.، گلشنی، ع. و چگینی، و. (۱۳۸۴). «پروژه مدلسازی امواج دریاهاى ایران (خلیج فارس و دریای عمان)»، سازمان بنادر و کشتیرانی و مرکز ملی اقیانوس شناسی.
- Aguirre-Pe, J., Olivero, M.L. and Moncada, A.T. (2003). "Particle densimetric Froude number for estimating sediment transport", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 129, No. 6, pp. 428-437.
- Bathurst, J.C., Graf, W.H. and Cao, H.H. (1983). "Initiation of sediment transport in steep channels with coarse bed material", Mechanics of Sediment Transport, A.A.Balkema Publication, The Netherlands.
- Cheng, N.S. and Chiew, Y.M. (1999). "Analysis of initiation of sediment suspension from bed load", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 125, No. 8, pp. 855-861.
- Falconer, R.A. and Chapman, B.C. (1996). "Design and operation of a laboratory tidal basin for model harbour studies", Dock and Harbour Authority, Vol. 746, No. 864, pp. 175-179.
- Hager, W.H., and Oliveto, G. (2002). "Shields' entrainment criterion in bridge hydraulic", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 128, No. 5, pp. 538-542.
- Kleinhans, M.G. and van Rijn, L.C. (2002). "Stochastic prediction of sediment transport in sand-gravel bed rivers", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 128, No. 4, pp. 412-425.