

## توسعه یک مدل رایانه‌ای برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب ساحلی

ناصر طالب بیدختی\* و محمدرضا نیک منش\*\*

بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۷۸/۱۰/۱۳ - دریافت نسخه نهایی: ۷۹/۱۲/۱۴)

**چکیده:** در این مقاله پدیده انتقال رسوب موازی با خط ساحلی در نواحی ساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. از بین عوامل مؤثر در پدیده انتقال رسوب روی امواج، جریانها و خصوصیات توپوگرافی ساحل تأکید بیشتری می‌شود. همچنین برای بررسی رفتار امواج از نظریه موج خطی استفاده می‌شود. برای شبیه سازی جریان ساحلی، معادلات پیوستگی و ممتنم با در نظر گرفتن عبارتهای مربوط به تنشهای تشعشی برای راستای موازی با خط ساحلی حل شده‌اند. برای تعیین پروفیل غلظت رسوبات معلق در عمق نیز معادله انتقال-پخش رسوب در حالت میانگین زمانی حل شده است.

بر اساس روابط مذکور و سایر روابط مورد نیاز برای بررسی پدیده انتقال رسوبات ساحلی برنامه رایانه‌ای PLSTP<sup>۱</sup> که با زبان فرترن ۷۷ نوشته شده است، برای پیش‌بینی جریان و رسوبات ساحلی ارائه شده است که در این برنامه، معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده انتقال رسوب با روش عددی تفاضل محدود و به طرق تفاضل رو به جلو، تفاضل رو به عقب و تفاضل مرکزی به صورت یک‌بعدی حل شده‌اند. در نهایت نتایج حاصل از این برنامه رایانه‌ای با سایر نتایج و اندازه‌گیریهای موجود مقایسه شده است که این مقایسه، صحت و دقت برنامه رایانه‌ای مذکور را تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: رسوبات دریایی، موج، ساحل، جریان، انتقال رسوب

## Development of a Computer Model for the Prediction of Littoral Sediment Transport Rate

N. Talebbeydokhti and M. Nikmanesh  
Department of Civil Engineering, University of Shiraz

**Abstract-** *In this paper, longshore sediment transport in littoral zones is investigated. For investigation of sediment transport in the nearshore zone, the effects of waves, currents and topographical conditions of coast are considered. Linear wave theory was used for the investigation of the wave behaviour. Governing equations of littoral current are continuity and momentum ones. For calculating concentration profile of suspended sediments at depth, the convection-diffusion equations must be solved.*

*A computer program called "PLSTP" (Prediction of Sediment Transport in Littoral Zones) is developed for investigation of sediment transport process in littoral zones. The finite difference method is used for solving governing equations. The results show a good agreement between this model and the measurements available.*

**Keywords:** *Littoral transport, Wave, Shore, current, sediment transport*

\*\* - کارشناس ارشد

\* - دانشیار

سپس توسط جریانهای ساحلی به وجود آمده در ناحیه شکست موج انتقال داده می‌شوند.

نظریه موج خطی یکی از انواع نظریه‌های امواج سطحی است که خصوصیات یک موج ساده را توصیف می‌کند. این نظریه به ویژه زمانی که عمق آب در مقایسه با طول موج خیلی کوچک نباشد رفتار موج را بهتر پیش بینی می‌کند. از ویژگیهای این نظریه این است که نه تنها کاربرد آسانی دارد بلکه برای بخش اعظم کل رژیم موج نیز قابل استفاده بوده و نتایج مناسب و قابل قبولی می‌دهد. از مهمترین فرضیاتی که برای استفاده از این نظریه وجود دارد این است که امواج باید آشفتگی و تلاطم کمی داشته و میدان نوسان آنها کوچک باشد و به همین دلیل آن را نظریه موج با میدان نوسان کوچک نیز می‌نامند.

آهنگ انتقال ممتد موج در هر نقطه دارای مؤلفه‌های عمودی و برشی‌اند که به آنها تنشهای تشعشی موج گفته می‌شود. در صورتی که  $x$  راستای عمود بر خط ساحلی و  $y$  راستای موازی با خط ساحلی باشد، آن گاه مؤلفه تنش تشعشی موج در راستای عمود بر ساحل و همچنین مؤلفه برشی تنش تشعشی موج به ترتیب از دو معادله زیر محاسبه خواهند شد [۳].

$$S_{xx} = S_{ss} \cos^2 \alpha + S_{nn} \sin^2 \alpha \quad (1)$$

$$S_{xy} = (S_{ss} - S_{nn}) \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

در معادلات بالا  $\alpha$  زاویه بین محور  $x$  و جهت پیشروی موج و  $S_{nn}$  و  $S_{ss}$  نیز به ترتیب مؤلفه تنش تشعشی در راستای انتشار موج و در راستای عمود بر انتشار موج‌اند.

### ۳- جریان ساحلی

امواجی که از نواحی عمیق دریا به سمت ساحل حرکت می‌کنند در عمق خاصی می‌شکنند و بعد از آن تا ساحل، انرژی آنها مستهلک می‌شود. تغییر در آهنگ انتقال ممتد مربوط به پیشروی امواج باعث به وجود آمدن جریانی به موازات ساحل می‌شود. این تغییرات همچنین باعث پایین رفتن سطح آب از نواحی عمیق دریا تا نقطه شکست موج و سپس بالا آمدن سطح

پدیده انتقال رسوب یکی از مهمترین فرایندهای ساحلی است که عوامل عمده محیطی مؤثر در ارتباط با آن شامل امواج، جریانها، جزر و مدها، بادها، عوامل زمین‌شناسی و توپوگرافی و تغییر محیط سواحل توسط انسان است. همچنین علت انتقال رسوب در یک ناحیه ساحلی، معلق شدن رسوبات بستر در آب در اثر اغتشاش ناشی از شکست موج و همچنین وجود جریان ساحلی است که جریانهای ساحلی نیز عمدتاً در نزدیکی محل شکست موج و در اثر ایجاد تغییرات در خصوصیات امواج به وجود می‌آیند.

ناپایداری سواحل و جابه‌جایی قابل توجه خط ساحلی، فرسایش پذیری سواحل در اثر امواج، جریانها و طوفانها و خسارات ناشی از آن به تأسیسات و سازه‌های ساحلی، پر شدن حوضچه بنادر از رسوب در یک زمان کوتاه و مسائل مشابه دیگر از جمله معضلات و مشکلات قابل توجه بسیاری از کشورها و نواحی دارای مرز آبی با دریاست که پدیده انتقال رسوب یکی از مهمترین فرایندهای مرتبط با معضلات مذکور است که باید با جدیت مورد بررسی قرار گیرد. کشور ما نیز دارای مرزهای آبی وسیعی در شمال و جنوب است که با توجه به افزایش روزافزون مبادلات تجاری از طریق دریا و گسترش بنادر و سازه‌های ساحلی در سواحل کشور، توجه جدی به بحث انتقال رسوب ساحلی که در پروژه‌های ساحلی نقشی اساسی را دارد لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

### ۲- امواج دریایی

امواج ناشی از وزش باد بر روی سطح آب نوع شناخته شده‌ای از امواج نوسانی دریایی هستند که معمولاً با ارتفاع طول و پرپودشان تعریف می‌شوند.

حرکت ذرات آب در هنگام شکستن موج باعث بیشترین انتقال رسوب در ناحیه ساحلی می‌شود چرا که حرکت آب در بستر و اغتشاش ایجاد شده ناشی از شکست موج، رسوبات بستر را به صورت معلق در می‌آورد و این رسوبات معلق شده

دست خواهد آمد که از این سرعت سپس در تعیین پروفیل سرعت در عمق در هر نقطه استفاده خواهد شد.

#### ۴- روش حل معادلات حاکم بر جریان ساحلی

##### ۴-۱- حل معادله پیوستگی

برای حل معادله پیوستگی از روش تفاضل رو به جلو و به صورت زیر استفاده می‌شود

$$-\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{S_{xx}^{i+1} - S_{xx}^i}{\Delta x} \right\} = g \left( \frac{D^i + D^{i+1}}{2} \right) \left\{ \frac{\Delta D^{i+1} - \Delta D^i}{\Delta x} \right\} \quad (9)$$

یا می‌توان نوشت

$$\Delta D^i = \Delta D^{i+1} + \frac{2}{\rho g} \left( \frac{S_{xx}^{i+1} - S_{xx}^i}{D^i + D^{i+1}} \right) \quad (10)$$

لازم به توضیح است که در نرم‌افزار ارائه شده بعد از محاسبه  $\Delta D$  در هر گره و اضافه کردن آن به عمق قبلی، عمق اصلاح شده جدید را مجدداً برای محاسبه خصوصیات موج (طول، ارتفاع و تنشهای تشعشعی موج) که در مراحل قبلی برنامه محاسبه شده‌اند مورد استفاده قرار داده و با اصلاح محاسبات قبلی، تغییر سطح متوسط تراز آب در هر گره را مجدداً به دست می‌آوریم و با مقادیر محاسبه شده قبلی مقایسه می‌کنیم. عمل مقایسه تا زمانی که اختلاف بین دو  $\Delta D$  محاسبه شده متوالی از حد قابل قبولی کمتر شود، ادامه خواهد یافت.

شرط مرزی برای این مسئله، مشخص بودن مقدار تغییر تراز متوسط سطح آب در نقطه انتهایی گره‌بندی در سمت دریاست. بعد از گره‌بندی ناحیه در راستای عمود بر خط ساحلی، مقدار  $\Delta D$  را در نقطه انتهایی سمت دریا برابر با صفر قرار داده و به کمک معادله (۱۰) مقدار  $\Delta D$  را در نقطه قبل از آن به دست می‌آوریم. به همین صورت با معلوم شدن  $\Delta D$  در هر نقطه می‌توان مقدار آن را در نقطه قبل از آن نیز به دست آورد و این روند از سمت دریا به سمت خشکی ادامه خواهد یافت تا در نهایت مقدار  $\Delta D$  روی خط ساحلی (نقطه شروع گره‌بندی در سمت خشکی) که در واقع همان بیشترین بلند شدن موج است،

آب از نقطه شکست تا ساحل می‌شود که آن را پایین آمدن و بلند شدن موج می‌نامند.

در صورتی که تغییرات توپوگرافی خط ساحلی و تنش تشعشعی در راستای موازی با خط ساحلی (محور  $y$ ) ناچیز و قابل صرف نظر کردن باشد، آن‌گاه معادلات پیوستگی و ممتهم به ترتیب به صورت دو معادله ساده شده (۳) و (۴) در خواهند آمد [۳]

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = gD \frac{\partial \Delta D}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} = \tau_b - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{4a^2}{T} \cos^2 \alpha \quad (5)$$

$$a = \frac{U_{lm} T}{2\pi} \quad (6)$$

$$U_{lm} = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh \left( \frac{2\pi D}{L} \right)} \quad (7)$$

در معادلات بالا  $D$  عمق آب،  $\Delta D$  تغییر سطح آب در اثر پدیده بلند شدن و پایین آمدن موج،  $\varepsilon$  ضریب پخش ممتهم،  $a$  دامنه حرکت نوسانی موج نزدیک بستر و  $U_{lm}$  نیز سرعت نوسانی موج نزدیک بسترنند. همچنین  $H$ ،  $L$  و  $T$  نیز به ترتیب ارتفاع، طول و پرپود موج‌اند.

همچنین در معادله ممتهم،  $\tau_b$  تنش برشی بستر است که برحسب ضریب مقاومت بستر (C) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\tau_b = \rho \frac{V|V|}{c} \quad (8)$$

لازم به توضیح است که ضریب مقاومت بستر خود برحسب پارامترهایی نظیر ضخامت لایه مرزی موج، زبری بستر و ضرایب اصطکاک بیان می‌شود.

معادلات پیوستگی و ممتهم از روش عددی تفاضل محدود حل خواهند شد. با حل معادله پیوستگی، نحوه تغییر تراز متوسط سطح آب به دست خواهد آمد و همچنین بعد از حل معادله ممتهم مقدار سرعت متوسط جریان در راستای ساحل به

به دست آید.

در ابتدا باید  $|V_{old}^i|$  که مقدار سرعت در هر گره است، حدس زده شود. برای آن که حدس اولیه از مقدار صحیح جواب انحراف زیادی نداشته باشد، از معادله زیر استفاده می‌کنیم

$$|V_{old}^i| = \sqrt{\frac{(S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}) M^2 D^{i/3}}{2\rho g \Delta x}} \quad (17)$$

در معادله بالا  $M$  ضریب مانینگ بستر دریاست که معمولاً مقدار آن ۳۲ فرض می‌شود.

در رابطه با نحوه به دست آوردن معادله (۱۷) باید گفت که این معادله همان معادله ممتنم است که ضریب پخش ممتنم در آن صفر در نظر گرفته شده است. ذکر این نکته ضروری است که مقدار ضریب پخش ممتنم بسیار کوچک بوده و می‌توان برای تعیین مقدار سرعت، به عنوان حدس اولیه مقدار آن را صفر در نظر گرفته و از معادله (۱۷) استفاده کنیم.

با مشخص شدن مقدار  $|V_{old}^i|$  در معادله (۱۷) تنها سه مجهول  $V^{i+1}$ ،  $V^i$ ،  $V^{i-1}$  باقی خواهد ماند. برای سایر گره‌ها نیز وضعیت مشابهی وجود دارد و لذا دستگاه معادلات حاصل، دستگاهی است که هر یک از معادلات آن شامل سه مجهول مقدار سرعت در آن گره و دو گره قبل و بعد از آن بوده و بنابراین شکل کلی هر یک از معادلات دستگاه به صورت زیر خواهد بود

$$K_1^i V^{i-1} + K_2^i V^i + K_3^i V^{i+1} = K_4^i \quad (18)$$

در معادله بالا، ضرایب معلوم به صورت زیر هستند

$$K_4^i = -\frac{1}{2\rho \Delta x} (S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}) \quad (19)$$

$$K_3^i = \frac{1}{2\Delta x^2} \{(\varepsilon D)^{i+1} + (\varepsilon D)^i\} \quad (20)$$

$$K_2^i = \left\{ -\left( K_3^i + K_1^i \right) - \frac{|V_{old}^i|}{C^i} \right\} \quad (21)$$

$$K_1^i = \frac{1}{2\Delta x^2} \{(\varepsilon D)^i + (\varepsilon D)^{i-1}\} \quad (22)$$

ماتریس ضرایب دستگاه حاصل یک ماتریس سه قطری نامیده می‌شود چرا که ضرایب تنها روی سه قطر وسط ماتریس

#### ۴-۲- حل معادله ممتنم

برای حل معادله ممتنم از ترکیبی از روشهای تفاضل مرکزی، تفاضل رو به جلو و تفاضل رو به عقب استفاده می‌شود. برای تعیین  $\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}$  از روش تفاضل مرکزی به صورت زیر استفاده می‌شود

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x} \{S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}\} \quad (11)$$

همچنین برای تعیین  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \right)$  ابتدا از روش تفاضل رو به جلو به صورت زیر استفاده می‌شود

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \Big|^{i+1} - \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \Big|^i \quad (12)$$

سپس برای تعیین هر یک از دو عبارت سمت راست معادله بالا از روش تفاضل رو به عقب به صورت زیر استفاده می‌شود

$$\varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \Big|^{i+1} = \frac{\varepsilon D \Big|^{i+1} + \varepsilon D \Big|^i}{2} \left( \frac{V^{i+1} - V^i}{\Delta x} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x} \Big|^i = \frac{\varepsilon D \Big|^i + \varepsilon D \Big|^{i-1}}{2} \left( \frac{V^i - V^{i-1}}{\Delta x} \right)$$

با استفاده از معادلات (۱۱) تا (۱۳) معادله ممتنم به شکل تفاضلی و به صورت معادله (۱۴) در خواهد آمد

$$\frac{1}{2\rho \Delta x} \{S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}\} = \frac{V^i |V_{old}^i|}{C^i} - \frac{\varepsilon D \Big|^{i+1} + \varepsilon D \Big|^i}{2} \left( \frac{V^{i+1} - V^i}{\Delta x} \right) + \frac{\varepsilon D \Big|^i + \varepsilon D \Big|^{i-1}}{2} \left( \frac{V^i - V^{i-1}}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

که در آن

$$C^i = 2.5 \left( \ln \left( \frac{D^i}{\delta_w^i} \right) - 1 \right) \frac{1 + \sqrt{4 \frac{|V_{old}^i|}{Y^i} + 1}}{2} \quad (15)$$

$$Y^i = \frac{2}{\Pi} f_w^i U_{lm}^i \frac{1 + \cos^2 \phi^i}{2} \left\{ 2.5 \ln \left( \frac{D^i}{\delta_w^i} \right) - 1 \right\}^2 \quad (16)$$

می‌کنیم. بعد از تعیین ضرایب E و F در گره انتهایی، معادله آخر دستگاه به صورت زیر در خواهد آمد

$$V^{n-1} = E_{n-1}V^n + F_{n-1} \quad (29)$$

با توجه به صفر بودن مقدار  $V_n$  طبق شرط مرزی موجود در گره انتهایی، خواهیم داشت

$$V^{n-1} = F_{n-1} \quad (30)$$

بعد از مشخص شدن مقدار سرعت در گره ماقبل آخر طبق معادله بالا، از معادله ماقبل آخر دستگاه شروع کرده و مقدار سرعت در هر گره را با توجه به معلوم بودن مقدار سرعت در گره جلوتر و نیز ضرایب معلوم E و F، تعیین می‌کنیم.

بعد از معلوم شدن مقادیر سرعت متوسط جریان در راستای ساحل در هر گره، مقادیر به دست آمده را با مقادیر قبلی که از طریق حدس اولیه به دست آمده بود و در معادلات جایگزین  $V_{old}^i$  شده بود مقایسه می‌کنیم. در صورتی که اختلاف مقادیر محاسبه شده از حد قابل قبولی کمتر باشد، عملیات پایان می‌یابد و در غیر این صورت مقادیر به دست آمده جدید را جایگزین  $V_{old}^i$  در معادلات کرده و روش دو جارویی را بار دیگر برای تعیین مقادیر جدید سرعت به کار می‌گیریم. واضح است که عملیات مذکور تا زمانی که اختلاف مقادیر به دست آمده متوالی از حد قابل قبولی کمتر شود ادامه خواهد یافت.

#### ۴-۳- توزیع سرعت در عمق

بر اساس روش ون راین، توزیع سرعت در عمق به صورت لگاریتمی فرض می‌شود و دو معادله لگاریتمی مختلف یکی برای نزدیکی بستر جایی که تحت تأثیر لایه مرزی موج قرار دارد و دیگری برای فواصل دورتر از بستر ارائه می‌شود [۶]. در خارج از لایه مرزی موج ( $z \geq 3\delta_w$ )، معادله زیر برای تعیین توزیع سرعت در عمق ارائه می‌شود

$$u = \frac{V \cdot \ln\left(\frac{30z}{K_a}\right)}{-1 + \ln\left(\frac{30D}{K_a}\right)} \quad (31)$$

قرار گرفته و سایر اعضای ماتریس صفرند. برای حل چنین دستگاهی از روش دو جارویی استفاده می‌شود که در زیر توضیح داده می‌شود [۲].

می‌توان فرض کرد که  $V^i$  و  $V^{i+1}$  از طریق دو ضریب  $E_i$  و  $F_i$  طبق معادله (۲۳) با یکدیگر ارتباط دارند

$$V^i = E_i V^{i+1} + F_i \quad (23)$$

بنابراین معادله مشابهی بین  $V^i$  و  $V^{i-1}$  به صورت زیر وجود خواهد داشت

$$V^{i-1} = E_{i-1} V^i + F_{i-1} \quad (24)$$

با جاگذاری معادله (۲۴) در معادله (۱۸) خواهیم داشت

$$K_1^i (E_{i-1} V^i + F_{i-1}) + K_2^i V^i + K_3^i V^{i+1} = K_4^i \quad (25)$$

معادله بالا را به صورت معادله (۲۶) هم می‌توان نوشت

$$V^i = \frac{-K_3^i}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i} V^{i+1} + \frac{K_4^i - K_1^i F_{i-1}}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i} \quad (26)$$

با مقایسه معادلات (۲۳) و (۲۶) خواهیم داشت

$$E_i = \frac{-K_3^i}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i} \quad (27)$$

$$F_i = \frac{K_4^i - K_1^i F_{i-1}}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i}$$

بنابراین مقدار ضرایب E و F در هر گره بر اساس مقدار این ضرایب در گره قبلی به دست خواهد آمد.

شرط مرزی برای این مسئله مشخص بودن مقادیر سرعت در دو گره ابتدایی و انتهایی است. بعد از گره‌بندی ناحیه در راستای عمود بر خط ساحلی، مقادیر سرعت را در گره‌های ابتدایی و انتهایی که به ترتیب در خط ساحلی و در حد انتهایی سمت دریا قرار می‌گیرند برابر با صفر قرار می‌دهیم. زمانی که مقدار سرعت را در گره ابتدایی برابر با صفر قرار دهیم، اولین معادله دستگاه به صورت زیر در خواهد آمد

$$V^1 = A_1 V^2 + B_1 \quad (28)$$

توجه داریم که ضرایب معلوم  $A_1$  و  $B_1$  در معادله بالا همان ضرایب عمومی E و F در گره شماره ۱ ( $E_1, F_1$ ) هستند. حال ضرایب E و F در گره‌های بعدی را طبق معادله (۲۷) و با توجه به معلوم بودن مقادیر این ضرایب در یک گره قبلتر از آن تعیین

و برای داخل لایه مرزی موج ( $z < 3\delta_w$ ) نیز معادله توزیع سرعت به صورت زیر است

$$u = \frac{V_\delta \cdot \ln\left(\frac{30z}{K_e}\right)}{\ln\left(\frac{90\delta_w}{K_e}\right)} \quad (32)$$

$$V_\delta = \frac{V \cdot \ln\left(\frac{90\delta_w}{K_a}\right)}{-1 + \ln\left(\frac{30D}{K_a}\right)} \quad (33)$$

در معادلات بالا داریم

$\delta_w =$  ضخامت لایه مرزی موج که از معادله زیر محاسبه می شود

$$\delta_w = 0.072K_e \left(\frac{a}{K_e}\right)^{0.75} \quad (34)$$

$a =$  دامنه حرکت نوسانی موج نزدیک بستر، معادله (6)

$K_e =$  زبری مؤثر بستر که براساس ارتفاع چین خوردگی بستر

$(h_r)$ ، طول چین خوردگی بستر ( $\lambda$ ) و قطر متوسط ذرات بستر

$(d_{50})$  به صورت زیر محاسبه می شود

$$K_e = 25d_{50} + 16 \frac{h_r^2}{\lambda} \quad (35)$$

$K_a =$  زبری ظاهری بستر که خود برحسب زبری مؤثر بستر

$(K_e)$  است [6].

#### ۴-۴- توزیع غلظت رسوبات غیر چسبنده در عمق

تلاطم ناشی از شکست امواج و نیز عوامل پخش ممتد

ناشی از حضور امواج و جریانها باعث بلند شدن رسوبات بستر

و معلق شدن آنها می شود. همچنین نیروهای جاذبه، شناوری و

مقاوم به حرکت سعی در ته نشین کردن رسوبات دارند. بر

اساس اندرکنش پدیده های بالا، توزیع لحظه ای غلظت رسوبات

در عمق تحت عنوان معادله انتقال-پخش به صورت زیر ارائه

می شود

$$\frac{dc}{dt} = W_s \frac{\partial c}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \varepsilon_{s,cw} \frac{\partial c}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,cw} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (36)$$

با توجه به اینکه تغییرات غلظت رسوبات در راستای افقی

در مقایسه با راستای عمودی (در عمق) ناچیز است لذا با حذف عبارت آخر معادله بالا، معادله ساده شده زیر که معادله غلظت رسوبات در راستای قائم و در حالت یک بعدی است، به دست خواهد آمد

$$\frac{\partial c}{\partial t} = W_s \frac{\partial c}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \varepsilon_{s,cw} \frac{\partial c}{\partial Z} \right) \quad (37)$$

در معادلات (36) و (37)،  $W_s$  سرعت ته نشینی ذرات رسوب و

$C$  نیز غلظت آنهاست. همچنین  $x$  و  $Z$  دو راستای افقی و

عمودی و  $t$  زمان است.

اگر از معادله ساده شده بالا بر روی زمان میانگین گیری

شود، معادله انتقال-پخش میانگین زمانی به صورت زیر به

دست خواهد آمد

$$W_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \varepsilon_{s,cw} \frac{\partial \bar{c}}{\partial Z} \right) = 0 \quad (38)$$

یا می توان نوشت

$$W_s \bar{c} + \varepsilon_{s,cw} \frac{\partial \bar{c}}{\partial Z} = 0 \quad (39)$$

در معادلات (38) و (39)، داریم

$\bar{c} =$  مقدار غلظت میانگین زمانی رسوب در یک تراز مشخص

$Z$  بالای بستر

$\varepsilon_{s,cw} =$  ضریب اختلاط رسوب مستقل از زمان

همچنین برای نقاطی که ترازشان کوچکتر یا مساوی با تراز

مرجع غلظت بستر باشد، معادله زیر برای محاسبه غلظت در آن

نقاط ارائه شده است [6].

$$\bar{c}_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{15}}{D_*^{0.3}} \quad (40)$$

در معادله بالا داریم

$a =$  تراز مرجع غلظت بستر که برابر با بیشترین مقدار نصف

ارتفاع چین خوردگی بستر و ضخامت لایه مرزی موج در نظر

گرفته می شود. همچنین تراز مرجع غلظت بستر نباید از یک

صدم عمق آب کمتر باشد [6].

$$a = \text{Max} \left\{ \frac{1}{2} h_r, \delta_w \right\} \quad (41)$$

$$a \geq 0.01D \quad (42)$$

$h_r$  = ارتفاع چین خوردگی بستر

$\delta_w$  = ضخامت لایه مرزی موج

$D$  = عمق آب

$T$  = پارامتر تنش برشی بستر که از معادله زیر به دست می آید

$$T = \frac{\tau'_{cw} - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (43)$$

$\tau'_{cw}$  = تنش برشی بستر ناشی از اثر توأم موج و جریان

$\tau_{cr}$  = تنش برشی بحرانی بستر

$D^*$  = پارامتر ذره که بر اساس چگالی نسبی رسوبات ( $S_s$ ),

ویسکوزیته سینماتیک آب ( $\nu$ ) و قطر متوسط ذرات ( $d_{50}$ ) به

صورت زیر نوشته می شود

$$D^* = d_{50} \left[ \frac{(S_s - 1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (44)$$

#### ۴-۵-۵- دبی انتقال رسوبات ناشی از جریان

دبی انتقال رسوبات ناشی از جریان در دو بخش دبی انتقال

بار بستر و دبی انتقال بار معلق مورد بررسی قرار می گیرد. برای

محاسبه دبی رسوباتی که به صورت بار معلق انتقال می یابند باید

انتگرال زیر به صورت عددی حل شود

$$q_{s,c} = \int_a^D u c dz \quad (45)$$

در معادله بالا که برای گره ای با عمق  $D$  و تراز مرجع غلظت

بستر  $a$  نوشته می شود،  $q_{s,c}$  دبی رسوبات انتقالی در راستای

ساحل به صورت بار معلق،  $u$  سرعت در یک تراز مشخص و

$\bar{c}$  نیز غلظت میانگین زمانی در تراز مذکور است.

همچنین برای دبی رسوباتی که به صورت بار بستر انتقال

می یابند، معادله تحلیلی زیر ارائه شده است [۶]

$$q_{b,c} = 0.25 \rho_s u'_{*,c} d_{50} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad (46)$$

$$u'_{*,c} = \sqrt{\frac{\tau'_c}{\rho}} \quad (47)$$

در معادلات بالا،  $q_{b,c}$  دبی رسوبات انتقالی در راستای ساحل به

صورت بار بستر ناشی از جریان،  $u'_{*,c}$  سرعت برشی مربوط به

دانه های رسوب بستر ناشی از جریان،  $\tau'_c$  تنش برشی بستر

ناشی از جریان، و  $\rho_s$  نیز جرم حجمی رسوبات است.

بعد از محاسبه دبی رسوبات انتقالی در راستای ساحل در

دو بخش بار بستر و بار معلق، دبی کل رسوبات انتقالی ناشی از

جریان از مجموع دو دبی مذکور به دست می آید

$$q_c = q_{s,c} + q_{b,c} \quad (48)$$

برای محاسبه دبی رسوبات انتقال در راستای ساحل ناشی از

موج نیز معادلات تحلیلی ارائه شده است که در مقایسه با دبی

رسوبات انتقالی ناشی از جریان مقدار آن ناچیز بوده و قابل

صرف نظر کردن است [۶].

#### ۵- نتایج برنامه رایانه ای PLSTP

برای کنترل صحت و دقت برنامه رایانه ای PLSTP

قسمتهای مختلف آن با نتایج و اندازه گیریهای موجود مقایسه

شده است که نتایج این مقایسه ها رضایتبخش است. در

شکل (۱) پروفیل غلظت حاصل از برنامه رایانه ای PLSTP و

پروفیل غلظت حاصل از مدل ون راین و اندازه گیریهای انجام

شده مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنان که در شکل

مشخص است اندازه گیریهای انجام شده فقط تا فاصله ۴۰

سانتیمتری از کف وجود دارد که البته در همین فاصله نیز دقت

برنامه رایانه ای PLSTP قابل قبول است. در شکل (۲) پروفیل

جریان ساحلی حاصل از برنامه رایانه ای PLSTP با کار سایرین

مورد مقایسه قرار گرفته است که تطابق پروفیلها با یکدیگر

بسیار مناسب و قابل قبول است. لازم به توضیح است که

پروفیل حاصل از برنامه رایانه ای PLSTP با پروفیل مدل ارائه

شده توسط زیسرمان<sup>۲</sup> تطابق بیشتری دارد. در نهایت جواب

نهایی مسئله انتقال رسوبات ساحلی یعنی توزیع دبی رسوبات

انتقالی برای برنامه رایانه ای PLSTP و مدل ارائه شده توسط

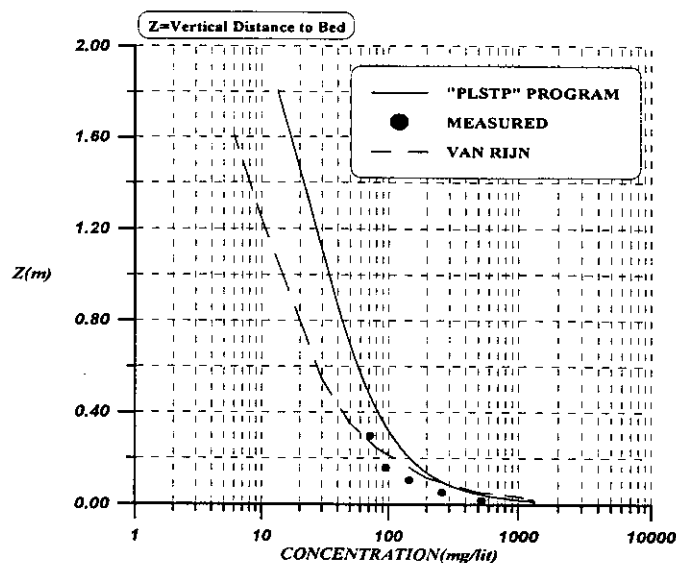
فردزو<sup>۳</sup> و دیگران<sup>۴</sup> در شکل (۳) مقایسه شده است که این شکل

نهایی نیز دقت برنامه رایانه ای PLSTP را تأیید می کند. بنابراین

دقت برنامه رایانه ای PLSTP در سه بخش اصلی پروفیل غلظت

رسوبات در عمق، پروفیل سرعت جریان ساحلی و پروفیل دبی

انتقال رسوبات ساحلی در مقایسه با سایر مدلها مورد تأیید قرار



شکل ۱- مقایسهٔ پروفیل غلظت حاصل از برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP و پروفیل غلظت حاصل از مدل ون راین و اندازه‌گیریهای انجام شده [۶]

می‌گیرد. خصوصیات موج، جریان، رسوبات و بستر دریا در

خصوصیات موج، رسوبات و بستر دریا در

شکل (۱) به قرار زیر است

ارتفاع موج در نواحی عمیق دریا

عمق آب = 1.8 m

پریود موج

ارتفاع موج = 0.4 m

شیب ساحل

پریود موج = 3 sec

زاویه نزدیک شدن موج به ساحل با راستای عمود بر خط

سرعت متوسط جریان در راستای ساحل = 0.27 m/sec

ساحلی

سرعت ته‌نشینی دانه‌های رسوب = 0.012 m/sec

اندازهٔ ذرات مربوط به ۵۰ درصد ریزتر

قطر دانه‌های رسوب مربوط به ۵۰ درصد ریزتر = 0.17 mm

زبری بستر = 0.045 m

ضخامت لایهٔ اختلاط نزدیک بستر = 0.045 m

## ۶- پیش بینی انتقال رسوب در نواحی ساحلی ایران

با توجه به اینکه در کشور ما مطالعات و تحقیقات زیادی در

رابطه با پدیدهٔ انتقال رسوب در سواحل انجام نگرفته است،

بنابراین واضح است که داده‌های مناسب و کاملی در این زمینه

موجود نباشد. وضعیت داده‌های لازم در کشورمان را به صورت

زیر بررسی می‌کنیم:

۱- خصوصیات موج در نواحی عمیق دریا- این خصوصیات

شامل ارتفاع، پریود و زاویه نزدیک شدن موج به خط

ساحلی اند که معمولاً در پروژه‌های ساحلی دو مورد اول

همچنین خصوصیات موج و ساحل در شکل (۲) به قرار زیر

است

ارتفاع موج در نواحی عمیق دریا

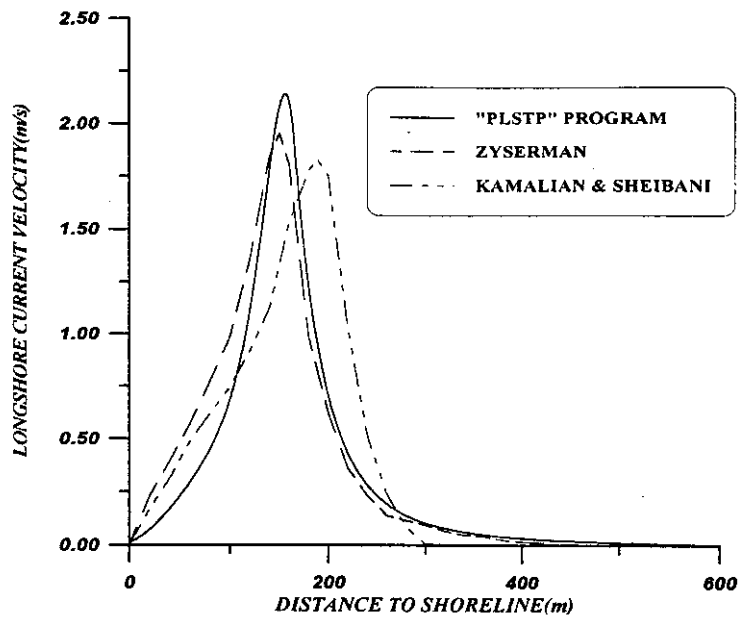
پریود موج

شیب ساحل

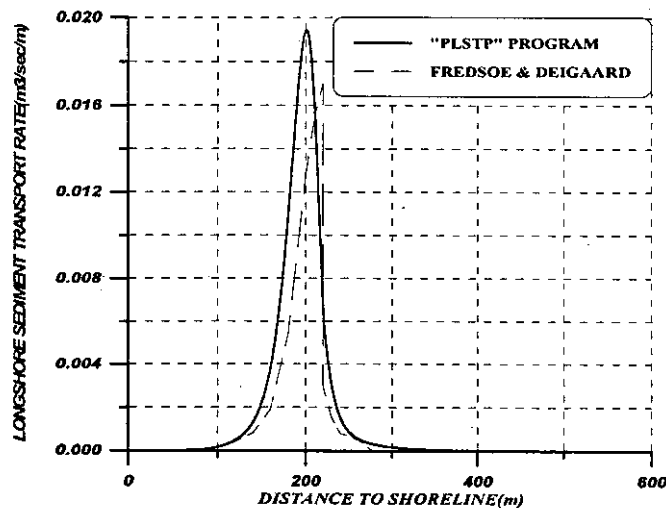
زاویه نزدیک شدن موج به ساحل با راستای عمود بر خط

ساحلی  $\alpha_0=45^\circ$





شکل ۲- مقایسهٔ پروفیل جریان ساحلی بر اساس نتایج برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP و مدل ارائه شده توسط آقابان کاملیان و شیبانی [۱] و نتایج مطالعات زیسرمان [۷]



شکل ۳- مقایسهٔ توزیع انتقال رسوبات حاصل از برنامهٔ PLSTP و مدل ارائه شده توسط دیگارد و فردزو [۳]

راستای خط ساحلی مورد بررسی، از طریق عکسهای هوایی یا روشهای معمول دیگر می‌توان  $\alpha_0$  را برای خط ساحلی مورد بررسی، تعیین کرد.

۲- خصوصیات دانه‌بندی رسوبات سواحل ماسه‌ای - دانه‌بندی رسوبات ساحل معمولاً بعد از نمونه‌گیری و آزمایش مشخص می‌شود. البته از اطلاعات دانه‌بندی رسوبات ماسه‌ای تنها دو مورد  $d_{50}$  و  $d_{90}$  برای اجرای برنامهٔ رایانه‌ای

معلوم است. همچنین در صورتی که خصوصیات موج به طور مستقیم موجود نباشد، می‌توان از آمار هواشناسی مربوط به سرعت باد و طول بادگیر برای محاسبهٔ خصوصیات موج استفاده کرد [۵].

در جدول (۱) نمونه‌هایی از اطلاعات مذکور آورده شده است. همچنین معمولاً جهت حرکت موج به طرف ساحل در نواحی عمیق دریا مشخص است و لذا بعد از مشخص شدن

جدول ۱- خصوصیات موج در نواحی عمیق دریا-بندر انزلی (دوره بازگشت = ۵۰ سال) [۴]

| طول بادگیر (km) | پریود موج (sec) | ارتفاع موج (m) | مدت (hr) | سرعت باد (m/s) | جهت       |
|-----------------|-----------------|----------------|----------|----------------|-----------|
| ۲۶۷/۵۷          | ۸/۰۹            | ۴/۸۴           | ۳        | ۳۰/۱           | شمال      |
| ۳۸۱/۵۴          | ۸/۴۶            | ۵/۶۸           | ۰/۸      | ۲۰/۲           | شمال شرقی |
| ۱۵۴/۷۴          | ۷/۹۱            | ۴/۳۷           | ۴        | ۲۴             | شرق       |
| ۱۸/۳۳           | ۵/۱۳            | ۲/۱            | ۸/۵      | ۱۹/۶           | غرب       |
| ۹۰/۹۲           | ۷/۳             | ۳/۸۶           | ۳        | ۲۵/۵           | شمال غربی |

“PLSTP” مورد لزوم است.

۳- توپوگرافی ساحل و بستر دریا - داده‌های مربوط به توپوگرافی ساحل و بستر دریا، کمابترین نوع داده‌ها در کشور ما هستند. برای هر منطقه ساحلی مورد بررسی لازم است که با روشهای معمول نقشه برداری و یا روشهای تعیین عمق آب در شرایط آرام دریایی، عمق آب در هر نقطه تعیین شود. واضح است که در مواردی که شیب ساحل تقریباً ثابت باشد، نیازی به عملیتهای نقشه برداری مذکور نخواهد بود.

براساس اطلاعات جدول (۱)، مثال عددی زیر برای تعیین دبی رسوبات انتقالی در راستای ساحل شرح داده شده و روی آن بحث می‌شود.

مثال عددی

جدول (۲) براساس اطلاعات فرض شده زیر و بعد از اجرای برنامه رایانه‌ای PLSTP به دست آمده است

شیب ساحل  $\beta = 0.01$   
اندازه ذرات مربوط به ۵۰ درصد ریزتر  $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$   
اندازه ذرات مربوط به ۹۰ درصد ریزتر  $d_{90} = 0.3 \text{ mm}$   
جرم حجمی آب دریا  $\rho_w = 1023 \text{ kg/m}^3$   
جرم حجمی رسوبات  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$   
ویسکوزیته سینماتیک آب دریا  $\nu = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$   
ثابت ون کارمن  $K = 0.4$

لازم به توضیح است که در جدول بالا، اعداد ستون چهارم

(مقادیر  $\alpha_0$ ) فرض شده‌اند و همچنین جهت حرکت رسوبات در شرایط مربوط به سه سطر اول جدول با شرایط مربوط به دو سطر آخر جدول عکس یکدیگرند که این موضوع با توجه به علامت مقادیر  $\alpha_0$  مشخص می‌شود.

همچنین اعداد ستون ششم (وزن رسوبات انتقالی بر حسب تن) از حاصلضرب اعداد ستون پنجم (دبی رسوبات انتقالی در راستای ساحلی) در اعداد ستون اول (مدت زمان وزش باد) و بعد از تبدیل واحد به دست آمده است. همچنان که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، زاویه نزدیک شدن موج به ساحل نسبت به راستای عمود بر خط ساحلی ( $\alpha_0$ ) یکی از مؤثرترین پارامترهای مرتبط با میزان رسوبات انتقالی در راستای ساحل است. مقایسه بین میزان رسوبات انتقالی در شرایط مربوط به سطر اول جدول با میزان رسوبات انتقالی در شرایط مربوط به سایر سطرهای این جدول، این مطلب را تأیید می‌کند. همچنین با توجه به نتایج این جدول مشخص می‌شود که ارتفاع موج نیز نقشی اساسی در انتقال رسوبات موازی با خط ساحلی ایفا می‌کند. در صورتی که در دو حالت مختلف، زوایای موج یکسان باشند دبی انتقال رسوبات در حالتی که ارتفاع موج بزرگتر باشد بیشتر خواهد بود.

همچنین برای بررسی تأثیر اندازه دانه‌های رسوب بر دبی انتقال رسوبات دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم  
حالت اول  $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$  ،  $d_{90} = 0.3 \text{ mm}$   
حالت دوم  $d_{50} = 0.25 \text{ mm}$  ،  $d_{90} = 0.37 \text{ mm}$

جدول (۳)، نتایج حاصل از برنامه رایانه‌ای “PLSTP” را در

جدول ۲- محاسبه دبی انتقال رسوبات

| (۱)      | (۲)       | (۳)     | (۴)              | (۵)             | (۶)            |
|----------|-----------|---------|------------------|-----------------|----------------|
| مدت (hr) | $H_0$ (m) | T (sec) | $\alpha_0$ (deg) | دبی رسوب (kg/s) | وزن رسوب (ton) |
| ۳        | ۴/۸۴      | ۸/۰۹    | ۵                | ۳۲۷۴            | ۳۵۳۵۹          |
| ۰/۸      | ۵/۶۸      | ۸/۴۶    | ۳۵               | ۱۲۳۵۴۷۵         | ۳۵۵۸۱۶۸        |
| ۴        | ۴/۳۷      | ۷/۹۱    | ۶۰               | ۲۶۹۷۲۰۱         | ۳۸۸۳۹۶۹۴       |
| ۸/۵      | ۲/۱       | ۵/۱۳    | -۶۰              | ۲۵۳۶۶۰          | ۷۷۶۱۹۹۶        |
| ۳        | ۳/۸۶      | ۷/۳     | -۳۵              | ۱۱۰۷۷۳۶         | ۱۱۹۶۳۵۴۹       |

جدول ۳- تأثیر اندازه ذرات رسوب بر دبی انتقال رسوب

| دبی رسوب (kg/sec)                            |  |
|--|--|
| برای<br>$d_{50}=0.25$ mm<br>$d_{90}=0.37$ mm | برای<br>$d_{50}=0.2$ mm<br>$d_{90}=0.3$ mm |
| ۳۱۵۳   | ۳۴۱۲                                       |
| ۱۲۳۲۹۱۶                                      | ۱۲۵۰۸۸۹                                    |
| ۲۶۶۳۴۸۰                                      | ۲۷۵۴۰۸۹                                    |
| ۲۴۹۶۱۸                                       | ۲۵۹۷۷۸                                     |
| ۱۰۹۴۱۶۹                                      | ۱۱۳۰۷۳۶                                    |

بستر بر دبی انتقال رسوبات موازی با خط ساحلی، نتایج برنامه رایانه‌ای "PLSTP" در حالت فرض کردن ضخامت این لایه در دو حالت مختلف در جدول (۵) آورده شده است. با مقایسه نتایج جدول (۵) در دو حالت، تفاوتی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن ملایم بودن شیب ساحل ( $\beta=0.01$ ) است. در صورتی که شیب ساحل تند باشد، نتایج با هم متفاوت خواهند بود که این مطلب در جدول (۹) نشان داده می‌شود.

لازم به توضیح است که ضخامت لایه اختلاط نزدیک بستر ( $\delta_s$ )، تنها در محاسبه توزیع ضریب اختلاط رسوب در عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد و لذا انتظار نداریم که تغییر آن باعث تغییرات شدید در مقدار دبی رسوبات انتقالی شود. جدول (۶) نیز براساس اطلاعات فرض شده جدول (۱) به دست آمده است با این تفاوت که شیب ساحل به جای ۰/۰۱

دو حالت بالا نشان می‌دهد. همچنان که نتایج نشان می‌دهند هر چه رسوبات ریزتر باشند دارای سرعت ته‌نشینی کمتری بوده و لذا شاهد غلظت بیشتر رسوبات در آب خواهیم بود و در نتیجه دبی انتقال رسوبات افزایش می‌یابد.

همچنین برای بررسی تأثیر زبری بستر بر دبی انتقال رسوبات موازی با خط ساحلی، نتایج برنامه رایانه‌ای "PLSTP" در حالت فرض کردن زبری بستر در سه حالت مختلف در جدول شماره (۴) آورده شده است.

همچنان که نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد در شرایط یکسان خصوصیات موج (ارتفاع، پریود و زاویه موج) و خصوصیات رسوب ( $d_{50}$ ,  $d_{90}$ ) هر چه زبری بستر بیشتر باشد، دبی رسوبات انتقالی کمتر خواهد بود.

همچنین برای بررسی تأثیر ضخامت لایه اختلاط نزدیک

جدول ۴- تأثیر زبری بستر بر دبی انتقال رسوبات

| دبی رسوبات انتقالی (kg/sec) |                |                  |
|-----------------------------|----------------|------------------|
| برای<br>k=1.5 mm            | برای<br>k=1 mm | برای<br>k=0.5 mm |
| ۲۵۳۰                        | ۲۷۶۹           | ۳۳۷۱             |
| ۷۴۰۰۷۴                      | ۹۱۸۹۷۵         | ۱۲۹۲۰۰۶          |
| ۱۴۵۹۲۵۴                     | ۱۸۹۲۸۲۳        | ۲۸۴۶۹۱۸          |
| ۱۵۵۳۵                       | ۱۹۰۴۵          | ۲۶۵۴۲            |
| ۶۰۰۷۶۶                      | ۷۷۷۸۶۲         | ۱۱۶۸۱۷۳          |

دبی انتقال رسوبات نشان داده شده است. برخلاف نتایج جدول (۵) در اینجا نتایج متفاوتی برای دو حالت مختلف ضخامت لایه اختلاط فرض شده مشاهده می‌شود، یعنی افزایش ضخامت لایه اختلاط نزدیک بستر باعث افزایش دبی رسوبات انتقالی در راستای ساحل می‌شود. البته همان گونه که قبلاً توضیح داده شد به دلیل اینکه ضخامت لایه اختلاط نزدیک بستر تنها در محاسبه توزیع ضریب اختلاط رسوب در عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد لذا تغییر آن باعث تغییر قابل توجه دبی رسوبات انتقالی نخواهد شد که این موضوع در جدول (۹) به وضوح دیده می‌شود.

جدول (۱۰) براساس اطلاعات فرض شده جدول (۲) به دست آمده است. تنها تفاوت این جدول با جدول (۲) در سه ستون آخر آنهاست که علت آن این است که در ستون چهارم مقادیر فرض شده برای زاویه نزدیک شدن موج به ساحل ( $\alpha_0$ ) برای دو جدول متفاوت است. همچنین برای این مثال تنها چهار حالت مختلف خصوصیات موج منظور شده است و فرض بر این است که خط ساحلی مورد نظر در منطقه ساحلی به گونه‌ای قرار گرفته است که تنها تحت تأثیر این چهار حالت قرار می‌گیرد. با مقایسه جداول (۱۰) و (۲)، تأثیر قابل ملاحظه زاویه نزدیک شدن موج به ساحل به وضوح مشاهده می‌شود.

همچنین جدول (۱۱)، براساس اطلاعات فرض شده جدول (۱۰) به دست آمده است با این تفاوت که شیب ساحل به جای  $۰/۰۱$  برابر با  $۰/۰۰۱$  در نظر گرفته شده است. با مقایسه

جدول ۵- تأثیر ضخامت لایه اختلاط بر دبی انتقال رسوبات

| دبی رسوب (kg/sec)       |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| برای<br>$\delta_s=4$ cm | برای<br>$\delta_s=2$ cm |
| ۳۲۷۴                    | ۳۲۷۴                    |
| ۱۲۳۵۴۷۵                 | ۱۲۳۵۴۷۵                 |
| ۲۶۹۷۲۰۱                 | ۲۶۹۷۲۰۱                 |
| ۲۵۳۶۶۰                  | ۲۵۳۶۶۰                  |
| ۱۱۰۷۷۳۶                 | ۱۱۰۷۷۳۶                 |

برابر با  $۰/۰۳$  در نظر گرفته شده است. با مقایسه نتایج این جدول با نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود که سه برابر شدن شیب ساحل باعث افزایش میزان رسوبات انتقالی تا حدود دو برابر می‌شود.

همچون جدول (۲) در اینجا نیز مشاهده می‌شود که زاویه نزدیک شدن موج به ساحل و ارتفاع موج دو پارامتر مهم و مؤثر در تعیین میزان انتقال رسوبات ساحلی‌اند.

همچنین جداول (۷) و (۸)، به ترتیب تأثیر اندازه دانه‌های رسوب و زبری بستر را بر دبی انتقال رسوبات نشان می‌دهند که نتایج حاصل مشابه نتایج جداول (۳) و (۴) هستند، یعنی بزرگتر بودن ذرات رسوب یا افزایش زبری بستر باعث کاهش دبی رسوبات انتقالی می‌شود.

در جدول (۹)، تأثیر ضخامت لایه اختلاط نزدیک بستر بر

جدول ۶- محاسبه دبی انتقال رسوبات

| (۱)      | (۲)       | (۳)     | (۴)              | (۵)             | (۶)            |
|----------|-----------|---------|------------------|-----------------|----------------|
| مدت (hr) | $H_0$ (m) | T (sec) | $\alpha_0$ (deg) | دبی رسوب (kg/s) | وزن رسوب (ton) |
| ۳        | ۴/۸۴      | ۸/۰۹    | ۵                | ۴۸۴۷            | ۵۲۳۴۸          |
| ۰/۸      | ۵/۶۸      | ۸/۴۶    | ۳۵               | ۲۶۱۳۰۴۶         | ۷۵۲۵۵۷۲        |
| ۴        | ۴/۳۷      | ۷/۹۱    | ۶۰               | ۴۶۷۶۴۲۹         | ۶۷۳۴۰۵۷۸       |
| ۸/۵      | ۲/۱       | ۵/۱۳    | -۶۰              | ۶۲۷۶۴۱          | ۱۹۲۰۵۸۱۵       |
| ۳        | ۳/۸۶      | ۷/۳     | -۳۵              | ۲۶۳۱۱۹۱         | ۲۸۴۱۶۸۶۳       |

جدول ۷- تأثیر اندازه ذرات رسوب بر دبی انتقال رسوب

| دبی رسوب (kg/sec)                            |  |
|--|--|
| برای<br>$d_{50}=0.25$ mm<br>$d_{90}=0.37$ mm | برای<br>$d_{50}=0.2$ mm<br>$d_{90}=0.3$ mm |
| ۴۸۲۶   | ۴۹۲۲                                       |
| ۲۶۰۴۶۲۷                                      | ۲۶۴۰۶۱۲                                    |
| ۴۶۰۱۰۶۱                                      | ۴۷۹۴۹۵۲                                    |
| ۶۲۱۸۱۳                                       | ۶۳۸۵۵۳                                     |
| ۲۵۹۵۲۳۲                                      | ۲۶۷۹۰۷۴                                    |

جدول ۸- تأثیر زبری بستر بر دبی انتقال رسوبات

| دبی رسوبات انتقالی (kg/sec) |                |                  |
|-----------------------------|----------------|------------------|
| برای<br>k=1.5 mm            | برای<br>k=1 mm | برای<br>k=0.5 mm |
| ۳۳۸۷                        | ۳۹۱۶           | ۵۰۰۸             |
| ۱۵۸۵۳۳۲                     | ۱۹۶۱۸۲۷        | ۲۷۲۶۷۹۴          |
| ۲۶۷۷۰۰۴                     | ۳۴۲۳۸۴۲        | ۵۰۱۶۶۴۷          |
| ۳۸۲۲۴۴                      | ۴۷۲۳۸۲         | ۶۵۹۵۲۰           |
| ۱۴۷۶۳۹۹                     | ۱۸۸۸۲۶۲        | ۲۷۷۲۴۳۵          |

جدول ۹- تأثیر ضخامت لایه اختلاط بر دبی انتقال رسوبات

| دبی رسوب (kg/sec)       |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| برای<br>$\delta_s=4$ cm | برای<br>$\delta_s=2$ cm |
| ۴۸۴۷                    | ۴۸۴۷                    |
| ۲۶۱۳۱۷۰                 | ۲۶۱۱۳۰۳                 |
| ۴۶۷۶۶۲۱                 | ۴۶۷۵۵۳۸                 |
| ۶۲۷۶۹۳                  | ۶۲۷۳۸۴                  |
| ۲۶۳۱۸۰۴                 | ۲۶۲۹۱۳۴                 |

جدول ۱۰- محاسبه دبی انتقال رسوبات

| (۶)            | (۵)             | (۴)              | (۳)     | (۲)       | (۱)      |
|----------------|-----------------|------------------|---------|-----------|----------|
| وزن رسوب (ton) | دبی رسوب (kg/s) | $\alpha_0$ (deg) | T (sec) | $H_0$ (m) | مدت (hr) |
| ۳۴۲۰۰۷۹        | ۳۱۶۶۷۴          | ۲۰               | ۸/۰۹    | ۴/۸۴      | ۳        |
| ۵۳۷۳۸۲۶        | ۱۸۶۵۹۱۲         | ۵۰               | ۸/۴۶    | ۵/۶۸      | ۰/۸      |
| ۷۲۸۹۴۴۰        | ۲۳۸۲۱۷          | -۴۵              | ۵/۱۳    | ۲/۱       | ۸/۵      |
| ۱۱۶۱۶۱۶        | ۱۰۷۵۵۷          | -۱۵              | ۷/۳     | ۳/۸۶      | ۳        |

جدول ۱۱- محاسبه دبی انتقال رسوبات

| (۶)            | (۵)             | (۴)              | (۳)     | (۲)       | (۱)      |
|----------------|-----------------|------------------|---------|-----------|----------|
| وزن رسوب (ton) | دبی رسوب (kg/s) | $\alpha_0$ (deg) | T (sec) | $H_0$ (m) | مدت (hr) |
| ۹۶۵۵۲۰         | ۸۹۴۰۰           | ۲۰               | ۸/۰۹    | ۴/۸۴      | ۳        |
| ۱۲۴۱۸          | ۴۳۱۲            | ۵۰               | ۸/۴۶    | ۵/۶۸      | ۰/۸      |
| ۱۸۵۳۳۸۱        | ۶۰۵۶۸           | -۴۵              | ۵/۱۳    | ۲/۱       | ۸/۵      |
| ۲۱۵۵۴۶         | ۱۹۹۵۸           | -۱۵              | ۷/۳     | ۳/۸۶      | ۳        |

شکل (۲)، و توزیع انتقال رسوبات در ناحیه ساحلی، شکل (۳)، انجام شده است. بنابراین می‌توان از این برنامه برای پیش بینی میزان رسوباتی که به موازات خط ساحلی جابه جا می‌شوند استفاده کرد که مثال عددی تشریح شده در قسمتهای قبل کاربرد برنامه را در این مورد به وضوح نشان می‌دهد.

نتایج این جدول با نتایج جدول (۱۰) مشاهده می‌شود که کم شدن شیب ساحل تا ۱۰ برابر باعث کاهش شدید دبی رسوبات انتقالی می‌شود که البته میزان این کاهش به ارتفاع و زاویه نزدیک شدن موج به ساحل نیز بستگی دارد.

## ۷- نتیجه گیری

کنترل صحت و دقت برنامه رایانه‌ای "PLSTP" از طریق کنترل پروفیل‌های غلظت، شکل (۱)، سرعت جریان ساحلی،

## واژه نامه

1. prediction of sediment transport in littoral zones
2. Zyserman
3. Fredsoe
4. Deigaard

## مراجع

۱. کمالیان، ر.، و شیبانی، ج.، "پروژه تحقیقاتی: مدل ریاضی پیش بینی جریان و میزان انتقال رسوب ساحلی،" مرکز تحقیقات آب، تهران، شهریور ۱۳۷۴.
2. Abbott, M. B., and Basco, D. R., *Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*, Longman, 1988.
3. Fredsoe, J., and Deigaard, R., *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, World Scientific, 1992.
4. JICA, "Master Plan and Feasibility Study for The Port of Anazali," Vol. III, Jan. 1995.

5. U. S. Army Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Department of the Army Corps of Engineers, Washington, D.C., Vol. I, 1977.
6. Van Rijn, L. C., *Sediment Transport by Currents & Waves*, Delft Hydraulics, 1989.
7. Zyserman, J., "Characteristics of Stable Rip-Current Systems on a Coast with a Longshore Bar," Series Paper No. 46, Inst. Of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, ISVA, Techn. Univ. Denmark, P. 178, 1989.