توسعهٔ یک مدل رایانه‌ای برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب ساحلی

ناصر طالب بیدختی* و محمدرضا نیک منش**

بخش مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۷۸/۱۰/۱۳ – دریافت نسخه نهایی: ۷۹/۱۲/۱٤)

چکیده : در این مقاله پدیدهٔ انتقال رسوب موازی با خط ساحلی در نواحی ساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. از بین عوامل مؤثر در پدیدهٔ 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 ممنتم با در نظر گرفتن عبارتهای مربوط به تنشهای تشعشعی برای راستای موازی با خط ساحلی حل شده‌اند. برای تعیین پروفیل غلظت رسوبات معلق در عمق نیز معادلهٔ انتقال-پخش رسوب در حالت میانگین زمانی حل شده است.

براساس روابط مذکور و سایر روابط مورد نیاز برای بررسی پدیدهٔ انتقال رسوبات ساحلی برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP[1] 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 پدیدهٔ 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. درنهایت نتایج حاصل از این برنامهٔ رایانه‌ای با سایر نتایج و اندازه‌گیریهای موجود مقایسه شده است که این مقایسه، صحت و دقت برنامهٔ 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 concentraion profile of suspended sediments at depth, the convection-diffusion equations must be solved.***

A computer program called "PLSTP" (Prediction of Sediment Transpornt 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***

---

* – دانشیار ** – کارشناس ارشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

۱- مقدمه

پدیدهٔ انتقال رسوب یکی از مهمترین فرایندهای ساحلی است که عوامل عمدهٔ 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 نیزعمدتاً در نزدیکی محل شکست موج و در اثر ایجاد تغییرات در خصوصیات امواج به وجود می‌آیند.

ناپایداری سواحل و جابه جایی 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 حوضچهٔ 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 پدیدهٔ 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 پریودشان 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 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 ممنتم موج در هر نقطه دارای مؤلفه‌های عمودی و برشی‌اند که به آنها تنشهای تشعشعی موج گفته می‌شود. در صورتی که x راستای عمود بر خط ساحلی و y راستای موازی با خط ساحلی باشد، آن گاه مؤلفهٔ تنش تشعشعی موج در راستای عمود بر ساحل و همچنین مؤلفهٔ برشی تنش تشعشعی موج به ترتیب از دو معادلهٔ زیر محاسبه خواهند شد [۳].

$$S_{xx} = S_{ss}\cos^2\alpha + S_{nn}\sin^2\alpha \qquad (۱)$$

$$S_{xy} = (S_{ss} - S_{nn})\sin\alpha\cos\alpha \qquad (۲)$$

در معادلات بالا α زاویه بین محور x و جهت پیشروی موج و S_{ss} و S_{nn} نیز به ترتیب مؤلفهٔ تنش تشعشعی 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 ممنتم 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 نقطهٔ شکست موج و سپس بالا آمدن سطح

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

آب از نقطهٔ شکست تا ساحل می‌شود کـه آن را پـایین آمـدن و بلند شدن موج می‌نامند.

در صورتی که تغییرات توپـوگرافـی خـط سـاحلی و تنـش تشعشعی در راستای موازی با خط ساحلی (محور y) نـاچـیز و قابل صرف نظر کردن باشد، آن گاه معادلات پیوستگی و ممنتـم به ترتیب به صورت دو معادلهٔ ساده شدهٔ (۳) و (٤) در خواهنـد آمد [۳]

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = gD\frac{\partial \Delta D}{\partial x} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} = \tau_b - \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x}\right) \qquad (٤)$$

$$\varepsilon = \frac{4a^2}{T}\cos^2\alpha \qquad (٥)$$

$$a = \frac{U_{lm}T}{2\pi} \qquad (٦)$$

$$U_{lm} = \frac{\pi H}{T}\frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}D\right)} \qquad (۷)$$

در معادلات بالا D عمق آب، ΔD تغییر سطح آب در اثر پدیـدهٔ بلند شدن و پایین آمدن موج، ε ضریب پخـش ممنتـم، a دامنهٔ حرکت نوسانی موج نزدیک بسـتر و U_{lm} نـیز سـرعت نوسـانی موج نزدیک بسترند. همچنین H، L و T نیز بـه ترتیـب ارتفـاع، طول و پریود موج‌اند.

همچنین در معادلهٔ ممنتم، τ_b تنـش برشـی بسـتر اسـت کـه برحسب ضریـب مقـاومت بسـتر (C) بـه صـورت زیـر نوشـته می‌شود.

$$\tau_b = \rho\frac{V|V|}{c} \qquad (۸)$$

لازم به توضیح است که ضریب مقـاومت بسـتر خـود برحسـب پارامترهایی نظـیر ضخـامت لایـه مـرزی مـوج، زبـری بسـتر و ضرایب اصطکاک بیان می‌شود.

معادلات پیوستگی و ممنتم از روش عددی تفاضل محـدود حل خواهند شد. با حـل معادلـهٔ پیوسـتگی، نحـوهٔ تغییـر تـراز متوسط سطح آب به دست خواهد آمد و همچنیـن بعـد از حـل معادلهٔ ممنتم مقدار سرعت متوسط جریان در راستای ساحل بـه دست خواهد آمد که از ایـن سـرعت سـپس در تعییـن پروفیـل سرعت در عمق در هر نقطه استفاده خواهد شد.

٤- روش حل معادلات حاکم بر جریان ساحلی

٤-۱- حل معادلهٔ پیوستگی

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

$$-\frac{1}{\rho}\left\{\frac{S_{xx}^{i+1}-S_{xx}^{i}}{\Delta x}\right\} = g\left(\frac{D^i + D^{i+1}}{2}\right)\left\{\frac{\Delta D^{i+1}-\Delta D^i}{\Delta x}\right\} \qquad (۹)$$

یا می‌توان نوشت

$$\Delta D^i = \Delta D^{i+1} + \frac{2}{\rho g}\left(\frac{S_{xx}^{i+1}-S_{xx}^{i}}{D^i + D^{i+1}}\right) \qquad (۱۰)$$

لازم به توضیح است که در نرم‌افزار ارائه شـده بعـد از محاسـبهٔ ΔD در هر گره و اضافه کردن آن به عمق قبلـی، عمـق اصـلاح شدهٔ جدید را مجدداً برای محاسـبهٔ خصوصیـات مـوج (طـول، ارتفاع و تنشهای تشعشعی مـوج) کـه در مراحـل قبلـی برنامـه محاسبه شده‌اند مورد استفاده قرار داده و بـا اصـلاح محاسـبات قبلی، تغییر سطح متوسط تراز آب در هر گره را مجدداً به دست می‌آوریم و با مقادیر محاسبه شدهٔ قبلی مقایسـه می‌کنیـم. عمـل مقایسه تا زمانی که اختلاف بین دو ΔD محاسبه شدهٔ متوالـی از حد قابل قبولی کمتر شود، ادامه خواهد یافت.

شرط مرزی برای این مسئله، مشخص بودن مقدار تغییر تراز متوسط سطح آب در نقطهٔ انتهایی گره‌بندی در سمت دریاسـت. بعد از گره‌بندی ناحیه در راستای عمود بر خط سـاحلی، مقـدار ΔD را در نقطهٔ انتهایی سمت دریا برابر با صفر قـرار داده و بـه کمک معادلهٔ (۱۰) مقدار ΔD را در نقطـهٔ قبـل از آن بـه دسـت می‌آوریم. به همین صورت بـا معلـوم شـدن ΔD در هـر نقطـه می‌توان مقدار آن را در نقطهٔ قبل از آن نیز به دست آورد و ایـن روند از سمت دریا به سمت خشکی ادامه خواهـد یـافت تـا در نهایت مقدار ΔD روی خط ساحلی (نقطهٔ شـروع گره‌بنـدی در سمت خشکی) که در واقع همان بیشترین بلند شدن موج است،

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

به دست آید.

٤-٢- حل معادلهٔ ممنتم

برای حل معادلهٔ ممنتم 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

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x}\left\{S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}\right\} \qquad (١١)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x}\right) = \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x}\Big|^{i+1} - \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x}\Big|^{i} \qquad (١٢)$$

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

$$\begin{aligned} \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x}\Big|^{i+1} &= \frac{\varepsilon D|^{i+1} + \varepsilon D|^{i}}{2}\left(\frac{V^{i+1} - V^{i}}{\Delta x}\right) \\ \varepsilon D \frac{\partial V}{\partial x}\Big|^{i} &= \frac{\varepsilon D|^{i} + \varepsilon D|^{i-1}}{2}\left(\frac{V^{i} - V^{i-1}}{\Delta x}\right) \end{aligned} \qquad (١٣)$$

با استفاده از معادلات (١١) تا (١٣) معادلهٔ ممنتم به شکل تفاضلی و به صورت معادلهٔ (١٤) در خواهد آمد

$$\frac{1}{2\rho\Delta x}\left\{S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}\right\} = \frac{V^{i}\left|V_{old}^{i}\right|}{C^{i^2}} - \frac{\varepsilon D|^{i+1} + \varepsilon D|^{i}}{2}\left(\frac{V^{i+1} - V^{i}}{\Delta x}\right) + \frac{\varepsilon D|^{i} + \varepsilon D|^{i-1}}{2}\left(\frac{V^{i} - V^{i-1}}{\Delta x}\right) \qquad (١٤)$$

که در آن

$$C^{i} = 2.5\left(\ln\left(\frac{D^{i}}{\delta_{w}^{i}}\right) - 1\right)\frac{1 + \sqrt{\frac{4\left|V_{old}^{i}\right|}{Y^{i}} + 1}}{2} \qquad (١٥)$$

$$Y^{i} = \frac{2}{\Pi} f_{w}^{i} U_{lm}^{i} \frac{1 + \cos^{2}\phi^{i}}{2}\left\{2.5\ln\left(\frac{D^{i}}{\delta_{w}^{i}}\right) - 1\right\}^{2} \qquad (١٦)$$

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

$$\left|V_{old}^{i}\right| = \sqrt{\left|\frac{\left(S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}\right)M^{2}D^{i^{1/3}}}{2\rho g\Delta x}\right|} \qquad (١٧)$$

در معادلهٔ بالا M ضریب مانینگ بستر دریاست که معمولاً مقدار آن ٣٢ فرض می‌شود.

در رابطه با نحوهٔ به دست آوردن معادلهٔ (١٧) باید گفت که این معادله همان معادلهٔ ممنتم است که ضریب پخش ممنتم در آن صفر در نظر گرفته شده است. ذکر این نکته ضروری است که مقدار ضریب پخش ممنتم بسیار کوچک بوده و می‌توان برای تعیین مقدار سرعت، به عنوان حدس اولیه مقدار آن را صفر در نظر گرفته و از معادلهٔ (١٧) استفاده کنیم.

با مشخص شدن مقدار $\left|V_{old}^{i}\right|$ در معادلهٔ (١٧) تنها سه مجهول V^{i-1}، V^{i} و V^{i+1} باقی خواهد ماند. برای سایر گره‌ها نیز وضعیت مشابهی وجود دارد و لذا دستگاه معادلات حاصل، دستگاهی است که هر یک ازمعادلات آن شامل سه مجهول مقدار سرعت در آن گره و دو گرهٔ قبل و بعد از آن بوده و بنابراین شکل کلی هر یک از معادلات دستگاه به صورت زیر خواهد بود

$$K_{1}^{i}V^{i-1} + K_{2}^{i}V^{i} + K_{3}^{i}V^{i+1} = K_{4}^{i} \qquad (١٨)$$

در معادلهٔ بالا، ضرایب معلوم به صورت زیر هستند

$$K_{4}^{i} = -\frac{1}{2\rho\Delta x}\left(S_{xy}^{i+1} - S_{xy}^{i-1}\right) \qquad (١٩)$$

$$K_{3}^{i} = \frac{1}{2\Delta x^{2}}\left\{(\varepsilon D)^{i+1} + (\varepsilon D)^{i}\right\} \qquad (٢٠)$$

$$K_{2}^{i} = \left\{-\left(K_{3}^{i} + K_{1}^{i}\right) - \frac{\left|V_{old}^{i}\right|}{C^{i^2}}\right\} \qquad (٢١)$$

$$K_{1}^{i} = \frac{1}{2\Delta x^{2}}\left\{(\varepsilon D)^{i} + (\varepsilon D)^{i-1}\right\} \qquad (٢٢)$$

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

قرار گرفته و سایر اعضای ماتریس صفرند. برای حل چنین دستگاهی از روش دوجارویی 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 معادلهٔ (۲۳) با یکدیگر ارتباط دارند

$$V^i = E_i V^{i+1} + F_i \qquad (۲۳)$$

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

$$V^{i-1} = E_{i-1} V^i + F_{i-1} \qquad (۲٤)$$

با جاگذاری معادلهٔ (۲٤) در معادلهٔ (۱۸) خواهیم داشت

$$K_1^i\left(E_{i-1}V^i + F_{i-1}\right) + K_2^i V^i + K_3^i V^{i+1} = K_4^i \qquad (۲۵)$$

معادلهٔ بالا را به صورت معادلهٔ (۲٦) هم می‌توان نوشت

$$V^i = \frac{-K_3^i}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i} V^{i+1} + \frac{K_4^i - K_1^i F_{i-1}}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i} \qquad (۲٦)$$

با مقایسهٔ معادلات (۲۳) و (۲٦) خواهیم داشت

$$E_i = \frac{-K_3^i}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i}$$
$$F_i = \frac{K_4^i - K_1^i F_{i-1}}{K_1^i E_{i-1} + K_2^i} \qquad (۲۷)$$

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

شرط مرزی برای این مسئله مشخص بودن مقادیر سرعت در دو گرهٔ 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 گرهٔ ابتدایی برابر با صفر قرار دهیم، اولین معادلهٔ دستگاه به صورت زیر در خواهد آمد

$$V^1 = A_1 V^2 + B_1 \qquad (۲۸)$$

توجه داریم که ضرایب معلوم A_1 و B_1 در معادلهٔ بالا همان ضرایب عمومی E و F در گرهٔ شمارهٔ ۱ (E_1, F_1) هستند. حال ضرایب E و F در گره‌های بعدی را طبق معادلهٔ (۲۷) و با توجه به معلوم بودن مقادیر این ضرایب در یک گره قبلتر از آن تعیین می‌کنیم. بعد از تعیین ضرایب E و F در گرهٔ انتهایی، معادلهٔ آخر دستگاه به صورت زیر در خواهد آمد

$$V^{n-1} = E_{n-1} V^n + F_{n-1} \qquad (۲۹)$$

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

$$V^{n-1} = F_{n-1} \qquad (۳۰)$$

بعد از مشخص شدن مقدار سرعت در گرهٔ ماقبل آخر طبق معادلهٔ بالا، از معادلهٔ ماقبل آخر دستگاه شروع کرده و مقدار سرعت در هر گره را با توجه به معلوم بودن مقدار سرعت در گرهٔ 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 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 آمدهٔ جدید را جایگزین $\left|V_{old}^i\right|$ 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 آمدهٔ متوالی از حد قابل قبولی کمتر شود ادامه خواهد یافت.

٤-۳- توزیع سرعت در عمق

بر اساس روش ون راین، توزیع سرعت در عمق به صورت لگاریتمی فرض می شود و دو معادلهٔ لگاریتمی مختلف یکی برای نزدیکی بستر جایی که تحت تأثیر لایه مرزی موج قرار دارد و دیگری برای فواصل دورتر از بستر ارائه می‌شود [٦]. در خارج از لایه مرزی موج $\left(z \geq 3\delta_w\right)$، معادلهٔ زیر برای تعیین توزیع سرعت در عمق ارائه می‌شود

$$u = \frac{V.\ln\left(\frac{30z}{K_a}\right)}{-1+\ln\left(\frac{30D}{K_a}\right)} \qquad (۳۱)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

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

$$u = \frac{V_\delta . \ln\left(\frac{30z}{K_e}\right)}{\ln\left(\frac{90\delta_w}{K_e}\right)} \qquad (۳۲)$$

$$V_\delta = \frac{V . \ln\left(\frac{90\delta_w}{K_a}\right)}{-1 + \ln\left(\frac{30D}{K_a}\right)} \qquad (۳۳)$$

در معادلات بالا داریم

δ_w = ضخامت لایهٔ مرزی موج که از معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود

$$\delta_w = 0.072K_e\left(\frac{a}{K_e}\right)^{0.75} \qquad (۳٤)$$

a = دامنهٔ حرکت نوسانی موج نزدیک بستر، معادلهٔ (٦)

K_e = زبری مؤثر بستر که براساس ارتفاع چین خوردگی بستر (h_r)، طول چین خوردگی بستر (λ) و قطر متوسط ذرات بستر (d_{50}) به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$K_e = 25d_{50} + 16\frac{h_r^2}{\lambda} \qquad (۳۵)$$

K_a = زبری ظاهری بستر که خود برحسب زبری مؤثر بستر (K_e) است [٦].

٤-٤- توزیع غلظت رسوبات غیرچسبنده در عمق

تلاطم ناشی از شکست امواج و نیز عوامل پخش ممنتم ناشی از حضور امواج و جریانها باعث بلند شدن رسوبات بستر و معلق شدن آنها می‌شود. همچنین نیروهای جاذبه، شناوری و مقاوم به حرکت سعی در ته‌نشین کردن رسوبات دارند. بر اساس اندرکنش پدیده‌های بالا، توزیع لحظه‌ای غلظت رسوبات در عمق تحت عنوان معادلهٔ انتقال-پخش به صورت زیر ارائه می‌شود

$$\frac{dc}{dt} = W_s\frac{\partial c}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z}\left(\varepsilon_{s,cw}\frac{\partial c}{\partial Z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_{s,cw}\frac{\partial c}{\partial x}\right) \qquad (۳٦)$$

با توجه به اینکه تغییرات غلظت رسوبات در راستای افقی در مقایسه با راستای عمودی (در عمق) ناچیز است لذا با حذف عبارت آخر معادلهٔ بالا، معادلهٔ ساده شدهٔ زیر که معادلهٔ غلظت رسوبات در راستای قائم و در حالت یک بعدی است، به دست خواهد آمد

$$\frac{\partial c}{\partial t} = W_s\frac{\partial c}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z}\left(\varepsilon_{s,cw}\frac{\partial c}{\partial Z}\right) \qquad (۳۷)$$

در معادلات (٣٦) و (٣٧)، W_s سرعت ته‌نشینی ذرات رسوب و C نیز غلظت آنهاست. همچنین x و z دو راستای افقی و عمودی و t زمان است.

اگر از معادلهٔ ساده شدهٔ بالا بر روی زمان میانگین‌گیری شود، معادلهٔ انتقال-پخش میانگین زمانی به صورت زیر به دست خواهد آمد

$$W_s\frac{\partial \bar{c}}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z}\left(\varepsilon_{s,cw}\frac{\partial \bar{c}}{\partial Z}\right) = 0 \qquad (۳۸)$$

یا می‌توان نوشت

$$W_s\bar{c} + \bar{\varepsilon}_{s,cw}\frac{\partial \bar{c}}{\partial Z} = 0 \qquad (۳۹)$$

در معادلات (٣٨) و (٣٩)، داریم

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

$\bar{\varepsilon}_{s,cW}$ = ضریب اختلاط رسوب مستقل از زمان

همچنین برای نقاطی که ترازشان کوچکتر یا مساوی با تراز مرجع غلظت بستر باشد، معادلهٔ زیر برای محاسبهٔ غلظت در آن نقاط ارائه شده است [٦].

$$\bar{c}_a = 0.015\frac{d_{50}}{a}\frac{T^{15}}{D_*^{0.3}} \qquad (٤۰)$$

در معادلهٔ بالا داریم

a = تراز مرجع غلظت بستر که برابر با بیشترین مقدار نصف ارتفاع چین‌خوردگی بستر و ضخامت لایه مرزی موج در نظر گرفته می‌شود. همچنین تراز مرجع غلظت بستر نباید از یک صدم عمق آب کمتر باشد [٦].

$$a = \mathrm{Max}\left\{\frac{1}{2}h_r \;\; \delta_w \right. \qquad (٤۱)$$

$$a \geq 0.01D \qquad (٤۲)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

h_r = ارتفاع چین خوردگی بستر

δ_w = ضخامت لایهٔ مرزی موج

D = عمق آب

T = پارامتر تنش برشی بستر که از معادلهٔ زیر به دست می‌آید

$$T = \frac{\tau'_{cw} - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \qquad (٤٣)$$

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

τ_{cr} = تنش برشی بحرانی بستر

D_* = پارامتر ذره که بر اساس چگالی نسبی رسوبات (S_s)، ویسکوزیتهٔ سینماتیک آب (ν) و قطر متوسط ذرات (d_{50}) به صورت زیر نوشته می‌شود

$$D_* = d_{50}\left[\frac{(S_s - 1)g}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (٤٤)$$

٤-٥- 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 می‌گیرد. برای محاسبهٔ دبی رسوباتی که به صورت بار معلق انتقال می‌یابند باید انتگرال زیر به صورت عددی حل شود

$$q_{s,c} = \int_a^D u\bar{c}dz \qquad (٤٥)$$

در معادلهٔ بالا که برای گره‌ای با عمق D و تراز مرجع غلظت بستر a نوشته می‌شود، $q_{s,c}$ 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 می‌یابند، معادلهٔ تحلیلی زیر ارائه شده است [٦]

$$q_{b,c} = 0.25\rho_s u'_{*,c} d_{50} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \qquad (٤٦)$$

$$u'_{*,c} = \sqrt{\frac{\tau'_c}{\rho}} \qquad (٤٧)$$

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 دانه‌های رسوب بستر ناشی از جریان، τ'_c تنش برشی بستر ناشی از جریان، و ρ_s نیز جرم حجمی رسوبات است.

بعد از محاسبهٔ دبی رسوبات انتقالی در راستای ساحل در دو بخش بار بستر وبار معلق، دبی کل رسوبات انتقالی ناشی از جریان از مجموع دو دبی مذکور به دست می‌آید

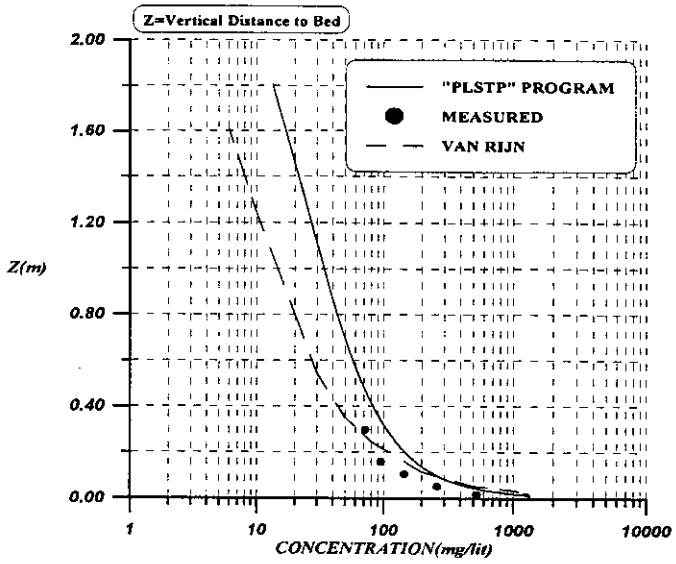
$$q_c = q_{s,c} + q_{b,c} \qquad (٤٨)$$

برای محاسبهٔ 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 [٦].

٥- نتایج برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP

برای کنترل صحت و دقت برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP قسمتهای مختلف آن با نتایج و اندازه‌گیریهای موجود مقایسه شده است که نتایج این مقایسه‌ها رضایتبخش است. در شکل (١) پروفیل غلظت حاصل از برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP و پروفیل غلظت حاصل از مدل ون راین و اندازه‌گیریهای انجام شده مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنان که در شکل مشخص است اندازه‌گیریهای انجام شده فقط تا فاصلهٔ ٤٠ سانتیمتری از کف وجود دارد که البته در همین فاصله نیز دقت برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP قابل قبول است. در شکل (٢) پروفیل جریان ساحلی حاصل از برنامهٔ رایانه‌ای 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 برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP با پروفیل مدل ارائه شده توسط زیسرمان[٢] تطابق بیشتری دارد. درنهایت جواب نهایی مسئلهٔ انتقال رسوبات ساحلی یعنی توزیع دبی رسوبات انتقالی برای برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP و مدل ارائه شده توسط فردزو[٣] و دیگارد[٤] در شکل (٣) مقایسه شده است که این شکل نهایی نیز دقت برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP را تأیید می‌کند. بنابراین دقت برنامهٔ رایانه‌ای 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]



شکل ۱- مقایسهٔ پروفیل غلظت حاصل از برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP و پروفیل غلظت حاصل از مدل ون راین و اندازه‌گیریهای انجام شده [٦]

می‌گیرد.

خصوصیات موج، جریان، رسوبات و بستر دریا در شکل (۱) به قرار زیر است

عمق آب = 1.8 m

ارتفاع موج = 0.4 m

پریود موج = 3 sec

سرعت متوسط جریان در راستای ساحل = 0.27 m/sec

سرعت ته‌نشینی دانه‌های رسوب = 0.012 m/sec

قطر دانه‌های رسوب مربوط به ۵۰ درصد ریزتر = 0.17 mm

زبری بستر = 0.045 m

ضخامت لایهٔ اختلاط نزدیک بستر = 0.045 m

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

ارتفاع موج در نواحی عمیق دریا	H_0=1.2 m
پریود موج	T=7.5 sec
شیب ساحل	β=0.01
زاویه نزدیک شدن موج به ساحل با راستای عمود بر خط ساحلی	α_0=45°

خصوصیات موج، رسوب و ساحل در شکل (۳) نیز به قرار زیر است

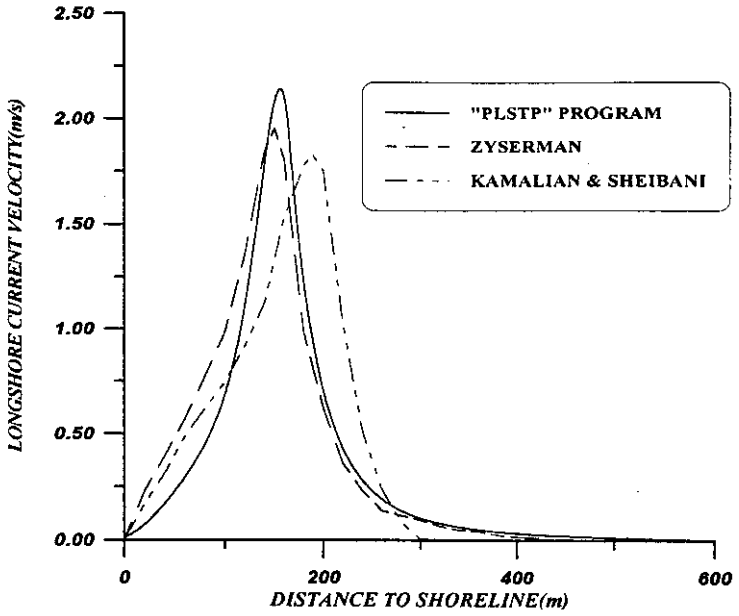
ارتفاع موج در نواحی عمیق دریا	H_0=1.5 m
پریود موج	T=7.6 sec
شیب ساحل	β=0.01
زاویه نزدیک شدن موج به ساحل با راستای عمود بر خط ساحلی	α_0=20°
اندازهٔ ذرات مربوط به ۵۰ درصد ریزتر	d_{50}=0.2 mm

٦- پیش بینی انتقال رسوب در نواحی ساحلی ایران

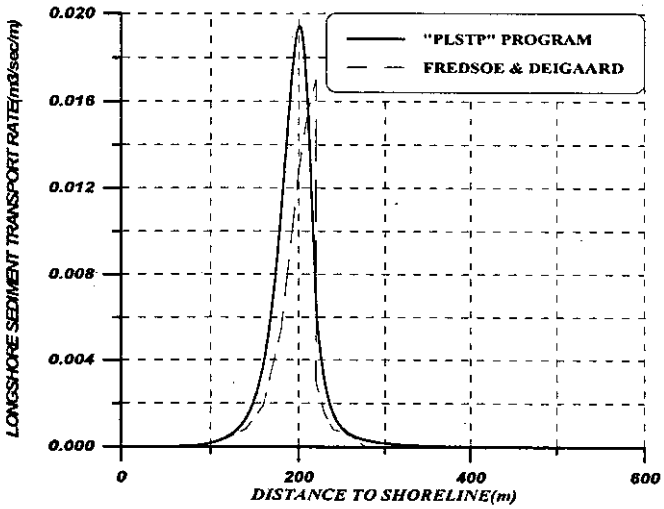
با توجه به اینکه در کشور ما مطالعات و تحقیقات زیادی در رابطه با پدیدهٔ انتقال رسوب در سواحل انجام نگرفته است، بنابراین واضح است که داده‌های مناسب و کاملی در این زمینه موجود نباشد. وضعیت داده‌های لازم در کشورمان را به صورت زیر بررسی می‌کنیم:

۱- *خصوصیات موج در نواحی عمیق دریا* - این خصوصیات شامل ارتفاع، پریود و زاویه نزدیک شدن موج به خط ساحلی‌اند که معمولاً در پروژه‌های ساحلی دو مورد اول

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]



شکل ۲- مقایسهٔ پروفیل جریان ساحلی بر اساس نتایج برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP و مدل ارائه شده توسط آقایان کمالیان 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]

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 راستای خط ساحلی مورد بررسی، از طریق عکسهای هوایی یا روشهای معمول دیگر می‌توان α_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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

جدول ۱- خصوصیات موج در نواحی عمیق دریا-بندر انزلی (دورهٔ بازگشت = ۵۰ سال) [٤]

جهت	سرعت باد (m/s)	مدت (hr)	ارتفاع موج (m)	پریود موج (sec)	طول بادگیر (km)
شمال	۳۰/۱	۳	٤/۸٤	۸/۰۹	۲٦۷/۵۷
شمال شرقی	۲۰/۲	۰/۸	۵/٦۸	۸/٤٦	۳۸۱/۵٤
شرق	۲٤	٤	٤/۳۷	۷/۹۱	۱۵٤/۷٤
غرب	۱۹/٦	۸/۵	۲/۱	۵/۱۳	۱۸/۳۳
شمال غربی	۲۵/۵	۳	۳/۸٦	۷/۳	۹۰/۹۲

"PLSTP" مورد لزوم است.

۳- *توپوگرافی ساحل و بستر دریا*- داده‌های مربوط به توپوگرافی ساحل و بستر دریا، کمیابترین نوع داده‌ها در کشور ما هستند. برای هر منطقهٔ 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 عملیاتهای 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 شدهٔ زیر و بعد از اجرای برنامهٔ رایانه‌ای PLSTP به دست آمده است

شیب ساحل	$\beta = 0.01$
اندازهٔ ذرات مربوط به ۵۰ درصد ریزتر	$d_{50} = 0.2$ mm
اندازهٔ ذرات مربو ط به ۹۰ درصد ریزتر	$d_{90} = 0.3$ mm
جرم حجمی آب دریا	$\rho_w=1023$ kg/m^3
جرم حجمی رسوبات	$\rho_s=2650$ kg/m^3
ویسکوزیتهٔ سینماتیک آب دریا	$\nu=1.1\times10^{-6}$ m^2/sec
ثابت ون کارمن	$K=0.4$

لازم به توضیح است که در جدول بالا، اعداد ستون چهارم (مقادیر α_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 α_0 مشخص می‌شود.

همچنین اعداد ستون ششم (وزن رسوبات انتقالی برحسب 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، زاویهٔ نزدیک شدن موج به ساحل نسبت به راستای عمود بر خط ساحلی (α_0) یکی از مؤثرترین پارامترهای مرتبط با میزان رسوبات انتقالی در راستای ساحل است. مقایسهٔ 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 اندازهٔ دانه‌های رسوب بر دبی انتقال رسوبات دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم

حالت اول	$d_{50}=0.2$ mm , $d_{90}=0.3$ mm
حالت دوم	$d_{50}=0.25$ mm , $d_{90}=0.37$ mm

جدول (۳)، نتایج حاصل از برنامهٔ رایانه‌ای "PLSTP" را در

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

جدول ۲- محاسبهٔ دبی انتقال رسوبات

(۱)	(۲)	(۳)	(٤)	(٥)	(٦)
مدت (hr)	H_0 (m)	T (sec)	α_0 (deg)	دبی رسوب (kg/s)	وزن رسوب (ton)
۳	٤/۸٤	۸/۰۹	٥	۳۲۷٤	۳٥۳٥۹
۰/۸	٥/٦۸	۸/٤٦	۳٥	۱۲۳٥٤۷٥	۳٥٥۸۱٦۸
٤	٤/۳۷	۷/۹۱	٦۰	۲٦۹۷۲۰۱	۳۸۸۳۹٦۹٤
۸/٥	۲/۱	٥/۱۳	-٦۰	۲٥۳٦٦۰	۷۷٦۱۹۹٦
۳	۳/۸٦	۷/۳	-۳٥	۱۱۰۷۷۳٦	۱۱۹٦۳٥٤۹

جدول ۳- تأثیر اندازهٔ ذرات رسوب بر دبی انتقال رسوب

دبی رسوب (kg/sec)	
برای d_{50}=0.2 mm d_{90}=0.3 mm	برای d_{50}=0.25 mm d_{90}=0.37 mm
۳٤۱۲	۳۱٥۳
۱۲٥۰۸۸۹	۱۲۳۲۹۱٦
۲۷٥٤۰۸۹	۲٦٦۳٤۸۰
۲٥۹۷۷۸	۲٤۹٦۱۸
۱۱۳۰۷۳٦	۱۰۹٤۱٦۹

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 برنامهٔ رایانه‌ای "PLSTP" در حالت فرض کردن زبری بستر در سه حالت مختلف در جدول شمارهٔ (٤) آورده شده است.

همچنان که نتایج جدول (٤) نشان می‌دهد در شرایط یکسان خصوصیات موج (ارتفاع، پریود و زاویهٔ 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 بستر بر دبی انتقال رسوبات موازی با خط ساحلی، نتایج برنامهٔ رایانه‌ای "PLSTP" در حالت فرض کردن ضخامت این لایه در دو حالت مختلف در جدول (٥) آورده شده است. با مقایسهٔ نتایج جدول (٥) در دو حالت، تفاوتی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن ملایم بودن شیب ساحل (β=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 لایهٔ اختلاط نزدیک بستر (δ_s)، تنها در محاسبهٔ 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 (٦) نیز براساس اطلاعات فرض شدهٔ جدول (۱) به دست آمده است با این تفاوت که شیب ساحل به جای ۰/۰۱

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

جدول ٤- تأثیر زبری بستر بر دبی انتقال رسوبات

دبی رسوبات انتقالی (kg/sec)		
برای k=0.5 mm	برای k=1 mm	برای k=1.5 mm
٣٣٧١	٢٧٦٩	٢٥٣٠
١٢٩٢٠٠٦	٩١٨٩٧٥	٧٤٠٠٧٤
٢٨٤٦٩١٨	١٨٩٢٨٢٣	١٤٥٩٢٥٤
٢٦٥٤٢	١٩٠٤٥	١٥٥٣٥
١١٦٨١٧٣	٧٧٧٨٦٢	٦٠٠٧٦٦

جدول ٥- تأثیر ضخامت لایه اختلاط بر دبی انتقال رسوبات

دبی رسوب (kg/sec)	
برای δ_s=2 cm	برای δ_s=4 cm
٣٢٧٤	٣٢٧٤
١٢٣٥٤٧٥	١٢٣٥٤٧٥
٢٦٩٧٢٠١	٢٦٩٧٢٠١
٢٥٣٦٦٠	٢٥٣٦٦٠
١١٠٧٧٣٦	١١٠٧٧٣٦

برابر با ٠/٠٣ در نظر گرفته شده است. با مقایسهٔ نتایج این جدول با نتایج جدول (٢) مشاهده می‌شود که سه برابر شدن شیب ساحل باعث افزایش میزان رسوبات انتقالی تا حدود دو برابر می‌شود.

همچون جدول (٢) 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 (٧) و (٨)، به ترتیب تأثیر اندازهٔ دانه‌های رسوب و زبری بستر را بر دبی انتقال رسوبات نشان می‌دهند که نتایج حاصل مشابه نتایج جداول (٣) و (٤) هستند، یعنی بزرگتر بودن ذرات رسوب یا افزایش زبری بستر باعث کاهش دبی رسوبات انتقالی می‌شود.

در جدول (٩)، تأثیر ضخامت لایه اختلاط نزدیک بستر بر دبی انتقال رسوبات نشان داده شده است. برخلاف نتایج جدول (٥) 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 محاسبهٔ 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 (٩) به وضوح دیده می‌شود.

جدول (١٠) براساس اطلاعات فرض شدهٔ جدول (٢) به دست آمده است. تنها تفاوت این جدول با جدول (٢) در سه ستون آخر آنهاست که علت آن این است که در ستون چهارم مقادیر فرض شده برای زاویه نزدیک شدن موج به ساحل (α_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 منطقهٔ ساحلی به گونه‌ای قرار گرفته است که تنها تحت تأثیر این چهار حالت قرار می‌گیرد. با مقایسهٔ جداول (١٠) و (٢)، تأثیر قابل ملاحظهٔ زاویه نزدیک شدن موج به ساحل به وضوح مشاهده می‌شود.

همچنین جدول (١١)، براساس اطلاعات فرض شدهٔ جدول (١٠) به دست آمده است با این تفاوت که شیب ساحل به جای ٠/٠١ برابر با ٠/٠٠١ در نظر گرفته شده است. با مقایسهٔ

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

جدول ٦- محاسبهٔ دبی انتقال رسوبات

(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥)	(٦)
مدت (hr)	H_0 (m)	T (sec)	α_0 (deg)	دبی رسوب (kg/s)	وزن رسوب (ton)
٣	٤/٨٤	٨/٠٩	٥	٤٨٤٧	٥٢٣٤٨
٠/٨	٥/٦٨	٨/٤٦	٣٥	٢٦١٣٠٤٦	٧٥٢٥٥٧٢
٤	٤/٣٧	٧/٩١	٦٠	٤٦٧٦٤٢٩	٦٧٣٤٠٥٧٨
٨/٥	٢/١	٥/١٣	-٦٠	٦٢٧٦٤١	١٩٢٠٥٨١٥
٣	٣/٨٦	٧/٣	-٣٥	٢٦٣١١٩١	٢٨٤١٦٨٦٣

جدول ٧- تأثیر اندازه ذرات رسوب بر دبی انتقال رسوب

دبی رسوب (kg/sec)	
برای d_{50}=0.2 mm d_{90}=0.3 mm	برای d_{50}=0.25 mm d_{90}=0.37 mm
٤٩٢٢	٤٨٢٦
٢٦٤٠٦١٢	٢٦٠٤٦٢٧
٤٧٩٤٩٥٢	٤٦٠١٠٦١
٦٣٨٥٥٣	٦٢١٨١٣
٢٦٧٩٠٧٤	٢٥٩٥٢٣٢

جدول ٨- تأثیر زبری بستر بر دبی انتقال رسوبات

دبی رسوبات انتقالی (kg/sec)		
برای k=0.5 mm	برای k=1 mm	برای k=1.5 mm
٥٠٠٨	٣٩١٦	٣٣٨٧
٢٧٢٦٧٩٤	١٩٦١٨٢٧	١٥٨٥٣٣٢
٥٠١٦٦٤٧	٣٤٢٣٨٤٢	٢٦٧٧٠٠٤
٦٥٩٥٢٠	٤٧٢٣٨٢	٣٨٢٢٤٤
٢٧٧٢٤٣٥	١٨٨٨٢٦٢	١٤٧٦٣٩٩

جدول ٩- تأثیر ضخامت لایه اختلاط بر دبی انتقال رسوبات

دبی رسوب (kg/sec)	
برای δ_s=2 cm	برای δ_s=4 cm
٤٨٤٧	٤٨٤٧
٢٦١١٣٠٣	٢٦١٣١٧٠
٤٦٧٥٥٣٨	٤٦٧٦٦٢١
٦٢٧٣٨٤	٦٢٧٦٩٣
٢٦٢٩١٣٤	٢٦٣١٨٠٤

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

جدول ۱۰- محاسبهٔ دبی انتقال رسوبات

(۱)	(۲)	(۳)	(٤)	(٥)	(٦)
مدت (hr)	H_0 (m)	T (sec)	α_0 (deg)	دبی رسوب (kg/s)	وزن رسوب (ton)
۳	٤/۸٤	۸/۰۹	۲۰	۳۱٦٦۷٤	۳٤۲۰۰۷۹
۰/۸	٥/٦۸	۸/٤٦	٥۰	۱۸٦٥۹۱۲	٥۳۷۳۸۲٦
۸/٥	۲/۱	٥/۱۳	-٤٥	۲۳۸۲۱۷	۷۲۸۹٤٤۰
۳	۳/۸٦	۷/۳	-۱٥	۱۰۷٥٥۷	۱۱٦۱٦۱٦

جدول ۱۱- محاسبهٔ دبی انتقال رسوبات

(۱)	(۲)	(۳)	(٤)	(٥)	(٦)
مدت (hr)	H_0 (m)	T (sec)	α_0 (deg)	دبی رسوب (kg/s)	وزن رسوب (ton)
۳	٤/۸٤	۸/۰۹	۲۰	۸۹٤۰۰	۹٦٥٥۲۰
۰/۸	٥/٦۸	۸/٤٦	٥۰	٤۳۱۲	۱۲٤۱۸
۸/٥	۲/۱	٥/۱۳	-٤٥	٦۰٥٦۸	۱۸٥۳۳۸۱
۳	۳/۸٦	۷/۳	-۱٥	۱۹۹٥۸	۲۱٥٥٤٦

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- نتیجه‌گیری

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

واژه نامه

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

مراجع

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.

۱. کمالیان، ر.، و شیبانی، ج.، "پروژهٔ تحقیقاتی: مدل ریاضی پیش بینی جریان و میزان انتقال رسوب ساحلی،" مرکز تحقیقات آب، تهران، شهریور ۱۳۷٤.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]

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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1380.20.2.5.2]