

توسعه مدل شبه دو بعدی SDAR برای شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر رودخانه‌های آبرفتی

عبدالله اردشیر^{*}، فیروز بهادری^{**} و احمد طاهر شمسی^{***}
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(دریافت مقاله: ۱۶/۷/۸۱ - دریافت نسخه نهایی: ۹/۳/۸۳)

چکیده - در این مقاله مدل ریاضی شبه دو بعدی SDAR^۱ که با هدف شبیه سازی خصوصیات جریان و تغییرات تراز بستر رودخانه‌ها توسط مولفان توسعه داده شده معرفی می‌شود. این مدل از ترکیب دو الگوریتم اصلی هیدرولیک و انتقال رسوب تشکیل شده است. مدل جدید SDAR از قابلیت‌های متعددی برخوردار است که محاسبه نرخ انتقال رسوب، تعیین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری، شبیه سازی نیمرخ طولی و عرضی، و پیش بینی وقوع پدیده آرمور یا مسلح شدن کف رودخانه را می‌توان برشمرد. الگوریتم مدل SDAR به‌گونه‌ای تنظیم شده که قادر است تغییرات سرعت، تنش برشی و نرخ انتقال رسوب را در امتداد عرضی مشخص کند. از این رو مدل دارای ماهیت شبه دو بعدی (S-2D)^۲ است. برای تحقق این ویژگی مهم، رودخانه به چند لوله جریان^۳ که دارای دبی مساوی ولی با مشخصه‌های هندسی متفاوتی اند تقسیم می‌شود. در هر لوله روندیابی رسوب و تعیین تغییرات تراز بستر به طور مجزا انجام می‌گیرد. در این تحقیقات همچنین با معرفی مفهوم لوله جریان بازه‌ای^۴ اتصال شاخه‌ها و انشعابات جانبی، تغذیه یا برداشت آب و رسوب در حالت شبه دو بعدی فراهم شده و محدودیت‌های موجود نسبت به مدل‌های مشابه مرتفع شده است. واسنجی یا کالیبراسیون مدل با بهره گیری از داده های رودخانه‌ای و آزمایشگاهی طی چند مرحله متوالی انجام گرفته و عملکرد آن با مدل‌های مرجع مقایسه شده است. این بررسیها توانایی مدل SDAR را برای شبیه سازی تغییرات تراز بستر و خصوصیات هیدرولیکی در شرایط گوناگون تأیید می‌کند. این مدل با دارا بودن توانایی شبیه سازی خصوصیات بستر در امتداد عرضی و طولی، گزینه مناسبی برای انجام مطالعات و تدارک اطلاعات کاربردی در عرصه های مختلف مهندسی و ساماندهی رودخانه ها قلمداد می شود.

واژگان کلیدی: تراز بستر، بستر متحرک، رودخانه آبرفتی، انتقال رسوب، پروفیل سطح آب، شبیه سازی بستر

Development of Semi -Two - Dimensional SDAR Model for Bed Variation Simulation in Alluvial Rivers

A. Ardeshir, F. Bahadori, and A. Tahershamsi
Faculty of Civil & Environmental Engineering, AmirKabir University of Technology

Abstract: In this paper, development of a semi-two- dimensional mathematical model called SDAR is introduced. The model is composed of two principal modules of hydraulics and sediment transport. The newly developed SDAR model has a number of capabilities including determination of sediment transport rate, aggradation - degradation

** - دانشجوی دکتری

* - استادیار

calculation, longitudinal profile and lateral cross-sectional variation simulation, and tracing armor layer development phenomena. SDAR is a semi- two dimensional (S-2D) model, in the sense that the lateral variation of velocity, shear stress, and rate of sediment transport are achieved by subdividing the channel course into several stream tubes carrying equal discharges. Sediment routing and bed variation calculations are accomplished along each stream tube designated by virtual interfaces.

Keywords: *Alluvial Bed, Bed Variation, Surface Profile, Sediment movement, Semi-2D Simulation, River bed Simulation*

۱- مقدمه

بررسی و شناخت رفتار رودخانه‌ها پیش نیاز اقدامات مهندسی در طرح‌های ساماندهی و بهره‌برداری از منابع رودخانه‌ای تلقی می‌شود. از این رو در دهه‌های اخیر توجه متخصصان مسائل رودخانه‌ای به بهره‌گیری از توانایی‌های وسیع رایانه‌ای و بسط و گسترش مدل‌های ریاضی معطوف شده است. در این راستا و در پاسخ‌گویی به ضرورت‌های موجود و به منظور تقویت بنیاد تحقیقات کاربردی در عرصه مهندسی آب یک بسته نرم افزاری با عنوان مدل SDAR برای مطالعه رودخانه‌ها توسعه داده شده است. پایه‌های نظری در پردازش مدل SDAR بر نظریه دوریس استوار است [۱]. بر اساس این نظریه خصوصیات جریان در هر گام زمانی مستقل از تغییرات تراز بستر رودخانه است. این واقعیت امکان می‌دهد تا بتوان معادلات ممتوم و پیوستگی آب و رسوب را در هر گام زمانی به‌طور جداگانه حل کرد. با بهره‌گیری از چنین مفهومی الگوریتم‌های مدل SDAR شامل مدول هیدرولیک و مدول رسوب تهیه شده است. از آنجایی که اساس کار مدل SDAR در نسخه فعلی بر جریان‌های متغیر تدریجی^۵ استوار است لذا محاسبات هیدرولیکی از پایین دست شروع شده و به سمت بالا دست پیش می‌رود. این روش اصطلاحاً محاسبه منحنی برگشت^۶ و یا روش گام به گام استاندارد^۷ نامیده می‌شود [۲]. در مرحله بعد، مجرای اصلی به چند لوله جریان تقسیم می‌شود. دبی در تمام لوله‌ها ثابت بوده ولی به لحاظ تغییر مشخصه‌های هندسی سرعت جریان در آنها متفاوت است. بدین ترتیب تغییرات عرضی سرعت و یا حالت S-2D محقق می‌شود.

استفاده از مفهوم لوله جریان برای تعیین تغییرات عرضی سرعت به عنوان یک روش اولین بار توسط یانگ مطرح شد [۳]. در روش یانگ اتصال شاخه‌های جانبی و یا تغذیه و برداشت

در محدوده شبیه‌سازی منظور نشده است. برای رفع این محدودیت ایده لوله جریان بازه‌ای در این تحقیقات ارائه شده است. بر اساس چنین ایده‌ای در لوله‌های جریان مبادله جرم اعم از آب و رسوب از سطح جانبی مجرا در محل گره‌ها میسر است. بدین ترتیب اتصال شاخه‌های جانبی و یا معرفی نقاط تغذیه و برداشت در مدل شبه دو بعدی فراهم شده و حوزه کاربری آن توسعه یافته است. در محل اتصال توزیع یکنواخت آب و رسوب بین لوله‌های جریان از جمله مفروضات مسئله تلقی می‌شود.

به دنبال انجام محاسبات هیدرولیکی، روند یابی رسوب و تعیین تغییرات تراز بستر از مقطع بالا دست شروع و به سمت پایین دست ادامه می‌یابد. سیکل روند یابی برای هر لوله جریان به‌طور مجزا باید تکرار شود. در الگوریتم رسوب شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر مستلزم تحقق شرایط زیر است:

- تعیین لایه فعال و نا فعال^۸ بر اساس نظریه بنت و نوردین [۴].
- تعیین ظرفیت انتقال مازاد^۹ بر اساس روش ارائه شده توسط بوره و همکاران [۵].

- مکانیزم تشکیل و شکسته شدن لایه آرمور^{۱۰} بر اساس روش گسler [۱۳].

- ملاحظات مربوط به انتقال نا تعادلی رسوب^{۱۱} ارائه شده توسط محققان مختلف [۱۰-۱۲].

هر یک از موارد فوق نقش مهمی در سازوکار مدل SDAR ایفا می‌کند.

آزمون صحت و دقت عملکرد مدل یا کالیبراسیون در شناخت نارسایی‌های برنامه‌ای و اصلاح ساختار محاسباتی و سازگار کردن مدل با شرایط متنوع رودخانه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. در روند توسعه مدل SDAR آزمون‌های مختلفی با استفاده از داده‌های تجربی به منظور ارزیابی عملکرد هیدرولیک جریان و قابلیت‌های مورفولوژیک در مدل انجام

گرفته است. در این بررسیها طیفهای مختلف دانه بندی، مقاطع هندسی، طول رودخانه، پلان مسیر و هیدروگراف جریان به کار گرفته شده است. در مراحل مختلف کالیبراسیون نتایج حاصله از مدل SDAR با عملکرد مدل‌های مرجع نظیر، HEC-6، FLUVIAL-12 و GSTARS-2 مقایسه شده و حسب مورد اصلاحات لازم در عناصر ساختاری مدل اعمال شده است.

۲- معادلات حاکم در فرمول بندی مدل SDAR

حرکت و جابه جایی مواد رسوبی در رودخانه‌ها تابع مشخصات هیدرولیکی حاصله از جریان آب است. ارتباط بین هیدرولیک جریان و انتقال رسوب با استفاده از معادلات ممتوم و پیوستگی که اصطلاحاً معادلات حاکم نامیده می شود میسر است. برای مدل کردن رفتار رودخانه‌ها لازم است معادلات حاکم بررسی شده و باتوجه به نوع مدل در صورت لزوم ساده‌سازیهای مورد نظر انجام پذیرد. همچنین برای حل معادلات تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی نیز ضروری است. در مدل SDAR معادلات مورد استفاده به سه گروه عمده زیر تقسیم می شود:

۲-۱- معادلات ممتوم و پیوستگی آب

حالت کلی معادله ممتوم یا معادله حرکت آب بر اساس تحلیل جانسن برای رودخانه‌ها و در حالت یک بعدی به صورت زیر ارائه شده است [۶]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial Z_b}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (1)$$

معادله پیوستگی متناظر با معادله بالا عبارت است از:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B\frac{\partial h}{\partial t} = \pm q_L \quad (2)$$

معادله (۱) معادله یک بعدی سنت و نان (Saint Venant) بوده و به معادله دینامیکی موج شهرت دارد [۷].

در این معادلات، Q دبی یا شدت جریان آب، A سطح مقطع جریان، h عمق آب، B عرض مجرا، Z_b تراز بستر، S_f شیب خط انرژی، x فاصله از مبدأ (طول بازه)، g شتاب ثقل، t زمان،

q_L دبی ورودی یا خروجی جانبی به ازای واحد طول مجراست.

حل تحلیلی معادلات دیفرانسیلی مزبور بنا به دلایل متعددی که در منابع علمی بحث شده امکان پذیر نبوده و از این رو استفاده از روشهای عددی راه حل عملی است.

۲-۱-۱- ساده سازی معادلات ممتوم و پیوستگی در مدل SDAR

پارامتر $\frac{\partial Q}{\partial t}$ در معادله (۱) نرخ تغییرات دبی را نسبت به زمان مشخص می دارد. از آن جایی که جریانهای رودخانه‌ای عمدتاً از نوع متغیر تدریجی هستند، در مدل هیدروگراف ها به صورت پلکانی در آمده و در هر گام محاسباتی مقدار Q نسبت به زمان ثابت در نظر گرفته می شود. با این ساده سازی ضمن لحاظ کردن تغییرات زمانی دبی، جریان ناپایدار به جریان شبه پایدار^{۱۲} تقلیل می یابد:

$$d(Q^2/A)/dx + gA\left(\frac{dh}{dx} + \frac{dZ_b}{dx} + S_f\right) = 0 \quad (3)$$

در معادله (۳) dZ_b/dx شیب بستر بوده و با S_0 جایگزین می شود. با اندک تغییراتی معادله (۳) را می توان به صورت زیر ارائه کرد.

$$\frac{dh}{dx} \left(1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}\right) + (S_f - S_0) = 0 \quad (4)$$

و یا:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(S_0 - S_f)}{\left(1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}\right)} \quad (5)$$

معادله (۵) مبنای محاسبات هیدرولیکی در مدل SDAR است و تغییرات مکانی تراز سطح آب را برای یک دبی معین مشخص می کند. در این معادله $Q^2 B/gA^3$ معرف عدد فرود (Fr)^{۱۳} بوده و عامل کنترل کننده در تعیین مسیر محاسباتی تلقی می شود. در مدل SDAR محدوده محاسبات برای اعداد فرود کمتر از یک و یا جریانهای متغیر تدریجی در نظر گرفته شده است. برای جریانهای بحرانی و یا فوق بحرانی لازم است تغییرات ساختاری در الگوریتم هیدرولیک اعمال شود.

با فرض جریان شبه پایدار دبی در هر گام زمانی ثابت بوده و مقدار $\partial h / \partial t$ در معادله (۲) برابر با صفر خواهد بود. دبی جانبی q_L (مقدار تغذیه یا برداشت) در دبی ورودی منظور و معادله پیوستگی برای هر گام زمانی به صورت ساده زیر معرفی می شود.

$$Q = \text{constant} \quad (6)$$

با حل عددی معادله (۵) خصوصیات هیدرولیک جریان برای دبی مورد نظر در حالت یک بعدی تعیین شده و اطلاعات لازم برای تعیین مشخصات جریان شبه دو بعدی فراهم می شود.

۲-۲- معادلات جریان شبه دو بعدی (لوله های جریان)

در جریان S-2D تغییرات سرعت و تنش برشی در امتداد عرضی با تقسیم مجرای اصلی به مجاری کوچکتر فرضی یا لوله های جریان به دست می آید (موقعیت لوله های جریان در شکل ۲ نشان داده شده است). مشخصات هیدرولیکی در لوله های جریان با استفاده از معادلات زیر تعیین می شود:

$$(Q_{st})_{i,j} = (Q - Q_f)_i / JST \quad i = 1, 2, \dots, I_{max}, \quad j = 1, 2, \dots, JST \quad (7)$$

$$(K_{st})_{i,j} = (K_{mc})_i / JST \quad (8)$$

$$(K_{st})_{i,j} = \frac{1}{nmc} (A_{st} (A_{st} / P_{st})^{2/3})_{i,j} \quad (9)$$

$$(K_{mc})_i = \left(\frac{1}{nmc} A (A / P)^{2/3} \right)_i \quad (10)$$

$$(V_{st})_{i,j} = (Q_{st} / A_{st})_{i,j} \quad (11)$$

$$(\tau_{st})_{i,j} = \gamma (A_{st} / P_{st})_{i,j} \cdot (S_f)_i \quad (12)$$

در این معادلات، Q_{st} دبی در لوله جریان، Q دبی کل (مجرای اصلی و سیلابدشت)، Q_f دبی در سیلابدشت، JST تعداد لوله های جریان (حداکثر برابر با ۱۰ در این مدل)، K_{st} فاکتور انتقال در لوله جریان، K_m فاکتور انتقال در مجرای اصلی، A_{st} سطح مقطع لوله جریان، P_{st} محیط تر شده لوله جریان، nmc ضریب مانینگ در مجرای اصلی که در هر مقطع با توجه به دانه بندی بستر، مشخصات هندسی مسیر و براساس کالیبراسیون

مدل و ملاحظات کارشناسی مطابق توصیه های چاو تعیین می شود [۲]. مقدار nmc در هر مقطع برای لوله های جریان یکسان در نظر گرفته می شود لیکن در مقاطع مختلف می تواند متفاوت باشد، A سطح مقطع مجرای اصلی، P محیط تر شده مجرای اصلی، V_{st} سرعت در لوله جریان، τ_{st} تنش برشی در لوله جریان، γ وزن مخصوص آب، $i =$ شماره مقطع عرضی (حداکثر برابر با I_{max})، j شماره لوله جریان (حداکثر برابر با JST). در معادلات بالا i معرف تغییرات طولی و j تغییرات عرضی را مشخص می کند.

معادلات (۱۱) و (۱۲) عناصر شبه دو بعدی مدل SDAR

تلقی می شوند. این معادلات تغییرات عرضی سرعت و تنش برشی را در مجرای اصلی مشخص می کنند. برای تعیین V_{st} نخست دبی بین لوله های جریان در مقطع i با استفاده از معادله (۷) به طور مساوی توزیع شده و سپس فاکتور انتقال (K_{st}) برای لوله جریان j از معادله (۹) محاسبه و با مقدار به دست آمده از معادله (۸) مقایسه می شود. با تکرار محاسبات و پس از آنکه اختلاف مقادیر حاصله از این دو معادله برابر با خطای تعیین شده شد، محاسبات خاتمه یافته تلقی و توزیع عرضی سرعت و توزیع تنش برشی و همچنین خصوصیات هندسی لوله های جریان تعیین می شود.

۲-۳- معادلات پیوستگی و انتقال رسوب

شبه سازی تغییرات تراز بستر رودخانه با بهره گیری از گروه سوم معادلات حاکم که به دنبال معرفی می شود به انجام می رسد. این معادلات نقش اساسی را در روند یابی رسوب و تغییر مشخصه های هندسی مجرا ایفا می کنند. کریش نپان معادله پیوستگی رسوب را در حالت یک بعدی به صورت معادله دیفرانسیلی زیر ارائه کرده است [۸]:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1 - \theta) B \frac{\partial Z_b}{\partial t} + BC_s \frac{\partial h}{\partial t} + A \frac{\partial C_s}{\partial t} = q_{SL} \quad (13)$$

در این معادله، Q_s نرخ انتقال رسوب (با رستر و معلق)، C_s غلظت مواد معلق موجود در آب، q_{SL} دبی رسوب ورودی از شاخه ها و شعبات جانبی و یا برداشت رسوب به ازای واحد

طول مجرا، θ تخلخل مواد رسوبی، Z_b تراز بستر رودخانه و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

۲-۳-۱- ساده سازی معادله پیوستگی رسوب در مدل

در مدل SDAR به منظور افزایش همگرایی در محاسبات عددی و همچنین امکان انتخاب گام زمانی طولانی تر و تقلیل مدت محاسبات، معادلات کریش نیان ساده تر شده است. در معادله (۱۳) عناصر $BC_s \partial h / \partial t$ و $A \partial C_s / \partial t$ مشخص کننده تغییرات غلظت مواد معلق نسبت به زمان است. در مدل SDAR با این فرض که مواد معلق در خاتمه گام زمانی (قبل از شروع گام زمانی جدید) ته نشین می شود. اثرات تغییر زمانی غلظت مواد معلق حذف شده و معادله پیوستگی رسوب به صورت زیر ساده شده است.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1 - \theta) B \frac{\partial Z_b}{\partial t} = q_{sl} \quad (14)$$

معادله (۱۴) برای حالت 1-D و S-2D صادق است. در حالت S-2D معادله برای هر یک از لوله های جریان به طور مستقل به کار گرفته می شود. برای حل معادله (۱۴) لازم است نرخ انتقال رسوب با استفاده از معادلات انتقال مشخص شود (در خصوص معادلات انتقال رسوب به مبحث ۳-۴-۲ تعیین پتانسیل انتقال مراجعه شود). شکل کلی معادله انتقال رسوب به صورت زیر بیان می شود:

$$Q_s = f(V, D, G_s, \dots) \quad (15)$$

در این معادله Q_s نرخ انتقال رسوب، V سرعت جریان آب، D قطر دانه های رسوب، G_s چگالی دانه ها هستند.

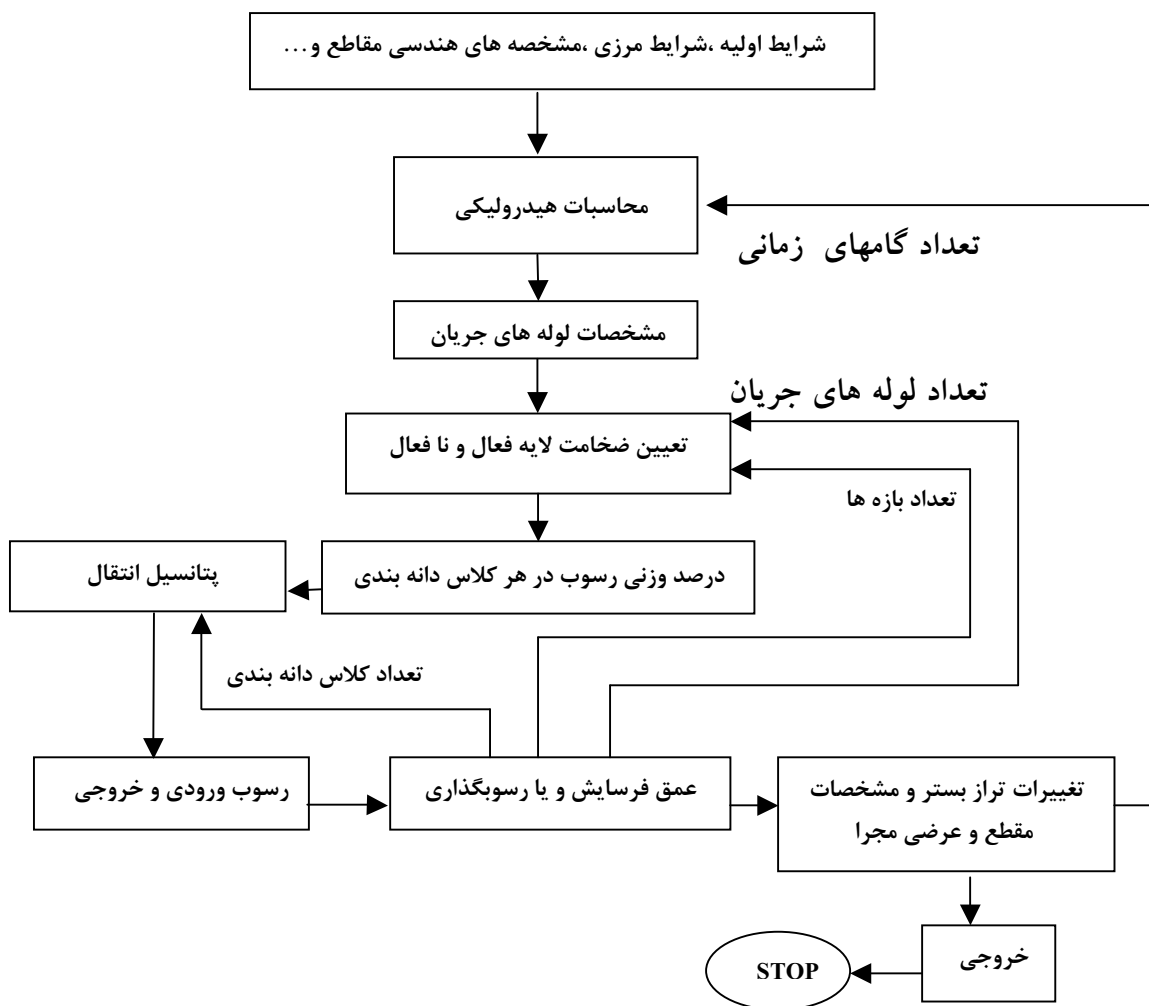
معادله (۱۴) پس از گسسته سازی به روش صریح تغییرات تراز بستر را در امتداد عرضی و طولی برای گام زمانی مورد نظر محاسبه می کند. بدین منظور لازم است Q_s از معادله (۱۵) تعیین شود (شکل گسسته معادله ۱۴ در مبحث ۳-۴-۳ برای حالت S-2D ارائه شده است).

۳- ساختار محاسبات عددی در مدل SDAR

تعیین تغییرات تراز بستر و مشخصه های جریان با فعال کردن الگوریتم های هیدرولیک و رسوب در مدل SDAR انجام می گیرد. مدل در محیط QBASIC و در سیستم متریک تنظیم شده و توسط فایل های اطلاعاتی پشتیبانی می شود. با فعال کردن الگوریتم هیدرولیک اطلاعات جامعی در خصوص شیب خط انرژی، عمق آب، عرض مجرا، سرعت جریان، موقعیت و مشخصات سیلابدشت، آرایش لوله های جریان، تغییرات عرضی سرعت، توزیع تنش برشی و سایر عوامل هیدرودینامیکی مورد نیاز تعیین می شود. در پی انجام محاسبات هیدرولیکی برای شبیه سازی تغییرات نیمرخ طولی و عرضی مجرا، لازم است الگوریتم رسوب توسط مدل فعال شود. در شکل ۱ روند نمای محاسبات و عناصر ساختاری مدل معرفی شده است. به دنبال بررسی جزئیات ساختاری مدل پرداخته می شود.

۳-۱- شرایط اولیه و شرایط مرزی و داده های ورودی

مطابق روند نما برای فعال کردن مدل، معرفی شرایط اولیه و شرایط مرزی و سایر داده های ورودی ضروری است. شرط مرزی پایین دست توسط منحنی دبی / شل^{۱۴} مشخص می شود. و برای مقطع بالا دست هیدروگراف جریان و همچنین دبی رسوب ورودی و دانه بندی آن به عنوان شرط مرزی تلقی می شود و مرزهای میانی نظیر سرریزها، شاخه ها و شعبات جانبی و یا نقاط تغذیه و برداشت و مقادیر دبی و رسوب مربوطه نیز باید مشخص گردد. از جمله داده های ورودی ضریب مانینگ و تغییرات آن در مقاطع مختلف مسیر رودخانه است. به علاوه مشخصات هندسی مجرا، شکل پلان مسیر، گسترش سیلابدشت در ساحل راست و چپ و موقعیت مجرای اصلی، محدوده بستر متحرک توسط فایل های مربوطه به مدل معرفی می شود. دانه بندی اولیه مواد بستر، ضخامت لایه آبرفتی و طول بازه ها نیز بخشی دیگر از داده های ورودی است. همچنین فایل های برای ثبت تغییرات دانه بندی در هر یک از



شکل ۱- روند نما و ساختار محاسباتی مدل SDAR

۳-۲- محاسبات هیدرولیکی

محاسبات عددی برای تعیین خصوصیات هیدرولیک جریان در مدل SDAR نخست برای حالت 1-D با استفاده از معادلات (۵) و (۶) محقق می‌شود. بدین منظور معادله (۵) برای حالت یک بعدی به شکل محاسباتی زیر تغییر داده شده است. این محاسبات از مقطع پایین دست آغاز و به سمت بالا دست پیش می‌رود:

$$H_s(I+1) = H_s(I) + (\Delta X(\overline{SF} - S_o))_{I+1} + DHEC \quad (16)$$

لوله‌های جریان در مدل منظور شده است. نظام آبدهی رودخانه یا رژیم جریان برای دوره شبیه سازی توسط هیدروگرافها مشخص می‌شود که شامل هیدروگراف ورودی از مقطع بالادست و شاخه‌های جانبی است. هیدروگراف سیلابها پس از پلکانی شدن به مدل معرفی می‌شود تا شرط برقراری جریان شبه پایدار برای هر گام زمانی محقق شود. دوره شبیه سازی در مدل SDAR متأثر از رژیم هیدرولوژیک و اهداف مطالعاتی بوده و ممکن است محدود به دوره زمانی معادل مدت زمان عبور موج سیل و یا جریانهای طولانی مدت ماهیانه و سالیانه شود.

$$(EFDST)_{i,j} = \left(\sum_{I=1}^N (D * \Delta A * D^{2/3})_I / \sum_{I=1}^N (\Delta A * D^{2/3})_I \right)_{i,j} \quad (19)$$

$$(EFWST)_{i,j} = \left(\sum_{I=1}^N (\Delta A * D^{2/3})_I / EFDST^{5/3} \right)_{i,j} \quad (20)$$

$$D_I = (D_d + D_u)_I / 2 \quad (21)$$

$$\Delta A_I = D_I * b_I \quad (22)$$

در معادلات بالا EFDST عمق مؤثر لوله جریان، EFWST عرض مؤثر لوله جریان، D_I عمق متوسط در مقطع D_d و D_u به ترتیب عمق جریان در ضلع پایین دست و بالا دست المان دوزنقه‌ای I است، ΔA_I سطح مقطع المان $b_{I,1}$ عرض المان و N تعداد المان در مقطع عرضی است. اصولاً پارامتر EFDST در تعیین توزیع تنش برشی مطابق معادله زیر و EFWST در تعیین تغییرات عرضی نرخ انتقال رسوب در حالت S-2D کاربرد دارد:

$$(TAWST)_{i,j} = \gamma \cdot (EFDST)_{i,j} \cdot (S_f)_i \quad (23)$$

در این معادله TAWST تنش برشی در بستر لوله جریان z در بازه i بوده و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

۳-۴- محاسبه تغییرات تراز بستر

هدف اصلی الگوریتم رسوب در مدل SDAR تعیین تغییرات تراز بستر است. بدین منظور لازم است مطابق روند نمای شکل (۱) مراحل محاسباتی برای تعیین ضخامت لایه فعال و نافع، توزیع درصد وزنی رسوب برای کلاسهای دانه بندی و محاسبه پتانسیل انتقال رسوب انجام پذیرد. این محاسبات به‌طور مستقل و به نوبت برای هر لوله جریان از مقطع بالا دست آغاز شده و در جهت جریان پیش می‌رود.

۳-۴-۱- تعیین ضخامت لایه فعال و نا فعال

ضخامت لایه فعال در محاسبه تغییرات تراز بستر از اهمیت زیادی برخوردار است. بر اساس مکانیسم حاکم بر انتقال رسوب در هر گام زمانی فقط بخشی از مواد بستر تحت تأثیر

در این معادله H_s انرژی ویژه، ΔX طول بازه، \overline{SE} شیب خط انرژی، S_0 شیب بستر، DHEC افت ناشی از کاهش یا افزایش مقطع (افت گردابه‌ای یا موضعی)، (I) و $(I+1)$ به ترتیب شماره مقطع پایین دست و بالا دست است.

پس از تعیین H_s از معادله (۱۶)، انرژی ویژه نظری (H_{st}) نیز برای کنترل صحت محاسبات از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$H_{st}(I+1) = Y(I+1) + \alpha V^2(I+1) / 2g \quad (17)$$

و در نتیجه مقدار خطا از معادله زیر به دست می‌آید:

$$DIFN = H_{st}(I+1) - H_s(I+1) \leq |\varepsilon| \quad (18)$$

که در آن Y عمق آب و V سرعت متوسط جریان است. شیوه محاسبه به این صورت است که در مقطع $(I+1)$ ، همزمان مقادیر $H_s(I+1)$ و $H_{st}(I+1)$ برای یک تراز فرضی آب تعیین و سپس مقدار خطا DIFN محاسبه می‌شود. در صورتی که مقدار DIFN در حد خطای قابل قبول باشد صحت محاسبات تأیید و مشخصات هیدرولیکی ثبت می‌شود. در غیر این صورت تراز آب جدیدی منظور و محاسبات مجدداً تکرار می‌شود. در خاتمه محاسبات اطلاعات جامعی از خصوصیات جریان در شرایط یک بعدی فراهم شده و زمینه لازم برای تعیین مشخصات جریان S-2D فراهم می‌شود.

۳-۴-۲- تعیین مشخصات جریان در حالت S-2D

پس از انجام محاسبات هیدرولیکی در حالت 1-D نخست با انتخاب مقدار JST، مجرای اصلی به چند لوله جریان با دبی مساوی تقسیم شده و سپس محاسبات در حالت S-2D با استفاده از معادلات (۷) الی (۱۲) از مقطع پایین دست آغاز و تا مقطع انتهایی پیش می‌رود. در هر مقطع توزیع سرعت، توزیع تنش برشی، پهنای جریان، عمق آب، مرز لوله‌های جریان و سایر مشخصه‌های هیدرولیکی تعیین می‌شود. برای محاسبه عرض و عمق مؤثر در هر لوله جریان به تبعیت از هیدرولیک جریان های 1-D روابط زیر در مدل S-2D منظور شده است:

جریان آب قرار گرفته و منتقل می‌شود. مطابق تقسیم بندی بنت و نوردین [۴] این قشر سطحی به عنوان «لایه فعال» شناخته می‌شود. مابقی رسوب بستر که متأثر از فعل و انفعالات هیدرولیکی نمی‌باشد به عنوان «لایه نا فعال» خوانده می‌شود. روشهای مختلفی برای تعیین ضخامت لایه فعال (Ta) پیشنهاد شده که در مدل SDAR از معادله ارائه شده توسط بوره با تغییراتی برای حالت شبه دو بعدی استفاده شده است [۹]:

$$(Ta)_{i,j} = 100 * (D_c)_{i,j} / (PC)_{i,j} (1 - \theta) \quad (24)$$

در این معادله Ta ضخامت لایه فعال، D_c قطر پایدار در بستر (قطری که جریان آب قادر به انتقال آن نبوده و قطرهای کوچکتر از D_c توسط رودخانه منتقل می‌شود)، PC درصد درشت تروزی نظیر D_c ، θ درجه پوکی مواد رسوبی است و مبین آن است که مقدار T_a در امتداد عرضی ثابت نبوده بلکه به تناسب وضعیت دانه بندی و شرایط هیدرولیکی حاکم در لوله‌های جریان متفاوت است. همان‌گونه که از معادله (۲۴) بر می‌آید برای تعیین Ta لازم است قطر پایدار (D_c) مشخص شود. در مدل SDAR برای تعیین D_c از تلفیق معادله مانینگ و معادله شیلدز در شرایط پایداری دانه‌های رسوبی و فرض بستر عریض معادله زیر استخراج شده است [۶ و ۱۰]:

$$(q)_{i,j} = \left(\frac{1}{nmc} Y_e^{5/3} \right)_{i,j} (S_f^{1/2})_i \quad (25) \quad \text{معادله مانینگ}$$

$$(26) \quad \text{معادله شیلدز}$$

$$(Y_e)_{i,j} (S_f)_i / (G_s - 1) (D_c)_{i,j} = 0.03$$

چنانچه در معادله (۲۶) به جای S_f از معادله (۲۵) قرار داده شود (و با فرض این که G_s چگالی دانه‌ها برابر با ۲/۶۵ است) معادله‌ای ضمنی برای تعیین D_c به دست می‌آید:

$$(Y_e)_{i,j} = (4.495 nmc.q / D_c^{1/2})_{i,j}^{6/7} \quad (27)$$

$$\Delta H = (Y_e - H_a)_{i,j} \geq 0 \quad (28)$$

در معادلات بالا q دبی در واحد عرض لوله جریان، Y_e عمق تعادل (عمقی که در آن دانه‌های موجود در بستر پایدار بوده و فرسایش متوقف می‌شود)، H_a عمق واقعی آب (عمقی که در

آن فرسایش بستر وجود دارد) و برای هر لوله جریان برابر با عمق موثر (EFDST) در نظر گرفته می‌شود. بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

برای تعیین D_c نخست از روی منحنی دانه بندی مواد بستر لوله جریان قطر D_{90} (قطر نظیر ۹۰ درصد وزنی دانه‌ها) انتخاب شده و به معادله (۲۷) معرفی و Y_e تعیین می‌شود. چنانچه Y_e در معادله (۲۸) صدق کند D_{90} همان قطر مورد نظر بوده و برای محاسبه Ta می‌توان آن را به معادله (۲۴) معرفی کرد. در غیر این صورت قطر کوچکتری انتخاب و محاسبات تکرار می‌شود. قطری که در آن Y_e حاصله در معادله (۲۸) صدق کند مقدار D_c و PC نظیر را برای استفاده در تعیین Ta مشخص می‌کند. پس از تعیین لایه فعال ضخامت لایه نا فعال (Tia) از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$(Tia)_{i,j} = (YS - T_a)_{i,j} \quad (29)$$

که در آن YS ضخامت لایه آبرفتی در بستر رودخانه و متعلق به لوله جریان است.

برای تعیین پتانسیل انتقال رسوب ضخامت لایه فعال در هر لوله جریان با توجه به توزیع دانه بندی باید به چند زیر لایه تقسیم شود:

$$Ta(k, i, j) = \Delta P(k, i, j) * (Ta)_{i,j} \quad (30)$$

که در آن $Ta(k, i, j)$ ضخامت لایه فعال در کلاس دانه بندی k و در مقطع i و لوله جریان j (k از یک تا N تغییر می‌کند)، ΔP درصد وزنی رسوب در کلاس k و N تعداد کلاس دانه بندی است.

۳-۴-۲- تعیین پتانسیل انتقال رسوب

در مدل SDAR برای تعیین پتانسیل انتقال پنج معادله منظور شده است. این معادلات بر اساس رتبه بندی و توصیه‌های انجام شده توسط یانگ در خصوص اعتبار و دقت آنها انتخاب شده‌اند. معادلات مورد نظر شامل: فرمول ارائه شده توسط یانگ برای شن و ماسه^{۱۵}، لارسن^{۱۶}، ایکرز- وایت^{۱۷}، انگن- هانسن^{۱۸} و مایر- پیتز - مولر^{۱۹} است. شرح تفصیلی معادلات مزبور و

$$\frac{(Q_{Sout} - Q_{Sin})}{\Delta X} + B(1 - \theta) \frac{\Delta Z}{\Delta T} = \frac{Q_{SL}}{\Delta X} \quad (32)$$

در این معادله Q_{Sout} دبی رسوب خروجی، Q_{Sin} دبی رسوب ورودی، B عرض لوله جریان که برابر با عرض موثر در نظر گرفته می‌شود، Q_{SL} دبی رسوب ورودی به لوله جریان از طریق شاخه‌های جانبی و یا رسوب برداشتی از بازه، ΔZ تغییرات تراز بستر، ΔX طول بازه، ΔT گام زمانی، θ تخلخل مواد رسوبی است. Q_{Sout} با استفاده از معادله پتانسیل انتقال به دست می‌آید. معادله (۳۲) را می‌توان با تغییراتی بر حسب معرفی کرد:

$$\Delta Z(k, i, j) = \frac{\Delta T}{(EFWST)_{i,j}(1 - \theta)\Delta X} (Q_{Sin} + Q_{SL} - Q_{Sout})_{k,i,j} \quad (33)$$

در معادله بالا k معرف کلاس دانه بندی است. مطابق معادله (۳۳) تغییرات تراز بستر برای هر کلاس دانه بندی در لوله جریان به‌طور مجزا تعیین و در معادله کلی زیر منظور می‌شود:

$$\Delta Z(i, j) = \sum_{k=1}^N \Delta Z(k, i, j) \quad (34)$$

که در آن $\Delta Z(i, j)$ معرف تغییرات تراز بستر حاصله از مجموع کلاسهای دانه بندی در مقطع i و لوله جریان j است. در معادله (۳۳) چنانچه کمیت داخل پرانتز را با Q_{SRj} نشان دهیم سه حالت مختلف امکانپذیر است.

حالت ۱- چنانچه $Q_{SRj} < 0$ باشد مبین آن است که رسوب خروجی (Q_{Sout}) از لوله جریان بیشتر از رسوب ورودی ($Q_{Sin} + Q_{SL}$) بوده و بستر حالت فرسایشی دارد. (ΔZ منفی است). در این حالت مقدار Q_{Sout} یا پتانسیل انتقال توسط معادله زیر در مدل کنترل می‌شود:

$$(Q_{Sout})_{k,i,j} \leq (Q_{Sin} + Q_{SL})_{k,i,j} + (VOAL)_{k,i,j} / \Delta T \quad (35)$$

$$(VOAL)_{k,i,j} = (Ta)_{i,j} * (1 - \theta) * (SA)_{i,j} \quad (36)$$

حوزه کاربرد آنها در منابع مختلف از جمله مرجع [۹] موجود است. معادلات انتقال رسوب عموماً در شرایط جریان یک بعدی و با فرض دانه بندی یکنواخت توسعه یافته‌اند. برای تطبیق این معادلات با شرایط S-2D در هر لوله جریان به‌طور مجزا نرخ انتقال رسوب تعیین و بدین ترتیب تغییرات عرضی در جابه‌جایی مواد رسوبی محقق می‌شود. همچنین در مدل SDAR برای تطبیق معادلات با شرایط طبیعی رودخانه‌ها که دارای مواد رسوبی نا یکنواخت و با اندازه‌های مختلف ماسه، شن و قلوه سنگ است، منحنی دانه بندی مواد بستر به چند کلاس مشخص تقسیم و در هر کلاس توزیع دانه بندی یکنواخت فرض می‌شود. با بهره‌گیری از این معادلات پتانسیل انتقال برای هر کلاس دانه بندی و با فرض اینکه مواد تشکیل دهنده بستر تماماً به همان کلاس تعلق دارد میسر می‌شود. در مرحله بعد مقدار رسوب حمل شده بر حسب درصد وزنی هر کلاس مطابق معادله زیر باید تعدیل شود:

$$QS(k, i, j) = \Delta P(k, i, j) \cdot QSP(k, i, j) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

در این معادله QSP نرخ انتقال رسوب پتانسیل برای کلاس k در مقطع i و لوله جریان j ، QS نرخ انتقال رسوب تعدیل شده برای کلاس k ، ΔP درصد وزنی رسوب موجود در لایه فعال در کلاس k است.

در مدل SDAR ده کلاس دانه بندی برای بستر منظور شده است. محدوده دانه بندی بین ۰/۰۶۵ تا ۶۴ میلی‌متر را در بر می‌گیرد. امکان افزایش کلاسها و محدوده دانه بندی در مدل وجود دارد.

۳-۴-۳- تعیین تغییرات تراز بستر در لوله های جریان

پس از انتخاب معادله انتقال رسوب و مشخص شدن ضخامت لایه فعال تغییرات تراز بستر در هر یک از لوله‌های جریان با حل عددی معادله دیفرانسیلی پیوستگی رسوب معادله (۱۴) تعیین می‌شود. معادله دیفرانسیلی مزبور را می‌توان به روش گسسته سازی به صورت کاربردی زیر مرتب کرد:

در معادلات بالا VOAL حجم لایه فعال موجود در بستر لوله جریان Z و مقطع i مربوط به کلاس دانه بندی SA, k مساحت بستر رودخانه در بازه i برای لوله جریان Z بوده و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

حالت ۲- چنانچه $QSRj > 0$ باشد مبین آن است که رسوب خروجی از لوله جریان کمتر از رسوب ورودی بوده و بستر در حالت رسوب گذاری است ($\Delta Z > 0$ مثبت). در این حالت QSout یا پتانسیل انتقال توسط معادله زیر در مدل کنترل می شود:

$$(QSRj)_{k,i,j} < (QSin + QSL)_{k,i,j} \quad (37)$$

حالت ۳- در صورتی که $QSRj = 0$ باشد رسوب ورودی و خروجی در لوله جریان مساوی بوده و حالت تعادل برقرار می باشد ($\Delta Z = 0$). در مدل SDAR مقدار $QSRj$ بر اساس نظریه بوره تعدیل می شود. مطابق نظریه مزبور مقدار $QSRj$ که بوره آن را «ظرفیت انتقال مازاد» نامیده است از حاصلضرب پتانسیل انتقال در ضریب اصلاحی Ω به دست می آید [۵]:

$$QSRj = \Omega * (QSout)_{k,i,j} \quad (38)$$

$$\Omega = (1 - \sum_{k=1}^N (QSin + QSL)_{k,i,j} / (QSout)_{k,i,j}) - 1 \leq \Omega \leq 1 \quad (39)$$

با معرفی $QSRj$ در معادله (۳۳) معادله تغییرات تراز بستر در لوله های جریان به صورت ساده زیر حاصل می شود:

$$(\Delta Z)_{k,i,j} = (\Delta T / (1 - \theta)(EFWST)_{k,i,j} \Delta X) * QSRj$$

فرسایش $0 < \Omega \leq 1$ $QSRj \leq (VOAL)_{k,i,j} / \Delta T$
رسوب گذاری $-1 \leq \Omega < 0$ $QSRj \leq (QSin + QSL)_{k,i,j}$

بسته به شرایط هیدرولیکی و بار رسوبی ورودی و مشخصات دانه بندی مواد بستر در لوله های جریان سه حالت مشخص برای ضریب اصلاحی Ω قابل پیش بینی است. چنانچه

$\Omega < 0$ باشد بستر در حالت فرسایشی بوده و همه مواد رسوبی موجود در لایه فعال و یا بخشی از آن که متعلق به کلاس k است از بستر جدا شده و همراه جریان آب به پایین دست منتقل می شود. در صورتی که $\Omega < 0$ باشد حالت رسوب گذاری در بستر حاکم است و بار رسوبی ورودی بیشتر از حد ظرفیت حمل رودخانه است. مقدار $\Omega = 0$ بیانگر حالت تعادل بوده که در آن رسوب ورودی عیناً به پایین دست منتقل می شود. در مدل SDAR با محاسبه Ω ، وضعیت بستر از نظر فرسایش و رسوب گذاری در هر یک از لوله های جریان مستمرا کنترل می شود.

۳-۴-۴- بعضی ملاحظات در محاسبه تغییرات تراز بستر استفاده از معادلات انتقال رسوب در تعیین تغییرات تراز بستر مستلزم لحاظ کردن بعضی نکات در ساختار محاسباتی مدل است که به دنبال اشاره می شود:

نرخ انتقال رسوب نسبت به تغییرات دانه بندی حساس است. لذا ضرورتاً در هر گام زمانی ΔT (مورد استفاده در محاسبات هیدرولیکی) روند یابی رسوب و محاسبات مربوط به تغییرات تراز بستر در چند نوبت تکرار می شود. تعداد تکرار برای تعیین تغییرات دانه بندی و محاسبه وزن رسوب حمل شده از معادلات زیر به دست می آید:

$$(ITS)_{i,j} = (VST)_{i,j} * \Delta T / \Delta X \quad (41)$$

$$(\Delta TS)_{i,j} = \Delta T / (ITS)_{i,j} \quad (42)$$

که در آن ITS تعداد تکرار در روند یابی رسوب در لوله جریان Z و مقطع i، VST سرعت جریان آب در لوله جریان Z و مقطع i، ΔTS گام زمانی در روند یابی رسوب است. در تعیین تغییرات تراز بستر و تغییرات دانه بندی، ΔTS به عنوان گام زمانی در معادلات (۳۲) الی (۴۰) معرفی می شود. بحث در مورد نحوه انتخاب ITS و جزییات مربوط به تعیین ΔTS را می توان در منابع موجود از جمله مراجع [۳ و ۱۵] دنبال کرد.

به لوله جریان j ، DEC پارامتر ترسیب W_k سرعت سقوط دانه در کلاس k ، بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

شدت انتقال رسوب تابعی از پایداری دانه های رسوب موجود در لایه فعال است. برای بررسی وضعیت پایداری دانه‌ها از مفهوم «لایه آرمور» در مدل SDAR استفاده شده است. به مرور زمان دانه‌های ریزتر (ریزتر از قطر D_c) توسط جریان آب منتقل شده و دانه های درشت تر از D_c تشکیل لایه آرمور یا قشر حفاظتی را می‌دهد. لایه آرمور در مقابل تنشهای هیدرولیکی مقاوم بوده و با تشکیل شدن آن فرسایش بستر متوقف می‌شود. در این حالت رسوب ورودی عیناً به پایین دست منتقل و معادله پیوستگی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$(QS_{out})_{k,i,j} = (QS_{in} + QSL)_{k,i,j}, \Delta Z(k,i,j) = 0 \quad (48)$$

بدیهی است با تغییر شرایط هیدرولیکی امکان شکسته شدن لایه آرمور وجود دارد. از اینرو در مدل SDAR پایداری لایه آرمور با استفاده از روش گسler کنترل می‌شود [۱۳]. در این روش مقدار فاکتور پایداری بستر BSF^{۳۳} در هر گام زمانی با استفاده از معادله زیر در لوله‌های جریان تعیین می‌شود. چنانچه $BSF \geq 0.65$ باشد دلیل پایداری بستر (تشکیل لایه آرمور مقاوم) بوده و معادله (۴۸) در مورد آن صادق است. در غیر این صورت فرسایش در بستر تا رسیدن به شرایط پایداری و تشکیل لایه آرمور مقاوم ادامه می‌یابد:

$$(BSF)_{i,j} = \left(\sum_{k=1}^N Pa_k^2 PF_k \right) / \left(\sum_{k=1}^N Pa_k PF_k D_k \right)_{i,j} \quad (49)$$

در این معادله BSF فاکتور پایداری بستر در لوله جریان z و بازه i ، Pa_k احتمال پایداری دانه‌ها در بستر (برای کلاس دانه بندی k که با استفاده از منحنی گسler تعیین می‌شود)، PF_k مقدار نسبی دانه‌های موجود در کلاس k ، D_k قطر متوسط دانه‌ها در کلاس k ، N تعداد کلاس دانه بندی است. بررسی روند تشکیل لایه آرمور یکی از عناصر مهم در ساختار محاسباتی مدل SDAR تلقی می‌شود.

استفاده از معادلات انتقال بر این فرض استوار است که غلظت رسوب حمل شده توسط جریان آب در مقاطع مختلف زمانی و مکانی برابر با پتانسیل انتقال (حداکثر بار رسوبی قابل حمل) است. انتقال در شرایط پتانسیل را اصطلاحاً انتقال تعادلی^{۲۰} گویند. به دلیل تأثیر عوامل مختلف از جمله طول بازه، عمق آب و سرعت جریان، معمولاً غلظت رسوب حمل شده واقعی کمتر از حد پتانسیل است و به اصطلاح انتقال ناعادلی^{۲۱} حاکم است لذا در مدلسازی انتقال رسوب لازم است این واقعیت لحاظ شود. در مدل SDAR برای تعیین «مقدار رسوب حمل شده واقعی» در حالت فرسایش از روش زیر که در منابع مختلف توصیه شده استفاده شده است [۱۰ و ۱۱]:

$$(QSE)_{k,i,j} = (QSE)_{k,i,j} (1.368 - e^{-ER}) \quad (43)$$

$$ER = \Delta X / 30 (EFDST)_{i,j} \quad (44)$$

در معادلات بالا QSEN ظرفیت انتقال واقعی یا غلظت ناعادلی در لوله جریان z و مقطع i (برای کلاس k دانه بندی)، QSE ظرفیت انتقال پتانسیل یا غلظت تعادلی، ER پارامتر فرسایش، EFDST عمق موثر آب در لوله جریان است. در حالت رسوب‌گذاری مقدار رسوب ته نشین شده واقعی در مدل با استفاده از ضریب تله اندازی (TE) که توسط جانسن و محققان دیگر ارائه شده به دست می‌آید [۱۲]:

$$(QSD)_{k,i,j} = (QSIN_j * TE)_{k,i,j}, \quad (45)$$

$$(QSD)_{k,i,j} \leq (QSIN_j + QSL)_{k,i,j}$$

$$(TE)_{k,i,j} = 1 - e^{-DEC}, \quad (TE)_{k,i,j} \leq 1 \quad (46)$$

$$(DEC)_{k,i,j} = (2\Delta X_k \cdot W_k) / (EFDST * VST)_{i,j} \quad (47)$$

در معادلات بالا QSD بار رسوبی ته نشین شده واقعی در لوله جریان z و مقطع i (برای کلاس k) بار رسوبی ورودی به لوله جریان یا $(QSIN+QSL)$ ، TE ضریب تله اندازی مربوط

مواد رسوبی وضخامت لایه فعال و نافع‌ال در فایلهای مربوطه به‌منظور پشتیبانی محاسبات در گام زمانی بعدی ذخیره می‌شود. لازم به ذکر است که اعمال تغییرات در تراز بستر در هر گام محاسباتی تنها در محدوده بستر متحرک که منطبق بر مجرای اصلی بوده و در برگیرنده لوله های جریان است، انجام می‌گیرد، شکل (۲).

۴- واسنجی (کالیبراسیون) مدل و بررسی نتایج حاصله

به‌منظور بررسی قابلیت مدل برای شبیه سازی تغییرات تراز بستر و مشخصات هیدرولیک جریان، با استفاده از داده‌های تجربی و صحرایی مدل مورد واسنجی قرار گرفت. همچنین نتایج حاصله از واسنجی با نتایج مدل‌های مرجع، نظیر HEC-6، GSTARS-2 و FLUVIAL-12 مقایسه شد. در جدول (۱) مشخصات مدل SDAR و مدل‌های مرجع درج شده است. همچنین خلاصه ای از آمار و اطلاعات صحرایی رودخانه های مورد استفاده در محاسبات واسنجی مدل در جدول ۲ منعکس است. به‌طوری‌که از جدول مزبور مستفاد می‌شود، کالیبراسیون مدل برای شرایط مختلف رودخانه ای انجام شده است. به‌عنوان مثال می‌سی سی پی^{۲۳} نمونه‌ای از رودخانه های بزرگ و متعلق به مناطق جلگه ای است. زامبرو^{۲۴} و آپرسانتیاگو^{۲۵} در زمره رودخانه های کوچک تا متوسط و از نوع کوهپایه ای‌اند. همچنین از نتایج فلوم آزمایشگاهی [۱۷] برای کنترل دقت مدل استفاده شده است. محاسبات واسنجی مدل در دو مرحله زیر انجام گرفته است:

- رودخانه با بستر صلب

- رودخانه با بستر متحرک

نتایج حاصله از این بررسیها به دنبال ارائه می‌شود:

۴-۱- واسنجی مدل در شرایط بستر صلب

با توجه به در دسترس بودن اطلاعات رودخانه زامبرو (جدول ۲) و ویژگیهای مناسب آن برای اهداف کالیبراسیون، از جمله داشتن اتصالات جانبی، مقطع کنترل میانی و وجود مجرای اصلی و سیلابدشت، برای سه حالت دبیهای کم، متوسط

مدلهای رودخانه ای نسبت به انتخاب گام زمانی (ΔT) از خود حساسیت نشان می‌دهند. عدم توجه به این مسئله موجب بروز واگرایی در محاسبات عددی و توقف برنامه می‌شود. در مواردی نیز علی‌رغم تداوم محاسبات نتایج حاصله فاقد ارزش مهندسی بوده و منعکس کننده واقیعت رفتاری رودخانه نیست. عموماً حساسیت مدل‌های مورفولوژیک به گام زمانی بیشتر بوده و لازم است برای رسیدن به جوابهای منطقی و اجتناب از واگرایی ΔT مناسب انتخاب شود. برای انتخاب ΔT رعایت معیار کورانت در مدل ضروری است [۶ و ۳]. این معیار مطابق معادله زیر با عدد کورانت مشخص می‌شود:

$$C_r = \frac{C_s \Delta T}{\Delta x} \quad (50)$$

در این معادله C_r عدد کورانت، C_s سرعت پیشروی امواج رسوبی در بستر، بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. به‌منظور برقراری پایداری و همگرایی در محاسبات لازم است ($C_r \leq 1$) باشد. بر این اساس حد ماکزیم ΔT برای محاسبات عددی از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$(\Delta T)_{\max} \leq \frac{\Delta x}{C_s} \quad (51)$$

از آنجایی‌که تعیین C_s مشکل است در عمل لازم است با آزمون و اجرای اولیه مدل مقدار ΔT انتخاب شود. از طرفی مطابق معادله (۵۰) مقدار ΔT از Δx نیز تاثیر پذیری دارد. از این رو در انتخاب Δx مشخصات هندسی رودخانه، شکل هیدروگراف جریان، شرایط هیدرولیکی و همچنین دانه بندی مواد بستر باید مد نظر قرار گیرد (در خصوص انتخاب ΔT مناسب و Δx به مبحث ۴ کالیبراسیون مدل SDAR مراجعه شود).

۳-۴-۵- بروز آوری مشخصات هندسی مقاطع و تراز بستر

در خاتمه هرگام زمانی پس از روند یابی رسوب بر اساس مقادیر ΔZ به‌دست آمده در لوله‌های جریان و در بازه‌های مختلف، مشخصه های هندسی هر مقطع اصلاح می‌شود سپس وضعیت تراز بستر، نیمرخ طولی، شیب مسیر، دانه بندی جدید

جدول ۱- مقایسه مشخصات مدل SDAR با مدل‌های مرجع

نام مدل	SDAR	HEC-6	GSTARS-2	FLUVIAL-12
رژیم جریان	زیر بحرانی	زیر بحرانی	زیر بحرانی - فوق بحرانی	زیر بحرانی
پذیرش شاخه های جانبی	دارد	دارد	ندارد	دارد
نوع رسوبات	غیر چسبنده	چسبنده - غیر چسبنده	چسبنده - غیر چسبنده	غیر چسبنده
نوع مدل	S-2D	1-D	S-2D	1-D

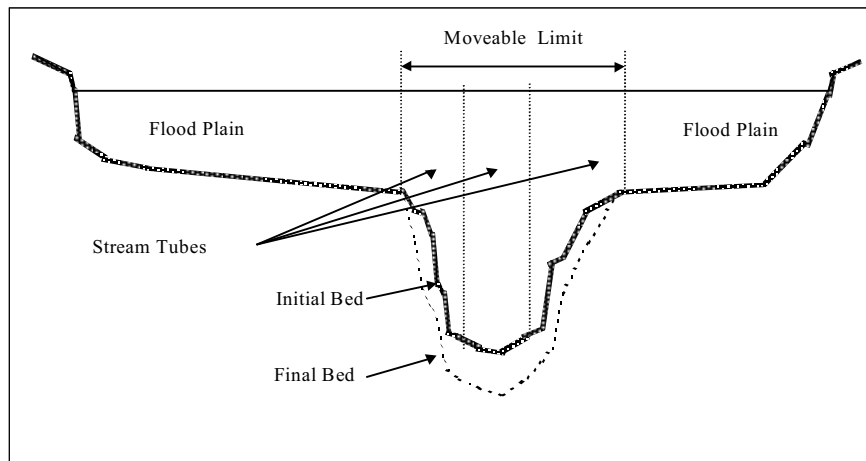
جدول ۲- مشخصات عمومی رودخانه های مورد استفاده در کالیبراسیون مدل SDAR

نام رودخانه یا مجرا	زامبرو	می سی سی پی	آپرسانتیگو	فلوم آزمایشگاهی
D_{50} بستر (mm)	0.8	0.56	0.57	1.7
D_{max} بستر (mm)	50	10	8	10
D_{min} بستر (mm)	0.15	0.065	0.065	0.1
Q_{min} (CMS)	34	1400	34	0.0341
Q_{max} (CMS)	284	9800	908	0.0341
TT- طول مدت جریان (day)	54	120	0.83	0.041
ΔT - گام زمان (sec)	86400	86400	720	12
L- طول بازه مطالعاتی (m)	8000	10000	1625	20
تعداد مقاطع	11	24	11	41
ΔL - متوسط فاصله مقاطع (m)	800	417	160	0.5
N-B تعداد شاخه های جانبی	3	-	-	-
S_0 - شیب رودخانه	$1.2 * 10^{-3}$	$1.1 * 10^{-4}$	$3.4 * 10^{-3}$	$4 * 10^{-3}$
h- عمق جریان (m)	1.6	16.2	3.9	0.074
V- سرعت متوسط جریان (m/sec)	0.89	2.21	2.27	0.603
W- متوسط عرض مجرا (m)	50	367	167	0.8
FR- عدد فرود جریان	0.24	0.18	0.48	0.73
مدل مرجع	HEC-6	GSTARS-2	FLUVIAL-12	GSTAR-2
نوع مدل	یک بعدی	شبه دو بعدی	یک بعدی	شبه دو بعدی
مرجع	[۱۰]، [۱۴]، [۱۵]	[۳]	[۱۹]	[۱۷]، [۱۱]

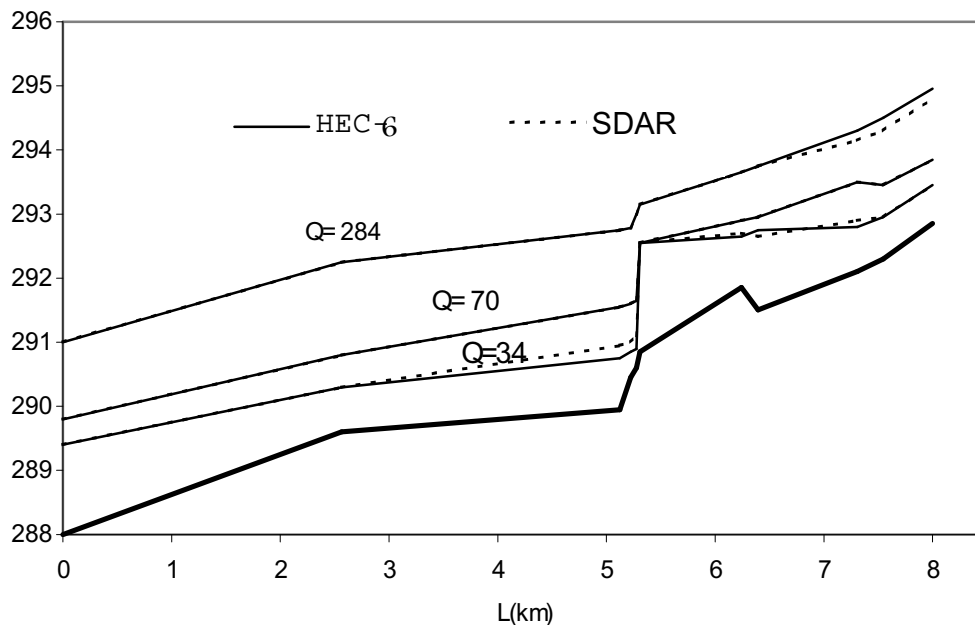
ملاحظات: مقادیر h, V, W و FR مربوط به Q_{max} بوده و معرف مقادیر متوسط در بازه مطالعاتی است.

و سیلابی مدل SDAR اجرا شده است. طول محدوده مطالعاتی حدود ۸ کیلومتر و سه شاخه جانبی و یک سیستم سرریز (شرط مرزی میانی) در مسیر رودخانه وجود دارد. به علاوه دبی ۷۰ متر مکعب در ثانیه به عنوان بده غالب تلقی می شود. در شکل (۳)

نیمرخهای طولی حاصله از اجرای مدل برای دبی ۳۴، ۷۰ و ۲۸۴ متر مکعب در ثانیه ترسیم شده است. به منظور سنجش توانایی مدل در شبیه سازی هیدرولیک جریان نتایج مدل HEC-6 نیز بر روی شکل (۳) به عنوان شاهد ترسیم شده است.



شکل ۲ - نحوه عملکرد مدل SDAR در تعیین تراز بستر رودخانه



شکل ۳ - مقایسه نیمرخ طولی تراز آب رودخانه زامبرو حاصل از مدل SDAR با نتایج مدل HEC-6 در حالت بستر صلب

شرایط بستر متحرک که طی آن انتقال رسوب موجب کف کنی و یا تجمع انباشته های رسوبی و تغییر مشخصه های هندسی مجرا می شود عدم انتخاب ΔT مناسب وقوع پدیده واگرایی و توقف محاسبات را بدنبال دارد. به عبارتی مدل های رودخانه ای با فعال شدن الگوریتم رسوب نسبت به گام زمانی حساس شده و لازم است با بررسی ارتباط متقابل هیدرولیک و انتقال

روند منحنی های حاصله از دو مدل دارای انطباق مطلوبی بوده و بیانگر قابلیت مدل جدید SDAR در شبیه سازی خصوصیات هیدرولیکی در شرایط مختلف آبدهی است.

۲-۴- واسنجی مدل در شرایط بستر متحرک

محاسبات هیدرولیکی در شرایط بستر صلب در جریان های شبه پایدار نسبت به گام زمانی (ΔT) حساس نیستند. لیکن در

رسوب در خصوص راههای مقابله با چنین پدیده ای و برای هدایت محاسبات در مسیر جوابهای منطقی و جلوگیری از پدیده واگرایی با چند آزمون اولیه بر روی دیبهای شاخص (نظیر Q_{max}) عملکرد مدل کنترل و محدوده مناسب برای انتخاب ΔT تعیین شود. با انتخاب ΔT مناسب شرایط کورانت^{۲۶} (در خصوص شرایط کورانت و انتخاب ΔT مناسب به بخش پایانی مبحث ۳-۴-۴ مراجعه شود) در مدل برقرار شده و با ایجاد سازگاری بین دو الگوریتم هیدرولیک و انتقال رسوب خطر واگرایی مرتفع و محاسبات تا رسیدن به نتیجه نهایی پیش می‌رود [۳ و ۶]. بررسی حساسیت مدل نسبت به ΔT با مروری بر مندرجات جدول (۲) امکانپذیر است. مطابق جدول مزبور مقدار ΔT بسته به نوع مجرا و شرایط هیدرولیکی در محدوده ۱۲ تا ۸۶۴۰۰ ثانیه انتخاب شده است و نتایج نشان می‌دهد که برای مجاری کوچک از جمله فلوم آزمایشگاهی، مقدار ΔT به‌طور محسوسی کمتر است و با افزایش ابعاد هندسی مجرا می‌توان گامهای زمانی بزرگتری انتخاب کرد.

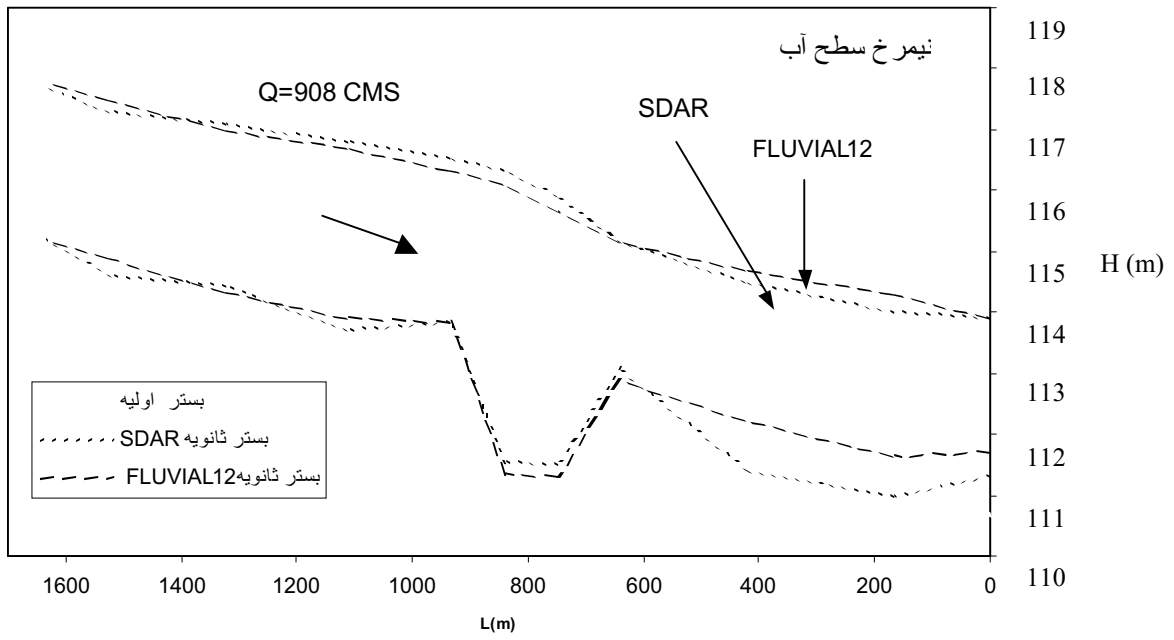
بررسیهای انجام گرفته در مراحل مختلف توسعه مدل SDAR گویای این واقعیت است که مدل‌های رایانه‌ای علاوه بر گام زمانی نسبت به گام مکانی (ΔX) نیز حساسیت دارند. شدت چنین عکس‌العملی با مشخصات هندسی مجرا، تغییرات دبی، خصوصیات دانه بندی و اهداف مطالعاتی ارتباط مستقیم دارد. از این رو لازم است به موازات انتخاب ΔT بادر نظر گرفتن عوامل تأثیر گذار مقادیر ΔX نیز به گونه‌ای مناسب انتخاب شود. نظری به مندرجات جدول (۲) بیانگر چنین واقعیتی است. در این جدول برای سه فقره از رودخانه‌های مورد مطالعه با در نظر گرفتن خصوصیات جریان و شرایط رودخانه‌ای متوسط مقدار ΔX در راستای ایجاد پایداری و تحقق همگرایی بین ۱۶۰ تا ۸۰۰ متر تغییر می‌کند. در خصوص فلوم آزمایشگاهی نیز به ویژگیهای جریان انتخاب ΔX برابر با ۰/۵ متر مناسب تر تشخیص داده شده است.

شکل (۴) نمونه‌ای از کالیبراسیون مدل از نظر عملکرد هیدرولیکی در شرایط فرسایش و رسوب‌گذاری را نشان

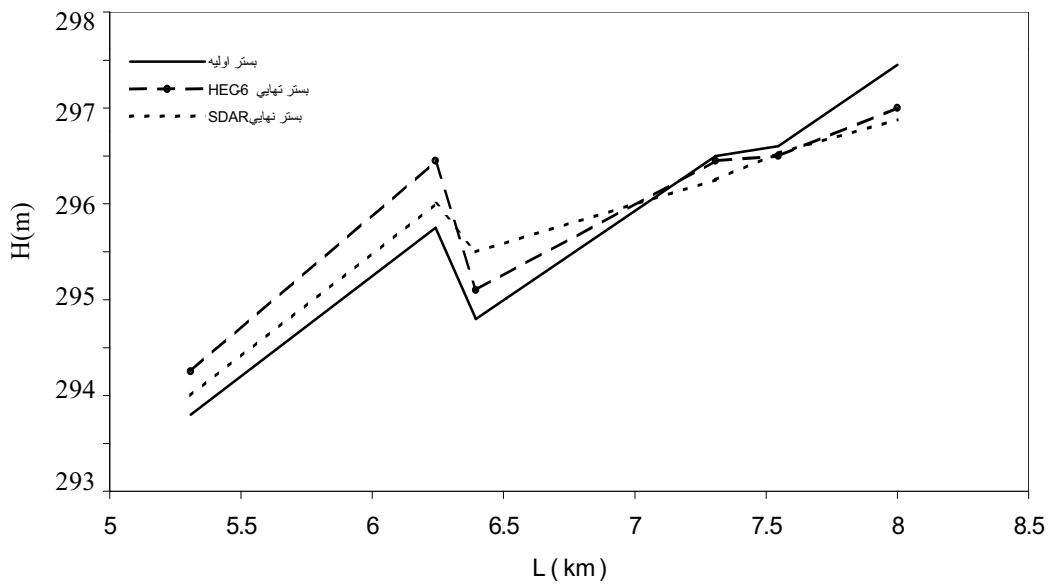
می‌دهد. این آزمون با استفاده از داده های رودخانه آپرسانتیاگو انجام گرفته و تأثیر تغییرات تراز بستر ناشی از عبور سیل با دوره بازگشت یکصد سال بر روی تراز آب در دبی اوج سیلاب ($Q_{max}=908\text{cms}$) توسط مدل SDAR شبیه سازی شده است. به‌منظور سنجش عملکرد مدل SDAR بر روی شکل (۴) همچنین نیمرخ حاصله از مدل FLUVIAL-12 ترسیم شده است. این دو منحنی با اندک تفاوتی از روند عمومی مشابهی برخوردار بوده و بیانگر توانایی مدل SDAR در شبیه سازی ویژگیهای هیدرولیکی در شرایط بستر متحرک است.

شبیه سازی تغییرات تراز بستر رودخانه‌ها از جمله اهداف اصلی مدل SDAR بوده و بدین منظور قابلیت مدل در حالت یک بعدی و شبه دو بعدی، با استفاده از آمار صحرایی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله از این بررسیها به دنبال ارائه شده است:

۴-۲-۱- شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر در حالت یک بعدی (1-D)
در مدل SDAR چنانچه $JST=1$ باشد (JST، تعداد لوله های جریان) مجرای اصلی به‌صورت یک لوله جریان در نظر گرفته می‌شود. در این حالت مدل به‌صورت 1-D قادر به شبیه سازی تغییرات تراز بستر است. رفتار سنجی مدل در حالت 1-D بر روی رودخانه‌های زامبرو و آپرسانتیاگو انجام گرفته است. رودخانه زامبرو دارای مواد بستری غیر چسبنده از نوع شن و ماسه بوده و بخشی از رسوب حمل شده در محدوده مورد مطالعه از طریق مقطع بالا دست و شاخه‌های جانبی فراهم می‌شود. شکل (۵) تأثیر پذیری بستر رودخانه زامبرو را از هیدروگراف ۵۴ روزه با تغییرات دبی ۱۴ تا ۷۰ مترمکعب در ثانیه که توسط مدل SDAR شبیه سازی شده است را به نمایش می‌گذارد. همراه با نمودار مزبور عملکرد مدل HEC-6 نیز به‌عنوان مدل مرجع ترسیم شده است. مطابق شکل (۵) هر چند نتایج حاصله از دو مدل دارای تفاوتی است لکن آهنگ تغییرات تراز بستر برای مدل SDAR و HEC-6 از نظر عملکرد



شکل ۴ - نمایش نحوه انطباق نیمرخ طولی سطح آب حاصل از مدل SDAR و FLUVIAL-12 در حالت بستر متحرک برای رودخانه آپرسانتیاگو (سیل یکصد ساله)



شکل ۵ - مقایسه نحوه پیش بینی تغییرات تراز بستر رودخانه زامبرو توسط مدل SDAR و HEC-6

فرسایش و رسوب‌گذاری از روند مشابهی تبعیت می‌کند. این تشابه رفتاری با مدل مرجع بخشی از توانمندی SDAR را در مطالعه فعل و انفعالات رودخانه ای بازگو می‌کند.

شکل (۶) مثال موردی دیگری در خصوص آزمون قابلیت شبیه سازی مدل SDAR در شرایط 1-D است. در این نمودار عکس العمل رودخانه آپرسانتیاگو نسبت به سیل با دوره بازگشت یکصد سال نشان داده شده است. مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه مخلوطی از شن و ماسه بوده و به سبب عدم وجود شاخه های جانبی تنها منبع تغذیه رسوب ورودی از مقطع بالا دست است. دبی در شروع سیلاب ۳۴ و در زمان اوج به ۹۰۸ متر مکعب در ثانیه افزایش می‌یابد. نیمرخهای ترسیم شده تغییرات تراز بستر را در وقوع اوج سیلاب و پس از ۲۰ ساعت از شروع محاسبات منعکس می‌کند. بر روی شکل (۶) منحنی حاصله از مدل FLUVIAL-12 نیز ترسیم شده است. مطابق شکل منحنیهای حاصله از دو مدل، در بخش عمده ای از بازه مطالعاتی دارای همخوانی مطلوبی است. به خصوص شبیه‌سازی گودافتادگی ناشی از کاهش مقطع توسط دو مدل در خور توجه است. در عین حال در بازه پایین دست روند تغییرات تا حدی متفاوت بوده و رسوب‌گذاری بیشتری توسط FLUVIAL پیش بینی می‌شود.

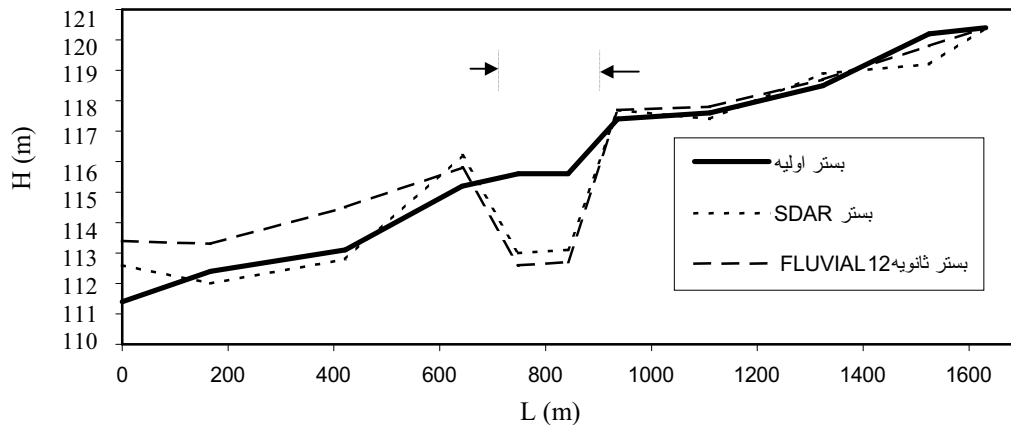
۴-۲-۲- شبیه سازی تغییرات تراز بستر در حالت شبه دو بعدی (S-2D)

سنجش عملکرد مدل در حالت S-2D با بهره گیری از داده های رودخانه می سی سی پی در بازه ای به طول ۱۰ کیلومتر انجام گرفته است. این بخش از رودخانه می سی سی پی اولین بار توسط یانگ با استفاده از مدل شبه دو بعدی GSTARS-2 شبیه‌سازی و با مقادیر عمق یابی مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفت [۳]. از این رو با توجه به در اختیار بودن نتایج شبیه سازی یانگ و مقادیر مشاهده ای این بازه برای آزمون توانایی مدل SDAR در حالت S-2D انتخاب شده است. محدوده مورد مطالعه بین دو ایستگاه هیدرومتری قرار دارد و در بخشی از آن

مقطع رودخانه به دلیل احداث تأسیسات هیدرولیکی تنگتر شده است. هدف از شبیه سازی، بررسی عکس العمل رودخانه توسط مدل SDAR نسبت به کاهش مقطع بوده و بدین منظور دبیهای روزانه برای یک دوره پر آبی ۱۲۰ روزه (از اول ژانویه تا می ۱۹۸۲) به مدل معرفی شده است. از آنجایی که در خاتمه این دوره تغییرات تراز بستر طی عملیات عمق یابی ثبت شده (مولیناس ۱۹۸۲) از داده های موجود برای کالیبراسیون مدل استفاده شده است. مجموعه اطلاعات مربوط به مشخصات هندسی بازه، دانه بندی مواد بستر که عمدتاً از جنس ماسه است، داده‌های هیدرولوژیک و مقاطع هندسی قبل و بعد از خاتمه جریان در مرجع [۳] موجود است. تعداد لوله‌های جریان در حالت شبه دو بعدی برابر با ۳ انتخاب شده است. دلیل این امر، امکان مقایسه نتایج مدل SDAR با نتایج مدل GSTARS-2 است که توسط یانگ با هدف شبیه سازی تغییرات تراز بستر در سال ۱۹۹۸ با سه لوله جریان اجرا شده است. شکل (۷) تغییرات تراز بستر پیش بینی شده توسط مدل SDAR را نسبت به بستر اولیه در پایان دوره ۱۲۰ روزه به نمایش می‌گذارد. بر روی شکل همچنین نیمرخ طولی حاصله از عمق یابی ترسیم شده و نتایج مدل GSTARS نیز به عنوان اطلاعات تکمیلی معرفی شده است. مقایسه منحنیها، گویای این واقعیت است که نتایج هر دو مدل با روند عمومی تغییرات تراز بستر مشاهده شده دارای هماهنگی است. هرچند عمق فرسایش حاصله از مدل SDAR تا حدی بیشتر از تراز مشاهده‌ای است و برای مدل GSTARS عموماً عمق فرسایش پیش بینی شده کمتر بوده و بخش عمده ای از منحنی حاصله بالاتر از ترازهای مشاهده ای قرار دارد.

۴-۳-۳- مقایسه خطاها

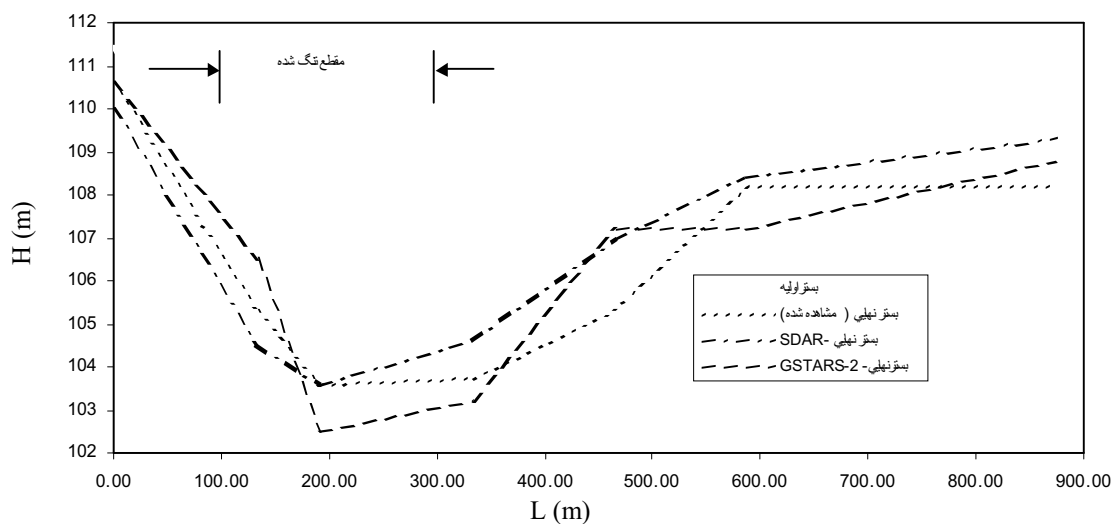
به منظور ارزیابی نحوه عملکرد مدل مقادیر خطای حاصله از پیش بینی میزان فرسایش و رسوب گذاری و تغییرات تراز بستر در بازه های مطالعاتی تعیین و در جدول (۳) درج شده است. در این جدول ستون مربوط به درصد خطاها تفاوت بین



شکل ۶- مقایسه نحوه پیش‌بینی تراز بستر رودخانه آپرسانتیاگو توسط مدل SDAR و FLUVIAL-12

جدول ۳ - مقایسه خطای پیش‌بینی فرسایش و رسوب‌گذاری توسط مدل SDAR نسبت به مدل‌های مرجع

زمان پایه هیدروگراف (روز)	درصد خطا			نوع مدل	نام رودخانه
	تراز آب	فرسایش	رسوب‌گذاری		
۵۴	-۱/۴۳	۵۷	-۴۰	HEC-6	رودخانه زامپرو
۰/۸۳	-۹/۷	۳۹	۲۱	FLUVIAL-12	رودخانه آپرسانتیاگو
۱۲۰	-	۷۷	-	GSTARS-2	رودخانه می‌سی‌سی‌پی
۱۲۰	۱	۳۶	-	مقادیر مشاهده شده	رودخانه می‌سی‌سی‌پی



شکل ۷ - مقایسه نحوه پیش‌بینی تراز بستر رودخانه می‌سی‌سی‌پی توسط مدل SDAR و GSTARS-2

مقا دیر حاصله از مدل SDAR و مدل‌های مرجع را برای رودخانه‌های مورد نظر، مشخص می‌کند. مطابق جدول (۳) محدوده خطا برای تراز آب از $1/4$ - تا $9/7$ درصد، فرسایش بین 36 تا 77 درصد و در خصوص رسوب‌گذاری 41 - تا 21 درصد است. طبق مندرجات جدول (۳) خطای حاصله از شبیه‌سازی تراز آب به مراتب کمتر از خطای تراز بستر است. از این رو عملکرد هیدرولیکی مدل SDAR را می‌توان مشابه مدل‌های مرجع قلمداد کرد. این واقعیت ضمن تایید توانمندی مدل ضرورت بررسی عوامل بروز خطا را در شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری محرز می‌کند. از جمله دلایل بروز خطا، تعدد پارامترهای تاثیرگذار در شبیه‌سازی انتقال رسوب است. برخلاف ویژگی‌های هیدرولیکی که از اصول و مبانی مشخصی پیروی می‌کند، فرایند انتقال رسوب دارای عوامل ناشناخته‌ای است که تاثیر آنها در معادلات انتقال رسوب ملحوظ نیست. نحوه مقابله با نارسایی‌های حاصله از این فرایند از جمله چالش‌های اساسی در تنظیم ساختار مدل‌های رودخانه‌ای تلقی می‌شود. از اینرو منشاء بروز خطا در فرسایش و رسوب‌گذاری را می‌توان عمدتاً در تفاوت ساختاری مدل SDAR با مدل‌های مرجع برای شبیه‌سازی انتقال رسوب جستجو کرد. به علاوه زیر برنامه‌های مربوط به تعیین توزیع سرعت، توزیع تنش برشی، مرزهای لوله جریان، ضخامت لایه فعال و نافع، پدیده تشکیل لایه آرمور، حالت تعادلی و ناعادلی انتقال رسوب، ظرفیت انتقال مازاد، تعیین سرعت سقوط دانه‌ها و نظایر آن هر چند دارای اصول و مبانی شناخته شده‌ای‌اند، لیکن از جنبه عملی تطبیق آنها با الگوی محاسباتی در هر مدلی به تبعیت از دیدگاه شخص برنامه‌نویس متفاوت بوده و به خصوص در مدل‌های مرجع مورد استفاده در این تحقیقات به عنوان رمز توسعه مدل دسترسی به خطوط برنامه آنها برای تشخیص تفاوت‌های ساختاری میسر نیست. مطابق جدول (۳) دامنه خطا در شبیه‌سازی رودخانه زامبرو توسط مدل SDAR با آنچه که از مدل HEC-6 حاصل شده تا حدی بیشتر است. لیکن در خصوص رودخانه آپرسانتیاگو خطا

نسبتاً کمتر بوده و عملکرد SDAR را می‌توان مشابه FLUVIAL تلقی کرد. برای رودخانه می‌سی‌سی‌پی نتایج دو مدل متفاوت است. در حالی که SDAR عمق فرسایش را 36 درصد بیشتر از مقدار مشاهده شده ارزیابی می‌کند، GSTARS تخمین دست‌پایینی داشته و فرسایش پیش‌بینی شده 41 درصد کمتر از تراز مشاهده‌ای است. عدد 77 درصد در جدول حاصله جمع دو کمیت مزبور بوده و اختلاف تراز حاصله از دو مدل را نسبت به هم منعکس می‌کند. از نظر متخصصان مدل‌های رودخانه‌ای به لحاظ تاثیر عوامل متعدد از جمله پردازش پایه‌های نظری مدل، برنامه‌نویسی و توسعه الگوریتم‌ها و همچنین پیچیدگی‌های موجود در پدیده‌های رودخانه‌ای محدوده خطاهای مندرج در جدول (۳) دور از انتظار نیست. جانسون در بررسی‌های خود خطای 50 - تا 200 درصد را در شبیه‌سازی کمیت رسوب محدوده‌ای ممکن قلمداد می‌کند [۱۲]. همچنین یائو و همکاران اخیراً در یک بررسی جامع به منظور آزمون حساسیت و عدم قطعیت در مدل‌های رودخانه‌ای دامنه خطای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری را بین 90 - تا 35 درصد گزارش کرده‌اند [۱۸]. بررسی‌های بالا می‌توانمندی مدل SDAR در شبیه‌سازی رفتار رودخانه‌ها بوده و بدان گونه که در مباحث آتی نیز عنوان خواهد شد، در مواردی عملکرد آن نسبت به مدل‌های مرجع مناسبتر است.

۴-۴- آزمون مدل در شبیه‌سازی تغییرات مقطع عرضی

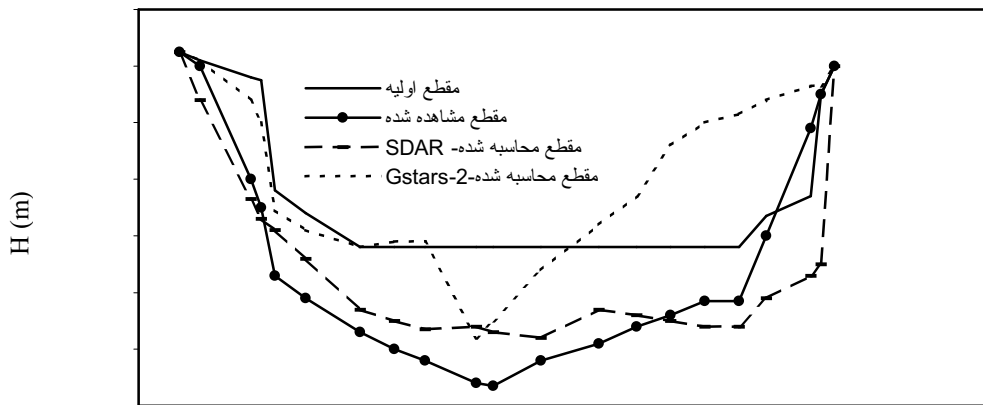
در بسترهای آبرفتی، جابه‌جایی مواد رسوبی موجب تغییر مشخصه‌های هندسی مقطع رودخانه می‌شود. بدیهی است به سبب توزیع نا یکنواخت سرعت جریان و تنش برشی شدت انتقال رسوب در نقاط مختلف مقطع متفاوت بوده و این امر بر شکل‌گیری نا متقارن نیمرخ عرضی تاثیرگذار است. در مدل SDAR، با توجه به ساختار شبه دوعبده‌ای، منطبق تغییر پذیری توزیع سرعت در امتداد عرضی ملحوظ شده است، از اینرو علاوه بر شبیه‌سازی تغییرات طولی، که عمدتاً امتداد خط

تالوگ^{۲۷} یا خط القعر مسیر رودخانه مد نظر است شبیه سازی تغییرات عرضی تراز بستر نیز از جمله قابلیت‌های مدل قلمداد می‌شود. بدین ترتیب مقایسه نتایج حاصل از مدل با مشاهدات صحرائی می‌تواند توانایی آن‌را در پیش بینی رفتار رودخانه منعکس کند. در این خصوص در ادامه بررسی‌های مربوط به شبیه‌سازی تغییرات رودخانه می‌سی‌سی‌پی در حالت S-2D که در مبحث پیشین عنوان شد به بررسی نحوه تغییرات مقطع عرضی نیز پرداخته شده است. مطابق جدول (۲) در بازه ۱۰ کیلومتری رودخانه می‌سی‌سی‌پی تعداد ۲۴ مقطع عرضی به مدل معرفی شده و در شکل (۸) نمونه‌ای از مقاطع عرضی ترسیم شده است. شکل (۸) وضعیت مقطع رودخانه را پس از یک دوره پر آبی ۱۲۰ روزه نشان می‌دهد. به‌علاوه به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد مدل در مقایسه با مدل‌های مرجع مقطع پیش‌بینی شده توسط GSTARS-2 نیز که در زمره مدل‌های شبه دویعدی است همراه مقاطع مزبور ارائه شده است. مطابق شکل (۸) با توجه به مقطع عرضی مشاهده شده عکس‌العمل رودخانه می‌سی‌سی‌پی نسبت به هیدروگراف جریان ۱۲۰ روزه بصورت فرسایش فراگیر و گودافتادگی نسبتاً زیاد بستر رودخانه است (محدوده احداث تأسیسات هیدرولیکی). مقطع شبیه‌سازی شده توسط مدل SDAR نیز دارای چنین ویژگی بوده و بیانگر وقوع فرسایش وافت محسوس تراز بستر در تمام عرض رودخانه است. در شکل (۸) مقطع پیش‌بینی شده توسط GSTARS تا حدی میزان رسوب‌گذاری بیشتری را در سمت راست مقطع نشان می‌دهد، ضمن آن‌که محدوده فرسایش عمده‌تأ متوجه بخش میانی رودخانه است. همان‌گونه که در مبحث بررسی خطاها عنوان شد، تفاوت در ساختار برنامه‌ای دو مدل منشاء اصلی بروز تفاوت در نتایج حاصله است. بدیهی است هماهنگی مطلوب مدل SDAR با نتایج مشاهداتی تایید دیگری بر توانایی آن در شبیه‌سازی تغییرات بستر رودخانه‌هاست.

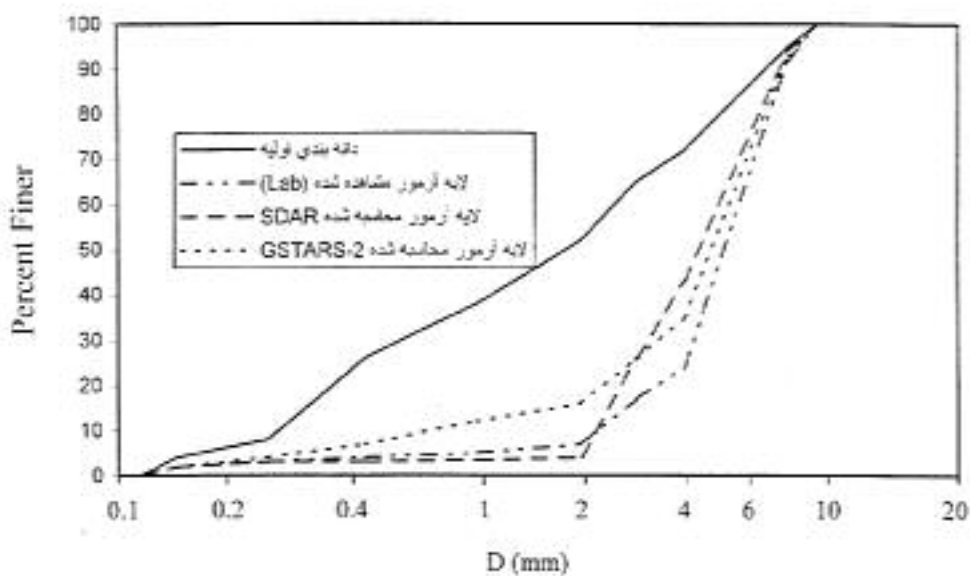
۴-۵- آزمون توانایی مدل در پیش‌بینی تشکیل لایه آرمور

تشکیل لایه آرمور یکی از ویژگی‌های مهم رودخانه‌ها و مجاری

طبیعی است. شبیه‌سازی چنین فرایندی از جمله چالش‌های اصلی در تدوین مدل‌های رودخانه‌ای است. در مدل SDAR تشکیل لایه آرمور توسط یک برنامه جامع پی‌گیری شده و میزان پایداری آن در هرگام زمانی کنترل می‌شود. بررسی پایداری بستر در مقابل تداوم سیلابها از جمله مشخصه‌های این برنامه است. به‌منظور بررسی توانایی مدل در پیش‌بینی تشکیل لایه آرمور و توقف فرسایش بستر از نتایج فلوم آزمایشگاهی که توسط آشیدا و می‌چیو ارائه شده استفاده شده است [۱۷]. در این بررسی یک مدل فیزیکی به طول ۲۰ و عرض ۰/۸ متر با هدف شبیه‌سازی تشکیل لایه آرمور در پایین دست یک سد مخزنی تدارک دیده شده است. قطر نظیر D₅₀ لایه سطحی بستر در شروع آزمایش برابر با ۱/۷ میلی‌متر و شدت جریان در طول مدت آزمایش ثابت و برابر با ۳۴ لیتر بر ثانیه و همچنین آب ورودی به فلوم فاقد مواد رسوبی است (حالت آب صاف در ورودی کانال). منحنی دانه‌بندی مواد بستر در شروع آزمایش در شکل (۹) نشان داده شده و همچنین توزیع دانه بندی لایه آرمور مشاهده شده توسط آشیدا و می‌چیو نیز ترسیم شده است. شکل (۹) منحنی آرمور حاصله را پس از اجرای مدل SDAR به همراه منحنی مشاهده شده به نمایش می‌گذارد. به‌علاوه توزیع دانه بندی لایه آرمور حاصله از مدل GSTARS نیز به‌عنوان شاهد همراه منحنیهای مزبور ترسیم شده است. مطابق شکل (۹) منحنی حاصله از مدل با روند عمومی منحنی مشاهده شده هماهنگی خوبی دارد و با عملکرد GSTARS نیز انطباق مطلوبی را نشان می‌دهد. نتایج حاصله تأییدی دیگر بر توانمندی مدل SDAR در شبیه‌سازی فرایند تشکیل لایه آرمور به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم رودخانه‌ای است. بررسی شکل (۹) دو ناحیه متمایز را در لایه آرمور نسبت به منحنی اولیه مشخص می‌کند. محدوده دانه‌های مساوی یا کوچکتر از ۲ میلی‌متر که بر خلاف دانه‌بندی اولیه دارای شیب ملایمی بوده و حدود ۵ درصد وزنی را به خود اختصاص می‌دهد و محدوده دانه‌های ۲ تا ۱۰ میلی‌متر که دارای شیب تندی بوده و بخش عمده لایه آرمور به آن تعلق



شکل ۸ - نمونه ای از مقطع عرضی شبیه‌سازی شده توسط مدل SDAR و GSTARS-2 و مقایسه آن با مقطع مشاهده شده



شکل ۹ - نمایش چگونگی انطباق دانه‌بندی لایه آرمور محاسبه شده توسط مدل SDAR با دانه‌بندی لایه آرمور مشاهده شده در فلوم آزمایشگاهی

دارند. در حالی که این محدود کمتر از ۵۰ درصد وزنی را قبل از شروع آزمایش به خود اختصاص داده است، با تشکیل لایه آرمور مقدار آن به حدود ۹۵ درصد دانه بندی بستر افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

با عنایت به مباحث عنوان شده در خصوص سازو کار مدل SDAR و با توجه به قابلیت‌ها و محدودیتهای آن، به دنبال

دارد. این ویژگی بیانگر آن است که بر اساس مکانیزم حاکم بر فرایند تشکیل لایه آرمور دانه های ریزتر از ۲ میلی متر (با مقداری برابر با ۵۰ درصد وزنی در شروع آزمایش) در اثر تداوم جریان شسته شده و فقط بخش کمی از آن در بستر باقی می ماند (حدود ۵ درصد وزنی). در مقابل دانه های بزرگتر از ۲ میلی متر نسبت به تنش برشی آب مقاومت بیشتری از خود نشان داده و در شکل‌گیری لایه آرمور نقش اصلی را به عهده

ارزیابی نتایج حاصله از تحقیقات انجام شده در توسعه مدل پرداخته و پیشنهادات برای مطالعات آتی ارائه می شود:

۱- با توجه به ویژگیهای رودخانه های مورد استفاده در مراحل کالیبراسیون و تطبیق ساختار مدل با شرایط صحرایی استفاده از مدل SDAR برای اهداف مهندسی و انجام مطالعات رفتار شناسی رودخانه های آبرفتی با مواد رسوبی غیرچسبنده و جریانهای متغیر تدریجی با اعداد فرود کمتر از یک توصیه می شود. به ویژه قابلیت اجرای مدل در حالت 1-D و S-2D زمینه های کاربردی متنوعی را برای استفاده کننده فراهم می کند. بدیهی است ارتقاء ظرفیت پذیرش مقاطع و شاخه های جانبی بیشتر، لحاظ کردن قابلیت گرافیکی و به طور کلی اعمال معیارهای کاربر دوست کردن آن استفاده حرفه ای از مدل SDAR را در عرصه های مهندسی امکانپذیر می سازد.

۲- تبدیل جریان 1-D به S-2D با بهره گیری از روش لوله جریان الگوئی مؤثر و کارآمد و اندیشه ای نو در توسعه مدلها و شناخت رفتار طبیعی رودخانه ها تلقی می شود. حسن عمده مدلهای S-2D در آن است که به لحاظ نیاز به ظرفیت کم رایانه ای امکان بررسی بازه های طولانی میسر می شود.

۳- در مدل SDAR معرفی مفهوم لوله جریان بازه ای تحولی جدید تلقی می شود. با چنین روشی محدوده مورد مطالعه به بازه های مختلفی تقسیم و در هر بازه شاخه ها و شعبات جانبی و یا نقاط برداشت با لوله های جریان مرتبط می شود. با این روش محدودیتهای موجود در پذیرش تغذیه یا برداشت جانبی توسط مدلهای S-2D مرتفع شده است.

۴- استفاده از مدل SDAR در شرایط فعلی محدود به رسوبات غیر چسبنده است. حوزه کاربردی مدل را می توان با افزودن الگوریتم رسوبات چسبنده افزایش داده و همزمان فعل و انفعالات حاصل از عملکرد مواد رسوبی چسبنده و غیر چسبنده را مورد مطالعه قرار داد. بدیهی است به لحاظ پیچیدگیهای حاکم در انتقال رسوبات چسبنده این امر نوعاً مستلزم انجام کار تحقیقاتی و بررسیهای مقایسه ای بوده و تدارک زمینه های پژوهشی مربوطه را طلب می کند.

۵- پدیده برداشت مصالح از رودخانه ها و شبیه سازی تبعات حاصله از جمله موارد مهمی است که امکان بررسی آن به طور بالقوه با استفاده از مدل SDAR وجود دارد. بدین منظور لازم است با انجام مراحل کالیبراسیون براساس نمونه های تجربی تقویت و تکمیل الگوریتم محاسباتی مربوطه محقق شود.

۶- لحاظ کردن تغییرات پلان مسیر یا جابه جاییهای عرضی حاصله از ریزش کناره ها از دیگر قابلیت های مورد نظر در فرایند توسعه آبی مدل SDAR است. در مدل SDAR با تقسیم مجرای اصلی به لوله های جریان امکان بررسی توزیع سرعت، تنش برشی و نرخ انتقال رسوب در امتداد کناره ها فراهم شده و اثرات کف کنی و پنجه شویی حاصله از آن که سرآغاز ریزش توده ای خاک کناره ها و تغییر پلان مسیر رودخانه است قابل بررسی است. هر چند به لحاظ محدودیت زمانی امکان پرداختن به جزئیات چنین فرایندی در روند توسعه مدل میسر نبوده است لیکن با توجه به اهمیت آن از دیدگاه مورفولوژیک انجام کار پژوهشی و تطبیق عملکرد مدل با نمونه های صحرایی و کاربردی قویا توصیه می شود. با این ویژگی حوزه کاربرد مدل در شبیه سازی پدیده های رودخانه ای و انجام بررسیهای مهندسی به نحو مؤثری افزایش می یابد.

۷- هیدروگراف جریان ناشی از ریزشهای جوی به عنوان داده های هیدرولوژیک عنصر اصلی محاسبات هیدرولیک جریان و روندیابی رسوب در مدلها است. تهیه الگوریتم برای انجام محاسبات هیدرولوژی و تبدیل ریزشهای جوی به هیدروگراف جریان از جمله مطالعات تکمیلی مهم در راستای توسعه مدل SDAR و تطبیق آن با نیازهای کاربردی به خصوص در شرایط عدم وجود داده های هیدرومتری (دبی سنجی) کلاسیک است.

۶- قدردانی

این تحقیقات با حمایت مالی معاونت محترم امور پژوهشی و پشتیبانی علمی وزارت نیرو انجام گرفته است. بدین وسیله نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از همکاری صمیمانه معاونت پژوهشی وزارت نیرو اعلام می دارد.

1. scour and deposition model of alluvial rivers (SDAR)
2. semi – two dimensional (S-2D)
3. stream tube
4. reachwise stream tube concept
5. gradually varied flow
6. backwater computation
7. standard step method
8. active and inactive layers
9. residual transport capacity
10. Armor layer
11. nonequilibrium sediment transport
12. quasi steady flow
13. Fnumber
14. stage discharge curve
15. Yang's Gravel & Sand Eq.
16. Laursen Eq.
17. Ackers-white Eq.
18. Engeland & Hansen Eq.
19. Myer – Peter & Muller Eq.
20. equilibrium transport
21. non equilibrium transport
22. bed stability factor (BSF)
23. Mississippi River
24. Zumbro River
25. upper San Diego River
26. The courant condition
27. the Thalweg line

مراجع

1. De Vries, M., "Applications of Physical and Mathematical Models for River Problems," *IHAR Symp.*, Bangkok, 1971.
2. Chow, V.T., "Open Channel hydraulics," Mc Graw Hill Book Co, 1988.
3. Yang, C.T., & et al., "GSTARS-2, Users Manual," U.S.A, 1994.
4. Bennet, J.P., and Nordin, C.F., "Simulation of Sediment Transport and Armoring," *Hydrological Sciences Bulletin*, XXII April, 1977.
5. Borah, D.K., Alonso, C.V., and Prasad, S.N., "Routing Graded Gravel Sediments in Streams: Formulations," *ASCE*, Vol. 105, No. Hy12, 1486 – 1503, 1982.
6. Jansen, P. Ph., "Principles of River Engineering," Pitman Pub. Co. England, 1983.
7. Yen, B. C., "Advances in Hydrosience Vol. 14, ch on Numerical Modeling of Unsteady Open Channel Flow," AP Press, New York, 1986.
8. Krishnappan, B.G., "In River Training Techniques," A.A. Balkema, Netherlands, 1981.
9. Yang, C. T., "Sediment transport," Mc Graw Hill Book Co., U. S.A, 1996.
10. HEC- 6, "Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs", Users Manual, U.S Corps of Engineers, 1991.
11. Yang, C.T. and et al, "Simulation and Prediction of River Morphological Changes Using GSTARS-2", The 3rd Int. Conf. on Hydro-Science and engineering, Berlin, Germany, 1998.
12. Johnson, B. E., and et al., "The Two Dimensional Upland Erosion model CASC 2D- SED", *Journal of the AWRA*, Vol. 36, No. 1, 31 – 42., Feb, 2000.
13. Gessler, J., "Beginning and Ceasing of Sediment Motion", *River Mechanics*, Vol. II, Fort Collins, Colorado, U.S.A, 1979.
14. Ardeshir, A., Tahershamsi, A., and Bahadori, F., "Prediction of Longitudinal Profile Evolution of Rivers Using Semi-Two Dimensional Mathematical Model SDAR", *Proc. of The 3rd Int. Symp. on Envi. Hyd. Tempe*, AZ, U. S.A, 2001.
15. Ardeshir, A., Bahadori, F., "Bed Variation Forecasting on Qomroud River. Iran," *Proc of ICETS 2000*, Beijing, China.
16. Chang, H.A., "FLUVIAL –12 Users Manual," U.S.A, 1996.
17. Ashida, K, and Michiue, M., "An Investigation of River Bed Degradation Downstream of a Dam Using Physical Model," *Proc. of the 3rd Cong. of the IAHR*, Vol. 3, 1961.
18. Yeou- Kong, T., and Jinn- Chang, Y., "Sensitivity and Uncertainty Analysis of Sediment Transport Model," *3rd Int. Symp on Environmental Hydraulics*, Tempe, AZ., U.S.A, 2001.