

بررسی تغییرات تراز در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای تحت تأثیر دو نقطه شکست متوالی

افشین فولادی سمنان¹، محمدرضا جعفرزاده^{2*}

1- کارشناس ارشد مهندسی عمران - مهندسی آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

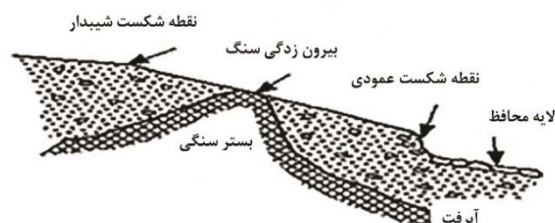
*jafarzad@um.ac.ir

چکیده - نقاط شکست به دلایل طبیعی و یا غیرطبیعی در بستر رودخانه‌ها به صورت پله‌های متوالی شکل می‌گیرند. در تحقیق حاضر مهاجرت دو نقطه شکست متوالی در بستر ماسه‌ای یک کانال مستطیلی با شیب ملایم به ازای دبی‌های مختلف، به‌طور آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. با شروع جریان دو نقطه شکست اولیه در مدت زمان کوتاهی ناپایدار شدند. نقطه شکست اول به سبب فرسایش و کف‌کنی به صورت یک موج تیز پسر و به بالادست و نقطه شکست دوم به سبب رسوبگذاری به صورت یک موج پیشرو به پایین دست کانال مهاجرت کردند. همراه با پسر و نقطه شکست اول، یک پشته‌ی کناری در پایین دست آن شکل گرفت که به بالادست کانال توسعه یافت. در پایین دست این پشته و قبل از نقطه شکست دوم، آبراهه پيچانی شد. در حد فاصل دو نقطه شکست، بستر کانال با شیب تندی گسترش پیدا کرد. افزایش دبی سبب افزایش نرخ حرکت دو نقطه شکست شد. بنابراین اثرات مهاجرت نقاط شکست تنها محدود به تغییرات تراز نشد، بلکه کانال را در پلان ناپایدار کرد. معادلات جریان و انتقال رسوب با نرم‌افزار HEC-RAS (V4.1.0) به ازای توابع مختلف انتقال رسوب حل شدند. در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی موجود، رابطه‌های انتقال رسوب لارسن و ایگز-وایت از دقت بهتری برای پیش‌بینی تغییرات تراز بستر برخوردار بودند.

کلید واژگان: نقطه شکست، فرسایش و رسوبگذاری، معادلات انتقال رسوب، HEC-RAS.

1- مقدمه

رودخانه‌ها همچون سایر پدیده‌های طبیعی میل به حفظ نظام پایدار خود دارند. بر این اساس هرگونه تغییر در هندسه هیدرولیکی رودخانه با پاسخ دینامیک آن برای برقراری مجدد تعادل همراه است. این پاسخ گاهی بسیار گسترده و غیر قابل کنترل است. کاهش تراز و فرسایش بستر رودخانه سبب تغییر شیب ناگهانی بستر و پیدایش نقاط شکست¹ می‌شود. نقطه شکست یک ناپیوستگی در شیب و تراز بستر کانال است (May, 1989) که به صورت



شکل 1 نقاط شکست شیب‌دار و عمودی (ژولین، 1387)

1. Knickpoints (Nickpoints)

نقاط شکست بستر رودخانه را ناپایدار می‌کنند. نظام رودخانه برای رسیدن به پایداری با روند کف‌کنی و فرسایش در بالادست و رسوب‌گذاری در پایین‌دست نقطه-شکست مواجه می‌شود. این فرایند که به معنای گسترش و مهاجرت نقطه شکست است، سبب وارد آمدن خسارت به سازه‌ها و زمین‌های اطراف می‌شود. حمل رسوبات، زیستگاه موجودات آبی را در معرض خطر قرار داده، به اکوسیستم رودخانه لطمه می‌زند.

در تحقیقات گذشته غالباً مکانیسم توسعه یک نقطه-شکست مطالعه شده است. (Brush and Wolman (1960 رفتار یک نقطه شکست را در بستری از مواد غیرچسبنده در آزمایشگاه بررسی کردند. در این آزمایش‌ها نقطه-شکست پسروی کرد، در نتیجه شیب کانال بالادست در ابتدا تند و عرض آن کم شد. در مقابل از شیب تند بستر در پایین‌دست نقطه شکست به تدریج کاسته شد. رسوبات انتقال یافته در پایین‌دست نقطه شکست به شکل تلماسه ته‌نشین شدند و کانال به طور موضعی عریض با شیب زیاد شد، اما پس از عبور تلماسه شیب کمتر شد.

(Holland and Pickup (1976 حرکت نقطه شکست را در محیط رسوبی لایه‌بندی شده و چسبنده در یک فلوام آزمایشگاهی مطالعه نمودند. دو لایه نازک ماسه‌ای در بین لایه‌های چسبنده قرار گرفت در نتیجه یک نقطه شکست پله‌ای بر بستر به وجود آمد که به بالادست حرکت می‌کرد. به علت حضور لایه خاکی ماسه‌ای از سرعت پسروی نقطه شکست شیب کاسته شد. (May (1989 عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری و مهاجرت نقطه شکست را در محیط لایه‌بندی شده بررسی کرد. تخریب پیشانی منطقه شکست متأثر از مشخصه‌های زمین شناسی، سرعت فرسایشی آب و فشار در زیر جریان ریزشی قرار داشت. (Crosby (2001 با استفاده از مطالعات میدانی یک مدل پخشیدگی غیر خطی را برای مهاجرت یک نقطه شکست ارائه کرد. (Simon and Darby (2002 اثر سازه‌های کنترل شیب و فاصله بین سازه‌ها و مکان و زمان نصب آن‌ها را بر کنترل فرسایش بستر ناشی از مهاجرت نقطه شکست بررسی نمودند. (Bhalla mudi and Chaudhry (1991 افزایش و کاهش تراز و از جمله حرکت نقطه شکست در

رودخانه‌های آبرفتی را با استفاده از الگوی عددی مک کورمک¹ بررسی کردند. کوهستانی و جعفرزاده (1384) مهاجرت یک نقطه شکست را با همان الگوی عددی بر اساس معادلات مختلف انتقال رسوب ارزیابی کردند و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه نمودند. Biggi et al. (2006) تأثیر مهاجرت نقطه شکست را بر ناپایداری شیب جانبی بدنه کانال به طور آزمایشگاهی بررسی کردند. مقدار زمین لغزش و موقعیت نقطه شکست در طی زمان تحت شرایط نیروی دائمی اندازه‌گیری شد و رابطه آماری معنی‌داری بدست آمد.

(Logget and Driessche (2009 سرعت توسعه نقطه شکست شیب در حوزه‌های آبریز بزرگ 10^3 تا 10^6 کیلومترمربع را وابسته به جذر مساحت حوزه، ساختار سنگی منطقه و مقدار افت تراز مبنای رودخانه می‌دانند و در این رابطه افت تراز دریای مدیترانه در عصر مسینین² در انتهای دوره میوسن³ را بررسی کردند.

(Cantelli and Muto (2014 تأثیر یک پایین افتادگی ناگهانی در تراز مبنای رودخانه را در شکل‌گیری نقاط شکستی که به بالادست مهاجرت می‌کنند، به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. کانال ماسه‌ای آن‌ها با $D_{50}=0.2$ mm به طول 4 متر، عرض بسیار کم 0/02 متر و با شیب 20% بود. علت عرض کم کانال حذف تأثیر پیچ‌وخم بر روند مهاجرت نقطه شکست بود. افت ناگهانی تراز مبنای، نقاط شکست متعددی بصورت پله‌های متوالی در بستر کانال ایجاد کرد که همگی به بالادست مهاجرت کرده در بالا و پایین‌دست هر کدام پرش هیدرولیکی اتفاق افتاد.

(Grimaud et al. (2016 نیمرخ رودخانه و نقطه شکست را در میکروکانالی با بستر مواد چسبنده حاوی سیلیس و کائولینیت به طول 1 متر، عرض بسیار کم 0/019 متر و با شیب 20% مطالعه کردند و ملاحظه شد که در نرخ ثابت پایین افتادگی تراز مبنای، نقاط شکست با شکل‌های مشابه تولید می‌شود. به علاوه سرعت پسروی، شیب پیشانی و عمق حوضچه ریزش پایین‌دست نقطه شکست به شدت به ساختار سنگی بستر بستگی دارد.

1. McCormack scheme

2. Messinian Age

3. Miocene Epoch

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\beta Q^2}{A} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S) = 0 \quad (2)$$

که در آن Q دبی جریان، A سطح مقطع، β ضریب توزیع سرعت، h عمق جریان، R شعاع هیدرولیکی، S شیب بستر، $S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$ شیب اصطکاکی خط انرژی و n ضریب زبری مانینگ است.

در کانال‌های فرسایش‌پذیر معادله پیوستگی رسوب به صورت رابطه (3) نوشته می‌شود (شفاعی بجنستان، 1387):

$$W \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-p_0)} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

که در آن W عرض کانال، Z تراز بستر، Q_s دبی رسوب و p_0 درصد تخلخل است. حل معادله‌ی (3) منوط به مشخص بودن معادله‌ی انتقال رسوب می‌باشد.

برای شبیه‌سازی مهاجرت و گسترش نقاط شکست، معادلات انتقال رسوب و جریان باید به طور عددی حل شوند. نرم‌افزارهای متعددی برای حل عددی جریان آب و رسوب در رودخانه ارایه شده است. در آخرین نگرش ارتش آمریکا¹ توسعه یافته است، علاوه بر قابلیت‌های قبلی، تغییرات نیمرخ طولی بستر رودخانه در اثر رسوب-گذاری و فرسایش برای دوره‌های طولانی‌مدت شبیه‌سازی می‌شود (Brunner, 2010). در این نرم‌افزار، سری پیوسته جریان ناماندگار به قطعات جریان ماندگار دبی در دوره زمانی خاص تقسیم می‌شود. برای هر یک از قطعات، نیمرخ سطح آب محاسبه می‌گردد و با استفاده از آن، سرعت، شیب انرژی، عمق و سایر پارامترها از جمله نرخ انتقال رسوب در هر یک از مقاطع عرضی به‌دست می‌آیند. تابع انتقال رسوب نشان دهنده میزان رسوب انتقالی از هر مقطع در طول زمان است. با استفاده از این تابع میزان رسوب‌گذاری و یا فرسایش در هر یک از مقاطع محاسبه می‌شود و سپس تغییرات حاصل در مقاطع هندسی برای بازه زمانی بعدی تکرار می‌گردد.

3- وسایل و تجهیزات آزمایشگاه

آزمایش‌ها در فلومی به طول 12 متر، عرض 30 و ارتفاع

سالهاست که رودخانه سومبار واقع در مرز ایران و ترکمنستان به علت عدم حفاظت ساحل، مسیر قراردادی خود در سال 1336 را ترک کرده است؛ در نتیجه باعث تخریب اراضی کشاورزی روستاییان در مرز شده و خساراتی به بار آورده است. اصلاح مسیر و برگرداندن رودخانه به موقعیت قراردادی، در اواسط دهه 1370 در دستور کار کمیته رودخانه‌های مرزی کشور قرار گرفت و چند سال بعد عملی شد. اما به علت کوتاه‌تر شدن مسیر و در نتیجه تند شدن شیب، تغییر انحنای خم‌ها و بعضاً حذف آن‌ها، بستر اصلاح شده شروع به فرسایش کرد و نقاط شکست متعددی در مسیر ایجاد شد. ریچاردسون و همکاران نیز به امکان ایجاد چنین مشکلی در اثر اصلاح مسیر رودخانه اشاره کرده‌اند (Richardson et al., 2001). در پژوهش‌های قبلی، بیشتر پسروری یک نقطه شکست در آزمایشگاه مطالعه شده است و در چند پژوهش معدود اخیر که توسعه نقاط شکست متوالی بررسی شده، نیز برای حذف عارضه پیچانی شدن، عرض کانال آزمایشگاهی بطور غیر طبیعی بسیار کم انتخاب شده است. از آنجا که به هر حال گریز از پدیده پیچانی شدن در عمل ممکن نیست، در پژوهش حاضر توسعه دو نقطه شکست متوالی در یک کانال مستطیلی در آزمایشگاه مطالعه گردید تا اثر متقابل نقاط شکست بر یکدیگر مشخص شود. آن‌گاه رفتار دو نقطه شکست با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS مدل شد تا با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی اولاً قابلیت‌های مدل عددی و ثانیاً دقت روابط انتقال رسوب ارزیابی شود. همچنین در حالت‌هایی که انجام آزمایش میسر نیست، مهاجرت دو نقطه شکست به صورت عددی مطالعه گردد.

2- معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان و رسوب

معادلات پیوستگی و اندازه حرکت (معادلات سنت و نانت)، حاکم بر دینامیک جریان‌های یک‌بعدی می‌باشد (Cunge et al., 1980):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

1. US Army Corps of Engineers (USACE)

برشی بحرانی کانال در آستانه‌ی حرکت N/m^2 $\tau_0 = 0/465$ بدست آمد. شیب کانال در بالا و پایین دست نقطه شکست 0/003 و در نقطه شکست برابر 0/1 انتخاب شد. تنش برشی بستر در آزمایش‌های مختلف در جدول 1 داده شده است. از آنجا که در تمام آزمایش‌ها تنش برشی تنها در نقاط شکست بیشتر از تنش برشی بحرانی است، هیچگونه فرسایشی جز در نقاط مذکور در کانال اتفاق نمی‌افتد.

به طور کلی در تغییر تراز رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای عدد فرود جریان (Fr)، عدد رینولدز جریان (Re) و پارامتر شیلدز (τ_*) از مهمترین پارامترهای بی بعد مؤثر هستند (ژولین، 1387). پارامتر شیلدز از رابطه (4) تعریف می‌شود (شفاعی بجستان، 1387):

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)D_s} \quad (4)$$

که در آن τ_0 تنش برشی بستر کانال، γ وزن مخصوص آب، γ_s وزن مخصوص ذرات رسوب و D_s قطر ذرات رسوبی است.

در جدول 1 مقادیر پارامترهای بی بعد مذکور قبل از نقطه شکست شیب و در محل آن، در آغاز آزمایش‌ها درج شده است. در دو آزمایش اول و دوم جریان انتقالی شده است. در آزمایش سوم جریان مغشوش ($500 < Re < 2000$) و در آزمایش‌هایی که جریان انتقالی برقرار بود احتمال تأثیر نیروهای لزوجت بر نتایج آزمایشگاهی وجود داشت. در کانال‌های بالا و پایین دست، جریان زیر بحرانی ($Fr < 1$) و در موقعیت نقاط شکست جریان فوق بحرانی ($Fr > 1$) بود. مشابه این وضعیت جریان پیش از این در آزمایش‌های (Brush and Wolman, 1960) و (Cantelli and Muto, 2014) گزارش شده است.

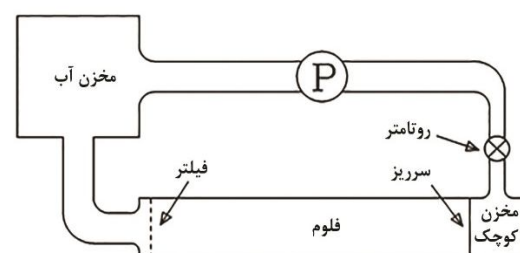
اگر ρ چگالی آب و σ کشش سطحی باشد، حد پایین عدد وبر $^2 (We = \frac{\rho V^2 h_0}{\sigma})$ برای صرف نظر کردن از اثرات کشش سطحی در ادبیات موضوع نسبتاً وسیع و در محدوده 10 تا 100 تعریف شده است (Peakall and Warburton, 1996).

40 سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. دیوارهای فلوم شیشه‌ای و کف آن فلزی بود که با چندین پایه فلزی شیب آن تنظیم می‌شد. شکل 2 نحوه قرارگیری فلوم و متعلقات آن را نشان می‌دهد. آب از مخزن اصلی توسط پمپی با حداکثر دبی 50 لیتر بر دقیقه (0/83 لیتر بر ثانیه) به مخزن کوچکی واقع در بالادست فلوم پمپاژ می‌شد. دبی جریان با روتامتر¹ قابل اندازه‌گیری بود. در ابتدای کانال، از یک مخزن کوچک برای آرام کردن جریان و حذف اثرات اغتشاشی ناشی از ریزش آب استفاده شد. آب در انتهای فلوم از فیلتر عبور کرده و به مخزن اصلی باز می‌گشت.

بستر کانال از ماسه با دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت با قطر میانه (D_{50}) برابر 0/95 میلی‌متر و چگالی نسبی (G_s) 2/54 ساخته شد. بدنه‌ی کانال نیز با ذرات ماسه پوشش داده شد تا زبری (n) بستر و بدنه یکسان و برابر 0/013 شود. طول بستر ماسه‌ای به 11 متر و عرض آن به 29/5 سانتی‌متر محدود شد. درجه حرارت آب مصرفی در کانال همواره بین 20 تا 25 درجه سانتی‌گراد بود.

4- آماده‌سازی کانال و شرایط اولیه آزمایش

آزمایش‌ها با عنایت به مشخص بودن قطر میانه ذرات (D_{50}) و عرض کانال (W)، برای سه دبی متفاوت انجام شد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی هر آزمایش در شروع اجرای آن در جدول 1 ارائه شده است.



شکل 2 طرح فلوم و متعلقات کانال آزمایشگاه

براساس معیار شیلدز (شفاعی بجستان، 1387)، تنش

جدول 1 شرایط اولیه آزمایش‌ها

شماره آزمایش	مکان اندازه‌گیری	شیب بستر S (mm)	عرض بستر W (m)	دبی جریان Q (l/s)	سرعت متوسط جریان V (m/s)	عمق نرمال h_0 (m)	تنش برشی بستر τ_0 (N/m ²)	عدد رینولدز Re	عدد فرود Fr	پارامتر شیلدز τ_*
1	در بالا و پایین دست نقطه شکست	0/003	0/295	0/44	0/167	0/009	0/236	1343	0/577	0/017
	در نقطه شکست	0/1			0/489	0/0030	2/854	1426	2/86	0/199
2	در بالا و پایین دست نقطه شکست	0/003	0/295	0/56	0/183	0/010	0/272	1700	0/588	0/019
	در نقطه شکست	0/1			0/540	0/0035	3/307	1823	2/93	0/231
3	در بالا و پایین دست نقطه شکست	0/003	0/295	0/68	0/198	0/011	0/305	2053	0/597	0/021
	در نقطه شکست	0/1			0/584	0/0039	3/722	2220	2/99	0/260

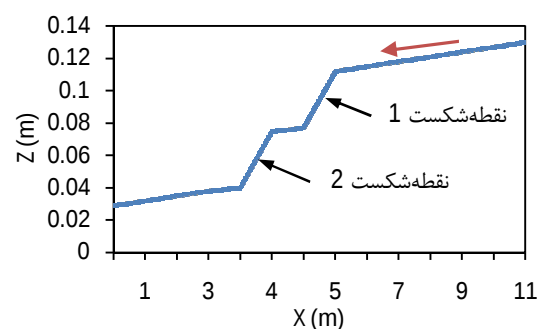
آزمایش به علت محدود بودن طول کانال و ساعات کاری آزمایشگاه مقصور نبود.

در لحظات آغازین، پیش از رسیدن جریان به نقاط شکست، بستر کانال پایدار ماند و هیچ گونه فرسایشی مشاهده نشد. با رسیدن جریان آب به نقطه شکست اول، بستر کانال فرسایش یافت و پدیده کف‌کنی آغاز گشت. با فرسایش بستر، رسوبات زیادی به پایین دست حمل شد. کف‌کنی در بالادست و حمل رسوبات به پایین دست نقطه شکست 2 به سرعت رخ داد. در فاصله بین دو نقطه شکست 1 و 2، هر دو پدیده رسوب‌گذاری و رسوب‌برداری در مدت کوتاهی مشاهده شد. بدین معنا که رسوبات حمل شده از بالادست با کاهش ناگهانی شیب در پایین دست نقطه شکست 1، به سرعت ته‌نشین شدند، ولی در ادامه فرسایش یافته و به پایین دست نقطه شکست 2 حرکت کردند. در نتیجه فاصله بین دو نقطه شکست به سرعت شیب‌دار شد. مهاجرت نقطه شکست 1 به بالادست سبب فرسایش بستر¹، بریدگی کف² و افزایش بار رسوبی (Q_s) در کانال شد. همراه با افزایش بار رسوبی، شیب بستر (S) در بالادست افزایش یافت و عرض آبراهه (W) نیز کم شد. این فرایند با یک رابطه کیفی نشان داده می‌شود (ژولین، 1387):

$$Q_s^+ \propto W^- h^- S^+ \tau_*^+ V^+ \quad (5)$$

که در آن h و V به ترتیب عمق و سرعت جریان و τ_*

بر اساس محاسبات انجام شده عدد وبر در کانال‌های بالا و پایین دست نقطه شکست کمتر از 10 و در محدوده نقطه-شکست بین 10 تا 20 در تغییر بود، بنابراین در آغاز آزمایش‌ها اثر کشش سطحی حداقل در کانال‌های بالا و پایین دست نقطه شکست وجود داشت. در شکل 3، موقعیت دو نقطه شکست متوالی به طول 0/35 متر و ارتفاع 3/5 سانتی‌متر (شیب ده درصد) در فواصل 4 و 5 متری از انتهای کانال نشان داده شده است. در تمامی آزمایش‌ها، مشخصات فیزیکی کانال از قبیل موقعیت نقاط شکست، شیب و تراز بستر در راستای طولی و عرضی در ابتدای آزمایش یکسان بود، تا نتایج نهایی قابل قیاس باشند. در هر آزمایش تنها اثر مهاجرت نقاط شکست مطالعه گردید.



شکل 3 نیم‌رخ طولی بستر اولیه کانال پیش از هر آزمایش

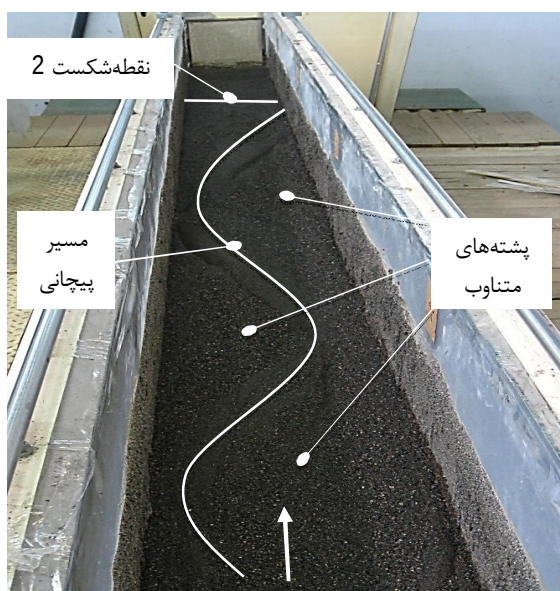
5- اجرای آزمایش

هر آزمایش به مدت 5 ساعت انجام شد. افزایش زمان

1. Erosion
2. Channel Incision

پارامتر شیلدز است. بالانویس مثبت یا منفی اشاره به افزایش یا کاهش متغیر مربوط دارد. کاهش عرض آبراهه سبب ایجاد یک پشته کناری شد (شکل 4- الف). پشته در کناره راست یا چپ کانال، آبراهه را به سمت چپ یا راست کانال متمایل کرد. همراه با مهاجرت نقطه شکست 1 به بالادست، عرض و طول پشته کناری افزایش یافت. این پشته همواره بالاتر از سطح آب قرار داشت. با فرسایش بستر در بالادست، حجم ته‌نشینی رسوبات در پایین‌دست پشته کناری افزایش یافت. توده رسوبات ته‌نشین شده، ابتدا به شکل پشته‌های میانی پدید آمدند، ولی پس از مدتی به زیر آب رفته و محو شدند. در ساعات پایانی آزمایش در پایین‌دست پشته کناری، پشته‌های متناوبی در کناره‌های راست و چپ کانال به وجود آمد که سبب شد آبراهه در پایین‌دست پیچانی گردد (شکل 4- ب). در حقیقت وجود نقاط شکست علاوه بر افزایش و کاهش تراز بستر، به پیچانی شدن آبراهه سرعت بخشیدند. پشته‌های متناوب هیچ‌گاه بالاتر از سطح آب قرار نگرفتند. محدودیت عرض کانال و کاهش بار رسوبی، مانع پیچانی شدن بیشتر آبراهه شد. به عنوان نمونه در شکل 5- الف، تغییرات تراز نیمرخ

طولی بستر آبراهه در آزمایش سوم در 45 دقیقه اول و در شکل 5- ب، تا پایان آزمایش، در امتداد خط القعر جریان ترسیم شده است. قسمت اعظم تغییرات در همان دقایق شروع آزمایش اتفاق افتاده است. فرسایش بستر پیش از نقطه شکست 1، باعث گسترش و پشروی آن به بالادست شده است، به گونه‌ای که در انتهای آزمایش منطقه شکستی با شیب تند، اما ملایم‌تر از نقطه شکست اولیه در ابتدای کانال با پایین افتادگی بیش از هفتاد درصد تا فاصله قابل توجهی دیده می‌شود. به‌طور هم‌زمان رسوب‌گذاری پس از نقطه شکست 2، موجب افزایش تراز بستر تا مسافت زیاد و پیشروی نقطه شکست مذکور به پایین‌دست شده است. شیب انتهایی نقطه شکست در موقعیت جدید بسیار تند و مشابه شیب اولیه آن می‌باشد. در حد فاصل دو نقطه شکست اولیه شیب بستر افزایش یافته است، اما تغییرات تراز زیادی مشاهده نمی‌شود. نرخ رسوب‌گذاری و کف‌کنی با گذشت زمان، به تدریج کاهش می‌یابد. در شکل 6، بستر کانال پیش از اجرای هر آزمایش با منحنی توپوگرافی و شکل سه‌بعدی ترسیم شده است.



(ب)



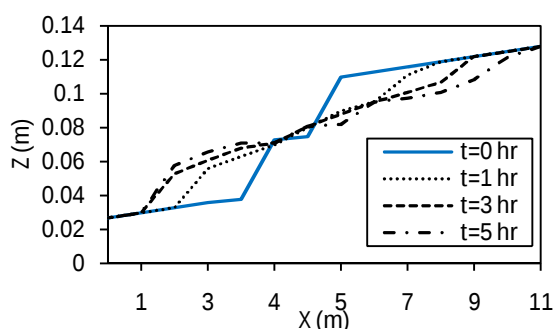
(الف)

شکل 4 الف- توسعه پشته کناری در پایین‌دست نقطه شکست اول (ساعت سوم آزمایش شماره 1)
ب- توسعه پشته‌های متناوب در پایین‌دست پشته کناری و بالادست نقطه شکست دوم (پایان آزمایش شماره 1)

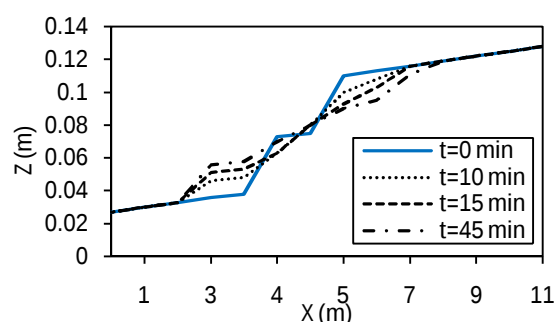
کناری و متناوب باعث پیچانرودی شدن آبراهه شده است. محدودیت عرض فلوم از گسترش بیشتر آبراهه پیچانی جلوگیری کرده است.

در شکل 8، نیمرخ طولی بستر کانال به ازای دبی‌های مختلف در پایان هر سه آزمایش ترسیم شده است.

در شکل 7، بستر کانال پس از پایان آزمایش سوم ($1/s$) با منحنی توپوگرافی و شکل سه‌بعدی ترسیم شده است. افزایش دبی، بریدگی بستر بالادست را عریض و طولیل نموده و سبب تجمع بیشتر رسوبات در پایین‌دست کانال شده است. عوارض بستر و شکل‌گیری پشته‌های

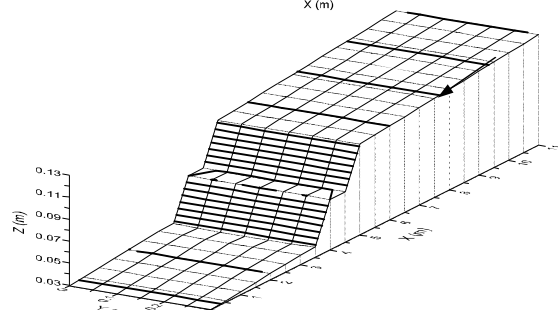
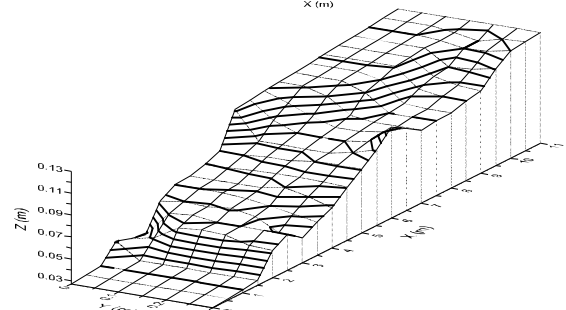
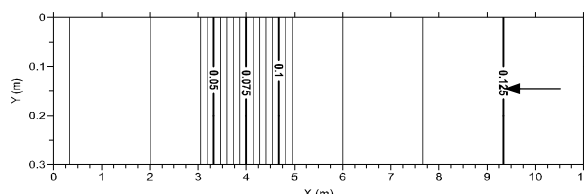
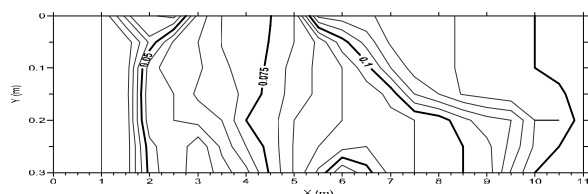


ب- ساعت اول تا پنجم



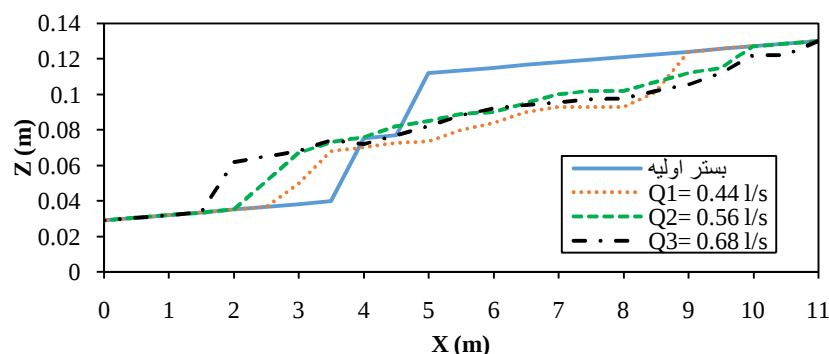
الف- در ساعت اول

شکل 5 تغییرات نیمرخ طولی کانال با زمان (آزمایش شماره 3).



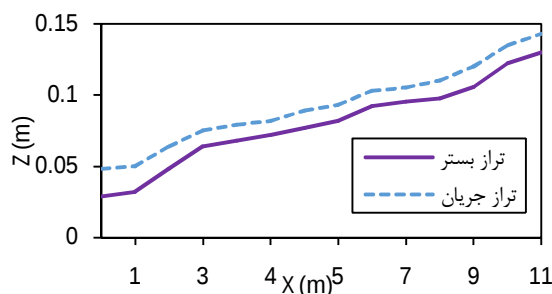
شکل 7 عوارض بستر کانال پس از آزمایش شماره 3
($Q_3 = 0/68 \text{ l/s}$)

شکل 6 عوارض بستر کانال پیش از هر آزمایش



شکل 8 نیمرخ طولی کانال برای دبی‌های مختلف در پایان هر سه آزمایش

در شکل 10 نیمرخ طولی بستر و تراز آب در پایان آزمایش سوم در امتداد خط القعر کانال ترسیم شده است. پروفیل سطح آب از تغییرات بستر تبعیت میکند.



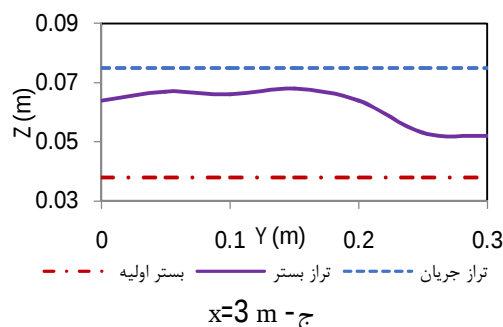
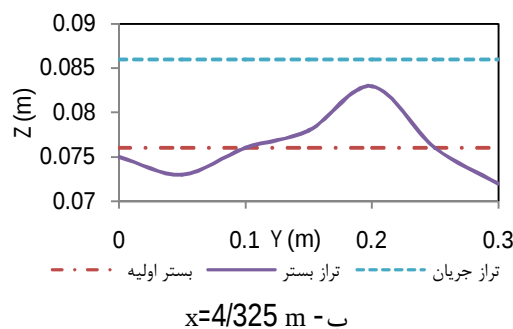
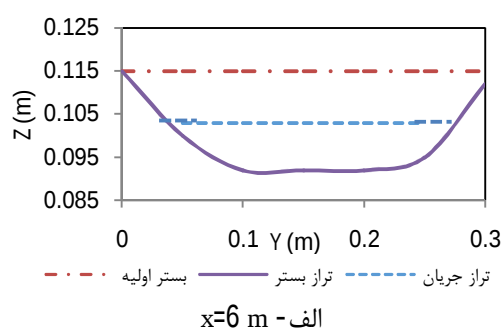
شکل 10 نیمرخ طولی بستر و تراز جریان در پایان آزمایش شماره 3

6- شبیه‌سازی عددی و ارزیابی توابع انتقال

رسوب

نرم‌افزار HEC-RAS از توابع انتقال رسوب متعددی برای محاسبه تغییرات تراز بستر بهره می‌برد. در تحقیق حاضر تغییرات بستر به مدت پنج ساعت با استفاده از شش تابع انتقال رسوب ایکرز- وایت¹، انگلوند-هانسن²، لارسن³، مایر- پیتر و مولر⁴، توفالیتی⁵ و یانگ⁶ مطالعه شد (شفاعی بجستان، 1387). دبی جریان ورودی ثابت است. بنابراین در ابتدا معادلات هیدرودینامیک پیوستگی و اندازه حرکت در حالت جریان پایدار با فرض بستر صلب حل می‌شود و عمق و سرعت جریان در طول کانال به دست می‌آید. آنگاه تغییرات تراز بستر از حل معادله (3) یعنی معادله اکسیر⁷، به دست می‌آید. نرم‌افزار HEC-RAS v.4.1 مشابه نرم‌افزار HEC-6 با استفاده از یک مدل حجم محدود صریح معادله اکسیر را حل می‌کند. تحلیل پایداری مدل عددی در حالت خطی منجر به ارضای شرط کورانت $c \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$ میشود. سرعت موج بستر، c ، گام زمانی Δt و گام مکانی Δx گام مکانی است. در عمل معادله اکسیر شدیداً غیرخطی است و سرعت موج

افزایش دبی، سبب افزایش کف‌کنی و پسروی نقطه شکست 1 به بالادست و افزایش رسوب‌گذاری و پیشروی نقطه شکست 2 به پایین دست می‌شود. تراز بستر در پایان آزمایش اول ($Q_1 = 0.44 \text{ l/s}$)، به علت کف‌کنی و رسوب-گذاری کم‌تر، نسبت به دو آزمایش دیگر پایین‌تر است. در همین آزمایش، شیب نقطه شکست بالادست تندتر و شیب نقطه شکست پایین دست ملایم‌تر از دو آزمایش دیگر است. در شکل‌های 9 مقاطع عرضی کانال در پایان آزمایش سوم، در یک متری بالادست نقطه شکست اول ($x=6$)، در میانه‌ی دو نقطه شکست ($x=4/325$) و یک متری پایین دست نقطه شکست دوم ($x=3$) ترسیم شده است. تغییرات بستر در هر سه مقطع به وضوح نشان دهنده‌ی ماهیت سه بعدی جریان می‌باشد.



شکل 9 مقاطع عرضی جریان و بستر کانال در پایان آزمایش شماره 3

1. Ackers-White
2. Engelund-Hansen
3. Laursen
4. Meyer- Peter and Müller
5. Toffaleti
6. Yang
7. Exner

داده‌های محاسباتی و مشاهداتی به یکدیگر نزدیک هستند از روش تعیین خطای نسبی (RE) استفاده می‌گردد تا مقدار خطا برای هر رابطه انتقال رسوب به صورت نسبی بدست آید. خطای نسبی مشاهده به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود (بوینگتن، 1366):

$$RE_i = \frac{(Xc)_i - (Xo)_i}{(Xo)_i} \times 100 \quad (6)$$

$(Xo)_i$ ، مقدار مشاهداتی i ام از عامل x و $(Xc)_i$ ، مقدار محاسباتی و RE_i خطای نسبی بر حسب درصد می‌باشد. برای تحلیل نتایج یک گروه از داده‌های آزمایشگاهی، دو عامل خطای نسبی (RE) و میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی ($MARE$) محاسبه شدند. میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی توسط رابطه (7) تعریف می‌شود:

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^N |RE_i|}{N} \quad (7)$$

N ، تعداد مشاهدات و $MARE$ میانگین قدر مطلق خطاهای نسبی است. این مقادیر در جدول 2 برای روابط مختلف انتقال رسوب محاسبه شده است و مبنای مناسبی برای مقایسه توابع مختلف می‌باشد.

با توجه به شکل‌های 11 و جدول 2، توابع لارسن و ایکرز- وایت، نسبت به سایر توابع بهترین و کم خطاترین نتایج را بدست می‌دهد. توابع یانگ و انگلوند-هانسن در مرتبه‌ی بعدی و توابع توفالتی و مایر-پیتر و مولر در مرتبه‌ی آخر دقت قرار می‌گیرد. در تمامی توابع، افزایش دبی میزان خطا را افزایش می‌دهد.

به عنوان نمونه در شکل 12، نتایج عددی تراز بستر (Z) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای دو تابع لارسن و توفالتی ترسیم شده است. انطباق با خط 45 درجه نشانه سازگاری کامل نتایج است.

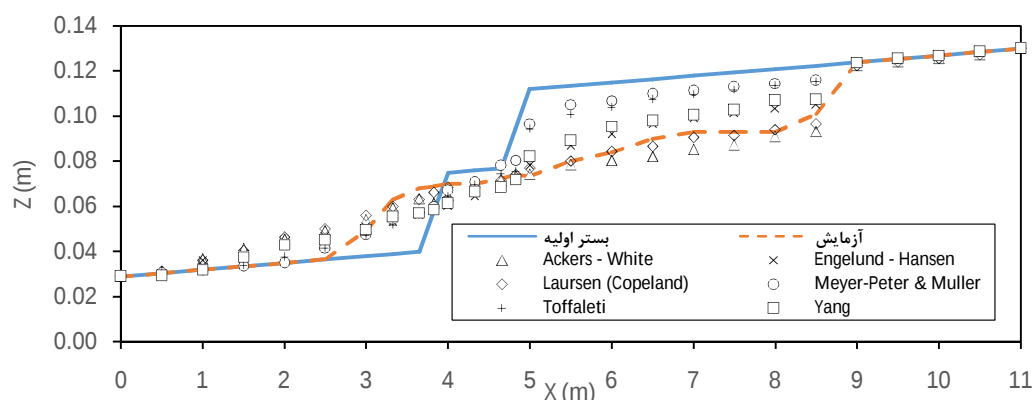
جدول 2 مقادیر میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی ($MARE$) برای ارزیابی مدل (درصد)

شماره آزمایش	لارسن	ایکز- وایت	یانگ	انگلوند-هانسن	توفالتی	مایر-پیتر و مولر
1	3/28	3/36	7/05	7/02	12/12	14/27
2	6/08	6/96	10/85	10/55	13/09	14/60
3	6/58	6/73	9/03	9/75	13/79	14/77

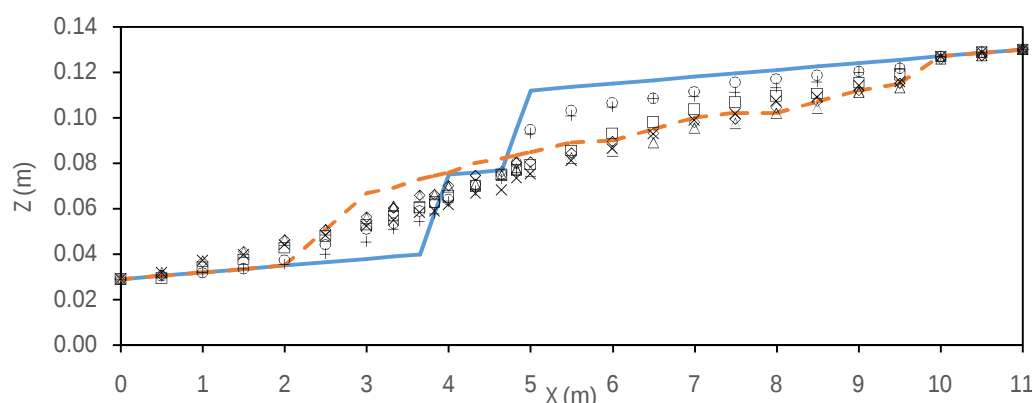
بستر به معادله انتقال رسوب بستگی پیدا می‌کند. توسعه عددی امواج تیز در مجاورت پایین افتادگی‌های ناگهانی بستر نظیر نقاط شکست شیب نوسانات عددی¹ تولید می‌کند. بنابراین معیار محاسبات گام زمانی علاوه بر ارضای شرط پایداری کورانت، کوچک کردن گام زمانی تا حدی است که این نوسانات ناخواسته به اندازه کافی میرا شوند. عمده تغییرات تراز بستر در ساعت اول آزمایش بیشتر از بقیه ساعات بود؛ بنابراین در مدل‌سازی، گام زمانی محاسباتی 0/0001 ساعت برای ساعت اول و پنج برابر آن برای ساعت‌های دوم تا پنجم در نظر گرفته شد تا دقت محاسبات عددی بالا رود. این گام زمانی برای آزمایش 24 ساعته تا ساعت پنجم عیناً مشابه آزمایش 5 ساعته است، ولی از ساعت ششم تا پایان 24 ساعت گام زمانی برابر 0/001 ساعت در نظر گرفته شده است تا از تکرار بی دلیل محاسبات عددی جلوگیری شود. برای آزمایش عددی 120 ساعته از ابتدا تا انتها این گام زمانی برابر 0/001 ساعت فرض گردید. فاصله بین مقاطع در خارج از نقاط شکست نیم متر و در محدوده نقاط شکست برابر 5 سانتی‌متر فرض شد.

در شکل‌های 11، نتایج عددی تغییرات تراز بستر در برابر نتایج آزمایشگاهی پس از 5 ساعت، ترسیم شده است. تغییرات بستر با استفاده از رابطه‌های لارسن و ایکرز- وایت واقع بینانه به‌نظر می‌رسد. موقعیت و پشروی نقطه شکست 1 (به استثنای آزمایش اول) به خوبی تخمین زده شده است، اما موقعیت و پیشروی لبه تیز نقطه شکست 2 دقت لازم را در نتایج عددی آزمایش‌های دوم و سوم ندارد. رابطه‌های مایر-پیتر و مولر و توفالتی، فرسایش و رسوب‌گذاری را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کنند. علت عدم هماهنگی نتایج عددی و آزمایشگاهی، علاوه بر تابع انتقال رسوب، سه بعدی بودن جریان و عدم توانایی مدل عددی یک‌بعدی در شبیه‌سازی پیشانی امواج تیز بستر است. شکل‌گیری پشته‌های کناری و متناوب در حد فاصل دو موج پشرو و پیشرو نیز از جمله مسائلی است که مدل عددی موجود قادر به پیش‌بینی آن نمی‌باشد. برای ارزیابی کمی توابع انتقال رسوب در مواردی که

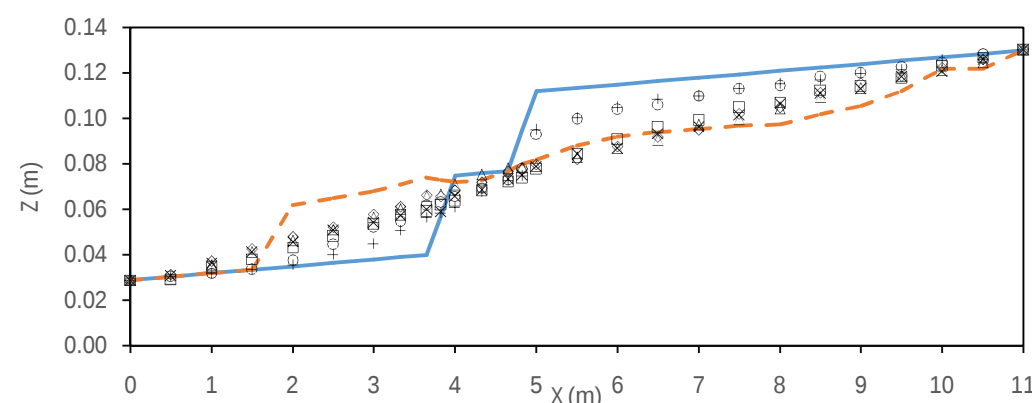
1. Wiggles



شکل 11- الف نتایج شبیه‌سازی عددی با توابع مختلف انتقال رسوب در آزمایش شماره 1 با مدل HEC-RAS



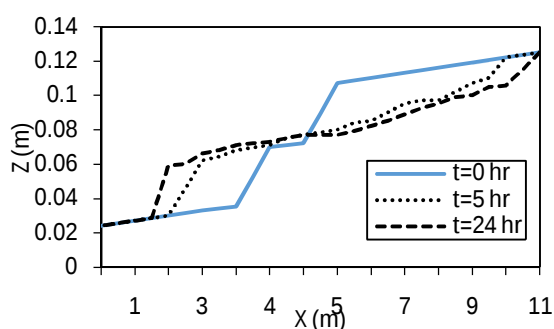
شکل 11- ب نتایج شبیه‌سازی عددی با توابع مختلف انتقال رسوب در آزمایش شماره 2 با مدل HEC-RAS



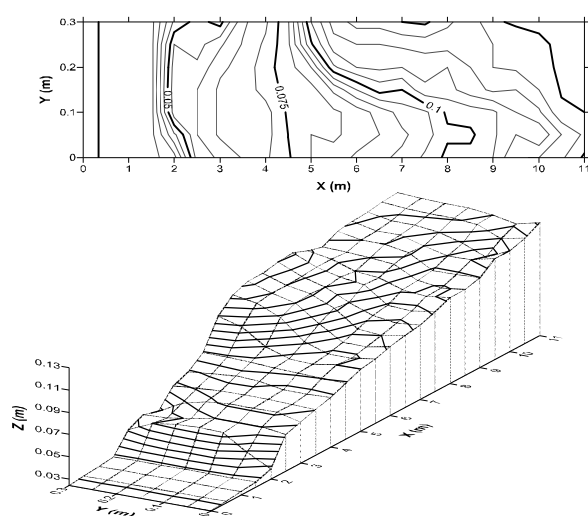
شکل 11- ج نتایج شبیه‌سازی عددی با توابع مختلف انتقال رسوب در آزمایش شماره 3 با مدل HEC-RAS

بهتری نسبت به رابطه مایر- پیتر و مولر می‌دهند که برای رودخانه‌های شنی با بستر درشت دانه ارائه شده است. رابطه توفالیتی فرضیات متعددی در عمق جریان دارد و به داده‌های ورودی حساس است و احتمالاً به این دلیل پاسخ خوبی نداده است. انجمن مهندسين عمران آمریکا نیز در یک بررسی مقایسه‌ای، روابط انتقال رسوب را با 40 داده میدانی از رودخانه‌های سراسر آمریکا و 225 داده

هر کدام از روابط انتقال رسوب تحت شرایط خاص به‌دست آمده‌اند که شاید با شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر با شیب نسبتاً تند بستر در موقعیت نقطه شکست و جریان فوق بحرانی در آن متفاوت باشند، بنابراین پذیرش خطا در محاسبات انتقال رسوب طبیعی است. از طرف دیگر چهار رابطه انتقال رسوب ایکرز- وایت، انگلوند- هانسن، لارسن، و یانگ برای بسترهای ماسه‌ای داده شده‌اند و نتایج



شکل 13 نیمرخ طولی کانال برای زمان‌های مختلف در آزمایش شماره 2 ($Q_2 = 0.56 \text{ l/s}$)



شکل 14 عوارض بستر کانال پس از ادامه آزمایش شماره 2 ($Q_2 = 0.56 \text{ l/s}$) تا 24 ساعت

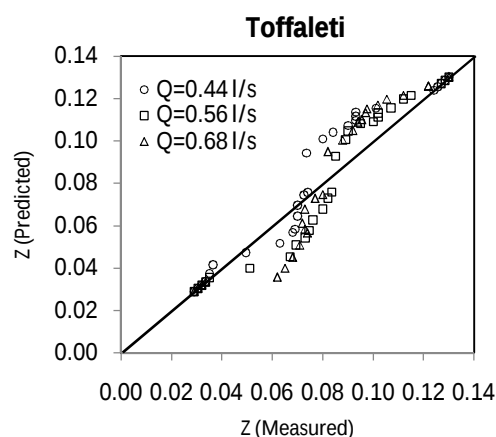
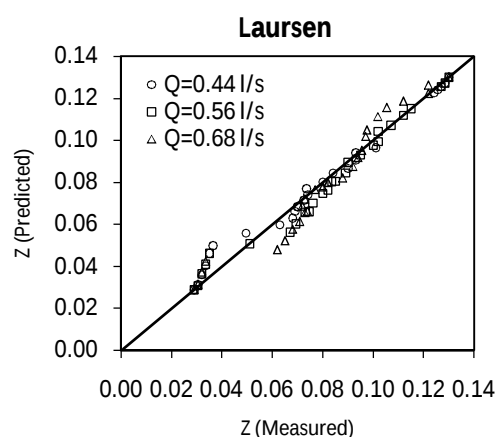
در پایان بیست و چهار ساعت، نقطه شکست 1 به ابتدای کانال رسیده است و نقطه شکست 2 تقریباً تا انتهای کانال با لبه‌ی تیز پیشروی کرده است. در فاصله دو نقطه شکست اخیر، شیب بستر کانال نسبتاً تند و بسیار بیشتر از شیب اولیه است.

آزمایش دوم در پایان بیست و چهار ساعت با نرم‌افزار HEC-RAS و سه تابع انتقال رسوب، لارسن، ایکرز- وایت و یانگ مدل گردید. نتایج در شکل 15 ترسیم شده است. شیب نقطه شکست بالادست به طور نسبی شبیه‌سازی شده است، اما لبه تیز نقطه شکست پایین‌دست در مدل عددی کاملاً پخش شده است. هر سه تابع انتقال رسوب نتایج مشابهی بدست می‌دهند.

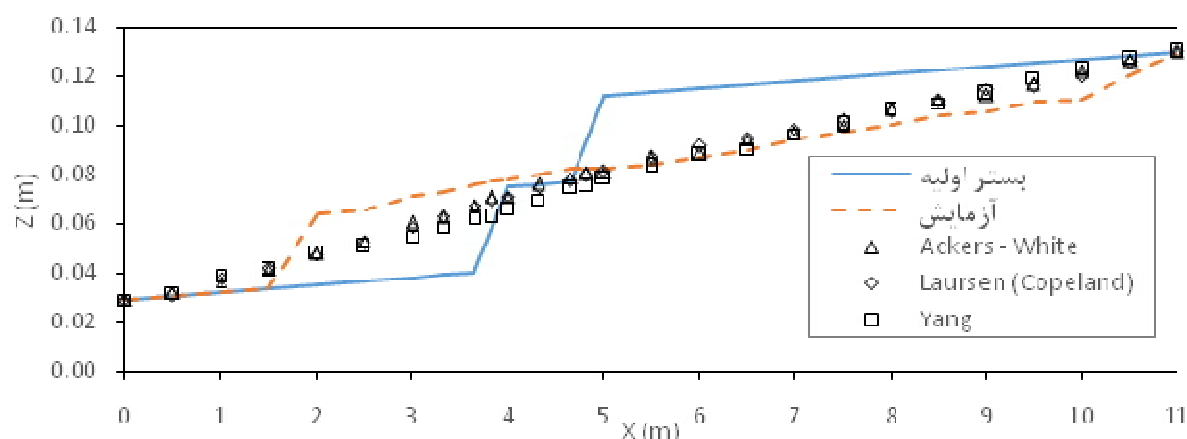
آزمایشگاهی که بر روی طیف وسیعی از ذرات درشت تا ریز بود، تطبیق داده و رتبه‌بندی کردند. در این ارزیابی روابط یانگ، لارسن و ایکرز- وایت به ترتیب در رتبه‌های یک تا سه و رابطه مایر-پیتر و مولر در رتبه‌های آخر قرار داشت (ASCE, 1982).

7- افزایش زمان آزمایش

به منظور بررسی بیشتر چگونگی مهاجرت نقاط شکست و تغییرات بستر کانال، آزمایش دوم ($Q_2 = 0.56 \text{ l/s}$) تا 24 ساعت ادامه یافت. در شکل 13، نیمرخ طولی بستر کانال در پایان ساعت پنجم و بیست و چهارم ترسیم شده است. شکل 14، بستر کانال را در پایان 24 ساعت با منحنی توپوگرافی و شکل سه‌بعدی نشان می‌دهد. تغییرات بستر کانال در ادامه آزمایش شامل فرسایش در بالادست و رسوب‌گذاری در پایین‌دست، نسبت به ساعات اولیه آن بسیار کمتر است.



شکل 12 همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای دو تابع انتقال رسوب

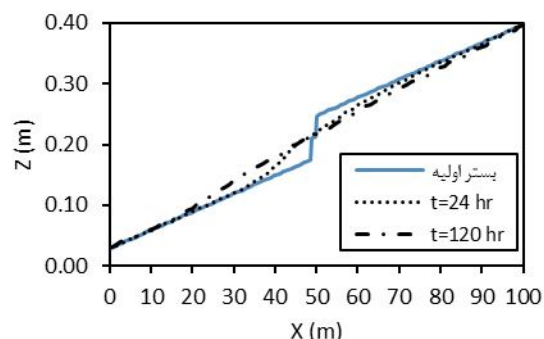


شکل 15 نتایج آزمایشگاهی و عددی با استفاده از توابع مختلف انتقال رسوب در آزمایش شماره 2 ($Q_2 = 0/56 \text{ l/s}$) در پایان 24 ساعت

کانال پیچانی می‌شود.

جدول 3 مقادیر میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی ($MARE$)

برای ارزیابی توابع انتقال رسوب در پایان 24 ساعت			
تابع	ایکرز-وایت	لارسن	یانگ
$MARE$	7/87	8/50	10/32



شکل 16 نتایج عددی تابع ایکرز-وایت برای کانال 100 متری در آزمایش دوم ($Q_2 = 0/56 \text{ lit/s}$)

نرخ پسروی و پیشروی نقاط شکست با افزایش دبی افزایش می‌یابد. مدل عددی HEC-RAS پسروی نقطه شکست 1 را تا حدودی ارزیابی می‌کرد، اما در پیش‌بینی لبه تیز نقطه شکست 2 موفق نبود. در محدوده آزمایش‌های این تحقیق، تغییرات تراز بستر با استفاده از توابع انتقال رسوب لارسن و ایکرز-وایت بهترین نتایج را بدست می‌دهد. اجرای طولانی مدل عددی تأیید کرد که چنانچه امکان فرسایش بیشتر وجود داشته باشد، نقاط شکست در امتداد

برای ارزیابی کمی توابع انتقال رسوب در پایان 24 ساعت، از میانگین قدر مطلق خطاهای نسبی ($MARE$) استفاده شد. این مقادیر در جدول 3 درج شده‌اند. دقت توابع ایکرز-وایت و لارسن مشابه یکدیگر است و نسبت به تابع یانگ خطای کمتری دارند.

8- افزایش طول کانال

طول کانال آزمایشگاهی 11 متر بود و امکان افزایش آن به لحاظ عملی مقدور نبود. از این رو در مدل کامپیوتری، طول کانال در بالا و پایین‌دست افزایش یافت تا در مجموع به 100 متر برسد. آزمایش دوم ($Q_2 = 0/56 \text{ l/s}$) به مدت 120 ساعت برای مدل عددی جدید اجرا شد. شکل 16، نتایج عددی تابع ایکرز-وایت را در پایان ساعت 24 و 120 برای کانال 100 متری نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در انتهای آزمایش عددی نقاط شکست با شیب نسبتاً تند در امتداد کانال گسترده شده و به طور کامل محو گشته است.

9- نتیجه‌گیری

مهاجرت نقاط شکست متوالی سبب کف‌کنی، فرسایش بستر و افت تراز در بالادست کانال می‌شود. نقطه شکست اول به بالادست پسروی می‌کند، با ته‌نشینی رسوبات در پایین‌دست، تراز بستر بالا می‌آید و نقطه شکست دوم به پایین‌دست پیشروی می‌کند. در پلان، بین دو نقطه شکست، پشته‌های کناری یا میانی شکل گرفته و

ژولین، پ. ی. (1387). مکانیک رودخانه، ترجمه‌ی جعفرزاده، م. ر.، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

شفاعی بجستان، م. (1387). مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

کوهستانی، ک. و جعفرزاده، م. ر. (1384). "بررسی تئوری و آزمایشگاهی تکامل نقطه شکست"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه باهنر کرمان، ایران.

ASCE, (1982). "Relationships between morphology of small streams and sediment yields", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 108, no. HY 11, Proceeding Paper 17450, pp. 1328-1365.

Bhalla mud, S.M., and Chaudhry, M.H. (1991). "Numerical modeling of aggradation and degradation in alluvial channels", J. Hydraulic Engineering, Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 117, No 9, pp. 1145-1164.

Bigi A., Hasbargen L. E., Montanari A. and Paola C. (2006). "Knickpoints and hillslope failures: Interactions in a steady-state experimental landscape", Geological Society of America, Special paper 398, 295-307.

Brunner, G.W. (2010). "HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual", U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.

Brush, L.M. and Wolman, M.G. (1960). "Knickpoint behavior in non-cohesive material: A laboratory study", Geological Society of America Bulletin, 71: 59-74.

Crosby, T.B. (2001). "Knickpoint migration in the waipaoa river and its tributaries". Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, First Generals Paper.

Cunge, J.A., Holly, F.M., and Verwey A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Advanced Publishing Program.

Cantelli, A. and Muto T. (2014). "Multiple knickpoints in an alluvial river generated by a single instantaneous drop in base level: experimental investigation", Earth Surf. Dynam., 2: 271-278.

Grimaud, J.L., Paola1, C. and Voller, V. (2016). "Experimental migration of knickpoints: influence of style of base-level fall and bed lithology", Earth Surf. Dynam., 4: 11-23.

کانال به تدریج محو می‌شوند. این نتیجه در کانال‌های ماسه‌ای برای یک نقطه شکست توسط پژوهشگران پیشین نظیر (Brush and Wolman 1960) و کوهستانی و جعفرزاده (1387) گزارش شده است.

10- فهرست علائم

A	سطح مقطع جریان (m^2)
A_s	سطح مقطع کانال (m^2)
D_s	قطر ذرات رسوب (mm)
D_{50}	قطر متوسط ذرات (mm)
$Fr=V/\sqrt{gh}$	عدد فرود
$G_s=\gamma_s/\gamma$	چگالی نسبی ذرات
h	عمق جریان (m)
h_c	عمق بحرانی (m)
h_o	عمق نرمال (m)
n	ضریب زبری مانینگ
P_o	تخلخل
Q	دبی جریان (l/s)
Q_s	دبی رسوب (m^3/s)
R	شعاع هیدرولیکی (m)
$Re=VR/\nu$	عدد رینولدز
RE	خطای نسبی
MARE	میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی
S	شیب بستر کانال (m/m)
V	سرعت متوسط جریان (m/s)
$We = \frac{\rho V^2 h_o}{\sigma}$	عدد وبر
β	ضریب توزیع سرعت
γ	وزن مخصوص آب (N/m^3)
γ_s	وزن مخصوص ذرات رسوب (N/m^3)
ρ	چگالی آب (kg/m^3)
σ	کشش سطحی (N/m)
τ_o	تنش برشی بستر کانال (N/m^2)
$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)D_s}$	پارامتر شیلدز

11- منابع

بوینگتن، ف. آر. (1366). تخلیص داده‌ها و تجزیه و تحلیل خطا برای علوم فیزیکی، ترجمه‌ی عدالتی، ت. و بزرگ‌نیا، ا.، چاپ اول، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

environment", Hydraulic Design Series Number 6, U.S. Department of Transportation, Publication No. FHWA NHI 01-004.

Simon, A. and Darby, S.E. (2002). "Effectiveness of grade-control structures in reducing erosion along river channels: the case of Hotophia Creek, Mississippi". Elsevier Scientific, *Geomorphology*. 42: 229-224

Thomas, J. and Papanicolaou, A. N. (2008). "Final report: the effects of headcut and knickpoint propagation on bridges in Iowa", Proceedings of the 2007 Mid-continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa.

Vanoni, V.A., (1975). *Sedimentation engineering*. ASCE Manuals And Reports on Engineering-No. 54, ASCE Task Committee

Holland, W.N. and Pickup, G. (1976). "Flume study of knickpoint development in stratified sediment", *Geological Society of America Bulletin*, 87: 76-82.

Loget, N. and Driessche, J.V.D. (2009). "Wave train model for knickpoint migration", *Geomorphology*, 106: 376-382.

May, J.H. (1989). "Report 4: Geologic and hydrodynamic controls on the mechanics of knickpoint migration", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Peakall, J., Warburton, J. (1996). "Surface tension in small hydraulic river models-the significance of the Weber number", *J. of Hydrology New Zealand*. 35(2): 199-212.

Richardson, E.V., Simons, D.B. and Lagasse P.F. (2001). "River engineering for highway encroachments, Highways in the river