



بِسْمِ تَعَالَى

کواهی ارائه مقاله در دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه

بدینوسیله کواهی می شود مقاله تحت عنوان:

بررسی حرکت رسوبات غیر چسبنده در کانال مستطیلی روباز با شیب ملایم
در اثر مهاجرت دو نقطه شکست متوالی

توسط:

افشین فولادی سمنان، محمدرضا جعفرزاده

در «دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه» که در تاریخ ۲۹ دی لغایت ۱ بهمن ماه سال ۱۳۹۴ در دانشگاه شهید چمران اهواز برگزار
گردید، مورد پذیرش قرار گرفته و ارائه شده است.

ضمن تشکر و قدرانی از بکاربری نویسندگان محترم، امیدواریم شاهد موفقیت روزافزون آنان در زمینه های گوناگون علمی باشیم.

دکتر مهدی قمی

دیر سمنان

دکتر بهشتک حسینی زاده

دیر سمنان





دهمین سمینار بین‌المللی مهندسی (رودخانه)
۲۹ دی الی ۱ بهمن ۱۳۹۴، اهواز، دانشگاه شهید چمران

بررسی حرکت رسوبات غیر چسبنده در کانال مستطیلی روباز با شیب ملایم در اثر مهاجرت دو نقطه شکست متوالی

افشین فولادی سمنان^{۱۲}، کارشناس ارشد مهندسی عمران - مهندسی آب، دانشگاه فردوسی

مشهد

محمد رضا جعفرزاده^{۱۳}، استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

نقاط شکست به دلایل طبیعی و یا غیرطبیعی در بستر رودخانه‌ها به صورت پله‌های متوالی شکل می‌گیرند. در تحقیق حاضر نحوه حرکت رسوبات در اثر مهاجرت دو نقطه شکست متوالی در بستر ماسه‌ای یک کانال مستطیلی روباز با شیب ملایم به ازای دبی‌های مختلف، به طور آزمایشگاهی بررسی می‌شود. با شروع جریان دو نقطه شکست اولیه در مدت زمان کوتاهی محو می‌شوند اما کف‌کنی و رسوب‌گذاری، یک موج تیز پسرو به بالادست و یک موج پیشرو به پایین‌دست را در بستر کانال به وجود می‌آورد. افزایش دبی سبب افزایش نرخ حرکت این دو موج می‌شود. در حد فاصل این دو موج، بستر کانال با شیب تندی گسترش یافته و یک پشته کناری شکل می‌گیرد. آبراهه در پایین‌دست پشته کناری به تدریج پیچانی می‌شود. از این رو مهاجرت نقاط شکست تنها محدود به تغییرات تراز نمی‌شود بلکه پلان کانال را نیز ناپایدار می‌کند. همراه با پسروی نقطه شکست اول به بالادست، امواج ماسه‌ای از نوع پادتل ماسه در نزدیکی این نقطه شکل می‌گیرد. برای پیش‌بینی شکل بستر در محدوده نقطه شکست، روش فان راین بیشترین مطابقت را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

واژه‌های کلیدی: نقطه شکست، کانال روباز، رسوبات غیر چسبنده، فرسایش، رسوب‌گذاری، امواج ماسه‌ای.

¹² afshin.fouladi@stu.um.ac.ir

¹³ jafarzad@um.ac.ir

بررسی حرکت رسوبات غیرچسبنده در کانال مستطیلی روباز با شیب ملایم در اثر مهاجرت دو نقطه شکست متوالی

افشین فولادی سمنان^۱، کارشناس ارشد مهندسی عمران - مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
محمد رضا جعفرزاده^۲، استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

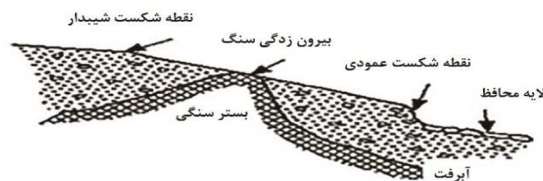
چکیده

نقاط شکست به دلایل طبیعی و یا غیرطبیعی در بستر رودخانه‌ها به صورت پله‌های متوالی شکل می‌گیرند. در تحقیق حاضر نحوه حرکت رسوبات در اثر مهاجرت دو نقطه شکست متوالی در بستر ماسه‌ای یک کانال مستطیلی روباز با شیب ملایم به ازای دبی‌های مختلف، به طور آزمایشگاهی بررسی می‌شود. با شروع جریان دو نقطه شکست اولیه در مدت زمان کوتاهی محو می‌شوند اما کف کنی و رسوب‌گذاری، یک موج تیز پسر و به بالادست و یک موج پیشرو به پایین دست را در بستر کانال به وجود می‌آورد. افزایش دبی سبب افزایش نرخ حرکت این دو موج می‌شود. در حد فاصل این دو موج، بستر کانال با شیب تندی گسترش یافته و یک پشته کناری شکل می‌گیرد. آبراهه در پایین دست پشته کناری به تدریج پیچانی می‌شود. از این رو مهاجرت نقاط شکست تنها محدود به تغییرات تراز نمی‌شود بلکه پلان کانال را نیز ناپایدار می‌کند. همراه با پسر و نقطه شکست اول به بالادست، امواج ماسه‌ای از نوع پادتل ماسه در نزدیکی این نقطه شکل می‌گیرد. برای پیش‌بینی شکل بستر در محدوده نقطه شکست، روش فان راین بیشترین مطابقت را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

واژه‌های کلیدی: نقطه شکست، کانال روباز، رسوبات غیر چسبنده، فرسایش، رسوب‌گذاری، امواج ماسه‌ای.

مقدمه

رودخانه‌ها همچون سایر پدیده‌های طبیعی میل به حفظ نظام پایدار و متعادل 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 شکست^۳ می‌شود. نقطه شکست یک ناپیوستگی در شیب و تراز بستر کانال است [۱]. این نقاط همانند شکل ۱ می‌توانند به صورت شیب‌دار و یا عمودی ایجاد می‌شوند.



شکل ۱- نقاط شکست شیب‌دار و عمودی [۲]

¹ afshin.fouladi@stu.um.ac.ir

² jafarad@um.ac.ir

³ Knickpoints (Nickpoints)

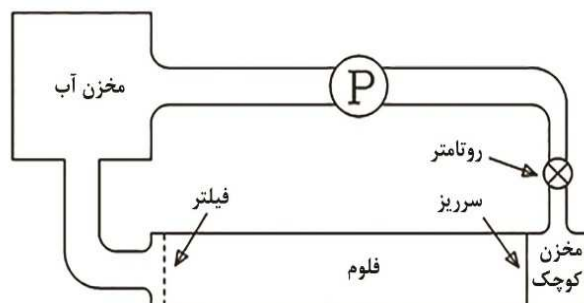
نقطه شکست شیب‌دار را نقطه شکست و نقطه شکست عمودی را پیشانی خندق^۱ یا آبکند نام‌گذاری کرده‌اند. نقاط شکست متوالی اغلب به شکل آبشارک‌های پی‌درپی در راستای نیم‌رخ طولی رودخانه به وجود می‌آیند [۳].

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 فرآیند که به معنای گسترش و مهاجرت نقطه شکست است، سبب وارد آمدن خسارت به سازه‌های بالادست و زمین‌های اطراف شده و حمل رسوبات ناشی از آن، زیستگاه موجودات آبی در پایین‌دست را در معرض خطر قرار می‌دهد که می‌تواند به اکوسیستم رودخانه لطمه وارد کند.

در تحقیقات گذشته معمولاً مکانیک یک نقطه شکست در آزمایشگاه مطالعه شده است. براس و ولمان رفتار یک نقطه شکست را در بستری از مواد غیرچسبنده در آزمایشگاه بررسی کردند [۴]. هلند و بی‌کاپ حرکت نقطه شکست را در رسوبات لایه‌بندی شده و چسبنده در یک فلوم آزمایشگاهی مطالعه نمودند [۵]. می عوامل تاثیرگذار در شکل‌گیری و مهاجرت نقطه شکست را بررسی کرد [۶]. کراسبی با استفاده از مطالعات میدانی یک مدل عددی برای مهاجرت یک نقطه شکست ارائه کرد [۷]. سیمون و داربی اثر سازه‌های کنترل شیب را بر کنترل فرسایش بستر ناشی از مهاجرت نقطه شکست بررسی نمودند [۸]. کوهستانی و جعفرزاده مهاجرت یک نقطه شکست را در کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای بررسی کردند و توسعه آن را با استفاده از الگوی عددی مک کورمک^۲ بر اساس معادلات مختلف انتقال رسوب مدل نمودند [۹]. از آنجا که در طبیعت نقاط شکست عموماً به صورت پی‌درپی شکل می‌گیرند، در پژوهش حاضر توسعه دو نقطه شکست متوالی در یک کانال مستطیلی در آزمایشگاه مطالعه گردید تا اثر متقابل نقاط شکست بر یکدیگر و نحوه حرکت رسوبات مشخص گردد.

وسایل و تجهیزات آزمایشگاه

آزمایشات در فلومی به طول ۱۲ متر، عرض ۳۰ و ارتفاع ۴۰ 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 تراز می‌شد. شکل ۲ نحوه قرارگیری فلوم و متعلقات آن را نشان می‌دهد. آب از مخزن اصلی توسط پمپی با حداکثر دبی ۵۰ لیتر بر دقیقه (۰/۸۳ لیتر بر ثانیه) به مخزن کوچکی واقع در بالادست فلوم پمپاژ می‌شد. دبی جریان با روتامتر 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 می‌کرد و به مخزن اصلی باز می‌گشت.



شکل ۲- تصویر مفهومی از فلوم و متعلقات کانال آزمایشگاه

بستر کانال از ماسه با دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت با قطر متوسط (D₅₀) ۰/۹۵ میلی‌متر و چگالی نسبی (G_s) ۲/۵۴ ساخته شد. بدنه‌ی کانال نیز با ذرات ماسه پوشش داده شد تا زبری (n) بستر و بدنه یکسان و برابر ۰/۱۳ شود. طول کانال ماسه‌ای به ۱۱ متر و عرض آن به ۲۹/۵ سانتی‌متر محدود شد. درجه حرارت آب مصرفی در کانال همواره بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود.

¹ Headcut

² McCormack scheme

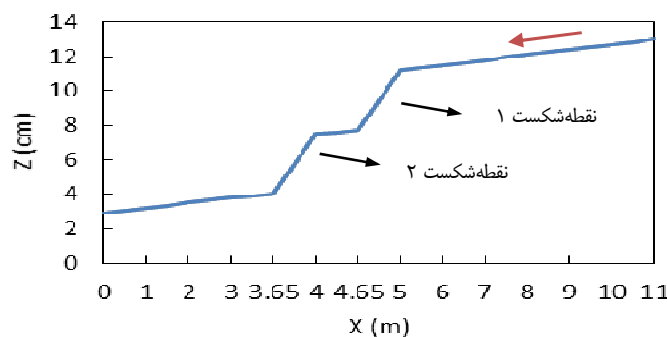
آماده‌سازی کانال و شرایط اولیه آزمایش

شیب ثابت بستر ماسه‌ای کانال برابر 0.003 و به گونه‌ای طرح شد که براساس دو معیار تنش برشی مجاز و سرعت بحرانی در شروع تمام آزمایش‌ها جز در نقاط شکست، پایدار بماند و فرسایش (کف‌کنی) تنها تحت تأثیر مهاجرت نقاط شکست صورت گیرد. آزمایش‌ها با عنایت به مشخص بودن قطر متوسط 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 ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- شرایط اولیه آزمایش‌ها

شماره آزمایش	دبی جریان Q (lit/s)	مکان اندازه‌گیری	شیب بستر S (m/m)	سرعت متوسط جریان V (m/s)	عمق نرمال h_0 (m)	عمق بحرانی h_c (m)	عدد فرود Fr
1	0.44	در بالا و پایین دست نقطه شکست	0.003	0.167	0.009	0.006	0.577
		در نقطه شکست	0.1	0.244	0.003	1.43	
2	0.56	در بالا و پایین دست نقطه شکست	0.003	0.183	0.01	0.007	0.588
		در نقطه شکست	0.1	0.265	0.0035	1.44	
3	0.68	در بالا و پایین دست نقطه شکست	0.003	0.198	0.011	0.008	0.597
		در نقطه شکست	0.1	0.283	0.0039	1.45	

در شکل ۳، موقعیت دو نقطه شکست متوالی به طول 0.35 متر و ارتفاع $3/5$ سانتی‌متر (شیب 0.1) 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 ۳- نیمرخ طولی از بستر اولیه کانال پیش از هر آزمایش

اجرای آزمایش

هر آزمایش ب مدت ۵ ساعت انجام شد. افزایش زمان آزمایش به علت محدود بودن طول کانال و ساعات کاری آزمایشگاه مقدور 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.

کف کنی در بالادست و حمل رسوبات به پایین دست نقطه شکست ۱ به سرعت رخ داد. در فاصله بین دو نقطه شکست ۱ و ۲، هر دو پدیده رسوب گذاری و رسوب برداری در مدت کوتاهی مشاهده شد. بدین معنا که رسوبات حمل شده از بالادست با کاهش ناگهانی شیب در پایین دست نقطه شکست ۱، به سرعت ته نشین شدند ولی در ادامه فرسایش یافته و به پایین دست حرکت کردند. در نتیجه فاصله بین دو نقطه شکست به سرعت شیب دار شد.

مهاجرت نقطه شکست ۱ به بالادست سبب فرسایش بستر، بریدگی کف 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 فرآیند با یک رابطه کیفی نشان داده می شود [۲]:

$$Q_s^+ \rightarrow W^- h^- S^+ \tau_*^+ V^+ \quad (۱)$$

که در آن h و V به ترتیب عمق و سرعت جریان و τ_* عدد شیلدز است. بالاترین مثبت یا منفی اشاره به افزایش یا کاهش متغیر مربوط دارد. عدد شیلدز از رابطه زیر تعریف می شود [۹]:

$$\tau_* = \frac{\gamma_s D_s}{(\gamma_s - \gamma) D_s} \quad (۲)$$

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. کاهش عرض آبراهه سبب ایجاد یک پشته کناری شد (شکل ۴-الف). پشته در کناره راست یا چپ کانال، آبراهه را به سمت چپ یا راست کانال متمایل کرد. همراه با مهاجرت نقطه شکست به بالادست، عرض و طول پشته کناری افزایش یافت و از سرعت و نرخ مهاجرت نقطه شکست کاسته شد. این پشته همواره بالاتر از سطح آب قرار داشت. با مهاجرت نقطه شکست و فرسایش بستر در بالادست، حجم ته نشینی رسوبات نیز در پایین دست پشته کناری افزایش یافت. توده رسوبات ته نشین شده، ابتدا به شکل پشته های میانی پدید آمدند ولی پس از مدتی به زیر آب رفته و محو شدند. در ساعات پایانی آزمایش در پایین دست پشته کناری، پشته های متناوبی در کناره های راست و چپ کانال به وجود آمد که سبب شد آبراهه در پایین دست پیچانی گردد (شکل ۴-ب). در حقیقت وجود نقاط شکست علاوه بر افزایش و کاهش تراز بستر به پیچانی شدن آبراهه سرعت بخشیدند. پشته های متناوب هیچ گاه بالاتر از سطح آب قرار نگرفتند. محدودیت عرض کانال و کاهش بار رسوبی مانع پیچانی شدن بیشتر آبراهه شد.

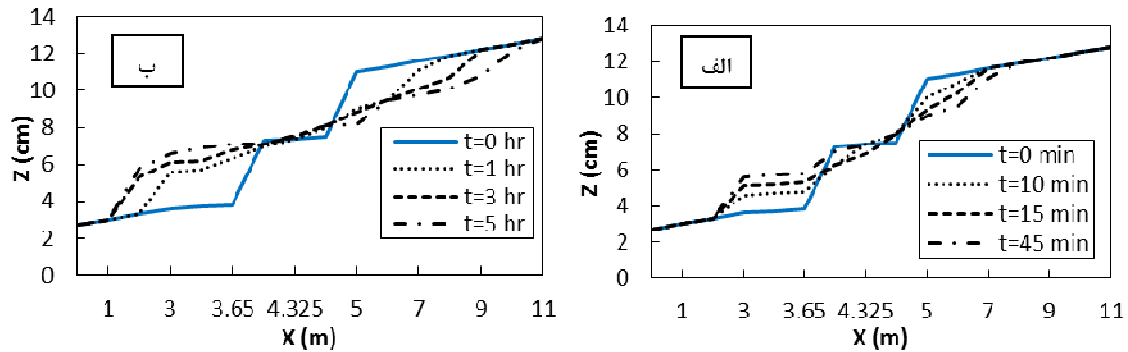


شکل ۴-الف- توسعه پشته کناری در پایین دست نقطه شکست (ساعت سوم آزمایش شماره ۱)

ب- توسعه پشته های متناوب در پایین دست پشته کناری (پایان آزمایش شماره ۱)

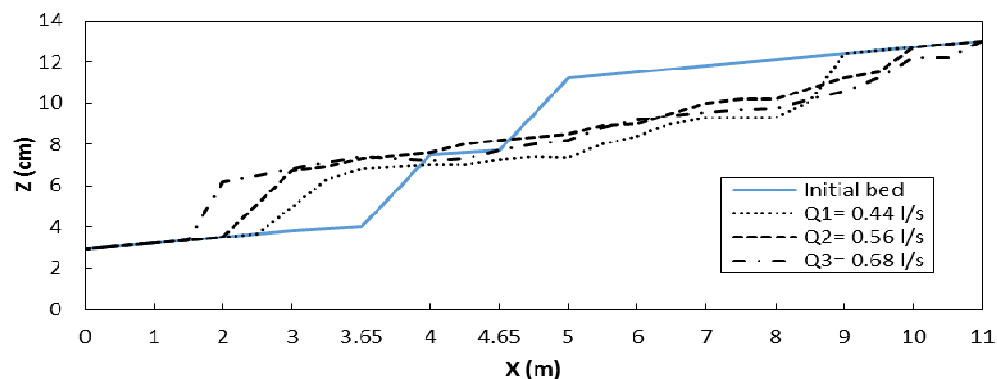
به عنوان نمونه در شکل ۵-الف، تغییرات تراز نیم رخ طولی بستر آبراهه در ۴۵ دقیقه اول و در شکل ۵-ب، تا پایان آزمایش سوم، در امتداد خط القعر جریان ترسیم شده است. قسمت اعظم تغییرات در همان دقایق شروع آزمایش اتفاق افتاده است. فرسایش بستر پیش از نقطه شکست ۱، باعث گسترش و پسروی آن به بالادست شده است. به گونه ای که در انتهای آزمایش منطقه شکستی با شیب تند اما ملایم تر از نقطه شکست اولیه در ابتدای کانال با پایین افتادگی بیش از هفتاد درصد تراز بستر تا فاصله قابل توجهی دیده می شود. به طور همزمان

رسوب‌گذاری پس از نقطه شکست ۲، موجب افزایش تراز بستر تا مسافت زیادی در پایین‌دست و ایجاد نقطه شکست جدیدی شده است. شیب انتهایی این نقطه شکست بسیار تند و مشابه شیب نقطه شکست ۲ 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.



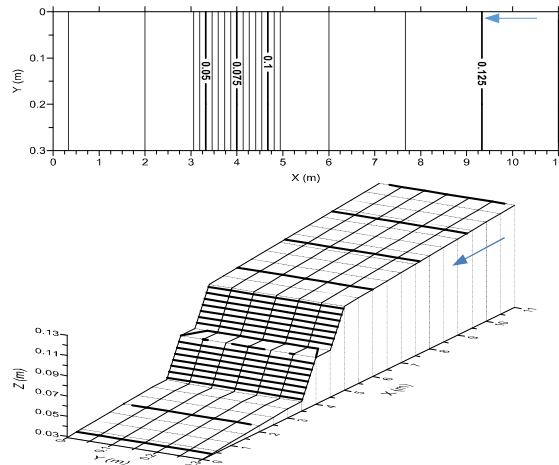
شکل ۵- تغییرات تراز نیمرخ طولی کانال با زمان (آزمایش شماره ۳) الف- ساعت اول ب- ساعت دوم تا پنجم

در شکل ۶، نیمرخ طولی بستر کانال به ازای دبی‌های مختلف در پایان هر سه آزمایش ترسیم شده است. افزایش دبی، سبب افزایش کف‌کنی و پسروی نقطه شکست ۱ به بالادست و افزایش رسوب‌گذاری و پیشروی نقطه شکست ۲ به پایین‌دست می‌شود. تراز بستر در پایان آزمایش اول ($Q_1 = 0.44 \text{ l/s}$)، به علت کف‌کنی و رسوب‌گذاری کم‌تر، نسبت به دو آزمایش دیگر پایین‌تر است. در همین آزمایش شیب نقطه شکست بالادست تندتر و شیب نقطه شکست پایین‌دست ملایم‌تر از دو آزمایش دیگر است.

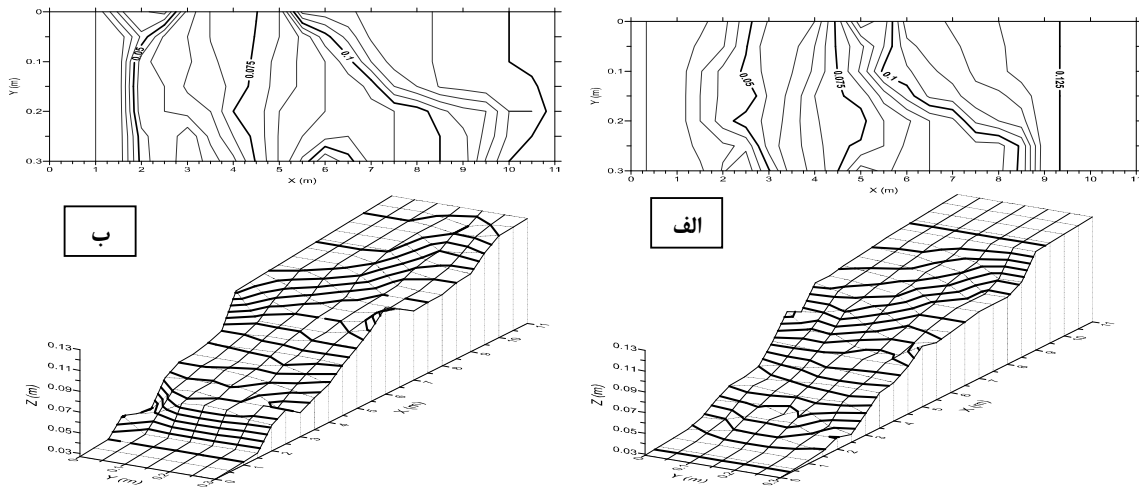


شکل ۶- نیمرخ طولی کانال برای دبی‌های مختلف در پایان هر سه آزمایش

در شکل ۷، بستر کانال پیش از اجرای هر آزمایش با منحنی توپوگرافی و شکل سه‌بعدی ترسیم شده است. در شکل‌های ۸، بستر کانال پس از پایان آزمایش‌های اول ($Q_1 = 0.44 \text{ l/s}$) و سوم ($Q_3 = 0.68 \text{ l/s}$)، با منحنی‌های توپوگرافی و شکل‌های 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 کناری و متناوب باعث پیچانرودی آبراهه شده است. محدودیت عرض فلوم از گسترش بیشتر آبراهه پیچانی جلوگیری کرده است.



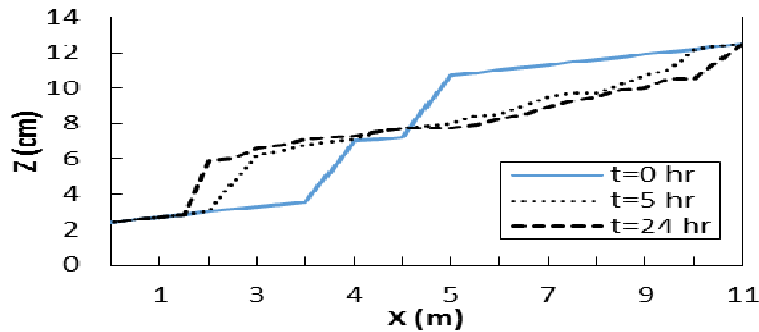
شکل ۷- عوارض بستر کانال پیش از هر آزمایش



شکل ۸- عوارض بستر کانال در پایان آزمایش الف- پایان آزمایش شماره ۱ ($Q_1 = 0.44 \text{ l/s}$) ب- پایان آزمایش شماره ۳ ($Q_3 = 0.68 \text{ l/s}$)

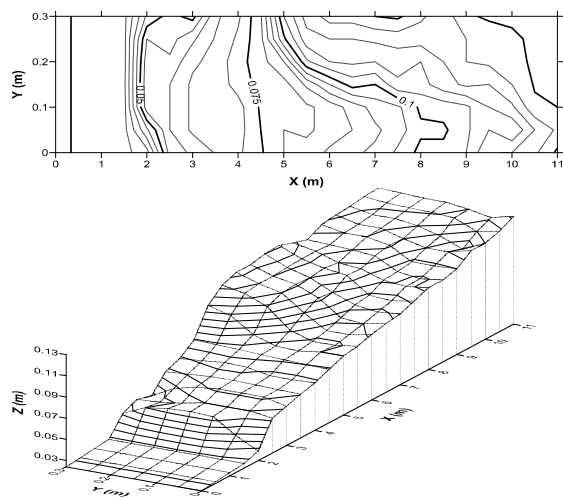
افزایش زمان آزمایش

به منظور بررسی بیشتر چگونگی مهاجرت نقاط شکست و تغییرات بستر کانال، آزمایش دوم ($Q_2 = 0.56 \text{ l/s}$) تا ۲۴ ساعت ادامه یافت. شکل ۹، نیمرخ طولی بستر کانال در پایان ساعت پنجم و بیست و چهارم ترسیم شده است.



شکل ۹- نیمرخ طولی کانال برای زمان‌های مختلف در آزمایش شماره ۲ ($Q_2 = 0.56 \text{ l/s}$)

در شکل ۱۰، بستر کانال را در پایان ۲۴ ساعت با منحنی‌های 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. در پایان بیست و چهار ساعت، نقطه شکست ۱ به ابتدای کانال رسیده است و نقطه شکست ۲ تا انتهای کانال با لبه‌ی تیز پیشروی کرده است. در فاصله دو نقطه-شکست اخیر، شیب بستر کانال نسبتاً تند و بیشتر از شیب اولیه است.



شکل ۱۰- عوارض بستر کانال پس از ادامه آزمایش شماره ۲ ($Q_2 = 0.56 \text{ l/s}$) تا ۲۴ ساعت

شکل بستر و پیش‌بینی آن

هندسه و آرایش‌های مختلف شکل بستر، تأثیر مستقیمی بر زبری بستر و مقاومت در برابر جریان دارد. در کانال‌هایی با بستر ماسه‌ای حرکت مواد رسوبی به صورت امواج ماسه‌ای است که بسته به شرایط هیدرولیکی از نوع شکست^۱، تلماسه^۲ یا پادتلماسه^۳ می‌باشد [۲]. به دلیل پیچیدگی مسأله و تأثیر متغیرهای متعدد هنوز راه حل تحلیلی استاندارد و قابل اعتمادی برای پیش‌بینی شکل بستر ارایه نشده است. از این رو تنها راه‌حل‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های سایمون و ریچاردسون^۴، عطاء الله^۵، بوگاردی^۶ و فان راین^۷ از جمله روش‌های پیش‌بینی شکل بستر می‌باشند [۹].

همزمان با مهاجرت نقطه شکست اول به بالادست، امواج ماسه‌ای در بستر کانال بلافاصله در پایین‌دست نقطه شکست و در قسمت شیب‌دار بستر شکل گرفت. این امواج در دسته‌های هم شکل در طی آزمایش خلاف جهت جریان به بالادست حرکت می‌کردند و در سطح آب نیز امواجی هم‌فاز با امواج ماسه‌ای ایجاد می‌شد. طول امواج ماسه‌ای در ابتدای آزمایش زیاد بود ولی به تدریج از آن کاسته شد تا در نهایت در پایان آزمایش محو گردید. به دلیل هم‌فاز بودن بستر کانال با نیمرخ جریان و با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، این امواج از نوع پادتلماسه تشخیص داده شد. در جدول ۲، اشکال بستر با روش‌های مختلف برای آزمایش شماره ۳ پیش‌بینی شد. پیش‌بینی با روش پیشنهادی فان راین بیشترین تطابق را با مشاهدات آزمایشگاهی نسبت به سایر روش‌ها دارد.

¹ Ripples

² Dunes

³ Anti-Dunes

⁴ Simon and Richardson (1963, 1966)

⁵ Athallah, 1968

⁶ Bogardi, 1974

⁷ Van Rijn, 1984

جدول ۲- پیش‌بینی اشکال بستر در کانال در طی آزمایش شماره ۳ ($Q_3 = 0.68 \text{ l/s}$)

روش	روش یوگاردی	روش سایمون و ریچاردسون	روش عطاء‌ال...	مشاهده آزمایشگاهی	مکان
فان راین	تخت و بی‌حرکت	تخت	تخت	تخت و بی‌حرکت	در خارج از نقطه شکست
	تخت و بی‌حرکت	تخت	تخت	تخت و بی‌حرکت	در خارج از نقطه شکست
	انتقالی	تلماسه	عدم اطلاع	پادتلماسه	در محدوده نقطه شکست
	پادتلماسه				

نتیجه گیری

مهاجرت نقاط شکست متوالی سبب کف‌کنی، فرسایش بستر و افت تراز در بالادست کانال می‌شود و 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، پشته‌های کناری یا میانی شکل گرفته و کانال پیچانی می‌شود. نرخ پسروی و پیشروی نقاط شکست با افزایش دبی افزایش می‌یابد. همزمان با پیشروی نقطه شکست به بالادست، رسوبات بستر به صورت امواج پاد تلماسه شکل می‌گیرند که با کاهش قدرت فرسایش نقطه شکست و ازدیاد عرض پشته کناری، این امواج به تدریج ناپدید می‌شوند. در کانال‌های دارای نقاط شکست با بسترهای گود افتاده، روش فان راین برای پیش‌بینی شکل بستر و امواج ماسه‌ای در محدوده نقاط شکست مناسب می‌باشد.

منابع

- [1] 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.
- [۲] ژولین، پ. ی. (۱۳۸۷). "مکانیک رودخانه"، ترجمه‌ی جعفرزاده، م. ر.، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Holland, W.N. and Pickup, G. (1976). "Flume study of knickpoint development in stratified sediment", Geological Society of America Bulletin, 87: 76-82.
- [6] 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 General Paper.
- [7] 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.
- [۸] کوهستانی، ک. و جعفرزاده، م. ر. (۱۳۸۴). "بررسی تئوری و آزمایشگاهی تکامل نقطه شکست"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه باهنر کرمان، ایران.
- [۹] شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۷). "مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.