

## بررسی آزمایشگاهی سرعت مهاجرت و توسعه پیچان رودها با رخداد تغییر ناگهانی شیب در پایین دست

سمیرا رضاپوریان قهفرخی<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی احمدی<sup>۲</sup> و کوروش قادری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان و <sup>۲،۳</sup> دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۱

### چکیده

تغییرات ژئومورفولوژیک بستر و کناره رودخانه‌ها می‌تواند سرعت مهاجرت و توسعه پیچان رودها را تحت تاثیر قرار دهد. تغییر ناگهانی شیب بستر رودخانه یکی از رایج‌ترین تغییرات ژئومورفولوژیک در مسیر رودخانه است. اندازه‌گیری سرعت مهاجرت و توسعه پیچان رودها و اتخاذ تدابیر لازم برای حفاظت سازه‌های قرار گرفته در کنار و روی رودخانه از جمله اقدامات مهندسی در عرصه مهندسی رودخانه می‌باشد. بدین منظور، برای مطالعه و اندازه‌گیری سرعت مهاجرت و توسعه پیچان رودها با رخداد تغییر ناگهانی شیب مسیر جریان، آزمایش‌هایی در فلوم آزمایشگاهی با بستر فرسایش پذیر انجام گرفت. کانال جریان بر روی بستر رسوبی حفر شد و برای سه عرض مختلف کانال (طول موج‌های مختلف خم ابتدایی)، سه دبی و سه شیب متفاوت بستر در دو گروه آزمایش با حضور و عدم حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب (آزمایش‌های شاهد) سرعت مهاجرت و توسعه پیچان رودها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که جریان در جهت تعدیل تغییر ناگهانی شیب در پایین دست، با سرعت بسیار بالایی شروع به ایجاد خم‌های پیچان رودی کرده، در نتیجه آن سرعت مهاجرت طولی پیچان رودها نسبت به آزمایش‌های شاهد افزایش و سرعت توسعه عرضی کاهش نشان داده است. افزایش سرعت مهاجرت طولی پیچان رودها تا ۳۲ درصد و کاهش سرعت توسعه عرضی تا ۳۶ درصد از مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب و عدم حضور آن به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** رودخانه‌های آبرفتی، سیلاب دشت، فلوم، مهندسی رودخانه، نیم‌رخ طولی

### مقدمه

است که بین دو نقطه عطف منحنی تشکیل می‌شود. پیچان رود از حلقه‌های دوتایی تشکیل شده است که در خلاف جهت یکدیگر هستند (Duan و Julien، ۲۰۱۰). در بسیاری رودخانه‌های طبیعی و از آزمایش‌های انجام شده در فلوم‌ها مشاهده شده است که ریزش دیواره یک عامل موثر در جابه‌جایی حلقه‌های پیچان رود است. ریزش دیواره به وسیله ریزش توده‌ای از مواد یا فرسایش اتفاق می‌افتد. حذف

پیچان رودها<sup>۱</sup> یکی از عارضه‌های دینامیک زمین هستند که در سیلاب‌دشت‌ها جابه‌جایی و مهاجرت دارند. پیچانی شدن رودخانه با توالی حلقه‌های پیچان متناوب مشخص می‌شود. یک حلقه پیچان، بازه‌ای

\* مسئول مکاتبات: palmy458@gmail.com

<sup>1</sup> Meandering rivers

قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که بالاترین نرخ مهاجرت هنگامی رخ داده است که نسبت شعاع انحنا به عرض کانال بین یک و دو بوده است. Briaud و همکاران (۲۰۰۷)، پروژه‌ای در سه بخش عددی، آزمایشگاهی و تحلیل ریسک برای محاسبه مهاجرت خط دیواره رودخانه و توسعه یک راهنما برای پیش‌بینی مهاجرت رودخانه به‌عنوان تابعی از زمان تعریف کردند. آن‌ها یک منحنی هذلولی برای تخمین مهاجرت با زمان انتخاب کردند. رابطه این منحنی با استفاده از دو پارامتر نرخ مهاجرت اولیه و بیشینه فاصله مهاجرت مشخص می‌شود. آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس در فلوم آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی فرایندهای رودخانه پیچان‌رودی و تعیین بیشینه فاصله مهاجرت در دو بستر شنی و رسی به‌صورت کاملاً جداگانه انجام و معادلات بیشینه فاصله مهاجرت در خاک‌های شنی و رسی ارائه شد.

در ایران، Rezaei Moghaddam و Khoshdel (۲۰۰۹) در محدوده دشت ازومدل ورزقان به بررسی کمی پیچ و خم‌های پیچان‌رود اهرچای پرداختند و بر اساس شاخص کورنایس و ضریب خمیدگی پیچان‌رود مورد بررسی را توسعه یافته معرفی کردند. با هدف تعیین نقش رسوبات غیرچسبنده در افزایش قدرت دیواره و افزایش رسوب‌گذاری رسوبات ریز در دشت سیلابی، Braudrick و همکاران (۲۰۰۹) یک کانال پیچان‌رودی خودپایدار در شرایط آزمایشگاهی ایجاد کردند. آزمایش‌ها نشان داد که قدرت و چسبندگی کناره و حضور ذرات معلق رسوبی اجزای لازم در پروژه‌های بازسازی پیچان‌رودهایی با بستر شنی هستند. Yamani و همکاران (۲۰۱۵)، از طریق مقایسه زمانی و به‌روش تحلیلی تغییرات هندسی پیچان‌رود کردان را پیش‌بینی کردند. آن‌ها بیان داشتند که میزان جابه‌جایی تغییرات جانبی رودخانه از ۳۷ متر تا ۱۶۵ متر متغیر بوده است و پیش‌بینی کردند که در ۲۰ سال آینده به‌طور میانگین ۱۴۴۱۵ متر مربع از ساحل سمت راست رودخانه مورد فرسایش قرار خواهد گرفت. در یک پژوهش جدید، Zen و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل بیومورفودینامیک در مقیاس عرضی برای مهاجرت جانبی خم‌های پیچان‌رودی ارائه دادند. آن‌ها بیان کردند که دو دیواره

مواد دیواره از یک سمت، اغلب همراه با تجمع مواد در دیواره مقابل و جابه‌جایی کانال رودخانه می‌باشد. اگر در یک مقطع هر دو دیواره فرسایش یابند، کانال عریض می‌شود. رشد و توسعه پیچان‌رود شامل تغییرات در ابعاد پیچان‌رود است که این تغییرات شامل افزایش دامنه، افزایش عرض پیچان‌رود و شعاع انحنای حلقه‌های پیچان‌رود است. جابه‌جایی پیچان‌رود شامل، جابه‌جایی به پایین دست در جهت جریان (مهاجرت<sup>۱</sup>) و در عرض جریان در واقع عمود بر جهت جریان (توسعه<sup>۲</sup>) است و به‌صورت نادر در برخی از بخش‌های خم جابه‌جایی به بالادست رخ می‌دهد (Briaud و همکاران، ۲۰۰۷). جابه‌جایی پیچان‌رود یک فرایند تعاملی بین جریان آب و فرسایش‌پذیری خاک بستر و دیواره‌ها است. شرایط جریان، خواص خاک و هندسه پیچان‌رود پارامترهای اثرگذار در جابه‌جایی پیچان‌رود و تکامل نیم‌رخ طولی<sup>۳</sup> آن هستند (Seminara, ۲۰۰۶). پیچان‌رودها به‌دلیل این ویژگی، نقش مهمی بر فعالیت‌های انسانی استقرار یافته در حاشیه آن‌ها و نیز طراحی و نگهداری سازه‌های هیدرولیکی مانند پل‌ها و سدها دارند. از این‌رو، شناخت و پیش‌بینی رفتار و تغییرات آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد.

مطالعات بسیاری بر روی شیب، هندسه کانال، شرایط جریان و خصوصیات مواد بستر و دیواره و تاثیر آن‌ها بر نرخ مهاجرت و جابه‌جایی پیچان‌رودها در شرایط طبیعی، آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی انجام گرفته است. Brice (۱۹۸۲)، نرخ مهاجرت کناره را متناسب با افزایش عرض کانال دانست. Nanson و Hickin (۱۹۸۳)، نشان دادند که نرخ مهاجرت جانبی پیچان‌رودها تحت تاثیر نسبت شعاع انحنای خم به عرض کانال ( $R_c/W$ ) می‌باشد و بیان داشتند، بیشینه نرخ مهاجرت نسبت به عرض کانال هنگامی مشاهده می‌شود که نسبت شعاع انحنای خم به عرض کانال ( $R_c/W$ ) تقریباً سه است. Kesel و Hudson (۲۰۰۰)، مهاجرت کانال و مورفولوژی خم در پیچان‌رودها را برای بخش پایینی رودخانه می‌سی‌سی‌پی مورد بررسی

<sup>1</sup> Migration

<sup>2</sup> Expansion

<sup>3</sup> Planform

(۲۰۱۶)، جریان فوق بحرانی (Bennett و همکاران، ۲۰۰۰؛ Cantelli و Muto، ۲۰۱۴) و مشخصات هندسی تغییر ناگهانی شیب (Parker، ۱۹۷۷؛ Gardner، ۱۹۸۳؛ Whipple، ۲۰۰۴؛ Crosby و Whipple، ۲۰۰۶) بررسی کردند.

با توجه به موارد بررسی شده، این مطالعات بر روی رودخانه‌های مستقیم انجام گرفته است و از آنجایی که این پدیده در مسیر پیچان‌رودها نیز احتمال وقوع دارد، لذا در این پژوهش، به مطالعه رفتار مورفولوژیکی نیمرخ طولی کانال‌های پیچان‌رودی با الگوی توسعه سینوسی و مهاجرت و توسعه آن‌ها با رخداد تغییر ناگهانی شیب در انتهای مسیر کانال و کمی‌سازی سرعت مهاجرت و توسعه پیچان‌رودها پرداخته شده است. بدین‌منظور، از یک مدل آزمایشگاهی با مواد بستر غیرچسبنده برای مطالعه سرعت مهاجرت و توسعه پیچان‌رودها استفاده می‌شود و تحت شرایط رخداد تغییر ناگهانی شیب در انتهای کانال جریان و عدم حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب (آزمایش‌های شاهد) موقعیت، سرعت مهاجرت و توسعه پیچان‌رودها در شرایط مختلف شیب، عرض جریان و دبی جریان بررسی مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک فلوم مستطیلی چوبی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۶۰، ۷۰ و ۴۰ سانتی‌متر طراحی و در محل آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شد. فلوم دارای قابلیت تغییر شیب و سامانه جریان آب چرخشی است. فلوم با استفاده از رسوبات شنی غیر چسبنده با قطر متوسط ۱/۲ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ۲/۶ به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر برای ایجاد بستر کانال پر شد. از آنجایی که رسوبات ریزدانه عامل موثر در تجمع و رسوب‌گذاری در کناره داخلی پیچان‌رودها هستند، به‌منظور ایجاد پیچان‌رودهای ماندگار در شرایط آزمایشگاهی نیاز به همراهی رسوبات ریزدانه و درشت دانه در مواد بستر می‌باشد. بنابراین، مطابق با شکل ۲، مواد رسوبی مورد استفاده برای بستر فلوم رنج وسیعی از دانه‌بندی را شامل

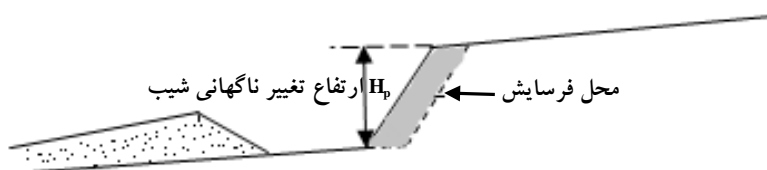
کانال به‌صورت جداگانه می‌توانند مهاجرت کنند و این مسئله اثر متقابل بین جریان رودخانه، رسوبات و پوشش گیاهی در ساحل رودخانه به‌خصوص در فصل مشترک کانال اصلی و بخش پیش‌رونده در دشت سیلابی است. در جدیدترین مطالعات انجام گرفته برای بررسی مهاجرت، Li و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از عکس‌های هوایی، نقشه‌برداری و شناسایی خصوصیات مواد بستر و دیواره، پوشش گیاهی، مورفولوژی و نیمرخ طولی، نرخ مهاجرت جانبی و بریدگی‌های ۱۰۵ خم از رودخانه تاریخیم در چین را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها با مطالعه طیف وسیعی از شرایط محیطی بیان داشتند، به‌علت بارندگی محدود و پوشش گیاهی پراکنده، دیواره‌ها از ریشه‌های مترکم تشکیل شده‌اند. همچنین، غالب بودن شن و ماسه ریز و سیلت در مواد کناره و مواد رسی کم مقاومت دیواره‌ها کم و موجب محدودیت در حرکت خم‌ها شده است. علاوه بر این، جریان رودخانه به‌صورت پالسی گزارش شده است که این موجب فرسایش ناگهانی دیواره‌ها می‌شود. علاوه بر این، تغییرات ژئومورفولوژیک ناگهانی در مسیر رودخانه می‌تواند منجر به تغییرات در جابه‌جایی و تکامل پیچان‌رودها شود.

همان‌گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، تغییر ناگهانی شیب<sup>۱</sup> بستر رودخانه یکی از رایج‌ترین تغییرات ژئومورفولوژیک در مسیر رودخانه می‌باشد که می‌تواند ناشی از پدیده‌های زمین‌شناسی، تغییرات آب و هوایی، اختلالات فرسایشی ناگهانی و یا افت سطح پایه تنظیم‌کننده پروفیل جریان در پایین‌دست دریاچه‌ها، سدها و سطح دریاها باشد (Grimaud و همکاران، ۲۰۱۶). این تغییرات، به‌وسیله جریان رودخانه از پایین‌دست به بالادست انتقال می‌یابد و تاثیر مستقیم بر تکامل رودخانه و پیچان‌رود دارد. محققان بسیاری پدیده تغییر ناگهانی شیب در مسیر رودخانه‌های مستقیم را در شرایط بسترهای چسبنده و غیرچسبنده (Brush و Wolman، ۱۹۶۰؛ Holland و Pickup، ۱۹۷۶؛ Frankel و همکاران، ۲۰۰۷؛ Cantelli و Muto، ۲۰۱۴؛ Grimaud و همکاران،

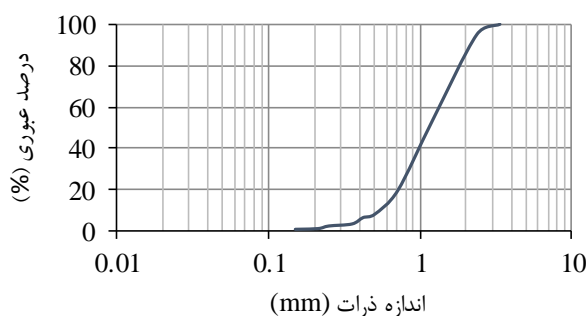
<sup>۱</sup> Knick point

۲۰ سانتی متر انتهای فلوم قبل از اتصال فلوم به حوضچه آرامش انتهایی برای ایجاد تغییر ناگهانی در شیب و بررسی تاثیر رخداد تغییر ناگهانی شیب مسیر بستر با استفاده از یک صفحه مقاوم ۲/۵ سانتی متر پایین تر از بستر اصلی فلوم قرار گرفت. در این مطالعه، با توجه به پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام گرفته توسط Friedkin (۱۹۴۵) و Moores (۲۰۰۲) در ساختار فلوم دو لوله زهکش دوطرفه جهت کنترل سطح آب زیرزمینی تعبیه شد. شکل ۳، پلانی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

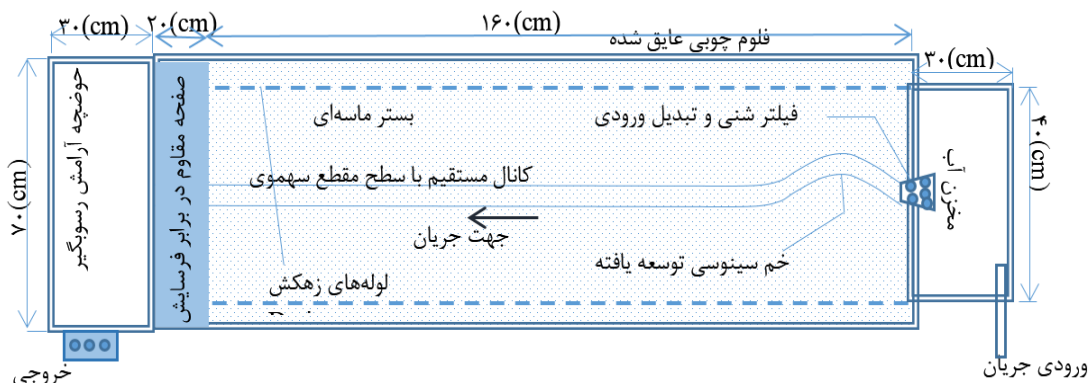
می‌شود. با توجه به این که خم‌های سینوسی توسعه یافته، بهترین نوع خم برای تعریف نیم‌رخ طولی پیچان رودها هستند، لذا، با توجه به مطالعات Silva و همکاران (۲۰۰۶) و Terminin (۲۰۰۹) در ورودی کانال خم اولیه سینوسی توسعه یافته با زاویه انحراف ۳۰ درجه و طول موج  $\lambda = 2\pi B$  (عرض کانال) حفر شد و پس از آن کانال به صورت مستقیم تا انتهای فلوم ادامه داده شد. فلوم در ابتدا دارای مخزن آب جهت آرام‌سازی جریان ورودی به کانال و در انتها متصل به حوضچه آرامش و رسوب‌گیر برای اندازه‌گیری دبی و رسوبات خروجی از کانال می‌باشد.



شکل ۱- تصویر شماتیک از مقطع عرضی رخداد تغییر ناگهانی شیب در مسیر رودخانه (Grimaud و همکاران، ۲۰۱۶)



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی بستر شنی مورد استفاده



شکل ۳- پلان فلوم آزمایشگاهی با رخداد تغییر ناگهانی شیب

آب‌شستگی موضعی تنظیم شد و در طول آزمایش‌ها چندین بار برای صحت آزمایش‌ها دبی خروجی از کانال اندازه‌گیری شد. موقعیت دیواره‌های کانال و خط‌القعر آن در فواصل زمانی مشخص به کمک عمق‌سنج با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر در طول و عرض فلوم برداشت شد. به منظور بررسی دقیق تغییرات ایجاد شده در کانال و پیچان‌رود شکل گرفته در فلوم، فاصله نقاط برداشت شده در امتداد طول و عرض فلوم دو سانتی‌متر در نظر گرفته شد و با کمک آن‌ها موقعیت پیچان‌رود در فواصل زمانی ترسیم شد. علاوه بر آن، برای مطالعه رخداد تغییر ناگهانی شیب در انتهای فلوم، جابه‌جایی‌های آن و تاثیر آن بر مهاجرت و توسعه پیچان‌رودها در زمان‌های برداشت، موقعیت پیچان‌رود با استفاده از دوربین ثابت شده در بالای فلوم از کل فلوم عکسبرداری صورت گرفت و از عکس‌ها به همراه موقعیت‌های برداشت شده برای مطالعه تاثیر تغییر ناگهانی شیب بر سرعت مهاجرت و توسعه پیچان‌رودها استفاده شد.

برای مطالعه تاثیر رخداد تغییر ناگهانی شیب در مسیر پیچان‌رودها، دو سری آزمایش انجام شد. گروه اول آزمایش‌ها بر روی بستر با شیب یکنواخت به‌عنوان آزمایش شاهد و گروه دوم با ایجاد تغییر شیب ناگهانی در انتهای فلوم انجام شدند. در مجموع، ۵۴ آزمایش با سه تکرار برای هر آزمایش ( $3 \times 54 = 162$ ) انجام گرفت. آزمایش‌ها بر اساس تغییرات شیب بستر اصلی جریان در سه گروه انجام شد و در هر شیب مقادیر دبی، عرض و عمق کانال تغییر داده شد. شرایط جریان برای مشابهت با رودخانه‌های طبیعی در کلیه آزمایش‌ها متلاطم زیر (Da Silva و همکاران، ۲۰۰۶) ایجاد شد. جدول ۱، خلاصه‌ای از مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته را نشان می‌دهد.

برای انجام هر آزمایش، پیش از برقراری جریان درون کانال، جریان آب به صورت معکوس به وسیله دو لوله زهکش به داخل بستر برقرار شد تا رسوبات بستر کاملاً اشباع شوند و در طول زمان اصلی آزمایش دبی ثابت در کانال برقرار باشد. پس از آن دبی ورودی به کانال، از مقادیر کم تا مقدار نهایی برای جلوگیری از

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات آزمایش‌ها

دبی جریان $Q$ ( $l s^{-1}$ )	شیب کانال $S$	نسبت عرض به عمق $B/h$	عدد فرود $Fr$	عدد رینولدز زبری $Re^*$	عدد رینولدز ریزش کناره $Re$
۰/۰۶۲، ۰/۰۷۲، ۰/۰۸۲	۰/۰۰۷، ۰/۰۱۴، ۰/۰۲۱	$B/h > 1.0$	$Fr < 1$	$Re^* > 40$	$Re > 2000$

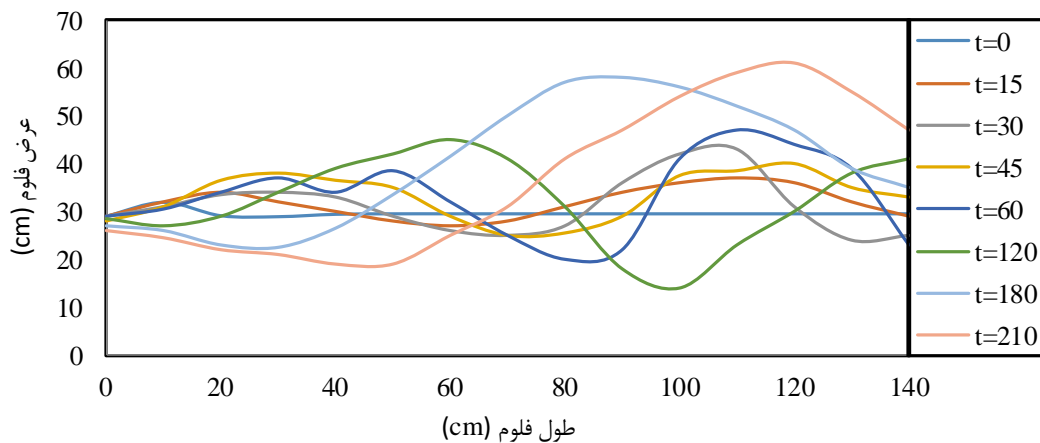
رخداد تغییر ناگهانی شیب، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تعداد خم‌های پیچان‌رودی ایجاد شده به واسطه شیب بسیار تند در کانال نسبت به آزمایش شاهد کمتر است. با توجه به وجود شیب بسیار تند در انتهای کانال، موج‌های ایجاد شده در انتهای فلوم دارای دامنه و عرض بزرگ‌تری نسبت به موج‌های بالادست فلوم هستند. در آزمایش‌های شاهد، یک مرحله از جابه‌جایی خم‌ها با تجمع رسوبات فرسایش یافته از دیواره داخلی و ایجاد بارهای نقطه‌ای در اطراف آن و متمایل به پایین دست راس صورت می‌گیرد. این مرحله، مرحله مهاجرت طولی در جهت پایین دست

## نتایج و بحث

خم‌های پیچان‌رودی دارای یک دوره تکامل نسبت به زمان هستند که این دوره در دو گروه آزمایش انجام گرفته در آزمایشگاه مشاهده شد. در آزمایش‌های شاهد که بدون حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب انجام گرفتند، با شروع جریان در کانال، پیچان‌رودی با هندسه‌ای نزدیک به کانال مستقیم (خم‌های کوتاه و دامنه‌های کم) ایجاد شد که در جهت پایین دست مهاجرت داشت. در این مرحله، چهار یا پنج خم در طول فلوم ایجاد شد که این نتایج به وسیله Terminin (۲۰۰۹) در شرایط بدون تغییر شیب ناگهانی و با سرعت کم مهاجرت نیز گزارش شده است. اما با وجود

عرضی همچنان بالا است و هم‌زمان توسعه عرضی به‌علت نرخ بالای فرسایش دیواره خارجی و نرخ پایین رسوب‌گذاری و ایجاد بارهای نقطه‌ای به‌وسیله رسوبات ریزدانه در دیواره داخلی نسبت به آزمایش‌های شاهد کمتر است. در نتیجه آن، جابه‌جایی خم‌ها در طول فلوم، بیشتر از جابه‌جایی عرضی آن‌ها است. با گذشت زمان، راس خم‌های پیچان‌رودی در آزمایش‌های شاهد به بالادست کشیده شد و مهاجرت به بالادست در خم‌ها مشاهده شد. اما، این مرحله از تکامل پیچان‌رودها به‌صورت بسیار جزئی در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب دیده شد. این رخداد جزئی در زمان ۱۸۰ دقیقه برای آزمایش‌ها در حضور تغییر ناگهانی شیب در شکل ۴ قابل مشاهده است. به‌علت افزایش شیب بستر در اثر تعدیل شیب ناشی از رخداد ناگهانی شیب در پایین دست و فرسایش پیشانی آن به‌وسیله جریان در طول زمان، تا انتهای آزمایش همچنان مهاجرت طولی با سرعتی بالاتر و توسعه عرضی با سرعتی پایین‌تر نسبت به آزمایش‌های شاهد ثبت شد.

نامیده می‌شود که موجب افزایش ضریب خمیدگی خم‌ها (نسبت طول خم در مسیر جریان به طول موج خم) می‌شود. اما در آزمایش‌های با حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب در انتهای کانال، میزان فرسایش دیواره خارجی به‌وسیله جریان و در نتیجه آن ریزش دیواره بسیار بالاتر از آزمایش‌های شاهد بوده و علاوه بر آن، رسوب‌گذاری در دیواره داخلی و تشکیل بارهای نقطه‌ای محدود بود. لذا، ضریب خمیدگی در این آزمایش‌ها کمتر از آزمایش‌های شاهد بود و این امر باعث مهاجرت طولی زیاد خم‌ها به پایین دست می‌شد. در ادامه، با توجه به افزایش ضریب خمیدگی، انتظار می‌رفت که همانند آزمایش‌های شاهد و مشابه با روند گزارش شده در شبیه‌سازی عددی Duan و Julien (۲۰۱۰)، میزان مهاجرت طولی در جهت پایین دست، کاهش داشته باشد و جابه‌جایی عمده خم‌ها به‌صورت عرضی و در جهت توسعه خم‌های پیچان‌رودی باشد. اما، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میزان مهاجرت طولی در جهت پایین دست نسبت به توسعه



شکل ۴- موقعیت خط‌القعر کانال در زمان‌های مختلف برای دبی  $0.062 \text{ (l.s}^{-1}\text{)}$ ، شیب  $0.14$  و عرض  $3/8 \text{ (cm)}$

رودخانه و رسیدن آن به تعادل و پایداری بیشتر در شیب کمتر است. Gurimaud و همکاران (۲۰۱۶)، نتایج پژوهش‌های خود بر روی رخداد تغییر ناگهانی شیب در کانال‌های باریک و مستقیم انجام دادند و نتایجی مبنی بر پیشروی تغییر ناگهانی شیب به بالادست کانال و افزایش شیب بستر کانال را گزارش کردند که این مسئله در کانال‌های پیچان‌رودی نیز

در پایان آزمایش‌ها، اختلاف ارتفاع ناگهانی انتهای کانال با توجه به فرسایش‌پذیری بستر و عملکرد خم‌های پیچان‌رودی در فلوم کاملاً از بین رفته است و موجب افزایش شیب بستر فلوم و بستر پیچان‌رود شده است. همچنین، خم‌های بزرگ در انتهای فلوم و حتی در برخی آزمایش‌ها تنها یک خم بزرگ در کل فلوم ایجاد شده است. این حالت در جهت تکامل بیشتر

تغییر ناگهانی شیب برای تبدیل آن به شیب در کل مسیر است.

علاوه بر آن، در ابتدای تکامل پیچان‌رودها بیشترین جابه‌جایی‌ها در راستای طولی و به سمت پایین دست است که مطابق با روند شبیه‌سازی عددی انجام گرفته به وسیله Da Silva و Bahar (۲۰۰۳) می‌باشد. با این تفاوت که در مدل‌سازی عددی شرایط خم‌ها و محیطی کاملاً کنترل شده است. اما، در شرایط آزمایش‌های انجام گرفته وجود عامل تغییر ناگهانی شیب موجب افزایش سرعت مهاجرت طولی و حرکت مهاجرتی خم‌ها تا انتهای آزمایش و تکامل خم‌ها شده است که این افزایش در اثر رخداد تغییر ناگهانی شیب در مقایسه با آزمایش‌های شاهد کاملاً مشهود می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که وجود تغییرات مورفولوژیکی از این دست، موجب افزایش سرعت مهاجرت طولی پیچان‌رودها به پایین دست می‌شود. درصد افزایش سرعت مهاجرت طولی در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۳۲ درصد افزایش در اثر رخداد تغییر ناگهانی شیب در سرعت مهاجرت طولی ایجاد شده است.

همچنین، با توجه به شکل ۵، در یک شیب بستر مشخص، سرعت مهاجرت طولی پیچان‌رود در هر دو گروه آزمایش‌ها وابسته به میزان دبی عبوری از کانال است. به نحوی که با افزایش دبی، سرعت مهاجرت افزایش یافته است و در همه دبی‌ها و شیب‌ها، تغییرات سرعت مهاجرت طولی نسبت به زمان تکامل پیچان‌رود به صورت نمایی می‌باشد. علاوه بر این، با مقایسه نمودارهای الف، ب و ج در شکل ۵، مشاهده می‌شود که افزایش شیب بستر کانال موجب افزایش سرعت مهاجرت طولی پیچان‌رود شده است که البته به علت رخداد تغییر ناگهانی شیب در مسیر جریان نیز این میزان جابه‌جایی در ابتدای زمان تکامل پیچان‌رود بسیار بالاتر بوده است.

مشاهده شد و نتایج برای پیچان‌رودها نیز مشابه کانال‌های مستقیم می‌باشد.

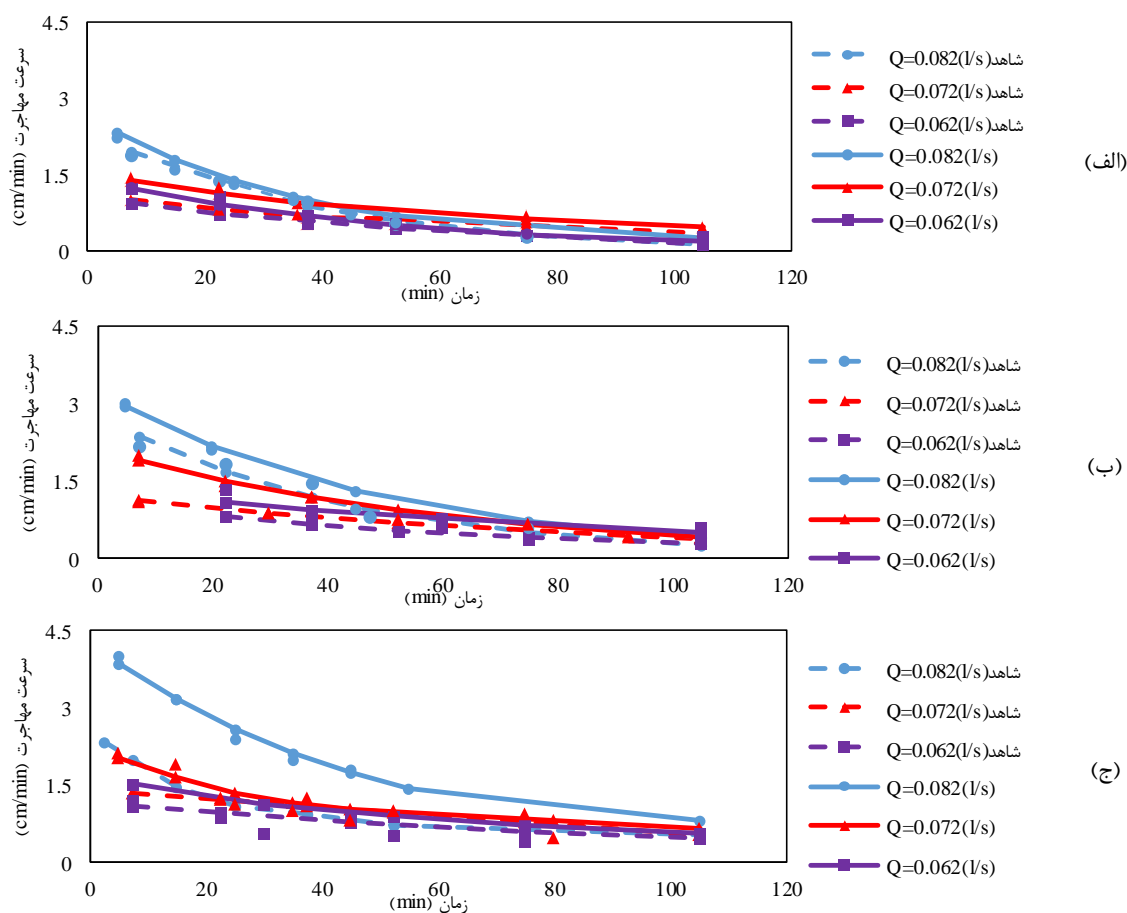
در همه آزمایش‌ها، ریزش کناره، انتقال رسوبات بستر و کناره به وسیله جریان و رسوب‌گذاری مشاهده شد. مخصوصاً همراه بودن رسوبات ریزدانه با رسوبات درشت‌دانه موجب رسوب‌گذاری و تشکیل بارهای میله‌ای در کناره داخلی در مقابل فرسایش و ریزش کناره خارجی به جابه‌جایی پیچان‌رود تشکیل شده در فلوم، منجر شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این جابه‌جایی در دو راستای طولی و عرضی در نقاط مختلف کانال در گام‌های زمانی، رخ داده است. در این مطالعه، علاوه بر مطالعه تاثیر رخداد تغییر ناگهانی شیب بر سرعت مهاجرت طولی و توسعه عرضی، به بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر مهاجرت طولی و توسعه عرضی پیچان‌رودها نیز پرداخته شده است.

**تاثیر دبی و شیب بستر در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب انتهایی بر سرعت مهاجرت پیچان‌رودها:** در کلیه آزمایش‌ها و نتایج حاصل از محاسبه سرعت مهاجرت (شکل ۵) مشاهده می‌شود که برای هر سه دبی (Q)، سه عرض (b) و سه شیب بستر (s) مورد بررسی در آزمایش‌های بدون حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب (آزمایش‌های شاهد) و با حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب در حالت کلی، سرعت مهاجرت طولی با زمان تکامل پیچان‌رود کاهش یافته است.

با توجه به رخداد تغییر ناگهانی شیب پایین دست و اختلاف ارتفاع موجود در مسیر جریان در آزمایش‌های گروه دوم این پژوهش، جریان در جهت کاستن اختلاف ارتفاع و تعدیل شیب، خم‌هایی در مسیر ایجاد می‌کند که جابه‌جایی آن‌ها به سمت پایین دست، تحت تاثیر این تغییر ناگهانی شیب قرار دارد. سرعت بالای مهاجرت به سمت پایین دست در زمان‌های اولیه در مقایسه با آزمایش‌های شاهد ناشی از تغییر ناگهانی شیب و فرسایش در محل پیشانی

جدول ۲- درصد افزایش سرعت توسعه عرضی در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب

شیب	دبی (ls <sup>-1</sup> )								
	۰/۰۶۲			۰/۰۷۲			۰/۰۸۲		
عرض کانال (cm)	۵	۳/۸	۲/۵	۵	۳/۸	۲/۵	۵	۳/۸	۲/۵
آزمایش شاهد	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۸۰	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۸۶	۱/۰۴
آزمایش تغییر شیب	۰/۷۰	۰/۷۸	۱/۰۵	۰/۸۸	۰/۹۵	۱/۲	۱	۱/۱۹	۱/۴۳
درصد افزایش سرعت	۳۲/۸۳	۳۴/۹۰	۳۰/۴۴	۳۰/۷۲	۳۵/۱۰	۳۰/۵۳	۳۷/۸۵	۳۸/۷۹	۳۷/۰۱
آزمایش شاهد	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۵۴	۰/۷۵	۱/۰۹
آزمایش تغییر شیب	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۸۳	۰/۸۹	۱	۱/۱۱	۰/۷۱	۰/۹۸	۱/۵۱
درصد افزایش سرعت	۳۰/۸۵	۳۱/۴۵	۳۵/۶۵	۲۹/۶۸	۳۰/۸۹	۳۷/۸۱	۳۰/۹۵	۳۱/۵۵	۳۹/۵۳
آزمایش شاهد	۰/۷۰	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۳	۱	۱	۱/۰۸
آزمایش تغییر شیب	۰/۹۶	۰/۹۷	۱/۰۴	۱/۲۲	۱/۲۱	۱/۲۵	۱/۲۹	۱/۳۳	۱/۴۳
درصد افزایش سرعت	۳۶/۶۹	۳۲/۸۹	۳۲/۹۶	۳۸/۴۹	۳۳/۳۳	۳۳/۸۵	۲۸/۱۹	۳۲/۸۹	۳۲/۲۲



شکل ۵- سرعت مهاجرت نسبت به زمان تکامل پیچان رود برای آزمایش‌های بدون رخداد تغییر ناگهانی شیب (شاهد) و در حضور رخداد

تغییر ناگهانی شیب برای دبی‌های مختلف، الف)  $S=0/007$ ,  $b=3/8$  (cm), ب)  $S=0/014$ ,  $b=2/5$  (cm) و ج)  $S=0/021$ ,  $b=5$  (cm)

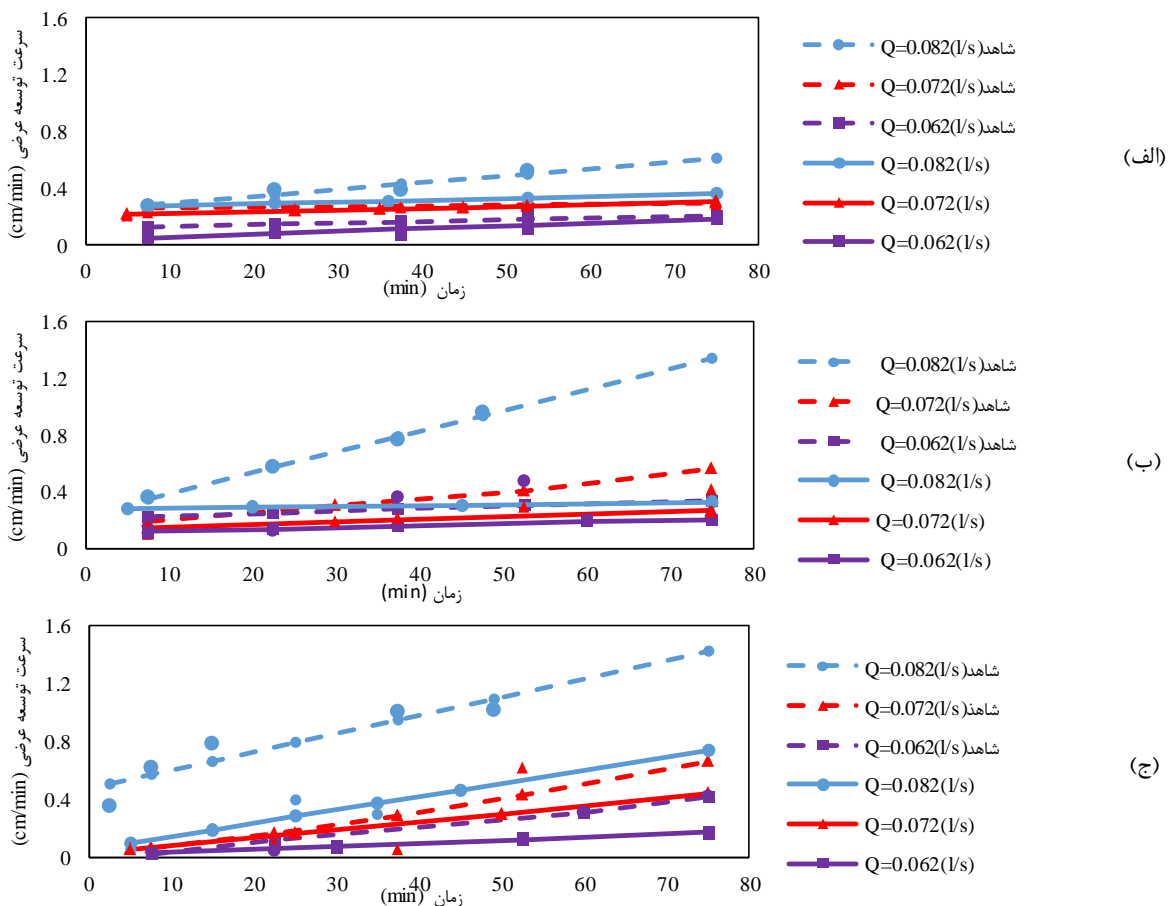
برای سه شیب ۰/۰۰۷، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۲۱ در سه دبی جریان ۰/۰۶۲، ۰/۰۷۲ و ۰/۰۸۲ (LS<sup>-1</sup>) برای سه عرض کانال ۲/۵، ۳/۸ و ۵ (cm) نشان می‌دهد. با توجه به این‌که تا زمانی که پیچان رود شکل نگیرد، توسعه عرضی و سرعت توسعه وجود ندارد، در

تأثیر دبی و شیب بستر در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب انتهایی بر سرعت توسعه پیچان رودها: شکل ۶، سرعت‌های توسعه محاسبه شده در دو گروه آزمایشی بدون حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب و با حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب



آزمایش‌های شاهد، کاهش سرعت توسعه عرضی و جابه‌جایی خم‌ها در عرض فلوم را به‌دنبال داشته است که این موضوع با توجه به افزایش سرعت مهاجرت طولی پیچان‌رود در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب انتهایی کانال قابل توجیه است. چرا که افزایش سرعت مهاجرت طولی به پایین‌دست روند انتقال رسوبات فرسایش یافته افزایش یافته است و این امر مانع از رسوب‌گذاری و جابه‌جایی دیواره‌های جانبی کانال در اثر فرسایش و رسوب‌گذاری می‌شود. همچنین، جدول ۳، درصد کاهش سرعت توسعه عرضی در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب را نشان می‌دهد، این کاهش حدوداً ۳۶ درصد است.

زمان‌های ابتدایی تکامل پیچان‌رود، در هر دو گروه آزمایشی سرعت توسعه عرضی کم می‌باشد. اما، به‌علت رخداد تغییر ناگهانی شیب در پایین‌دست کانال جریان غالباً در حال کاهش شیب مسیر بوده است و همین عامل موجب جابه‌جایی خم‌های ابتدایی در عرض فلوم شده است و از همان ابتدا، سرعت توسعه برای خم‌ها قابل مشاهده و محاسبه است. با گذشت زمان و تکامل پیچان‌رود سرعت توسعه عرضی افزایش می‌یابد که این نتیجه مطابق با یافته‌های Da Silva و Bahar (۲۰۰۳) می‌باشد و این افزایش سرعت توسعه عرضی پیچان‌رودها نسبت به زمان روندی خطی دارد (شکل ۶). حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب در مقایسه با



شکل ۶- سرعت توسعه نسبت به زمان تکامل پیچان‌رود برای آزمایش‌های بدون رخداد تغییر ناگهانی شیب (شاهد) و در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب برای دبی‌های مختلف، الف)  $S=0/007$  (cm),  $b=3/8$  (ب)  $S=0/014$  (cm),  $b=2/5$  (ج)  $S=0/021$  (cm),  $b=5$

می‌شود. در یک شیب ثابت، حتی با وجود رخداد تغییر ناگهانی شیب در انتهایی کانال تاثیر افزایش دبی بر سرعت توسعه عرضی به‌صورت افزایش سرعت

علاوه بر این، مقایسه سه گروه نمودارهای شکل ۶ در دو گروه آزمایشی نشان می‌دهد، افزایش شیب باعث افزایش در سرعت توسعه عرضی پیچان‌رود

آزمایشگاهی بررسی شد و با توجه به تکامل پیچان رودها در طول زمان و ایجاد شرایط تعادل به- وسیله جریان، میزان جابه‌جایی پیچان رود در دو راستای طولی و عرضی کانال و سرعت جابه‌جایی اندازه‌گیری شد. برای مطالعه تاثیر حضور تغییر شیب ناگهانی در انتهای فلووم، از یک گروه آزمایش بر روی بستر با شیب یکنواخت به‌عنوان آزمایش‌های شاهد و گروه دوم آزمایش‌ها با حضور تغییر شیب ناگهانی در انتهای کانال استفاده شد و در ادامه تاثیر تغییرات دبی، شیب و عرض کانال بر روی سرعت مهاجرت طولی و توسعه عرضی کانال با حضور و عدم حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب بررسی شد.

توسعه عرضی مشاهده شد. بنابراین، در حالت کلی، می‌توان دبی جریان و شیب بستر کانال را دو عامل بسیار تاثیرگذار بر سرعت توسعه عرضی دانست.

### نتیجه‌گیری

مطالعه پدیده‌های طبیعی همچون پیچان رودها در آزمایشگاه، شبیه‌سازی، بررسی و مطالعه دقیق رژیم جریان، رسوب و رخ دادهای حاصل از تعاملات این دو شامل رسوب‌گذاری، فرسایش و ریزش کناره را امکان‌پذیر می‌سازد. در این پژوهش، تکامل و جابه‌جایی نیم‌رخ طولی پیچان رودها با حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب در انتهای مسیر جریان به‌صورت

جدول ۳- درصد کاهش سرعت توسعه عرضی در حضور رخداد تغییر ناگهانی شیب

شیب	دبی (Ls <sup>-1</sup> )			۰/۰۸۲			۰/۰۷۲			۰/۰۶۲		
	عرض کانال (cm)	۲/۵	۳/۸	۵	۲/۵	۳/۸	۵	۲/۵	۳/۸	۵	۲/۵	۳/۸
۰/۰۰۷	آزمایش شاهد	۰/۶۲	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲	۳/۸	۵
	آزمایش تغییر شیب	۰/۴	۰/۳	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۳	۳/۸	۵
	درصد کاهش سرعت	-۳۵/۲	-۳۷/۹۰	-۳۷/۵۲	-۳۱/۸۸	-۳۶/۲۹	-۳۳/۶۲	-۳۵/۲۳	-۳۵/۴۸	-۳۶/۶۳	۳/۸	۵
۰/۰۱۴	آزمایش شاهد	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۱۵	۳/۸	۵
	آزمایش تغییر شیب	۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۰	۳/۸	۵
	درصد کاهش سرعت	-۳۴/۹۵	-۳۹/۲۶	-۳۶/۰۲	-۴۴/۳۰	-۴۲/۹۶	-۳۱/۸۲	-۳۱/۷۳	-۲۷/۳۲	-۳۰/۱۷	۳/۸	۵
۰/۰۲۱	آزمایش شاهد	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۶۳	۰/۵۳	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۲۲	۳/۸	۵
	آزمایش تغییر شیب	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۱۳	۳/۸	۵
	درصد کاهش سرعت	-۳۶/۱۹	-۴۲/۸۴	-۳۸/۰۲	-۳۷/۱۹	-۴۲/۳۰	-۳۷/۹۰	-۲۳/۳۳	-۳۶/۸۴	-۳۹/۹۵	۳/۸	۵

است، باز هم مهاجرت طولی با سرعت بالا مشاهده شد. سرعت مهاجرت در ابتدا به‌علت وجود تغییر ناگهانی شیب در مسیر جریان و فرسایش و انتقال رسوبات، زیاد و با گذشت زمان، تکامل پیچان رود و تبدیل تغییر ناگهانی شیب به شیب تند در مسیر جریان به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که این سرعت وابسته به‌میزان دبی عبوری و شیب کانال است. با وجود رخداد تغییر ناگهانی شیب در پایین دست کانال، سرعت توسعه عرضی در کل زمان تکامل پیچان رود قابل مشاهده و محاسبه است و این

نتایج آزمایشگاهی نشان داد، رخداد تغییر ناگهانی شیب در پایین دست، موجب فرسایش در محل پیشانی تغییر ناگهانی شیب و کاهش و انتقال آن به بالادست از طریق کاهش ارتفاع و تبدیل آن به شیب در طول کل فلووم شد. علاوه بر آن، جریان با ایجاد خم‌های پیچان‌رودی بزرگ و افزایش مسیر حرکت جریان در فلووم موجب کاهش بیشتر شیب مسیر جریان شد. در طول آزمایش‌ها به‌علت وجود تغییر ناگهانی شیب در انتهای کانال، حتی در مراحل تکامل پیچان رود که توسعه عرضی حرکت اصلی جابه‌جایی خم‌ها در فلووم

است. با توجه به مهاجرت و توسعه پیچان رودها، انجام پژوهش‌ها بر روی عوامل موثر در کاهش سرعت مهاجرت و توسعه پیچان رودها تحت شرایط مختلف ژئومورفولوژیک بستر می‌تواند تکمیل‌کننده این پژوهش باشد. همچنین، نتایج حاصل از این پژوهش‌ها می‌تواند مورد استفاده سازمان‌های مختلف نظیر اداره کل راه و شهرسازی، اداره کل منابع طبیعی و سازمان جهاد کشاورزی در بخش فعالیت‌های عمرانی و کشاورزی جهت توسعه پایدار در حاشیه پیچان رودها به صورت کاربردی قرار گیرد.

سرعت به صورت خطی متناسب با دبی عبوری و شیب کانال افزایش یافت. اما، با وجود تغییر ناگهانی شیب پایین دست کانال، مقادیر آن در دوره تکامل خم‌های پیچان رودی، پایین تر از مقادیر مشاهده شده در آزمایش‌های شاهد و حتی شبیه‌سازی‌های عددی می‌باشد. نتایج نشان داد که سرعت مهاجرت طولی جریان با حضور رخدادهای تغییر ناگهانی شیب، نسبت به آزمایش‌های شاهد بر روی بستر با شیب یکنواخت ۳۲ درصد افزایش و در همین زمان سرعت توسعه عرضی نسبت به آزمایش‌های شاهد، ۳۶ درصد کاهش داشته

### منابع مورد استفاده

1. Bennett, S.J, C.V. Alonso, S.N. Prasad and M.J.M. Römkens. 2000. Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resource Research*, 36: 1911–1922.
2. Braudrick, C.A, W.E. Dietrich, G.T. Leverich and L.S. Sklar 2009. Experimental evidence for the conditions necessary to sustain meandering in coarse-bedded rivers. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(40): 16936–16941.
3. Briaud, J.L., H.C. Chen, K.A. Chang, Y.A. Chung, N. Park, W. Wang and P.H. Yeh. 2007. Establish guidance for soil properties based prediction of meander migration rate. *Zachry Department of Civil Engineering, Texas A and M University. Report, FHWA/TX-07/0-4378-1. Texas, USA, 121 pages.*
4. Brice, J.C. 1982. Stream channel stability assessment. *Federal Highway Administration. Report, FHWA/RD-82/021, Washington D.C., 41 pages.*
5. Brush, L.M. and M.G. Wolman. 1960. Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study. *Geological Society of America Bulletin*, 71: 59–74.
6. Cantelli, A. and T. Muto. 2014. Multiple knickpoints in an alluvial river generated by a single instantaneous drop in base level: experimental investigation. *Earth Surface Dynamics*, 2: 271–278.
7. Crosby, B.T. and K.X. Whipple. 2006. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. *Geomorphology*, 82: 16–38.
8. Da Silva, A.M.F. and S.M.H. Bahar. 2003. Migration and expansion of meander loops: a simulation model. *IAHR Congress, Thessaloniki, Greece*, 139-148.
9. Da Silva, A.M.F., T. El-Tahawy and W.D. Tape. 2006. Variation of flow pattern with sinuosity in sine-generated meandering streams. *Hydraulic Engineering*, 132: 1003-1014.
10. Duan, J.G. and P.Y. Julien. 2010. Numerical simulation of meandering evolution. *Hydrology*, 391: 34–46.
11. Frankel, K.L., F.J. Pazzaglia and J.D. Vaughn. 2007. Knickpoint evolution in a vertically bedded substrate, upstream-dipping terraces and Atlantic slope bedrock channels. *Geological Society of America Bulletin*, 119 (3-4): 476-486.
12. Friedkin, J.F. 1945. A laboratory study of the meandering of alluvial river. *U.S. Waterways Experiment Station*, 40 pages.
13. Gardner, T.W. 1983. Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 664–672.
14. Grimaud, J.L, C. Paola and V. Voller. 2016. Experimental migration of knickpoints: influence of style of base-level fall and bed lithology. *Earth Surface Dynamics*, 4: 11–23.
15. Holland, W.N and G. Pickup. 1976. Flume study of knickpoint development in stratified sediment. *Geological Society of America Bulletin*, 87: 76–82.
16. Hudson, P.F. and R.H. Kesel. 2000. Channel migration and meander-bend curvature in the lower Mississippi River prior to major human modification. *Geology*, 28(6): 531-534.
17. Li, Z., G.A. Yu, G.J. Brierley, Z. Wang. and Y. Jia. 2017. Migration and cutoff of meanders in the hyperarid environment of the middle Tarim River, northwestern China. *Geomorphology*, 276: 116–124.

18. Moores, R.B. 2002. Operation criteria for a movable bed flume in the hydraulics laboratory at the University of Wyoming. MSc Thesis, University of Wyoming, Laramie, 110 pages.
19. Nanson, G.C. and E.J. Hickin. 1986. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in Western Canada. Geological Society of America Bulletin, 97: 497-504.
20. Parker, R.S. 1977. Experimental study of drainage basin evolution and its hydrologic implications. Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, 90: 58 pages.
21. Rezaei Moghaddam, M.H. and K. Khoshdel. 2009. A research on sinuosity of Ahar Chay meanders in Ozomdel Plain, Varzeghan, East Azerbaijan, Iran. Geography and Environmental Planning, 20(3): 110-112 (in Persian)
22. Seminara, G. 2006. Meanders. Fluid Mechanics, 554: 271–297.
23. Terminin, D. 2009. Experimental observations of flow and bed processes in large-amplitude meandering flume. Hydraulic Engineering, 135: 575-587.
24. Whipple, K.X. 2004. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32: 151–185.
25. Yamani, M., A. Goorabi and S. Alizadeh. 2015. Prediction of Kordan River geometric change in the meandering range. Quarterly Journal of Environmental Erosion Research, 3(19): 1-14 (in Persian).
26. Zen, S., G. Zolezzi, M. Toffolon and A.M. Gurnell. 2016. Biomorphodynamic modelling of inner bank advance in migrating meander bends. Advances in Water Resources, 93: 166–181.