اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۵، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۷، ص ۴۷۰-۴۶۱

تأثیر پوشش گیاهی غیرمستغرق سیلاب‌دشت بر تغییرات بستر رودخانه‌های مئاندری ملایم با مقطع مرکب

الهه نیکوبخت[۱]، حسین حمیدی‌فر[۲*]، علیرضا کشاورزی[۳]

۱. کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. استادیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳. استاد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۷/۱۴)

چکیده

یکی از مسائل مهم و درخور توجه در مهندسی رودخانه، آب‌شستگی و تغییرات توپوگرافی بستر رودخانه‌ها در محل قوس است. در بسیاری از رودخانه‌ها هنگام وقوع سیل، جریان از مقطع اصلی خارج می‌شود و دشت‌های سیلابی را فرا می‌گیرد. ورود جریان در دشت‌های سیلابی سازوکار هیدرولیکی پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند. استفاده از پوشش گیاهی از جمله روش‌های غیرسازه‌ای برای حفاظت از رودخانه‌هاست. در این تحقیق تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر توپوگرافی بستر پیچان‌رود ملایم با مقطع مرکب بررسی آزمایشگاهی شد. آزمایش‌ها در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت با عمق نسبی ۰/۳۵ با دو تراکم یک و دو ردیف پوشش گیاهی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بیان می‌کند که در حضور پوشش گیاهی تغییرات عرضی بستر نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی کمتر شده و شیب عرضی بستر یکنواخت‌تر است. همچنین، حضور پوشش گیاهی سبب شده است که موقعیت وقوع بیشترین عمق آب‌شستگی در همهٔ طول پیچان‌رود به سمت قوس خارجی تغییر یابد. به‌طور کلی، تغییرات تراز بستر در حضور دو ردیف پوشش گیاهی پراکندگی کمتری نسبت به حالت یک ردیف پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی داشته است. در برخی موارد در حضور پوشش گیاهی، ۸۸ درصد آب‌شستگی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی کاهش داشته است.

کلیدواژگان: آب‌شستگی، پوشش گیاهی، پیچان‌رود، توپوگرافی، کانال مرکب.

* نویسندهٔ مسئول

Email: hamidifar@shirazu.ac.ir

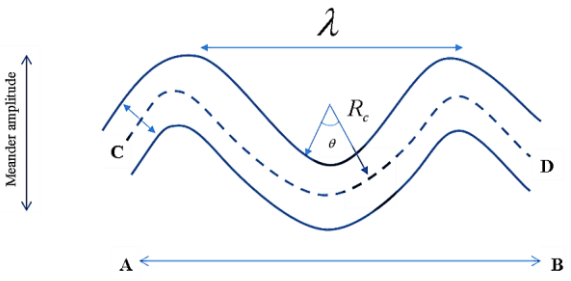
مقدمه

پیدایش و شکل‌گیری آبراهه‌های طبیعی متأثر از عوامل مختلفی مانند شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی و جغرافیایی است. در این میان، می‌توان به بده رودخانه، مقاومت خاک در برابر فرسایش، شکل هندسی و مشخصات و مقدار رسوب انتقالی به عنوان عوامل مهم اشاره کرد. شکل و ابعاد رودخانه پس از تشکیل آن تا زمانی که تغییر عمده‌ای در یک یا چند عامل یادشده به وجود نیامده باشد، نسبتاً ثابت است. ممکن است رودخانه‌ها در سازندهای مصالح آبرفتی فرسایشی پدیدار شوند. در چنین حالتی تمایل همیشگی برای تغییر پیوستهٔ موقعیت رودخانه‌ها از طریق فرسایش و رسوب‌گذاری قابل مشاهده است [۱]. متداول‌ترین نوع تقسیم‌بندی پلان رودخانه‌های آبرفتی شامل رودخانه‌های مستقیم، شریانی و پیچان‌رودی می‌شود [۲].

رودخانه‌هایی که طول آنها حدود ۱۰ برابر عرض آبراههٔ مستقیم باشد، رودخانهٔ مستقیم اند. رودخانه‌های مستقیم معمولاً از نظر استاتیکی پایدارند [۳]. رودخانه‌های شریانی معمولاً ناپایدارند و می‌توانند مقادیر زیادی رسوب را حمل کنند. رودخانه‌های شریانی سواحل خود را فرسایش می‌دهند، آب‌شستگی بستر و شکل هندسی آنها متناسب با دبی، شیب دره، و رسوب ورودی بالادست است. این رودخانه‌ها دشت سیلابی در کنارهٔ آبراهه دارند و گاهی جریان از سواحل و کناره‌ها سرریز می‌کند و در عرض دشت سیلابی پخش می‌شود.

رودخانه‌های پیچان‌رودی بسیار متداول هستند و به‌ندرت الگوی با قاعدهٔ سینوسی دارند. این رودخانه‌ها معمولاً از لحاظ دینامیکی پایدارند. نوسانات مقطع آنها تقریباً حول یک موقعیت متوسط از الگوی جریان حرکت کرده و به پایین‌دست پیشرفت می‌کند. طول موج پیچان‌رود رودخانه‌های آبرفتی حدود شش برابر عرض کانال است در حالی که شعاع پیچان‌رود می‌تواند تا ۱۷ برابر عرض آبراهه باشد، این نسبت‌ها هنگامی که رودخانه شریانی باشد به‌ترتیب ۱۱ و ۲۷ هستند [۳]. مشخصات یک حلقهٔ پیچان‌رود شامل شعاع انحنا R، عرض رودخانه B، طول موج یا طول پیچان‌رود λ، دامنهٔ پیچان‌رود Meander amplitude، ضریب خمیدگی Sionsity می‌شود.

نسبت CD به AB را ضریب خمیدگی می‌گویند. اگر خمیدگی از ۱/۵ بیشتر باشد، رودخانه پیچان‌رود است (شکل ۱) [۳].



شکل ۱. نمای شماتیک از یک کانال پیچان‌رودی

مطالعه دربارهٔ پدیدهٔ آب‌شستگی از حدود ۱۵۰ سال پیش شروع شده، اما به‌دلیل پیچیدگی‌های خاص آن، هنوز از موضوعات مورد علاقهٔ محققان هیدرولیک است. یکی از مسائل مهم و درخور توجه در مهندسی رودخانه، آب‌شستگی و تغییرات توپوگرافی بستر رودخانه‌ها در محل قوس است. سامان‌دهی رودخانه‌ها در محل قوس با اهدافی نظیر جلوگیری از تغییر انحنای قوس، جلوگیری از تغییرات مورفولوژی و تراز بستر، حفاظت از دیوار خارجی در برابر فرسایش، کنترل رسوب‌گذاری در مجاور دیوار داخلی بخش مهمی از مدیریت رودخانه‌هاست [۴]. آباد و گرسیا [۵]، چن و تانگ [۶]، انگل و رهوداز [۷] و اصفهانی و کشاورزی [۸] به بررسی اهمیت آب‌شستگی و تکنیک‌های محافظت رودخانه به منظور مدیریت رودخانه‌ها پرداختند، اما با این وجود دینامیک شکل قوسی رودخانه‌ها و حرکت رسوبات در آنها ناشناخته است [۹].

کوچک‌ترین بی‌نظمی در شکل و پارامترهای رودخانه و انسداد موقت می‌تواند موجب بروز آشفتگی موضعی شود و با تشکیل جریان‌های برگشتی بازهٔ یادشده را به پیچان‌رودهایی تبدیل کند. به دلیل حرکت پیچان‌رودها به پایین‌دست و ناپایداری آنها، خاک‌های باارزش کناره‌ها شسته می‌شود و از بین می‌رود. علت اصلی این ناپایداری‌ها توزیع نامتقارن سرعت در عرض و طول رودخانه است. تراز سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می‌گیرد و این امر غرقابی‌شدن سیلاب‌دشت‌ها را، که نقاط تمرکز صنعت و تجارت هستند، تجدید می‌کند.

جریان‌های ثانویه به دلیل توزیع مومنتوم طولی و انتقال محل وقوع بیشترین سرعت به طرف جدار بیرونی سبب فرسایش آن شده و در مقابل، جریان‌های نزدیک به بستر مواد فرسایش‌یافته را به سمت جدار داخلی منتقل می کند و در آن ناحیه ته‌نشین می‌شود [۱۰]. جریان ثانویهٔ حرکت ذرات رسوب در سراسر بستر کانال در نتیجهٔ فرسایش در ساحل خارجی و رسوب‌گذاری بانک داخلی است، در نتیجه عمق جریان و سرعت در ساحل خارجی افزایش می‌یابد. از عوامل مهم در فرسایش رودخانه پوشش گیاهی حاشیهٔ رودخانه‌ها است و تخمین زده می‌شود که حضور پوشش گیاهی سبب افزایش مقاومت برشی دیواره‌ها و کاهش فرسایش و آب‌شستگی شود. در بسیاری از رودخانه‌ها هنگام وقوع سیل، جریان از مقطع اصلی خارج می‌شود و دشت‌های سیلابی را فرا می‌گیرد. ورود جریان در دشت‌های سیلابی سازوکار هیدرولیکی را پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که بیش از دو دهه توجه بسیاری از محققان مسائل رودخانه و سیلاب را به خود معطوف کرده است. هیدرولیک جریان در آبراهه‌های با مقطع مرکب تا اندازهٔ زیادی متفاوت از کانال‌های با مقطع ساده است. در دبی‌های زیاد، جریان در کانال اصلی لبریز و به دشت (های) سیلابی وارد می‌شود. به نظر می‌رسد که بر اثر تغییر شکل مقطع جریان و به دلیل تفاوت در زبری کانال اصلی و دشت سیلابی، ساختار جریان در مقاطع مرکب بسیار پیچیده باشد. انتقال مومنتوم بین کانال اصلی و دشت سیلابی مجاور آن، به کاهش دبی در کانال اصلی و درنتیجه کاهش ظرفیت انتقال جریان آبراهه منجر می‌شود [۱۱]. با اینکه در گذشته پوشش گیاهی سیلاب‌دشت‌ها برای کاهش مقاومت در مقابل جریان و افزایش ظرفیت انتقال از مسیر جریان حذف می‌شد، امروزه به منظور بهبود کیفیت آب و افزایش پایداری آبراهه‌ها و همچنین تغییر الگوی جریان، نه‌تنها پوشش گیاهی حذف نمی‌شود بلکه گیاهان در مسیر جریان کاشته می‌شوند. ویمینگ و همکارانش [۱۲] مدل عددی دوبعدی را برای بررسی اثر پوشش گیاهی مستغرق و غیرمستغرق بر توپوگرافی خم ارائه کردند و ضمن مقایسه با داده‌های طبیعی به این نتیجه دست یافتند که بیشتر مواقع پیش‌بینی‌های مدل با واقعیت تطابق داشته است. کشاورزی و همکارانش [۱۳] ضمن بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر مشخصات جریان و توپوگرافی بستر دریافتند که پوشش گیاهی تأثیر بسزایی در آب‌شستگی پیچان‌رود ملایم بررسی‌شده داشته است. طبق مشاهدات آنها حضور پوشش گیاهی در برخی موارد بیشترین عمق آب‌شستگی را تا ۷۷ درصد کاهش داده و موقعیت بیشترین عمق آب‌شستگی را به سمت خط مرکزی انتقال داده است. کاهش تنش برشی در طول خم در حضور پوشش گیاهی نیز از دیگر یافته‌های آنان است. حمیدی‌فر و همکارانش [۱۴] ضمن مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی و عددی تأثیر حضور پوشش گیاهی بر ظرفیت جریان در کانال مرکب نامتقارن دریافتند که مدل شینو و نایت برای محاسبهٔ دبی در مقطع مرکب نزدیک‌ترین تقریب را با نتایج آزمایش‌های آنها داشته است. با بررسی مطالعات پیشین می‌توان دریافت که تا کنون اثر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت در پیچان‌رودهای مرکب بررسی نشده است. در مطالعهٔ حاضر با انجام آزمایش‌هایی در فلوم پیچان‌رود به بررسی تغییرات توپوگرافی بستر و ارائهٔ راه حلی مؤثر برای حفاظت رودخانه از فرسایش پرداخته شده است. به این منظور، اثر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر تغییرات توپوگرافی در یک آبراههٔ پیچان‌رودی ملایم با مقطع مرکب به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است.

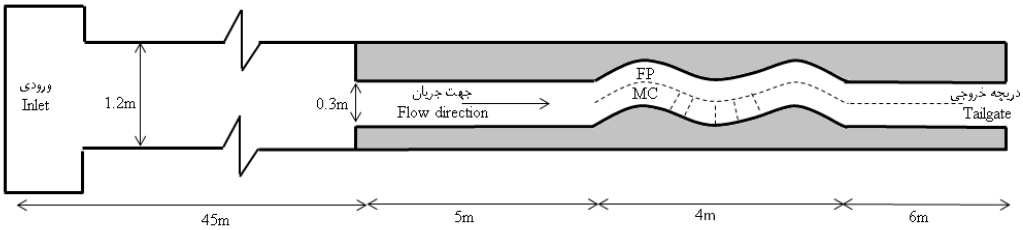
مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶۰ متر و عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شد. پیچان‌رود استفاده‌شده متشکل از سه قوس متوالی قوس با طول موج ۲/۱۵ و عرض کمرهٔ ۰/۷ متر است. دیواره و کف کانال از جنس ورق فلزی ساخته شد. برای تبدیل کانال با مقطع سادهٔ موجود به کانال مرکب، پله‌ای به عرض و ارتفاع یکسان ۰/۱۵ متر در مقطع عرضی کانال نصب شد. برای ایجاد جریان یکنواخت در ورودی قوس، در ابتدای فلوم مد نظر توسط قراردادن دیواره‌های فلزی هم‌عرض با مدل آزمایشگاهی مسیر مستقیمی به طول پنج متر قبل از ورود به قوس مستقر شد. به منظور تنظیم عمق جریان و برقراری جریان یکنواخت، از یک دریچهٔ انتهایی استفاده شد. شیب طولی بستر کانال اصلی و دشت سیلابی ثابت و مقدار آن ۰/۰۰۰۵ است. دیواره‌های جانبی و کف سیلاب‌دشت به‌ترتیب به صورت عمودی و افقی است.

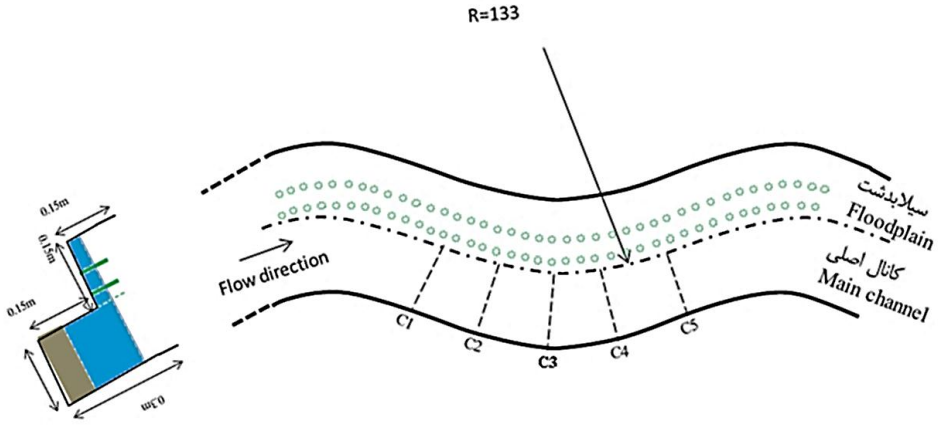
ابتدا آزمایشی برای بررسی الگوی جریان در کانال پیچان‌رود با مقطع ساده و بستر صلب انجام شد. مقادیر

جدول ۱. خلاصه‌ای از شرایط انجام آزمایش‌های مختلف شامل بدون پوشش، یک ردیف پوشش و دو ردیف پوشش

دبی (lit/s)	عمق جریان (mm)	عمق نسبی (-)	شعاع هیدرولیکی (mm)	سرعت متوسط (m/s)	عدد فرود Fr
۸	۸۰	۰/۳۵	۷۶	۰/۰۱۷	۰/۱۱۳



الف)



ب)

ج)

شکل ۲. الف) نمایی از پلان مدل کانال استفاده‌شده در تحقیق (FP سیلاب‌دشت، MC کانال اصلی)، ب) وضعیت مقاطع، پوشش گیاهی در قوس و کانال مرکب، پ) نمای بالادست مدل آزمایشگاهی

سرعت لحظه‌ای توسط دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی صوتی داپلر ADV انجام شد. سپس، آزمایش دیگری در حالت مقطع مرکب و بدون پوشش گیاهی روی دشت سیلابی اجرا شد. در آزمایش‌های بعدی به منظور تأثیر پوشش گیاهی بر ساختار جریان و آشفتگی، از میله‌های استوانه‌ای پلاستیکی با قطر ۱۰ میلی‌متر با آرایش یک و دو ردیف میله به‌عنوان پوشش‌گیاهی صلب در سیلاب‌دشت به‌صورت غیر مستغرق استفاده شد. آرایش پوشش گیاهی به صورت ردیفی در نظر گرفته شد. میله‌ها در دشت سیلابی با لایه‌ای از مصالح غیر قابل فرسایش شامل ذرات شن و ماسه در دو ردیف به فواصل ۰/۰۱۵ متر از یکدیگر قرار داده شدند. فاصلهٔ اولین ردیف از لبهٔ سیلاب‌دشت برابر ۰/۰۷۵ متر است. همچنین، در کف کانال اصلی لایه‌ای به ضخامت ۰/۱ متر از مصالح قابل فرسایش شامل رسوبات با اندازهٔ متوسط ۰/۰۸ میلی‌متر قرار داده شد. آزمایش‌ها هر سه حالت بدون پوشش گیاهی، یک ردیف پوشش گیاهی و دو ردیف پوشش گیاهی، با درنظرگرفتن عمق نسبی (نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق جریان در کانال اصلی) برابر ۰/۳۵، دبی هشت لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب در سیلاب‌دشت ۰/۸ متر انجام شد (جدول ۱). برای قرائت توپوگرافی بستر از متر لیزری استفاده شد و داده‌برداری‌ها در پنج مقطع عرضی C1، C2، C3، C4 وC5 که به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ ابتدای قوس تا انتهای قوس هستند (شکل ۲) در فواصل یک سانتی‌متر واقع در مقطع عرضی پیچان‌رود انجام شد.

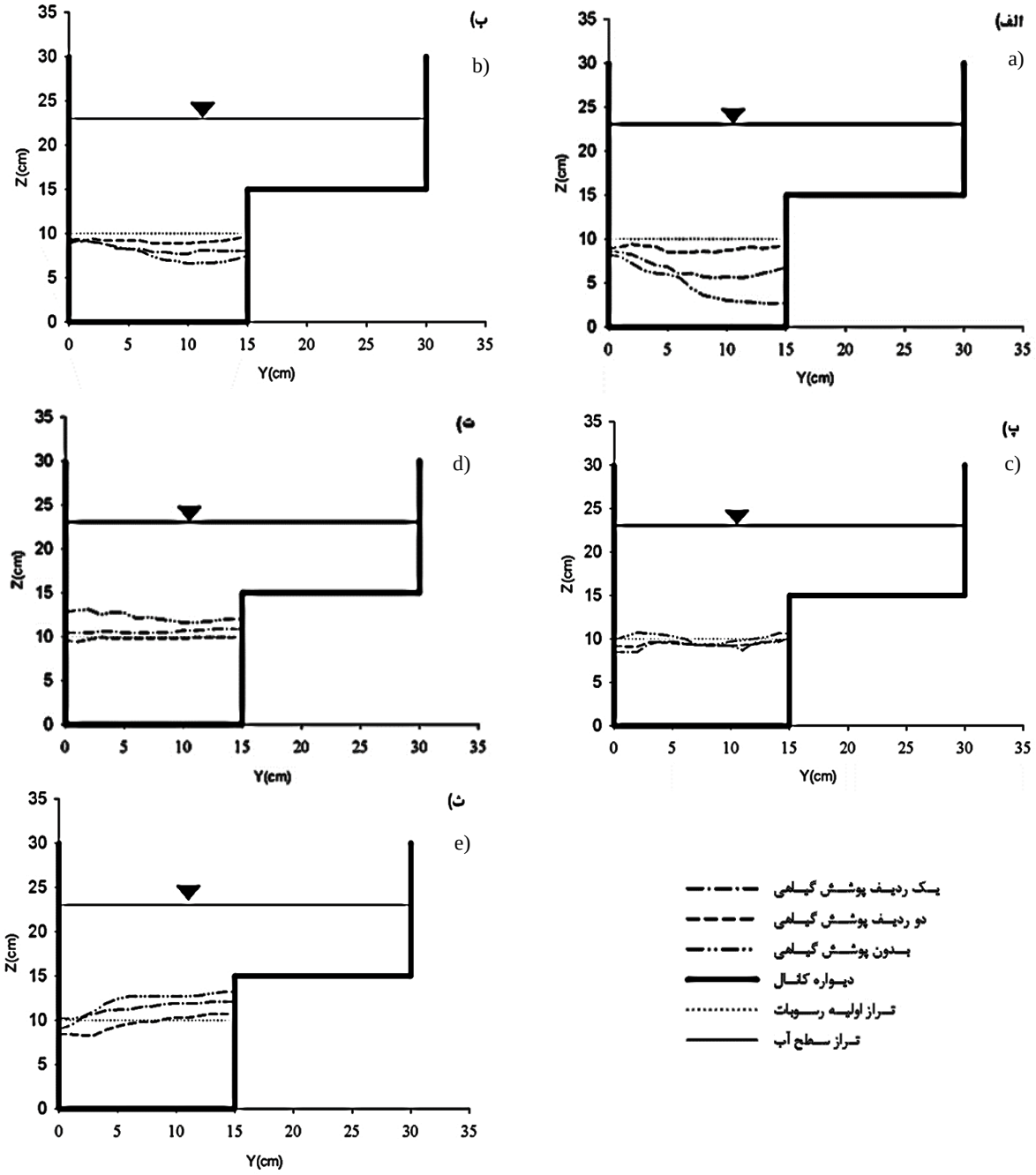
نتایج و بحث

بررسی تغییرات توپوگرافی بستر در آزمایش‌های مختلف در قوس ملایم

در شکل ۳ (الف-ث) تغییرات تراز بستر در مقاطع مختلف پیچان‌رود برای حالت‌های با و بدون پوشش گیاهی آورده شده است. در این شکل، مؤلفهٔ افقی (Y) بیان‌کنندهٔ فاصله از قوس خارجی کانال (از لبهٔ کانال اصلی به سمت سیلاب‌دشت) و مؤلفهٔ عمودی (Z) محور بیان‌کنندهٔ فاصله از کف کانال اصلی است. در مقطع C1 که ابتدای قوس قرار دارد، در حضور پوشش گیاهی شیب عرضی بستر ملایم‌تر شده است. همچنین، به دلیل کم‌شدن سرعت جریان به علت قرارگرفتن پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت، فرسایش در حالت بدون پوشش گیاهی بیشتر از دو حالت دیگر است. به بیانی دیگر، پوشش گیاهی سیلاب‌دشت به کاهش فرسایش در مقاطع مختلف منجر شده است. بیشترین فرسایش در مجاورت مرز سیلاب‌دشت و کانال اصلی اتفاق افتاده است که می‌تواند ناشی از گردابه‌های شکل‌گرفته در حد فاصل کانال اصلی و سیلاب‌دشت باشد.

در مقطع C2 تغییرات بستر در هر سه حالت کاهش یافته است و نسبت به مقطع C1 فرسایش کمتری اتفاق افتاده است. همچنین، بیشترین فرسایش در حالت بدون پوشش گیاهی و در قوس داخلی رخ داده است و کمترین فرسایش در حالت دو ردیف پوشش گیاهی و در قوس خارجی اتفاق افتاده است. مقطع C3 در رأس قوس واقع شده است. در این مقطع بستر تغییرات کمی نسبت به مقاطع دیگر داشته است. در حالت بدون پوشش گیاهی مقداری رسوب‌گذاری در قوس خارجی اتفاق افتاده است. در حضور پوشش گیاهی رسوب‌گذاری در قوس خارجی رخ داده است که می‌تواند به علت تراکم جریان در کانال اصلی در حضور پوشش گیاهی باشد. در مقطع C4 در حالت بدون پوشش گیاهی رسوب‌گذاری در بستر اتفاق افتاده است. همچنین، در قوس خارجی ارتفاع رسوب‌گذاری نسبت به قوس داخلی افزایش یافته است. در حالت تک‌ردیفی رسوب‌گذاری ناچیزی در بستر اتفاق افتاده است. در حضور دو ردیف پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت فرسایش ناچیزی نسبت به مقاطع قبلی اتفاق افتاده است و می‌تواند ناشی از تراکم و انحراف جریان در حضور پوشش گیاهی باشد.

در مقطع C5 ارتفاع رسوب‌گذاری در حالت بدون پوشش گیاهی و یک ردیف پوشش گیاهی نسبت به مقطع C4 افزایش یافته است. همچنین، در این مقطع رسوب‌گذاری از قوس خارجی به سمت لبهٔ سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد. در حالت دو ردیف پوشش گیاهی از لبهٔ قوس خارجی تا میانهٔ کانال اصلی دچار فرسایش و از میانهٔ کانال اصلی به سمت سیلاب‌دشت رسوب‌گذاری اتفاق افتاده است. با مقایسهٔ تغییرات بستر در مقاطع مختلف به این نتیجه می‌توان دست یافت که تغییرات عرضی بستر در مقطع C1 و C5 نسبت به سایر مقاطع بیشتر بوده است که می‌تواند به دلیل تأثیر قوس‌های مجاور کانال باشد. همچنین، در همهٔ مقاطع در حضور پوشش گیاهی شیب بستر نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی یکنواخت‌تر شده است. کمترین تغییرات بستر در مقطع C3 (میانهٔ قوس) اتفاق افتاده است.

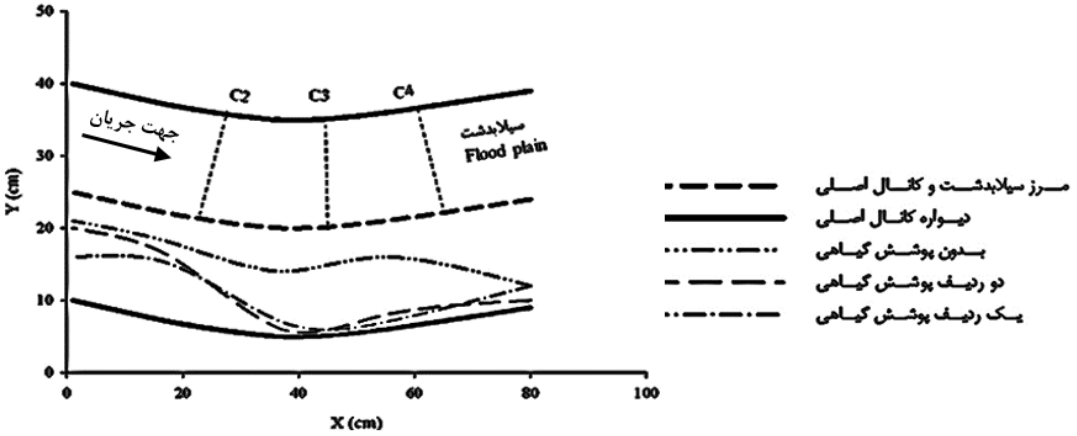


شکل ۳. توپوگرافی مقاطع مختلف پیچان‌رود ملایم: الف) مقطع C1، ب) مقطع C2، پ) مقطع C3، ت) مقطع C4، ث) مقطع C5

بررسی موقعیت بیشترین آب‌شستگی در کانال پیچان‌رود ملایم

طبق شکل ۴ در حالت بدون پوشش گیاهی بیشترین عمق آب‌شستگی از ابتدای کانال تا نزدیکی مرکز قوس به سمت ساحل داخلی پیش می‌رود. سپس، در مرکز قوس به سمت قوس خارجی تغییر جهت می‌دهد و در ادامه به سمت قوس خارجی پیش می‌رود. در حضور پوشش گیاهی در نیمهٔ اول قوس بیشترین عمق آب‌شستگی ابتدا به سمت ساحل داخلی و سپس به سمت مرکز قوس و ساحل خارجی پیش می‌رود. در حالت بدون پوشش گیاهی هر چه از مقطع C1 به سمت C3 (مرکز قوس)، از لبهٔ سیلاب‌دشت فاصله می‌گیرد و به سمت قوس خارجی متمایل می‌شود. از مقطع C3 تا C4 خط القعر به سمت قوس داخلی تغییر جهت می‌دهد، در مقطع C4 و C5 به

سمت قوس خارجی متمایل می شود. در حضور یک ردیف پوشش گیاهی با حرکت از مقطع C1 به سمت C2 خط‌القعر به سمت قوس داخلی و با حرکت از مقطع C3 تا C5 خط‌القعر نزدیک به لبهٔ کانال اصلی است، در حالت دو ردیف پوشش گیاهی نیز الگوی تغییرات همانند حالت تک‌ردیف است. از مقایسهٔ این حالت با حالت بدون پوشش گیاهی نتیجه گرفته می‌شود که در حضور پوشش گیاهی در نیمهٔ اول قوس بیشترین عمق آب‌شستگی به سمت مرکز قوس و در نیمهٔ دوم به سمت ساحل خارجی متمایل می‌شود. کشاورزی و همکارانش [۹] گفتند که در حضور پوشش گیاهی در بستر پیچان‌رود با مقطع ساده، بیشترین عمق آب‌شستگی به سمت مرکز خم بعد از کاشت گیاهان منتقل می شود. همچنین، حضور پوشش گیاهی سبب حرکت خط‌القعر به سمت قوس خارجی شده است که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.



شکل ۴. مسیر خط‌القعر توپوگرافی در طول پیچان‌رود

بررسی درصد تغییرات بستر نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی

درصد تغییرات بستر نسبت به تراز اولیه (۱۰ سانتی‌متر) رسوبات در هر سه حالت محاسبه شده و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. نمادهای R0، R1 و R2 به‌ترتیب بیان کنندهٔ آزمایش بدون پوشش گیاهی، آزمایش با یک ردیف پوشش گیاهی و آزمایش با دو ردیف پوشش گیاهی است. مقادیر منفی در جدول بیان‌کنندهٔ درصد آب‌شستگی و مقادیر مثبت بیان‌کنندهٔ درصد رسوب‌گذاری نسبت به تراز اولیه است. بیشترین مقدار تغییرات مربوط به حالت R0 و مقطع C1 است. در این مقطع در حضور یک ردیف پوشش گیاهی مقدار آب‌شستگی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی کاهش داشته است. همچنین، در حالت R2 میزان آب‌شستگی نسبت به دو حالت دیگر به‌طور چشمگیری کاهش داشته است.

در مقطع C2 در هر سه حالت روند درصد تغییرات همانند مقطع C1 بوده است. مقطع C4، حالت R0 در هر دو قوس داخلی و خارجی رسوب‌گذاری اتفاق افتاده است. حالت R1 در این مقطع رسوب‌گذاری نسبت به R0 کاهش یافته است و در حال R2 در این مقطع آب‌شستگی کمی اتفاق افتاده است. در مقطع C5 در همه حالت در قوس خارجی نسبت به قوس داخلی رسوب‌گذاری بیشتری اتفاق افتاده است، و تراز بستر در هر قوس به‌ترتیب R2 نسبت به R1 و R1 نسبت به R0 کاهش یافته است. در همهٔ حالت‌ها در نیمهٔ اول قوس بیشترین آب‌شستگی رخ داده است و در نیمهٔ دوم نسبت به نیمهٔ اول آب‌شستگی کاهش یافته است. در نیمهٔ اول قوس، بیشترین فرسایش در ساحل داخلی و در نیمهٔ دوم در ساحل خارجی اتفاق افتاده است. این الگوی تغییرات با گزارش یالین [۱۳] مطابقت دارد. همچنین، بیشترین آب‌شستگی در همهٔ آزمایش‌ها در مقطع C1 و بیشترین رسوب‌گذاری در مقطع C5 رخ داده است. یالین [۱۳] گفته است که در نیمهٔ اول (دوم) کانال پیچان‌رود فرسایش در ساحل داخلی (خارجی) و رسوب‌گذاری در ساحل خارجی (داخلی) اتفاق می‌افتد. به طور کلی، تغییرات تراز بستر در حضور دو ردیف پوشش گیاهی پراکندگی کمتری نسبت به

حالت یک ردیف پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی داشته است. در برخی از موارد در حضور پوشش گیاهی، ۸۸ درصد آب‌شستگی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی کاهش داشته است (جدول ۲). کشاورزی و همکارانش [۹] نیز ضمن بررسی اثر پوشش گیاهی بر توپوگرافی بستر پیچان‌رود با مقطع ساده (غیرمرکب) به این نتیجه دست یافتند که در حضور پوشش گیاهی، ماکزیمم عمق آب‌شستگی در برخی موارد تا ۷۷ درصد کاهش می‌یابد. درخور یادآوری است که به دلیل هندسهٔ خاص کانال مرکب استفاده‌شده، عمق جریان و محدودیت‌های دستگاه اندازه‌گیری سرعت، امکان اندازه‌گیری سرعت در حالت مرکب بودن مقطع وجود نداشت.

حمیدی‌فر و همکارانش [۱۵] با شبیه‌سازی اقدامات حفاظتی، تأثیر قراردادن شمع‌ها در حاشیهٔ رودخانه‌های پیچان‌رودی برای حفاظت بستر و تغییر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در شرایط مختلف را بررسی و مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با ایجاد موانع و قراردادن شمع‌ها، توپوگرافی بستر در قوس‌های داخلی و خارجی و نیز موقعیت نقاط مربوط به بیشترین و کمترین آب‌شستگی و رسوب‌گذاری به طور چشمگیری تغییر می‌کند. در این پژوهش مشاهده شد قراردادن پوشش گیاهی در سطح سیلاب‌دشت سبب تغییر موقعیت نقاط بیشترین و کمترین عمق آب‌شستگی و رسوب‌گذاری شده است.

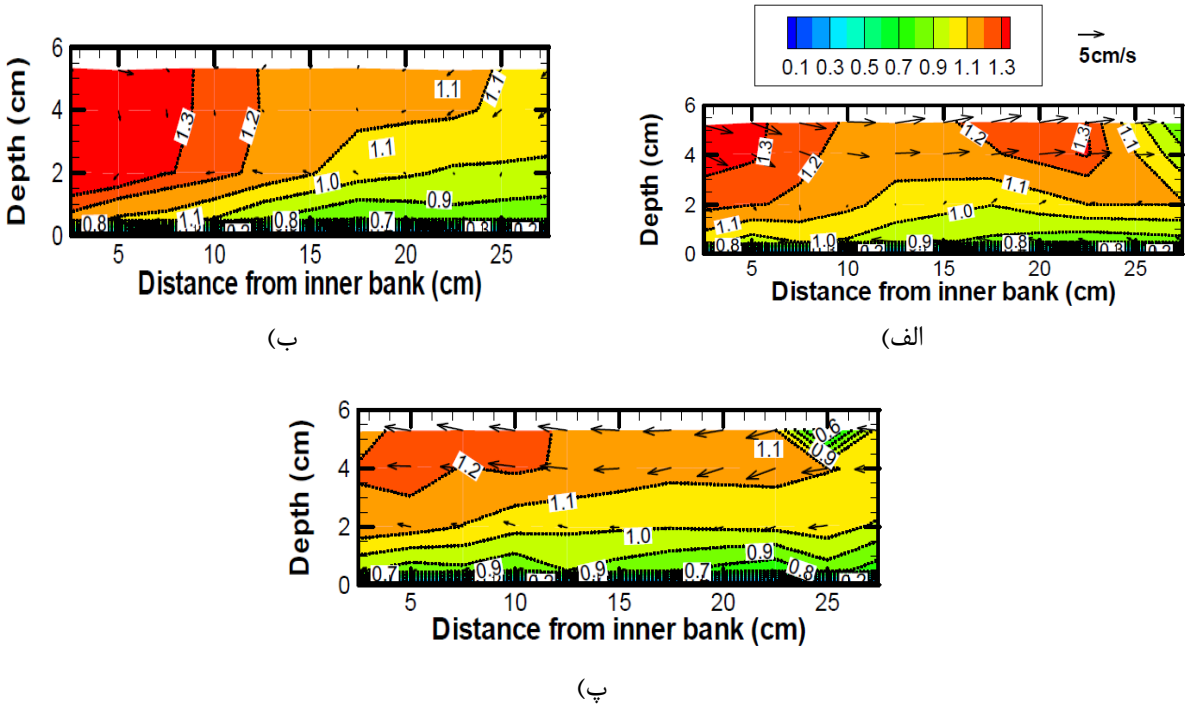
جدول ۲. درصد تغییرات عمق آب‌شستگی (مقادیر منفی) و رسوب‌گذاری (مقادیر مثبت) در مقاطع مختلف در مقایسه با تراز اولیهٔ بستر

مقطع	بدون پوشش گیاهی		یک ردیف پوشش گیاهی		دو ردیف پوشش گیاهی	
	قوس خارجی	قوس داخلی	قوس خارجی	قوس داخلی	قوس خارجی	قوس داخلی
C1	-۳۱	-۸۸	-۲۱	-۴۵	-۹	-۱۰
C2	-۹	-۳۲	-۱۱	-۲۱	-۸	-۷
C3	۴	۲	-۱۳	-۵	-۸	-۴
C4	۲۲	۱۴	۴	۷	-۳	-۱
C5	3	۲۳	-۱	۱۷	-۱۵	۵

مقایسهٔ الگوی تغییرات پیچان‌رود مرکب و ساده

شکل ۵ خطوط هم‌تراز سه جزء سرعت جریان برای مقاطع C1، C3 و C5 در یک پیچان‌رود ساده نمایش داده شده است. به طور کلی، موقعیت جریان پس از ورود به خم به سمت ساحل درونی گرایش دارد، پس از آن با افزایش فاصله به سمت قوس خارجی تغییر جهت می‌دهد. این در حالی است که در قوس مرکب نیز با توجه به توپوگرافی تشکیل‌شده در هر سه حالت الگوی جریان مانند قوس ساده است، در واقع می‌توان گفت که در قوس ملایم ساده، قوس ملایم مرکب و در قوس ملایم مرکب با پوشش گیاهی از یک الگو پیروی می‌کند.

بردارها در شکل ۵ (a, b, c) جریان ثانویه را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در مقاطع C1 و C5 جریان‌های ثانویه نسبتاً قوی هستند. در بخش C1 جریان‌های ساعتگرد مشاهده شده‌اند در حالی که در بخش‌های C3 و C5 پاد ساعتگرد هستند و در کل مقطع C3 (مرکز قوس) جریان‌های ثانویه ضعیف اند. در قوس مرکب نیز در مقاطع C1 و C5 بیشترین تغییرات در بستر اتفاق افتاده است که می‌تواند به علت همین جریان‌های ثانویهٔ قوی باشد. در قوس C1 آب‌شستگی در بستر رخ داده است که ناشی از جریان‌های ثانویه ساعتگرد است و در قوس C5 رسوب‌گذاری ناشی از جریان‌های ثانویهٔ ساعتگرد اتفاق افتاده است. در حالی که در قوس مرکب در مقطع C3 کمترین تغییرات بستر اتفاق افتاده است که این نیز می‌تواند ناشی از جریان‌های ضعیف یادشده در این مقطع باشد. به طور کلی، می‌توان گفت که در همهٔ مقاطع قوس مرکب جریان از الگوی قوس ساده پیروی می‌کنند و مرکب‌بودن کانال با عمق نسبی ۰/۳۵ تأثیر چندانی در روند الگوی جریان نداشته است، همچنین در حضور پوشش گیاهی نیز جریان از همین الگو تبعیت می‌کند.



شکل ۵. سرعت متوسط بدون بعد و بردارهای جریان ثانویه در پیچان‌رود (الف) مقطع C1، ب) مقطع C3، پ) مقطع C5

نتیجه‌گیری

یکی از مسائل مهم در بحث مهندسی رودخانه، تغییرات بستر رودخانه و حفاظت از سواحل است. در این تحقیق به بررسی اثر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر تغییرات پیچان‌رود ملایم پرداخته شد. آزمایش‌ها در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی با دو تراکم یک و دو ردیف در سیلاب‌دشت انجام شد. نتایج نشان داد در حالت کلی در حضور پوشش گیاهی تغییرات بستر نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی کاهش یافته است. همچنین، شیب تغییرات عرضی بستر کاهش یافته است. محل بیشترین آب‌شستگی به سمت قوس خارجی گرایش داشته است. با مقایسهٔ تغییرات بستر در پنج مقطع C1, C2, C3, C4, C5 این نتایج به دست آمد: بیشترین آب‌شستگی در قوس داخلی مقطع C1 و بیشترین رسوب‌گذاری در قوس داخلی مقطع C5 اتفاق افتاده است، در نیمهٔ اول قوس، بیشترین فرسایش در ساحل داخلی و در نیمهٔ دوم در ساحل خارجی اتفاق افتاده است. این الگوی تغییرات با گزارش یالین [۱۶] مطابقت دارد. در برخی موارد در حضور پوشش گیاهی، ۸۸ درصد آب‌شستگی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی کاهش داشته است.

منابع

[1].Ministry of Energy. Guideline on Hydraulic Geometry and Channel Pattern of Rivers. 2013; No. 643. (In Persian).

[2].Watershed Management Deputy. Basic Design for Erosion Control in Streams and Channels Structures. (In Persian). 2008; No. 417.

[3].Farrady RV, Charlton FG. Hydraulic factors in bridge design, Hydraulic Research station Limited, Wallingford, Oxford shire, London, England. 1983.

[4].Fazli M, Ghodsiyan M, Salehi Neyshabori SA. Study scouring around groins in river bends, 3th civil engineering conference, Tabriz. (In Persian). 2008.

[5].Abad JD, Garcia MH. Experiments in a high-amplitude kinoshita meandering channel: implications of bend orientation on mean and turbulent flow structure. Water Resour. Res. 2009; 45: 1–19.

[6].Chen D, Tang C. Evaluating secondary flows in the evolution of sine-generated meanders. Geomorphology. 2012.

[7].Engel FL, Rhoads BL. Interaction among mean flow, turbulence, bed morphology, bank failures and channel plan form in an evolving compound meander loop. Geomorphology. 2012.

[8].Esfahani F, Keshavarzi A. Effect of different meander curvatures on spatial variation of coherent turbulent flow structure inside ingoing multi-bend river meanders. Stochastic Environ. Res. Risk Assess. 2011; 25: 913-928.

[9].Keshavarzi A, Hamidifar H, Ball J. Bed morphology in vegetated estuarine river with mild-curved meander bend. Hydrol. Sci. J. 2016; 61(11):2033-49.

[10]. Esfahani F, Keshavarzi A. How far must trees be cultivated from the edge of the flood plain to provide best river bank protection?. International Journal of River Basin Management. 2010; 8(1): 109-116.

[11]. Yang K, Cao S, Knight DW. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. Journal of Hydraulic Engineering. 2007; 133: 148-159.

[12]. Weiming W, Douglas J, Bennett S, Wang S. A depth-averaged two-dimensional model for flow, sediment transport, and bed topography in curved channels with riparian vegetation. Water Resour. Res. 2005; 41: W03015.

[13]. Keshavarzi A, Hamidifar H, Ball J. Bed morphology in vegetated estuarine river with mild-curved meander bend. Hydrol. Sci. J. 2016; 61(11): 2033-2049.

[14]. Hamidifar H, Omid MH, Keshavarzi A. Evaluation of 1-D and 2-D model for discharge prediction in straight compound channel with smooth and rough floodplain. Flow Measurment and Instrumentation, 2016; 49: 63-69.

[15]. Hamidifar H, Keshavarzi A, Saadatnia M, Sistani B. Experimental investigation of the effect of pile installation on change of erosion and sedimentation pattern in channel’s meander. 7th Iranian Hydraulic Conference, Tehran, Iran. 2008.

[16]. Yalin MS. River Mechanics. Pergamon Press: London. 1992.