

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب جانبی کانال اصلی دوزنقه‌ای بر پدیده فرسایش در تلاقی کانال‌های باز

پیام خسروی نیا^{۱*}، علی حسین‌زاده دلیر^۲، محمود شفاعی بجستان^۳ و داود فرسادی‌زاده^۴

چکیده

تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها دارای اهمیت زیادی در مطالعات مجاری روباز هستند. تغییر در مقدار و جهت سرعت و مقدار دبی جریان سبب می‌شود پدیده فرسایش بستر و سواحل در محل تلاقی اتفاق بیفتد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر شیب جانبی کانال اصلی روی حداکثر عمق فرسایش در محل تلاقی رودخانه‌ها است. بدین منظور ابتدا با آنالیز ابعادی، معادلات بی‌بعد در نظر گرفته شد و سپس با ساخت مدل فیزیکی تأثیر پارامترهای شیب جانبی کانال اصلی، نسبت دبی، عدد فرود ذره پایاب (F_{p0}) و عدد فرود جریان پایاب روی حداکثر عمق فرسایش بستر در یک تلاقی ۹۰ درجه بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش شیب جانبی کانال اصلی، نسبت دبی، عدد فرود ذره، عدد فرود جریان و کاهش عمق جریان سبب افزایش حداکثر عمق فرسایش بستر در محل تلاقی می‌شود. بهترین عملکرد کاهش آب‌شستگی مربوط به شیب جانبی ۴۵ درجه و در نسبت دبی ۰/۲ معادل ۴۶ درصد به دست آمد. معادله پیشنهادی ارائه شده برای پیش‌بینی حداکثر عمق نسبی فرسایش در محل تلاقی نشان می‌دهد که عدد فرود و عدد فرود ذره در پایاب، بیشترین تأثیر را در مقدار عمق نسبی فرسایش در مقایسه با سایر پارامترها مانند نسبت دبی، شیب جانبی کانال و عمق نسبی دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، تلاقی کانال، شیب جانبی کانال اصلی، فرسایش بستر، نسبت دبی.

ارجاع: خسروی نیا پ. حسین‌زاده دلیر ع. شفاعی بجستان م. و فرسادی‌زاده د. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب جانبی کانال اصلی دوزنقه‌ای بر پدیده فرسایش در تلاقی کانال‌های باز. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹: ۱۱۹-۱۳۰.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: p.khosravinia2012@gmail.com

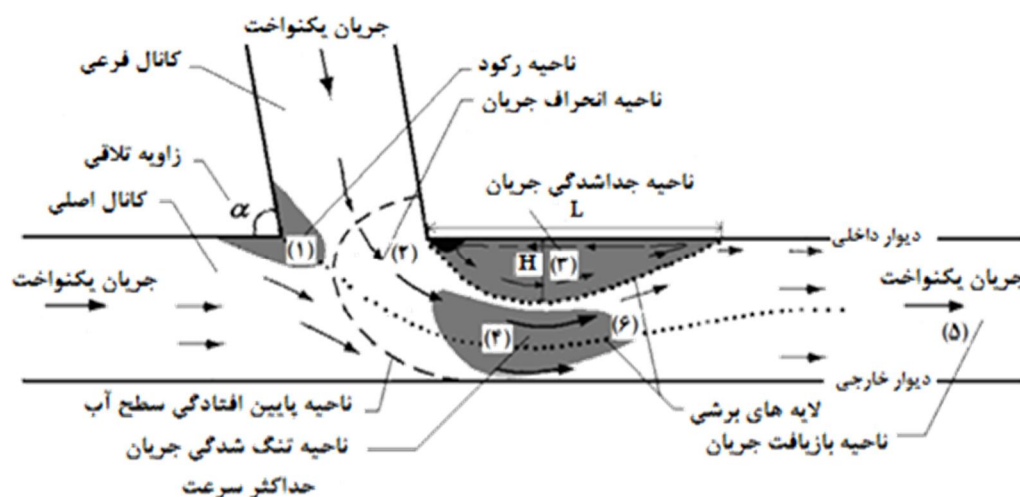
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۰۵

مقدمه

مورفولوژی است. دینامیک تلاقی رودخانه‌ها تابعی از نسبت مومنتوم میان جریان‌هایی که به هم می‌رسند و هندسه محل اتصال کانال‌ها است. با تحلیل دقیق دینامیک جریان می‌توان نواحی با سرعت زیاد که سبب فرسایش عمیق و تخریب سواحل و همچنین نواحی با سرعت پایین که سبب رسوب‌گذاری می‌شود را شناسایی کرد. عمیق‌تر شدن حفره فرسایشی و همچنان حجیم‌تر شدن رسوب انباشته شده، کم‌کم ایجاد پیچان رود و جابجایی موقعیت سه شاخه را به همراه دارد. ضمن اینکه وجود جریان گردابی مشکلات زیادی برای کشتیرانی ایجاد می‌کند. بست (۱۹۸۸) دینامیک جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها را به صورت شماتیک براساس شکل ۱ نشان داد.

در محل اتصال رودخانه‌ها که جریان دو کانال اصلی و فرعی به هم می‌پیوندند، به وجود آمدن جریان‌های گردابه‌ای و افزایش سرعت در محل تنگ‌شدگی جریان سبب ایجاد پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری در این محل می‌شود. بحث فرسایش از این نظر می‌تواند دارای اهمیت باشد که داشتن معیاری از حداکثر عمق آب‌شستگی می‌تواند در تعیین عمق پایه‌های پل و سایر ابنیه مشابه و مرتبط به کار آید. آگاهی کافی از نحوه پیشروی حفره فرسایشی نیز می‌تواند در تعیین فاصله مناسب سازه‌های حفاظتی از محل تلاقی کانال و ساحل رودخانه مفید شود. آگاهی کافی از دینامیک جریان در اتصال رودخانه‌ها، از بزرگ‌ترین دغدغه‌های مهندسان رودخانه، رسوب و



شکل ۱- الگوی جریان در محل تلاقی کانال‌های باز (شکیبایی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۰)

رسوب‌گذاری در آن رخ می‌دهد. در ناحیه حداکثر سرعت یا ناحیه فشردگی، سرعت جریان بسیار بالا رفته و با بیشتر شدن تنش برشی از تنش بحرانی، فرسایش موضعی در آن انجام می‌شود. تنش برشی بین جریان اصلی و فرعی سبب به وجود آمدن ناحیه لایه‌های برشی می‌شود و در پایین‌دست، جریان در ناحیه بازیافت به حالت عادی بر می‌گردد. در سال‌های اخیر، بررسی‌های آزمایشگاهی و صحرایی محدودی برای شناخت بیشتر الگوی جریان و وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی انجام شده است.

بست (۱۹۸۸) تأثیر زاویه اتصال ۱۵، ۴۵، ۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ درجه را بر پدیده فرسایش در تلاقی رودخانه‌ها به صورت آزمایشگاهی و صحرایی بررسی کرد. نتایج نشان داد که در

در محدوده تلاقی، شش ناحیه مختلف شناسایی شد که شامل: (۱) ناحیه رکود (۲) ناحیه انحراف جریان (۳) ناحیه جداسازی (۴) ناحیه حداکثر سرعت (۵) ناحیه بازیافت جریان و (۶) ناحیه لایه‌های برشی است (شکیبایی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۰). در ناحیه رکود که در گوشه بالادست محل اتصال به وجود می‌آید، اولین برخورد بین دو جریان کانال اصلی و فرعی رخ می‌دهد و سرعت جریان در این ناحیه به طور تقریبی صفر است. ناحیه انحراف، ناحیه‌ای است که جریان کانال اصلی از مسیر خود منحرف شده و به دیواره روبه‌رویی اتصال نزدیک می‌شود. جریان کانال فرعی پس از اتصال از دیواره داخلی کانال فاصله می‌گیرد و سبب به وجود آمدن ناحیه‌ای به نام ناحیه جداسازی می‌شود که سرعت جریان در این محل بسیار پایین بوده و

با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که هرچه نسبت دبی کانال فرعی به دبی کل بیشتر باشد، ایجاد پرش هیدرولیکی در عددهای فرود بالادست کمتری ممکن است و با افزایش دبی کل، این مقادیر کمتر نیز می‌شود.

قبادیان و شفافی بجستان (۱۳۸۶) الگوی فرسایش، به ویژه حداکثر عمق فرسایش بستر، را در محل تلاقی کانال‌های روباز با تأثیر سه نسبت پهنا، پنج نسبت دبی و حداقل چهار عدد فرود ذره در پایاب زاویه ۹۰ درجه را بررسی کردند و معادله زیر را با روش رگرسیونی چند متغیره با ضریب همبستگی ($R^2 = 90.5\%$) برای پیش‌بینی حداکثر عمق نسبی فرسایش در محل تلاقی ارائه دادند:

$$\frac{d_s}{B_3} = 0.129 \ln(Q_r) + 0.217 \ln(F_{g3}) + 0.075 B_r^{-0.776} \quad (1)$$

که در این معادله، d_s ، حداکثر عمق نسبی فرسایش، B_3 پهناي کانال در پایین دست محل اتصال، Q_r نسبت دبی، F_{g3} عدد فرود ذره و B_r نسبت پهناي کانال فرعی به اصلی است. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی پایین دست مهم‌ترین پارامتر در بررسی تلاقی کانال‌ها است. همچنین با افزایش نسبت دبی، عدد فرود ذره و زاویه تلاقی، عمق حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی نیز در پژوهش برقی و صاحباری (۲۰۱۰) گزارش شده است. معادله (۱) نشان می‌دهد که عدد فرود ذره در پایاب بیشترین و نسبت پهناي کانال فرعی به اصلی کمترین تأثیر را در مقدار عمق نسبی فرسایش دارند.

در مورد کنترل آب‌شستگی در محل تلاقی نیز بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده است. زینی‌وند و شفافی بجستان (۱۳۸۸) با انجام بررسی‌های آزمایشگاهی به بررسی تأثیر صفحات مستغرق بر میزان فرسایش در محل اتصال کانال‌ها پرداختند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان می‌دهد که نصب صفحات مستغرق در دیواره کانال فرعی و با زاویه ۳۰ درجه، مناسب‌ترین موقعیت قرارگیری و سبب کاهش میزان فرسایش می‌شود. امینی و شفافی بجستان (۱۳۹۰) کارایی مناسب طوقه را به‌عنوان مانعی بر فرسایش در محل تلاقی کانال‌ها گزارش دادند. محمدی و شفافی بجستان (۱۳۹۱) تأثیر شعاع گردشگی لبه پایین دست کانال اتصال را بر تغییرات تراز بستر رودخانه‌ها در زاویه

زاویه ۱۵ درجه آب‌شستگی مشاهده نشد ولی با افزایش زاویه اتصال، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. روی و روی (۱۹۸۸) با اندازه‌گیری سطح مقطع جریان در محل اتصال در یک حوضه آبریز نشان دادند که ظرفیت کلی کانال در پایین دست بیشتر اتصال‌ها کاهش می‌یابد که دلیل آن را افزایش سرعت در محل اتصال گزارش کردند.

بریان و کوهن (۲۰۰۲) تأثیر هندسه تلاقی‌های متقارن و غیرمتقارن روی الگوهای جریان و فرسایش را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در محل تلاقی حفره فرسایشی ایجاد می‌شود. ابعاد این حفره با افزایش زاویه تلاقی بزرگ‌تر نیز می‌شود. اما تأثیر بیشتر، روی الگوی فرسایش مربوط به تقارنی یا نامتقارنی شکل تلاقی است. در تلاقی متقارن، حفره فرسایشی نسبت به شکل اولیه کانال، متقارن است در حالیکه شکل حفره فرسایشی در تلاقی نامتقارن پیچیده‌تر است.

رودز (۲۰۰۵) با بررسی روی دینامیک تلاقی رودخانه‌ها و با اشاره به اینکه در حال حاضر تأثیر تغییرات وابسته به مقیاس و ژئومتری روی ساختار جریان در محل تلاقی مشخص نشده است، فرضیه‌هایی را در این مورد ارائه کرد از جمله: ۱- قدرت حرکت‌های حلزونی در تلاقی‌های بزرگ نسبت به تلاقی‌های کوچک با همان درجه نسبتی انحنای جریان، ضعیف‌تر است. ۲- رودخانه‌های بزرگ می‌توانند جریان شاخه فرعی را در خود جابجا کنند بدون اینکه شتاب قابل توجهی در جریان آن‌ها به وجود آید که سبب به فرسایش عمیق شود. ۳- در تلاقی‌های بزرگ تغییرات شکل بستر در محل تلاقی، به‌صورت چشم‌گیری متأثر از حوادث هیدرولوژیکی نمی‌باشد.

برقی و نظری (۱۳۸۲) به بررسی الگوی رسوب و فرسایش در تقاطع کانال‌های مستطیلی و اثر متغیرهایی چون قطر متوسط مصالح بستر روی یک اتصال ۹۰ درجه پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی در ابتدای ناحیه جداسازی جریان اتفاق می‌افتد و حداکثر عمق آب‌شستگی با کاهش قطر متوسط مصالح بستر افزایش می‌یابد.

فتاحی نیسیانی و برقی (۱۳۸۵) تأثیر دبی کل عبوری از کانال‌ها، نسبت دبی کانال فرعی به دبی کل، نسبت عرض کانال‌ها و عدد فرود بالادست کانال‌ها را روی تشکیل پرش هیدرولیکی و پارامترهای آن در اتصال قائم کانال‌های روباز

تلاقی ۶۰ درجه و در دوکانال اصلی و فرعی با پهنای برابر ۲۶ سانتی‌متر بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش شعاع گردشگری لبه پایین دست اتصال، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. به طوری که در عدد فرود ذره ۲/۷۶ و نسبت دبی ۰/۲، مقدار عمق آب‌شستگی در مقایسه با اتصال لبه تیز برای نسبت‌های شعاع ۰/۲۸، ۰/۵ و ۱، به ترتیب، ۴۰، ۶۸ و ۱۰۰ درصد، کاهش آب‌شستگی داشته است.

بررسی‌هایی نیز در زمینه تأثیر شیب جانبی کانال اصلی بر رسوب معلق ورودی به آبگیر جانبی توسط کرمی مقدم و همکاران (۲۰۱۰) و سیدیان و شفاعی بجستان (۱۳۸۹) انجام شده است. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که تغییر زاویه دیواره از حالت قائم به ۴۵ درجه به میزان قابل توجهی سبب کاهش رسوب ورودی به آبگیر می‌شود.

بررسی منابع زیادی که در زمینه فرسایش در محل تلاقی کانال‌ها انجام شده است، نشان می‌دهد که عمده بررسی‌ها به صورت آزمایشگاهی و در فلوم‌های مستطیلی شکل بوده است، در حالیکه چنین شرایطی در طبیعت وجود ندارد و به طور معمول سواحل رودخانه‌ها عمودی نیستند. شیب سواحل سبب تغییر الگوی سه بعدی جریان در محل تلاقی نسبت به دیواره قائم می‌شود که می‌تواند سبب تغییر الگوی آب‌شستگی نیز باشد. بررسی میزان این تغییرات در اثر شیب دار کردن ساحل نسبت به دیواره قائم، هدف اصلی این بررسی است.

$$\frac{d_s}{T_3} = f\left(\frac{Q_2}{Q_3}, \theta, F_{g3}, \frac{y_3}{d_{50}}, F_{r3}\right) \quad (3)$$

که در این معادله، $F_{g3} = \frac{V_3}{\sqrt{g(G_s - 1)d_{50}}}$ عدد

فرود ذره (V_3 سرعت جریان در پایین دست تلاقی، G_s چگالی ویژه ذرات رسوب برابر ۲/۶۵) است. در این پژوهش تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور بر حداکثر عمق آب‌شستگی بررسی خواهد شد.

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز که مجهز به دو کانال اصلی و فرعی مستطیلی، به ترتیب، دارای طول ۶ و ۵ متر، عرض ۸۰ و ۲۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. شیب کف هر دو کانال افقی در نظر گرفته شد. برای اجرای آزمایش‌ها و با توجه به شرایط کانال‌های آزمایش‌های موجود، تغییراتی شامل ایجاد کف کاذب و بستر متحرک، کاهش دادن عرض کانال اصلی از ۸۰ به ۵۰ سانتی‌متر برای افزایش قابلیت شیب‌دار کردن دیواره کانال اصلی، همچنین اضافه کردن تأسیسات لوله‌گذاری و ساخت مخزن آرام‌کننده در بالادست کانال فرعی برای ورود آب از کانال فرعی به داخل کانال اصلی انجام شد. کف کانال‌های اصلی

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

برای دستیابی به هدف‌های این پژوهش، با توجه به اینکه پارامترهای زیادی بر حداکثر عمق فرسایش (d_s) تأثیر دارند، پس ابتدا با شناخت این پارامترها و استفاده از تحلیل ابعادی و براساس روش باکینگهام، معادله بی‌بعد، معادله (۲)، استخراج شد.

$$\frac{d_s}{d_{50}} = f\left(\frac{Q_2}{Q_3}, \frac{Q_b}{Q_3}, \frac{B_2}{B_3}, \frac{T_3}{T_2}, \frac{y_3}{y_1}, \theta, \alpha, S_0, \frac{\rho_s}{\rho}, R_{e3}, W_{e3}, F_{r3}\right) \quad (2)$$

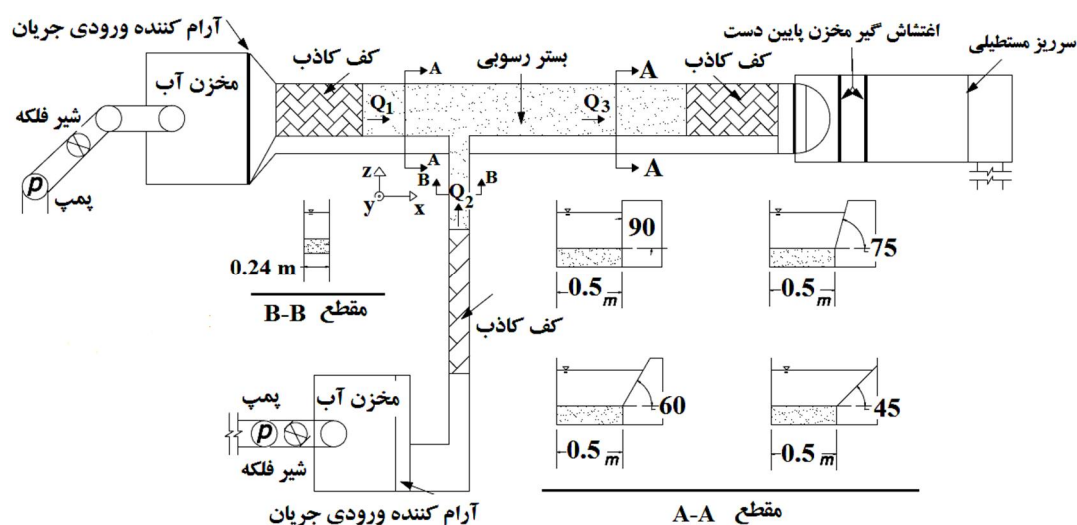
در این معادله، d_s حداکثر عمق فرسایش، d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوب، Q دبی جریان، y عمق جریان، B عرض کف کانال، Q_b بار بستر، T عرض سطح آب، θ زاویه شیب جانبی کانال اصلی، α زاویه اتصال دو کانال، S_0 شیب کف کانال اصلی در محل اتصال، R_p

پلکسی گلاس، به ۵۰ سانتی متر کاهش داده شد، تا امکان ایجاد شیب‌های مختلف در کانال اصلی ایجاد شود. شیب جانبی کانال اصلی برابر با ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ در نظر گرفته شد (مقطع A-A در شکل ۲). برای تثبیت دیواره‌های جانبی شیب‌دار از گوه‌های چوبی در قسمت پشت دیواره‌ها استفاده شد.

دبی کل ورودی به سیستم برای تمام آزمایش‌ها، ۲۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. دبی هر دو کانال با سرریز مستطیلی نصب شده در حوضچه آرامش پایین دست کانال اصلی، اندازه‌گیری شد.

و فرعی با سکوها‌ی چوبی به ارتفاع ۱۴ سانتی متر و عرضی معادل عرض کانال‌های اصلی و فرعی بالا آورده شد (کف کاذب) و محدوده بین این سه کف کاذب به طول ۳ متر در کانال اصلی و ۱/۵ متر در کانال فرعی به‌عنوان منطقه مورد آزمایش در نظر گرفته شد (بستر متحرک) و سپس به همان ارتفاع سکوها با رسوبات غیرچسبنده پر شد. شکل ۲ پلان کانال‌های آزمایشگاهی و تجهیزات استفاده شده را نشان می‌دهد.

زاویه تلاقی کانال اصلی و فرعی ۹۰ درجه است. عرض کانال اصلی با دیواره‌هایی با ضخامت ۶ میلی متر از جنس



شکل ۲- پلان تجهیزات استفاده شده در آزمایشگاه در این پژوهش

ماسه قرار گرفته بین این دو سایز را به‌عنوان رسوب آزمایش انتخاب کردیم. به همین دلیل رسوبات انتخاب شده دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده و در جدول ۱ مشخصات دانه‌بندی آن ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات دانه‌بندی رسوب به کار رفته

| مقدار | مشخصه |
|---------------|--------------------------------------|
| ۱/۲۸ میلی متر | اندازه متوسط ذرات (d_{50}) |
| ۱/۵۱۳ | ضریب یکنواختی (C_u) |
| ۰/۹۵۱ | ضریب انحنا (C_c) |
| ۱/۳۲ | انحراف استاندارد ذرات (σ_g) |

برای بررسی تأثیر شیب جانبی کانال اصلی در پدیده فرسایش در تلاقی کانال‌ها، از پارامترهای بی بعد معادله (۳) براساس جدول ۲ استفاده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، تعداد چهار شیب جانبی دیواره،

تنظیم دبی در کانال‌ها بدین صورت انجام شد که ابتدا دبی مورد نظر در کانال اصلی تثبیت شد، در این زمان کانال فرعی مانند یک کانال جانبی بدون خروجی که جریان در آن ساکن بود، عمل می‌کرد. سپس شیر فلکه کانال فرعی کم کم باز می‌شد تا دبی مورد نظر حاصل شود. برای تنظیم عمق در پایاب یا به‌عبارت دیگر برای بررسی تأثیر عدد فرود جریان در پایین دست از تیرک‌های آب‌بند و از دستگاه التراسونیک با دقت یک میلی متر ساخت شرکت آداک ایرانیان برای اندازه‌گیری سطح آب استفاده شده است. در ابتدای کانال‌های اصلی و فرعی از آرام کننده‌های جریان برای جلوگیری از اغتشاش جریان استفاده شد. به‌دلیل شبیه‌سازی شرایط آزمایش‌ها با شرایط واقعی رودخانه، رسوب استفاده شده در این آزمایش‌ها، ماسه شسته شده و تیزگوشه است که در آزمایشگاه آن را از دو الک با اندازه حدود ۲ میلی متر و ۰/۳ میلی متر عبور داده و

آن دبی مورد نظر کانال فرعی با باز کردن شیر فلکه مربوطه به جریان اضافه می‌شود که در نهایت نسبت دبی‌های مورد نظر حاصل شد. برای تنظیم سطح آب در انتهای کانال اصلی از تیرک‌های آب‌بند به ارتفاع ۱ سانتی‌متر استفاده می‌شود که با توجه به اینکه برای هر نسبت دبی به چهار عدد فرود نیاز هست، با برداشتن هر تیرک آب‌بند یک عدد فرود حاصل شد. زمان اتمام آزمایش زمانی است که شرایط تعادل برای فرسایش و حفره آب‌شستگی ایجاد شده باشد. با توجه به اینکه در شیب ۴۵ درجه، زمان تعادل بیشتری نسبت به شیب‌های دیگر پیش‌بینی می‌شد، پس آزمایش‌های با زمان ۲۴ و ۳۶ ساعته در کمترین و بیشترین نسبت دبی انجام شد و در نهایت پس از گذشت زمان ۶ ساعت حدود ۹۰ درصد از آب‌شستگی به دست آمد. به همین دلیل برای تمامی آزمایش‌ها زمان یکسان ۶ ساعت در نظر گرفته شد. پس از اتمام هر آزمایش، کانال‌ها از هر سه طرف به آهستگی تخلیه می‌شود تا تغییراتی در بستر ایجاد نشود و پروفیل بستر در محل تلاقی با استفاده از متر لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر و یک شبکه ۲ در ۲ سانتی‌متری برداشت شد. شکل ۳ نمونه‌ای از فرسایش اتفاق افتاده در شیب ۹۰ و ۴۵ درجه این پژوهش را نشان می‌دهد.

چهار نسبت دبی و برای هر نسبت دبی، چهار عمق متفاوت جریان که در نهایت چهار عدد فرود جریان و چهار عدد فرود ذره را ایجاد می‌کند، به کار می‌رود.

جدول ۲- دامنه تغییرات پارامترهای به کار رفته در این

| پژوهش | پارامتر | محدوده تغییرات |
|-------|-----------------------------------|------------------------|
| | شیب جانبی کانال اصلی (Z) | ۰،۰۱۵۷۷، ۰،۰۲۶۸، ۰،۱ |
| | نسبت دبی ($Q_r = Q_2 / Q_3$) | ۰/۲۸، ۰/۴، ۰/۵۵ |
| | عدد فرود ذره پایاب (F_{g3}) | $1/2 < F_{g3} < 2/6$ |
| | عدد فرود جریان پایاب (F_{r3}) | $0/12 < F_{r3} < 0/32$ |

برای انجام هر آزمایش، ابتدا کل سطح بستر ماسه‌ای، به طور کامل صاف و تراز شد. پس از آن با قرار دادن تیرک‌های آب‌بند در انتهای کانال اصلی، مانع از خروج آب به مخزن پایین‌دست شده، آنگاه از سه طرف (ابتدای کانال اصلی و فرعی و انتهای کانال اصلی) اجازه داده می‌شد تا جریان آب با دبی بسیار پایینی وارد شود تا سطح آب در کانال‌ها به آرامی افزایش و از آب‌شستگی احتمالی در شروع آزمایش به دلیل عمق کم آب جلوگیری شود. روش تنظیم نسبت دبی بدین صورت انجام شد که ابتدا دبی کانال اصلی تنظیم و ثابت شود، در این حالت کانال فرعی به‌عنوان یک آبگیر با دبی صفر عمل می‌کند، بعد از

ب



الف



شکل ۳- فرسایش اتفاق افتاده در پژوهش الف) شیب ۹۰ درجه ب) شیب ۴۵ درجه

حرکت می‌کنند و زمینه‌ساز و عامل اصلی شروع آب‌شستگی مواد بستر در محل اتصال است. گرداب چرخشی که نزدیک‌تر به محل تلاقی است در اثر انقباض و فشردگی بیشتر جریان در مقطع خود، قوی‌تر عمل کرده و

نتایج و بحث

بلافاصله پس از شروع آزمایش و برقراری جریان، در اثر برخورد جریان کانال فرعی و اصلی دو گرداب چرخشی شکل می‌گیرد. این گرداب‌ها در جهت عکس همدیگر

روی سطح شیب‌دار قرار گرفته و با سرعت کمتری حرکت می‌کند. این مسئله از مزیت‌های شیب‌دار بودن دیواره جانبی کانال اصلی است به دلیل اینکه ریخت‌شناسی پایین‌دست کمتر دچار تغییرات می‌شود. مسئله دیگر اینکه، به دلیل کمتر شدن تجمع رسوبات در پایین‌دست تلاقی، از تخریب سازه‌های قرار گرفته در پایین‌دست تلاقی مانند ایستگاه‌های پمپاژ و سازه‌های آبگیر جلوگیری به عمل می‌آید.

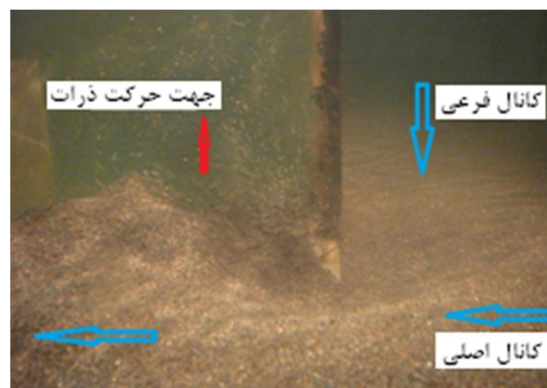


شکل ۵- توسعه حفره آب‌شستگی ایجاد شده در چهار جهت

تأثیر عدد فرود جریان (F_{r3}) بر حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/T_3)

شکل‌های ۶- الف تا ۶- د تغییرات حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی بستر در مقابل عدد فرود جریان پایین‌دست تلاقی برای شیب‌های جانبی و شرایط مختلف جریان را نشان می‌دهند. برای نسبت دبی ۰/۱۹، با توجه به مقدار پایین دبی کانال فرعی نسبت به دبی کانال اصلی، مومنتوم کانال فرعی نسبت به کانال اصلی بسیار کم بوده و جریان کانال اصلی، جریان کانال فرعی را با خود حمل کرده و اجازه تشکیل گرداب‌های چرخشی بزرگ را نمی‌دهد. در این نسبت دبی، لایه برشی در دهانه محل تلاقی و از وسط کانال فرعی شروع شده، منطقه رکود یا ایستایی بزرگ‌تر می‌شود. برای شیب‌های ملایم، قسمت بزرگ جریان شاخه فرعی پس از ورود به کانال اصلی، از روی شیب عبور کرده و به پایین‌دست منتقل می‌شود. با کاهش عمق آب و افزایش عدد فرود جریان در پایین‌دست، جریان ورودی از کانال فرعی و کانال اصلی با شدت بیشتری به هم برخورد می‌کنند و دو گرداب با قدرت بزرگ‌تری تشکیل و در جهت عکس هم حرکت می‌کنند که در نهایت تخریب بستر را تشدید می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۶- الف دیده

مواد بستر در گوشه پایین‌دست تلاقی را در همان ابتدا با شدت به سطح جریان پرتاب نموده و همراه جریان به طرف پایین‌دست منتقل کرده (شکل ۴).



شکل ۴- معلق شدن ذرات بستر در گوشه پایین‌دست تلاقی

مواد بستری که به سطح جریان آورده می‌شوند، پس از اینکه به سطح آب نزدیک می‌شوند انرژی آن‌ها مستهلک شده و زمانی که در حال فرونشستن هستند، جریان ثانویه آن‌ها را به طرف پایین‌دست تلاقی حمل می‌کند و با ته‌نشین شدن این ذرات زمینه‌ساز پدید آمدن تپه رسوب‌گذاری می‌شوند.

حفره آب‌شستگی ایجاد شده در محل تلاقی، بعد از گذشت مدت زمانی از آزمایش، در چهار جهت توسعه می‌یابد. این چهار جهت شامل توسعه درون شاخه فرعی، توسعه در عرض کانال فرعی در دهانه تلاقی، توسعه در جلوی دهانه تلاقی به سمت محور کانال اصلی و توسعه از محل تلاقی به سمت پایین‌دست است (شکل ۵).

رسوباتی که از بستر در محل دهانه تلاقی فرسایش یافته با فاصله کمی نسبت به دیواره پایین‌دست تلاقی تجمع کرده، به مرور زمان بر ابعادش افزوده شده و خود را به دیواره پایین‌دست می‌رساند. ارتفاع تپه رسوب‌گذاری با گذشت زمان در اثر انباشته شدن رسوبات محل تلاقی افزایش می‌یابد تا جایی که گردابه‌ها در لایه‌های بالایی جریان مانع افزایش بیشتر آن شده و با حمل رسوبات قله، سبب مسطح شدن تپه رسوب‌گذاری می‌شود. به همین دلیل تپه ایجاد شده در اوایل آزمایش نوک تیز و باریک بوده ولی با گذشت زمان پهن‌تر و وسیع‌تر می‌شود.

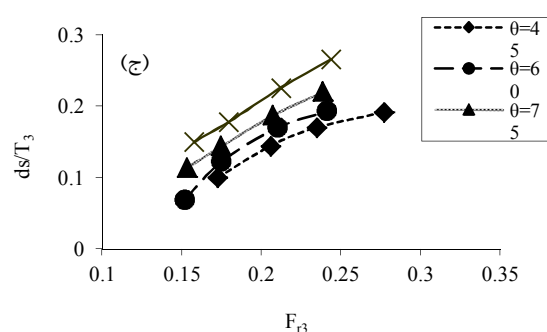
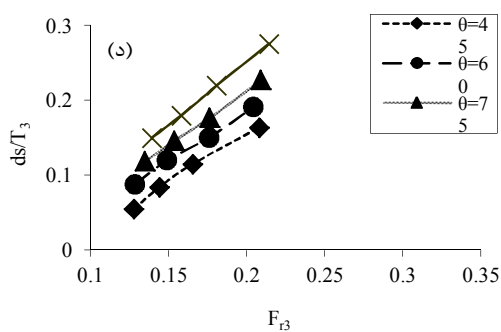
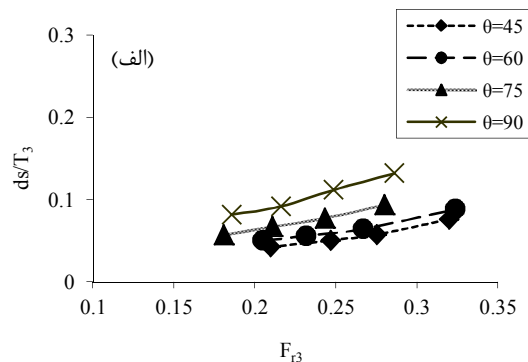
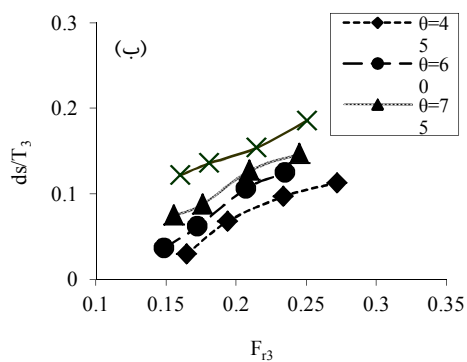
در شیب ۹۰ درجه کانال اصلی، تپه رسوب‌گذاری حالت گسترده پیدا کرده ولی در شیب‌های ملایم و به خصوص در نسبت دبی‌های پایین به صورت لایه نازکی از رسوب

ورودی از کانال فرعی خیلی بیشتر از کانال اصلی شده و با قدرت بیشتری وارد کانال اصلی می‌شود. برخورد جریان کانال فرعی به جریان کانال اصلی مانند نسبت دبی‌های قبلی، دو گرداب چرخشی به وجود می‌آورد که در این نسبت دبی گرداب نزدیک‌تر به سمت تلاقی قوی‌تر بوده و سبب به تخریب بیشتر می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود شیب این نمودارها نسبت به نمودارهای قبلی تندتر شده و حداکثر عمق آب‌شستگی مقدار بیشتری نسبت به نمودارهای (الف) تا (ج) به دست می‌آید. همچنین شکل‌های ۶- الف تا ۶- د نشان می‌دهد که در یک عدد فرود جریان یکسان در تلاقی با شیب جانبی ۹۰ درجه و ۴۵ درجه، به ترتیب، بیشترین و کمترین مقدار حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی به دست می‌آید.

می‌شود، عمق نسبی آب‌شستگی با شیب به نسبت ملایمی نسبت به عدد فرود در حال افزایش است. ضمن اینکه شیب ۴۵ و ۶۰ درجه در این نسبت دبی عملکرد مشابهی از خود نشان می‌دهند.

در شکل‌های ۶- ب) و ۶- ج نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت دبی از ۰/۲۷ به ۰/۴ مقادیر حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی، همچنین شیب نمودارها افزایش پیدا کرده است که این مسئله به دلیل افزایش قدرت گردابه‌های به وجود آمده در اثر برخورد جریان دو کانال اصلی و فرعی است. در این نمودار هم عملکرد به طور تقریبی یکسان شیب ۴۵ و شیب ۶۰ درجه و فاصله آن‌ها با شیب ۹۰ درجه دیده می‌شود.

برای نسبت دبی ۰/۵۵ (شکل ۶- د)، دبی شاخه فرعی از دبی کانال اصلی بیشتر شده و با توجه به اینکه سطح مقطع کانال فرعی از کانال اصلی کوچک‌تر است، مومنوم



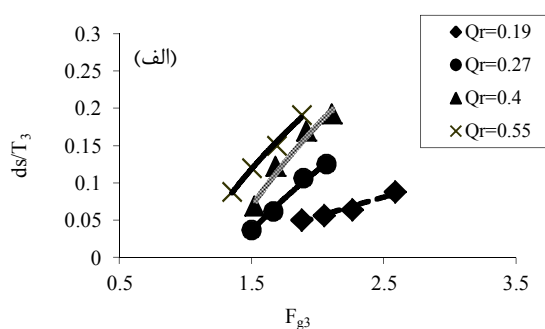
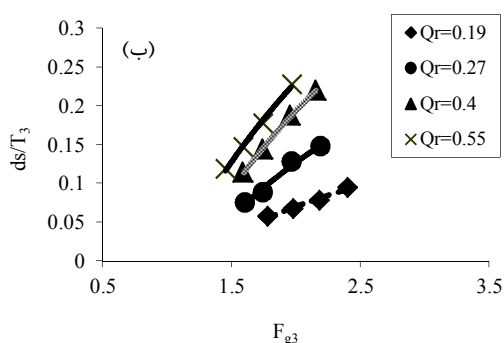
شکل ۶- تغییرات حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی بستر در مقابل عدد فرود جریان پایین دست تلاقی برای شیب‌های جانبی مختلف و برای Qr برابر با الف) ۰/۱۹، ب) ۰/۲۷، ج) ۰/۴ و د) ۰/۵۵

در تلاقی کانال یا رودخانه‌ها است (قبادیان و شفافی بجستان، ۱۳۸۶). شکل‌های ۷- الف و ۷- ب به ترتیب، تأثیر عدد فرود ذره در پایاب را بر حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی در محل تلاقی به طور نمونه برای دو شیب

تأثیر عدد فرود ذره (F_{g3}) بر حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی $\left(\frac{d_s}{T_3}\right)$

عدد فرود ذره در پایین دست محل تلاقی، یکی از پارامترهای مهم تأثیرگذار بر حداکثر عمق نسبی فرسایش

همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش عدد فرود ذره در پایین دست، صرف‌نظر از تأثیر سایر پارامترها، حداکثر عمق نسبی فرسایش افزایش می‌یابد. همچنین در یک عدد فرود ذره ثابت، با افزایش نسبت دبی، حداکثر عمق فرسایش نیز افزایش می‌یابد که این افزایش برای شیب ۷۵ درجه از ۶۰ درجه بیشتر است. با توجه به اینکه سطح مقطع جریان در شیب ۷۵ درجه نسبت به ۶۰ درجه کمتر است، پس افزایش عدد فرود ذره و یا افزایش نسبت دبی می‌تواند تلاطم و در ادامه گردابه قوی‌تری در محل تلاقی به وجود آورد و سپس فرسایش بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۷- تغییرات حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی بستر در مقابل عدد فرود ذره برای شیب‌های جانبی الف) زاویه ۶۰ درجه و ب) زاویه ۷۵ درجه

نسبت دبی و عمق نسبی یکسان، با افزایش شیب جانبی کانال اصلی، عمق حداکثر فرسایش افزایش پیدا می‌کند. با کاهش عمق جریان آب در یک دبی یکسان، دو جریان اصلی و فرعی با مومنوم بزرگ‌تری به هم برخورد کرده که حاصل آن ایجاد گردابه‌های قائم در محل تلاقی و تخریب بستر است. زمانی که شیب کانال اصلی از حالت قائم به ۴۵ درجه نزدیک می‌شود، شکل گردابه‌ها تغییر پیدا می‌کند و قدرت آن‌ها کمتر می‌شود. بنابراین فرسایش کمتری نسبت به شیب‌های قائم خواهد داشت. در مورد تپه رسوب‌گذاری، هرچه عمق جریان کمتر شود، ذرات کنده شده از محل تلاقی، فرصتی برای روی هم قرار گرفتن پیدا نمی‌کنند و با توجه به افزایش تنش برشی ایجاد شده در روی تپه رسوب‌گذاری، بیشتر رسوبات به محض قرار گرفتن در روی تپه سریع با جریان آب شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند. از این رو عمق جریان آب کنترل کننده ارتفاع تپه رسوب‌گذاری نیز است.

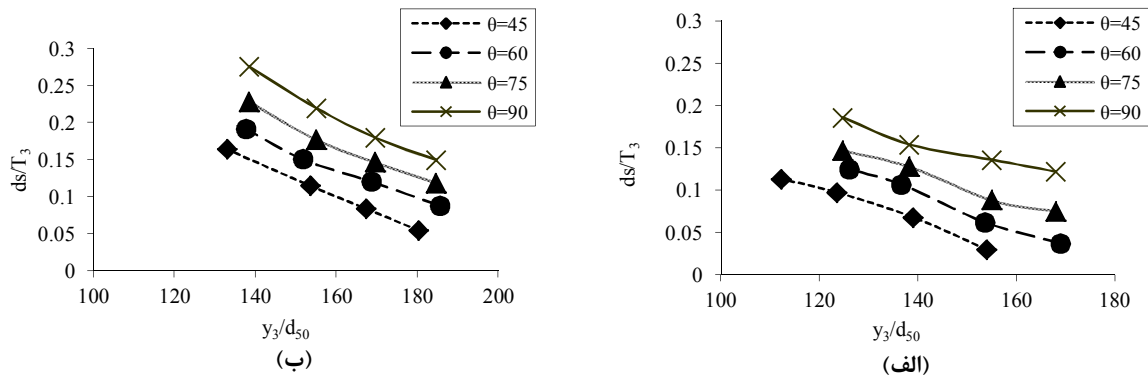
۶۰ و ۷۵ درجه نشان می‌دهد.

برای افزایش عدد فرود ذره با توجه به ثابت بودن قطر متوسط ذرات بستر، بدین گونه عمل شد که با کاهش عمق جریان، سرعت جریان در پایین دست محل تلاقی (V_3) و در نهایت عدد فرود ذره، افزایش پیدا کرد. این امر سبب به افزایش سرعت جریان کانال‌های بالادست محل تلاقی و همچنین افزایش سرعت چرخش گردابه‌های ایجاد شده در محل تلاقی می‌شود. به همین دلیل با افزایش مومنوم کانال‌های فرعی و اصلی، فرسایش بیشتری در محل تلاقی شکل می‌گیرد.

تأثیر عمق نسبی جریان $\left(\frac{y_3}{d_{50}}\right)$ بر حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی $\left(\frac{d_s}{T_3}\right)$

عمق جریان نیز یکی از پارامترهای مهم در مسئله فرسایش در محل تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها است به طوری که کاهش آن می‌تواند تأثیر زیادی بر قدرت گردابه‌های به وجود آمده و همچنین ارتفاع تپه رسوب‌گذاری ایجاد شده داشته باشد. شکل‌های ۸- الف و ۸- ب، به ترتیب، تأثیر عمق نسبی جریان را بر حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی در محل تلاقی به طور نمونه برای دو نسبت دبی ۰/۲۷ و ۰/۵۵ نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۸- الف و ۸- ب مشخص است با کاهش عمق نسبی جریان، حداکثر عمق نسبی فرسایش افزایش یافته است. برای نسبت دبی‌های بالا و به ویژه زمانی که جریان کانال فرعی از شاخه اصلی بیشتر است، شیب این نمودار تندتر است (شکل ۸- ب). برای یک



شکل ۸- تغییرات حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی بستر در مقابل عمق نسبی جریان برای نسبت دبی‌های الف) $Q_r = 0.27$ و ب) $Q_r = 0.55$

۶۴ آزمایش روی تلاقی ۹۰ درجه با چهار شیب جانبی کانال اصلی تحت شرایط هیدرولیکی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها با روش رگرسیون چند متغیره با نرم‌افزار SPSS-15 تجزیه و تحلیل شدند که در نهایت، معادلات (۴) و (۵) با دقت مناسبی حاصل شد:

$$\frac{d_s}{T_3} = 0.2 Q_r^{1.175} F_{g3}^{1.473} \sin \theta^{1.195} \quad R^2 = 0.89 \quad (۴)$$

$$\frac{d_s}{T_3} = 0.1 Q_r^{1.144} F_{r3}^{2.294} \left(\frac{y_3}{d_{50}} \right)^{1.059} \sin \theta^{1.035} \quad R^2 = 0.88 \quad (۵)$$

نشان دهنده همبستگی معکوس ولی غیرمعنی‌دار است. بنابراین ارتباط غیرخطی بین این دو پارامتر به صورت یک ارتباط معکوس منظم نبوده و انتظار بر این است که توان مربوط به پارامتر عمق نسبی مثبت باشد.

در جدول ۳ درصد کاهش فرسایش و آب‌شستگی شیب‌های مختلف نسبت به ۹۰ درجه به ازای نسبت دبی‌های مختلف آورده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، برای هر شیب، با افزایش نسبت دبی درصد کاهش آب‌شستگی نسبت به شیب قائم کاهش پیدا می‌کند و یا به عبارت دیگر، کارایی شیب‌دار کردن کانال اصلی با افزایش نسبت دبی کاهش می‌یابد. نکته دیگری که از جدول ۳ می‌توان برداشت کرد این است که در یک نسبت دبی مشخص با افزایش شیب جانبی از ۴۵ به ۷۵ درجه، درصد کاهش آب‌شستگی کاهش می‌یابد. بهترین عملکرد مربوط به شیب ۴۵ درجه و در نسبت دبی‌های پایین است. در

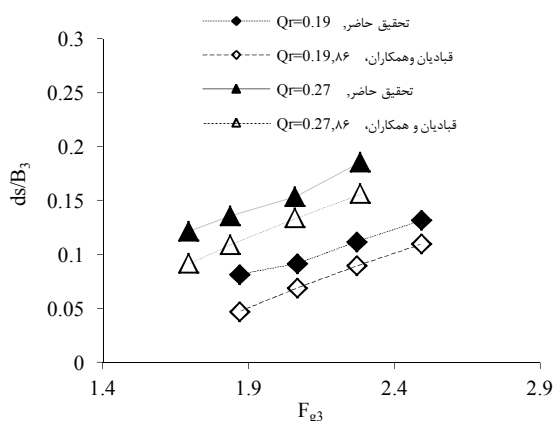
استخراج معادلات پیش‌بینی حداکثر عمق نسبی فرسایش بستر در محل تلاقی

برای بررسی اثر متقابل شیب جانبی کانال اصلی (Z)، نسبت دبی (Q_r)، عدد فرود ذره (F_{g3})، عدد فرود جریان (F_{r3}) و نسبت بی‌بعد عمق جریان به اندازه متوسط ذرات (y_3/d_{50}) روی حداکثر عمق آب‌شستگی،

این دو معادله در محدوده $0.119 < Q_r < 0.55$ ، $0.24 < F_{g3} < 0.90$ ، $0.112 < F_{r3} < 0.32, 45 < \theta < 90$ ، $0.13 < y_3$ کاربرد دارد.

معادلات (۴) و (۵) از نتایج آزمایش‌ها مستخرج شده و نشان می‌دهد که عدد فرود ذره و عدد فرود جریان بیشترین تأثیر را نسبت به پارامترهای دیگر در حداکثر عمق آب‌شستگی در محل تلاقی رودخانه‌ها دارد. تأثیر پارامتر شیب جانبی کانال اصلی در پدیده فرسایش در محل تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها از نتایج دیگر معادلات (۴) و (۵) است. همچنین حداکثر عمق نسبی فرسایش بستر در محل تلاقی، با افزایش نسبت دبی، عدد فرود ذره، عدد فرود جریان، زاویه شیب جانبی کانال اصلی و کاهش عمق جریان افزایش می‌یابد.

در معادله (۵) با توجه به اینکه با افزایش پارامتر y_3/d_{50} مقدار حداکثر عمق نسبی فرسایش، کاهش معناداری پیدا می‌کند، ولی مقدار ضریب همبستگی بین این دو پارامتر



شکل ۹- مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش قبادیان و همکاران (۱۳۸۶)

همان‌گونه که دیده می‌شود، با افزایش عدد فرود ذره در پایین‌دست، حداکثر عمق نسبی آب‌شستگی در هر پژوهش افزایش می‌یابد و روند مشابهی در نتایج هر دو پژوهش مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در محل تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها، ورود جریان از شاخه فرعی به اصلی، سبب ایجاد گردابه‌های چرخشی شده که در نهایت سبب فرسایش بستر در محل تلاقی می‌شود. در این پژوهش با انجام ۶۴ آزمایش روی تلاقی دو کانال رسوبی با زاویه اتصال ۹۰ درجه، به بررسی حداکثر عمق فرسایش بستر در محل تلاقی پرداخته شده است. در این آزمایش‌ها، تأثیر چهار شیب جانبی کانال اصلی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر این پژوهش، چهار نسبت دبی و چهار عدد فرود ذره پایاب بر حداکثر عمق فرسایش بستر در محل تلاقی در نظر گرفته شده است. با استفاده از رگرسیون چند متغیره، روابطی نیز برای محاسبه حداکثر عمق فرسایش در محل تلاقی ارائه شد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش شیب جانبی کانال اصلی، نسبت دبی، عدد فرود ذره در پایاب و عدد فرود جریان پایین‌دست، حداکثر عمق نسبی فرسایش افزایش می‌یابد. از طرفی در یک نسبت دبی ثابت، کاهش عمق جریان سبب افزایش عمق فرسایش می‌شود. بیشترین مقدار کاهش آب‌شستگی مربوط به شیب جانبی ۴۵ درجه و در نسبت دبی ۰/۲ معادل ۴۶ درصد به دست آمد.

نسبت دبی‌های کم، جریان کانال اصلی با مومنتوم و قدرت بیشتر، جریان شاخه فرعی را مجبور به عبور از روی شیب جانبی کانال اصلی می‌کند که این مسئله سبب کاهش شکل‌گیری گرداب و کم کردن قدرت آن می‌شود. اما در نسبت دبی‌های بالا و به ویژه زمانی که جریان شاخه فرعی از اصلی بیشتر است، این مومنتوم کانال فرعی است که تعیین کننده است و نقش شیب جانبی در این حالت بیشتر از قدرت گردابه سبب تغییر شکل آن می‌شود. همچنین در این حالت، ناحیه جداسازی بیشتر بوده و پس با توجه به قدرت زیاد جریان فرعی، جریان کمتری از روی شیب عبور می‌کند. البته در طبیعت به طورعموم نسبت دبی‌ها پایین است و دبی شاخه فرعی نسبت به شاخه اصلی بسیار کمتر است. به همین دلیل و با توجه به نتایج پژوهش می‌توان مایل بودن شیب جانبی کانال را در بهبود فرسایش در محل تلاقی توصیه کرد.

جدول ۳- درصد کاهش آب‌شستگی شیب‌های جانبی مختلف نسبت به ۹۰ درجه برای نسبت دبی‌های مختلف

| درصد کاهش آب‌شستگی | | | |
|--------------------|------|------|------|
| θ | ۴۵ | ۶۰ | ۷۵ |
| Q_r | | | |
| ۰/۱۹ | ۴۶/۲ | ۳۹/۳ | ۲۸/۹ |
| ۰/۲۷ | ۳۷/۸ | ۳۳/۴ | ۱۹/۳ |
| ۰/۴ | ۳۱/۳ | ۱۸/۴ | ۱۰/۴ |
| ۰/۵۵ | ۲۹/۷ | ۱۸/۱ | ۹/۹ |

مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی

در مورد پدیده فرسایش در محل تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها، پژوهش‌های محدودی انجام شده است و نتایج بیشتر آن‌ها به‌صورت کیفی ارائه شده است. پژوهشی که با توجه به شرایط، قابل مقایسه با نتایج کار حاضر است مربوط به پژوهش قبادیان و همکاران (۱۳۸۶) و فقط برای شیب جانبی ۹۰ درجه است. از این‌رو با توجه به معادله (۱) ارائه شده با آن‌ها، پارامترهای نسبت دبی، عدد فرود ذره و نسبت پهنا را در معادله (۱) جایگذاری کرده و حداکثر مقدار عمق نسبی آب‌شستگی به دست آمده از این معادله با نتایج این پژوهش مقایسه شده است (شکل ۹).

8. Best J. L. 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*. 35(5):481-498.
9. Borghei S. M. and Sahebari A. J. 2010. Local scour at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Research*. 48(4):538-542.
10. Bryan R. B. and Kuhn N. J. 2002. Hydraulic conditions in experimental rill confluences and scour in erodible soils. *Journal of Water Resources Research*. 38(5):1-22.
11. Gurram S. K. Karki K. S. and Hager W. H. 1997. Subcritical junction flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 123(5):447-455.
12. Karamimoghadam M. Shafai Bajestan M. and Sedghi H. 2010. Sediment entry investigation at the 30 degree water intake installed at a trapezoidal channel. *Journal World Applied Sciences*. 11(1):82-88.
13. Rhoads B. L. 2005. Scaling of confluence dynamics in river systems: some general considerations. *River, Coastal and estuarine morphodynamics*. 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2005, Urbana, Illinois, USA. pp. 379-387.
14. Roy A. G. and Roy R. 1988. Changes in channel size at river confluences with coarse- bed material, *Earth Surface Processes and Landforms*. 13(10):77-84.
15. Shakibainia A. Majdzadeh Tabatabai M. R. and Zarrati A. R. 2010. Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 37(5):772-781.

همچنین با توجه به اختلاف کم زاویه‌ای بین شیب جانبی ۷۵ و ۹۰ درجه، به همین دلیل شیب ۷۵ درجه، از نظر بهبود شرایط فرسایش نسبت به شیب ۹۰ درجه، تفاوت چندانی به ویژه در نسبت دبی‌های بالا نداشته و در نسبت دبی ۰/۵۵، عمق فرسایش حدود ۹ درصد نسبت به شیب ۹۰ درجه کمتر بود. معادله پیشنهادی ارائه شده از نتایج آزمایش‌ها بوده و نشان می‌دهد که عدد فرود ذره در پایاب بیشترین تأثیر را در مقدار عمق نسبی فرسایش دارد. همچنین نکته دیگری که از معادلات پیشنهادی مشاهده می‌شود، تأثیر بالای پارامتر شیب جانبی کانال اصلی است.

منابع

۱. امینی ن. و شفافی بجستان م. ۱۳۹۰. بررسی عمق چاله فرسایشی در پایین‌دست تلاقی رودخانه‌ها در حضور طوقه. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. کرمان.
۲. برقی س. م و نظری ا. ۱۳۸۲. بررسی آزمایشگاهی الگوی رسوب در تقاطع کانال‌ها. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران. اصفهان. ۲۴۷-۲۵۵.
۳. زینی‌وند، م. و شفافی بجستان م. ۱۳۸۸. کنترل چاله فرسایشی در محل تلاقی رودخانه‌ها با استفاده از صفحات مستغرق. مجله پژوهش‌های آبخیزداری. ۸۱:۸۴-۹۱.
۴. سیدیان. س م. و شفافی بجستان م. ۱۳۸۹. مقایسه رسوب معلق ورودی به آبگیر با تغییر زاویه دیواره کانال اصلی از قائم به ۴۵ درجه. نشریه آب و خاک دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۴(۵):۹۹۴-۹۸۵.
۵. فتاحی نیسانی. ح. و برقی س. م. ۱۳۸۵. بررسی پرش هیدرولیکی در تقاطع کانال‌ها. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ۲۶-۲۴ بهمن ۱۳۸۵، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۶. قبادیان ر و شفافی بجستان م. ۱۳۸۶. پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش بستر در محل تلاقی رودخانه‌ها. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱(۱):۵۱-۶۳.
۷. محمدی ص. و شفافی بجستان م. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر شعاع گردشگی لبه پایین‌دست کانال اتصال بر تغییرات تراز بستر رودخانه‌ها. مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۰):۱۲۳-۱۳۰.