

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی عددی- آزمایشگاهی تاثیر پره‌های متقاطع در طرح‌های احیای رودخانه بر تبادلات هایپریک

محمد میرناصری^{*۱}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷

چکیده

سازه‌های کنترل تراز بستر از مهم‌ترین اقدامات بازسازی رودخانه‌ها و آبراهه‌های کوچک هستند. پره‌های متقاطع در انواع I شکل، U شکل، W شکل، J شکل و A شکل از چوب یا الوار، تخته سنگ‌ها و یا ترکیبی از هردو می‌توانند از جمله این سازه‌ها باشند که به اصلاح و بازسازی رودخانه کمک می‌کنند. وجود این سازه‌ها می‌تواند علاوه بر تاثیرات سازنده در جلوگیری از فرسایش و تخریب رودخانه‌ها موجب تغییرات اکولوژی رودخانه‌ها نیز شوند. لذا در این پژوهش با تعبیه دو نوع سازه پره متقاطع I شکل و U شکل در دو ارتفاع (h_{st}) ۵/۲۵ و ۱۰/۵۰ سانتی‌متر ساخته شده از تخته‌سنگ در یک کانال آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۷ متر به بررسی تاثیر وجود این سازه‌ها بر مشخصه‌های تبادلات هایپریک پرداخته شد. از تزریق محلول کلرید سدیم (NaCl) به عنوان ماده ردیاب در ناحیه اصلی جریان و محلول پرمنگنات پتاسیم (KMnO₄) به عنوان ماده ردیاب رنگی در تبادلات هایپریک ناحیه بستر رسوبی استفاده شدند. نتایج نشان دادند که افزایش عدد فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) موجب کاهش پارامترهای حداکثر طول نفوذ جریان هایپریک (L_{HZ})، حداکثر عمق نفوذ جریان هایپریک (d_{HZ}) و میانگین مدت زمان ماند جریان هایپریک (RT) در ناحیه بستر رسوبی شده است. همچنین نتایج نشان دادند افزایش h_{st} در سازه پره متقاطع I شکل سبب افزایش ۸ تا ۱۱۵ درصدی مقدار L_{HZ} شد اما از سوی دیگر، یک روند ثابت بین L_{HZ} با h_{st} در پره‌های متقاطع U شکل مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: اکولوژی رودخانه، پرمنگنات پتاسیم، زمان ماند، کلرید سدیم، همرفت-انتشار

مقدمه

احیای رودخانه‌ها می‌توان به بازسازی زیست‌گاه‌های آن نیز کمک نمود (Pagliara and Kurdistan, 2017).

طرح سازه‌های کنترل تراز بستر^۳ از مهم‌ترین اقدامات اصلاح رودخانه‌ها و آبراهه‌های کوچک هستند. این نوع از سازه‌ها با دو عملکرد: الف) کنترل بستر موجب ایجاد یک نقطه سخت^۴ در بستر رودخانه شده و مقاومت در برابر نیروهای فرسایشی را افزایش می‌دهد و یا ب) کنترل هیدرولیکی موجب افت هیدرولیکی در مسیر جریان شده و انرژی جریان را مستهلک می‌کنند. متداول‌ترین روش ایجاد کنترل تراز بستر، ساخت سازه‌هایی درون کانال اصلی رودخانه می‌باشد (Watson et al., 1999). این روش با اتلاف انرژی جریان و انحراف آن به مرکز کانال رودخانه یا آبراهه و یا با ایجاد استخرهایی به منظور کاهش سرعت جریان می‌تواند به اصلاح و بازسازی رودخانه‌ها کمک کند. یک سازه کنترل تراز بستر با ایجاد ثبات در کانال اصلی جریان می‌تواند از ایجاد تغییرات در بستر رودخانه یا

محافظت از دیواره‌ها و بستر رودخانه در برابر فرسایش و آبستگي یکی از مهم‌ترین موضوعات مهندسی رودخانه بوده که در نهایت از طریق کمک به بازسازی ساختار تخریبی یا در حال تخریب رودخانه و بازگردانی آن به شرایط طبیعی می‌تواند منجر به احیای رودخانه^۲ گردد. در جایی که به سادگی به نیروهای هیدرولیکی طبیعی اجازه می‌دهیم تا به آرامی رودخانه‌ها را تغییر شکل دهند و ناهمگونی طبیعی را برقرار کنند در واقع بحث احیای رودخانه‌ها نادیده گرفته شده است (Gillilan et al., 2005). روش‌های کنترل بستر رودخانه، تثبیت تراز آن، حفاظت از دیواره‌های آن و بازسازی زیست‌گاه‌های طبیعی بخش مهمی از پروژه‌های احیای رودخانه بوده و در واقع با

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

(* نویسنده مسئول: Email: Mohammadmirnaseri@yahoo.com)

3- Grade Control Structures
4- Hard Point

2- River Restoration

سازه‌ها همچنین می‌توانند جهت ایجاد استخرها و هدایت جریان به سمت مرکز رودخانه در بالادست پل‌ها به منظور جلوگیری از آسیب به پایه‌های پل نیز مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۲- نمای از نزدیک یک سازه پره متقاطع (Hickman and Thompson, 2010)



شکل ۱- نمایی از پایین دست یک سازه پره متقاطع U شکل در رودخانه لیتل پاتوکسنت مریلند (Hickman and Thompson, 2010)

دوره جریان زیاد و کم در استخر عمیق ایجاد شده توسط آن، (۳) توسعه خطوط تغذیه در مناطق جداسازی جریان به علت نیروهای رو به پایین و بالا آمدن (جریان‌های هابیریک) قوی در مرکز کانال و همچنین (۴) ایجاد زیستگاهی مناسب برای تخم ریزی در قسمت انتهایی بازوها (Rosgen, 2001). شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نمای شماتیک از بالای یک سازه پره متقاطع با اشکال U و I در مسیر جریان یک آبراهه و حفره‌های ایجاد شده ناشی از آن را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها B عرض کانال اصلی آبراهه، Y_0 عمق جریان آبراهه در بالادست، h_{st} ارتفاع سازه پره متقاطع یا در واقع میانگین ارتفاع‌های بالای سنگ‌ها تشکیل‌دهنده این سازه‌ها، Δy اختلاف ارتفاع سطح آب در بالادست و پایین دست سازه پره متقاطع، Z_m حداکثر عمق گودال ناشی از آبشستگی پایین دست، l_m طول گودال ناشی از آبشستگی، l طول سازه پره متقاطع، w حداکثر عرض گستره گودال ناشی از آبشستگی و S_0 نیز شیب طولی کف کانال اصلی آبراهه را بیان می‌دهند (Pagliara and Kurdistani, 2013).

(Pagliara and Kurdistani, 2013) در مطالعات آزمایشگاهی میزان آبشستگی پایین دست سازه‌های پره متقاطع به تعریف عدد فرود مبتنی بر چگالی ذره بستر رسوبی تحت عنوان F_d پرداختند.

$$F_d = \frac{Q}{l \cdot h_{st} \cdot (G_s - 1) \cdot d_{50}^{0.5}} \quad (1)$$

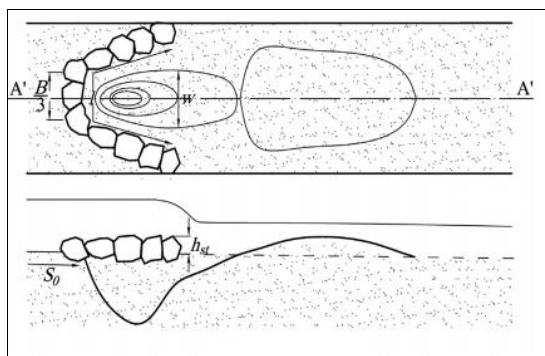
که در این رابطه: Q مقدار دبی جریان در آبراهه یا رودخانه، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی بستر، G_s چگالی نسبی ذرات رسوبی بستر و g نیز شتاب ثقل می‌باشد. آن‌ها نتیجه گرفتند که شکل حفره‌های ناشی از آبشستگی در ارتباط مستقیم با عدد F_d بوده و افزایش محدوده این عدد را موجب افزایش عمق (Z_m) و طول حفره (l_m) ناشی از آبشستگی در پایین دست سازه‌های پره متقاطع ارزیابی کردند.

آبراهه در آن مقطع جلوگیری کند. این سازه‌های کوچک و ساده همچنین می‌توانند از دیواره‌های رودخانه یا آبراهه در مقابل فرسایش یا جابه‌جایی خصوصاً در نواحی پیچان رودی نیز محافظت نمایند. این

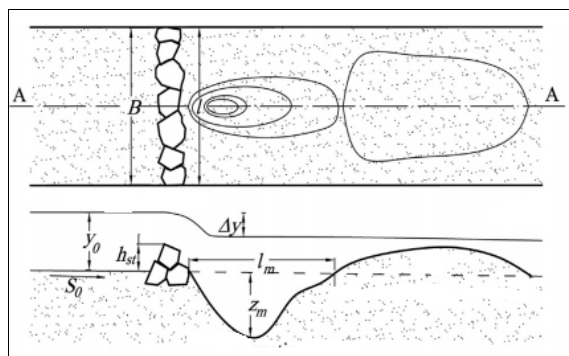
پره‌های متقاطع در انواع I شکل، U شکل، W شکل، J شکل و A شکل از چوب یا الوار^۱، تخته سنگ‌ها^۲ و یا ترکیبی از هر دو ساخته می‌شوند (Rosgen, 2001). پره‌های متقاطع به شرط عدم محدودیت از نظر اجرایی می‌توانند جایگزین مفیدتری از نظر زیست‌محیطی نسبت به دیواره‌های محافظتی سواحل رودخانه مانند سنگ‌چین‌ها^۳ یا روش‌های سنتی کنترل تراز بستر نظیر سدهای اصلاحی^۴ باشند (Pagliara and Kurdistani, 2013). در شکل (۱) پره متقاطع U شکل در رودخانه لیتل پاتوکسنت^۵ مریلند^۶ برای محافظت از یک خط فاضلاب که از بالادست پره عبور می‌کند، نشان داده شده است. سنگ‌های پره متقاطع باید به خوبی در کنار هم قرار گیرند و فضای خالی ایجاد شده بین تخته سنگ‌ها می‌بایست با سنگ‌های کوچکتر با طیف وسیعی از اندازه‌ها پر شده و همچنین سنگ‌های زیرین در پارچه‌های کنفی^۷ پیچیده شوند که این امر به جلوگیری از فرسایش رسوب موجود در شکاف بین سنگ‌ها نیز کمک خواهد کرد (Hickman and Thompson, 2010). شکل (۲) نمونه‌ای از اجرای سازه پره متقاطع و قرارگیری سنگ‌ها در این سازه از نمای نزدیک را نشان می‌دهد.

پره متقاطع U شکل یک ساختار بهبود زیستگاه رودخانه است به دلیل: (۱) افزایش پوشش کناره‌های رودخانه به دلیل افزایش متفاوت سطح آب در سواحل، (۲) ایجاد پوشش نگهدارنده و پناه‌گاه در هر دو

- 1- Logs
- 2- Boulders
- 3- RipRap
- 4- Check-Dam
- 5- Little Patuxent River
- 6- Maryland
- 7- Geotextile Fabric



شکل ۴- نماهای از بالا (مقطع A'-A') و جانبی پره متقاطع با شکل U (Pagliara and Kurdistani, 2013)



شکل ۳- نماهای از بالا (مقطع A-A') و جانبی پره متقاطع با شکل I (Pagliara and Kurdistani, 2013)

اکسیژن محلول در ایجاد تنوع و کیفیت زیست‌گاه‌های جریان زیرسطحی برای موجودات زنده موجب ایجاد اثرات مختلف بر اکوسیستم‌های رودخانه‌ای خواهد شد (Findlay et al., 1993; Kim et al., 1992).

محمدعلیزاده و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی تاثیر سازه‌های تثبیت کننده بستر از نوع سرریزهای گابیونی بر روند تبادلات هاپیریک پرداختند. آن‌ها ایجاد روند کاهشی در مانینگین مدت زمان ماند و هم‌چنین دبی تبادلی جریان‌های هاپیریک در شرایط وجود سرریزهای گابیونی را نتیجه گرفتند.

غلامی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر آبشکن‌های متخلخل بر روند همرفت املاح در رودخانه‌ها پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود آبشکن‌های متخلخل در مسیر جریان باعث افزایش تبادلات هاپیریک شده لذا این تغییر در مقدار دبی تبادلی و هم‌چنین مدت زمان سبب خواهد شد تا معادله همرفت-انتشار^۴ (ADE) قابلیت مناسب در پیش‌بینی روند همرفت املاح در ناحیه اصلی جریان را نداشته باشد. آن‌ها مدل عددی OTIS را گزینه مناسبی برای شبیه‌سازی املاح در شرایط حضور آبشکن‌های متخلخل دانستند.

برزعلی و همکاران (۱۴۰۳) در یک پژوهش میدانی در رودخانه گرمادشت گرگان به بررسی تنه درخت‌های افتاده در مسیر جریان رودخانه در سه ارتفاع مختلف ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر پرداختند. آن‌ها بیش‌ترین دبی تبادلی در ارتفاع تنه درخت ۳۰ سانتی‌متر مشاهده کردند. آن‌ها هم‌چنین نتیجه گرفتند که طول نفوذ جریان به نواحی هاپیریک با افزایش ارتفاع تنه درختان افزایش یافته بنابراین میزان پیمایش این خطوط در نواحی هاپیریک نیز بیش‌تر خواهد شد لذا میانگین مدت زمان ماند با افزایش ارتفاع تنه درختان نیز بیش‌تر خواهد شد.

اسکورلاک در مطالعه‌ای به توسعه مدل تک‌بعدی به‌منظور پیش‌بینی اتلاف انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر از نوع پره متقاطع U شکل پرداختند (Scurlock et al., 2011). ایشان در پژوهشی دیگر که شامل ۲۷ آزمایش بوده است به ارزیابی پارامترهای هندسه ناشی از آبستنگی در پایین‌دست سه نوع مختلف سازه پره متقاطع A، U و W شکل پرداخته و در نهایت سه معادله مختلف را برای تخمین عمق آبستنگی برای هر نوع سازه به‌دست آوردند (Scurlock et al., 2012a,b).

منطقه هاپیریک^۱ ناحیه‌ای بلافاصله زیر بستر رودخانه‌ای است که اختلاط آب‌های سطحی در طی جریان‌های رو به پایین با آب‌های زیرسطحی در آن‌جا اتفاق می‌افتد. این منطقه نقش بسیار حیاتی در اکولوژی رودخانه^۲ دارد و سبب خودپالایی جریان نیز می‌شود (آبشوری و همکاران، ۱۴۰۰). در جریان یک رودخانه، آب‌های سطحی و زیرسطحی مرتباً در تعامل با یک‌دیگر بوده لذا اکتشاف فرآیندهای پیچیده این ناحیه منجر به درک جدیدی از پیامدهای گسترده آن برای کیفیت آب و اکولوژی رودخانه شده است.

در سال‌های گذشته، تحقیقات انجام شده در خصوص تبادلات هاپیریک بیش‌تر با هدف بررسی تاثیر فرآیندهای زیست‌زمین‌شناسی^۳ جریان در نواحی هاپیریک و اثرگذاری آن بر اکولوژی رودخانه‌ها و آبراهه‌ها بوده است (Boano et al., 2014). تبادلات هاپیریک موجب ایجاد اثرات مختلفی از جمله همرفت املاح به نواحی رسوبی و تغییر غلظت املاح در این نواحی زیرسطحی می‌گردد (Bencala and Walters, 1983). هم‌چنین جریان‌های رو به پایین، آب‌های سطحی را که سرشار از اکسیژن محلول هستند را به مناطق کم‌عمق هاپیریک منتقل می‌سازند. این تغییرات در غلظت املاح و

4- Advection-Dispersion Equation

1- Hyporheic Zone
2- Stream Ecology
3- Biogeochemistry

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به طول ۱۲ متر، عرض کف ۰/۵ متر، ارتفاع دیواره‌های کناری ۰/۷ متر و شیب طولی ۰/۰۶ هست. آب موردنیاز برای تمامی آزمایش‌ها توسط یک پمپ گریز از مرکز با حداکثر دبی جریان ۲۲/۵ لیتر بر ثانیه تأمین گردید. طراحی سیستم این کانال آزمایشگاهی از این جهت بوده که جریان مستقیماً بعد از پمپاژ وارد کانال نشود و در واقع با این نوع هدایت، زمینه ایجاد شرایط جریان پایدار و یکنواخت در تمامی آزمایش‌ها فراهم خواهد شد.

آماده‌سازی بستر رسوبی

به‌منظور شبیه‌سازی بستر رودخانه‌ای حدوداً ۲/۵ تن مصالح شن و ماسه از یک معدن تولیدی واقع در رودخانه تجن شهرستان ساری تهیه شد. وجود سازه‌ها در مسیر جریان احتمالاً موجب افزایش عمق تبادلات هائیریک خواهد شد لذا با در نظر گرفتن این فرضیه تلاش شد ضخامت بستر رسوبی با انجام یک‌سری پیش‌آزمایش به‌گونه‌ای تعریف و ایجاد گردد که جریان‌های هائیریک در حضور سازه پره متقاطع به‌طور کامل شکل گیرد. بدین‌منظور ضخامتی در حدود ۲۵ سانتی‌متر از مصالح شن و ماسه با قطر متوسط (d₅₀) ۱۰/۲۰ میلی‌متر و تخلخل (n) ۰/۳۹ در طول ۱۲ متر از ابتدای کف کانال آزمایشگاهی تا انتهای آن ایجاد گردید.

سازه پره متقاطع

در این پژوهش برای طراحی و اجرای سازه‌های پره متقاطع I شکل و U شکل سعی شد تا توصیه‌های اجرایی مطالعه Rosgen (2001) لحاظ شود. طبق این مطالعات، ایجاد یک پره متقاطع از مصالح سنگی به‌صورت U معکوس در مسیر جریان می‌تواند به کاهش تنش برشی، سرعت و قدرت جریان در سواحل کناری آبراهه منجر شده و انرژی جریان را به سمت آبراهه هدایت نماید. حالت U شکل معکوس این نوع سازه‌ها می‌بایست به‌گونه‌ای در مسیر جریان قرار گیرد که حدوداً یک‌سوم عرض کانال اصلی جریان (B) در قسمت عمود بر مسیر جریان و در قسمت میانی مرکز کانال اصلی آبراهه لحاظ شود و در سمت چپ و راست نیز بازوهای پایین‌رونده به سمت پایین‌دست و با زاویه حدوداً ۲۰ الی ۳۰ درجه به سمت سواحل چپ و راست آبراهه ایجاد شوند. شکل (۵) نمای شماتیک پره متقاطع U شکل ایجادشده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، زاویه بازوهای کناری سازه‌های این پژوهش حدوداً ۳۱ درجه تنظیم و ۱۷ سانتی‌متر از این سازه در بخش میانی جریان و متقاطع بر مسیر جریان قرار گرفت. طول این سازه (l) حدوداً برابر ۷۹ سانتی‌متر بوده لذا نسبت l/B نیز حدوداً ۱/۶۱ برآورد شده است. همچنین دو ارتفاع ۵/۲۵ و ۱۰/۵۰ سانتی‌متر به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع سازه پره

راثو و همکاران با استفاده از یک آبشکن متخلخل در شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده کانال فاضلاب، میزان حذف آلاینده را قبل و بعد از ساخت آبشکن بررسی کردند و نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که آبشکن متخلخل می‌تواند به‌طور موثری ظرفیت نیترات موجود را بهبود بخشد (Rao et al., 2018). همچنین پال و گاللی نیز یکی از راه‌کارهای کنترل آلودگی را استفاده از سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه‌ها دانستند و سدهای اصلاحی گابیونی را به‌عنوان یکی از این سازه‌ها در نظر گرفتند که با توجه به متخلخل بودن این‌گونه سدها می‌توانند نقش مهمی در کنترل آلودگی و کمک به خودپالایی رودخانه ایفا نمایند (Pal and Galelli, 2019).

پره‌های متقاطع، صفحات مستغرق^۱، آبشکن‌های کناری، سدهای اصلاحی، آبشکن‌های تیغه‌ای و سایر سازه‌های به‌کار رفته در طرح‌های اصلاح و بازسازی رودخانه‌ها اگرچه تأثیرات سازنده‌ای در جلوگیری از تخریب و فرسایش رودخانه‌ها را ایفا می‌کنند اما قطعاً این تغییرات ایجاد شده در هیدرولیک جریان رودخانه‌ها و آبراهه‌ها به علت وجود هر یک از این سازه‌ها سبب خواهد شد تا اکولوژی رودخانه‌ها نیز تحت تأثیر قرار گیرند. وجود سازه‌هایی هم‌چون پره متقاطع در مسیر جریان موجب خواهد شد تا تبادلات هائیریک بین ناحیه اصلی جریان و ناحیه بستر رسوبی دچار تغییرات فراوانی گردد بنابراین حجم این تبادلات و میانگین مدت زمان ماند اصلاح در نواحی هائیریک دست‌خوش تغییرات فراوانی خواهند شد.

وجود سازه‌هایی هم‌چون پره متقاطع در مسیر جریان موجب تغییراتی در مشخصه‌ها و میزان تبادلات هائیریک بین ناحیه اصلی جریان و ناحیه بستر رسوبی خواهد شد. مرور مطالعات پیشین نشان داد که اغلب مطالعات احیا و بازسازی رودخانه‌ها و آبراهه‌ها در زمینه پره متقاطع بر جنبه‌های هیدرولیکی این نوع سازه‌ها تمرکز داشته و کمتر به بررسی تأثیرات اکولوژیکی احداث این سازه‌ها در مسیر آبراهه‌ها و رودخانه‌ها پرداخته شد. لذا در این پژوهش سعی شد تا با شبیه‌سازی آزمایشگاهی به مطالعه تأثیر سازه‌های پره متقاطع از نوع I شکل و U شکل بر روند تبادلات هائیریک در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها پرداخت.

مواد و روش‌ها

کانال آزمایشگاهی

اجرای آزمایش‌های هیدرولیکی این پژوهش در یک کانال مستطیلی آزمایشگاهی پایه‌دار که در حدود ۱ متری از سطح زمین واقع شده و دارای دیواره و کف شفاف از جنس پلکسی‌گلس انجام پذیرفت. این کانال آزمایشگاهی در مجموعه گروه مهندسی آب

در این پژوهش برای ساخت پره‌های متقاطع I شکل و U شکل سعی شد تا از تخته‌سنگ‌های با ابعاد یکسان استفاده شود تا حداقل فضای خالی بین آن‌ها ایجاد گردد و همچنین فضاهای خالی نیز توسط خرده‌سنگ‌هایی با ابعاد مختلف به‌طور کامل پر شده تا شاهد یک جریان روگذر از سازه باشیم. در شکل (۶) نمای از بالای یک سازه پره متقاطع I شکل با ارتفاع (h_{st}) ۱۰/۵۰ سانتی‌متر در دو طبقه تخته‌سنگ، به‌گونه‌ای که طبقه زیرین در پارچه‌های کفنی پیچیده شده در شرایط عبور جریان نشان داده شده است. شکل (۷) نمای از پایین دست کانال آزمایشگاهی همراه با تعبیه سازه پره متقاطع U شکل را نشان می‌دهد.



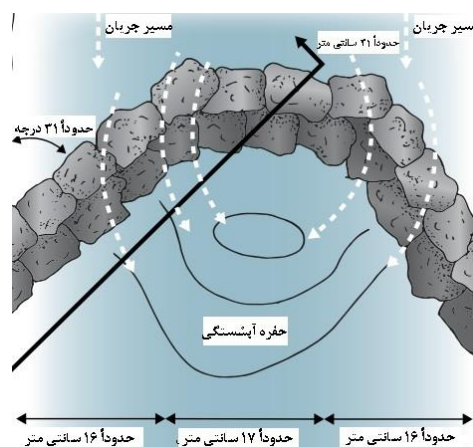
شکل ۶- نمای از بالای پره متقاطع I شکل با ارتفاع ۱۰/۵۰ سانتی‌متر

پره متقاطع تعبیه شده و یک عدد حسگر نیز در پایین دست سازه‌ها قرار گرفتند.

محلول کلرید سدیم (NaCl) به ناحیه اصلی جریان وارد شده و اگر مسیر جریان در کانال آزمایشگاهی به‌صورت یک سیکل بسته باشد موجب خواهد شد تا املاح برگشتی در آزمایش‌های بعدی موجب ایجاد خطای فاحش در مقادیر ثبتی داده‌های هدایت الکتریکی (EC) شوند. لذا با ایجاد تغییراتی در ساختار کانال آزمایشگاهی تلاش شد تا جریان در کانال آزمایشگاهی به‌صورت یک‌طرفه برقرار شده و در واقع جریان از انتهای کانال آزمایشگاهی خارج گردیده و هر بار جریان تازه به کانال آزمایشگاهی پمپاژ گردید. شکل (۸) نحوه تعبیه لوله‌هایی در انتهای پایین دست کانال آزمایشگاهی به‌منظور خروج جریان دارای املاح و شکل‌گیری جریان غیر چرخشی را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، به‌منظور تعیین مشخصات جریان در ناحیه جریان زیرسطحی شامل: الف) سرعت جریان در نواحی متخلخل بستر رسوبی (V_{HZ})، ب) حداکثر عمق نفوذ جریان هابیریک (d_{HZ}) و ج)

مقاطع (h_{st}) بر روند انتقال املاح در جریان‌های سطحی و زیرسطحی در نظر گرفته شدند. از سوی دیگر، سازه‌های پره متقاطع I شکل نیز به‌منظور بررسی تأثیر شکل نوع سازه پره متقاطع بر روند همرفت املاح در جریان‌های سطحی و زیرسطحی در بخش دیگری از آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. این نوع از پره‌های متقاطع کاملاً عمود بر جریان بوده و دارای نسبت L/B برابر ۱ می‌باشند. در این نوع از پره‌ها نیز همان ارتفاع‌های پره‌های متقاطع U شکل باهدف بررسی اثر ارتفاع در این نوع از سازه‌ها و همچنین مقایسه صحیح با سازه‌های U شکل در نظر گرفته شدند. مکان تعبیه شروع قرارگیری سازه‌های پره متقاطع در کلیه آزمایش‌ها از ۸/۵ متری پایین دست از ابتدای بستر رسوبی بوده است.



شکل ۵- نمای شماتیک از بالای پره متقاطع U شکل طراحی شده

ماده ردیاب

در این پژوهش به‌منظور مطالعه نحوه همرفت و انتشار املاح در ناحیه جریان سطحی از محلول کلرید سدیم (NaCl) به‌عنوان ماده ردیاب استفاده شد. بدین منظور مقدار ۱۲۵ گرم ماده جامد نمک خوراکی را در یک ظرف چهار لیتری آب حل و با هم زدن محلولی با غلظت ۳۱۲۵۰ ppm تهیه و به‌صورت آنی (لحظه‌ای) در ابتدای بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان تزریق شد. به‌منظور ردیابی املاح از یک دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی شرکت آتاگو^۱ با دقت ۱۲ بیت که قابلیت اتصال به رایانه را داشته برای ثبت هر ۵ ثانیه یک‌بار مقدار هدایت الکتریکی (EC) استفاده شد. این دستگاه شامل سه عدد حسگر بوده که حسگر اول در فاصله ۵ متری پایین دست از ابتدای بستر رسوبی، حسگر دوم در فاصله ۸ متری پایین دست از ابتدای بستر رسوبی و حسگر سوم نیز در فاصله ۹ متری پایین دست از ابتدای بستر رسوبی جانمایی شدند. بدین ترتیب دو عدد حسگر در بالادست سازه

1- ATAGO CO.

میانگین مدت زمان ماند (RT) از روش تزریق ماده رنگی در ناحیه بستر رسوبی استفاده شد.



شکل ۸- خروج جریان از انتهای پایین دست کانال آزمایشگاهی



شکل ۷- نمای از پایین دست جریان عبوری از پره متقاطع U شکل



شکل ۱۰- ماده رنگی تزریق شده به ناحیه زیرین در بالادست یک سازه پره متقاطع و نحوه شکل گیری ناحیه هایپریک



شکل ۹- نحوه تزریق ماده رنگی به داخل بستر رسوبی

مطابق آنچه بیان شد، سازه‌های پره متقاطع بیش تر باهدف تثبیت بستر و کناره‌های آبراهه یا رودخانه در پروژه‌های احیا و بازسازی کاربرد خواهند داشت اما باهدف در نظر گرفتن نقش ثانویه این سازه‌ها در بهبود کیفیت اکولوژیکی در مسیر جریان آبراهه‌ها بهتر است تا محدوده دبی جریان به گونه‌ای در آزمایش‌ها لحاظ شود که غالباً رژیم جریان از نوع زیربحرانی برقرار بوده یا به عبارتی مطابق رابطه (۱) مقدار عدد فرود ذرات بستر (F_d) در محدوده کم‌تر از ۱ قرار گیرد. چراکه تأثیرات این گونه سازه‌های متقاطع در بهبود کیفی ناشی از افزایش تبادلات هایپریک با مناطق زیرین جریان و افزایش نگهداشت موقت در میسر جریان خواهد بود که طبیعتاً این امر در آبراهه‌ها با دبی‌های جریان کم و در محدوده رژیم جریان زیربحرانی ($F_d < 1$) میسر خواهد شد لذا در این پژوهش محدوده ۲/۵۰ تا ۱۰/۳۵ لیتر بر ثانیه برای دبی‌های جریان از طریق انجام یک سری پیش آزمایش همراه با سازه‌های I و U شکل مورد استفاده برای دست‌یابی به انواع رژیم جریان ترجیحاً در محدوده زیربحرانی انتخاب گردید. تنظیم مقدار جریان خروجی از پمپ با استفاده از یک شیرفلکه با دقت

بدین منظور مقدار ۷ گرم ماده جامد پرمنگنات سدیم^۱ در یک ظرف ۱/۵ لیتری آب حل و محلول تهیه شده به صورت ثقی در عمق ۵ سانتی متری از بالای بستر رسوبی و در فاصله ۱۵ سانتی متری از شروع سازه پره متقاطع توسط یک سرنگ به حجم ۶۰ میلی لیتر که به انتهای آن یک لوله با قطر ۵ میلی متر متصل شده بود به ناحیه جریان زیرین تزریق شد (شکل ۹). سپس مسیر طی شده توسط ماده رنگی در هر یک از آزمایش‌ها به صورت جداگانه روی جداره شفاف کانال آزمایشگاهی ترسیم و طول این مسیر اندازه گیری گردید. هم-چنین مدت زمان طی شدن این ماده رنگی در نواحی نگهداشت بستر رسوبی توسط زمان سنج اندازه گیری و به همراه حداکثر عمق نفوذ برای هر یک از آزمایش‌ها به صورت جداگانه ثبت شده تا مقدار سرعت جریان در نواحی متخلخل زیرین با ثبت زمان و طول مسیر طی شده حرکت جریان هایپریک پس از تزریق ماده رنگی در نواحی متخلخل بستر رسوبی در حضور یک سازه پره متقاطع را نشان می‌دهد.

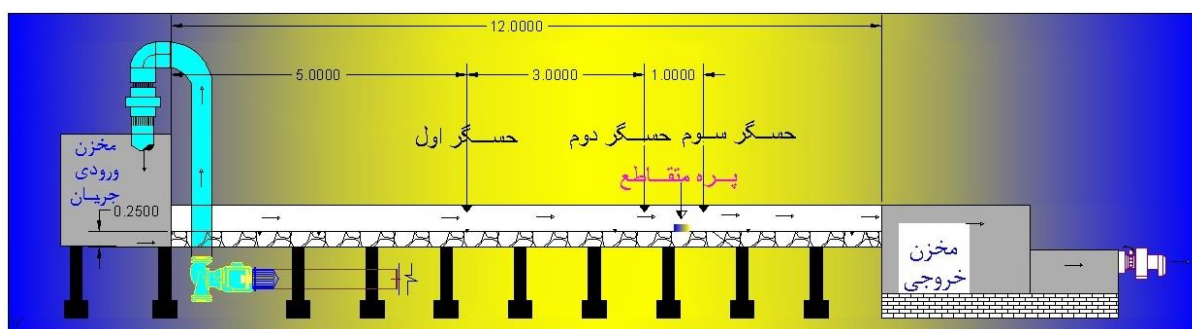
پیتو متصل به فشارسنج انجام شد. بدین صورت که این دستگاه با اتصال به رایانه در هر چهار ثانیه مقدار فشار دینامیک برای محاسبه سرعت لحظه‌ای را ثبت می‌کند. سرعت لحظه‌ای جریان در هریک از آزمایش‌ها چندین مرتبه در مکان‌های مختلف کانال آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و در نهایت سرعت متوسط (U) با استفاده از میانگین این اندازه‌گیری‌ها برآورد شد. عمق جریان آب (d) نیز توسط یک دستگاه عمق‌سنج صوتی با دقت ± 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. این دستگاه دارای دو حسگر بوده که در $1/5$ متری بالادست و $1/5$ متری پایین‌دست سازه پره متقاطع در آزمایش‌های مختلف قرار گرفته و هر ۴ ثانیه عمق جریان عبوری از روی بستر رسوبی را از طریق اتصال به رایانه ثبت نمودند.

بالا در مسیر لوله مکش انجام شده و در هر آزمایش نیز مقدار جریان ورودی به کانال آزمایشگاهی توسط یک دستگاه دبی‌سنج صوتی نصب‌شده روی لوله رانش پمپ کنترل شده تا اطمینان حاصل شود که در محدوده تعیین‌شده قرار داشته‌اند. در این پژوهش مجموعاً ۲۰ آزمایش هیدرولیکی شامل ۴ آزمایش بدون سازه‌های پره متقاطع به‌عنوان آزمایش‌های کنترل (شاهد) و همچنین تعداد ۱۶ آزمایش با انواع سازه‌های پره متقاطع I و U شکل انجام پذیرفتند. محدوده‌های دبی جریان (Q) و اختلاف اعماق بالادست و پایین‌دست تا سازه‌ها (Δy) در آزمایش‌های مذکور روی مدل‌های فیزیکی طراحی شده با محدوده‌های متفاوت نسبت l/B و همچنین مقادیر h_{st} در جدول (۱) ارائه گردیده است.

اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان با استفاده از یک دستگاه لوله

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌ها

شماره آزمایش	سری آزمایش	نوع سازه پره متقاطع	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	l/B	h _{st} (cm)	F _d
۱		-	۲/۵۰	-	-	-
۲		-	۴/۳۰	-	-	-
۳		-	۷/۳۵	-	-	-
۴		-	۱۰/۲۵	-	-	-
۵	سری اول	I	۲/۵۰	۱	۵/۲۵	-۰/۲۴
۶		I	۴/۳۰	۱	۵/۲۵	-۰/۴۱
۷		I	۷/۳۵	۱	۵/۲۵	-۰/۷۱
۸		I	۱۰/۲۵	۱	۵/۲۵	-۰/۹۹
۹	سری دوم	I	۲/۵۰	۱	۱۰/۵۰	-۰/۱۲
۱۰		I	۴/۳۰	۱	۱۰/۵۰	-۰/۲۰
۱۱		I	۷/۳۵	۱	۱۰/۵۰	-۰/۳۵
۱۲		I	۱۰/۲۵	۱	۱۰/۵۰	-۰/۴۹
۱۳	سری سوم	U	۲/۵۰	۱/۶۱	۵/۲۵	-۰/۱۴
۱۴		U	۴/۳۰	۱/۶۱	۵/۲۵	-۰/۲۵
۱۵		U	۷/۳۵	۱/۶۱	۵/۲۵	-۰/۴۴
۱۶		U	۱۰/۲۵	۱/۶۱	۵/۲۵	-۰/۶۱
۱۷	سری چهارم	U	۲/۵۰	۱/۶۱	۱۰/۵۰	-۰/۰۷
۱۸		U	۴/۳۰	۱/۶۱	۱۰/۵۰	-۰/۱۲
۱۹		U	۷/۳۵	۱/۶۱	۱۰/۵۰	-۰/۲۲
۲۰		U	۱۰/۲۵	۱/۶۱	۱۰/۵۰	-۰/۳۰



شکل ۱۱- نمای جانبی شماتیک از کانال آزمایشگاهی و محل جانمایی حسگرها و سازه پره متقاطع (برحسب متر)

شبیه‌سازی دقیق‌تر جابجایی املاح خواهد شد. مدل عددی OTIS یک مدل شبیه‌ساز ریاضی برای بررسی همرفت مواد محلول در رودخانه‌ها بوده که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۶ ارائه شده است. در این نرم‌افزار، مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از روش تفاضل‌های محدود نیمه ضمنی کرانک-نیکلسون حل شده و منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی می‌شوند. به‌منظور این شبیه‌سازی لازم است که منحنی رخنه ماده ردیاب (NaCl) اندازه‌گیری شده در بالادست را به‌عنوان شرط مرزی به نرم‌افزار تعریف کرده تا در نهایت منحنی‌های رخنه پایین‌دست بازتولید شوند. لذا در این مطالعه در نظر است تا با استفاده از نرم‌افزار OTIS، همرفت و انتشار املاح باوجود سازه‌های پره‌های متقاطع در ناحیه اصلی جریان شبیه‌سازی شده و همچنین تأثیر وجود این سازه بر پارامترهای همرفت املاح نیز بررسی و مقایسه شود (Runkel, 1998).

نتایج و بحث

آنالیز ابعادی

مطابق رابطه (۱)، مشخصه‌های جریان هایپرریک در یک مطالعه آزمایشگاهی وجود سازه پره متقاطع در شرایط آزمایشگاهی از جمله: L_{HZ} = حداکثر طول نفوذ جریان هایپرریک (m)، d_{HZ} = حداکثر عمق نفوذ جریان هایپرریک (m) و RT = میانگین مدت‌زمان ماند جریان هایپرریک در ناحیه بستر رسوبی (S) می‌توانند در تابعیت با پارامترهایی همچون: K = ضریب هدایت هیدرولیکی (m/s)، d_{HZ} = حداکثر عمق نفوذ جریان هایپرریک (m)، RT = میانگین مدت‌زمان ماند (S)، L_{HZ} = حداکثر طول نفوذ جریان هایپرریک (m)، h_{st} = ارتفاع سازه پره متقاطع (m)، l = طول سازه پره متقاطع (m)، B = عرض کانال اصلی آبراهه (m)، Δy = اختلاف ارتفاع سطح آب در بالادست و پایین‌دست سازه پره متقاطع (m)، Q = دبی جریان (m^3/s)، ρ_s = چگالی مصالح بستر رسوبی (kg/m^3)، ρ = چگالی آب (kg/m^3)، g = شتاب ثقل (m/s^2)، d_{50} = قطر متوسط ذرات رسوبی بستر (m)، S_0 = شیب طولی کف کانال اصلی آبراهه تعریف شوند:

$$(d_{HZ}, RT, L_{HZ}) = f(K, h_{st}, l, B, \Delta y, Q, \rho_s, \rho, g, d_{50}, S_0) \quad (۴)$$

پارامترهای بی‌بعد متشکل از متغیرهای رابطه (۴) با استفاده از اصل آنالیز ابعادی و تئوری پی‌باکنیگهام^۷ عبارت‌اند از:

$$f\left(\frac{d_{HZ}}{h_{st}}, \frac{L_{HZ}}{h_{st}}, \frac{1}{h_{st}}, \frac{d_{50}}{h_{st}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{Q^2}{g \cdot h_{st}^5}, \frac{\Delta y}{h_{st}}, \frac{B}{h_{st}}, \frac{h_{st}^2 \cdot K}{Q}, \frac{RT \cdot Q}{h_{st}^3}, S_0\right) = 0 \quad (۵)$$

نمایی شماتیک از مجموعه کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و همچنین محل جانمایی سازه پره متقاطع و حسگرهای سنجش هدایت الکتریکی (EC) در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

مدل نگهداشت موقت (TSM)

حرکت املاح در آبراهه‌های طبیعی بدین صورت است که بخشی از جرم ماده حل‌شده وارد نواحی تحت عنوان نگهداشت^۱ شده و در نتیجه غلظت املاح در کانال اصلی رقیق می‌شود. بعد از عبور ماده حل‌شده از آبراهه، نواحی نگهداشت موقت به‌عنوان منبعی از این ماده در آبراهه محسوب شده و سپس جرمی از این املاح را مجدداً به ناحیه اصلی جریان بازمی‌گرداند و در نتیجه سبب تغییراتی در منحنی-های رخنه^۲ (غلظت-زمان) املاح خواهد شد. برای شبیه‌سازی دقیق فرایند همرفت املاح در چنین محیط‌هایی باید یکسری اصلاحات در نظر گرفت. از سوی دیگر، وجود سازه-هایی در مسیر جریان همانند پره متقاطع موجب تغییرات در ذخیره موقت املاح در ناحیه اصلی جریان و همچنین بستر رسوبی شده لذا استفاده از معادله همرفت-انتشار (ADE) برای رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی دارای سازه‌های متقاطع در مسیر جریان با اشکالات فراوان در پیش‌بینی نحوه جابجایی املاح همراه خواهد بود (نیکبخت و همکاران، ۱۴۰۱؛ غلامی و همکاران، ۱۴۰۳). بانکالا و والترز برای شبیه‌سازی همرفت و انتشار املاح در آبراهه‌ها مدلی تحت عنوان مدل نگهداشت موقت (TSM)^۳ را مطابق روابط (۲) و (۳) پیشنهاد دادند:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \alpha (C_s - C) \quad (۲)$$

$$\frac{dC_s}{dt} = -\alpha \frac{A}{A_s} (C_s - C) \quad (۳)$$

که در این روابط: A مساحت مقطع عرضی ناحیه جریان اصلی، A_s مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت، C غلظت ماده حل‌شده در ناحیه اصلی جریان، C_s غلظت ماده حل‌شده در ناحیه نگهداشت، D_x ضریب انتشار طولی^۴، Q دبی جریان، t زمان، x فاصله از محل تزریق آلودگی و α ضریب تبادل ناحیه نگهداشت^۵ هست (Bencala and Walters, 1983).

مدل عددی OTIS

برآورد دقیق پارامترهای چهارگانه (α و A، A_s ، D_x) مدل نگهداشت موقت (TSM) موجب افزایش کارایی این مدل برای

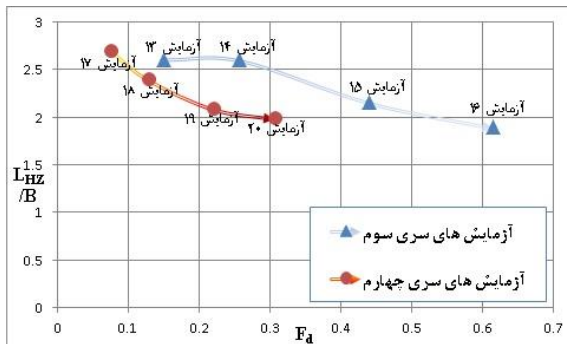
- 1- Dead Zone
- 2- Breakthrough Curve (BTC)
- 3- Transient Storage Model (TSM)
- 4- Longitudinal Dispersion Coefficient
- 5- Storage Zone Exchange Coefficient

6- USGS (The United States Geological Survey)

7- Buckingham- π Theorem

تأثیر سازه پره متقاطع بر طول تبادلات هابیریک (L_{HZ})

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب تغییرات پارامتر بی‌بعد $\frac{L_{HZ}}{B}$ در مقابل محدوده عدد فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) برای آزمایش‌های سری اول، دوم و همچنین سری سوم، چهارم را نشان می‌دهند. تغییرات منحنی‌ها در هر دو شکل نشان‌دهنده کاهش پارامتر بی‌بعد $\frac{L_{HZ}}{B}$ در مقابل افزایش عدد F_d بوده یا به عبارتی نشان از آن دارد که در یک سری آزمایش افزایش عدد F_d موجب کاهش طول تبادلات جریان هابیریک (L_{HZ}) در ناحیه زیرین سازه‌های پره متقاطع خواهد شد. از آنجایی مقادیر l ، h_{st} ، d_{50} و G_s در یک سری آزمایش ثابت بوده لذا صرفاً افزایش مقدار دبی جریان (Q) با توجه به در نظر گرفتن رابطه (۱) موجب افزایش عدد F_d خواهد شد. بنابراین می‌توان این‌گونه ارزیابی کرد که در یک سری آزمایش با مشخصات فیزیکی ثابت برای بستر رسوبی و سازه پره متقاطع، افزایش دبی جریان (Q) موجب کاهش حداکثر طول تبادلات جریان هابیریک (L_{HZ}) در ناحیه زیرین بستر رسوبی خواهد شد.

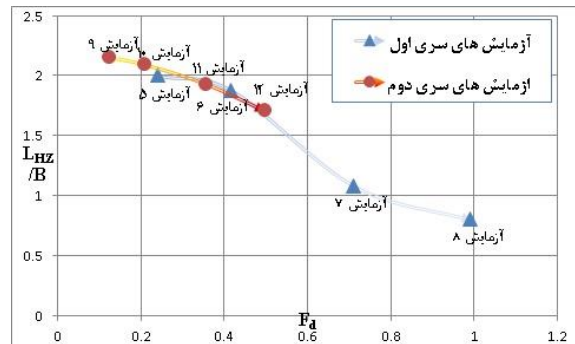


شکل ۱۳- تغییرات $\frac{L_{HZ}}{B}$ در مقابل عدد F_d در آزمایش‌های سری سوم و چهارم

نشان می‌دهد که تغییرات افزایشی این پارامتر بی‌بعد با افزایش دبی جریان دچار افزایش شده است. به‌طوری‌که افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع (h_{st}) در دبی جریان $۱۰/۲۵$ لیتر بر ثانیه موجب افزایش ۱۱۵ درصدی مقدار طول تبادلات جریان هابیریک (L_{HZ}) شده که این افزایش برای دبی‌های جریان $۷/۳۵$ ، $۴/۳۰$ و $۲/۵۰$ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۷۴، ۱۱ و ۸ بوده است. همین نتیجه نشان از آن دارد که در پره‌های متقاطع I شکل، افزایش مقدار h_{st} از یک‌سو موجب افزایش طول تبادلات هابیریک (L_{HZ}) در ناحیه زیرین بستر رسوبی شده و از سوی دیگر، این افزونی با افزایش دبی جریان (Q) یک رابطه کاملاً مستقیم دارد. با انجام همین مقایسه برای زوج آزمایش‌های ۱۳ با ۱۷، ۱۴ با ۱۸، ۱۵ با ۱۹ و ۱۶ با ۲۰ درمی‌یابیم که یک روند مستقیم بین افزایش طول تبادلات هابیریک (L_{HZ}) با افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع (h_{st}) وجود ندارد. به‌گونه‌ای که در دبی‌های جریان $۲/۵۰$

با ترکیب پارامترهای (۹) و (۱۰) در رابطه (۵) می‌توان به رابطه بی‌بعد $\frac{RT*K}{h_{st}}$ در خصوص میانگین مدت‌زمان ماند (RT) دست‌یافت. از سوی دیگر، از آنجایی در این پژوهش مقدار شیب طولی کف کانال اصلی آبراهه (S_0) ثابت بوده لذا از پارامتر یازدهم در رابطه (۵) نیز می‌توان صرف‌نظر کرد. همچنین با ترکیب پارامتر $\frac{B}{h_{st}}$ در پارامترهایی نظیر $\frac{1}{h_{st}}$ ، $\frac{L_{HZ}}{h_{st}}$ ، $\frac{d_{HZ}}{h_{st}}$ و $\frac{\Delta y}{h_{st}}$ می‌توان به پارامترهای بی‌بعدی که تغییرات متغیرهایی همچون l ، d_{HZ} ، L_{HZ} و Δy را نسبت به عرض کانال اصلی آبراهه (B) بررسی می‌کنند، دست‌یافت. از سوی دیگر، با استفاده از ترکیب پارامترهای بی‌بعد $\frac{Q^2}{g*h_{st}^5}$ ، $\frac{\rho_s}{\rho}$ ، $\frac{d_{50}}{h_{st}}$ ، $\frac{1}{h_{st}}$ نیز می‌توان به فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) رسید و درنهایت با ترکیب پارامترهای $\frac{RT*K}{h_{st}}$ و $\frac{h_{st}}{B}$ ، رابطه (۶) به‌عنوان شش پارامتر بی‌بعد در این مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سازه پره متقاطع بر تبادلات هابیریک عبارت‌اند از:

$$f\left(\frac{d_{HZ}}{B}, \frac{L_{HZ}}{B}, \frac{1}{B}, F_d, \frac{\Delta y}{B}, \frac{RT*K}{B}\right) = 0 \quad (6)$$



شکل ۱۲- تغییرات $\frac{L_{HZ}}{B}$ در مقابل عدد F_d در آزمایش‌های سری اول و دوم

به‌منظور مقایسه تأثیر افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع (h_{st}) بر طول تبادلات هابیریک (L_{HZ}) در آزمایش‌های سری اول و دوم می‌بایست نتایج پارامتر بی‌بعد $\frac{L_{HZ}}{B}$ برای آزمایش‌های ۵ با ۹، ۶ با ۱۰، ۷ با ۱۱ و همچنین ۸ با ۱۲ را به‌صورت دوه‌دو مقایسه کرد. چراکه در هر یک از این ۴ زوج آزمایش، مقادیر l ، Q ، d_{50} و G_s ثابت بوده و تنها افزایش مقدار h_{st} از $۵/۲۵$ به $۱۰/۵۰$ سانتی‌متر موجب کاهش عدد F_d شده است. مقایسه نتایج منحنی‌های شکل (۱۲) نشان می‌دهد که مقدار پارامتر بی‌بعد $\frac{L_{HZ}}{B}$ در آزمایش ۵ به مقدار ۲/۱۶ در آزمایش ۹ افزایش داشته و همین روند افزایشی در مقایسه نتایج آزمایش‌های ۶ با ۱۰، ۷ با ۱۱ و همچنین ۸ با ۱۲ نیز مشاهده گردید. نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی برای هر یک از آزمایش‌های ۱۶ گانه روی ۴ حالت مختلف سازه پره متقاطع در جدول (۲) ارائه‌شده است. مقایسه مقادیر $\frac{L_{HZ}}{B}$ برای آزمایش‌های سری اول و دوم در جدول (۲)

نشان از آن دارد که در یک سری آزمایش افزایش عدد F_d موجب کاهش عمق نفوذ جریان هایپریک (dHZ) خواهد شد. در واقع مطابق آنچه در بخش قبلی بیان شد، در یک سری آزمایش صرفاً افزایش دبی جریان (Q) موجب افزایش عدد F_d خواهد شد، لذا می توان این برداشت را نیز داشت که افزایش دبی جریان (Q) موجب کاهش حداکثر عمق نفوذ جریان های هایپریک (dHZ) خواهد شد.

مطابق آنچه در بخش قبل بیان شد، مقایسه پارامتر بی بعد $\frac{d_{HZ}}{B}$ در آزمایش های ۵ با ۹، ۶ با ۱۰، ۷ با ۱۱ و ۸ با ۱۲ نشان می دهد که افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع I شکل موجب کاهش حداکثر عمق نفوذ جریان هایپریک (dHZ) شده است. در واقع افزایش ارتفاع سازه سبب می شود تا بخش عمده ای از جریان به صورت سطحی جاری شده و مشارکت کم تر در جریان زیرسطحی شکل گیرد. اما همین مقایسه دوه دو بین آزمایش های ۱۳ با ۱۷، ۱۴ با ۱۸، ۱۵ با ۱۹ و ۱۶ با ۲۰ در خصوص افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع U شکل نشان از این دارد که افزایش ارتفاع سازه در محدوده دبی کم تر از $4/30$ لیتر بر ثانیه موجب افزایش حداکثر عمق نفوذ شده و در محدوده بیش تر از این دبی موجب کاهش حداکثر عمق نفوذ شده است. طبق مطالعات کاردناس و ویلسون فاصله بین محل کم ترین و بیش ترین فشار تعیین کننده عمق ناحیه هایپریک هست. در آزمایش های ۱۹ و ۲۰ بعد از ایجاد حفره هایی ناشی از آبستتگی در محل پایین دست سازه، بلافاصله رسوب گذاری بعد از این حفرات صورت پذیرفت. ایجاد این رسوب گذاری سبب شد تا محل کم ترین فشار در پایین دست به سازه پره متقاطع نزدیک تر شود لذا همین امر سبب کاهش عمق نفوذ جریان هایپریک شد. به طوری که در آزمایش های ۱۵ و ۱۶ مقایسه با آزمایش های ۱۹ و ۲۰ مقدار dHZ کم تری برآورد شده است (Cardenas and Wilson, 2007).

تأثیر سازه پره متقاطع بر میانگین مدت زمان ماند جریان هایپریک (RT)

به منظور تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی رسوبات (K) مطابق رابطه (۷)، جریان به گونه ای که مماس بر سطح بستر رسوبی بوده و هیچ گونه تماسی با سطح آزاد نداشته باشد، برقرار گردید (Tonina and Buffington, 2007):

$$K = \frac{Q}{As_f} \quad (7)$$

که در این رابطه، Q دبی جریان مماسی، A سطح مقطع عرضی رسوبات اشباع، s_f شیب خط انرژی جریان است. مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح مورداستفاده در این پژوهش مطابق این روش مقدار $0/76$ متر بر ثانیه برآورده شد که با مقادیر ارائه شده توسط محققین برای محدوده هدایت هیدرولیکی بسترهای شنی که مقادیر $0/001$ تا 1 متر بر ثانیه ارزیابی شده بود، مطابقت دارد (Karamouz et al., 2011).

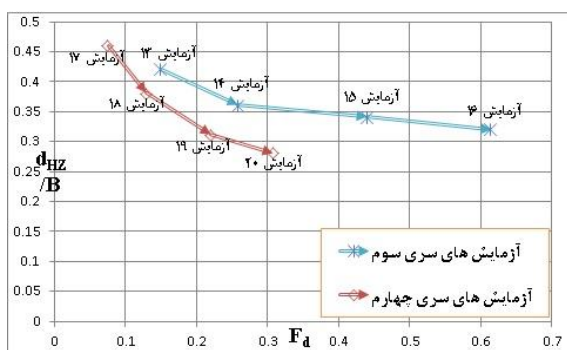
$3/40$ لیتر بر ثانیه شاهد رابطه معکوس بین افزایش h_{st} بر L_{HZ} بوده ایم. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که افزایش دبی جریان در آزمایش های انجام شده روی پره های U شکل سبب ایجاد حفره های آبستتگی در پایین دست سازه شده که همین امر سبب ایجاد یک ناحیه گردابی با فشار در پایین دست سازه پره متقاطع شده است. وجود این ناحیه موجب گردید تا جریان های هایپریک فاصله طولی بیش تری را در قسمت زیرین سازه پره متقاطع طی کنند تا بتوانند بعد از این بخش حفره ای از بستر رسوبی خارج شده و به جریان سطحی ملحق شوند. این امر سبب آن شده است تا طول جریان هایپریک در آزمایش های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب بیش تر از آزمایش ۱۵ و ۱۶ که البته این مقدار ناچیز بوده است.

مشاهدات و برداشت های آزمایشگاهی نشان داد که پره های متقاطع I شکل با ایجاد یک مانع مستقیم در مسیر جریان سبب ایجاد تفاوت بیش تری در اختلاف اعماق بالادست و پایین دست (Δy) نسبت به سازه U شکل خواهد شد. این اختلاف بیش تر اعماق بالادست و پایین دست در سازه های I شکل موجب ایجاد افزایش اختلاف فشار جریان قبل و بعد سازه شده در نتیجه سبب خواهد شد تا جریان هایپریک مسیر طولانی تری را برای خروج از بستر رسوبی طی نماید. با توجه به منحنی های شکل های (۱۲) و (۱۳) می توان دریافت که روند تغییر این منحنی ها با افزایش عدد F_d با شیب کم تری تغییر کرده و به سمت افق میل نموده که این امر نشان از این دارد که سازه های پره متقاطع تا یک محدوده ای از دبی جریان موجب تغییرات در طول املاح طی شده در جریان هایپریک داشته و با افزایش بیش تر دبی جریان عملاً نقش این سازه ها کم رنگ خواهد شد. البته برای آن که توصیه نهایی در خصوص تأثیر شکل و ارتفاع سازه پره متقاطع بر تبادلات هایپریک داشت می بایست به بررسی این تأثیرات بر میانگین مدت زمان ماند (RT) نیز پرداخت.

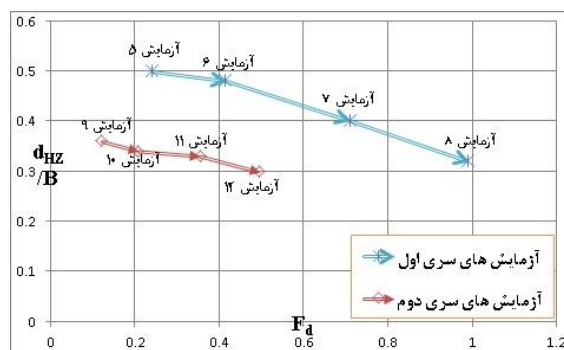
تأثیر سازه پره متقاطع بر حداکثر عمق تبادلات هایپریک (dHZ)

شکل های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب تغییرات پارامتر بی بعد $\frac{d_{HZ}}{B}$ در مقابل محدوده عدد فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) برای آزمایش های سری اول، دوم و هم چنین سری سوم، چهارم را نشان می دهند. مطابق آنچه در شکل (۱۰) نشان داده شد، روند شکل گیری یک جریان هایپریک در زیر سازه پره متقاطع دارای یک انحنا به سمت پایین بوده که در یک بخش از حرکت به بیش ترین عمق نفوذ در بستر رسوبی رسیده و مجدداً پس از آن به سمت خروج از بستر رسوبی حرکت می کند. لذا مقدار dHZ در واقع بیش ترین عمق نفوذ در اندازه گیری های جریان هایپریک بوده است.

تغییرات منحنی ها در هر دو شکل (۱۴) و (۱۵) نشان دهنده کاهش پارامتر بی بعد $\frac{d_{HZ}}{B}$ در مقابل افزایش عدد F_d بوده یا به عبارتی



شکل ۱۵- تغییرات $\frac{d_{HZ}}{B}$ در مقابل عدد F_d در آزمایش‌های سری سوم و چهارم



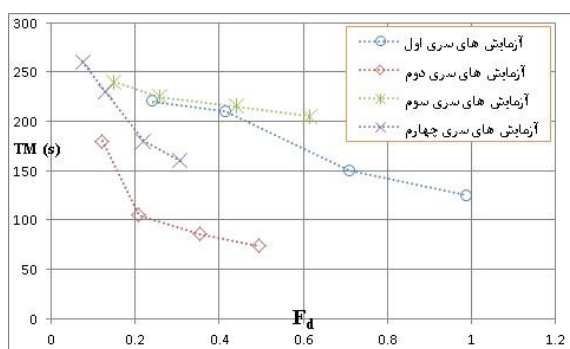
شکل ۱۶- تغییرات $\frac{d_{HZ}}{B}$ در مقابل عدد F_d در آزمایش‌های سری اول و دوم

بالتر دبی جریان شاهد روند کاهش میانگین مدت‌زمان ماند (RT) با افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع U شکل بوده‌ایم. منحنی‌های شکل (۱۷) برای همه سری‌های آزمایش به‌منظور بررسی تغییرات عدد (F_d) در مقابل (RT) ارائه شدند. نحوه تغییرات این منحنی‌ها در تمامی آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که مقدار (RT) با افزایش عدد F_d کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان به این نتیجه رسید که در هر سری آزمایش با افزایش دبی جریان (Q) شاهد کاهش میانگین مدت‌زمان ماند املاح در بستر رسوبی بوده‌ایم. افزایش میانگین مدت‌زمان ماند املاح در ناحیه رسوبی سبب می‌شود تا فرصت تغذیه میکروارگانیسم‌ها از مواد مغذی همراه با جریان بیش‌تر بوده و از سوی دیگر، فرصت زمانی بیش‌تری برای واکنش‌های شیمیایی تجزیه آلودگی‌های همراه با جریان در ناحیه بستر رسوبی در اثر این نگهداشت موقت ایجاد می‌شود. لذا توجه به افزایش مدت‌زمان حضور املاح در ناحیه بستر رسوبی به‌عنوان یک کارکرد مثبت افزایش کیفی اکوسیستم رودخانه مهم هست. از سوی دیگر، بررسی منحنی‌های شکل (۱۷) نشان می‌دهد که بیش‌ترین میانگین مدت‌زمان ماند (RT) مربوط به پره‌های متقاطع U شکل با ارتفاع ۵/۲۵ سانتی‌متری بوده است و این نوع پره متقاطع خصوصاً در محدوده دبی جریان (Q) زیاد دارای مدت‌زمان نگهداشت موقت بیش‌تری نسبت به سایر سازه‌ها بوده است. لذا با آنچه بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سازه‌های پره متقاطع در پروژه‌های بازسازی رودخانه‌ها خصوصاً در مناطق کم‌عمق با دبی جریان کم می‌تواند به بهبود کیفی زیست‌بوم رودخانه‌ها از طریق افزایش تبادلات هاپیریک کمک نماید و با توجه به اهمیت مقدار (RT) در افزایش کیفی جریان و کمک به زیست‌بوم رودخانه، استفاده از سازه‌های پره متقاطع U شکل با ارتفاع کم به‌عنوان توصیه اول و سازه‌های پره متقاطع I شکل با ارتفاع کم به‌عنوان توصیه دوم کمک شایانی در این بهبود خواهد داشت.

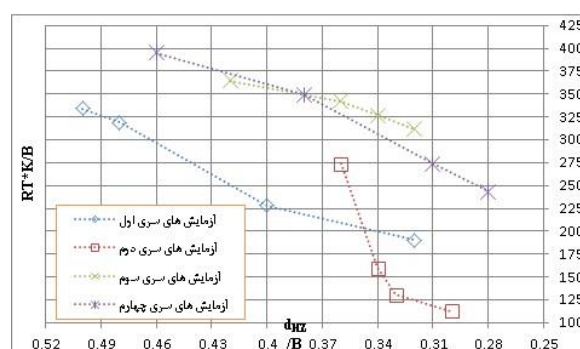
از سوی دیگر، برای بررسی تغییرات میانگین مدت‌زمان ماند املاح در شرایط مختلف آزمایشگاهی از تغییرات پارامتر بی‌بعد $\frac{RT \cdot K}{B}$ استفاده گردید. در این رابطه، مقادیر K و B برای بستر رسوبی و شرایط آزمایش‌های مختلف در این پارامتر بی‌بعد ثابت بوده لذا تغییرات مقادیر RT می‌تواند به‌عنوان یک متغیر در حالت‌های مختلف آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

شکل (۱۶) تغییرات پارامتر بی‌بعد $\frac{RT \cdot K}{B}$ در مقابل تغییرات پارامتر بی‌بعد $\frac{d_{HZ}}{B}$ برای آزمایش‌های سری اول تا چهارم را نشان می‌دهد. روند تغییرات منحنی‌های شکل (۱۶) نشان از رابطه مستقیم پارامتر $\frac{RT \cdot K}{B}$ در مقابل افزایش مقادیر $\frac{d_{HZ}}{B}$ دارد. در واقع نتایج تمامی آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میانگین مدت‌زمان ماند (RT) جریان هاپیریک در تمامی آزمایش‌ها با کاهش عمق ناشی از جریان زیرین (d_{HZ}) کاهش داشته که جزئیات این تغییرات نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

مقایسه مقادیر RT در آزمایش‌های سری اول و دوم نشان می‌دهد که مقادیر این پارامتر در آزمایش‌های سری اول بیش‌تر از آزمایش‌های سری دوم هست. به عبارتی این نتیجه نشان‌دهنده آن است که افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع I شکل (h_{st}) تأثیری معکوس بر روند تغییرات مقادیر RT داشته است. از سوی دیگر، نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع U شکل (h_{st}) شاهد یک روند ثابت در تغییرات متغیر RT نخواهیم بود. همان‌طور که در بخش قبلی نیز تشریح شد، افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع U شکل با توجه به محدوده دبی جریان (Q) منجر به ایجاد اعماق مختلف برای جریان‌های هاپیریک نفوذی خواهد شد لذا با توجه به همان روند تغییرات شاهد مقادیر مختلف (RT) خواهیم بود. به‌طوری که برای محدوده آزمایش با دبی‌های جریان کم (۲/۵ و ۴/۳ لیتر بر ثانیه) شاهد افزایش میانگین مدت‌زمان ماند املاح (RT) با افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع U شکل بوده‌ایم و برای محدوده



شکل ۱۷- تغییرات RT در مقابل F_a در آزمایش های سری اول تا چهارم



شکل ۱۶- تغییرات $\frac{RT \cdot K}{B}$ در مقابل $\frac{d}{B}$ در آزمایش های سری اول تا چهارم

جدول ۲- نتایج برداشت های آزمایشگاهی جریان های پیریک

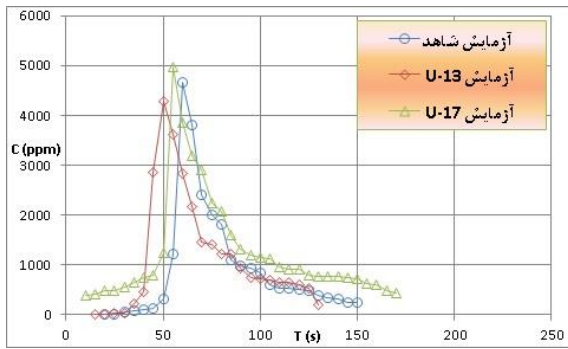
شماره آزمایش	سری آزمایش	نوع سازه پره متقاطع	L_{HZ} (cm)	D_{HZ} (cm)	RT (s)
۵		I	۱/۰۰	۰/۲۵	۲۲۰
۶	سری اول	I	۰/۹۴	۰/۲۴	۲۱۰
۷		I	۰/۵۴	۰/۲۰	۱۵۰
۸		I	۰/۴۰	۰/۱۶	۱۲۵
۹		I	۱/۰۸	۰/۱۸	۱۸۰
۱۰	سری دوم	I	۱/۰۵	۰/۱۷	۱۰۵
۱۱		I	۰/۹۷	۰/۱۶	۸۶
۱۲		I	۰/۸۶	۰/۱۵	۷۴
۱۳		U	۱/۳۵	۰/۲۱	۲۴۰
۱۴	سری سوم	U	۱/۳۰	۰/۱۸	۲۲۵
۱۵		U	۱/۰۸	۰/۱۷	۲۱۵
۱۶		U	۰/۹۵	۰/۱۶	۲۰۵
۱۷		U	۱/۳۰	۰/۲۳	۲۶۰
۱۸	سری چهارم	U	۱/۲۱	۰/۱۹	۲۳۰
۱۹		U	۱/۱۱	۰/۱۵	۱۸۰
۲۰		U	۱/۰۰	۰/۱۴	۱۶۰

پارامترهای بسیار مهم در بحث تبادلات هایپریک است. دبی تبادلی (Q_{ex}) تحت تأثیر مساحت ناحیه بستر رسوبی (A_s) و هم‌چنین سرعت جریان در این ناحیه (V_s) بوده و از رابطه $Q_{ex} = A_s \cdot V_s$ محاسبه می‌شود. از سوی دیگر، سرعت جریان در ناحیه بستر رسوبی (V_s) با استفاده از رابطه محاسبه $\frac{L_{HZ}}{RT}$ شده و در واقع مقدار سرعت جریان در این ناحیه با افزایش (L_{HZ}) و یا کاهش مقدار (RT) افزایش یافته لذا مقدار دبی تبادلی (Q_{ex}) نیز دچار افزایش خواهد شد. پس مجموعاً دبی تبادلی (Q_{ex}) تحت تأثیر سه پارامتر L_{HZ} ، RT و A_s بوده و ایفای نقش هر یک از این پارامترها موجب کاهش یا افزایش دبی املاح ورودی به نواحی هایپریک یا دبی املاح خروجی از این نواحی خواهد شد.

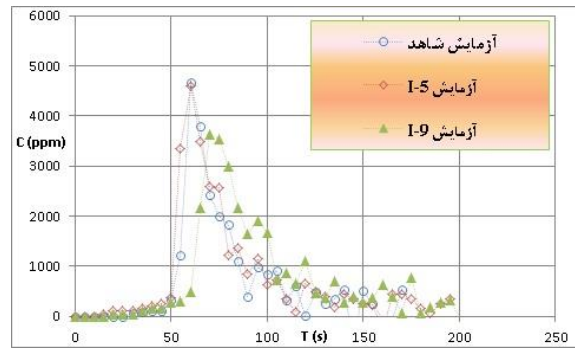
آزمایش های ماده ردیاب

تأثیر وجود سازه های پره متقاطع بر تبادلات هایپریک ناحیه زیرین جریان در بخش های قبلی پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. حال اگر چنانچه نحوه همرفت املاح در ناحیه اصلی جریان در حضور این نوع سازه ها بررسی گردد می‌توان علاوه بر تأثیرپذیری جریان های زیرین تحت حضور این نوع از سازه ها به بررسی تأثیر آن ها بر همرفت املاح در ناحیه اصلی جریان نیز پرداخت. لذا در این بخش از پژوهش به بررسی منحنی های رخنه برداشتی از آزمایش های ماده ردیاب ($NaCl$) پرداخته شد. شکل های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب منحنی های رخنه برداشتی ماده ردیاب از آزمایش شاهد در مقابل آزمایش های I-5، I-9 و هم‌چنین U-13، U-17 در محل تعبیه شده حسگر سوم را نشان می‌دهند.

دبی تبادلی (Q_{ex}) بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی یکی از



شکل ۱۹- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده ردیاب در آزمایش‌های شاهد، U-13 و U-17 با دبی جریان ۲/۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۸- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده ردیاب در آزمایش‌های شاهد، I-5 و I-9 با دبی جریان ۲/۵ لیتر بر ثانیه

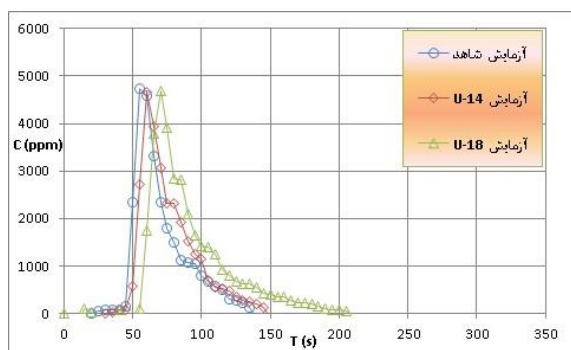
که همین امر نشان می‌دهد مقدار T_{max} در این آزمایش بیش‌تر از آزمایش I-10 خواهد بود. علت تفاوت در مقادیر T_{max} برای آزمایش‌های مختلف را می‌توان تحت تأثیر مقدار (RT) در ناحیه بستر رسوبی ارزیابی نمود. به‌گونه‌ای که افزایش مقدار RT سبب خواهد شد تا املاح، مدت‌زمان بیش‌تری را در نواحی متخلخل بستر رسوبی نگهداشت موقت شوند و با بازه زمانی به‌مراتب طولانی‌تر به ناحیه اصلی جریان بازگردند که همین امر سبب خواهد شد تا منحنی رخنه برداشتی از ناحیه اصلی جریان دارای کشیدگی بیش‌تری شود. مقایسه T_{max} منحنی رخنه آزمایش‌های U-18 و U-14 در شکل (۱۹) نشان از نزدیکی این پارامتر برای هر دو آزمایش داشته به‌گونه‌ای که به ترتیب ۱۶۰ و ۲۰۵ ثانیه بوده‌اند که مقایسه نتایج جدول (۲) نیز نزدیکی مقدار RT برای این دو آزمایش (به ترتیب ۲۲۵ و ۲۳۰ ثانیه) را نشان می‌دهد.

ضرایب مدل نگهداشت موقت (TSM)

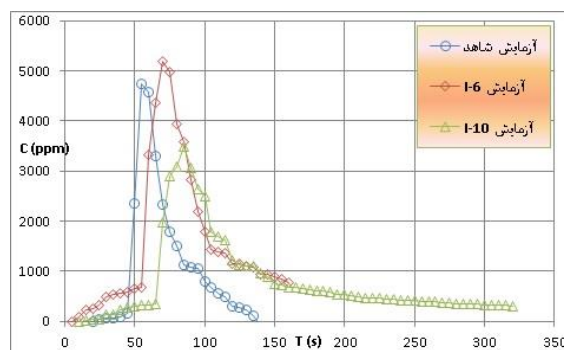
در این بخش از پژوهش، مدل عددی OTIS با استفاده از غلظت‌های اندازه‌گیری شده ماده ردیاب (NaCl) در آزمایش‌های I-5 تا U-20 و سایر مشخصات آزمایش‌ها از جمله دبی جریان، سرعت و عمق جریان به‌منظور تخمین ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) و مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت (A_s) اجرا شد. ضریب تبادل ناحیه نگهداشت یک پارامتر برخلاف (RT) املاح در بستر رسوبی است. در واقع افزایش این پارامتر نشان‌دهنده آن است که همرفت املاح در ناحیه هاپیریک بستر رسوبی دارای سرعت بیش‌تری بوده است. از سوی دیگر، مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت (A_s) نیز یک پارامتر تأثیرگذار در دبی تبدالی بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی است. در واقع رابطه $A_s * \alpha$ در ارتباط مستقیم با مقادیر Q_{ex} است و به‌عبارت‌دیگر مقدار تبدالی بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی در آزمایش‌هایی که مقادیر A_s و α زیاد بوده نیز دارای افزایش بوده که این امر با کاهش C_{max} در این دسته از آزمایش‌ها تأیید شده است.

مقایسه منحنی‌های رخنه شکل (۱۸) نشان می‌دهند که مقدار غلظت اوج املاح (C_{max}) در آزمایش‌های شاهد و I-5 تقریباً برابر بوده و بیش‌تر از آزمایش I-9 می‌باشند. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که مقادیر L_{HZ} و RT برای آزمایش I-9 به ترتیب ۱/۰۸ متر و ۱۸۰ ثانیه بوده که در مقایسه با همین مقادیر برای آزمایش I-5 که به ترتیب ۱ متر و ۲۲۰ ثانیه بوده‌اند، دارای افزایش در طول نفوذ هاپیریک (L_{HZ}) و کاهش مقدار (RT) بوده است. بنابراین مقدار سرعت نفوذ املاح در بستر رسوبی (V_s) و در نتیجه دبی تبدالی (Q_{ex}) در آزمایش I-9 بیش‌تر از آزمایش I-5 خواهد بود. همین امر سبب شده تا حجم رسوبی وارد شوند. از سوی دیگر، با توجه به این که حسگر اندازه‌گیری EC برای تشکیل این منحنی‌های رخنه در پایین دست سازه پره متقاطع (حسگر ۳) واقع شده لذا افزایش حجم املاح ورودی به بستر رسوبی موجب کاهش غلظت اوج املاح (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان شده لذا مقدار C_{max} در آزمایش I-9 کم‌تر از آزمایش I-5 به‌دست آمد. همین روند تغییرات C_{max} در نتایج منحنی‌های رخنه شکل (۱۹) نیز مشهود است. به‌گونه‌ای که مقدار C_{max} در آزمایش U-17 اندکی بیش‌تر از آزمایش U-13 بوده است. مقدار سرعت نفوذ جریان هاپیریک (V_s) در آزمایش U-13 حدوداً ۰/۵۶ سانتی‌متر بر ثانیه و در آزمایش U-17 حدوداً ۰/۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه بوده که افزونی مقدار سرعت نفوذ جریان هاپیریک (V_s) در آزمایش U-13 در مقایسه با آزمایش U-17 سبب شده تا محدوده غلظت اوج املاح (C_{max}) در این آزمایش نیز اندکی کم‌تر از آزمایش U-17 باشد.

هم‌چنین شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به ترتیب منحنی‌های رخنه برداشتی ماده ردیاب از آزمایش شاهد در مقابل آزمایش‌های I-6، I-10 و هم‌چنین U-14، I-18 در محل تعبیه‌شده حسگر سوم را نشان می‌دهند. منحنی‌های رخنه شکل (۱۸) نشان می‌دهند که حداکثر مدت‌زمان ماند املاح در ناحیه اصلی جریان (T_{max}) در آزمایش‌های I-6 و I-10 به‌مراتب بیش‌تر از آزمایش شاهد بودند. از سوی دیگر، شیب بازوی پایین‌رونده در آزمایش I-6 کندتر از آزمایش I-10 بوده



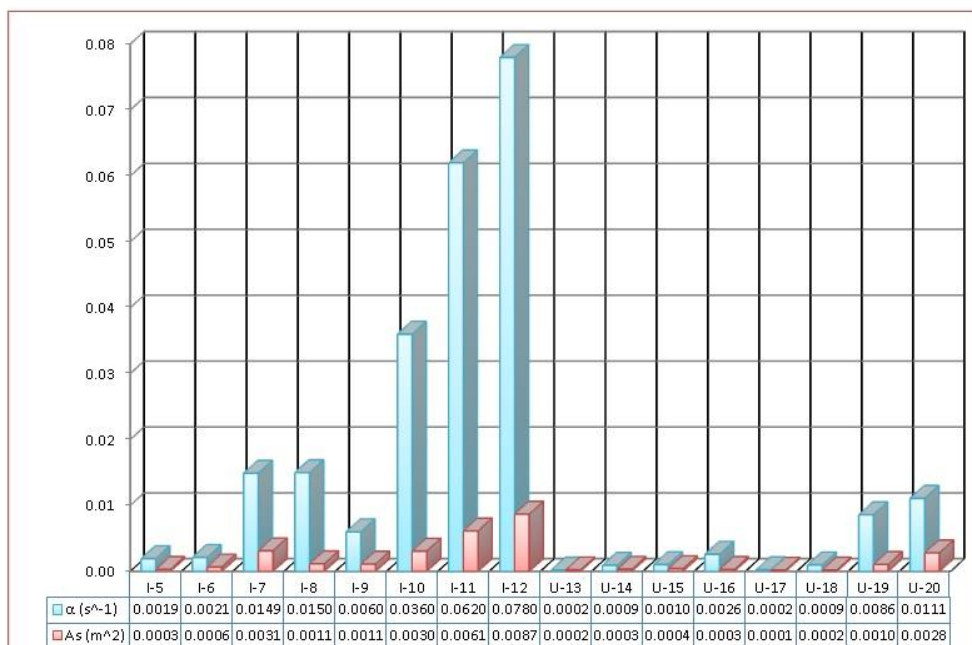
شکل ۲۱- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده ردیاب در آزمایش‌های شاهد، U-14 و U-18 با دبی جریان ۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۲۰- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده ردیاب در آزمایش‌های شاهد، I-6 و I-10 با دبی جریان ۵ لیتر بر ثانیه

منحنی‌های رخنه برداشتی خواهد شد. پارامترهای تخمینی α و A_s مدل عددی OTIS برای تمامی آزمایش‌های ۱۶ گانه همراه با پره متقاطع در شکل (۲۲) ارائه شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که آزمایش‌های ۱۲، ۱۱ و ۱۰ به ترتیب دارای بیش‌ترین مقادیر ضریب α می‌باشند. مقایسه نتایج جدول (۲) و مقایسه آن با مقادیر α تخمینی نشان‌دهنده رابطه معکوس بین این دو پارامتر در نتایج بوده است. از سوی دیگر، مقادیر A_s و α نشان می‌دهند که رابطه مستقیمی بین این دو پارامتر در اغلب آزمایش‌ها بوده است.

البته باید در نظر داشت که حسگر سوم مقادیر غلظت املاح را در فاصله ۰/۵ متری پایین‌دست سازه‌های پره متقاطع ثبت می‌کند لذا مقایسه بین منحنی‌های رخنه پایین‌دست بلافاصله بعد از سازه است. لذا می‌بایست در نظر داشت که بیش‌تر بودن مقدار دبی تبدالی (Q_{ex}) از یک سو سبب خواهد شد تا حجم بیش‌تری از املاح وارد ناحیه بستر رسوبی شوند اما از سوی دیگر، همین روند تبدالی زیاد در ناحیه بستر رسوبی یا به عبارت دیگر بالابودن مقدار ضریب α سبب خواهد شد تا املاح با سرعت بیش‌تر و حجم زیادتر از همین ناحیه بستر رسوبی نیز خارج شوند، لذا اندازه‌گیری املاح در فواصل طولانی‌تر در پایین‌دست سازه‌ها موجب ایجاد شرایط عکس در



شکل ۲۲- تغییرات ضرایب α و A_s برای آزمایش‌های I-5 الی U-20

نتیجه‌گیری

وجود سازه‌های کنترل تراز بستر در مسیر جریان رودخانه‌ها یا آبراهه‌ها همانند پره‌های متقاطع با ایجاد تغییرات هیدرولیکی در شرایط جریان، علاوه بر کمک به اصلاح و بازسازی رودخانه‌ها می‌توانند سبب تغییرات مؤلفه‌های حاکم بر همرفت املاح در جریان - های سطحی و زیرسطحی رودخانه‌ها شوند. لذا در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب NaCl و هم‌چنین ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم $KMnO_4$ به تحلیل و ارزیابی همرفت املاح در ناحیه جریان سطحی و هم‌چنین زیرسطحی در حضور سازه‌های پره متقاطع I و U شکل پرداخته شد و نتایج زیر برآورد گردیدند:

- نتایج برای یک سری آزمایش با مشخصات فیزیکی ثابت بستر رسوبی و هم‌چنین سازه پره متقاطع نشان از کاهش حداکثر طول تبادلات جریان هاپیریک (L_{HZ}) در مقابل افزایش مقدار دبی جریان (Q) داشتند.
- نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش عدد فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) موجب کاهش طول تبادلات جریان هاپیریک (L_{HZ}) و هم‌چنین عمق نفوذ جریان هاپیریک (d_{HZ}) در ناحیه زیرین سازه‌های پره متقاطع خواهد شد.
- نتایج آزمایشگاهی ماده رنگی نشان از کاهش میانگین مدت‌زمان ماند (RT) جریان هاپیریک در تمامی آزمایش‌ها با کاهش عمق نفوذ جریان هاپیریک (d_{HZ}) داشته است.
- بررسی نتایج تبادلات هاپیریک نشان دادند که افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع I شکل (h_{st}) تأثیری معکوس بر روند تغییرات مقادیر RT داشته اما روند مشخصی برای پره متقاطع U شکل یافت نشد. به طوری که برای محدوده آزمایش با دبی‌های جریان کمتر از $4/3$ لیتر بر ثانیه شاهد افزایش میانگین مدت‌زمان ماند املاح (RT) با افزایش ارتفاع سازه پره متقاطع U شکل بوده‌ایم و برای محدوده بالاتر از این دبی‌های جریان شاهد یک روند کاهشی بوده‌ایم.
- نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب نشان داد که دبی تبادلی (Q_{ex}) بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی دارای رابطه مستقیم با L_{HZ} و مساحت ناحیه بستر رسوبی (A_s) و رابطه معکوس با RT بوده است.
- هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی عددی نتایج آزمایشگاهی با استفاده از مدل OTIS نشان از تغییرات ضرایب تبادل ناحیه نگهداشت (α) و مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت (A_s) هم‌سو با مقدار دبی تبادلی (Q_{ex}) بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی بوده است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره ۰۲-۱۴۰۳-۰۵ انجام شد که به این وسیله سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

آبشوری، ع.ر.، دهقانی، ا.ا. و ظهیری، ع.ر. ۱۴۰۰. مطالعه الگوی جریان هاپیریک پایین‌دست موانع صلب رودخانه‌ای. اکوهیدرولوژی، ۸(۴): ۱۱۴۵-۱۱۲۷.

برزعلی، م.، مسعودیان، م.، فضل‌اولی، ر. و دهقانی، ا.ا. ۱۴۰۳. بررسی تاثیر تنه‌های درخت افتاده در مسیر جریان رودخانه بر مشخصات ناحیه هاپیریک با استفاده از نرم‌افزار کامسول (مطالعه موردی رودخانه گرمادشت گرگان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۱): ۴۱-۲۷.

غلامی، ف.، عمادی، ع.ر. و میرناصری، م. ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی تأثیر نواحی نگهداشت آبشکن‌های متخلخل بر شبیه‌سازی عددی انتقال آلودگی در رودخانه‌ها. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۱): ۷۰-۵۵.

محمدعلیزاده، م.، مفتاح‌هلقی، م.، دهقانی، ا.ا.، ظهیری، ع.ر. و قربانی، خ. ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی تاثیر سازه‌های تثبیت‌کننده گابیونی بر روی تبادلات هاپیریک. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴(۲): ۹۴-۷۷.

نیکبخت، ز.، عمادی، ع.ر. و میرناصری، م. ۱۴۰۱. بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر سدهای اصلاحی گابیونی بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) در انتقال آلودگی در رودخانه‌ها. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۳(۸۷): ۱۴۴-۱۱۹.

Bencala, K.E. and Walters, R.A. 1983. Simulation of solute transport in a mountain pool-and riffle stream: a transient storage model. Water Resource Research. 19(3): 112-124.

Boano, F., Harvey, J. W., Marion, A., Packman, A. I., Revelli, R., Ridolfi, L., and Wörman, A. 2014. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. Reviews of Geophysics. 52(4): 603-679.

Cardenas, M.B., and Wilson, J.L. 2007. Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments. Water Resources Research. 43(8): 1-16.

- efficiencies of ecological porous spur-dike in field drainage ditch. *Journal of Hydrodynamics*. 30(3): 373-383.
- Rosgen, D.L., 2001. The cross-vane, W-Veir and J-Hook vane structures: their description, design and application for stream stabilization and river restoration. *Wetland Engineering and River Restoration Conf.*
- Runkel, R.L. 1998. One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers. U.S. Geological Survey, Water-Resources investigations, Report 98 4018. 73 p, Denver, Colorado.
- Scurlock, S.M., Cox, A.L., Thornton, C.I., Baird, D.C., 2012a. Maximum velocity effects from vane-dike installations in channel bends. *World Environmental and Water Resources Congress.*
- Scurlock, S.M., Thornton, C.I. and Abt, S.R. 2011. One-dimensional modeling techniques for Energy dissipation in U-weir grade-control structures. *World Environmental and Water Resources Congress.*
- Scurlock, S.M., Thornton, C.I. and Abt, S.R. 2012b. Equilibrium scour down-stream of three dimensional grade control structures. *J. Hydraul.Eng.* 138(2): 167-176.
- Tonina, D. and Buffington, J.M. 2007. Hyporheic exchange in gravel Bed Rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. *Water Resources Research*. 43(1): 1-16.
- Watson, C.C., Biedenharn, D.S. and Scott, S.H. 1999. Channel rehabilitation: Processes, design and implementation, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi.
- Findlay S., Strayer D., Goumbala C. and Gould K. 1993. Metabolism of stream water dissolved organic carbon in the shallow hyporheic zone. *Limnology and Oceanography*. 38(7):1493-1499.
- Gillilan, S., Boyd, K., Hoitsma, T. and Kauffman, M. 2005. Challenges in developing and implementing ecological standards for geomorphic river restoration projects: a practitioner's response to Palmer *et al.* (2005). *Journal of Applied Ecology*. 42(2): 223-227.
- Hickman, E.L. and Thompson. 2010. Stream Restoration Series: Cross Vane. Maryland Department of Natural Resources, US Environmental Protection Agency, and the Chesapeake Bay Trust, Fact Sheet Number 1, 8 p, Virginia Tech.
- Karamouz, M., Ahmadi, A. and Akhbari, M. 2011. *Groundwater hydrology: engineering, planning, and management: CRC Press.*
- Kim, B.K.A., Jackman, A.P., and Triska, F.J. 1992. Modeling biotic uptake by periphyton and transient hyporheic storage of nitrate in a natural stream. *Water Resources Research*. 28(10): 2743-2752.
- Pagliara, S. and Kurdistani, S.M. 2013. Scour downstream of cross-vane structures. *Journal of hydro environment research*. 7(4): 236-242.
- Pagliara, S. and Kurdistani, S.M. 2017. Flume experiments on scour downstream of wood stream restoration structures. *Geomorphology*. 279: 141-149.
- Pal, D. and Galelli, S. 2019. A numerical framework for the multi-objective optimal design of check dam systems in erosion-prone areas. *Environmental modelling & software*. 119(3): 21-31.
- Rao, L., Wang, P.F., Dai, O.S. and Wang, C. 2018. The coupling between hydrodynamic and purification

Numerical-Experimental Investigation of the Effect of Cross-Vanes in River Restoration Projects on Hyporheic Exchanges

M. Mirnaseri^{1*}

Received: Dec.08, 2024

Accepted: Jan.16, 2025

ABSTRACT

Grade Control Structures are one of the most important measures to restore rivers and small waterways. Cross-vanes in I-shaped, U-shaped, W-shaped, J-shaped and A-shaped types made of wood or logs, boulders or a combination of both are among these structures that help to restore rivers. These structures can cause changes in river ecology in addition to constructive effects in preventing river erosion and destruction. Therefore, in this research, two types of I-shaped and U-shaped Cross-vane structures in two different heights (h_{st}) 5.25 and 10.50 cm are made of boulders in a rectangular flume with a length of 12 meters, a width of 0.5 meters and a height of 0.7 meters were installed to investigate the effect of the presence of these structures on the characteristics of hyporheic exchanges. Sodium chloride solution (NaCl) was used as a tracer in the main channel area and potassium permanganate solution (KMnO₄) was used as a color tracer in the hyporheic exchanges of the storage zone area. The results showed that increasing densimetric particle Froude number (F_d) decreased hyporheic exchange parameters including length (L_{HZ}), depth (d_{HZ}) and residence time (RT). Also, the results showed that the increase of h_{st} in the I-shaped Cross-vane structures caused an increase of 8 to 115% in the value of L_{HZ} . On the other hand, a consistent trend between L_{HZ} and h_{st} was not observed in the U-shaped Cross-Vane.

KEYWORDS: Advection-Dispersion, Potassium Permanganate, Residence Time, River Ecology, NaCl

1- Assistant Professor of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
(*Corresponding Author Email: Mohammadmirnaseri@yahoo.com)