

مطالعه الگوی جریان هایپریک پایین دست موانع صلب رودخانه‌ای

علیرضا آبشوری^۱، امیراحمد دهقانی^{۲*}، عبدالرضا ظهیری^۳

۱. دانشجوی دکتری رشته مهندسی آب، سازه‌های آبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۱۹؛ بازنگری ۱۴۰۰/۰۸/۲۹، تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

چکیده

منطقه هایپریک ناحیه‌ای بلافاصله زیر بستر رودخانه است که اختلاط آب‌های سطحی پایین رونده با آب زیرسطحی در آن اتفاق می‌افتد. این منطقه نقش بسیار حیاتی در اکولوژی رودخانه دارد و سبب خودپالایی جریان رودخانه می‌شود. موانع تخته‌سنگی موجود در بستر رودخانه‌ها معمولاً مانند موانع نفوذناپذیر عمل می‌کنند و در بالادست و پایین دست این سازه‌ها اختلاف هد هیدرولیکی ایجاد می‌شود و پرش هیدرولیکی در پایین دست آنها اتفاق می‌افتد. از آنجا که معمولاً در پایین دست این موانع حفره آب‌شستگی نیز شکل می‌گیرد، هدف از این تحقیق تعیین الگوی حرکتی تبادلات هایپریک با وجود موانع صلب رودخانه‌ای در سه حالت جریان ریزشی، جریان متغیر سریع و جریان متغیر سریع-آب‌شستگی است. برای بررسی نتایج، از یک فلوم آزمایشگاهی با شیب کف ۱ درصد، طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر برای مشخص کردن مسیرهای خطوط جریان هایپریک استفاده شد. مصالح بستر استفاده‌شده در این فلوم دارای قطر میانۀ ۶/۸ میلی‌متر بودند. ضخامت رسوبات بالادست مانع برابر ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت رسوبات پایین دست مانع برابر با ۱۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها از یک مانع صلب ۳۰ سانتی‌متری که به صورت نفوذ کامل درون بستر رسوبات نصب شده بود، استفاده شد. همچنین، از مدل آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان زیرسطحی استفاده شد. نتایج نشان داد تطابق مناسبی بین الگوی جریان مشاهداتی و محاسباتی در منطقه هایپریک برای دو حالت ایجاد پرش و ریزشی وجود دارد و در حالت ایجاد پرش-آب‌شستگی فقط در محدوده بین دیواره عمودی مانع تا جایی که بیشترین آب‌شستگی شکل گرفته بود، در مدل آزمایشگاهی جریان بالادست رو به بالا (UDU) و در مدل عددی جریان پایین دست رو به بالا (DDU) مشاهده شد. همچنین، با بررسی دبی تبدالی کل (Qex)، زمان ماندگاری (Rt) و درصد دبی تبدالی (Qp) و مقایسه هریک با عدد رینولدز به ترتیب رابطه توانی با ضریب همبستگی ۹۴ و ۸۴ و ۷۷ درصد به دست آمد که از این روابط می‌توان تخمین مناسبی از پارامترهای جریان هایپریک داشت.

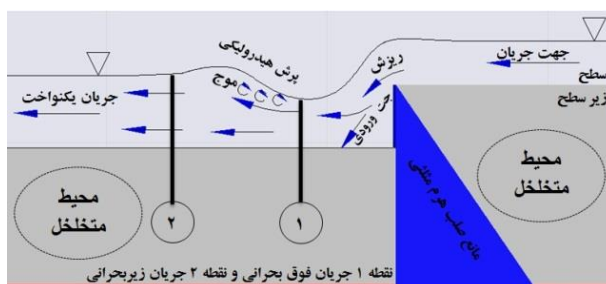
کلیدواژگان: جریان هایپریک، موانع صلب رودخانه‌ای، دبی تبدالی، زمان ماندگاری، مدل میوز.

مقدمه

منطقه هایپرریک ناحیه‌ای بلافاصله زیر بستر رودخانه است که در آن اختلاط آب‌های سطحی پایین‌رونده با آب زیرسطحی در آن اتفاق می‌افتد. این منطقه نقش بسیار حیاتی در اکولوژی رودخانه دارد و سبب خودپالایی جریان آب رودخانه می‌شود. بنابراین، هر عاملی که بتواند تبادل جریان آب سطحی و زیرسطحی را افزایش دهد، می‌تواند در احیای رودخانه‌ها نقش اساسی ایفا کند [۱]. [۴] و از موارد مهم در طرح احیای رودخانه‌ای است [۵]. [۸]. ایجاد اختلاط هیدرولیکی در طول جریان یکی از عوامل ایجاد جریان هایپرریک در رودخانه است. موانع

تخته‌سنگی موجود در بستر رودخانه‌ها معمولاً مانند موانع نفوذناپذیر عمل می‌کند و در بالادست و پایین‌دست این سازه‌ها اختلاف هد هیدرولیکی ایجاد می‌شود و معمولاً پرش هیدرولیکی در پایین‌دست آنها اتفاق می‌افتد [۶ و ۹].

پرش‌های هیدرولیکی با تغییر خطوط جریان از یک مقطع نسبتاً کم‌عمق و با جریان سریع به یک جریان عمیق‌تر و آرام‌تر شکل می‌گیرد. با تغییر جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی پرش هیدرولیکی تشکیل می‌شود و به عنوان جریان متغیر سریع شناخته شده است (شکل ۱).



شکل ۱. نمایی از جریان متغیر سریع بعد از مانع صلب، شامل ریزش، جت فشاری و پرش هیدرولیکی همراه با نوسانات و موج

پرش‌های هیدرولیکی توسط هیدرولیک موضعی جریان و پروفیل سطح آب مشخص شده‌اند [۱۲] و تبادلات هایپرریک در رودخانه‌ها به هیدرولیک موضعی جریان و پروفیل سطح جریان وابسته است [۱۳ و ۱۴]. با این‌وجود، تأثیر پرش‌های هیدرولیکی روی تبادلات هایپرریک به طور دقیق بررسی نشده است. تبادل هایپرریک ممکن است بر اثر پخشیدگی، انتقال و مومنتوم ایجاد شوند [۳، ۱۵ و ۱۶]. مطالعه تبادل هایپرریک در رودخانه‌ها با وجود موانع رودخانه‌ای معمولاً به پارامتر انتقال وابسته است [۹، ۱۳، ۱۵، ۱۷، ۱۸ و ۱۹]. تبادلات هایپرریک بر اثر تغییرات طولی هد هیدرولیکی $h(m)$ ایجاد می‌شود که این پارامتر از سه مؤلفه هد ارتفاعی $z(m)$ ، هد فشاری p و هد سرعت $u^2/2g (m)$ ، $\Psi = p/\rho g (m)$ (پاسکال)، ρ چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)، g شتاب ثقل و u سرعت (متر بر ثانیه) تشکیل می‌شود. بیشتر تحقیقات قبلی در مورد تبادلات هایپرریک با وجود موانع رودخانه‌ای، میزان هایپرریک را با استفاده از پروفیل سطح جریان هیدرواستاتیک و بدون در نظر گرفتن

در مسیر جریان عبوری از مانع، جریان متغیر سریع شامل ریزش جریان از روی مانع، جریان فوق بحرانی ($F_{r1} > 1$) در پایین‌دست مانع در موقعیت ۱، و یک شیب سطح جریان معکوس در طول پرش، که در انتهای آن جریان زیر بحرانی (۰) و در موقعیت ۲ تشکیل می‌شود [۱۰]. در پایاب موانع دو نوع جریان ممکن است شکل بگیرد. یکی جریان ریزشی^۱ که تقریباً عمودی و موازی با دیواره مانع است و دیگری جریان غوطه‌وری^۲ که دارای یک شیب مثبت با عمق آب کاهشی در مسیر جریان است. پرش هیدرولیکی دارای یک شیب منفی یا معکوس با عمق جریان افزایشی در مسیر جریان است. ویلکوکس و ووهل (۲۰۰۷) اشاره کردند که طی اینکه جریان زیر بحرانی یک هیدرولیک جریان غالب در آبراهه‌های استپ-پول است، در یک ناحیه کوچک در پایین‌دست موانع، جریان فوق بحرانی شکل می‌گیرد که باعث تشکیل پرش هیدرولیکی می‌شود [۱۱].

1. Clinging nappe
2. Plunging nappe

این حالت جریان عبوری از روی مانع به صورت ریزشی تشکیل شد و هیچ شیب سطح آب معکوسی در پایین دست مانع ایجاد نشد. در آزمایش‌های انجام شده با وجود پرش هیدرولیکی، دبی عبوری ۱/۲ لیتر بر ثانیه با عمق جریان ۴ سانتی‌متر در آزمایشگاه ایجاد شد؛ یک ناحیه غوطه‌وری بعد از ریزش جریان از روی مانع تشکیل شد، و پرش در ۳۰ سانتی‌متری پایین دست مانع به پایان رسید. در هر دو حالت آزمایش با دبی عبوری متفاوت، بیشتر جریان در زیر محل ریزش به صورت آشفته بود، با این حال در این تحقیق فقط الگوهای تبدالی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر پخشیدگی در تبدالات هایپرریک تجزیه و تحلیل نشد [۲۳]. برای هر یک از چهار آزمایش انجام شده، ماده رنگی آبی تیره از طریق لوله‌های انعطاف پذیر به قطر ۰/۳ سانتی‌متر به زیر بستر در قسمت بالادست و پایین دست مانع تزریق شد. تزریق رنگ به روش استفاده از لوله فلزی برای تعیین مسیرهای جریان هایپرریک در نقاط مختلف صورت پذیرفت. عکس‌هایی که از ماده رنگی گرفته شده بودند، مسیر حرکت رنگ را در نقاط مختلف نشان می‌دادند.

از مدل عددی Flow3D نیز برای شبیه‌سازی مسیرهای هایپرریک استفاده شد. شبکه محاسباتی در این تحقیق به صورت مستطیلی ۰/۵ سانتی‌متر در جهت x، ۰/۱ سانتی‌متر در جهت z و ۷/۵ سانتی‌متر عرض سلول در جهت y بود. محدوده شبیه‌سازی ۱۵ سانتی‌متر بالادست مانع و ۵۰ سانتی‌متر پایین دست مانع بود.

نتایج این آزمایش نشان داد وجود پرش هیدرولیکی سبب تغییر مسیرهای جریان می‌شود که شامل حرکت جریان رو به پایین زیر ناحیه ریزشی در پایین دست مانع و حرکت رو به بالا و در جهت بالادست در مجاورت مانع و زیر پرش بود. در حالت ایجاد پرش، در زیر محل ریزش^۱ مسیرهای خطوط هایپرریک در دو جهت بالادست و به سمت زیر محل ریزش و در جهت پایین دست جریان و به سمت زیر پرش مشاهده شدند. عدم موفقیت در پیش‌بینی تأثیرات فشارهای دینامیکی و استاتیکی که به پرش‌های هیدرولیکی وابسته است، این موضوع منجر به پیش‌بینی نادرست ۷۵ درصد مسیرهای جریان هایپرریک در زیر ناحیه پرش شد [۲۴]. درخور یادآوری است که در

فرایندهای هیدرودینامیک و تغییرات هد سرعتی، پیش‌بینی کرده‌اند [۹، ۱۸، ۲۰ و ۲۱]. با ترکیب کردن هد ارتفاعی و هد فشاری هیدرواستاتیک، معمولاً هد پیژومتریک حاصل می‌شود.

ایندرونی و همکاران (۲۰۱۱) با در نظر گرفتن مدل مفهومی تبدالات هایپرریک در زیر موانع رودخانه‌ای به بررسی خطوط جریان هایپرریک در یک فلوم آزمایشگاهی و مقایسه آن با مدل عددی پرداختند. این آزمایش روی فلومی به عرض ۷/۵ سانتی‌متر، ضخامت رسوبات بالادست مانع برابر ۱۰ سانتی‌متر، ضخامت رسوبات پایین دست مانع برابر با ۶ سانتی‌متر با شیب بستر ۱ درصد، ارتفاع مانع صلب ۴ سانتی‌متر، عمق جریان در پایین دست ۴ سانتی‌متر و قطر میانه ذرات در بستر فلوم معادل یک سانتی‌متر بود که طول پرش هیدرولیکی تشکیل شده برابر ۲۵ سانتی‌متر بود. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق با استفاده از روش ردیابی رنگ در ناحیه رسوبات زیرسطحی درون فلوم و در مجاورت دیواره شیشه‌ای انجام شد [۱۶ و ۲۲]. ایشان به بررسی دو نوع ریزش جریان از روی مانع پرداختند. ابعاد فلوم و قطر لایه بستر مشابه مطالعه تیبادوکس و بوئل (۱۹۷۸) منظور شد. به صورت طولی، رسوبات در فاصله ۷۰ سانتی‌متر بالادست مانع و ۱۸۰ سانتی‌متر پایین دست مانع ریخته شد. مانع‌ها از قطعات چوبی جامد و با ارتفاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متری ساخته شدند، که برای ایجاد یک پلکان عمودی ۴ سانتی‌متری در حد فاصل تاج مانع تا محل برخورد دیواره عمودی مانع صلب با سطح رسوبات پایین دست در نظر گرفته شدند. در آزمایش‌ها با ارتفاع پلکان‌های ۱۰ سانتی‌متری، مانع به عمق ۱۰ سانتی‌متر به صورت کامل در زیر بستر نفوذ کرد و به پایه فلزی فلوم متصل شد. در آزمایش‌ها با ارتفاع مانع ۵ سانتی‌متری، مانع به مقدار نصف عمق لایه بالادست درون رسوبات نصب شد و فاصله بین کف فلوم و کف مانع برابر ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. چهار آزمایش روی فلوم انجام شد که حاصل آن ترکیبی از حالت‌های مختلف نصب مانع به صورت نفوذ کامل و جزئی و ایجاد پروفیل‌های مختلف سطح جریان در دو حالت وجود پرش هیدرولیکی و بدون وجود پرش هیدرولیکی بود. هر یک از چهار آزمایش ۳ بار تکرار شدند. در آزمایش‌هایی که پرش هیدرولیکی شکل نگرفت، دبی عبوری ۰/۴ لیتر بر ثانیه و عمق جریان ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، که در

تحقیقات انجام شده روی پدیده هایپرریک بدون توجه به اثر وجود حفره آب شستگی بر مشخصات جریان هایپرریک بوده است، بنابراین در این تحقیق در نظر است تا نقش شکل گیری همزمان پرش هیدرولیکی و حفره آب شستگی بر الگوی جریان هایپرریک بررسی شود. درخور یادآوری است با توجه به اینکه برخی از تخته سنگ های درون رودخانه ها حالت برون زدگی دارند و به سنگ مادری در زیر بستر رودخانه متصل هستند، شبیه سازی جریان هایپرریک پایین دست موانع صلب رودخانه ای که به کف کانال می چسبند، می تواند مدلی از جریان در پایین دست این تخته سنگ ها باشد.

مواد و روش ها

به منظور بررسی الگوی جریان هایپرریک مطالعات به صورت آزمایشگاهی انجام شد. در ادامه، مشخصات کانال آزمایشگاهی و شیوه انجام آزمایش ها ارائه شده است.

کانال آزمایشگاهی

کانال آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق از جنس فلزی با دیواره های شیشه ای سکوریت و دارای طول ۵ متر، عرض ۳۰ سانتی متر، ارتفاع ۵۰ سانتی متر و شیب کف فلوم توسط یک جک هیدرولیکی که در زیر فلوم نصب شده بود، قابل تغییر بود که در تمامی حالت های آزمایش، شیب کف کانال روی یک درصد تنظیم شده بود. مخزن انتهایی به حجم ۸۰۰ لیتر و مخزن ابتدایی برای جلوگیری از نوسانات سطح جریان به حجم ۳۰۰ لیتر ساخته شد. برای محاسبه دبی یک کنتور حجمی قبل از مخزن ابتدایی نصب شد. در شکل ۲ نمایی از فلوم آزمایشگاهی آورده شده است.

مطالعات ایندرنی و همکاران (۲۰۱۱) جریان به گونه ای تنظیم شده بود که با توجه به رسوب به کاررفته در آزمایشگاه، آب شستگی در پایین دست مانع اتفاق نیفتد.

تا کنون بیشتر تحقیقاتی که در خصوص مدل سازی عددی جریان هایپرریک انجام شده است، به این صورت بوده است که ابتدا مدل سازی جریان سطحی انجام شده و توزیع هد هیدرولیکی حاصل از مدل سازی عددی روی کف کانال به عنوان شرایط مرزی در پشت برای مدل سازی جریان زیرسطحی لحاظ شده است. به بیانی، شبیه سازی یکطرفه بوده و تحقیقات قبلی نشان داده است که این فرض تأثیر چندانی در نتایج حاصل ندارد. به تازگی تحقیقاتی در خصوص حل همزمان جریان سطحی و زیرسطحی انجام شده است که نشان می دهد فرض یادشده خیلی نتایج را تحت تأثیر قرار نمی دهد، ولی حل همزمان دو محیط نیاز به پردازشگرهای بسیار قوی و زمان زیادی برای اجرای برنامه دارد. از این رو، تحقیقاتی در این زمینه برای این بخش ارائه شده است. ژو و ایندرنی (۲۰۱۳) تأثیر خیزآب- چالاب بر میزان تبادلات هایپرریک و عمق نفوذ آن به داخل بستر شنی در حضور فرم بستر خیزآب- چالاب را با شبیه سازی همزمان محیط سطحی و زیرسطحی بررسی کردند. آنها با استفاده از تزریق سدیم کلرید به داخل جریان، دبی عمودی هایپرریک و با تزریق جوهر از جداره زیرسطحی و عمق هایپرریک را برآورد کرده و در نهایت، مدل FLOW3D را برای تخمین خصوصیات ناحیه هایپرریک برای شرایط هیدرولیکی مختلف ارزیابی کردند.

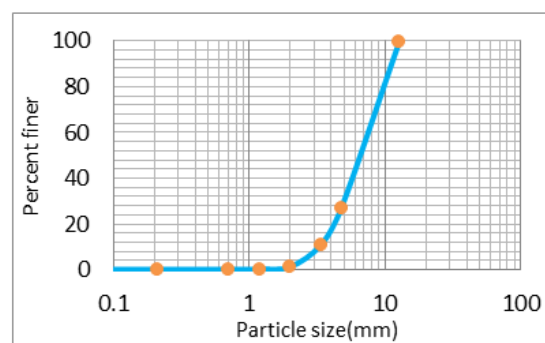
با توجه به اینکه اختلاف هد هیدرولیکی در بالادست و پایین دست موانع می تواند منجر به وقوع حفره آب شستگی شود و نگاهی به سوابق تحقیق نشان می دهد که بیشتر



شکل ۲. نمایی از کانال آزمایشگاهی

رسوبات بستر فلوم

مطابق روش دانه‌بندی ذرات با استفاده از الک‌های استاندارد، اندازه قطر متوسط D50 ذرات استفاده‌شده در فلوم آزمایشگاهی معادل ۶/۸ میلی‌متر، D16 ذرات ۴/۱ میلی‌متر و D84 ذرات معادل ۱۰ میلی‌متر به دست آمد. ضریب یکنواختی ذرات نیز با جذر نسبت D84 به D16 برابر ۱/۵۶۲ به دست آمد. ضخامت رسوبات بالادست مانع برابر ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت رسوبات پایین دست مانع برابر با ۱۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، به طوری که اختلاف سطح رسوبات بالادست نسبت به پایین دست معادل ۱۴ سانتی‌متر بود. به صورت طولی، رسوبات در فاصله ۸۸ سانتی‌متر بالادست مانع و ۲۱۲ سانتی‌متر پایین دست مانع ریخته شد. در شکل ۳ منحنی دانه‌بندی رسوبات ارائه شده است.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ذرات

قبل از شروع آزمایش‌ها و برقراری جریان آب در فلوم، سطح رسوبات بستر ماسه‌ای در بالادست و پایین دست مانع به صورت یک سطح صاف با شیب ۱ درصد اجرا شد. عمق لایه بستر به دلیل محدودیت در ارتفاع دیوار فلوم و همچنین، توان تحمل وزن رسوبات ریخته‌شده روی ورق فلزی کف فلوم حداکثر معادل ۳۰ سانتی‌متر در انجام آزمایش‌ها منظور شد.

تعیین هدایت هیدرولیکی

برای محاسبه پارامتر هدایت هیدرولیکی ابتدا بستر رسوبی یکنواختی در کل طول فلوم اجرا شد و سطح رسوب با استفاده از تراز به طور کامل صاف شد. سپس، دبی فلوم طوری تنظیم شد که سطح جریان با سطح رسوب مماس شود و سپس، مطابق رابطه $k = Q / (AS_f)$ و مشابه روش (تونینا و بافینگتن، ۲۰۰۷)، هدایت هیدرولیکی رسوبات

محاسبه شد. که در این رابطه، Q دبی جریان در محیط متخلخل، A سطح مقطع رسوبات اشباع و S_f شیب خط انرژی است. در این تحقیق برای محاسبه این پارامتر از دو تکرار مختلف استفاده شد و در نهایت، هدایت هیدرولیکی جریان در محیط متخلخل برابر ۰/۴۰۵ متر بر ثانیه به دست آمد.

تعیین تخلخل ذرات

تخلخل ذرات نیز با محاسبه نسبت حجم فضای خالی بین ذرات رسوب به حجم کل رسوبات در آزمایشگاه محاسبه شد. حجم فضای خالی بین رسوبات با جمع کردن حجم رسوبات نمونه و حجم آب سرریز شده داخل ظرف پس از ریختن نمونه رسوب درون یک ظرف پر از آب و کم کردن حجم مخلوط آب و رسوب (مجموع حجم آب ریخته‌شده در ظرف و حجم آب اولیه در حالتی که کل ظرف به طور کامل پر از آب بود) معادل ۰/۳۵۷ محاسبه شد. تخلخل رسوبات نیز تابع شکل و شیوه قرارگیری ذرات است که برای رسوبات شنی بین ۰/۳ تا ۰/۳۴ محاسبه شد [۲۵].

برداشت پروفیل سطح جریان و اندازه‌گیری دبی فلوم

برای برداشت دقیق رقوم سطح آب و رسوب در تمامی ۸ آزمایش از عمق سنج دقیق دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ متر استفاده شد. برای محاسبه مقدار دبی عبوری از فلوم از یک دستگاه کنتور فرانسج حجمی ۲/۵ اینچ نصب‌شده روی قسمت انتهایی فلوم و قبل از مخزن انتهایی استفاده شد. برای افزایش دقت و کاهش خطای آزمایشگاهی در محاسبه دبی در هر یک از ۸ آزمایش، دبی فلوم در ۳ تکرار مختلف توسط کنتور قرائت شد.

مانع صلب هرم مثلثی شکل

دو روش متفاوت برای نصب مانع صلب قابل بررسی بود، یکی از آنها مسدود کردن تمام جریان زیرسطحی از بالادست به پایین دست توسط مانع صلب هرم مثلثی شکل، که به عنوان نفوذ کامل تعریف شد؛ و دیگری اجازه دادن حرکت جریان زیرسطحی از زیر مانع صلب، به عنوان نفوذ جزئی تعریف شد. هر نوع مانع در رودخانه‌های طبیعی با قطعات نیمه‌مستغرق و تخته‌سنگ‌هایی که روی قله‌ها واقع شده‌اند، به عنوان انسداد جزئی و سنگ بسترهایی که از کف رودخانه بیرون زده‌اند، به عنوان انسداد کامل شناخته می‌شود [۲۶-۲۸].

برای هر یک از آزمایش‌های انجام‌شده، ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم از طریق لوله فلزی و سرنگ‌های تزریق به زیر بستر در قسمت‌های بالادست و پایین‌دست مانع و در نقاط مختلف برای تعیین مسیرهای هایپریک تزریق شد.

شیوه انجام آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا با بستن دریچه کشویی انتهایی مسیر جریان به صورت کامل مسدود شد. سپس، فلوم آزمایشگاهی به‌آرامی از آب پر شد و پس از آن پمپ آزمایشگاهی روشن شد و با رسیدن دبی پمپ به دبی‌های مورد نظر، تراز سطح آب در پایین‌دست سازه توسط دو دریچه کشویی و شیر کروی در کف کانال در انتها تنظیم شد تا متناسب با نوع آزمایش‌ها سه حالت مختلف جریان در فلوم ایجاد شود. در این تحقیق سه حالت جریان ریزشی، با پرش و حالت ایجاد پرش با ایجاد آب‌شستگی مورد آزمایش قرار گرفت.

این تحقیق شیب کف کانال معادل ۱ درصد و جریان از نوع پایدار در نظر گرفته شد. محدوده کاربرد نتایج این تحقیق مربوط به حالت‌هایی از تخته‌سنگ‌های رودخانه‌ای است که تا لایه نفوذناپذیر بستر فرو رفته‌اند.

شبیه‌سازی الگوی جریان هایپریک با مدل آب زیرزمینی

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و ردیابی ذرات از نرم‌افزار مادفلو و مادپس استفاده شد [۲۹ و ۳۰].

مادفلو (۲۰۰۵) نوعی مدل سه‌بعدی آب‌های زیرزمینی است که جریان پایدار و ناپایدار درون لایه آبخوان را به صورت محدود، محصورنشده و یا ترکیبی از محدود و آزاد را شبیه‌سازی می‌کند.

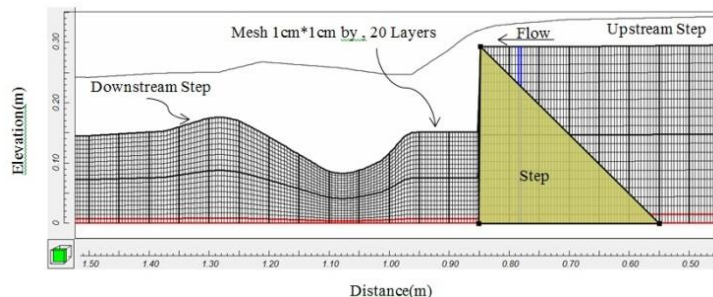
با معرفی داده‌های مربوط به توپوگرافی بستر رسوب، شبکه پایه‌ای مطابق با هندسه مسئله ایجاد شده و سپس، پروفیل سطحی جریان برداشت‌شده به عنوان شرط مرزی دریشلت به مدل معرفی شد.

برای ایجاد هندسه مدل، اندازه مش در راستای طولی و عرضی کانال یک سانتی‌متر و تعداد لایه‌ها در راستای Z متناسب با ابعاد مش در نظر گرفته شده در حالت هیدرواستاتیک معادل ۲۰ لایه انتخاب شد. در نهایت، با اعمال شرایط مرزی فشار برای ورودی و خروجی، مدل مادفلو اجرا شد و سپس، مدل مادپس برای ردیابی ذرات و تعیین مشخصات جریان هایپریک استفاده شد.

در این تحقیق حالت نفوذ کامل نصب مانع درون رسوبات بررسی شد. آزمایش با انسداد کامل به ما اجازه داد تا بررسی کنیم که چگونه وجود داشتن یاد نداشتن جریان عبوری در زیر مانع بر هایپریک ایجادشده در سه حالت ریزشی، ایجاد پرش هیدرولیکی و ایجاد توأم پرش و آب‌شستگی تأثیرگذار است. مانع به کاربرده شده از یک قطعه چوبی ضد آب جامد به صورت هرم مثلثی شکل و با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری ساخته شدند که برای ایجاد یک دراپ عمودی ۱۴ سانتی‌متری حد فاصل تاج مانع تا محل برخورد دیواره عمودی مانع صلب با سطح رسوبات پایین‌دست در نظر گرفته شد. برای نصب مانع درون فلوم از چسب آکواریوم به منظور جلوگیری از نشست آب از جداره‌های مانع از بالادست به پایین‌دست و جلوگیری از نشست احتمالی و تأثیر آن روی خطوط هایپریک پایین‌دست مانع استفاده شد.

شیوه تزریق مواد رنگی

در محل‌های قبل و بعد از پرش هیدرولیکی و در عمق‌های مختلف برای بررسی بهتر مسیر جریان هایپریک ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم تزریق شد که هم‌زمان نیز از مسیر حرکت ماده رنگی نیز فایل تصویری با استفاده از یک دستگاه دوربین سونی ۱۴/۱ مگاپیکسل با لنز ۲۵ میلی‌متری که روی سه‌پایه با موقعیت ثابت هنگام آزمایش نصب شده بود، در موقعیت‌های مختلف محل تزریق در پایین‌دست مانع برای محاسبه دقیق زمان حرکت جریان هایپریک فیلمبرداری شد، تهیه شد. ضمن اینکه شیوه تزریق ماده رنگی در محیط متخلخل به صورت ثقلی و از دو سرنگ به صورت سری استفاده شد و از پمپاژ رنگ به طور مستقیم در بستر رسوبی برای جلوگیری از تأثیرگذاری بر حرکت جریان هایپریک اجتناب شد. همچنین، برای ثبت مسیر جریان هایپریک هم‌زمان با تزریق رنگ، برچسب رنگی روی مسیر چسبانده شد تا به صورت مشخص بتوان مسیر جریان هایپریک در بستر رسوبی را مشخص کرد. با محاسبه طول حرکت مسیر ماده رنگی و زمان حرکت ماده رنگی در آزمایشگاه سرعت جریان هایپریک محاسبه شد. درخور یادآوری است با توجه به اینکه مسیر حرکت ماده رنگی به صورت قوسی شکل بود، به منظور محاسبه دقیق طول مسیر حرکت از ریسمان و یک عدد خط‌کش برای محاسبه طول قوس استفاده شد.



شکل ۴. نمایی از هندسه و مش‌بندی در نرم‌افزار مدل میوز

۳. جریان‌هایی که به عکس حالت دوم هستند و در واقع، از منبع زیرزمینی وارد جریان سطحی می‌شوند که جریان دریافتی نامیده می‌شوند. ۴. جریان‌هایی هستند که از بالادست و به موازات جریان سطحی در محیط متخلخل جریان دارند و هیچ برخوردی با جریان سطحی ندارند که از آنها به عنوان جریان آب زیرزمینی یاد می‌شود [۳۱]. در ساختارهای طبیعی بسته به موقعیت مکانی ممکن است همه این جریان‌ها و یا بخشی از آنها وجود داشته باشد.

برای محاسبه دبی تبدالی عبوری از محیط متخلخل جهت هر یک از ۸ دبی مورد آزمایش، با محاسبه سرعت جریان ورودی به محیط متخلخل و ضرب کردن آن در تخلخل رسوبات (۰/۳۵۷) و سطح مقطع هر مش (۰/۰۱ × ۰/۰۱ مترمربع، و سپس جمع کردن تمامی دبی‌ها، در نهایت دبی تبدالی کل عبوری در محیط متخلخل محاسبه شد.

سپس، برای مقایسه بهتر دبی‌های تبدالی شاخص‌های جریان سطحی و زیرسطحی به منظور کلیه آزمایش‌ها به صورت بی‌بعد تعریف شدند. از جمله این پارامترها، دبی تبدالی نرمال شده (q^*)، زمان ماندگاری بی‌بعد شده (t^*)، درصد دبی تبدالی (Q_p)، رینولدز جریان (Re) و Lm طول مؤثر جریان بودند. شایان یادآوری است طول مؤثرترین همان خط هایپرریکی بود که در محدوده مانع رخ داده بود و جریان هایپرریک در ابتدای این خط به رسوبات وارد و در انتهای این خط هایپرریک از رسوبات خارج شده بود. شیوه محاسبه هر پارامتر در روابط ۱ تا ۳ آورده شده است. دبی تبدالی و زمان ماندگاری بی‌بعد شده در مطالعات زیادی به عنوان شاخص‌های مناسب ارائه شده است [۳۲].

$$q^* = \frac{Q_{ex}}{kA_s} \quad (1)$$

$$t^* = \frac{Rt}{Lm} k \quad (2)$$

الگوریتم ردیابی ذرات که توسط مدل مادپس قابل اجراست، می‌تواند ناحیه جریان را در حالت ماندگار یا انتقالی بررسی کند. مدل مادپس قادر است مسیر جریان را به صورت سه‌بعدی با استفاده از خروجی جریان آب زیرزمینی و با توجه به داده‌های خروجی مدل مادفلو شبیه‌سازی کند. این مدل جریان آب زیرزمینی را بر اساس معادله داری و روش تفاضل محدود حل می‌کند [۲۹].

مسیر حرکت ذره با ردیابی ذره از یک سلول به سلول مجاور تا رسیدن به یک مرز مشخص همچون چاه یا چشمه یا شرایط انتهایی دیگر مشخص می‌شود. داده‌های ورودی به مدل مادپس، ترکیبی است از داده‌های خروجی مادفلو که شامل هد و جریان هستند. خروجی مادپس شامل فایل‌های خروجی متعددی همچون فایل مختصاتی مسیر ذره است که این داده‌های خروجی توسط برنامه‌های دیگر قابل آنالیز و بررسی بوده و نتایج به روش‌های مختلف قابل نمایش است. علاوه بر محاسبه مسیر خطوط جریان، مادپس زمان انتقال حرکت ذرات را نیز محاسبه می‌کند. با معرفی دقیق موقعیت‌های شروع حرکت ذره در مدل مادپس، این امکان وجود دارد که در محدوده وسیعی از ناحیه مورد آنالیز، مسیر محل تزریق و شبکه جریان را ترسیم کند.

تبادل هایپرریک و زمان ماند

به طور کلی، جریان‌های زیرسطحی به چهار دسته تقسیم می‌شوند: ۱. جریان‌هایی که به دلیل تغییرات فرم بستر از سطح بستر وارد محیط متخلخل شده و دوباره از آن خارج می‌شوند و به جریان سطحی برمی‌گردند که به آنها جریان‌های هایپرریک گفته می‌شود. ۲. جریان‌هایی که از آب سطحی وارد محیط متخلخل می‌شوند و دیگر برنمی‌گردند که در این حالت به سفره آب زیرزمینی می‌پیوندند که به این جریان‌ها جریان ازدست‌رفته گویند.

پروفیل‌های مختلف سطح جریان در سه حالت ریزشی، وجود پرش هیدرولیکی و وجود هم‌زمان پرش هیدرولیکی به همراه آب‌شستگی در آزمایشگاه شکل گرفت. هر سری از آزمایش‌ها در ۳ دبی مختلف انجام شد.

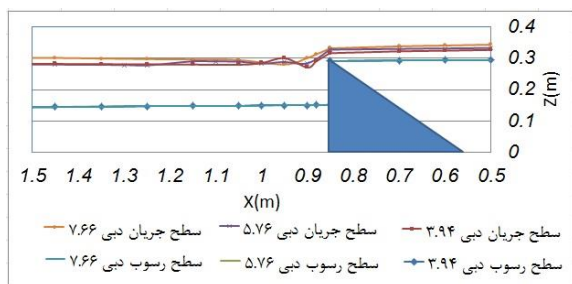
در جدول ۱ مشخصات هیدرولیکی سه سری آزمایش انجام‌شده شامل دبی و عمق جریان در انتهای فلوم آورده شده است.

در آزمایش‌هایی که پرش هیدرولیکی در آن شکل نگرفت، جریان عبوری از روی مانع به صورت ریزشی تشکیل شد و هیچ شیب سطح آب معکوسی در پایین‌دست مانع ایجاد نشد.

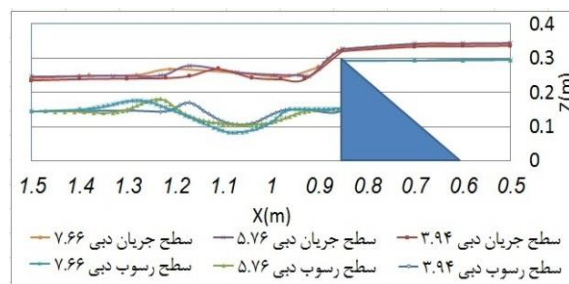
در ۶ آزمایشی که در آن پرش هیدرولیکی تشکیل شد (سری اول و دوم)، بعد از عبور جریان از روی مانع یک ناحیه غوطه‌وری بعد از ریزش جریان از روی مانع شکل گرفت که پرش هیدرولیکی در هر سری از آزمایش‌ها به صورت شکل‌های ۵ و ۶ تشکیل شد.

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی جریان

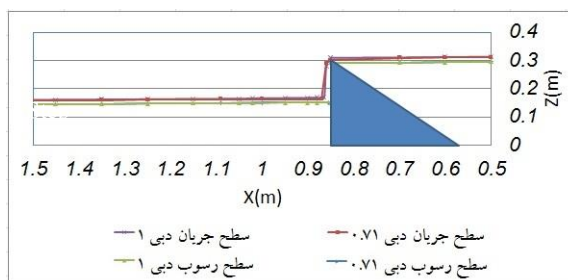
سری	سری ۱			سری ۲			سری ۳		
حالت‌های آزمایش	پرش و آب‌شستگی			پرش			ریزشی		
تعداد آزمایش‌های انجام‌شده	۳			۳			۲		
دبی (لیتر بر ثانیه)	۵/۷۶	۳/۹۴	۷/۶۶	۳/۷	۴/۷۸	۶/۱	۰/۷۱	۱	۱
عمق جریان پایین‌دست	۱۳/۱	۱۲/۵	۱۲/۲	۱۵/۸	۱۶/۵	۱۸/۶	۱/۸	۱/۷	۱/۷



شکل ۶. مشخصات جریان در حالت ایجاد پرش



شکل ۵. پروفیل‌های جریان در حالت ایجاد پرش-آب‌شستگی



شکل ۷. مشخصات جریان در حالت جریان ریزشی

$$Q_p = \frac{Q_{ex}}{Q} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن، k هدایت هیدرولیکی مصالح محیط متخلخل، A_s مساحت سطح تماس جریان سطحی و محیط متخلخل، Rt زمان ماند حرکت ذرات، Q_{ex} دبی تبدیلی کل و Q دبی جریان است [۳۱].

برای محاسبه عدد رینولدز جریان از رابطه ۴ استفاده شد.

$$Re = \frac{(Q/By)^y}{g} \quad (۴)$$

که در آن، B عرض فلوم آزمایشگاهی، y عمق جریان در ورودی فلوم و θ لزجت سینماتیک آب است.

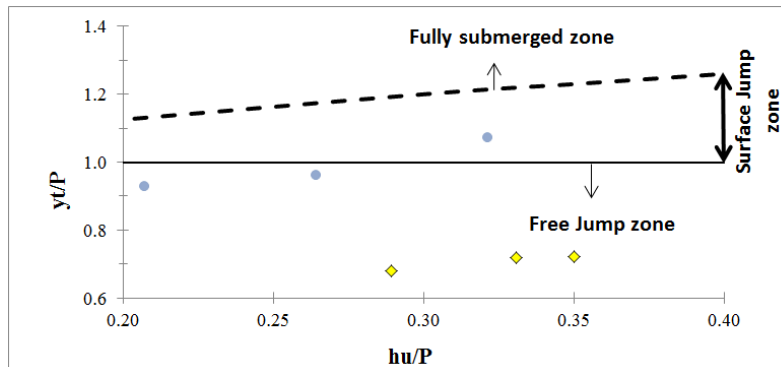
نتایج و بحث

پروفیل سطح جریان

سه سری آزمایش در مجموع به تعداد ۸ آزمایش روی فلوم آزمایشگاهی انجام شد که مانع صلب ۳۰ سانتی‌متری به صورت نفوذ کامل درون بستر رسوبات نصب شد و

بر اساس نتایج تحقیق احمد و همکاران (۲۰۲۰) که به مطالعه پرش‌های سطحی پرداختند، نوع پرش‌های تشکیل شده در تحقیق حاضر مطابق شکل ۸ به دست آمد [۳۳].

محدوده ایجاد پرش هیدرولیکی در حالت‌های وجود آبشستگی حد فاصل x برابر $0/93$ متر تا x برابر $1/28$ متر برای حالت بدون ایجاد آبشستگی حد فاصل x برابر $0/9$ متر تا x برابر $1/25$ متر اتفاق افتاد.



شکل ۸. منحنی پرش آزاد، سطحی و مستغرق

گرفت و تأثیر پخشیدگی در تبادلات هایپرریک مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفت [۲۳ و ۲۴].

مسیرهای خطوط هایپرریک به دست آمده از نتایج فلوم آزمایشگاهی

در کلیه آزمایش‌ها چهار نوع مسیر جریان هایپرریک در پایین دست مانع شناسایی شد. جهت به سمت پایین دست و متمایل به سمت سطح رسوبات^۱، جهت به سمت بالادست جریان و متمایل به سمت سطح رسوبات^۲، جهت به سمت پایین دست جریان و متمایل به سمت کف فلوم^۳ و جهت به سمت بالادست جریان و متمایل به سمت کف فلوم^۴.

در آزمایش‌های سری اول که مشخصات هیدرولیکی آن در جدول ۲ آورده شد، پرش هیدرولیکی و آبشستگی به صورت توأمان تشکیل شد و در این سری آزمایش مانع صلب هرم مثلثی شکل به صورت کامل تا کف فلوم نصب شد. در شکل ۹ به عنوان نمونه نمای کلی از ۳ آزمایش یادشده آورده شده است که در آن مسیرهای خطوط هایپرریک که توسط تزریق ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم که در بستر رسوبات در حین انجام آزمایش‌ها تزریق شده بود، به وسیله نوارهای رنگی سفید (UDU) و زرد (DDU) نشان داده شده است.

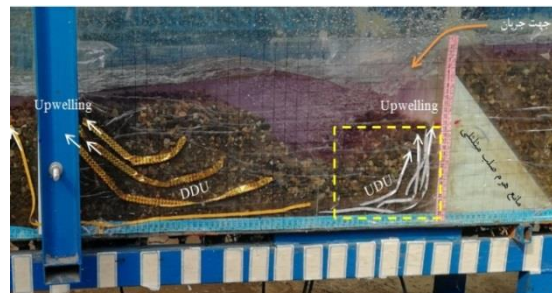
نقاط دایره‌ای آبی‌رنگ مربوط به حالت‌هایی از آزمایش‌ها است که در آن پرش هیدرولیکی تشکیل شده بود، ولی هیچ‌گونه آبشستگی در رسوبات رخ نداده بود. در این ۳ آزمایش، آن آزمایشی که دبی آن حداکثر بود (معادل دبی $6/1$ لیتر بر ثانیه)، نوع پرش آن به دلیل اینکه در محدوده دو منحنی قرار گرفته بود، از نوع سطحی بود و در آزمایش دیگر که با دبی‌های $3/7$ و $4/78$ لیتر بر ثانیه انجام شده بود، به دلیل اینکه نقاط متناظر این دو حالت در زیرمنحنی پرش آزاد قرار گرفته بود، پرش از نوع آزاد شکل گرفته بود. لوزی‌های زرد رنگ مربوط به حالتی از آزمایش‌ها بود که پرش و آبشستگی به صورت هم‌زمان تشکیل شده بود. با توجه به اینکه هر سه نقطه در زیرمنحنی پرش آزاد قرار گرفته بودند، نوع پرش تشکیل شده در این حالات از آزمایش‌ها پرش از نوع آزاد بود. درخور یادآوری است که پارامترهای h_u ، y_t و p به ترتیب عمق جریان بالادست مانع، عمق جریان بعد از محل تشکیل پرش و ارتفاع ریزش جریان از روی مانع است.

در هر یک از آزمایش‌های مربوط به سری اول و دوم که در آنها پرش هیدرولیکی تشکیل شده بود، آشفستگی جریان زیاد بود، با این حال در این مقاله مشابه کار ایندرونی و ناگانوکا (۲۰۱۱) فقط الگوهای تبادلی مورد بررسی قرار

1. Downstream-directed upwelling (DDU)
2. Upstream-directed upwelling (UDU)
3. Downstream-directed downwelling (DDD)
4. Upstream-directed downwelling (UDD)

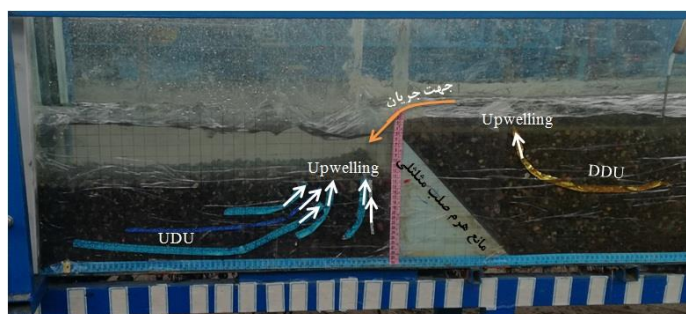
سفیدرنگ (UDU) نشان داده شده است، در جهت بالادست جریان و به سمت سطح بستر رسوبات مشاهده شد و دلیل آن را می‌توان به اختلاف فشار هیدرودینامیکی دو نقطه و وجود جریان‌های گردابی کوچک درست در مجاور دیوار عمودی مانع نسبت داد. از محل حداکثر عمق آب‌شستگی ایجادشده تا پایین‌دست فلوم کلیه خطوط هایپرریک مطابق نوارهای زردرنگ (DDU) مشخص شده در شکل ۹ در جهت پایین‌دست جریان و به سمت سطح بستر رسوبات بودند که این حالت ناشی از اختلاف فشارهای هیدرودینامیک به واسطه تغییرات سرعت و عمق جریان در دو نقطه مختلف است.

در آزمایش‌های سری دوم با سه دبی $۳/۷$ ، $۴/۷۸$ و $۶/۱$ لیتر بر ثانیه با ارتفاع مانع ۳۰ سانتی‌متری که در آزمایشگاه انجام گرفت، دبی طوری در فلوم آزمایشگاهی برقرار شده که فقط پرش هیدرولیکی تشکیل شود و هیچ‌گونه آب‌شستگی نیز رخ نداد، به دلیل همین موضوع مجبور بودیم رقوم سطح جریان در پایین‌دست فلوم را با تنظیم درجه کشویی پایین‌دست بالا نگه داریم تا آب‌شستگی در پایین‌دست مانع ایجاد نشود و این امر باعث شد در قسمتی از طول فلوم زمانی که ماده رنگی به سمت رسوبات تزریق می‌شد، جهت خطوط هایپرریک به سمت بالادست همان‌طور که در شکل ۱۰ با نوارهای آبی‌رنگ (UDU) نشان داده شده، شکل گیرد.



شکل ۹. مدل آزمایشگاهی در حالت ایجاد پرش- آب‌شستگی

فلش‌های زرد خطوط هایپرریکی را نشان می‌دهد که جهت آنها به سمت پایین‌دست جریان و موافق حرکت جریان آب (DDU) هستند و فلش‌های سفیدرنگ مسیره‌های خطوط هایپرریکی را نشان می‌دهد که جهت آنها به سمت بالادست جریان و در جهت خلاف حرکت جریان (UDU) است. در این سری از آزمایش‌ها، در زیر محلی که حداکثر آب‌شستگی در آزمایشگاه ایجاد شده بود، طی تزریق ماده رنگی مسیره‌های خطوط هایپرریک مطابق شکل ۹ در دو جهت مختلف مشاهده شد که دلیل آن را می‌توان ناشی از هیدرودینامیک جریان ریزشی از روی مانع و پرش هیدرولیکی و جریان‌های چرخشی ایجادشده ناشی از پرش هیدرولیکی درست در بالادست محل حداکثر عمق آب‌شستگی ایجادشده دانست. همان‌طور که در این شکل نیز قابل رؤیت است، خطوط هایپرریک حد فاصل دیوار عمودی مانع تا محل حداکثر آب‌شستگی که با نوارهای

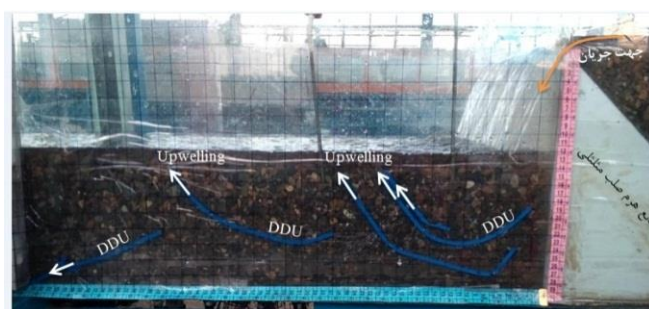


شکل ۱۰. مدل آزمایشگاهی در حالت ایجاد پرش هیدرولیکی

هایپرریکی را نشان می‌دهد که جهت آنها به سمت بالادست جریان و مخالف حرکت جریان آب (UDU) هستند و نوارهای زردرنگ مسیره‌های خطوط هایپرریکی را نشان می‌دهد که جهت آنها به سمت پایین‌دست جریان و در جهت حرکت جریان (DDU) است. خطوط هایپرریک آبی‌رنگ به واسطه اختلاف فشار هیدرودینامیک بین دو

در شکل ۱۰ به عنوان نمونه نمای کلی از ۳ آزمایش مربوط به این سری از آزمایش‌ها (سری دوم) آورده شده است که در آن نیز مسیره‌های خطوط هایپرریک که توسط ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم که در بستر رسوبات هنگام انجام آزمایش‌ها تزریق شده بود، به وسیله نوارهای رنگی زرد و آبی نشان داده شده است. نوارهای آبی خطوط

آزمایش نیز مشابه دو سری آزمایش‌های قبلی (۶ حالت قبلی)، مانع صلب هرم مثلثی شکل به صورت کامل تا کف فلوم نصب شده بود. در شکل ۱۱ نیز به عنوان نمونه نمای کلی از ۲ آزمایش مربوط به این سری از آزمایش‌ها (سری سوم) آورده شده است که در آن نیز مسیرهای خطوط هایپرریک که توسط ماده رنگی پرمگنات پتاسیم که در بستر رسوبات هنگام انجام آزمایش‌های تزریق شده بود، به وسیله نوارهای رنگی آبی (DDU) نشان داده شده است.



شکل ۱۱. مدل آزمایشگاهی در حالت جریان ریزشی

مانع، به سمت تاج مانع و به سمت سطح رسوب در کانال روباز حرکت کردند.

در آزمایش‌هایی که آقای ایندرنی انجام دادند، پرش هیدرولیکی تشکیل شده بود، مسیرهای تبادلی هایپرریک در بالادست مانع، در حالتی که مانع به صورت کامل در بستر نفوذ کرده بود، به صورت جریان رو به بالا مشاهده شد.

یکی دیگر از نتایج پژوهش آقای ایندرنی این بود که پرش هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده آن تا حدود ۲۵ سانتی‌متری از پای مانع ادامه داشت، که در آن نقطه، جریان هایپرریک به صورت پیوسته و به سمت پایین دست جریان و در جهت رو به بالا (DDU) مشاهده شد. در تحقیق حاضر برای حالتی که مانع به صورت کامل در رسوبات نصب شده بود و علاوه بر تشکیل پرش، آبشستگی نیز تشکیل شده بود، فاصله پرش هیدرولیکی از پای مانع، معادل ۴۴ سانتی‌متر برای مانع با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (سری اول) بود. در حالتی که فقط پرش هیدرولیکی داشتیم و هیچ‌گونه حرکت رسوبات در پایین دست مانع وجود نداشت، فاصله پرش هیدرولیکی از پای مانع، معادل ۱۷ سانتی‌متر برای مانع با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (سری دوم) بود.

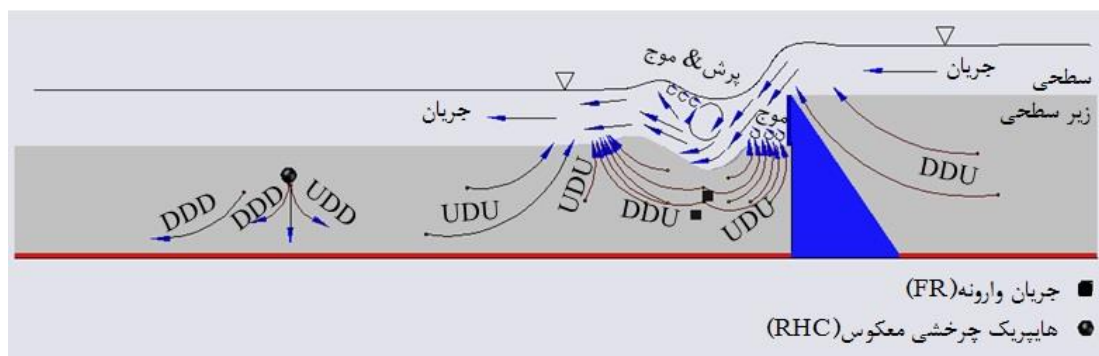
نقطه است که باعث شده حد فاصل دیوار عمودی مانع تا انتهای پرش خطوط هایپرریک در جهت پایین دست و به سمت سطح بستر رسوبات ایجاد شوند.

در آزمایش‌های سری سوم با دبی‌های ۰/۷۱ و ۱ لیتر بر ثانیه با ارتفاع مانع ۳۰ سانتی‌متری که در آزمایشگاه انجام گرفت، دبی به صورتی در فلوم آزمایشگاهی برقرار شده که نه پرش هیدرولیکی و نه آبشستگی تشکیل شد و جریان به صورت ریزشی از روی مانع شکل گرفت. در این دو

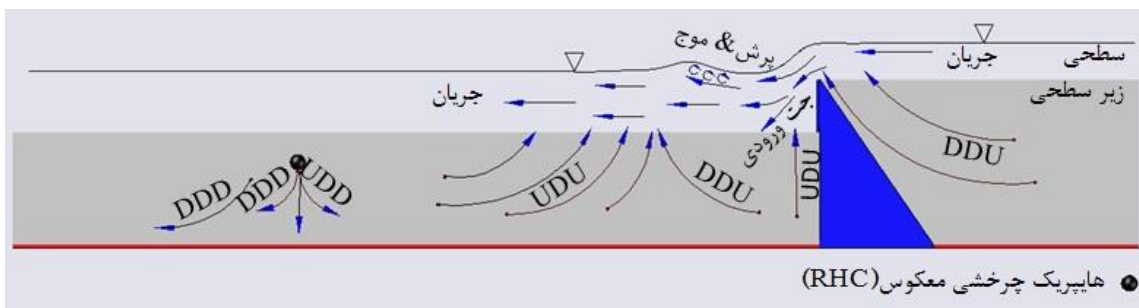
نوارهای آبی خطوط هایپرریکی را نشان می‌دهد برای آنان به سمت پایین دست جریان و در جهت حرکت جریان آب (DDU) هستند. خطوط هایپرریک آبی رنگ به واسطه اختلاف فشار هیدرودینامیکی است که حد فاصل مانع تا قسمت پایین دست فلوم ایجاد شده است که این باعث شده تمامی مسیرهای خطوط هایپرریکی که نزدیک به مانع هستند، به سمت پایین دست جریان و متمایل به سمت سطح بستر رسوبات حرکت کنند و خطوط هایپرریکی که از مانع فاصله دارند، درون بستر رسوبات به سمت پایین دست فلوم حرکت کنند که دلیل آن در نتیجه آبگیر کفی ۲/۵ اینچی است که در انتهای فلوم و در کف فلوم ایجاد شده تا بتوان برای افزایش دقت آزمایش‌ها، جریان سطحی و زیرسطحی را هنگام انجام آزمایش‌ها از هم مجزا کرد. در این سری از آزمایش‌ها که پرش هیدرولیکی وجود نداشت و جریان به صورت ریزشی بود، مشابه نتایج پژوهش آقای ایندرنی جهت جریان هایپرریک در زیر مانع متمایل به سمت پایین جریان مشاهده شد. همچنین، در تمامی سه سری از آزمایش‌های اشاره شده (۸ آزمایش) و در حالتی که مانع به صورت کامل درون بستر قرار گرفته بود و حالت انسداد جریان شکل گرفته بود نیز مشابه نتایج ایندرنی بیشتر رنگ‌های تزریق شده در بستر رسوبی و در بالادست

چهار حالت حرکتی جریان هایپرپیک و ارتباط آنان به صورت شماتیک برای حالاتی از آزمایش‌های که مانع به

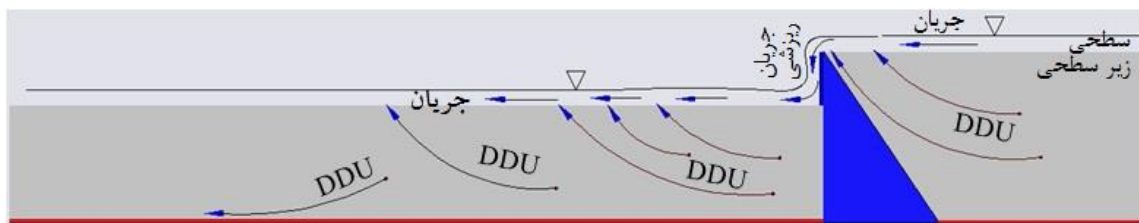
صورت کامل در رسوبات نصب شده بود، در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ آورده شده است.



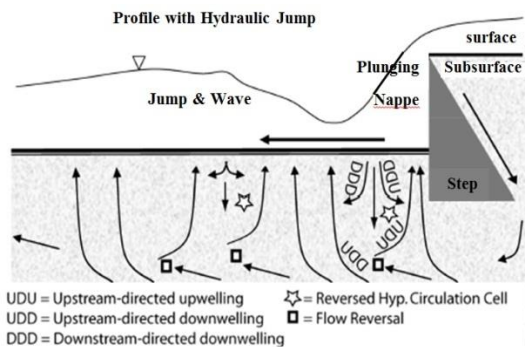
شکل ۱۲. شماتیک جریان عبوری از روی مانع صلب برای حالت ایجاد پرش - آب‌شستگی



شکل ۱۳. شماتیک جریان عبوری از روی مانع صلب برای حالت ایجاد پرش



شکل ۱۴. شماتیک جریان عبوری از روی مانع صلب برای حالت جریان ریزشی



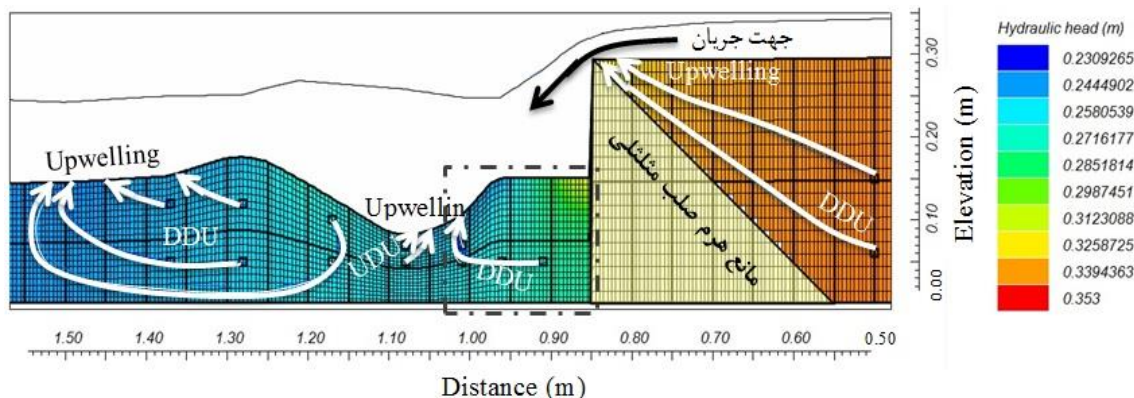
شکل ۱۵. جریان وارونه مشاهده شده (ایندرنی، ۲۰۱۱)

جریان وارونه^۱ به این صورت تعریف شد که جریان به سمت پایین دست و متمایل به سطح بستر رسوب (DDU) را به یک جریان به سمت بالادست و رو به بالا (UDU) متصل شوند. در آزمایش‌های آقای ایندرنی این نوع جریان در حالتی که مانع به صورت جزئی در رسوبات نصب شده بود و پرش نیز شکل گرفته بود، در فاصله ۱ سانتی‌متری نسبت به کف فلوم و در زیر محل ریزش جریان از روی مانع و همچنین، در زیر محل قله پرش که به صورت مربع سفیدرنگ در شکل ۱۵ مشاهده شده بود.

1. Flow Reversal (FR)

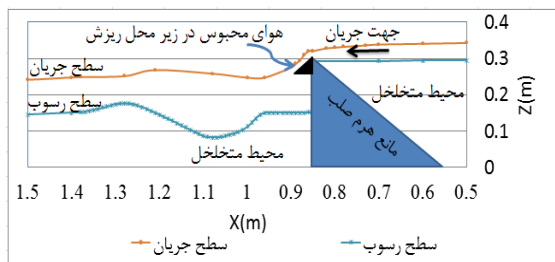
مسیرهای خطوط هایپریک به دست آمده از نتایج مدل عددی همان طور که در بخش نتایج فلوم آزمایشگاهی اشاره شد، در آزمایش های سری اول با سه دبی ۳/۹۴، ۵/۷۶ و ۷/۶۶ لیتر بر ثانیه با ارتفاع مانع ۳۰ سانتی متری که در آزمایشگاه انجام گرفت، پرش هیدرولیکی و آبشستگی به صورت توأمان تشکیل شد و در این سری از آزمایش ها مانع صلب هرم مثلثی شکل به صورت کامل تا کف فلوم نصب شده بود که نتایج حاصل از خروجی نرم افزار مدل هیدرواستاتیک مدل میوز برای حالتی که دبی ۷/۶۶ لیتر بر ثانیه و ارتفاع مانع صلب ۳۰ سانتی متر بود، انتخاب شده و در شکل ۱۶ آورده شده است. همچنین، برای اعتبارسنجی مدل هیدرواستاتیک، مکان های تزریق رنگ در فلوم آزمایشگاهی با نقاط مشابه در نرم افزار هیدرواستاتیک مدل میوز مقایسه شد.

در این تحقیق نیز این نوع جریان وارونه (FR) که در حالت هایی که مانع به صورت کامل در رسوبات نصب شده بود و پرش هیدرولیکی و آبشستگی نیز تشکیل شده بود، مشاهده شد که در شکل ۱۵ با علامت مربع مشکی رنگ نشان داده شده است. در آزمایش های آقای ایندرنی یک سلول هایپریک چرخشی^۱ به این صورت شکل گرفته بود که یک جریان هایپریک که جهت آن به سمت بالادست و رو به پایین (UDD) بود، با یک جریان هایپریک دیگر که جهت آن به سمت بالادست و متمایل به سمت سطح رسوبات (UDU) بود، با هم برخورد داشتند که این حالت باعث تشکیل یک سیکل جریان در پایین دست مانع و درون رسوبات آزمایش های ایشان شد. در این تحقیق و در تمامی حالات مختلف نصب مانع و حالات مختلف ایجاد پرش و بدون ایجاد پرش، این نوع جریان مشاهده نشد.



شکل ۱۶. مسیرهای خطوط هایپریک به دست آمده از نتایج مدل عددی در حالت جریان وجود پرش- آبشستگی

آن را می توان ناشی از حجم هوای محبوس شده در زیر محل ریزش (مثلث مشکی رنگ در شکل ۱۷) دانست که مدل میوز به درستی این قسمت را شبیه سازی نمی کند.



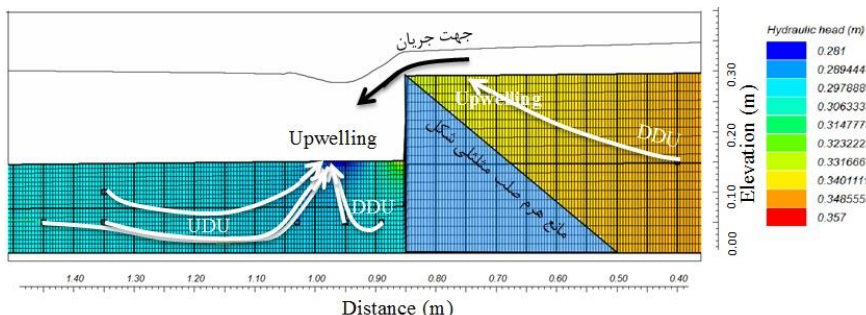
شکل ۱۷. موقعیت هوای محبوس ایجاد شده در زیر محل ریزش برای حالت ایجاد پرش- آبشستگی

با مقایسه مسیرهای هایپریک در دو مدل آزمایشگاهی^۱ (شکل ۹) و مدل هیدرواستاتیک (شکل ۱۶) برای حالت نصب کامل مانع درون رسوبات و ایجاد پرش و آبشستگی به صورت توأمان و ارتفاع مانع صلب ۳۰ سانتی متری مشاهده شد که در تمامی نواحی مسیرهای هایپریک با هم مطابقت دارند و فقط در محدوده زیر محل ریزش جریان از روی مانع (nappe) به طول ۶ سانتی متر نسبت به دیواره عمودی مانع که در شکل یاد شده با مربع نقطه چین نشان داده شده است مسیرهای هایپریک حاصل از مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق ندارد که دلیل

1. Reversed Hyp. Circulation

آزمایش‌ها نیز مانع صلب هرم مثلثی شکل به صورت کامل تا کف فلوم نصب شده بود. که از ۳ سری انجام‌شده نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار مدل هیدرواستاتیک مدل میوز برای حالتی که دبی ۶/۱ لیتر بر ثانیه و ارتفاع مانع صلب ۳۰ سانتی‌متر بود، انتخاب شده و در شکل ۱۸ آورده شده است.

در آزمایش‌های سری دوم نیز که با سه دبی ۳/۷، ۴/۷۸ و ۶/۱ لیتر بر ثانیه با ارتفاع مانع ۳۰ سانتی‌متری که در آزمایشگاه انجام گرفت، دبی طوری در فلوم آزمایشگاهی برقرار شده که فقط پرش هیدرولیکی تشکیل شود و هیچ‌گونه آب‌شستگی نیز رخ ندهد و در این سری از



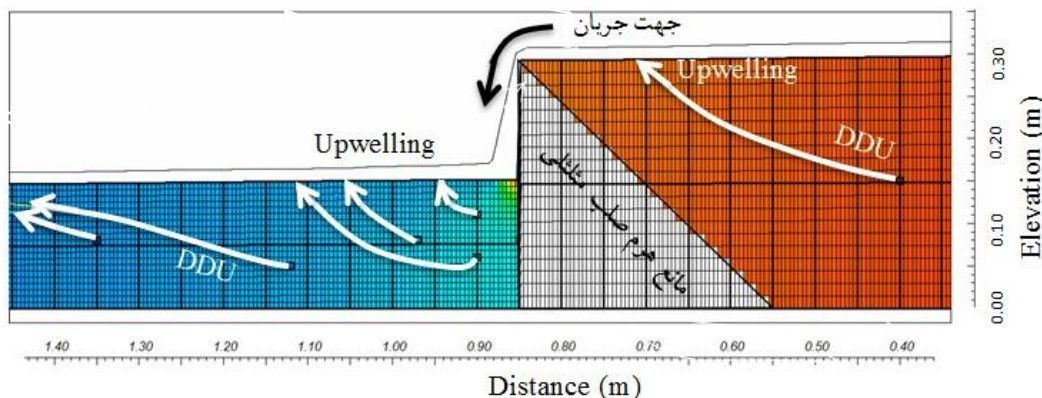
شکل ۱۸. مسیرهای خطوط هایپرک به دست آمده از نتایج مدل عددی در حالت جریان ایجاد پرش

مانع شکل گرفت و در این سری از آزمایش‌ها مانع صلب هرم مثلثی شکل به صورت کامل تا کف، فلوم نصب شده بود که از ۲ سری انجام‌شده نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار مدل هیدرواستاتیک مدل میوز برای حالتی که دبی ۱ لیتر بر ثانیه و ارتفاع مانع صلب ۳۰ سانتی‌متر بود، انتخاب شده و در شکل ۱۸ آورده شده است.

با مقایسه مسیرهای هایپرک در دو مدل آزمایشگاهی (شکل ۱۱) و مدل هیدرواستاتیک (شکل ۱۹) برای حالت نصب کامل مانع درون رسوبات و جریان به صورت ریزشی و ارتفاع مانع صلب ۳۰ سانتی‌متری، تطابق بسیار خوبی بین خطوط هایپرک آزمایشگاهی و خطوط هایپرک حاصل از مدل عددی هیدرواستاتیک مدل میوز نیز مشاهده شد.

با مقایسه مسیرهای هایپرک در دو مدل آزمایشگاهی (شکل ۱۰) و مدل هیدرواستاتیک (شکل ۱۸) برای حالت نصب کامل مانع درون رسوبات و ایجاد پرش بدون ایجاد آب‌شستگی و ارتفاع مانع صلب ۳۰ سانتی‌متری، تطابق بسیار خوبی بین خطوط هایپرک آزمایشگاهی و خطوط هایپرک حاصل از مدل عددی هیدرواستاتیک مدل میوز مشاهده شد.

در آزمایش‌های سری سوم نیز که با دبی‌های ۰/۷۱ و ۱ لیتر بر ثانیه با ارتفاع مانع ۳۰ سانتی‌متری که در آزمایشگاه انجام گرفت، دبی به صورتی در فلوم آزمایشگاهی برقرار شده که نه پرش هیدرولیکی و نه آب‌شستگی تشکیل شد و جریان به صورت ریزشی از روی



شکل ۱۹. مسیرهای خطوط هایپرک به دست آمده از نتایج مدل عددی در حالت جریان ریزشی

دبی تبدالی و زمان ماندگاری

پس از تجزیه و تحلیل مدل هیدرواستاتیکی و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی، در این بخش، نتایج مشخصه‌های هایپریک بدون بعد تجزیه و تحلیل می‌شود. پس از محاسبه

دبی تبدالی و زمان ماند با استفاده از خروجی‌های مدل عددی در حالت نصب موانع صلب ۳۰ سانتی‌متری به صورت کامل درون رسوبات، نتایج به شرح جدول ۲ به دست آمد.

جدول ۲. مشخصات دبی تبدالی و زمان ماندگاری بی‌بعد، جریان هایپریک در سه حالت مختلف جریان

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
ردیف	نوع جریان	دبی	عدد رینولدز	دبی تبدالی بی‌بعد شده	درصد دبی تبدالی	زمان ماند بی‌بعد شده
		Q(m3/s)	Re	q*	%QP	t*.avg
۱	پرش و آب‌شستگی	۰/۰۰۳۹۴	۱۳۰۵۳	۰/۰۱۳۰	۳۵/۰	۵/۶۰
۲		۰/۰۰۵۷۶	۱۹۰۶۴	۰/۰۱۲۸	۲۸/۶	۲/۵۰
۳		۰/۰۰۷۶۶	۲۵۳۵۸	۰/۰۱۲۴	۲۷/۳	۲/۱۰
۴	پرش	۰/۰۰۳۷	۱۲۲۵۶	۰/۰۱۵۲	۴۹/۶	۶/۵
۵		۰/۰۰۴۷۸	۱۵۸۳۶	۰/۰۱۲۰	۳۰/۴	۴/۳
۶		۰/۰۰۶۱	۲۰۱۷۳	۰/۰۱۱۴	۲۱/۴	۱/۰
۷	ریزشی	۰/۰۰۰۷۱	۲۳۴۵	۰/۰۲۳۷	۶۰/۳	۲۰/۹
۸		۰/۰۰۱	۳۲۹۹	۰/۰۲۳۱	۵۵/۸	۱۶/۷

بررسی زمان ماندگاری جریان هایپریک (RT)

نتایج نشان می‌دهد در حالت‌های جریان (ایجاد پرش- آب‌شستگی، ایجاد پرش) به طور کلی با افزایش عدد رینولدز جریان، زمان ماندگاری بی‌بعد شده روند کاهشی و در حالت جریان ریزشی روند افزایشی داشته است. همچنین، با مقایسه مقدار زمان ماند در حالت‌های ریزشی، ایجاد پرش و ایجاد پرش- آب‌شستگی مشاهده شد که در حالت ریزشی متوسط زمان ماند نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. ضمن اینکه متوسط زمان ماند در حالت ایجاد پرش بیشتر از حالتی است که پرش و آب‌شستگی به صورت هم‌زمان در آزمایشگاه تشکیل شده بود، به این معنا که با کاهش عدد رینولدز تعداد ذرات جریان که زمان ماند طولانی‌تری دارند، افزایش می‌یابد. نتایج دو حالت ایجاد پرش و ایجاد پرش- آب‌شستگی با یافته‌های موحدی و همکاران (۱۳۹۸) نیز مطابقت داشت [۳۴ و ۳۵]. جمالی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی اندرکنش جریان سطحی و زیرسطحی در پشته‌های رسوبی میانی پرداختند. این محقق نیز به طور مشابه به این نتیجه رسید که با افزایش دبی جریان، زمان ماندگاری میانه بی‌بعد جریان در محیط متخلخل پشته (*t) نیز روند کاهشی از خود نشان داد [۳۱]. مارزادرای و

همکاران (۲۰۱۰) نیز که به بررسی نیمه‌تحلیلی جریان هایپریک روی پشته‌های رسوبی پرداخته بودند، به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جریان روی پشته رسوبی، زمان ماند کاهش می‌یابد [۳۳].

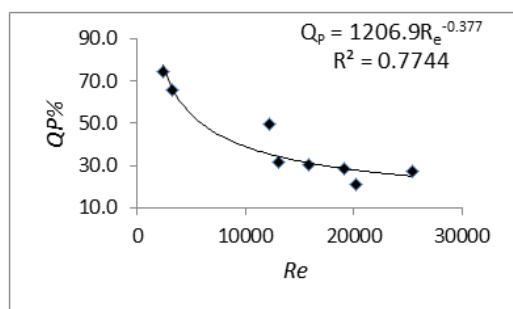
بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در رینولدزهای پایین، مدت زمانی که مواد محلول درون ناحیه هایپریک باقی می‌ماند، بیشتر است و در نتیجه، فرصت بیشتری برای انجام برخی واکنش‌های شیمیایی و نیز کاهش یا حذف مواد آلاینده که همراه جریان وارد این ناحیه شده‌اند، وجود خواهد داشت.

کمترین زمان ماندگاری در همه آزمایش‌ها مربوط به حالت جریان با ایجاد پرش- آب‌شستگی و بیشترین زمان ماند نیز به حالت جریان ریزشی است.

طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده از نتایج زمان ماند مشخص شد که زمان ماند با عدد رینولدز رابطه توانی دارند، به طوری که در شکل ۲۰ تغییرات زمان ماند بی‌بعد شده در مقابل عدد رینولدز ترسیم شده و ضریب همبستگی ۸۴ درصد بین آنها برقرار بوده است. به طوری که می‌توان طبق این رابطه توانی تخمین مناسبی از زمان ماند ارائه کرد.

و همکاران (۲۰۱۵) نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جریان، شاخص بی‌بعد دبی تبدالی (q^*) نیز کاهش می‌یابد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

بررسی درصد دبی تبدالی کل جریان هایپرریک (Q_p) درصد دبی تبدالی کل جریان هایپرریک از نسبت دبی تبدالی کل جریان هایپرریک (Q_{ex}) به دبی جریان ورودی از فلوم آزمایشگاهی (Q) به دست می‌آید. با بررسی این پارامتر در جدول ۲ مشاهده شد که در تمامی حالت‌های مورد آزمایش با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار درصد دبی تبدالی کل جریان هایپرریک روند کاهشی داشته است که با نتایج مطالعات تراث و همکاران (۲۰۱۵) نیز همخوانی دارد [۳۶].

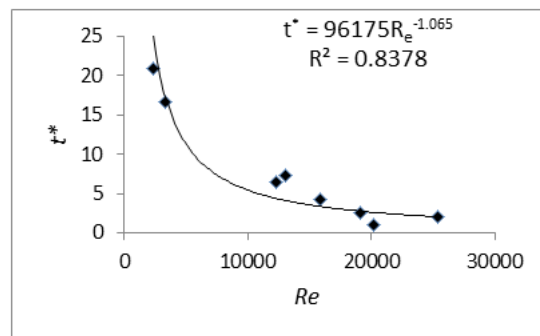


شکل ۲۲. نمودار درصد دبی تبدالی کل جریان هایپرریک در مقابل رینولدز جریان

مطابق نتایج جدول ۲ بیشترین درصد اختلاط جریان سطحی با محیط زیرسطحی با توجه به دبی جریان عبوری در آن با $60/3$ درصد در جریان ریزشی رخ داده است و کمترین درصد اختلاط نیز به حالت ایجاد پرش با $21/4$ درصد دبی تبدالی بود. همچنین، در نمودار شکل ۲۲ همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد دبی تبدالی کل جریان با عدد رینولدز نیز رابطه‌ی توانی دارند که برای درصد دبی تبدالی کل جریان هایپرریک (Q_p) در مقابل عدد رینولدز (Re) همبستگی ۷۷ درصد بین آن‌ها برقرار است.

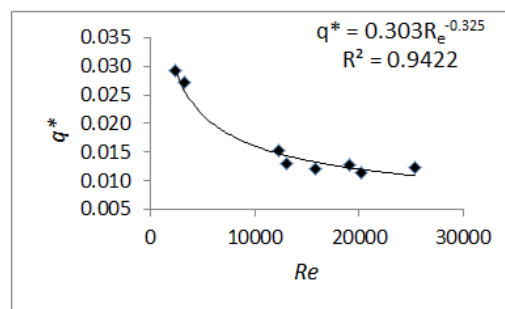
نتیجه‌گیری

- طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده از نتایج مدل زیرسطحی و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی مشخص شد که در دو حالت ایجاد پرش و ریزشی، الگوی خطوط جریان هایپرریک ایجادشده در مدل آزمایشگاهی با الگوی خطوط جریان هایپرریک



شکل ۲۰. تغییرات زمان ماندگاری بی‌بعدشده در مقابل عدد رینولدز جریان

بررسی دبی تبدالی کل جریان هایپرریک (Q_{ex}) با بررسی دبی تبدالی کل بی‌بعدشده (q^*) مشاهده شد که تغییرات دبی تبدالی وابسته به گرادیان فشار است که از تغییرات سرعت، گردابه‌های جریان و اختلاف هد استاتیکی جریان به وجود می‌آید. دبی تبدالی کل جریان هایپرریک بی‌بعدشده در هر سه حالت ریزشی، ایجاد پرش-آب‌شستگی و ایجاد پرش با افزایش عدد رینولدز روند کاهشی داشت. دامنه تغییرات مقدار دبی تبدالی کل (Q_{ex}) با توجه به دبی تست‌شده در آزمایشگاه دارای مقدار $0/43$ لیتر بر ثانیه برای حالت ریزشی تا $2/09$ لیتر بر ثانیه برای حالت ایجاد پرش-آب‌شستگی بود.



شکل ۲۱. تغییرات دبی تبدالی بی‌بعدشده در مقابل عدد رینولدز جریان

مطابق شکل ۲۱ رابطه‌ی توانی دبی تبدالی بی‌بعدشده با عدد رینولدز دارای ضریب همبستگی ۹۴ درصد بوده است. جمالی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی این پارامتر پرداختند. نتیجه پژوهش این محقق نشان‌دهنده این موضوع بود که با افزایش دبی جریان، شاخص بی‌بعد دبی تبدالی بین جریان سطحی و زیرسطحی روند کاهشی را از خود نشان داد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. تراث

- در تمامی حالت‌های مورد آزمایش با افزایش عدد رینولدز جریان، زمان ماندگاری بی‌بعدشده روند کاهشی از خود نشان دادند.
- در حالتی از آزمایش‌ها که جریان به صورت ریزشی شکل گرفته بود، زمان ماند بی‌بعدشده نسبت به دو حالت دیگر بیشتر بود. ضمن اینکه کمترین زمان ماندگاری در همه آزمایش‌ها مربوط به حالت جریان با ایجاد پرش و معادل $2/47$ ثانیه بود.
- با بررسی روند تغییرات زمان ماند نسبت به عدد رینولدز یک رابطه توانی با ضریب همبستگی 84 درصد به دست آمد که از رابطه به دست آمده در این تحقیق می‌توان تخمین مناسبی از زمان ماند ارائه داد.
- با بررسی دبی تبدالی کل بی‌بعدشده (q^*) در سه نوع از حالت‌های مورد آزمایش با افزایش دبی این پارامتر روند کاهشی را از خود نشان داد. ضمن اینکه رابطه توانی به دست آمده این پارامتر نسبت به عدد رینولدز دارای ضریب همبستگی 94 درصد بود.
- با بررسی پارامتر درصد دبی‌های تبدالی مشاهده شد که در تمامی حالت‌ها با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار درصد دبی تبدالی جریان هایپرریک روند کاهشی داشت که رابطه توانی به دست آمده درصد دبی تبدالی در مقابل عدد رینولدز دارای ضریب همبستگی 77 درصد بود.

منابع

- [1]. Brierley, G. J. and Fryirs, K. A. *Geomorphology and River Management*. Malden, Mass. : s.n., 2005, Blackwell Publ., p. 398.
- [2]. Comiti, F., Cadol, D. and Wohl, E. *Flow regimes, bed morphology, and flow resistance in self-formed step-pool channels*. s.l.: Water Resour. Res., 2009, Vols. W04424, doi:10.1029/2008WR007259., p. 45.
- [3]. Hager, W. H. *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Kluwer Acad. Publ. Netherlands. : Dordrecht, 1991.
- [4]. Harbaugh, A. W. *Geological Survey modular ground-water model—The ground-water flow process*. U.S. : s.n., 2005, U.S. Geol. Surv. Tech. Methods, Vols. 6-A16, p. 253. MODFLOW-2005.

- به دست آمده از مدل عددی همخوانی بسیار خوبی دارند. به طوری که در حالتی از آزمایش‌ها که فقط پرش هیدرولیکی شکل گرفته بود هم در بالادست مانع و هم در محدوده بین دیواره عمودی مانع تا زیر محل پرش، نوع حرکت جریان به صورت «جریان پایین دست رو به بالا (DDU)» مشاهده شد و در محدوده پایین دست فلوام یعنی از محل انتهایی پرش تا انتهای فلوام آزمایشگاهی نوع حرکت جریان «جریان بالادست رو به بالا (UDU)» مشاهده شد که این دو نوع حرکت جریان هم در مدل آزمایشگاهی و هم در مدل عددی تطابق بسیار خوبی با هم داشتند.
- در حالت جریان ریزشی در کل طول فلوام تمامی خطوط جریان هم در مدل آزمایشگاهی و هم مدل زیرسطحی به صورت «جریان پایین دست رو به بالا (DDU)» مشاهده شدند که در این حالت از جریان نیز تطابق بسیار خوبی بین دو مدل عددی و آزمایشگاهی مشاهده شد.
- در حالتی از جریان که در آن پرش هیدرولیکی و آبشستگی به صورت هم‌زمان رخ داده بود، در بالادست مانع مسیر حرکت جریان «جریان پایین دست رو به بالا (DDU)» در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی شکل گرفت. در محدوده بین دیواره عمودی مانع تا جایی که بیشترین آبشستگی رسوبات شکل گرفته بود، در مدل آزمایشگاهی جریان بالادست رو به بالا (UDU) مشاهده شد و در مدل عددی جریان پایین دست رو به بالا (DDU) مشاهده شد. این اختلاف جهت به دلیل این بود که مدل میوز در محدوده پای دیواره عمودی که جریان به صورت ریزشی از روی مانع عبور می‌کرد، حفره هوای تشکیل شده در مدل آزمایشگاهی را خوب شبیه‌سازی نمی‌کرد. به همین دلیل، این تفاوت در جهت‌ها در این بازه بین دو مدل مشاهده شد. در حد فاصل محل حداکثر عمق آبشستگی تا انتهای فلوام جریان پایین دست رو به بالا (DDU) در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی مشاهده شد که خطوط هایپرریک تطابق بسیار خوبی با هم داشتند.

- [5]. Knighton, D. *Fluvial Forms & Processes: A New Perspective*. New York : s.n., 1998, Oxford Univ. Press, p. 383.
- [6]. Tonina, D. *Interaction between river morphology and intra-gravel flow paths within the hyporheic zone*. s.l. : Unpublished Ph.D. dissertation, 2005.
- [7]. Tsutsumi, D. and Laronne, J. B. *Gravel-Bed Rivers: Process and Disasters*. [ed.] Jonathan B. Laronne Daizo Tsutsumi. 2017.
- [8]. Kasahara, T. and Hill, A. R. *Hyporheic exchange flows induced by constructed riffles and steps in lowland streams in southern Ontario, Canada*. s.l. : Hydrol. Proc., 2006, pp. 20, 4287–4305.
- [9]. Crispell, J. K. and Endreny, T. A. *Hyporheic exchange flow around constructed in-channel structures and implications for restoration design*. s.l. : Hydrol. Proc., 2009, pp. 23(8), 1158–1168.
- [10]. Harvey, J. W. and Bencala, K. E. *The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments*. 1993, Water Resour. Res., pp. 29(1), 89–98.
- [11]. Lautz, L. K. and Siegel, D. I. *Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D*. s.l. : Adv. Water Resour., 2006, pp. 29, 1618–1633.
- [12]. Packman, A., Salehin, M. and Zaramella, M. *Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows*. s.l. : J. Hydraul. Eng., 2004, pp. 130(7), 647–656.
- [13]. Thibodeaux, L. J. and Boyle, J. D. *Bedform-generated convective transport in bottom sediment*. s.l. : Nature, 1987, pp. 325(22), 341–343.
- [14]. Tonina, D. and Buffington, J. M. *Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and threedimensional modeling*. W01421, , s.l. : Water Resour. Res., 2007, p. 43. doi:10.1029/2005WR004328.
- [15]. Valle, B. L. and Pasternack, G. B. *Submerged and unsubmerged natural hydraulic jumps in a bedrock step-pool mountain channel*. s.l. : Geomorphology, 2006, pp. 82(1–2), 146–159.
- [16]. Wilcox, A. C. and Wohl, E. E. *Field measurements of three-dimensional hydraulics in a step-pool channel*. s.l. : Geomorphology, 2007, pp. 83(3–4), 215–231.
- [17]. Wondzell, S. M. *Effect of morphology and discharge on hyporheic exchange flows in two small streams in the Cascade Mountains of Oregon*. USA : Hydrol. Proc., 2006, pp. 20(2), 267–287.
- [18]. onina, D. and Buffington, J. M. *Hyporheic Exchange in Mountain Rivers I : Mechanics and Environmental Effects*. Ts.l. : Geogr. Compass, 2009, pp. 3, 1–24.
- [19]. Nagaoka, H. and Ohgaki, S. *Mass transfer mechanisms in a porous riverbed*. 1990, Water Res, pp. 24(4), 417–425.
- [20]. O'Connor, B. L. and Harvey, J. W. *Scaling hyporheic exchange and its influence on biogeochemical reactions in aquatic ecosystems*. 2008, Water Resour. Res, Vols. W12423,, p. 44. doi:10.1029/2008WR007160.
- [21]. Kasahara, T. and Wondzell, S. M. *s.l. Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams*. : Water Resour. Res., 2003, pp. 39(1), 1005,. doi:10.1029/2002WR001386.
- [22]. Boulton, A. J.; Findlay, S.; Marmonier, P.; Stanley, E. H.; Valett, H. M.; *The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers*. 1998, Ann. Rev. Ecol. Syst., pp. 29, 59–81.
- [23]. Trauth, N.; Schmidt, C.; Vieweg, M.; Oswald, S. E. *Hydraulic controls of in-stream gravel bar hyporheic exchange and reactions*. 2015, Fleckenstein JHJWRR, Vol. 51(4), pp. 2243-63.
- [24]. Elliott, A. H. and Brooks, N. H. *Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments*. 1997a, Water Resour. Res, pp. 33(1), 137–151. doi:10.1029/96WR02783.
- [25]. Buffington, J. M. and Tonina, D. *Hyporheic Exchange in Mountain Rivers II : Effects of Channel Morphology on Mechanics, Scales, and Rates of Exchange*. s.l. : Geogr. Compass, 2009, pp. 3, 1–25.
- [26]. Chanson, H. *Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena*. s.l. : A survey of experimental results, Eur. J. Mech. B., Fluids, 2009, pp. 28(2), 191–210.
- [27]. Hester, E. T. and Doyle, M. W. *In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange*. 2008, Water Resour. Res, Vols. W03417,, p. 44. doi:10.1029/2006WR005810.
- [28]. Poole, G. C. *Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology*. 2010, J. N. Am. Benthol. Soc, pp. 29(1), 12–25.
- [29]. Comiti, F. and Lenzi, M. A. *Dimensions of standing waves at steps mountain rivers*. s.l. :

- Water Resour. Res., 2006, Vols. W03411, , p. 42. doi:10.1029/2004WR003898.
- [30]. Endreny, T., Lautz, L. and Siegel, D. I. *Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: Flume and hydrodynamic models*. February 12, 2011, Water Resour. Res, Vols. 47, W02517. doi:10.1029/2009WR008631.
- [31]. Jamali, S and Dehghani, A.A. *laboratory study on the action of surface and subsurface water in the middle sedimentary ridge*. 2019, J. Echo Hydrology, Vol. 6(2), pp. 323-339. (In Persian).
- [32]. Lautz, L. K. and Fanelli, R. M. *Seasonal biogeochemical hotspots in the streambed around restoration structures*. s.l.: Biogeochemistry, 2008, pp. 91(5),85– 104.
- [33]. Marzadri A, Tonina D, Bellin A, Vignoli G, Tubino M. *Semianalytical analysis of hyporheic flow induced by alternate bars*.: Water Resour. Res., 2010, Vols. 46, W07531. doi:10.1029/2009WR008285.
- [34]. Movahedi, N; Dehghani, A.A; Trat, N; Meftah Halqi, M. *Laboratory and numerical study of hyperic exchange in the presence of pool and riffle bed form*. 2019, J. Echo Hydrology, Vol. 6(1), pp. 191-204. (In persian).
- [35]. Movahedi, N.; Dehghani, A.A.; Schmidt, C.; Trat, N.; Pasternack, G.B.; Stewardson, M.J.; Meftah Halghi, M. *Hyporheic exchanges due to channel bed and width undulations*. 2021, Water res, Vol. 149(2), p. 103857. doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103857.
- [36]. Kaser, D. H.; Binley, A.; Heathwaite, A. L.; Krause, S. *Spatiotemporal variations of hyporheic flow in a riffle-step-pool sequence*. s.l.: Hydrol. Proc., 2009, pp. 23(15), 2138– 2149.