

## تأثیر شرایط مختلف هیدرولیکی بر جریان هایپرریک در اطراف سازه سرریز گابیونی

مهرداد پورحسین قادی<sup>۱</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۲\*</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۲</sup>

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

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۲۷؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۷/۲۰)

## چکیده

احداث سرریزهای گابیونی در مسیر رودخانه، باعث اختلاف هد هیدرولیکی در بالادست و پایین دست آن‌ها و عبور جریان از بدنه سرریز گابیونی و محیط متخلخل زیرین می‌شود. این اختلاط در منطقه هایپرریک بلافاصله زیر بستر رودخانه، جایی که جانداران و میکروارگانیسم‌هایی که نقش مهمی در اکولوژی رودخانه دارند، اتفاق می‌افتد. در تحقیق حاضر با انجام مطالعات آزمایشگاهی، روی کانال آزمایشگاهی شیب‌پذیر به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر، مصالح به کاررفته در گابیون با سایز ۱۷ میلی‌متر و مصالح بستر با سایز ۶/۸ میلی‌متر تهیه شد. الگوی جریان هایپرریک اطراف سازه سرریز گابیونی با تزریق مواد رنگی بررسی شد. شرایط هیدرولیکی به گونه‌ای تنظیم شد تا سه حالت جریان شامل جریان درون‌گذر (TFGW)، جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی (NFGW) و جریان با پرش هیدرولیکی (PNGW) در پایین دست سرریز گابیونی ایجاد شود. برای بررسی مشخصات منطقه هایپرریک، هد هیدرولیکی اندازه‌گیری شده روی بستر به عنوان مرز درישلت به مدل آب زیرزمینی معرفی شد و مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل با استفاده از مدل شبیه‌سازی زیرسطحی مدل میوس انجام شد. نتایج نشان می‌دهد تطابق مناسبی بین الگوی جریان مشاهداتی و محاسباتی در منطقه هایپرریک وجود دارد. در جریان TFGW و NFGW بیشتر خطوط جریان به صورت جریان پایین دست رو به بالا (DDU) و در حالت جریان PNGW، علاوه بر الگوی جریان پایین دست رو به بالا، خطوط‌های جریان بالادست رو به بالا (UDU) نیز دیده شد. همچنین، با بررسی دبی تبدلی کل ( $Q_{ex}$ )، زمان ماندگاری ( $R_t$ ) و درصد دبی تبدلی ( $Q_p$ ) مشاهده می‌شود که دامنه تغییرات مقدار دبی تبدلی کل ۱/۶۳ تا ۲/۸۰ لیتر بر ثانیه هستند و زمان ماندگاری نیز با کاهش عدد رینولدز روند افزایشی داشته است. در ضمن، در حالت جریان TFGW، NFGW، PNGW به طور متوسط ۵۲، ۴۲ و ۲۶ درصد جریان سطحی در تبادل با ناحیه هایپرریک است. در این تحقیق رابطه‌هایی با دقت مناسب و ضریب همبستگی زیاد ۸۵ درصد برای تخمین زمان ماندگاری و دبی تبدلی نیز ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** منطقه هایپرریک، جریان هایپرریک، سرریز گابیونی، الگوی جریان، زمان ماندگاری.

## مقدمه

سازه‌های گابیونی یکی از سازه‌های پرکاربرد در سرشاخه‌های حوضه رودخانه‌های با شیب تند به عنوان سازه سرریز بستر رودخانه و یا به عنوان بندهای مصنوعی تأخیری است. با رسوب‌گذاری در بالادست این سازه‌ها شیب در بالادست آن‌ها تغییر می‌کند و گرادیان هیدرولیکی در محدوده این سازه‌ها به وجود می‌آید. به نظر می‌رسد این سازه‌ها می‌توانند نقش مهمی در ایجاد جریان‌های هایپرریک ایفا کنند که در این تحقیق به این موضوع پرداخته می‌شود. ناحیه هایپرریک، یک ناحیه اشباع بینابینی زیر بستر رودخانه و جداره‌های آن است که شامل بخشی از جریان رودخانه بوده که به داخل بستر نفوذ کرده است. هنگامی که جریان در مسیر رودخانه حرکت می‌کند، تبدالی بین جریان رودخانه و بستر زیر رودخانه به وجود می‌آید که تبدالات هایپرریک نامیده می‌شود [۱]. تبادل جریان هایپرریک از اختلاط جریان سطحی و جریان زیرسطحی در محیط متخلخلی که زیر و اطراف مجرای گذر آب را احاطه کرده است، ایجاد می‌شود [۱]. در دهه‌های اخیر اهمیت تبدالات جریان هایپرریک در رابطه با تأثیر آن در مباحث ژئومورفولوژی آبرفت‌ها، آب‌های زیرزمینی و زیست‌بوم موجودات آبی در بقا، مدیریت و احیای رودخانه‌ها بسیار پررنگ شده است. تبادل جریان هایپرریک تأثیر چندگانه روی زیست‌بوم رودخانه‌ای دارد. جریان‌های رو به پایین مواد محلول و آب سطحی را به داخل رسوبات بستر می‌برند و باعث اصلاح غلظت مواد محلول در رسوبات می‌شوند، در نتیجه بر اکولوژی جانداران و میکروارگانیسم‌ها که در محیط بستر رودخانه زندگی می‌کنند، تأثیر می‌گذارند. این موجودات نیز به نوبه خود غلظت مواد محلول را تغییر می‌دهند، قسمتی از مواد محلول آورده شده را مصرف می‌کنند و هدررفت بیولوژیکی خود را به ذراتی می‌دهند که دوباره به جریان سطحی برمی‌گردند. جریان رو به پایین حاوی اکسیژن محلول در آب است که محیط هوازی در لایه کم‌عمق منطقه هایپرریک ایجاد می‌کند و جانوران آبی می‌توانند در این محیط تکثیر شوند. با این وجود، مواد آلی برای تجزیه در منطقه هایپرریک، اکسیژن مصرف می‌کنند و باعث ایجاد اختلاف غلظت اکسیژن می‌شوند که بسته به زمان واکنش، غلظت اولیه اکسیژن، سرعت جریان، طول مسیرهای

جریان هایپرریک تغییر می‌کنند. جریان‌های هایپرریک اساساً از تعامل بین جریان رودخانه‌ای و مورفولوژی موضعی بستر رودخانه‌ها مانند تپه‌ها، مانع‌ها، چالاب‌ها [۲] و [۳]. سرریزها [۴] سدهای کوچک [۵] راه ماهی‌ها [۳] ایجاد می‌شوند.

این تبادل جریان تحت تأثیر خصوصیات آبراهه مانند فشار در کف، شکل بستر، ضخامت آبرفت و هدایت هیدرولیکی به طور زمانی و مکانی تغییر می‌کند [۱، ۳، ۶، ۷، ۸ و ۹]. اختلاط هایپرریک به صورت متناوب از جریان‌های رو به پایین<sup>۱</sup> به داخل بستر متخلخل و بازگشت دوباره به جریان سطحی که رو به بالا<sup>۲</sup> است، اتفاق می‌افتد. مقیاس زمانی و مکانی اختلاط هایپرریک به وسعت منطقه هایپرریک بستگی دارد که ممکن است محدود یا محصور در رودخانه‌های کوچک محدود شده به سنگ بستر و یا وسیع و نامحدود در سیلاب دشت‌ها باشد. همچنین، وسعت این مناطق می‌تواند به طور فصلی تغییر کند.

تبادل جریان در ناحیه هایپرریک توسط چندین محرک فیزیکی ناپیوسته می‌تواند تنظیم شود، این محرک‌ها شامل انتشار، انتقال و مومنتوم است [۱۰-۱۲]. تبادل انتقال توسط هد هیدرولیکی  $h_p(m)$  که از هد ارتفاع  $z(m)$  هد فشاری  $h_p = \frac{P}{\rho g}$  و هد سرعت  $\frac{u^2}{2g}$  تشکیل شده است، به وجود می‌آید.

$$h = z + h_p + C \frac{u^2}{2g} \quad (1)$$

که  $h_p$  هد فشار (m)،  $g$  شتاب گرانشی  $u$ ، (m<sup>2</sup>/s) سرعت متوسط (m/s) و  $C$  ضریب ثابت است.

به طور کلی، هر سازه‌ای در آبراهه که بتواند باعث تغییر یکی از مؤلفه‌های قیدشده در رابطه ۱ در طول مشخصی از آبراهه شود، می‌تواند تبدالات هایپرریک را تحت تأثیر خود قرار دهد [۱۳]. سازه‌های گابیونی یکی از سازه‌های پرکاربرد در سرشاخه‌های حوضه آبریز و در رودخانه‌های با شیب تند به عنوان سازه تثبیت بستر رودخانه و یا به عنوان بندهای مصنوعی تأخیری احداث می‌شوند. با رسوب‌گذاری در بالادست این سازه‌ها شیب در بالادست آن‌ها تغییر می‌کند و گرادیان هیدرولیکی در

است، پس تحقیقات انجام شده در خصوص مورفولوژی سکو- چالاب<sup>۱</sup> که گرادیان مشابهی ایجاد می کند نیز ارائه شده است. در شکل ۱ نمایی از این سازه ها در رودخانه نشان داده شده است.

محدوده این سازه ها به وجود می آید. این سازه ها می توانند نقش مهمی در ایجاد جریان های هایپرریک ایفا کنند که در این تحقیق به این موضوع پرداخته می شود. با توجه به اینکه عملکرد این سازه ها مانند ایجاد موانعی در رودخانه



شکل ۱. نمایی از کاربرد سرریز گابیونی و بندهای مصنوعی تأخیری در رودخانه ها

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 [۱۴]. مروان حسن (۲۰۱۴) در تحقیقی که بر مبنای تبادل آب سطحی و زیرسطحی در یک جریان شیب دار زیر با یک مورفولوژی سکو- چالاب استوار بود، تبادلات هایپرریک را مورد بررسی قرار دادند. آن ها از هر دو حالت آزمایشگاهی و مدل سازی عددی برای بررسی تأثیر شیب کانال و هدایت هیدرولیکی رسوب در تبادل هایپرریک استفاده کردند. نتایج نشان داد عمیق ترین جریان هایپرریک در شیب های تندتر و در دبی های متوسط اتفاق می افتد. این آزمایش ها و شبیه سازی های عددی تأکید بر اهمیت توپوگرافی، نفوذپذیری رسوب و عناصر زبری در طول سطح کانال، موقعیت و مقدار شار از جریان رو به پایین و تبادل هایپرریک است [۱۵].

ترات و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی عددی تبادلات هایپرریک در حضور خیزاب- گوداب تحت شرایط مختلف آب زیرزمینی محصور پرداختند. مدل سازی جریان سطحی با

تا کنون بیشتر تحقیقاتی که در خصوص مدل سازی عددی جریان هایپرریک انجام شده، 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 دریشلت 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 بر 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 در سال ۲۰۱۳ تأثیر خیزاب- چالاب بر میزان تبادلات هایپرریک و عمق نفوذ آن به داخل بستر شنی در حضور فرم بستر خیزاب- چالاب را با شبیه سازی همزمان محیط سطحی و زیرسطحی بررسی کردند. آن ها با استفاده از تزریق سدیم کلرید به داخل جریان، دبی عمودی هایپرریک و با تزریق

پرداختند. آن‌ها در این تحقیق با بررسی مشخصات ناحیه‌های پیریک مشخص کردند که با افزایش عدد رینولدز، تبدلات هاپریک افزایش یافته و زمان ماندگاری کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد نمودارهای زمان ماند از توزیع مقادیر حدی تبعیت می‌کنند و به طور متوسط ۲۰ درصد جریان سطحی در تبادل با جریان زیرسطحی بود [۱۸].

مقاله حاضر نتیجه کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری در خصوص جریان هاپریک اطراف سازه‌های گابیونی است که کاربرد بسیار گسترده‌ای در سرشاخه‌های رودخانه‌ها به عنوان سازه‌های تثبیت‌کننده بستر رودخانه دارد. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در خصوص موانع در رودخانه‌ها مربوط به موانع صلب بوده است و تحقیق حاضر به الگوی جریان هاپریک اطراف سازه‌های گابیونی می‌پردازد که به نوعی سازه غیرصلب محسوب می‌شوند و آب هم از بدنه و هم از روی سرریز عبور می‌کند و اکولوژی جانداران و میکروارگانیسم‌ها در بستر رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مرور منابع موجود روی جریان‌های هاپریک در حالت وجود پرش هیدرولیکی در حضور موانع نشان می‌دهد مطالعات کمی در این زمینه انجام شده است، اگرچه در این مطالعات از سرریزهای گابیونی به‌ندرت استفاده شده است. همچنین، با توجه به ماهیت پیچیده جریان در محیط متخلخل و مشکل بودن داده‌برداری در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی باید از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی شرایط مختلفی که از نظر زمان و اجرا چه در طبیعت و چه در آزمایشگاه هزینه‌بر است، استفاده شود. استفاده از نتایج این تحقیق می‌تواند در کنار نقش تثبیت بستر این سازه‌ها، اثر این سازه‌ها بر اندرکنش آب سطحی و زیرسطحی و الگوی جریان هاپریک را نیز مورد مطالعه قرار داد. نتایج این تحقیق می‌تواند در پروژه‌های ساماندهی و اصلاح رودخانه‌ها مانند سازه‌های سرریز بستر رودخانه در سرشاخه‌ها و بندهای تأخیری، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان توان خودپالایی یک رودخانه را در جذب و کاهش آلاینده‌ها با توجه به زمان ماندگاری آن در داخل بستر تعیین کرد. استفاده‌کنندگان از تحقیق حاضر، شرکت‌های آب منطقه‌ای، سازمان محیط زیست و سازمان آب و فاضلاب هستند.

استفاده از بسته نرم‌افزاری OpenFOAM و با فرض بستر نفوذناپذیر صورت گرفت و فشارهای به‌دست‌آمده از این مدل به عنوان شرط مرزی ورودی برای مدل‌سازی قسمت متخلخل با استفاده از مدل زیرزمینی MIN3P به کار رفت [۱۶].

این‌درونی و همکاران جریان هاپریک در پرش‌های هیدرولیکی ناشی از موانع رودخانه‌ای را به صورت آزمایشگاهی در کانال و نیز با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند. کانال آزمایشگاهی ایشان دارای شیب بستر ۱ درصد و عرض کانال ۷/۵ سانتی‌متر بوده است. در تحقیق ایشان، موانعی صلب با ارتفاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متر روی بستری با قطر ذراتی برابر ۱۰ میلی‌متر قرار گرفته بود. دو روش مختلف برای کارگذاری موانع بررسی شد. به گونه‌ای که در یکی از آن‌ها موانع تا کف کانال ادامه می‌یافت و باعث جلوگیری عبور جریان از زیر موانع می‌شد و در دیگری موانع تا کف کانال آزمایشگاهی به گونه‌ای نصب می‌شد که جریان هم از رو و هم زیر موانع برقرار شود. نتایج این تحقیق نشان داد وجود پرش هیدرولیکی باعث تغییر مسیرهای جریان در زیر بستر رودخانه می‌شود، به گونه‌ای که حرکت جریان رو به پایین در مکان‌های مستغرق درون چالاب‌ها و حرکت رو به بالای جریان به سمت بالادست در پای موانع و زیر پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد [۱۳].

این‌درونی و همکاران همچنین جریان هاپریک در پرش‌های هیدرولیکی ناشی از موانع رودخانه‌ای را با شبیه‌سازی عددی توسط مدل‌های هیدرواستاتیکی نیز مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق کفایت و حساسیت پیش‌بینی مدل هیدرواستاتیک آب زیرزمینی (MODFLOW) در شبیه‌سازی جریان هاپریک در یک رودخانه پلکانی با استفاده از یک پرش هیدرولیکی بررسی شد. در این تحقیق مدل هیدرواستاتیک به طور دقیق جریان رو به پایین به سمت بالادست را در ناحیه موج و پرش هیدرولیکی پیش‌بینی کرد، اما نتوانست جریان رو به پایین در ناحیه چالاب را که به وسیله فشارهای محرک هدایت می‌شود را پیش‌بینی کند. همچنین، نتایج نشان داد چگونه مدل هیدرودینامیکی قادر به نشان دادن مسیرهای جابه‌جایی هاپریک زیر یک مانع با شبیه‌سازی فشارهای دینامیک و استاتیک است [۱۷].

موحدی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی تبدلات هاپریک در حضور بستر خیزاب و چالاب

کانال استفاده شده است. در جهت جریان نیز طول سازه ۰/۱۵ متر بود. یکی از فرضیات تحقیق در این بخش قرار دادن سازه سرریز گابیونی روی سنگ بستر است. به همین دلیل، سازه سرریز گابیونی تا کف کانال آورد شده است. ذرات داخل گابیون از قلوه سنگ‌هایی با حداقل ابعاد ۱/۵ برابر چشمه‌های توری برای لایه‌های حفاظتی و توری سنگی‌های بیرونی استفاده شد [۱۹].

اندازه سنگدانه ( $d_{50}$ ) استفاده شده در این سازه سرریز گابیونی ۱۷ میلی‌متر که ۲/۵ برابر ذرات رسوب داخل کانال است. برای رسوبات کف نیز از ذراتی با قطر متوسط ( $d_{50}$ )، ۶/۸ میلی‌متر استفاده شده است، به طوری که رسوبات در قبل از سازه سرریز گابیونی به ارتفاع ۰/۳ متر و بعد از آن به ارتفاع ۰/۱۶ متر قرار گرفت. نمایی از رسوبات مصالح بستر و مصالح به‌کاررفته در سرریز گابیونی در شکل ۳ و نمایی از رسوبات و منحنی دانه‌بندی آنها در شکل ۴ نشان داده شده است.

مطالعاتی که در آینده می‌توان برای بهبود این تحقیق انجام شود عبارت‌اند از:

- ۱- استفاده از سازه‌های سرریز پلکانی به صورت گابیونی
- ۲- استفاده از تخلخل‌های مختلف در سرریز گابیونی و اثر آن روی جریان هایپرریک
- ۳- بررسی ارتفاع‌های مختلف در سرریز گابیونی و اثر آن در جریان هایپرریک

## مواد و روش‌ها

### کانال آزمایشگاهی

کانال آزمایشگاهی با توجه به مشخصات آمیزش به صورت شیب‌پذیر به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر ساخته شد. در جدول ۱ مشخصات کانال آزمایشگاهی و در شکل ۲ نمایی از کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است.

### سازه سرریز گابیونی و رسوبات کف

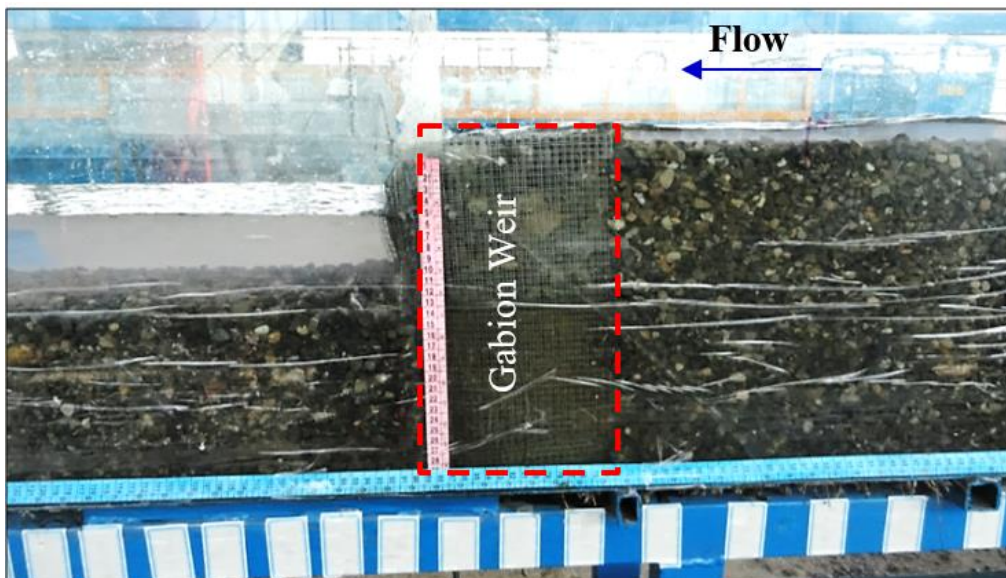
برای سرریز گابیونی از توری گالوانیزه با قطر چشمه به اندازه ۵ میلی‌متر به ارتفاع ۰/۳ متر و در تمامی عرض



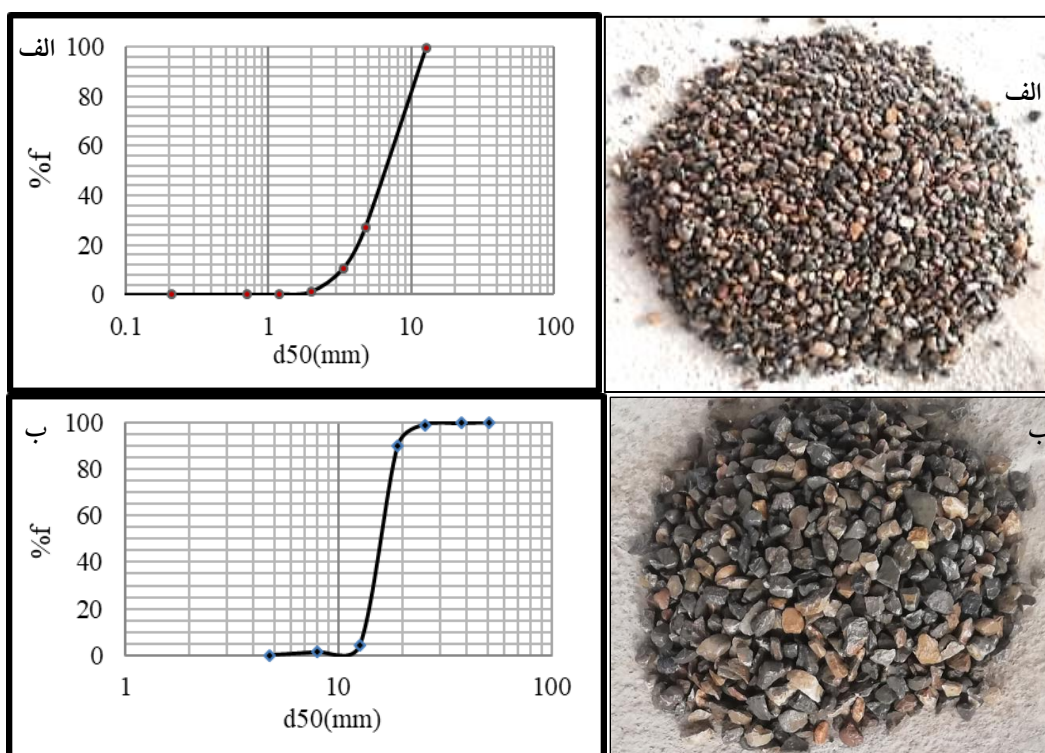
شکل ۲. نمایی از کانال آزمایشگاهی

جدول ۱. مشخصات کانال آزمایشگاهی

نوع کانال	جنس کانال	شیب	طول کانال (متر)	عرض کانال (متر)	ارتفاع کانال (متر)
مسطحی	کف فلزی با دیواره سکوریت	۱%	۵	۰/۳	۰/۵



شکل ۳. نمایی از ذرات رسوب در بالادست و پایین دست سازه سرریز گابیونی



شکل ۴. نمایی از ذرات رسوب و منحنی دانه بندی استفاده شده در تحقیق الف: مصالح بستر ب: مصالح به کاررفته در گابیون

آزادی ایجاد نشود. سپس طبق رابطه ۲، هدایت هیدرولیکی محاسبه شد [۲۰].

$$K = \frac{Q}{A \times Sf} \quad (2)$$

که در آن ها  $Q$  دبی جریان در محیط متخلخل بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $A$  سطح مقطع رسوبات اشباع بر حسب

تعیین هدایت هیدرولیکی و تخلخل ذرات

هدایت هیدرولیکی ( $K$ ) و تخلخل ( $\phi$ ) ذرات کف کانال طبق روش هایی که در ادامه توضیح داده می شود، اندازه گیری شد. به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی رسوبات، پس از صاف کردن بستر رسوبی، جریان به داخل کانال برقرار می شود، به طوری که هیچ گونه جریان با سطح

در آزمایشگاه جریان طوری کنترل می‌شد که به دلیل وجود جریان با پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه آب‌شستگی در قسمت پایین‌دست سازه سرریز گابیونی روی محیط رسوبات کف کانال اتفاق نیفتد. بنابراین، در بیشتر حالت‌های پرش هیدرولیکی به صورت سطحی اتفاق افتاده بود. در شکل ۵ نمایی از سه حالت جریان به صورت مفهومی نمایش داده شده است.

**مدل شبیه‌سازی جریان زیرسطحی (MODEL MUSE)**  
 برای مدل‌سازی جریان هایپرریک، مدل‌های آب زیرزمینی به کار برده می‌شود که در تحقیق حاضر از بسته نرم‌افزاری مدل میوس (Model Muse) استفاده شده است.

Model Muse یک رابط کاربر گرافیکی (GUI<sup>۵</sup>) است که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) تحت دو برنامه MODFLOW و MODPATH ایجاد شده است. مدل یادشده قادر است براساس معادله داری و روش حل عددی تفاضلات محدود در یک حجم کنترل، مقادیر فشار دامنۀ مطالعاتی را برای فضای سه‌بعدی حل کند. این نرم‌افزار به همراه ماژول MODPATH بسته نرم‌افزاری خوبی برای مطالعات جریان هایپرریک است. با استفاده از ماژول MODPATH به راحتی می‌توان ردیابی ذرات را در دامنۀ مطالعاتی بررسی کرد و از خروجی مناسب آن برای تحلیل نتایج بهره برد. در این مدل داده‌های مکانی مستقل از شبکه و داده‌های زمانی مستقل از دوره تنش است.

Model Muse دارای ابزاری برای تولید و ویرایش شبکه مدل است. همچنین، دارای انواع روش‌های تعاملی و توابع جغرافیایی است که می‌تواند برای کمک به تعریف متغیر مکانی مدل استفاده شود، همچنین می‌تواند برای اجرای MODFLOW و MODPATH استفاده شود و می‌تواند نتایج مدل MODFLOW را نمایش دهد.

MODFLOW یک مدل سه‌بعدی آب‌های زیرزمینی است که شبیه‌سازی جریان ثابت و ناپایدار در یک جریان آشفته درون لایۀ آبخوان را به صورت محدود، محصورنشده و یا ترکیبی از محدود و آزاد انجام می‌دهد.

متر مربع و  $\delta$  شیب خط انرژی است. تخلخل رسوبات نیز تابع شکل و شیوۀ قرارگیری ذرات است که برای رسوبات شنی بین ۰/۳ تا ۰/۳۴ است [۲۰].

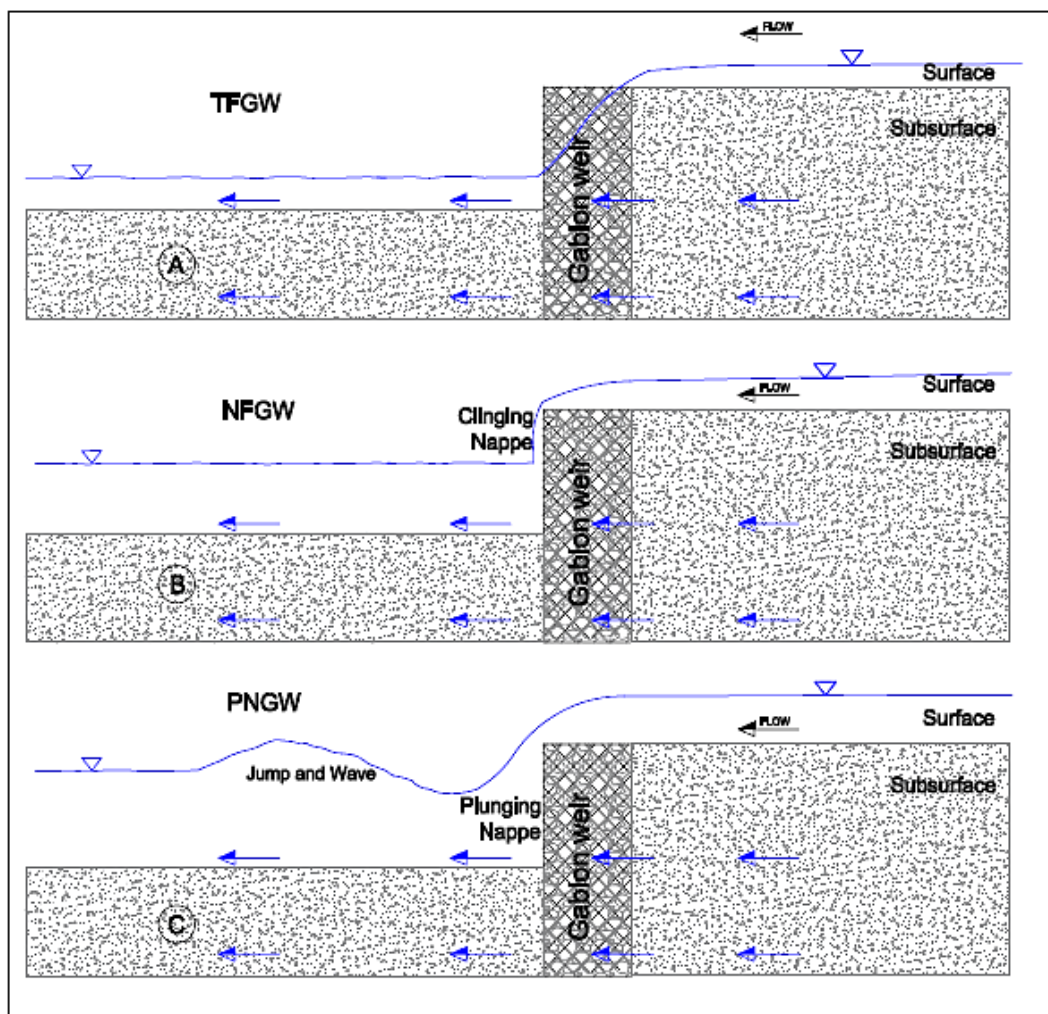
#### شیوۀ انجام آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا کانال آزمایشگاهی به آرامی از آب پر شد، سپس پمپ آزمایشگاهی روشن شده و پس از رسیدن دبی به دبی‌های مورد نظر، تراز سطح آب در پایین‌دست سازه توسط دو دریچه کشویی و شیر کشویی در کف کانال در انتها تنظیم می‌شد تا هیچ نوع آب‌شستگی در پایین‌دست سازه ایجاد نشود. مطالعه جریان‌های هایپرریک در فضای عددی بسیار کاربردی و آسان‌تر خواهد بود. بنابراین، در این تحقیق در نظر است پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و بررسی انواع جریان‌های مختلف شامل جریان درون‌گذر (TFGW)<sup>۱</sup>، جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی (NFGW)<sup>۲</sup> و جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی (PNGW)<sup>۳</sup> شبیه‌سازی جریان‌های هایپرریک با وجود سرریز گابیونی با استفاده از بسته نرم‌افزاری مدل میوس<sup>۴</sup> انجام شود. در هر آزمایش از سه نوع دبی مختلف استفاده شده است.

در این تحقیق با توجه به فرضیات لحاظ‌شده که عبارت‌اند از:

- الف) سازه سرریز گابیونی تا سنگ بستر نفوذ کرده است.
- ب) پایین‌دست سازه سرریز گابیونی نباید هیچ‌گونه آب‌شستگی اتفاق بیفتد.
- پ) جریان به صورت غیر یکنواخت و ماندگار است.
- ت) شیب کانال ثابت فرض شده است.
- ث) دبی جریان طی هر آزمایش بدون تغییر باقی می‌ماند.
- ج) اختلاف ارتفاع رسوبات در بالادست و پایین‌دست سازه گابیونی ثابت در نظر گرفته شده است.

۱. جریانی که از داخل سرریز گابیونی حرکت می‌کند و هیچ جریانی از روی سرریز گابیونی عبور نمی‌کند (Tourg Flow Gabion Weir)  
 ۲. جریانی که علاوه بر عبور آن از داخل سرریز گابیونی، از روی سرریز گابیونی عبور کرده بدون اینکه هیچ پرش هیدرولیکی رخ دهد (Nappe Flow Gabion Weir)  
 ۳. جریانی که از داخل و روی سرریز گابیونی عبور می‌کند و بعد از سرریز گابیونی پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد (Plunging Nappe Flow Gabion Weir)



شکل ۵. نمایی از سه حالت جریان تحت آزمایش به صورت مفهومی A:TFGW, B:NFGW, C:PNGW

وارد شده به محیط متخلخل است. همچنین، به کمک مدل و با استفاده از اطلاعات مربوط به نقاط شاهد، می‌توان مشخصات هیدرودینامیکی و فیزیکی محیط متخلخل را محاسبه یا تصحیح کرد. شبیه‌سازی محیط‌های متخلخل شامل استفاده از روابط و پارامترهای فیزیکی آن است، به طوری که به ازای مقادیر مختلف ورودی و خروجی سیستم، میزان ذخیره و سطح آب در نقاط و بازه‌های زمانی مختلف مشخص شود. معادله جریان آب زیرسطحی در فضای سه‌بعدی که از ترکیب معادله داری و پیوستگی حاصل می‌شود، در دستگاه مختصات کارتزین و در محیط اشباع از رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

MODPATH نیز شبیه‌سازی چندجزئی در انتقال محلول واکنش‌پذیر در سیستم جریان آب‌های زیرزمینی اشباع‌شده سه‌بعدی را تحلیل می‌کند.

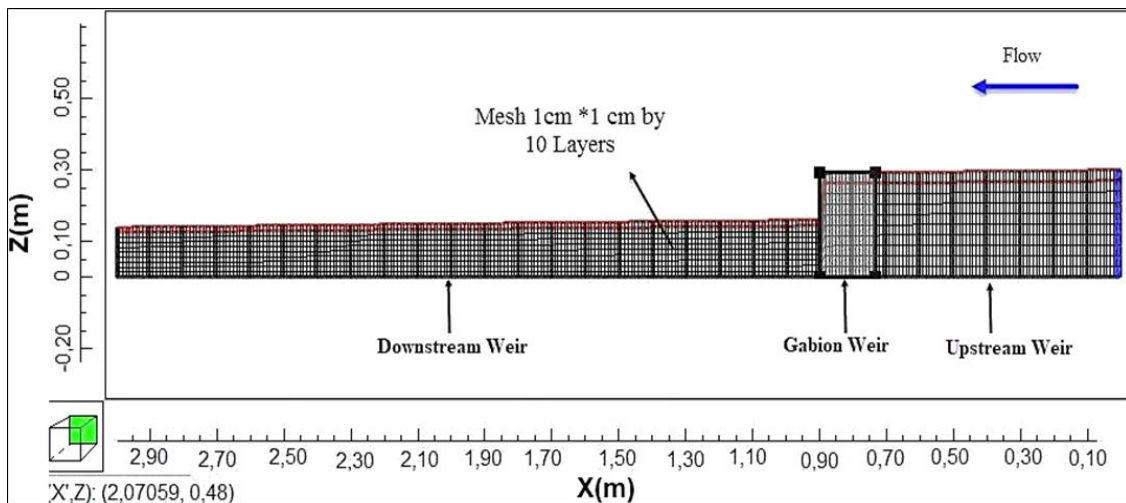
با Model Muse می‌توان داده‌های ورودی برای مدل‌ها را با ترسیم نقاط، خطوط یا چندضلعی در نمای بالا، جلو و نمای جانبی دامنه مدل، تعریف کرد. Model Muse داده‌های ورودی را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد، که در این صورت باعث می‌شود کاربر برای جلوگیری و تشخیص اشتباهات در ورودی داده‌ها راحت‌تر شود، بنابراین فرایند مدل‌سازی بهتر و دقیق‌تر می‌شود. این مدل همخوانی خوبی با فایل‌های DXF و Shape files دارد و همچنین، دارای چندین روش درون‌یابی است [۲۱].

هدف از شبیه‌سازی جریان، پیش‌بینی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب بر اثر تنش‌های مختلف



در این معادله  $K_x, K_y, K_z$  هدایت هیدرولیکی در سه جهت  $x, y, z, S_s$  ضریب ذخیره بر حسب درصد  $t$  زمان،  $w$  میزان تخلیه و یا تغذیه بر حسب حجم است [۱۸]. به طور کلی، حل معادلات یادشده، اساس شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است و در این تحقیق مدل Model Muse به عنوان پرکاربردترین مدل در شبیه‌سازی جریان که از چندین زیربرنامه به عنوان بسته نرم‌افزاری برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده می‌کند، برای شبیه‌سازی جریان آب زیرسطحی به کار گرفته شده است.

در خصوص اندازه‌ها در این تحقیق مش‌های مختلفی تست شدند، ولی چون معادله مورد نظر خطی است نتایج نشان داد بهترین مش  $1 \times 1$  سانتی‌متر است. تست استقلال شبکه نیز انجام شد که نتایج مؤید این بود که مش مورد نظر دقت خوبی دارد. بنابراین، برای شبیه‌سازی جریان در ناحیه هایپرریک در مدل زیرسطحی مدل میوس از اندازه مش  $1 \times 1$  سانتی‌متر و تخلخل ذرات کف و ذرات سازه گابیونی که در جدول ۲ آمده است، استفاده شد (شکل ۶).



شکل ۶. نمایی از هندسه و مش‌بندی در نرم‌افزار مدل میوس

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی و هندسی جریان

ردیف	نوع جریان	دبی عبوری (لیتر بر ثانیه)	ارتفاع سرریز گابیونی (متر)	ارتفاع رسوبات پایین‌دست سرریز گابیونی (متر)	تخلخل ذرات محیط رسوبی	تخلخل ذرات سرریز گابیونی	عمق آب متوسط قبل سرریز گابیونی (mm)	عمق آب متوسط بعد سرریز گابیونی (mm)
۱		۲/۷۷					۰/۱۲۶	۰/۰۵۷۳
۲	TFGW	۲/۴۶					۰/۰۱۹	۰/۰۷۰
۳		۴					۰/۰۲۲۶	۰/۰۸۶۴
۴		۴/۶					۰/۰۲۴۲	۰/۰۸۷۳
۵	NFGW	۵/۱	۰/۳۰	۰/۱۶	۰/۴۲۹	۰/۳۵۷	۰/۰۳۰۶	۰/۱۰۰
۶		۶					۰/۰۳۴۸	۰/۱۳۳
۷		۸/۳					۰/۰۳۸	۰/۱۴
۸	PNGW	۹/۵۸					۰/۰۴۵	۰/۱۴۹
۹		۱۱/۲۴					۰/۰۵۹	۰/۱۶۸

مسیر خطوط جریان و زمان آنها، تخلخل محیط متخلخل را در نظر می‌گیرد، بنابراین سرعت نفوذ محاسبه شده سرعت جریان در منافذ خالی هر سلول است. بر این اساس، برای محاسبه دبی هر سلول، سطح هر سلول باید در تخلخل و سرعت نفوذ ضرب شود. در نهایت، از مجموع دبی همه سلول‌ها مقدار دبی تبدلی کل به دست خواهد آمد. برای اینکه بتوان دبی تبدلی آزمایش‌های مختلف را با هم مقایسه کرد، شاخص‌های جریان سطحی و زیرسطحی به صورت بی‌بعد تعریف می‌شوند. دبی تبدلی بی‌بعد شده ( $q^*$ )، زمان ماندگاری بی‌بعد شده ( $t^*$ )، درصد دبی تبدلی ( $Q_p$ )، چگونگی محاسبه آن‌ها در روابط ۴ تا ۶ ارائه شده است.

$$q^* = \frac{Q_{ex}}{K \times A_s} \quad (4)$$

$$t^* = \frac{Rt \times K}{Lm} \quad (5)$$

$$Q_p = \frac{Q_{ex}}{Q} \times 100 \quad (6)$$

که در این روابط  $K$  هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل بر حسب متر بر ثانیه،  $A_s$  مساحت سطح تماس جریان سطحی و محیط متخلخل در محدوده سرریز گابیونی بر حسب متر مربع،  $Rt$  زمان ماندگاری بر حسب ثانیه،  $Q_{ex}$  دبی تبدلی کل بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $L_m$  طول مؤثر جریان هایپریک در محدوده سرریز گابیونی بر حسب متر و  $Q$  دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه است. دبی تبدلی و زمان ماندگاری بی‌بعد شده در مطالعات زیادی به عنوان شاخص‌های مناسب ارائه شده است [۲۵].

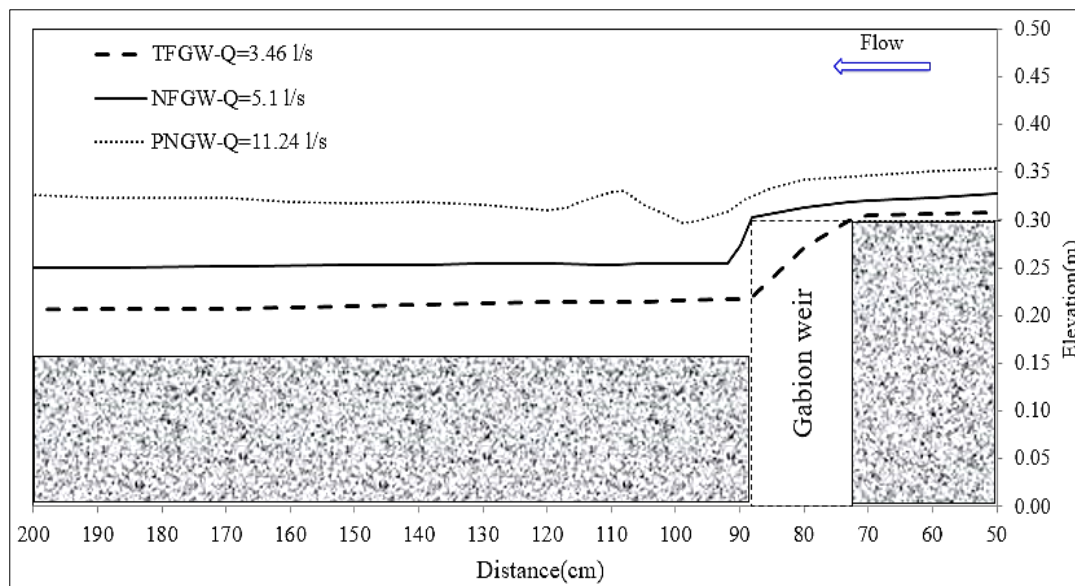
## نتایج و بحث

### پروفیل سطح آب

مشخصات پروفیل سطح آب در آزمایش‌های انجام شده در سه حالت مختلف هیدرولیکی با دبی ۳/۴۶ لیتر بر ثانیه جریان TFGW، دبی ۵/۱ لیتر بر ثانیه جریان NFGW و دبی ۱۱/۲۴ لیتر بر ثانیه به عنوان جریان PNGW در شکل ۷ ارائه شده است. پروفیل سطح آب و سطح رسوب در طولی به اندازه ۳ متر اندازه‌گیری شده است، به طوری که سرریز گابیونی در فاصله ۷۳ تا ۸۸ سانتی‌متری، قرار گرفته است.

### محاسبه دبی تبدلی ( $Q_{ex}$ ) و شاخص‌های آن

به طور کلی، جریان‌های زیر سطحی درون محیط متخلخل به چهار دسته تقسیم می‌شوند: الف) جریان‌هایی که به دلیل تغییرات فرم بستر از جریان سطحی وارد محیط متخلخل شده و دوباره از آن خارج می‌شوند و به جریان سطحی برمی‌گردند که به آن‌ها جریان‌های هایپریک گفته می‌شود. ب) 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. ج) جریان‌هایی که به عکس حالت دوم هستند و در واقع، از منبع آب زیرزمینی وارد جریان سطحی می‌شوند که جریان دریافتی نامیده می‌شوند. د) 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 [۲۲]. در ساختارهای طبیعی بسته به موقعیت مکانی ممکن است همه این جریان‌ها و یا بخشی از آن‌ها وجود داشته باشد. در این تحقیق آن دسته از خطوط جریان که ابتدا از جریان آب سطحی وارد محیط متخلخل شده و پس از طی مسافتی در محیط متخلخل دوباره به جریان آب سطحی برمی‌گردند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای این کار با تزریق رنگ در نواحی مختلف محیط رسوب در قبل و بعد از سرریز گابیونی و ردیابی خطوط جریان مورد شناسایی قرار گرفت. زمان تبادل جریان هایپریک یا زمان ماندگاری ( $Rt$ ) مدت زمانی است که طول می‌کشد تا بخشی از جریان سطحی که به دلیل گرادیان فشار به داخل بستر رسوبی وارد شده است دوباره به جریان سطحی برگردد. تحولات بیوشیمیایی و اکولوژیکی در منطقه هایپریک به زمان تبادل جریان هایپریک بستگی دارد [۲۳]. عمق جریان هایپریک، ارتفاع نفوذ آب سطحی به داخل بستر را نشان می‌دهد. این عمق از نظر عمق زیست‌بوم رودخانه حائز اهمیت است. در مورفولوژی‌های طبیعی که بیشتر سه‌بعدی هستند، گسترش جانبی منطقه هایپریک هم می‌تواند مورد توجه باشد [۲۴]. با استفاده از بسته ردیابی ذرات در مدل زیرسطحی، روی سطح مشخصی از قبل سرریز گابیونی و بعد از آن با تعداد یک ذره در هر سلول روی لایه اول، یک ذره رها شد. پس از اتمام شبیه‌سازی، سرعت ورودی هر ذره به محیط متخلخل محاسبه شد. بسته نرم‌افزاری MODPATH در محاسبه



شکل ۷. پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده در محدوده سرریز گابیونی در سه حالت جریان TFGW، NFGW، PNGW

زیرسطحی با مدل آزمایشگاهی چندین تزریق رنگ در نواحی مختلف در مدل آزمایشگاهی انجام شد. پروفیل سطح رسوب و پروفیل سطح آب در حالت آزمایشگاهی و نواحی که تزریق آزمایشگاهی انجام شد به مدل زیرسطحی معرفی شد. سپس، با آنالیز این دو مدل در شکل‌های ۸-۱۰ نتایج حاصل از تزریق رنگ در سه حالت مختلف جریان در آزمایشگاه و خروجی حاصل از مدل زیرسطحی ارائه شده است.

برای کالیبراسیون مدل زیرسطحی و مدل آزمایشگاهی از روش ردیابی خطوط جریان با تزریق رنگ در نواحی مختلف در محیط رسوب استفاده شده است. طول خط جریان و زمان ماند در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در سه حالت جریان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین، پارامترهای آماری RMSE، MAE،  $R^2$  نیز در جدول ۳ ارائه شده است. در روابط ۷ و ۸ این پارامترهای آماری ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - S_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{n} \quad (8)$$

در این روابط  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌ها است.

مطابق شکل ۷ و جدول ۲ محدوده دبی ۲/۷۷ تا ۴ لیتر بر ثانیه تحت عنوان جریان درون گذر (TFGW) معرفی شده است که تنها جریان از درون سرریز گابیونی حرکت کرده و هیچ جریانی از بالای سرریز عبور نکرده است. محدوده دبی ۴/۶ تا ۶ لیتر بر ثانیه تحت عنوان جریان ریزشی بدون پرش هیدرولیکی (NFGW) است که جریان از روی سرریز گابیونی عبور کرده، ولی در پایین دست سرریز هیچ آشفتگی یا پرشی وجود ندارد. در حالت سوم محدوده دبی بین ۸/۳۰ تا ۱۱/۲۴ لیتر بر ثانیه بوده که در این حالت جریان علاوه بر اینکه از روی سرریز عبور می‌کند، پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز (PNGW) رخ داد. در همه حالت‌ها همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی جریان، عمق آب نیز در قبل و بعد از سرریز گابیونی حالت افزایشی دارند.

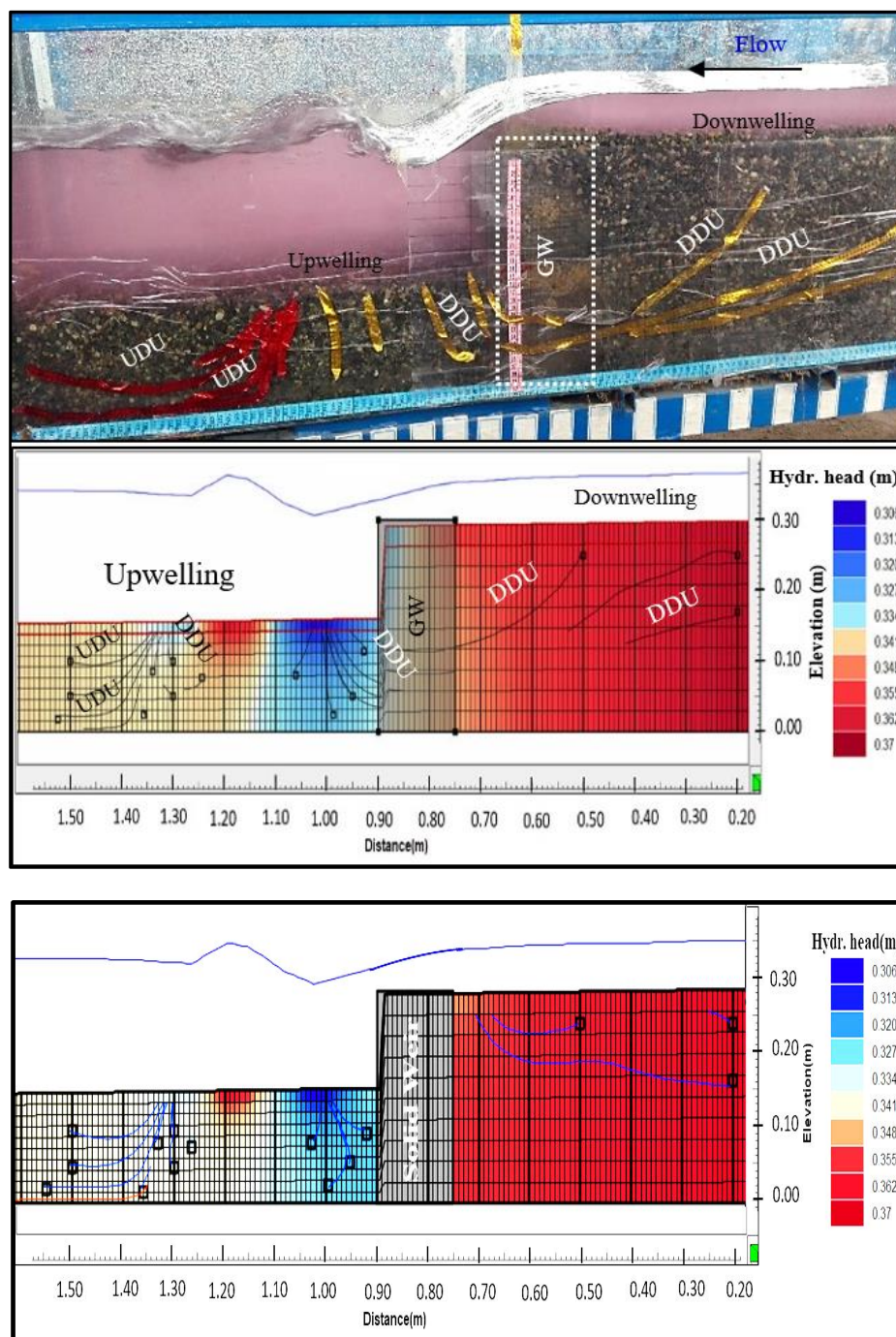
#### مقایسه جریان هایپریک در مدل زیرسطحی و آزمایشگاهی

در مدل آزمایشگاهی مسیرهای جریان برگشتی (یعنی خلاف جهت جریان اصلی)  $(UDU^1)$  با نوار رنگ قرمز و مسیرهای جریان غیربرگشتی (یعنی در جهت جریان اصلی)  $(DDU^2)$  با نوارهای رنگ زرد و آبی در سه حالت مختلف جریان مشخص شد. برای کالیبره کردن مدل

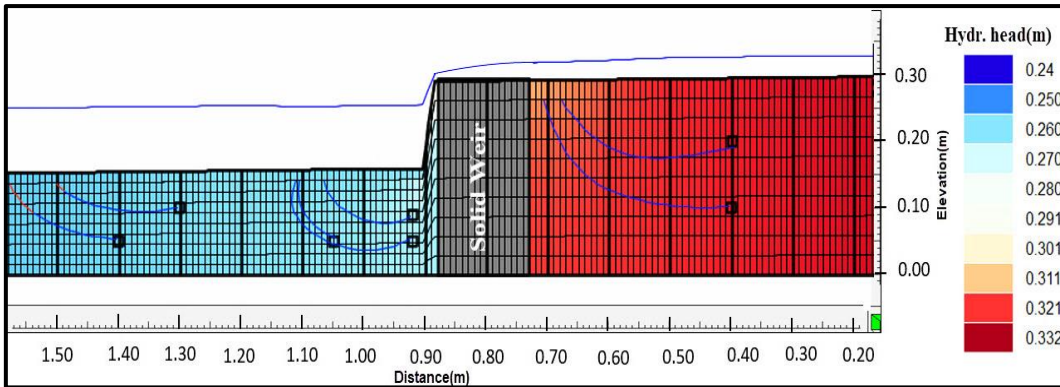
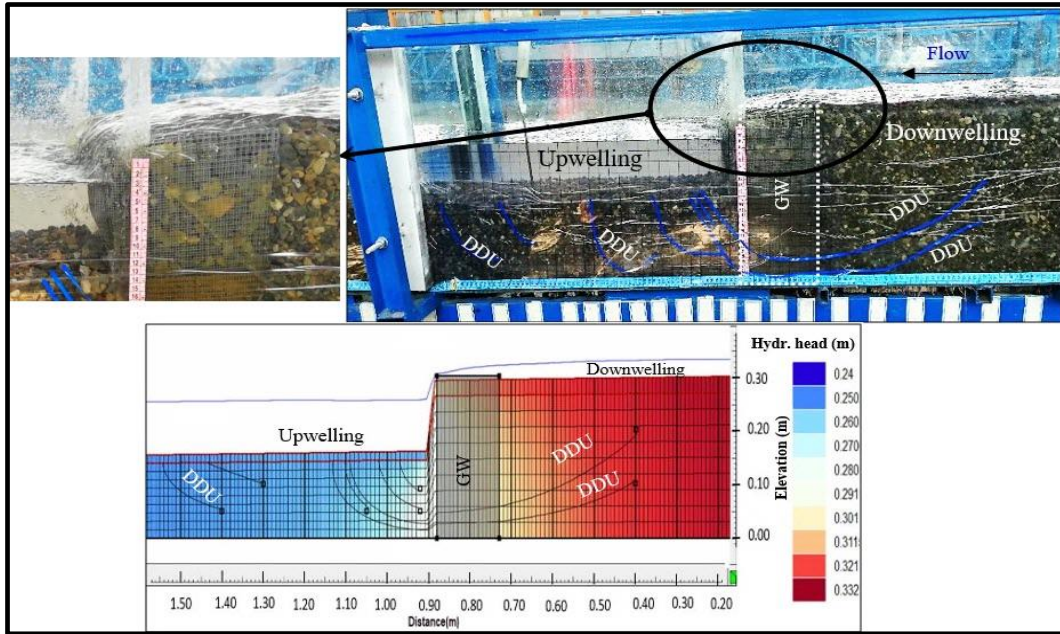
1. Upstream Directed Upwelling
2. Downstream Directed Upwelling

در سرریز گابیونی بلافاصله بعد از آن از محیط متخلخل خروج پیدا می‌کند. اما در پایین‌دست سرریز گابیونی و صلب نیز کمی تفاوت در خطوط جریان وجود دارد که این تغییرات تحت تأثیر همان محیط متخلخل سرریز گابیونی است، به طوری که عبور جریان از داخل سرریز گابیونی باعث حرکت خطوط جریان به سمت پایین‌دست می‌شوند.

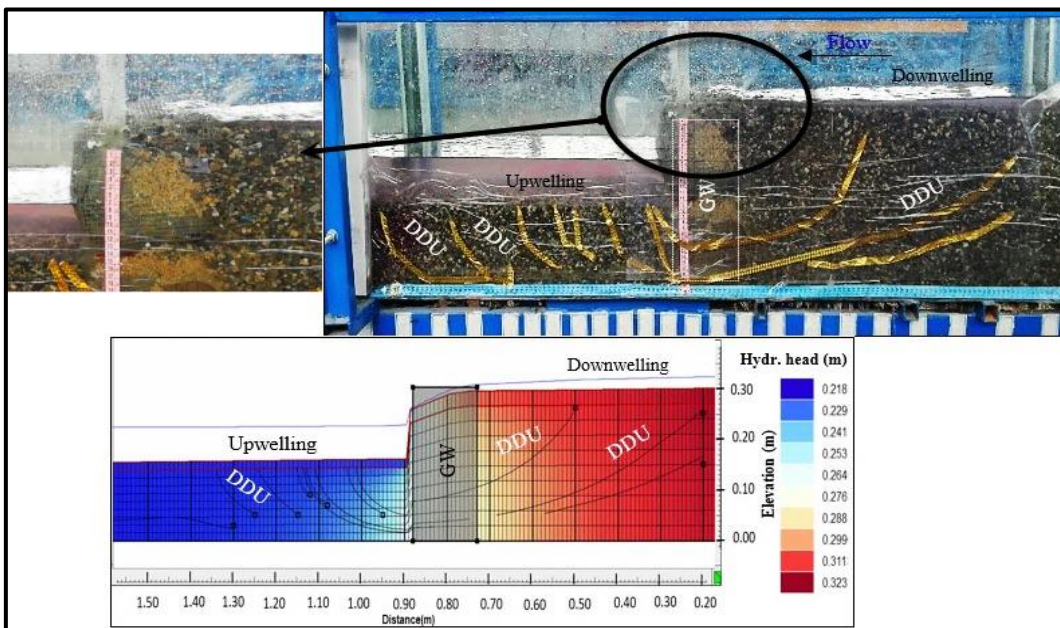
در شکل‌های ۸ و ۹ برای مقایسه نتایج، حالتی که سرریز کاملاً صلب باشد نیز با سرریز گابیونی مورد بررسی قرار گرفت. خطوط جریان در قبل از سرریز گابیونی با سرریز صلب کاملاً متفاوت بوده، به طوری که در سرریز صلب خطوط جریان قبل از آن به صورت جریان Upwelling از بستر محیط متخلخل خارج می‌شوند، ولی



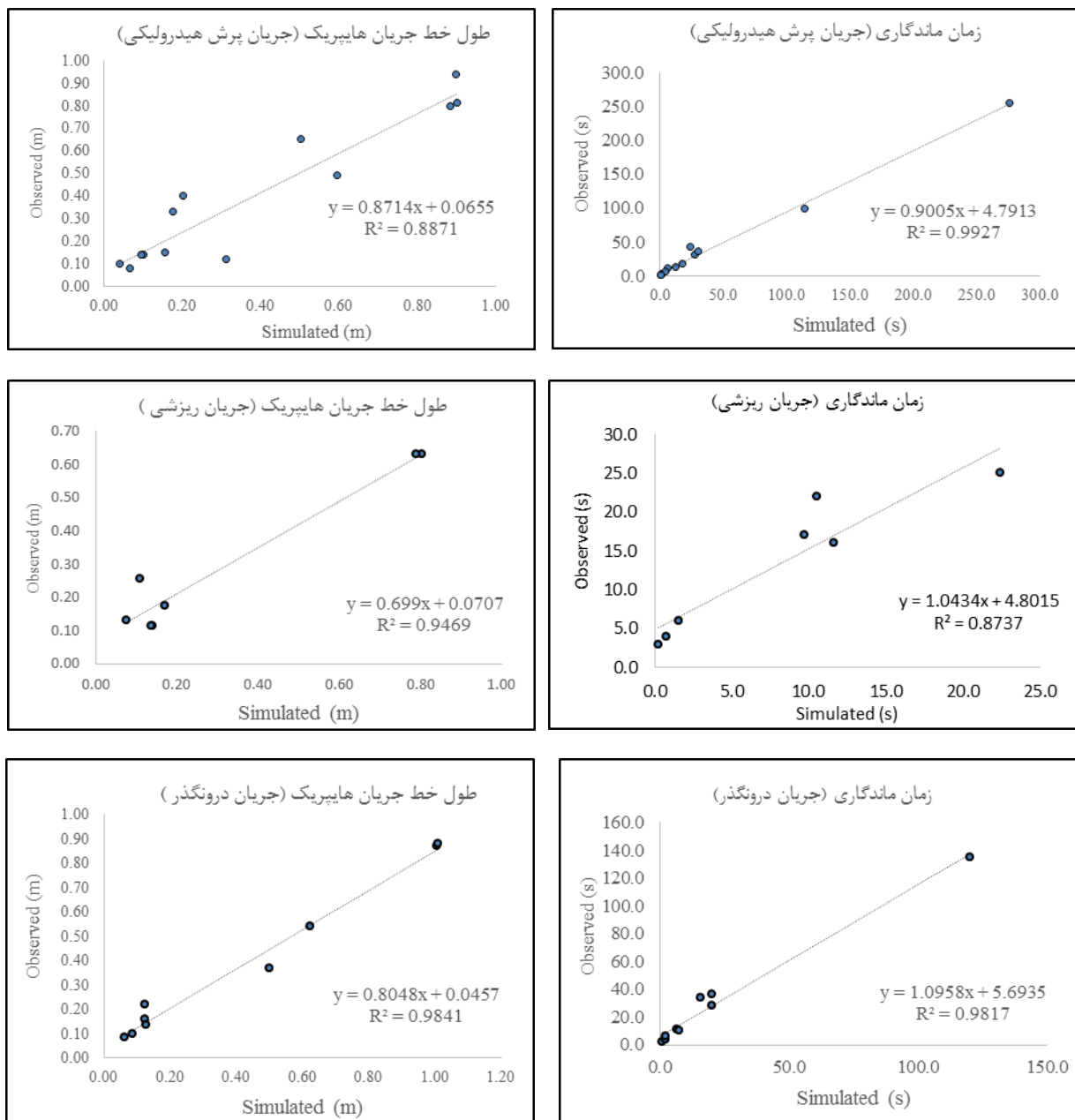
شکل ۸. مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل زیرسطحی در حالت جریان PNGW با سرریز گابیونی و سرریز صلب



شکل ۹. مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل زیرسطحی در حالت جریان NFGW با سرریز گابیونی و سرریز صلب



شکل ۱۰. مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدل زیرسطحی در حالت جریان TFGW با سرریز گابیونی



شکل ۱۱. کالیبراسیون مدل آزمایشگاهی و مدل زیرسطحی طول خط جریان و زمان ماند برای سه نوع جریان پرش هیدرولیکی، جریان ریزشی و جریان درون گذر

جدول ۳. مقادیر پارامتر آماری برای طول خط جریان و زمان ماند برای سه نوع جریان PNGW-NFGW-TFGW

نوع جریان	پارامتر	RMSE(m)	MAE	R <sup>2</sup> (%)
PNGW	طول خط جریان (متر)	۰/۱۱	۰/۰۹	۹۴
	زمان ماند (ثانیه)	۹/۴۱	۶/۳۷	۸۷
NFGW	طول خط جریان (متر)	۰/۰۸	۰/۰۴	۸۸
	زمان ماند (ثانیه)	۴/۳۶	۲/۷۸	۹۹
TFGW	طول خط جریان (متر)	۰/۰۹	۰/۰۷	۹۸
	زمان ماند (ثانیه)	۱۰/۰۱	۷/۷۸	۹۸

۹۴ و ۸۷ درصد با مدل آزمایشگاهی بوده است. این حالت از جریان هایپرریک با مطالعات ایندرنی و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی خوبی دارد. در این مقاله با بررسی الگوی جریان هایپرریک در موانع صلب و موانع صلب با نفوذ جزئی به این نتیجه رسیدند که در حالتی که جریان در حالت پرش هیدرولیکی است، جریان هایپرریک معکوس نیز وجود دارد، اما در جریان‌های ریزشی هیچ‌گونه جریان هایپرریک معکوسی مشاهده نشده است [۱۳].

#### دبی تبادلی و زمان ماندگاری

پس از کالیبره کردن مدل زیرسطحی که براساس مسیر خط جریان و زمان ماند در محیط متخلخل و تزریق رنگ در مدل آزمایشگاهی و خروجی مدل زیرسطحی انجام شده است. در جدول ۴ مقادیر شاخص‌های جریان زیرسطحی برای آزمایش‌های مختلف محاسبه و تحلیل شد.

جدول ۴. مشخصات دبی تبادلی و زمان ماندگاری بی‌بعد، جریان هایپرریک در سه حالت مختلف جریان TFGW, NFGW, PNGW

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
ردیف	نوع جریان	دبی عبوری Q(m <sup>3</sup> /s)	عدد رینولدز Re	دبی تبادلی بی‌بعد شده q*	درصد دبی تبادلی %QP	زمان ماند بی‌بعد شده t*
۱		۰/۰۰۲۷۷	۸۰۶۴	۰/۰۱۶۲	۵۹/۳	۱۴/۸۱
۲	TFGW	۰/۰۰۳۴۶	۱۰۰۷۲	۰/۰۱۹۵	۴۷/۱	۱۰/۲۰
۳		۰/۰۰۴۰	۱۱۶۸۲	۰/۰۱۶۹	۵۰/۵	۹/۷۶
۴		۰/۰۰۴۶	۱۳۵۰۰	۰/۰۱۵۸	۴۹/۳	۸/۳۸
۵	NFGW	۰/۰۰۵۱	۱۴۸۷۲	۰/۰۱۳۹	۴۲/۵	۷/۵۲
۶		۰/۰۰۶۰	۱۷۶۸۴	۰/۰۱۲۹	۳۴/۸	۶/۲۷
۷		۰/۰۰۸۳	۲۴۲۱۱	۰/۰۱۰۶	۳۳/۸	۳/۰۷
۸	PNGW	۰/۰۰۹۵۸	۲۷۸۸۴	۰/۰۰۹۹	۲۵/۹	۲/۲۱
۹		۰/۰۱۲۴	۳۲۸۸۶	۰/۰۰۶۸	۱۹	۲/۱۷

[۱۸]. جمالی و همکاران (۲۰۱۹) نیز با بررسی جریان هایپرریک در پشته‌های رسوبی به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جریان، زمان ماندگاری روند کاهشی را دارد [۲۲]. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در رینولدزهای پایین، مدت زمانی که مواد محلول درون ناحیه هایپرریک باقی می‌ماند بیشتر است 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 PNGW و بیشترین زمان ماند نیز به حالت جریان TFGW است.

طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده از مدل زیرسطحی در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشخص شد که، الگوی خطوط جریان در ناحیه هایپرریک با مدل آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارند، به طوری که در حالت جریان TFGW، NFGW بیشتر خطوط جریان هم در مدل آزمایشگاهی و هم مدل زیرسطحی به صورت جریان پایین‌دست رو به بالا (DDU) بوده است. همچنین، با بررسی طول خط جریان و زمان ماند در این دو نوع جریان مطابق جدول ۳ به‌ترتیب در جریان TFGW دارای همبستگی بیش از ۹۸ درصد و در جریان NFGW دارای همبستگی بیش از ۸۸ درصد برخوردارند. در حالت PNGW خطوط جریان هم به صورت جریان پایین‌دست رو به بالا (DDU) و هم به صورت جریان بالادست رو به بالا (UDU) نمایان شد که با بررسی طول خطوط جریان و زمان ماند به‌ترتیب دارای همبستگی

#### تغییرات بی‌بعد مشخصه‌های جریان هایپرریک با عدد رینولدز

##### الف) زمان ماندگاری جریان هایپرریک (R<sub>t</sub>)

نتایج نشان می‌دهد در همه حالت‌های جریان (TFGW, NFGW, PNGW) به طور کلی با کاهش عدد رینولدز جریان، زمان ماندگاری بی‌بعد روند افزایشی داشته است، به طوری که این روند افزایشی از حالت جریان PNGW به NFGW و سپس، جریان TFGW نیز وجود دارد، به این معناست که با کاهش عدد رینولدز تعداد ذرات جریان که زمان ماند طولانی‌تری دارند، افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های موحدی و همکاران (۲۰۱۹) نیز مطابقت دارد

ج) درصد دبی تبدالی کل جریان هایپریک ( $Q_p$ ) درصد دبی تبدالی کل جریان هایپریک از نسبت دبی تبدالی کل جریان هایپریک ( $Q_{ex}$ ) به دبی جریان ورودی از کانال آزمایشگاهی ( $Q$ ) به دست می‌آید. با بررسی این پارامتر در جدول ۴ مشاهده می‌شود که در تمامی حالت‌های آزمایش ( $TFGW$ ،  $NFGW$ ،  $PNGW$ ) با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار درصد دبی تبدالی کل جریان هایپریک نیز روند کاهشی داشته است که با مطالعات ترات و همکاران (۲۰۱۵) همخوانی دارد [۲۶].

مطابق نتایج جدول ۴ بیشترین درصد اختلاط جریان سطحی با محیط زیرسطحی با توجه به دبی جریان عبوری با ۵۹ درصد در جریان  $TFGW$  و کمترین درصد اختلاط نیز به جریان  $PNGW$  با ۱۹ درصد رخ داده است. همچنین، در حالت جریان  $TFGW$ ،  $NFGW$ ،  $PNGW$  به طور متوسط ۵۲، ۴۲ و ۲۶ درصد جریان سطحی در تبادل با ناحیه هایپریک است.

همچنین، در شکل (۱۲-پ) همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد دبی تبدالی جریان ( $Q_p$ ) با عدد رینولدز ( $Re$ ) نیز رابطه‌ی توانی دارند که طبق این شکل همبستگی ۹۰ درصد بین آن‌ها برقرار است.

محدوده کاربرد روابط ارائه‌شده برای ذرات رسوب گابیون کمتر از ۱۷ میلی‌متر و ذرات رسوب اطراف گابیون با سایز ۶/۸ میلی‌متر بوده و برای دبی جریان بین ۲/۷۷ تا ۱۱/۲۴ لیتر بر ثانیه و عدد رینولدز ۸-۳۳ هزار کاربرد دارد.

### نتیجه‌گیری

- طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده از مدل زیرسطحی مشخص شد که در بیشتر موارد، الگوی خطوط جریان در ناحیه هایپریک با مدل آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارند، به طوری که در حالت جریان  $NFGW$  و  $TFGW$  بیشتر خطوط جریان هم در مدل آزمایشگاهی و هم مدل زیرسطحی به‌صورت جریان پایین‌دست رو به بالا ( $DDU$ ) بوده و در حالت  $PNGW$  خطوط جریان در قبل سرریز گابیونی و محدوده کوچکی از پایین‌دست سرریز گابیونی و قلّه پرش هیدرولیکی به صورت جریان پایین‌دست رو به بالا بوده و در محدوده بعد پرش هیدرولیکی نیز خطوط جریان بصورت جریان برگشتی یعنی جریان بالادست رو به بالا ( $UDU$ ) هستند.

طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده از نتایج زمان ماند مشخص شد که زمان ماند با عدد رینولدز رابطه‌ی توانی دارند. ترات و همکاران (۲۰۱۳) و کاردانس و ویلسون (۲۰۰۶) برای زمان ماندگاری بی‌بعد شده با عدد رینولدز روابط توانی ارائه دادند که با مقاله حاضر تطابق خوبی دارد [۱۶ و ۲۶]. به طوری که در شکل (۱۲-الف) تغییرات زمان ماند بی‌بعد شده در مقابل عدد رینولدز ترسیم شده و ضریب همبستگی ۹۶ درصد بین آن‌ها برقرار بوده است که طبق این رابطه توانی می‌توان تخمین مناسبی از زمان ماند، ارائه کرد. هانگ و چوی (۲۰۱۸) روابطی را برای محاسبه مشخصه‌های منطقه هایپریک پیشنهاد دادند که تخمین مناسبی از زمان ماندگاری ارائه می‌دهد [۲۷].

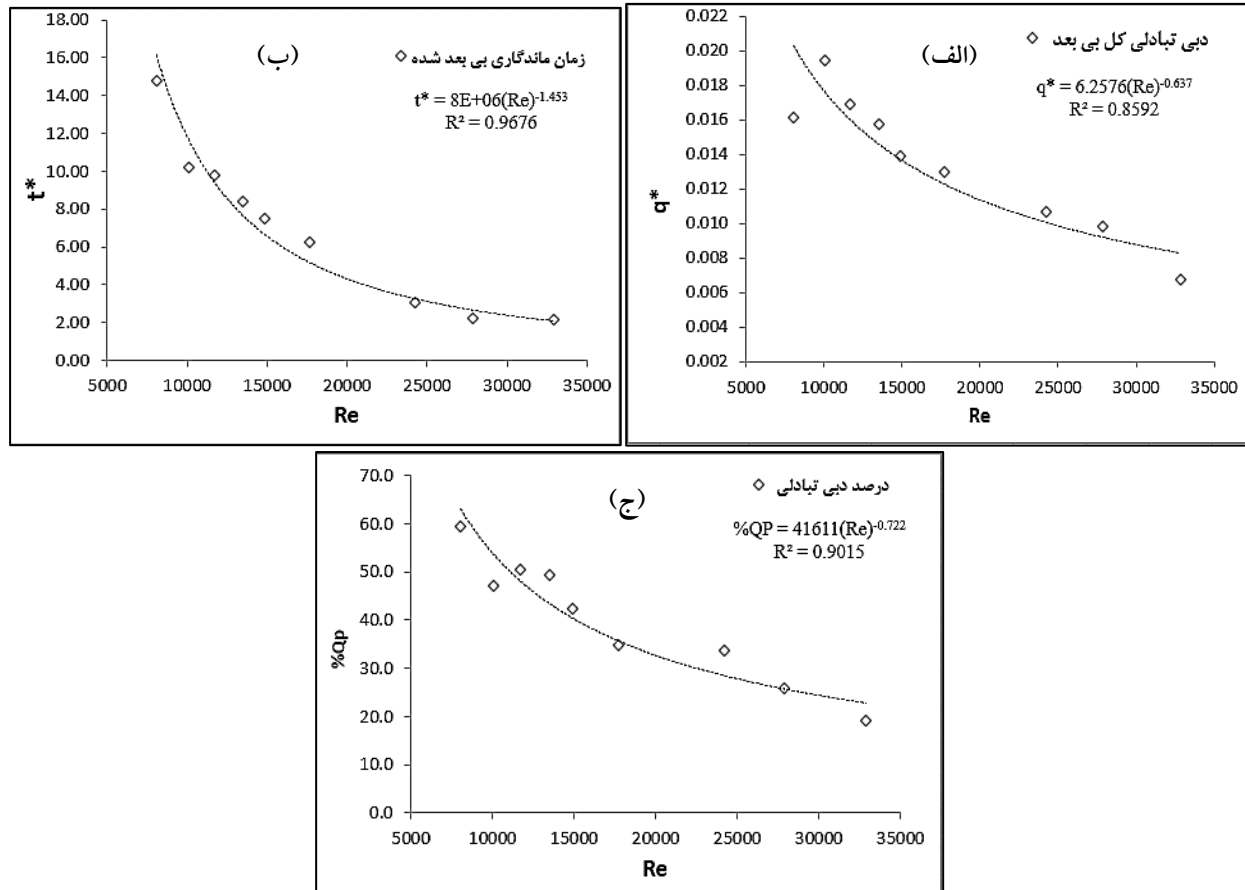
### ب) دبی تبدالی کل جریان هایپریک ( $Q_{ex}$ )

با بررسی دبی تبدالی کل بی‌بعد شده ( $q^*$ ) مشاهده می‌شود 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 هایپریک بی‌بعد شده در جدول مشخصات جریان هایپریک با تغییر حالت جریان یعنی  $TFGW$  به  $NFGW$  و سپس،  $PNGW$  روند کاهشی دارد، به طوری که در هر حالت جریان نیز با افزایش عدد رینولدز این مقدار بی‌بعد، دارای روندی کاهشی است.

در محیط‌های متخلخل مانند سازه سرریز گابیونی در مسیر مجراهای طبیعی، تغییرات دبی تبدالی هایپریک بیشتر ناشی از اختلاف تراز سطح آب در دو طرف سازه سرریز گابیونی و بالادست و پایین‌دست است که معمولاً گرادیان عرضی بیشتر از طولی است. این اختلاف با افزایش دبی کاهش یافته و دبی تبدالی نیز روندی کاهشی را دنبال می‌کند که با مطالعات ترات و همکاران (۲۰۱۵) همخوانی دارد [۲۸].

دامنه تغییرات مقدار دبی تبدالی کل ( $Q_{ex}$ ) مقدار ۱/۶۳ تا ۲/۸۰ لیتر بر ثانیه دارند. مطابق شکل (۱۲-ب) رابطه توانی دبی تبدالی بی‌بعد شده با عدد رینولدز دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد بوده است. ترات و همکاران (۲۰۱۳) و کاردانس و ویلسون (۲۰۰۶) برای دبی تبدالی بی‌بعد شده با عدد رینولدز روابط توانی ارائه دادند که با مقاله حاضر تطابق خوبی دارد [۱۶ و ۲۶].





شکل ۱۲. تغییرات بی بعد شده مشخصه های جریان هایپرریک در مقابل عدد رینولدز جریان؛ الف: زمان ماندگاری بی بعد شده، ب: دبی تبدالی بی بعد شده، ج: درصد دبی تبدالی

بوده و کمترین دبی تبدالی بی بعد شده ( $q^*$ ) نیز مربوط به حالت جریان PNGW نسبت به دو حالت دیگر دارای مقدار کمتری برخوردار است و در حالت TFGW نیز بیشترین زمان ماندگاری را دارد.

- زمان ماندگاری با عدد رینولدز رابطه توانی دارند، به طوری که می توان طبق این رابطه توانی تخمین مناسبی از زمان ماند زد. تغییرات زمان ماند بی بعد شده در مقابل عدد رینولدز ضریب همبستگی ۹۶ درصد داشته است.

- در محیط های متخلخل مانند سازه سرریز گابیونی در مسیر مجراهای طبیعی، تغییرات دبی تبدالی هایپرریک بیشتر ناشی از اختلاف تراز سطح آب در دو طرف سازه سرریز گابیونی و بالادست و پایین دست است. این اختلاف با افزایش دبی کاهش می یابد و دبی تبدالی نیز روندی کاهشی را دنبال می کند.

- بیشترین دبی تبدالی کل بی بعد شده ( $q^*$ ) در همه حالت های مورد آزمایش مربوط به حالت جریان TFGW

- دامنه تغییرات دبی تبدالی کل ( $Q_{ex}$ ) ۱/۶۳ تا ۲/۸۰ لیتر بر ثانیه هستند.  
 - درصد دبی تبدالی کل جریان هایپرریک که با دبی جریان مورد بررسی قرار می گیرد، نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز و تغییر حالت جریان به حالت آشفته تر روند کاهشی را دارد.  
 - درصد دبی تبدالی جریان با عدد رینولدز رابطه توانی دارند که برای درصد دبی تبدالی جریان هایپرریک در مقابل عدد رینولدز همبستگی ۹۰ درصد بین آن ها برقرار است.  
 - در حالت جریان TFGW، NFGW، PNGW به طور متوسط ۵۲، ۴۲ و ۲۶ درصد جریان سطحی در تبادل با ناحیه هایپرریک است.

- بررسی زمان ماندگاری جریان هایپرریک در حالت جریان PNGW نسبت به دو حالت دیگر دارای مقدار کمتری برخوردار است و در حالت TFGW نیز بیشترین زمان ماندگاری را دارد.

- در محیط های متخلخل مانند سازه سرریز گابیونی در مسیر مجراهای طبیعی، تغییرات دبی تبدالی هایپرریک بیشتر ناشی از اختلاف تراز سطح آب در دو طرف سازه سرریز گابیونی و بالادست و پایین دست است. این اختلاف با افزایش دبی کاهش می یابد و دبی تبدالی نیز روندی کاهشی را دنبال می کند.

- بیشترین دبی تبدالی کل بی بعد شده ( $q^*$ ) در همه حالت های مورد آزمایش مربوط به حالت جریان TFGW

- در حالت جریان هایپرریک در مقابل عدد رینولدز جریان؛ الف: زمان ماندگاری بی بعد شده، ب: دبی تبدالی بی بعد شده، ج: درصد دبی تبدالی

## منابع

- [1]. Edwards RT. The hyporheic zone. In *River Ecology and Management. Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. Naiman RJ, Bilby RE (eds). Springer-Verlag. New York. 2000; 50(11): 996-1011.
- [2]. Harvey JW, Bencala KE. The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. *Water Resour Res.* 1993; 29(1):89-98.
- [3]. Tonina D, Buffington JM. A three-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 2009; 66(12): 2157-2173.
- [4]. Hester ET, Doyle MW. In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange. *Water Resour Res.* 2008; 44(3): W03417.
- [5]. Fanelli RM, Lautz L. Patterns of water, heat, and solute flux through streambeds around small dams. *Ground Water.* 2008; 46(5): 671-687.
- [6]. Cardenas MB, Wilson J. Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bed forms. *J Hydr Div ASCE.* 2007b; 30(3):301-313.
- [7]. Cardenas MB, Wilson JL. Exchange across a sediment-water interface with ambient groundwater discharge. *J Hydrology.* 2007a; 346(3-4): 69-80.
- [8]. Boulton AJ, Findlay S, Marmonier P, Stanley EH, Valett HM. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 1998; 29: 59-81.
- [9]. Cardenas MB, Wilson J, Zlotnik VA. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. 2004; 40(8): W08307.
- [10]. Packman A, Salehin M, Zaramella M. Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. *J Hydraul Eng.* 2004; 130(7): 647- 656.
- [11]. O'Connor BL, Harvey JW. Scaling hyporheic exchange and its influence on biogeochemical reactions in aquatic ecosystems. *Water Resour Res.* 2008; 44(12): W12423.
- [12]. Kaser DH, Binley A, Heathwaite AL, Krause S. Spatiotemporal variations of hyporheic flow in a riffle-step-pool sequence. *Hydrol Proc.* 2009; 23(15): 2138-2149.
- [13]. Endreny T, Lautz L, Siegel DI. Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: Flume and hydrodynamic models. *Water Resour Res.* 2011a; 47(2): W02517.
- [14]. Zhou T, Endreny TA. Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: Flume and hydrodynamic experiments. *Water Resources Research.* 2013; 49(8): 5009-5020.
- [15]. Marwan AH, Daniele T, Roger DB, Matthew K. The effects of discharge and slope on hyporheic flow in step-pool morphologies. *Hydrol Process.* 2014; 29(3): 419-433.
- [16]. Trauth N, Schmidt C, Maier U, Vieweg M, Fleckenstein JH. Coupled 3-D stream flow and hyporheic flow model under varying stream and ambient groundwater flow conditions in a pool-riffle system. *Water Resources Research.* 2013; 49(9): 5834-5850.
- [17]. Endreny T, Lautz L, Siegel D. Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: Hydrostatic model simulations. *Water Resour Res.* 2011b; 47(2): W02518.
- [18]. Movahedi N, Dehghani AA, Trat N, Meftah Halqi M. Laboratory and numerical study of hyperic exchange in the presence of pool and riffle bed form. *J Echo Hydrology.* 2019; 6(1): 191-204. (Persian).
- [19]. No name. Design criteria for floor dams and bed Weirs. Management and Planning Organization of the country: Criterion No. 701; 2016.p197. (Persian).
- [20]. Tonina D, Buffington JM. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: laboratory experiments and three dimensional modeling. *Water Resour. Res.* 2007; 43(1): W01421.
- [21]. Harbaugh AW. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model-The ground-water flow process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 6-A16: 2005. variously paged.
- [22]. Jamali S, Dehghani AA. laboratory study on the action of surface and subsurface water in the middle sedimentary ridge. *J Echo Hydrology.* 2019; 6(2): 339-323. (In Persian).
- [23]. Fox A, Boano F, Arnon SJ. Impact of losing and gaining streamflow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by duneshaped bed forms. 2014;50(3):1895-907.
- [24]. Movahedi N, Dehghani AA, Schmidt C, Trauth N, Pasternack GB, Stewardson MJ, et al. Hyporheic exchanges due to channel bed and width undulations. *Water Resour Res.* 2021; 149(2): 103857.

- [25]. Tsutsumi D, Laronne JB. Gravel-Bed Rivers, Process and Disasters, John Wiley & Sons Ltd, Chichester UK; 2017.p.798.
- [26]. Cardenas MB, Wilson JL. The influence of ambient groundwater discharge on hyporheic zones induced by current-bedform interactions. *Journal of Hydrology*. 2006: 331, 103–109.
- [27]. Huang P, May Chui, TFM. Empirical Equations to Predict the Characteristics of Hyporheic Exchange in a Pool Riffle Sequence. *Groundwater*. 2018: 56(6), 947-958.
- [28]. Trauth N, Schmidt C, Vieweg M, Oswald SE, Fleckenstein JH. Hydraulic controls of in-stream gravel bar hyporheic exchange and reactions. 2015; 51(4): 2243-2263.