

## بررسی آزمایشگاهی اندرکنش آب سطحی و زیرسطحی در پشته رسوبی میانی

سارا جمالی<sup>۱</sup>، امیر احمد دهقانی<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۲</sup>، نیکو ترات<sup>۲</sup>، کریستین اشمیت<sup>۳</sup>

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

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

۳. پژوهشگر دکتری، مرکز تحقیقات محیط زیستی هلمهلتز، لایپزیک، آلمان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۰۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۱/۲۳)

### چکیده

تبادل هایپرریک در مجاری روباز در چرخه اکولوژی و هیدرولوژی بسیار تأثیرگذار است. پشته‌های رسوبی از جمله عوامل مورفولوژیکی رودخانه هستند که جریان هایپرریک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در تحقیق حاضر، جریان ماندگار در اطراف یک پشته رسوبی سه‌بعدی متقارن با قاعده بیضی (۲m×۰/۶۴m) و ارتفاع ۰/۱ متر در یک فلوم آزمایشگاهی بررسی شد. برای بررسی آثار استغراق، مطالعات آزمایشگاهی پشته رسوبی در دو حالت غیر مستغرق و مستغرق کامل بررسی شد. همچنین، الگوی جریان و میدان فشار در اطراف پشته رسوبی توسط مدل ریاضی شبیه‌سازی شد. سپس، الگوی فشار محاسبه‌شده از مدل ریاضی به عنوان شرایط مرزی روی مرز بالایی پشته رسوبی قرار گرفت و جریان زیرسطحی با استفاده از مدل آب زیرزمینی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. نتایج تحقیق نشان داد شاخص بی‌بعد دبی تبادل بین جریان سطحی و زیرسطحی، با افزایش دبی جریان کاهش داشته و تغییرات آن همبستگی مناسبی با عدد رینولدز محیط متخلخل پشته نشان می‌دهند. درصد دبی تبادل به دبی جریان سطحی در محدوده ۳/۵ تا ۷/۵ است. با افزایش دبی جریان، گسترش فضایی خطوط جریان افزایش داشته و در شرایط غیر مستغرق گسترش عرض آن شبیه جریان‌های هایپرریک ناشی از فرم بسترهای ریفل-پول و دیون دویلی است. همچنین، نتایج نشان داد توزیع فراوانی طول خطوط جریان و زمان ماندگاری ذرات در محیط متخلخل پشته نیز از الگوی لوگ نرمال پیروی می‌کند که با افزایش دبی جریان به توزیع متقارن نزدیک‌تر می‌شود. در ضمن، با افزایش دبی جریان، زمان ماندگاری میانه بی‌بعد ذرات در محیط متخلخل پشته ( $t_m^*$ )، کاهش داشته و در این آزمایش‌ها بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۱ است.

**کلیدواژگان:** پشته رسوبی میانی، جریان هایپرریک، دبی تبادل، زمان ماندگاری.

## مقدمه

دهه‌های اخیر حفاظت پشته‌های رسوبی در پایین‌دست سدها به دلیل اهمیت این مناطق از نظر زیست‌بوم گونه‌های آبی به طور درخور توجهی مورد توجه قرار گرفته است [۱۸]. معمولاً پشته‌های رسوبی در رودخانه‌های یک منطقه، تجمع رسوبات شن و ماسه هستند و توسط رسوب‌گذاری جریان ایجاد می‌شوند. موقعیت پشته‌های رسوبی به هندسه رودخانه و شرایط جریان بستگی دارد. این پشته‌ها معمولاً در نواحی‌ای که تنش برشی کاهش یافته، تشکیل می‌شوند. انواع مختلفی از پشته‌های رسوبی در طبیعت مشاهده می‌شود که عبارت‌اند از: نقطه‌ای، متناوب و میانی. پشته‌های نقطه‌ای معمولاً در قوس داخلی انحنا رودخانه ایجاد می‌شوند. پشته‌های متناوب به صورت یک توالی در رودخانه‌های مستقیم مشاهده می‌شوند. پشته‌های میانی در قسمت وسط رودخانه‌ها شکل می‌گیرند. در بازه‌های غیر شریانی رودخانه زمانی که دو شاخه فرعی یا جانبی به هم می‌پیوندند و یا بر اثر تنگ‌شدگی موضعی مجرا، سرعت جریان افزایش می‌یابد و سبب ایجاد فرسایش شده و به محض ورود جریان به مجرای عریض‌تر به دلیل کاهش سرعت جریان، مقداری از رسوبات درشت‌دانه نهشته می‌شوند که شروع رسوب‌گذاری و تشکیل پشته‌های رسوبی است. همین نهشته‌شدن رسوبات درشت‌دانه سبب ایجاد مانع و رسوب‌گذاری بیشتر می‌شود تا جایی که رسوبات به قدری تجمع می‌یابند که جریان در رودخانه را به دو قسمت تبدیل می‌کنند [۱۹]. پشته‌های رسوبی از ساختارهای ریخت‌شناسی متداول در رودخانه‌ها هستند. بنابراین، لازم است که رفتار جریان هایپریک در آنها نیز بررسی شود. از مطالعات انجام‌شده در زمینه جریان هایپریک در پشته‌های رسوبی می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی تونینا و بافینگتن (۲۰۰۷) روی مورفولوژی سه‌بعدی ترکیبی از ریفل-پول و پشته‌های رسوبی جانبی<sup>۱</sup> و نیز مطالعه صحرائی ترات و همکارانش (۲۰۱۵)، شوپ و همکارانش (۲۰۱۲)، ترات و فلکشتاین (۲۰۱۷) و بری و دیوننی (۲۰۱۷) [۱۴، ۱۶، ۲۰، ۲۱]، روی یک پشته رسوبی میانی اشاره کرد. مدل‌های دوبعدی ارائه‌شده برای تخمین فشار روی سطح فرم بستر [۲۲] که بیشتر برای فرم بسترهای دوبعدی مانند دیون در محدوده ذرات ماسه‌ای کاربرد داشته است، در مطالعه تونینا و بافینگتن (۲۰۰۷) کارایی مناسبی را نشان نداد. در مورفولوژی

تبادل جریان هایپریک<sup>۱</sup> عبارت است از: اختلاط جریان سطحی و جریان زیرسطحی در محیط متخلخلی که زیر و اطراف مجرای گذر آب را احاطه کرده است. این تبادل جریان تحت تأثیر خصوصیات متغیر آبراهه مانند فشار در کف، حرکت بستر، حجم آبرفت و هدایت هیدرولیکی به طور زمانی و مکانی تغییر می‌کند. واژه هایپریک از کلمه یونانی 'hypo-' و 'rhe-' به معنای آب زیرسطحی کم‌عمق در زیر رودخانه و دشت‌سیلاب‌های اطراف استخراج شده است. جریان‌های هایپریک در شرایطی که آب تمیز و بدون رسوب داشته باشند، به دلیل داشتن اکسیژن زیاد سبب حفظ تکامل دوره جنینی موجودات آبی می‌شوند و همچنین ضایعات سوخت‌وساز این موجودات را حذف می‌کنند [۱]. بیش از ۸۰ درصد تهویه آبراهه‌ها در منطقه هایپریک انجام می‌شوند [۲]. یکی از عوامل ایجاد تبادل هایپریک، وجود گرادیان فشار در مرز جریان سطحی و محیط متخلخل است. گرادیان فشار بر اثر عوامل مختلفی مانند موانع موجود در مسیر جریان و یا فرم‌های بستر به وجود می‌آید که متناسب با بزرگی این عوامل، روی مقدار تبادل و عمق گستردگی هایپریک تأثیر خواهد گذاشت [۳]. انواع فرم‌های بستری که به طور معمول شناخته شده‌اند، عبارت‌اند از: دیون - ریفل<sup>۲</sup>، ریفل-پول<sup>۳</sup>، استپ-پول<sup>۴</sup>، پشته‌های رسوبی<sup>۵</sup> و... که هر یک خصوصیات مخصوص به خود از نظر هندسه، توزیع دانه‌بندی و شیب طولی آبراهه را دارند. مطالعات هایپریک تحت تأثیر عوامل فرم بستر در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه بوده است و تحقیقات زیادی در قالب مطالعات آزمایشگاهی [۳-۹]، میدانی [۱۰] و عددی [۱۱-۱۴] انجام شده است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد مطالعه فرم بسترهای ریفل-پول و دیون-ریفل روی هایپریک فضای مناسبی از دانش در این زمینه را فراهم کرده است [۱۵]. بنابراین، بررسی انواع فرم‌های دیگر می‌تواند مکمل خوبی برای این مطالعات باشد. در این میان، تأثیر جزایر یا پشته‌های رسوبی در مسیر رودخانه‌ها با توجه به فراوانی حضور آنها در الگوی فضایی این جریان‌ها، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۶ و ۱۷]. در

1. Hyporheic flow
2. Dune-Ripple
3. Riffle-Pool
4. Step-Pool
5. Bar

6. Alternative Bars

بیولوژی جانداران بسیار اهمیت دارند [۲۳ و ۲۴]. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر فرم بستر پشته رسوبی بر توزیع فشار در کف مجرا و به تبع آن، جریان‌های زیرسطحی ناشی از آن است. با انجام تحقیق حاضر، تأثیر پشته رسوبی در تبادل جریان سطحی رودخانه و محیط متخلخل پشته و زمان ماند جریان مشخص می‌شود که سهم بسزایی در فرایندهای اکولوژیکی دارد. همچنین، در بسیاری از عملیات‌ها که برای ساماندهی رودخانه‌ها انجام می‌شود، می‌تواند کاربرد داشته باشد. برای مثال، پاسخ به این سؤال که آیا این پشته‌ها باید در رودخانه‌ها لایروبی شوند و یا تأثیر آنها در اکولوژی و بیولوژی رودخانه چیست، می‌تواند از اهداف فرعی تحقیق حاضر باشد.

در مطالعه حاضر، یک پشته رسوبی میانی در یک فلوم آزمایشگاهی ایجاد شد و شرایط جریان ماندگار برای دبی‌های مختلف در حالت‌های نیمه‌مستغرق و مستغرق در آن بررسی شد. همچنین، آزمایش‌ها با استفاده از یک نرم‌افزار هیدرودینامیک سه‌بعدی نیز شبیه‌سازی شدند و با استفاده از نتایج فشار به‌دست‌آمده، الگوی جریان زیرسطحی نیز بررسی شد. در نهایت، نیز با استفاده از تکنیک ردیابی ذرات<sup>۱</sup> چگونگی توزیع خطوط جریان و مشخصات جریان‌های زیرسطحی تحلیل شد.

### مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر به منظور بررسی الگوی جریان هایپرریک، جریان سطحی با وجود یک پشته رسوبی میانی در فلوم آزمایشگاهی در شرایط دبی‌های مختلف بررسی شد. برای اجرای مورفولوژی پشته رسوبی سعی شد که ابعاد آن در محدوده ساختارهای طبیعی باشد. محدوده تغییرات عرض به طول پشته‌های رسوبی بین ۰/۳-۰/۵ و با میانگین ۰/۳۷ برای رودخانه‌های مختلف [۲۵] و برای رودخانه می‌سی‌سی‌پی حدود ۰/۱۲-۰/۴۲ و با میانگین ۰/۲۵ [۲۶] گزارش شده که در تحقیق حاضر نسبت ۰/۳۲ در نظر گرفته شده است. پشته ابعادی به طول دو متر، ۶۴ سانتی‌متر عرض و ۱۰ سانتی‌متر ارتفاع در مرکز دارد. این مورفولوژی با قاعده بیضی و در یک فلوم با عرض ثابت پیاده شد. از مخلوط شن و ماسه با دانه‌بندی بین یک تا ۱۱ میلی‌متر به عنوان مصالح رسوبی استفاده شد که قطر

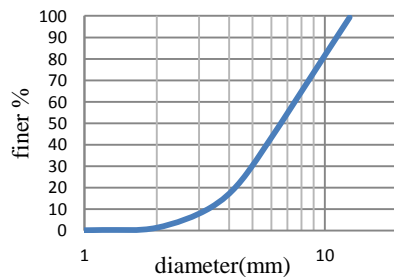
سه‌بعدی رفتار هیدرودینامیک جریان سطحی و زیرسطحی بسیار متفاوت است، به طوری که ممکن است سبب تمایز گسترده گونه‌های زیستی در مقایسه با فرم‌های دوبعدی باشد [۸]. شرایط نیمه‌استغراق و جریان با عمق کم در اطراف فرم بستر با ابعاد نسبتاً بزرگ‌تر مانند پشته‌های رسوبی شرایط بسیار متفاوتی از نظر هیدرولیک و جریان زیرسطحی در مقایسه با فرم بسترهای کوچک و جریان‌های مستغرق با عمق زیاد ایجاد می‌کند [۱۷]. شوپ و همکارانش (۲۰۱۲) با شبیه‌سازی جریان زیرسطحی ناشی از یک پشته رسوبی میانی دریافتند که وجود این ساختار، مقدار تبادل جریان سطحی و زیرسطحی را تا شش برابر در مقایسه با مورفولوژی مشابه بدون پشته رسوبی افزایش می‌دهد [۱۶]. ترات و همکارانش (۲۰۱۵) با مدل‌سازی سناریوهای مختلف از جریان‌های زیرسطحی نشان دادند یک ساختار مورفولوژیکی مانند پشته رسوبی ظرفیت زیادی در فرایندهای نیتروژن‌زدایی آب سطحی و زیرزمینی نسبت به فرم بستر پول-ریفل در حالت استغراق کامل در ابعاد مشابه دارد که به دلیل منطقه واکنش بزرگ‌تر آنهاست. آنها نتیجه گرفتند که پشته‌های رسوبی در این ابعاد می‌تواند مخزن تله‌اندازی خوبی برای نیترات در سیستم‌های رودخانه‌ای باشد [۱۴]. ترات و فلکشتاین (۲۰۱۷) تأثیر هیدروگراف‌های مختلف بر یک پشته رسوبی میانی روی رودخانه سلک آلمان را بررسی کردند و نشان دادند طی گذر هیدروگراف، مقدار دبی تبدلی، انتقال و زوال مواد محلول افزایش داشته است [۲۰]. بری و دیوینی (۲۰۱۷) نیز با مطالعه روی یک پشته رسوبی طبیعی، نامتقارنی مورفولوژی پشته را یکی از عوامل تأثیرگذار بر سطح و محل ورود و خروج جریان‌های هایپرریک دانستند [۲۱]. پشته‌های رسوبی به عنوان یکی از شکل‌های معمول بستر رودخانه‌ها بر اثر حرکت رسوبات و تجمع در محلی تشکیل می‌شوند که شرایط هیدرولیکی رودخانه اجازه می‌دهد. معمولاً، این پشته‌ها سبب دو شاخه شدن جریان اصلی در رودخانه می‌شوند و در بسیاری موارد تراز کف این دو شاخه از رودخانه متفاوت است و در یکی از شاخه‌ها مقدار بیشتری از جریان وجود دارد. شایان یادآوری است در بسیاری موارد با طغیانی شدن رودخانه، این پشته‌ها به زیر آب می‌روند و مستغرق خواهند شد. با توجه به اختلاف تراز هیدرولیکی و تغییرات طولی و عرضی فشار، معمولاً در این پشته‌ها جریان‌هایی زیرسطحی وجود دارد که در بحث اکولوژی و

دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری فشار روی سطح پشته رسوبی از حسگرهای فشار مدل BCT-110-100mbar استفاده شد. برای استفاده از این فشارسنج‌ها، در کف کانال یک شبکه سوراخ متناسب با قطر روزنه فشارسنج‌ها ایجاد شد و در نهایت هر فشارسنج در زیر کانال نصب شد. به هر فشارسنج یک لوله باریک به ارتفاع تراز پشته (در نقطه نصب فشارسنج) وصل شد تا بتواند فشار روی سطح پشته را حس کند. به دلیل متقارن بودن پشته رسوبی، فشارسنج‌ها در یک سمت پشته نصب شدند. فشارسنج‌ها به همراه یک دیتالاگر مقادیر فشار را در نرم‌افزار مربوط به آن در کامپیوتر می‌خواندند. برای واسنجی فشارسنج‌ها، در ترازهای مختلف آب ساکن (پمپ خاموش) عدد فشارسنج‌ها خوانده شده و معادله واسنجی هر فشارسنج استخراج شد. با روشن شدن پمپ و جریان یافتن آب، فشارسنج‌ها به صورت لحظه‌ای فشار را ثبت کردند که در نهایت متوسط زمانی فشار به عنوان فشار آن نقطه در نظر گرفته شد. در شکل ۲ نمایی از یک لوله فشارسنج نشان داده شده است.

متوسط (ds<sub>50</sub>) ۶/۸ میلی‌متر داشت. این محدوده دانه‌بندی در رودخانه‌های شنی بسیار رایج و محیط مناسبی برای تخم‌ریزی ماهی‌هاست [۲۷].

کلیه آزمایش‌های تحقیق حاضر در کانال آزمایشگاهی دارای طول ۱۲ متر، عرض یک متر و ارتفاع ۰/۸ متر صورت گرفت. در ابتدای فلوم توری‌های مستهلک‌کننده انرژی و در انتها یک دریچه برای تنظیم عمق قرار داشت. آزمایش‌ها در شرایط مختلف هیدرولیکی به گونه‌ای انجام شد که در دبی‌های کمتر، پشته به حالت نیمه‌مستغرق باشد. در رودخانه‌ها شرایط نیمه‌مستغرق پشته‌های رسوبی بیشتر اتفاق می‌افتد [۸]، بنابراین، دو دبی در حالت نیمه‌مستغرق و یک دبی در حالت مستغرق کامل در نظر گرفته شد. شیب طولی کف کانال در آزمایش‌ها ثابت و نزدیک به صفر در نظر گرفته شد، اما دریچه پایین دست به منظور ایجاد شرایط هیدرولیکی برای بستر غیرمتحرک در هر آزمایش تنظیم شد.

دبی جریان با استفاده از دستگاه دبی‌سنج آلتراسونیک اندازه‌گیری شد. تراز سطح آب با استفاده از عمق‌سنج



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی و شکل ظاهری پشته رسوبی



شکل ۲. نمایی از یک لوله فشارسنج

## مدل عددی جریان سطحی

جریان سطحی اطراف پشته رسوبی در مدل هیدرودینامیک OpenFoam شبیه‌سازی شد که معادلات ناویر استوکس را با مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ (LES) حل می‌کند. از حلگر InterFoam برای شبیه‌سازی جریان دوفازی هوا-آب استفاده شد که مطابق با شرایط جریان در مجاری روباز است. فضای شبیه‌سازی در مدل دارای ۱۰ متر طول، یک متر عرض و ۰/۲۵ متر ارتفاع بوده است. برای جلوگیری از آثار ورودی و خروجی جریان، پشته رسوبی در فاصله چهارمتری از ورودی و خروجی کانال در نظر گرفته شد. شبکه سلول‌ها، شامل سلول‌های شش‌وجهی است. با بررسی دقت و زمان انجام محاسبات در اندازه سلول‌های مختلف شبکه، اندازه طولی و عرضی هر سلول دو سانتی‌متر و در راستای عمودی تعداد ۲۵ سلول، گزینه مناسبی به نظر رسید که به طور کلی به تولید ۶۲۵ هزار سلول منجر شد. شرط ورودی جریان دبی و عمق بالادست بوده است. شرط خروجی، ورودی جریان به هوای آزاد (*total pressure*) بوده است. به دلیل طول کافی در پایین دست پشته، خروج جریان به هوای آزاد تأثیری بر جریان اطراف پشته نداشته است. همین حالت برای شرط مرزی بالایی نیز استفاده شد. شرط مرزی عدم لغزش برای بستر در نظر گرفته شد [۱۴]. ۱۷ و ۲۸-۳۰]. دیواره‌های جانبی نیز شرایط مرزی عدم لغزش دارند. با اعمال شرایط مرزی یادشده، شبیه‌سازی جریان ماندگار با دبی‌های ۹/۵، ۱۶/۵ و ۲۴ لیتر بر ثانیه (متناظر با عمق‌های بالادست ۰/۰۶۳، ۰/۰۸۵ و ۰/۱۲ متر) انجام شد.

## مدل عددی جریان زیرسطحی

اغلب مطالعات انجام‌شده در شبیه‌سازی جریان‌های هایپریک با استفاده از نتایج فشار شبیه‌سازی جریان سطحی در مدل عددی بوده است، بنابراین به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از این کار با مطالعات قبلی، از داده‌های فشار حاصل از شبیه‌سازی جریان، برای شرط مرزی سطح تماس پشته با آب استفاده شده است. برای مدل‌سازی جریان هایپریک، مدل‌های آب زیرزمینی به کار برده می‌شوند که در تحقیق حاضر از بسته نرم‌افزاری MODFLOW استفاده شده است. این مدل در بسیاری از مطالعات جریان هایپریک به کار گرفته شده است [۱۱ و ۳۱-۳۷].

مدل آب زیرزمینی MODFLOW قادر است براساس معادله داری و روش حل عددی تفاضلات محدود در یک

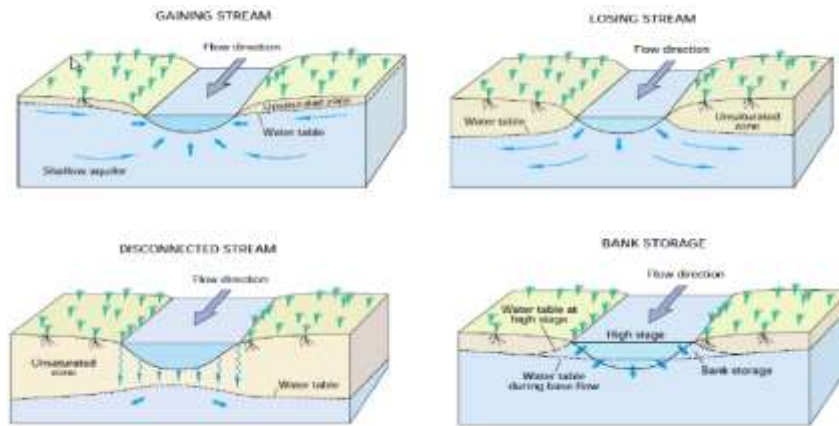
حجم کنترل، مقادیر فشار دامنه مطالعاتی را برای فضای سه‌بعدی حل کند. این نرم‌افزار به همراه ماژول MODPATH بسته نرم‌افزاری خوبی برای مطالعات جریان هایپریک است. با استفاده از ماژول MODPATH به راحتی می‌توان ردیابی ذرات را در دامنه مطالعاتی بررسی کرد و از خروجی مناسب آن برای تحلیل نتایج بهره برد.

برای حل جریان آب در محیط متخلخل، به شرایط مرزی مناسب نیاز است. سطح سه‌بعدی رویه پشته رسوبی به صورت شرط مرزی مقادیر ثابت (شرط مرزی دریشله) لحاظ شد و سایر شرایط مرزی بدون جریان در نظر گرفته شدند. نوع سفره آب زیرسطحی نیز به صورت قابل تبدیل (Convertible) و مقدار تخلخل مصالح ۰/۳۵ انتخاب شد. اندازه مش در راستای طولی و عرضی برابر دو سانتی‌متر و در راستای قائم یک سانتی‌متر و همچنین مقدار هدایت هیدرولیکی معادل ۰/۱۶ در هر سه جهت در نظر گرفته شد.

محاسبه مقدار دبی تبدیلی<sup>۱</sup> ( $Q_{ex}$ ) و شاخص‌های آن

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 هایپریک گفته می‌شود، ۲. جریان‌هایی که از آب سطحی وارد محیط متخلخل می‌شوند و دیگر برنمی‌گردند که در این حالت به سفره‌های زیرزمینی می‌پیوندند که به این جریان‌ها جریان از دست‌رفته<sup>۲</sup> گفته می‌شود، ۳. جریان‌هایی که به عکس حالت دوم هستند و در واقع از منبع زیرزمینی وارد جریان سطحی می‌شوند که جریان دریافتی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند و 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. در ساختارهای طبیعی بسته به موقعیت مکانی ممکن است همه این جریان‌ها و یا بخشی از آنها وجود داشته باشند. در تحقیق حاضر به دلیل قرارگیری محیط متخلخل روی بستر غیر قابل نفوذ، همه جریان‌های ورودی به پشته از آن خارج شده و جزء دسته نخست به حساب می‌آیند. شکل ۳ موقعیت‌های مختلف از رابطه جریان سطحی و زیرسطحی را نشان می‌دهد.

1. Hyporheic exchange  
2. Losing flows  
3. Gaining flows



شکل ۳. حالت‌های مختلف ارتباط جریان سطحی و زیرسطحی

زیرسطحی به صورت بی بعد تعریف می‌شوند. دبی تبادلی نرمال شده ( $q^*$ )، زمان ماندگاری بی‌بعد شده ( $t^*$ )، نسبت استغراق ( $h_s$ )، درصد دبی تبادلی ( $Q_p$ )، رینولدز جریان محیط متخلخل ( $Re^*$ )، چگونگی محاسبه آنها در روابط ۱-۵ ارائه شده‌اند.

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

$$t^* = \frac{RT}{L} kS_w \quad (2)$$

$$h_s = \frac{h}{H_b} \quad (3)$$

$$Q_p = \frac{Q_{ex}}{Q} \times 100 \quad (4)$$

$$Re^* = \frac{kS_w d_s}{\nu} \quad (5)$$

که  $k$ ، هدایت هیدرولیکی مصالح محیط متخلخل،  $A_s$  مساحت سطح تماس جریان سطحی و محیط متخلخل،  $RT$  زمان ماندگاری ذرات،  $h$  عمق بالادست جریان،  $H_b$  ارتفاع پشته،  $Q_{ex}$  دبی تبادلی کل،  $Q$  دبی جریان،  $d_s$  قطر متوسط مصالح محیط متخلخل،  $S_w$  شیب طولی سطح آب و  $\nu$  لزجت سینماتیک آب است. دبی تبادلی و زمان ماندگاری بی‌بعد شده در مطالعات زیادی به عنوان شاخص‌های مناسب ارائه شده‌اند [۳۸-۴۱]. هر یک از مشخصات آماری زمان ماندگاری مانند میانگین ( $RT_m$ ) و میانه ( $MRT$ ) زمان ماندگاری می‌تواند در رابطه قرار داده شده و بی‌بعد شوند.

زمان تبادل جریان هایپرریک یا 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 سطح برگردد. تحولات بیوشیمیایی و اکولوژیکی در منطقه هایپرریک به زمان تبادل جریان هایپرریک بستگی دارد [۱۱]. عمق جریان هایپرریک، ارتفاع نفوذ آب سطحی به داخل بستر را نشان می‌دهد. این عمق از نظر موقعیت تداخل آب سطحی و جریان‌های زیرزمینی و نیز عمق زیست‌بوم رودخانه حائز اهمیت است. در مورفولوژی‌های طبیعی که بیشتر سه‌بعدی هستند، گسترش جانبی منطقه هایپرریک هم می‌تواند مورد توجه باشد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با استفاده از بسته ردیابی ذرات، MODPATH، روی سطحی از پشته که در برخورد با جریان سطحی قرار داشته است، 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 مسیر خطوط جریان و زمان آنها تداخل محیط متخلخل را در نظر می‌گیرد، بنابراین سرعت نفوذ محاسبه‌شده سرعت جریان در منافذ خالی هر سلول است. بر این اساس، برای محاسبه دبی هر سلول، سطح هر سلول باید در تداخل و سرعت نفوذ ضرب شود. در نهایت، از مجموع دبی همه سلول‌ها، مقدار دبی تبادلی کل به دست خواهد آمد.

برای اینکه بتوان دبی تبادلی سه آزمایش انجام‌شده را با هم مقایسه کرد، شاخص‌های جریان سطحی و

#### 1. Residence Time

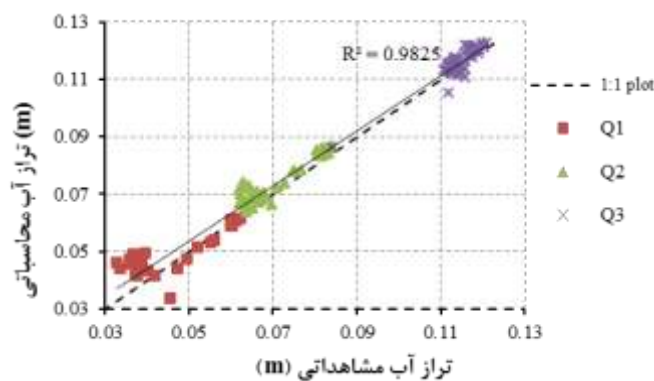
نتایج و بحث

اختلاف فشار می‌شوند. در بالادست پشته با به‌وجودآمدن نقاط ایستا و کندشدن سرعت، یک منطقه پرفشار در دماغه پشته ایجاد می‌شود و از طرفی، به دلیل دو قسمت شدن جریان و تنگ‌تر شدن مجرا در اطراف پشته، سرعت جریان به تدریج افزایش می‌یابد. افزایش سرعت جریان کاهش فشار را به همراه دارد. بنابراین، سبب خروج جریان در محیط پشته خواهد شد. با افزایش دبی، سطح استغراق افزایش یافته و حضور خطوط جریان در فضای داخل پشته افزایش یافته است. الگوی خطوط جریان هایپریک در شرایط غیرمستغرق، بسیار شبیه جریان‌های هایپریک ناشی از فرم بسترهای ریفل-پول و دیون دوعدی است. با افزایش دبی و افزایش سطح تماس جریان و پشته رسوبی، نقاط خروجی جریان‌های هایپریک گسترش عرضی پیدا کرده‌اند. البته، سطح پشته ناهمواری‌های موضعی هم دارد و نقاطی از سطح پشته که ماکزیمم محلی هستند، دچار کاهش فشار محلی شده و محل خروج خطوط جریان می‌شوند. در انتهای پشته به دلیل همگراشدن دو مجرا و برخورد خطوط جریان سطحی، کاهش سرعت و به‌وجودآمدن نقاط ایستایی یک منطقه پرفشار دیگر شکل می‌گیرد که با افزایش دبی، وسعت این منطقه گسترش پیدا کرده و همان‌طور که از خطوط جریان در شکل ۶ مشخص است، خطوط جریان هایپریک برگشتی نیز به وجود آمده است.

به منظور بررسی قابلیت مدل عددی شبیه‌سازی جریان سطحی، تراز آب شبیه‌سازی شده با داده‌های تراز آب مشاهده‌شده اطراف پشته در آزمایشگاه مقایسه شد. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی، مقدار ارتفاع زبری کف تغییر داده شد. در نهایت، یک مقدار زبری برای هر سه دبی با در نظر گرفتن خطای کلی مورد قبول واقع شد. شکل ۴ نمودار مقادیر محاسباتی و شبیه‌سازی شده تراز سطح آب و جدول ۱ شاخص‌های آماری مربوط به آن را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد ( $R^2=0.98$ ).

توزیع فشار

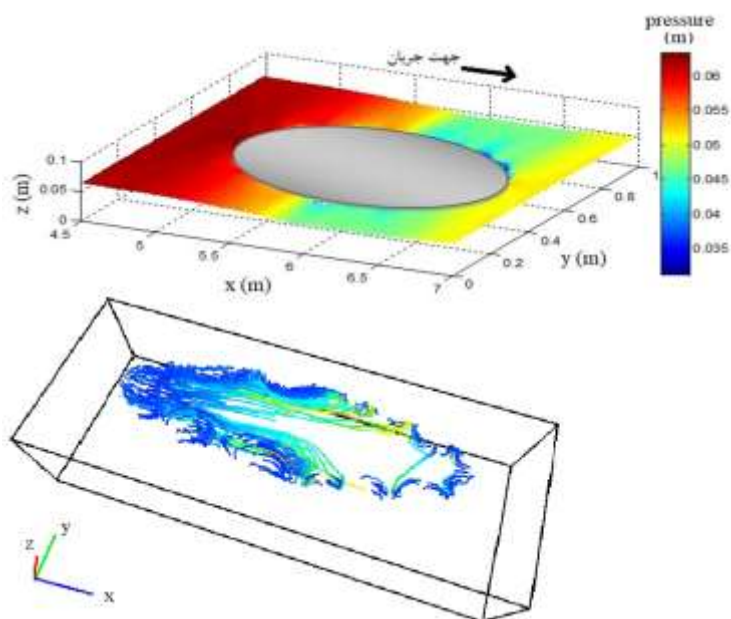
شکل ۵ توزیع فشار روی کف را برای استغراق نخست (Q1) نشان می‌دهد. درخور یادآوری است که در دو دبی پایین‌تر، پشته رسوبی به صورت نیمه‌مستغرق است، به گونه‌ای که جریان به دو قسمت تقسیم می‌شود و از اطراف پشته حرکت می‌کند. با افزایش دبی، شیب سطح آب و گرادیان هیدرولیکی بین بالادست و پایین‌دست پشته کاهش یافته است. با توجه به نتایج، بیشترین فشار در بالادست پشته ایجاد می‌شود. بر اثر برخورد جریان با مانع متخلخل، جریان به دو قسمت تقسیم می‌شود. تغییر مسیر جریان سبب ایجاد آشفتگی می‌شود و گردابه‌هایی در جریان سطحی درست می‌کند. این گردابه‌ها سبب ایجاد



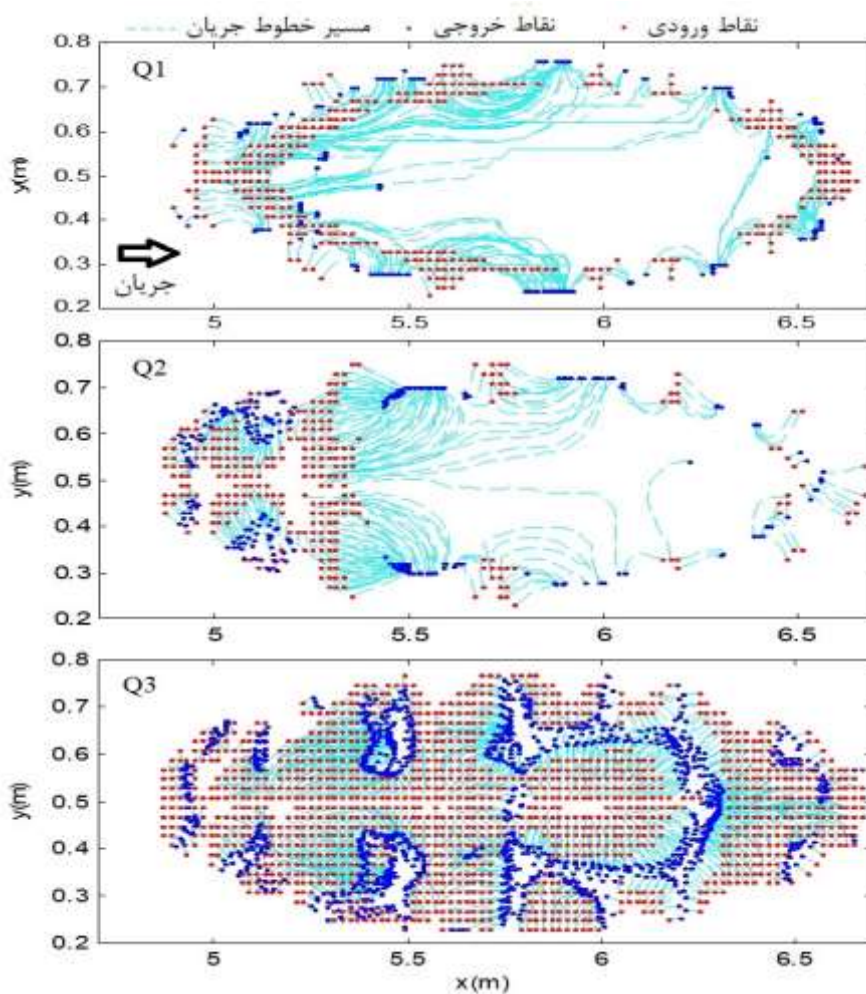
شکل ۴. نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز آب برای کل داده‌ها

جدول ۱. شاخص‌های خطا برای سه آزمایش و کل داده‌ها

کل داده‌ها	Q3	Q2	Q1	
۰/۰۰۴	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵	جذر میانگین مربعات (m) RMSE
۳/۶۹	۱/۰۶۳	۴/۷	۶/۳۶	میانگین درصد خطا % MPE



شکل ۵. توزیع فشار در اطراف پشته رسوبی و خطوط جریان شبیه‌سازی شده در مدل زیرسطحی



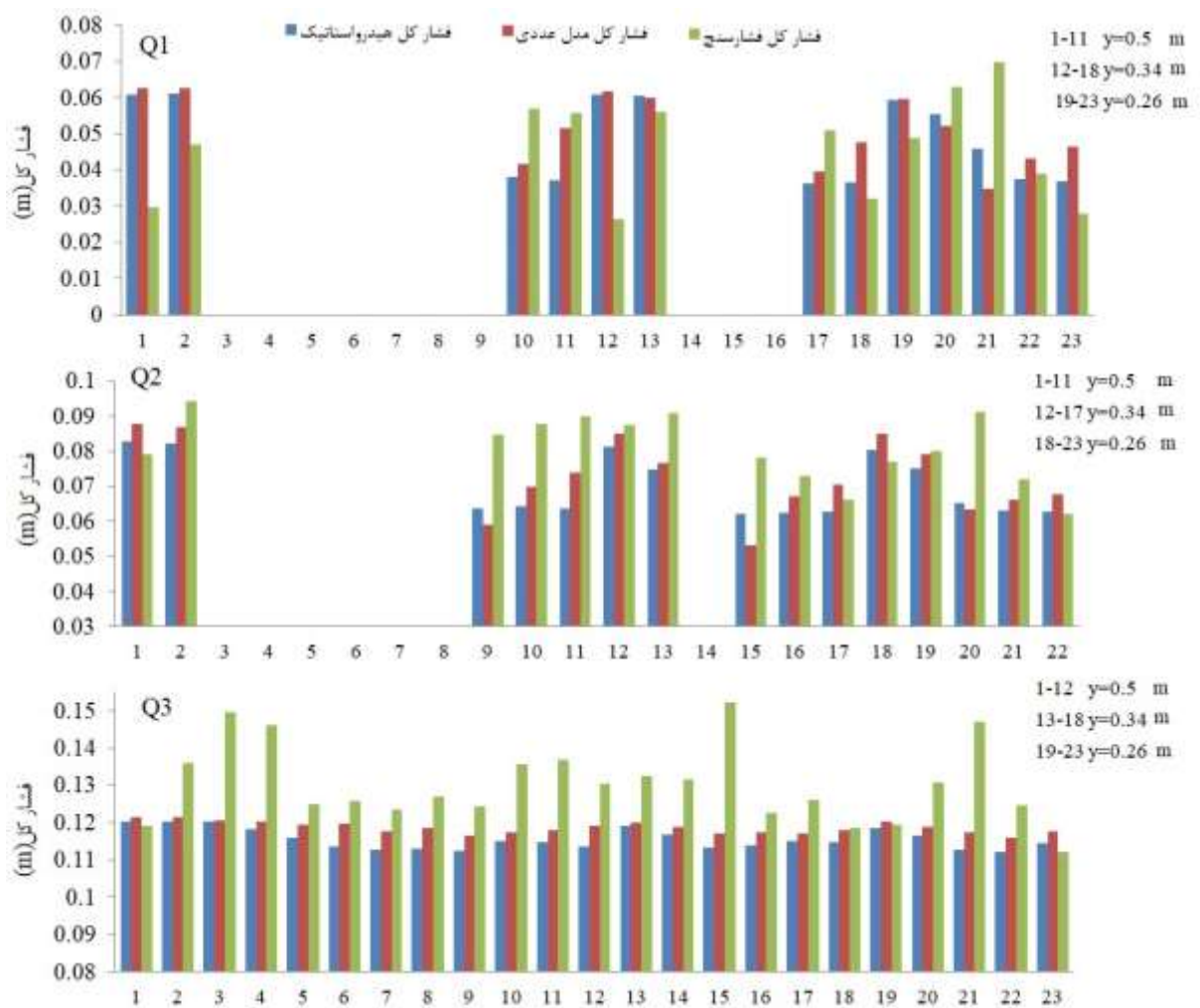
شکل ۶. خطوط جریان در دبی‌های مختلف (جهت جریان از چپ به راست است)



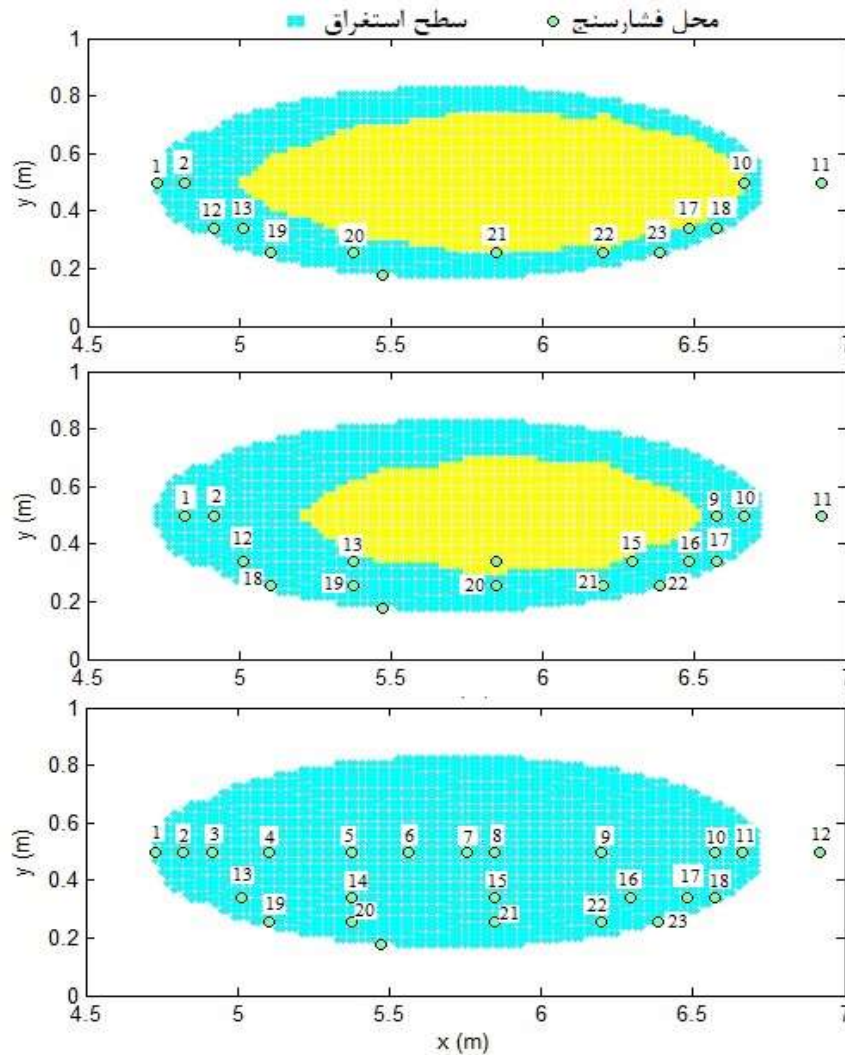
در انتهای پشته، دوباره جریان به حالت اولیه خود در بالادست، نزدیک می‌شود اما با توجه به تلفات آن در برخورد با پشته، تراز سطح آب از بالادست پایین‌تر خواهد بود. پروفیل فشار اندازه‌گیری شده از فشارسنج‌ها نیز به طور تقریبی از پروفیل تراز آب تبعیت می‌کند، هر چند در مکان‌هایی اختلاف دیده می‌شود. تغییرات فرود جریان در اطراف این مانع سه‌بعدی، در اطراف تاج پشته بیشتر و در بالادست و پایین‌دست کمتر است که به ناپایداری و آشفتگی جریان منجر می‌شود [۸]. این آشفتگی‌ها ممکن است سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری تراز سطح آب و در نتیجه، اختلاف بین این دو فشار شود. همچنین، این اختلاف می‌تواند ناشی از گردابه‌های کوچک نزدیک بستر باشد که بسیار بر فشار نزدیک بستر تأثیرگذارند، اما به دلیل کوچکی، اثر آن تا تراز سطح آب نمی‌رسد [۸ و ۱۱].

شکل ۷ نمودار تغییرات طولی فشار هیدرواستاتیک و فشار اندازه‌گیری شده از فشارسنج‌ها برای سه مقطع عرض‌های ۰/۵ (وسط کانال)، ۰/۳۴ و ۰/۲۶ متر را نشان می‌دهند. درخور یادآوری است که در نقاط خالی، فشارسنج‌ها در منطقه خشک هستند (شکل ۸).

فشار هیدرواستاتیک از بالادست به پایین‌دست روند کاهشی و سپس افزایشی دارد. در راستای مرکز کانال، جریان در برخورد با پشته رسوبی با کاهش عمق از آن عبور خواهد کرد که طبق معادلات جریان متغیر تدریجی در رژیم زیر بحرانی انتظار آن وجود دارد. در مقاطع طولی دیگر، به دلیل ساختار سه‌بعدی پشته رسوبی جریان در گذر از اطراف پشته در مجرای باریک‌تر قرار می‌گیرد و بنابراین سرعت افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود تراز سطح آب به دلیل تلفات ناشی از سرعت بیشتر، افت داشته باشد.



شکل ۷. مقادیر فشار هیدرواستاتیک، مدل عددی و اندازه‌گیری شده توسط فشارسنج



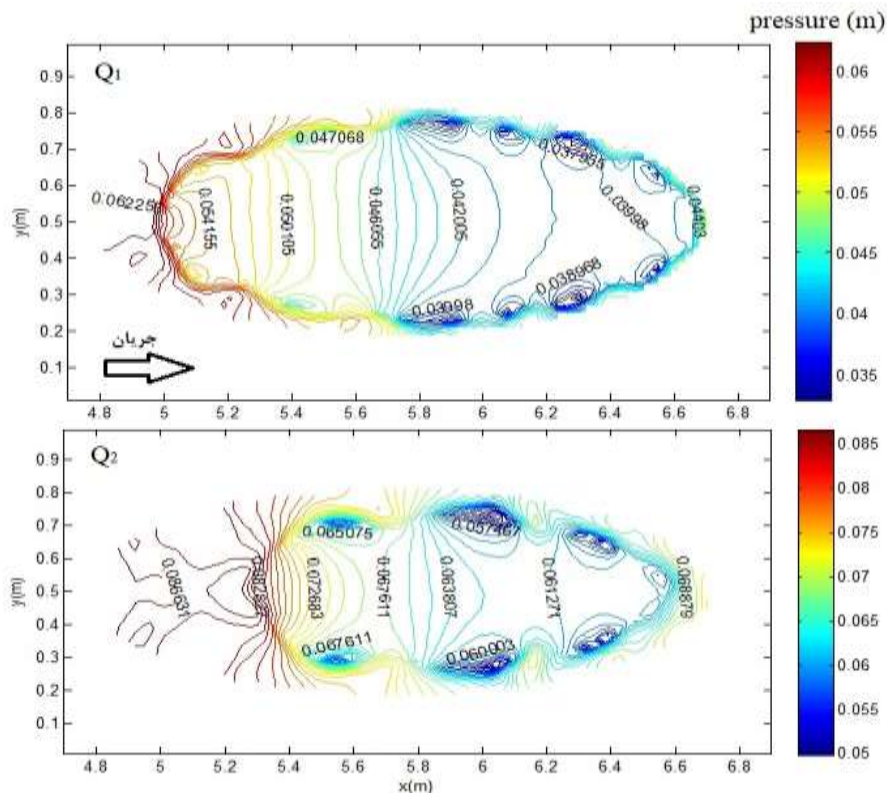
شکل ۸. جانمایی فشارسنج‌ها در طول و عرض پشته- (شماره‌ها براساس شکل ۷ است)

### جریان زیرسطحی و تبادل هایپرریک

جریان زیرسطحی با استفاده از مدل آب زیرزمینی MODFLOW شبیه‌سازی شد. شکل ۹ خطوط حد فاصل فشار در سطح ایستابی را برای شرایط نیمه‌مستغرق پشته نشان می‌دهد. با افزایش دبی، سطح ایستابی داخل پشته کاهش یافته است.

جدول ۲ مقادیر شاخص‌های بی‌بعد جریان سطحی و زیرسطحی برای آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد با افزایش دبی، شیب سطح آب، درصد دبی تبدالی ( $Q_p$ ) و شاخص بی‌بعد آن ( $q^*$ )، کاهش یافته است که با نتایج مطالعه ترات و همکارانش (۲۰۱۵) مطابقت دارد. با افزایش دبی، میانه زمان ماندگاری بی‌بعد ( $t_m^*$ )، کاهش یافته است. مقادیر بی‌بعد

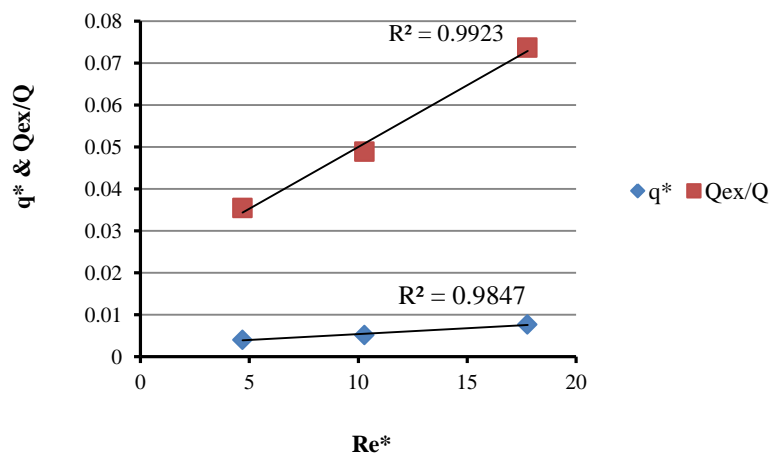
زمان ماندگاری میانگین مطابق نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش مرزدری و همکارانش (۲۰۱۰) است. در تحقیق ایشان رابطه بین زمان ماندگاری میانگین بی‌بعد و مورفولوژی پشته‌های رسوبی متناوب بررسی شده بود [۴۰]. برداشت پروفیل سطح آب و تخمینی از هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و دانه‌بندی، داده‌هایی هستند که می‌توان از منطقه مطالعاتی به‌راحتی به دست آورد، بنابراین با استفاده از این داده‌ها می‌توان یک شاخص با شکل ظاهری رینولدز برای محیط متخلخل تعریف کرد که رابطه آن پیش‌تر بیان شده است. شکل ۱۰ تغییرات شاخص بی‌بعد دبی تبدالی و درصد دبی تبدالی برحسب رینولدز جریان متخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۹. خطوط فشار در سطح ایستابی در شرایط غیرمستغرق Q1 و Q2

جدول ۲. شاخص‌های هیدرولیکی جریان سطحی و زیرسطحی

$t_{av}^*$	$t_m^*$	$q^*$	$Q_p\%$	$h_s$	$Re^*$	$Re_f$	$Fr$	$S_w$	$Q$ (lit/s)	$h$ (m)	آزمایش
۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۹۵	۷/۴	۰/۶۳	۱۴/۲۲	۹۳۰۰	۰/۱۹	۰/۰۱۳	۹/۵	۰/۰۶۳	۱
۰/۰۰۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۶۵	۴/۹	۰/۸۵	۸/۲۳	۱۶۱۵۰	۰/۲	۰/۰۰۷۵	۱۶/۵	۰/۰۸۵	۲
۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۳/۵	۱/۲	۳/۷۵	۲۴۵۰۰	۰/۱۹	۰/۰۰۳۴	۲۴	۰/۰۱۲	۳



شکل ۱۰. مقادیر بی بعد دبی تبدالی و درصد دبی تبدالی در مقابل رینولدز جریان زیرسطحی

نیز این توزیع را تأیید می‌کند. مقادیر چولگی نمودارهای توزیع، بین ۲- و ۲، نشان می‌دهد طول خطوط نیز می‌تواند توزیع لوگ نرمال داشته باشد. در حالت نیمه‌مستغرق، در نمودار توزیع زمان ماندگاری، میانه، انحراف معیار، چولگی و میانگین از دبی اول به دوم کاهش یافته است. بررسی نمودار توزیع طول خطوط جریان در این دو دبی نشان می‌دهد میانه، انحراف معیار و میانگین کاهش یافته است و جهت چولگی به عکس شده است. انحراف معیار بیشتر، در توزیع دو نمودار برای دبی اول نشان می‌دهد خطوط جریان از نظر زمان و طول پراکنش دارند. یعنی تعدادی خطوط با طول زیاد و زمان ماندگاری زیاد وجود دارد که میانگین را تحت تأثیر خود قرار داده‌اند. پراکنش در دبی دوم کاهش یافته است، بنابراین خطوط از نظر طول و زمان ماندگاری ذرات به هم نزدیک شده‌اند. با تغییر حالت جریان از غیر مستغرق به مستغرق، میانه زمان ماندگاری افزایش و انحراف معیار کاهش یافته است. نمودارها نشان می‌دهند با افزایش دبی، مقدار چولگی کاهش داشته است و زمان ماندگاری و طول مسیریها به توزیع لوگ نرمال متقارن نزدیک‌تر می‌شود.

مقدار میانه و میانگین در توزیع طول خطوط جریان از حالت غیر مستغرق به مستغرق کامل، کاهش یافته است که نشان می‌دهد به طور کلی خطوط جریان در حالت مستغرق طول کمتری در مقایسه با دو حالت قبل دارند. سطح استغراق افزایش داشته و به دلیل پستی و بلندی‌های موضعی روی سطح پشته، مناطق با اختلاف فشارهای موضعی افزایش پیدا کرده است، بنابراین طول خطوط جریان کاهش داشته است. کاهش چولگی و انحراف معیار نشان می‌دهد با افزایش دبی توزیع زمانی و طولی خطوط جریان به توزیع لوگ نرمال متقارن نزدیک‌تر می‌شود.

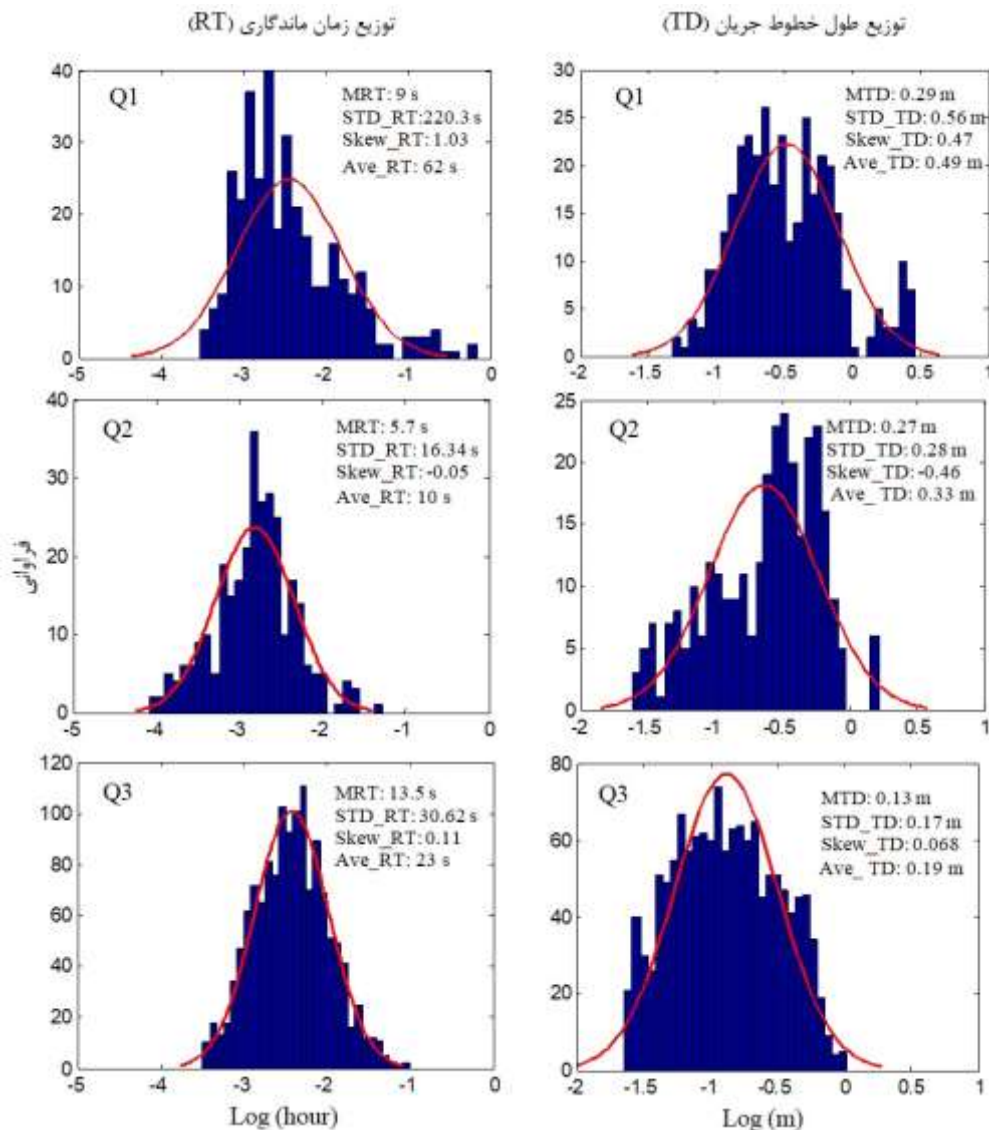
شکل ۱۲ نمودار حداکثر عرض و حداقل تراز خطوط جریان هایپرریک را در برابر درصد تجمعی دبی تبادلی نشان می‌دهد. مقادیر عرض نسبت به دو طرف جداره کانال گرفته شده است، چون پشته متقارن بوده است. اگر جهت بررسی خطوط جریان از سمت جداره‌ها به وسط پشته در نظر گرفته شود و در هر عرض، دبی هر خط جریان با دبی خطوط قبلی جمع شود، می‌توان درصد دبی تبادلی حمل‌شونده توسط خطوط جریانی که گسترش آنها تا یک عرض خاص است را به دست آورد. در نمودارهای توسعه عرضی، روند پلکانی مشاهده می‌شود؛ به دلیل متقارن بودن

به طور کلی، در فرم بسترهای مستغرق با افزایش عدد رینولدز، دبی تبادلی هایپرریک افزایش می‌یابد [۴، ۱۱، ۱۴ و ۲۸] و در ساختارهای نیمه‌مستغرق مانند پشته‌های رسوبی طبیعی با افزایش رینولدز، دبی تبادلی کاهش داشته است [۱۶ و ۱۷]. تغییرات دبی تبادلی وابسته به گرادیان فشار است که از تغییرات سرعت، گردابه‌های جریان و اختلاف استاتیکی سطح آب نشئت می‌گیرد. در فرم بسترهای مستغرق مانند دیون‌ها و ریفل‌ها، جریان هایپرریک ناشی از گردابه‌های نزدیک بستر و تغییرات سرعت است. در این ساختارها با افزایش دبی و به تبع آن رینولدز جریان، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند و سرعت بیشتر سبب ایجاد گردابه‌های قوی‌تری در نزدیک فرم بستر می‌شود، هر چند که این تغییر همیشه افزایشی نیست. چنانچه رینولدز جریان در یک ارتفاع ثابت از فرم بستر مستغرق آن قدر افزایش یابد که نسبت عمق جریان به ارتفاع فرم بستر زیاد شود، منطقه سرعت مؤثر جریان از فرم بستر دور شده و در نتیجه، گردابه‌های نزدیک فرم بستر کوچک می‌شود. در این حالت با افزایش رینولدز دبی تبادلی هایپرریک چندان تغییری نخواهد کرد، همان طور که این نتیجه در فرم بستر کوچک مطالعه ترات و همکارانش (۲۰۱۳) مشاهده شد. در پشته‌های رسوبی طبیعی، تغییرات دبی تبادلی هایپرریک بیشتر ناشی از اختلاف تراز سطح آب در مجراهای دو طرف پشته و بالادست و پایین دست است که معمولاً گرادیان عرضی بیشتر از طولی است. این اختلاف با افزایش دبی کاهش یافته و دبی تبادلی نیز کاهش می‌یابد [۱۷].

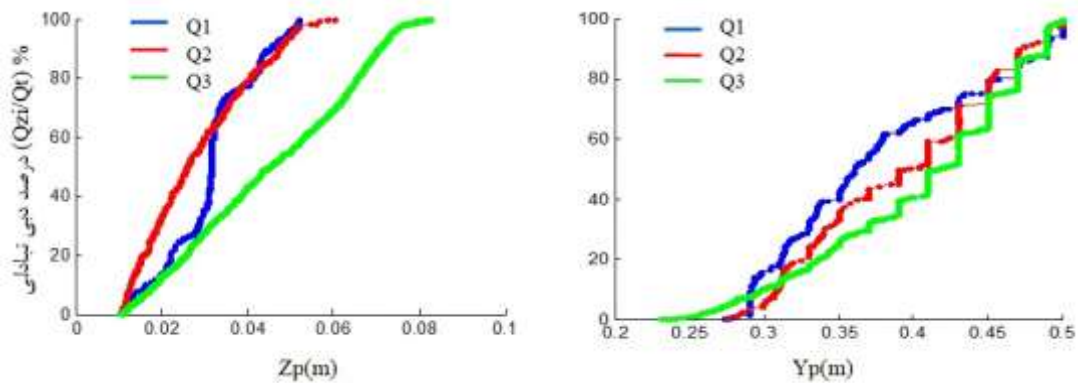
نمودار توزیع زمان ماندگاری وزنی (RT) و نمودار توزیع طول خطوط جریان در شکل ۱۱ برای دبی‌های یک تا سه رسم شده است. در این شکل‌ها، TD، طول جریان، MRT، زمان ماندگاری میانه، STD، انحراف معیار، Skew، چولگی و Ave، میانگین داده‌ها هستند. زمان ماندگاری وزنی خط جریان، زمانی است که از ضرب نسبت دبی انتقال داده‌شده به میانگین دبی انتقال به دست می‌آید که در بسیاری از مطالعات به جای زمان ماندگاری استفاده شده است، این کار برای کم کردن تأثیر خطوط جریان با زمان ماندگاری طولانی و دبی تبادلی کم انجام می‌شود [۱۴، ۱۷ و ۴۲]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد زمان ماندگاری جریان هایپرریک به طور کلی از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند، نتایج این مطالعه

ثابت از کل دبی تبدلی، حداکثر عرض خطوط جریان حامل این درصد دبی، با افزایش دبی جریان زیاد شده است که به دلیل افزایش استغراق است. در حالت مستغرق کامل ( $Q_3$ ) شیب تغییرات هر دو نمودار تقریباً ثابت است که نشان می‌دهد خطوط جریان هم گسترش عرضی و هم گسترش عمقی داشته‌اند. اما شیب دو نمودار دیگر در دو شکل تغییر کرده است. در دبی اول شیب تغییرات درصد دبی تبادل شده نسبت به حداقل تراز خطوط جریان بیشتر از حداکثر عرض خطوط است که نشان می‌دهد انتقال دبی تبدلی بیشتر با توسعه عرضی همراه بوده است تا توسعه عمقی. به طور کلی، شیب تغییرات درصد دبی تبدلی در برابر توسعه عمقی با افزایش دبی کاهش داشته است.

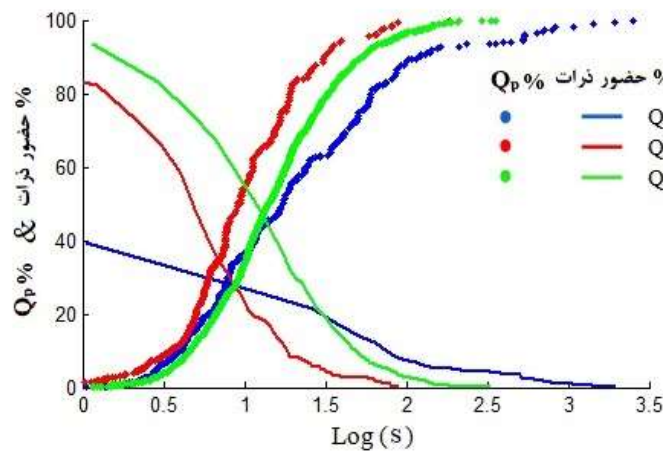
پشته، در یک عرض ثابت رشد دبی تبدلی مربوط به خطوط در دو سمت پشته است که اگر این خطوط مقدار دبی درخور توجهی را نسبت به سایر خطوط حمل کنند، رشد چشمگیری را به درصد تبادل خواهند داد. اما پلکانی بودن نمودار از طرفی دیگر نشان می‌دهد خطوط جریان در عرض‌های  $0/4$  تا  $0/5$  بیشتر از توسعه عرضی، توسعه عمقی داشته است و چون اندازه هر سلول در راستای عرض دو سانتی‌متر بوده است، با فواصل دو سانتی‌متری خطوط جریان در راستای عمقی توسعه یافته‌اند. بنابراین، در دبی‌های مستغرق، در عرض‌های میانی پشته، پروفیل دوبعدی خطوط در راستای طولی و عمقی غالب خواهد بود. به طور کلی، با افزایش دبی با در نظر گرفتن حمل درصدی



شکل ۱۱. نمودارهای توزیع فراوانی زمان ماندگاری (سمت چپ) و نمودارهای توزیع فراوانی طول خطوط جریان (سمت راست)



شکل ۱۲. درصد تبدالی دبی هر خط جریان ( $Q_{zi}$ ) در مقابل حداقل تراز خطوط جریان (سمت چپ) و بیشترین عرض خطوط جریان (سمت راست)



شکل ۱۳. درصد تبدالی هر خط جریان و حضور ذرات در برابر زمان ماندگاری

دبی تبادل شده مربوط به قسمت میانی نمودار است که نشان می‌دهد بیشترین حجم دبی تبادل شده، توسط خطوط جریانی انجام می‌شود که زمان ماندگاری نه خیلی بلند و نه خیلی کوتاه دارند. در واقع، دارای زمان ماندگاری در محدوده میانی دامنه تغییرات هستند.

از نقطه تلاقی دو نمودار مربوط به یک دبی می‌توان دریافت که چند درصد از خطوط جریان (هر ذره نماینده یک خط جریان است) قابلیت حمل چه درصدی از دبی تبدالی را دارند. برای دبی نخست محل تلاقی دو نمودار حدود ۲۸ درصد را برای حضور ذرات و دبی تبدالی و همچنین زمان هشت ثانیه را نشان می‌دهد. یعنی ۷۲ درصد خطوط جریان، خطوطی که زمان ماندگاری ذرات در آنها کمتر از هشت ثانیه است، ۲۸ درصد دبی تبدالی را حمل می‌کنند و ۲۸ درصد دیگر که زمان ماندگاری ذرات در آنها بیشتر از هشت ثانیه است، قادر خواهد بود ۷۲ درصد دبی تبدالی کل را در هر لحظه منتقل کنند. این

کم بودن ضخامت لایه آب در حجم تر پشته در دبی نخست سبب می‌شود جریان‌های هایپرریک به صورت عمودی فشرده‌تر شوند و در واقع به حالت دوبعدی نزدیک‌تر خواهد شد. شیب تغییرات درصد دبی در مقابل حداقل تراز، از حالت نیمه‌مستغرق به مستغرق کاهش یافته است؛ یعنی به دلیل افزایش لایه آب در پشته، از فشردگی خطوط کاسته شده است. یک شیب تغییرات شدید برای دبی اول در شکل حداقل تراز دیده می‌شود مربوط به محدوده ۳۰ تا ۷۰ درصد دبی، که خطوط جریان کاملاً دوبعدی بوده‌اند.

شکل ۱۳ نمودارهای درصد حضور ذرات و درصد دبی تبادل شده در برابر زمان ماندگاری را نشان می‌دهد. شیب نمودار درصد دبی تبدالی با افزایش زمان ماندگاری کم شده است که نشان می‌دهد خطوط جریان با طول زمان ماندگاری بیشتر دبی کمتری دارند و در نتیجه رشد کمتری به نمودار درصد دبی تبدالی داده‌اند. بیشترین شیب نمودارهای درصد

یافته است، همان طور که این شاخص‌ها برای مطالعات پشته‌های رسوبی طبیعی نیز روند کاهشی داشته‌اند [۱۶] و [۱۷]. گرادیان طولی سطح آب، تغییرات عرض مجرای جریان در گذر از اطراف پشته و گردابه‌های موضعی ناشی از تغییرات سه‌بعدی جهت خطوط جریان، از عوامل ایجاد جریان هایپریک در این مطالعه‌اند. زمان ماندگاری تحت تأثیر هدایت هیدرولیکی مصالح محیط متخلخل، طول فرم بستر و گرادیان هیدرولیکی جریان سطحی است، بنابراین، زمان ماندگاری نسبت به این عوامل بی‌بعد شده است. میانه زمان ماندگاری به عکس تغییرات دبی تبدالی تغییر می‌کند. در این مطالعه نیز با کاهش شاخص‌های بی‌بعد دبی تبدالی، شاخص بی‌بعد میانه زمان ماندگاری،  $t_m^*$  کاهش یافته است. مقادیر این شاخص‌ها در جدول ۲ آمده است. مقادیر شاخص‌های بی‌بعد نزدیک به نتایج پژوهش ترات و همکارانش (۲۰۱۵) بوده است. تغییرات رینولدز جریان زیرسطحی که با استفاده از شیب سطح آب و ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح محاسبه شد، همبستگی خوبی برای شاخص‌های درصد دبی تبدالی به دبی کل ( $Q_p$ ) و دبی تبدالی ( $q^*$ ) نشان می‌دهد، در این خصوص مطالعات در دامنه بیشتری از هیدرولیک جریان لازم است. تحلیل خطوط جریان نشان می‌دهد توزیع فراوانی زمان ماندگاری و طول خطوط جریان از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند. در دبی نخست هر دو نمودار توزیع زمان و طول خطوط چولگی مثبت دارند که نشان می‌دهد تعداد خطوط جریان با زمان ماندگاری زیاد طول بلند داشته و تعداد کمتری نسبت به سایر خطوط دارند. در پشته‌های طبیعی به دلیل اختلاف تراز فرم بستر و تراز سطح آب در دو طرف پشته معمولاً چولگی منفی در نمودار توزیع زمان برای دبی‌های کم مشاهده می‌شود؛ به دلیل وجود طول خطوط نسبتاً طولانی با زمانی ماندگاری طولانی که از یک مجرا به مجرای دیگر جریان دارد، است [۱۷]. اما در این مطالعه خطوط جریان بلند به دلیل تقارن پشته از وسط شروع شده و در دورترین نقطه با کمترین فشار خارج شده‌اند. با افزایش دبی از مقدار چولگی کاسته شده و توزیع‌ها به لوگ نرمال متقارن نزدیک‌تر می‌شوند. تحلیل فضایی گسترش خطوط جریان نشان می‌دهد با افزایش دبی، گسترش فضایی خطوط بیشتر می‌شود. در دبی نخست خطوط جریان گسترش عرضی بیشتری نسبت به گسترش عمقی داشته‌اند

نسبت‌ها برای دو دبی دیگر به این ترتیب است؛ در دبی دوم ۳۵ درصد خطوط جریان با زمان بیشتر از ۶/۵ ثانیه قابلیت حمل ۶۵ درصد دبی کل در هر لحظه را دارند و در دبی سوم، ۴۷ درصد خطوط جریان با زمان بیشتر از ۱۵ ثانیه، قادر است ۵۳ درصد دبی را در هر لحظه حمل کند. با افزایش دبی درصد دبی تبدالی منتقل شده توسط درصد بیشتری از خطوط صورت گرفته است. یعنی توزیع دبی در خطوط جریان با افزایش دبی یکنواخت‌تر شده است. مقدار افزایش درصد دبی تبدالی و میزان کاهش درصد حضور ذرات با افزایش دبی، بیشتر به هم نزدیک شده است.

### نتیجه‌گیری

تبادل جریان‌های هایپریک در محدوده وسیعی از ساختارهای مورفولوژیکی از مقیاس کوچک مانند دیون‌ها و ریپل‌ها تا مقیاس بزرگ مانند مئاندرها و حوضه‌ها اتفاق می‌افتد. در مقاله حاضر، تغییرات توزیع فشار و خصوصیات جریان هایپریک شامل دبی تبدالی، زمان ماندگاری و گسترش فضایی خطوط جریان هایپریک ناشی از یک پشته رسوبی متقارن، در سه دبی جریان بررسی شد. در دو دبی کمتر، پشته به صورت نیمه‌مستغرق و در یک دبی به صورت مستغرق کامل بوده است. توزیع فشار روی پشته با استفاده از اندازه‌گیری فشارسنج و شبیه‌سازی مدل عددی، در برابر فشار هیدرواستاتیک (تراز آب) مقایسه شد و نتایج نشان داد با افزایش دبی جریان روند تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده توسط فشارسنج و فشار هیدرواستاتیک بیشتر به هم نزدیک شده است که همسو با نتایج مشاهده‌شده قبلی [۸] است. در این مطالعه جریان در اطراف یک پشته رسوبی متقارن در یک فلوام آزمایشگاهی روی یک بستر نفوذناپذیر شبیه‌سازی شد که اختلاف تراز سطح آب در دو طرف آن صفر در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی جریان هایپریک براساس نتایج فشار به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی جریان سطحی صورت گرفت. با افزایش رینولدز و ثابت‌ماندن عدد فرود، شیب طولی سطح آب کاهش داشته است. دبی تبدالی هایپریک در سه آزمایش، دو دبی کمتر جریان غیر مستغرق و دبی سوم کاملاً مستغرق، تقریباً ثابت مانده است، هر چند که سطح تبادل جریان افزایش داشته است. شاخص بی‌بعد دبی تبدالی،  $q^*$  و درصد دبی تبدالی به دبی کل کاهش

- [7].Thibodeaux LJ, Boyle JDJN. Bedform-generated convective transport in bottom sediment. 1987;325(6102):341.
- [8].Tonina D, Buffington MJWRR. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. 2007;43(1).
- [9].Salehin M, Packman AI, Paradis MJWRR. Hyporheic exchange with heterogeneous streambeds: Laboratory experiments and modeling. 2004;40(11).
- [10].Käser DH, Binley A, Heathwaite AL, Krause SJHPAIJ. Spatio-temporal variations of hyporheic flow in a riffle-step-pool sequence. 2009;23(15):2138-49.
- [11].Cardenas MB, Wilson J, Zlotnik VAJWRR. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. 2004;40(8).
- [12].Stonedahl SH, Harvey JW, Packman AIJWRR. Interactions between hyporheic flow produced by stream meanders, bars, and dunes. 2013;49(9):5450-61.
- [13].Tonina D, Buffington MJWrr. Effects of stream discharge, alluvial depth and bar amplitude on hyporheic flow in pool-riffle channels. 2011;47(8).
- [14].Trauth N, Schmidt C, Maier U, Vieweg M, Fleckenstein JHJWRR. Coupled 3-D stream flow and hyporheic flow model under varying stream and ambient groundwater flow conditions in a pool-riffle system. 2013;49(9):5834-50.
- [15].Tonina D, Buffington MJJGC. Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects. 2009;3(3):1063-86.
- [16].Shope CL, Constantz JE, Cooper CA, Reeves DM, Pohl G, McKay WAJWRR. Influence of a large fluvial island, streambed, and stream bank on surface water-groundwater fluxes and water table dynamics. 2012;48(6).
- [17].Trauth N, Schmidt C, Vieweg M, Oswald SE, Fleckenstein JHJWRR. Hydraulic controls of in-stream gravel bar hyporheic exchange and reactions. 2015;51(4):2243-63.
- [18].Li Z, Wang Z, Pan B, Zhu H, Li WJQI. The development mechanism of gravel bars in rivers. 2014;336:73-9.
- [19].Ashworth PJJESP, Landforms. Mid-channel bar growth and its relationship to local flow strength and direction. 1996; 21(2):1996-103.

و از نظر عمودی فشرده تر بوده‌اند که می‌توان گفت در واقع با کاهش لایه آب پروفیل خطوط جریان به دوبعدی نزدیک می‌شود. بررسی درصد حضور ذرات و درصد دبی تبدالی در مقابل زمان ماندگاری نشان می‌دهد سهم هر خط جریان در انتقال درصدی از دبی تبدالی با افزایش دبی با توزیع یکنواخت‌تری شکل گرفته است یا به بیان دیگر با افزایش دبی، درصد دبی تبدالی انجام شده و درصد شرکت خطوط جریان حامل این مقدار دبی تبدالی به هم نزدیک‌تر شده است؛ توزیع لوگ نرمال متقارن‌تر بیان‌کننده این نکته است. به طور کلی، در شرایط این آزمایش‌ها دبی بیشتر برای انجام واکنش‌های بیوشیمیایی مانند دنیتریفیکاسیون مطلوب‌تر به نظر می‌رسد، چون زمان ماندگاری بیشتری دارند، اما برای فرایندهای تنفس هوازی جریان‌های پایین‌تر که زمان ماندگاری کمتری دارند، مطلوب‌ترند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر و مطالعه ترات و همکارانش (۲۰۱۵) نشان می‌دهد گرادیان هیدرولیکی ناشی از اختلاف استاتیکی فشار بین دو مجرای اطراف پشته تأثیر زیادی در میزان عملکرد جریان هاپیریک دارد. بنابراین، با وجود گرادیان عرضی در دبی‌های کم هم مقدار تبدالی دبی و هم زمان ماندگاری بیشتری ایجاد می‌شود.

#### منابع

- [1].Bjornn TC, Reiser DWJAFSSP. Habitat requirements of salmonids in streams. 1991;19(837):138.
- [2].Kaplan LA, Newbold JD. Surface and subsurface dissolved organic carbon. Streams and ground waters: Elsevier; 2000. p. 237-58.
- [3].Elliott AH, Brooks NHJWRR. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments. 1997;33(1):137-51.
- [4].Fox A, Boano F, Arnon SJWRR. Impact of losing and gaining streamflow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by dune-shaped bed forms. 2014;50(3):1895-907.
- [5].Hassan MA, Tonina D, Beckie RD, Kinnear MJHp. The effects of discharge and slope on hyporheic flow in step-pool morphologies. 2015;29(3):419-33.
- [6].Packman AI, Salehin M, Zaramella MJJoHE. Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. 2004;130(7):647-56.



- [20]. Trauth N, Fleckenstein JHJWRR. Single discharge events increase reactive efficiency of the hyporheic zone. 2017;53(1):779-98.
- [21]. Bray E, Dunne TJWRR. Subsurface flow in lowland river gravel bars. 2017;53(9):7773-97.
- [22]. Elliott AH, Brooks NHJWRR. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory. 1997;33(1):123-36.
- [23]. Ock G, Takemon Y, Sumi T, Kondolf GM, editors. Ecological significance of riverine gravel bars in regulated river reaches below dams. AGU Fall Meeting Abstracts; 2012.
- [24]. Zeng Q, Shi L, Wen L, Chen J, Duo H, Lei GJPo. Gravel bars can be critical for biodiversity conservation: A case study on Scaly-Sided Merganser in South China. 2015;10(5):e0127387.
- [25]. Sambrook Smith GH, Ashworth PJ, Best JL, Woodward J, Simpson CJFSV. The morphology and facies of sandy braided rivers: Some considerations of scale invariance. 2005:145-58.
- [26]. Sahay VK. Spatial Geometry of Channel Bar Deposits of Mississippi river, United States of America. International Basic and Applied Research. 2016;2(9):73-9.
- [27]. Kondolf GM, Wolman MGJWRR. The sizes of salmonid spawning gravels. 1993;29(7):2275-85.
- [28]. Cardenas MB, Wilson JJAiwr. Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bedforms. 2007;30(3):301-13.
- [29]. Janssen F, Cardenas MB, Sawyer AH, Dammrich T, Krietsch J, de Beer DJWRR. A comparative experimental and multiphysics computational fluid dynamics study of coupled surface-subsurface flow in bed forms. 2012;48(8).
- [30]. Kessler AJ, Glud RN, Cardenas MB, Larsen M, Bourke MF, Cook PLJL, et al. Quantifying denitrification in rippled permeable sands through combined flume experiments and modeling. 2012;57(4):1217-32.
- [31]. Gooseff MN, Anderson JK, Wondzell SM, LaNier J, Haggerty RJHPAIJ. A modelling study of hyporheic exchange pattern and the sequence, size, and spacing of stream bedforms in mountain stream networks, Oregon, USA. 2006;20(11):2443-57.
- [32]. Kasahara T, Wondzell SMJWRR. Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams. 2003;39(1):SBH 3-1-SBH 3-14.
- [33]. Storey RG, Howard KW, Williams DDJWRR. Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: A three-dimensional groundwater flow model. 2003;39(2).
- [34]. Stonedahl SH, Harvey JW, Detty J, Aubeneau A, Packman AIJWRR. Physical controls and predictability of stream hyporheic flow evaluated with a multiscale model. 2012;48(10).
- [35]. Hester E, Young K, Widdowson MJWRR. Mixing of surface and groundwater induced by riverbed dunes: Implications for hyporheic zone definitions and pollutant reactions. 2013;49(9):5221-37.
- [36]. Lautz LK, Siegel DIJAiWR. Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D. 2006;29(11):1618-33.
- [37]. Liu S, Chui TFMJG. Impacts of streambed heterogeneity and anisotropy on residence time of hyporheic zone. 2018;56(3):425-36.
- [38]. Chen X, Cardenas MB, Chen LJWRR. Three-dimensional versus two-dimensional bed form-induced hyporheic exchange. 2015;51(4):2923-36.
- [39]. Chen X, Cardenas MB, Chen LJWRR. Hyporheic Exchange Driven by Three-Dimensional Sandy Bed Forms: Sensitivity to and Prediction from Bed Form Geometry. 2018;54(6):4131-49.
- [40]. Marzadri A, Tonina D, Bellin A, Vignoli G, Tubino M. Semianalytical analysis of hyporheic flow induced by alternate bars. Water Resour. Res. 2010;46:W07531.
- [41]. Tsutsumi D, Laronne JB. Gravel-Bed Rivers: Process and Disasters: John Wiley & Sons; 2017.
- [42]. Sawyer AH, Cardenas MBJWRR. Hyporheic flow and residence time distributions in heterogeneous cross-bedded sediment. 2009;45(8).