

## بررسی آزمایشگاهی و عددی تبادلات هایپریک در حضور فرم بستر خیزاب و چالاب

نشاط موحدی<sup>۱</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۲\*</sup>، نیکو ترات<sup>۳</sup> و مهدی مفتاح هلقی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، 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

۳. پژوهشگر، دانشکده هیدروژئولوژی، مرکز تحقیقات محیط زیست هلمهولتز، لایپزیک، آلمان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۱/۱۳)

### چکیده

ناحیه هایپریک به ناحیه اشباع بلافاصله زیر بستر رودخانه گفته می شود که کارکرد بسیار مهمی در اکولوژی جانداران دارد. در این ناحیه، قسمتی از جریان آب سطحی اکسیژن و مواد مغذی را به جانداران می رساند و پس از طی زمان معینی دوباره به آب سطحی باز می گردد. تبادلات هایپریک بین جریان سطحی و جریان در محیط متخلخل رودخانه می تواند بر اثر وجود شکل های مختلف بستر رودخانه ایجاد شود. خیزاب ها و چالاب ها ویژگی های توپوگرافیکی هستند که در رودخانه های مستقیم، ماریچی و شاخه ای یافت می شوند. تغییرات فشار روی سطح این فرم بستر به ایجاد تبادل های هایپریک منجر می شود. تخمین دقیق میزان این تبادلات و زمان ماند جریان می تواند در پروژه های احیای رودخانه ها بسیار مفید باشد. بنابراین، در تحقیق حاضر ضمن بررسی آزمایشگاهی تأثیر فرم بستر خیزاب-چالاب بر تبادلات هایپریک، با به کارگیری روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، تغییرات فشار روی بستر شبیه سازی عددی شده و سپس مدل آب زیرزمینی و روش ردیابی ذرات برای شبیه سازی جریان در ناحیه هایپریک به کار گرفته شد. نتایج نشان داد حل کننده ایتروفوم با مدل شبیه سازی به روش گردابه های بزرگ به خوبی قادر است شرایط آزمایشگاهی را مدل سازی کند. به طوری که پروفیل سطح آب را برای کل آزمایش های تحقیق حاضر، با درصد خطای متوسط (MPE) ۱/۸ درصد برآورد می کند که با توجه به میزان اندک خطا در تخمین پروفیل سطح آب، می تواند تخمین دقیقی از فشار روی سطح فرم بستر و به دنبال آن میزان تبادلات هایپریک ارائه کند. بررسی مشخصات ناحیه هایپریک نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز، تبادلات هایپریک افزایش یافته و زمان ماندگاری کاهش می یابد. همچنین، نتایج تحقیق حاضر نشان داد نمودارهای زمان ماند از توزیع مقادیر حدی تبعیت می کنند. در تحقیق حاضر، به طور متوسط ۲۰ درصد جریان سطحی در تبادل با جریان زیرسطحی است.

**کلیدواژگان:** اوپن فوم، تبادلات هایپریک، خیزاب-چالاب، زمان ماند.

## مقدمه

رودخانه‌ها سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که انواع فرایندهای شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی در آنها اتفاق می‌افتد. ناحیه‌های هاپیریک<sup>۱</sup>، یک ناحیه‌اشباع بینابینی زیر بستر رودخانه و جداره‌های آن است که شامل بخشی از جریان رودخانه می‌شود که به داخل بستر نفوذ کرده است (شکل ۱). عبارت هاپیریک برای نخستین بار توسط ارقیدن (۱۹۵۹) مطرح شد که در واقع ترکیب پیشوند یونانی «hypo» با کلمه ریشه «rheos» است و جریان زیرین معنا می‌دهد [۱]. هنگامی که جریان در مسیر رودخانه حرکت می‌کند، تبدالی بین جریان رودخانه و بستر زیر رودخانه به وجود می‌آید. اختلاط جریان‌های هاپیریک به وسیله سلول‌های چرخشی‌ای رخ می‌دهد که جریان رودخانه را به سمت آبرفت هدایت می‌کنند (جریان‌های رو به پایین<sup>۲</sup>)، مدتی در آنجا باقی می‌گذارند و دوباره به داخل رودخانه باز می‌گردانند (جریان‌های رو به بالا<sup>۳</sup>) که این عمل با عنوان «تبادلات هاپیریک<sup>۴</sup>» معرفی می‌شود [۲]. زمانی که طول می‌کشد جریان رودخانه از بین رسوبات زیر بستر رودخانه عبور کند و دوباره به سطح بازگردد، به عنوان زمان ماند<sup>۵</sup> تعریف می‌شود. زمان ماند مهم‌ترین خصوصیت ناحیه هاپیریک است، زیرا واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی که داخل رسوبات رخ می‌دهد، به زمانی بستگی دارد که جریان رودخانه در ارتباط با محیط زیر رودخانه است [۳].

تبادلات هاپیریک، مواد محلول و معلق، مانند مواد مغذی، آلاینده‌ها، کربن آلی و اکسیژن را به داخل ناحیه هاپیریک حمل می‌کند، در نتیجه شرایط اکولوژیکی و چرخه مواد غذایی را در این ناحیه تحت تأثیر قرار می‌دهد. جریان سطحی‌ای که وارد منطقه هاپیریک می‌شود، معمولاً اکسیژن زیاد داشته و در معرض نور زیاد قرار دارد، و با آب زیرسطحی‌ای مخلوط می‌شود که اغلب اکسیژن ناچیز و عاری از نور دارد. مخلوط شدن جریان با ترکیب‌های شیمیایی مختلف، تنوع میکروبی را آسان می‌کند و نتیجه متابولیسم میکروبی ممکن است به شماری از واکنش‌ها مانند اکسیداسیون کربن آلی، معدنی شدن مواد مغذی،

نیتروزن‌دهی و غیره منجر شود. افزایش واکنش‌های بیوشیمیایی، حتی در ناحیه کوچکی از هاپیریک، می‌تواند به طور درخور توجهی خصوصیات شیمیایی جریان خروجی از حوضه را تغییر دهد [۱].

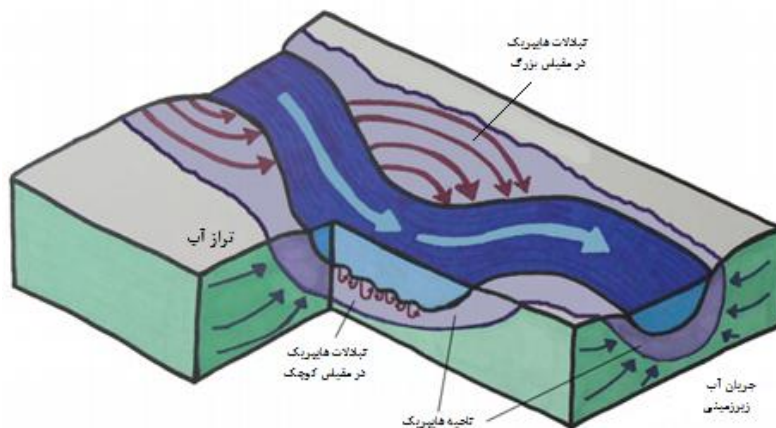
عوامل متعددی مانند خصوصیات رسوب، تراز آب زیرزمینی و توپوگرافی بستر، بر تبادلات هاپیریک و اندازه ناحیه هاپیریک تأثیرگذارند [۴]. تبادل آب بین جریان سطحی و ناحیه هاپیریک تابع اختلاف فشار در مقیاس‌های مختلف است. در مقیاس حوضه‌ای<sup>۶</sup>، تبادل وقتی رخ می‌دهد که بین تراز رودخانه و تراز آب زیرزمینی اختلاف وجود داشته باشد. در مقیاس کوچک‌تر، مقیاس بازه‌ای از رودخانه<sup>۷</sup>، اثر متقابل بین جریان رودخانه و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، مانند دیون، توالی‌های خیزاب-چالاب<sup>۸</sup> و توالی پله‌ها<sup>۹</sup> سبب ایجاد اختلاف فشار خواهد شد [۵].

دیون‌ها به‌وفور در رودخانه‌ها، مصب‌های جذر و مدی و خلیج‌ها وجود دارند. تایبادوکس و بویل (۱۹۸۷) نخستین کسانی بودند که به طور مشاهده‌ای نشان دادند در یک فرم بستر دیون، جریان‌های هاپیریک به‌وسیله گرادیان‌های فشار دینامیکی در امتداد فرم بستر ایجاد می‌شوند، به‌طوری که در مناطق پرفشار جریان به داخل فرم بستر هدایت شده و در مناطق کم‌فشار دوباره به داخل جریان برمی‌گردد [۶]. پس از آن، محققان زیادی به بررسی تبادلات هاپیریک در فرم بستر دیون به‌طور آزمایشگاهی [۷-۹] و عددی [۱۰-۱۴] پرداختند.

خیزاب‌ها و چالاب‌ها ویژگی‌های توپوگرافیکی هستند که در رودخانه‌های مستقیم، مارپیچی و شاخه‌ای یافت می‌شوند و به عنوان عنصر اصلی در شروع و توسعه رودخانه‌های مارپیچی در نظر گرفته می‌شوند. تغییرات هیدرودینامیکی خیزاب‌ها و چالاب‌ها شرایط زیستگاهی متنوعی را برای گونه‌های مختلف ماهی و مراحل مختلف زندگی آنها فراهم می‌کنند. این موضوع سبب ایجاد خیزاب‌ها و چالاب‌های مصنوعی در پروژه‌های احیای رودخانه‌ها شده است [۱۵].

6. Catchment, Basin or Watershed Scale  
7. Reach Scale  
8. Riffle-pool sequences  
9. Step

1. Hyporheic Zone  
2. Downwelling  
3. Upwelling  
4. Hyporheic Exchange  
5. Residence time



شکل ۱. نمایی کلی از جریان‌های هاپیریک [۴]

(شرط مرزی no flow برای سطح فرم بستر) صورت گرفت و فشارهای به‌دست‌آمده از این مدل به عنوان شرط مرزی ورودی برای مدل‌سازی قسمت متخلخل با استفاده از مدل آب زیرزمینی MIN3P به کار رفت [۱۸].

همان‌گونه که سوابق تحقیق نشان می‌دهد بیشتر مطالعات آزمایشگاهی و عددی صورت‌گرفته در زمینه تبادلات هاپیریک، بر فرم بستر دیون و با بستر ماسه‌ای متمرکز بوده‌اند. بنابراین، در مقاله حاضر سعی شده است ضمن بررسی آزمایشگاهی تبادلات هاپیریک در فرم بستر خیزاب-چالاب روی بستر شنی، برآورد دقیقی از میزان فشار در سطح فرم بستر و به دنبال آن، خصوصیات ناحیه هاپیریک ارائه شود.

#### مواد و روش‌ها

##### مدل آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌های تحقیق حاضر در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض یک متر و ارتفاع ۰/۸ صورت گرفت. مخزن انتهایی کانال به حجم تقریبی ۷/۸ مترمکعب، آب مورد نیاز به‌منظور چرخش جریان را توسط پمپ به داخل کانال فراهم می‌کرد. دریچه پروانه‌ای نیز در انتهای کانال به‌منظور تنظیم عمق جریان تعبیه شده بود. کلیه اندازه‌گیری‌های عمودی با استفاده از عمق‌سنج دیجیتال به دقت ۰/۱ میلی‌متر که روی ارايه نصب شده بود، صورت می‌گرفت. ارايه مد نظر به‌راحتی در طول و عرض کانال حرکت می‌کرد.

طبق تحقیقات لئوپد و ولمن (۱۹۵۷) و کلر (۱۹۷۱) در رودخانه‌هایی که بستر خیزاب-چالاب در آن‌ها به‌طور

نخستین مطالعه در زمینه تبادلات هاپیریک در رودخانه‌های شنی همراه با بستر خیزاب-چالاب-بار توسط تونینا و بافینگتن (۲۰۰۷) صورت گرفت. تأثیر دبی جریان و دامنه فرم بستر بر جریان‌های هاپیریک با استفاده از تزریق فلورسین به داخل جریان و ثبت میزان کاهش آن با زمان بررسی شد. فشارهای دینامیک نیز در سطح و داخل بستر رسوبی با استفاده از پیرومتر ثبت می‌شد که نتایج آن برای مقایسه با مدل عددی فلونت استفاده شد. با مقایسه فشارهای دینامیک و فشارهای هیدرواستاتیک در شرایط مختلف دبی و دامنه فرم بستر، نتایج آنان نشان داد استفاده از فشارهای هیدرواستاتیک (که اندازه‌گیری آن در شرایط صحرائی راحت‌تر است) می‌تواند در جریان‌های زیاد و با دامنه فرم بسترهای کوچک، جایگزین مناسبی برای فشارهای دینامیک باشد [۱۶]. ژو و اندری (۲۰۱۳) تأثیر خیزاب-چالاب بر میزان تبادلات هاپیریک و عمق نفوذ آن به داخل بستر شنی در حضور فرم بستر خیزاب-چالاب (در یک طول موج و دامنه ثابت) را بررسی کردند. با استفاده از تزریق سدیم کلرید به داخل جریان، دبی عمودی هاپیریک و با تزریق جوهر از جداره کانال به درون بستر، به‌طور مشاهده‌ای خطوط جریان زیرسطحی و عمق هاپیریک را برآورد کرده و در نهایت، مدل Flow3D را برای تخمین خصوصیات ناحیه هاپیریک برای شرایط هیدرولیکی مختلف ارزیابی کردند [۱۷]. ترات و همکارانش (۲۰۱۳) به بررسی عددی تبادلات هاپیریک در حضور خیزاب-گوداب تحت شرایط مختلف آب زیرزمینی محصور پرداختند. مدل‌سازی جریان سطحی با استفاده از بسته نرم‌افزاری OpenFOAM و با فرض بستر نفوذناپذیر

رسوبات اندازه متوسط ( $d_{50}$ ) ۶/۸ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ( $\sigma_g$ ) ۱/۵ داشتند. عمق بستر رسوبی ۳۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. این انتخاب با توجه به مطالعه تاییدوکس و بویل (۱۹۸۷) صورت گرفت که بیان کردند عمق جریان‌های هایپرریک تا پنج برابر ارتفاع فرم بستر خواهد رسید [۶]. آزمایش‌ها برای سه دبی ۱۹، ۱۱/۶ و ۰/۸۶ لیتر بر ثانیه انجام پذیرفت. در جدول ۱، پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌های صورت‌گرفته ارائه شده است.

پس از ایجاد هندسه مد نظر، پمپ روشن شده و جریان به آرامی در دبی‌های کم وارد کانال می‌شد. ابتدا، دریچه انتهایی کانال بالا نگه داشته می‌شد تا سطح آب در کانال کمی بالا بیاید، سپس دبی جریان را به مقدار مد نظر رسانده و دریچه به آرامی به طور کامل باز می‌شد تا جریان آزاد داخل محیط متخلخل برقرار شود. دبی جریان و دریچه انتهایی به گونه‌ای تنظیم می‌شد که ضمن استغراق کامل فرم بستر، هیچ‌گونه حرکت رسوبی ملاحظه نشود. پس از اطمینان از توسعه یافتگی جریان، برداشت داده‌های مورد نیاز برای تعیین مشخصات ناحیه هایپرریک آغاز می‌شد.

طبیعی شکل می‌گیرد، طول موج فرم بستر ۳ تا ۷ برابر عرض آبراهه است. همچنین، طبق مطالعه مونتگمری و همکارانش (۱۹۹۵)، در رودخانه‌هایی که انتقال رسوب به دلیل حضور موانع در سر راه جریان وجود دارد، طول موج فرم بستر می‌تواند برابر عرض آبراهه در نظر گرفته شود [۱۸]. بنابراین، در آزمایش‌های تحقیق حاضر، طول موج یک متر برای کلیه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به طول کانال، پنج سیکل متوالی از فرم بستر خیزاب - چالاب، با دامنه ۶/۸ سانتی‌متر (فاصله تاج خیزاب تا کف چالاب) و طول موج یک متر با استفاده از شابلون چوبی از پیش ساخته‌شده، طبق رابطه سینوسی زیر، ایجاد شد (رابطه ۱).

$$z = A \sin(\lambda x) \quad (1)$$

که در آن  $A$  دامنه فرم بستر و  $\lambda$  طول موج است.  $x$  فاصله در راستای طولی کانال و  $z$  ارتفاع فرم بستر است. نسبت دامنه فرم بستر به طول موج آن ۰/۰۶۸ است که طبق تحقیق بافینگتن و مونتگمری (۱۹۹۹) امکان تشکیل چنین فرم بستری در رودخانه‌های شنی وجود دارد [۱۹]. شکل ۲ بستر نهایی خیزاب-چالاب ایجادشده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فرم بستر خیزاب-چالاب

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی آزمایش‌های صورت‌گرفته

آزمایش	دبی (لیتر بر ثانیه)	عمق متوسط جریان (متر)	سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)
آزمایش ۱	۱۱/۶	۰/۰۶۷	۰/۱۷۱
آزمایش ۲	۱۹	۰/۰۷۹	۰/۲۳۸
آزمایش ۳	۲۲/۹	۰/۰۸۶	۰/۲۶۴

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 + \alpha) \rho_a \quad (3)$$

که در آن چگالی آب و چگالی هواست. معادله انتقال فصل مشترک و معادله پیوستگی برای جریان دوفازی غیر قابل تراکم به ترتیب به صورت روابط ۴ و ۵ هستند:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla \alpha = 0 \Rightarrow \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \alpha) = \alpha \nabla \cdot (\bar{U}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (\bar{U}) = 0 \quad (5)$$

بنابراین، معادله انتقال فصل مشترک برای جریان دوفازی غیر قابل تراکم به صورت رابطه ۶ خواهد بود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \alpha) = 0 \quad (6)$$

معادله مومنتم نیز به صورت رابطه ۷ است:

$$\frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu \left( (\nabla \bar{U})^T + \nabla \bar{U} \right) \right) + F_\sigma \quad (7)$$

قسمت آخر معادله یادشده، بیان کننده اثر نیروی کشش سطحی است. عبارت  $\bar{U} \bar{U}$  تانسور تنش رینولدز است. معادلات یادشده، RANS نامیده می شوند که مدل های آشفتگی مختلفی برای تخمین تانسورهای تنش رینولدز ارائه شده است. طبق توصیه مک شری و همکارانش (۲۰۱۷)، در تحقیق حاضر از مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) استفاده شد [۲۰]. یکی از مدل های مشهور آشفتگی به روش گردابه های بزرگ (LES)، مدل دینامیکی اسماکورینسکی<sup>۳</sup> است که در تحقیق حاضر استفاده شد [۲۱]. الگوریتم حل simple برای حل مسائل پایا و الگوریتم های حل PISO و PIMPLE برای حل مسائل transient استفاده می شوند. اما از آنجا که مدل آشفتگی LES در تحقیق حاضر ارزیابی می شود، از حل کننده های پایا نمی توان استفاده کرد. در نتیجه، در تحقیق حاضر به منظور حل قسمت های فشار و سرعت در معادلات ناویر استوکس، الگوریتم PIMPLE به کار برده شده است.

نخستین و مهم ترین مرحله شبیه سازی عددی، ساخت مش است. برای ساخت مش از کد نوشته شده در نرم افزار

پس از برقراری شرایط هیدرولیکی یادشده و اطمینان از توسعه یافتگی جریان، پروفیل سطح آب قرائت شده و سرعت جریان نیز با استفاده از یک دستگاه سرعت سنج میکرو اندازه گیری می شد. همچنین، به منظور تعیین سرعت در بستر رسوبی، تزریق ماده رنگی در نزدیکی جداره کانال صورت می گرفت. ماده رنگی مد نظر پرمنگنات سدیم بود که به طور ثقلی با استفاده از میله ای به قطر داخلی سه میلی متر و سرنگی که روی آن قرار داده شده بود، در عمق ها و مکان های مختلف داخل بستر رسوبی تزریق می شد. با ثبت زمان و طول مسیر طی شده، سرعت داخل محیط متخلخل برآورد می شد. کلیه اندازه گیری ها در سیکل وسط (سیکل سوم)، در فاصله یک چالاب تا چالاب بعدی صورت می گرفت.

### شبیه سازی عددی

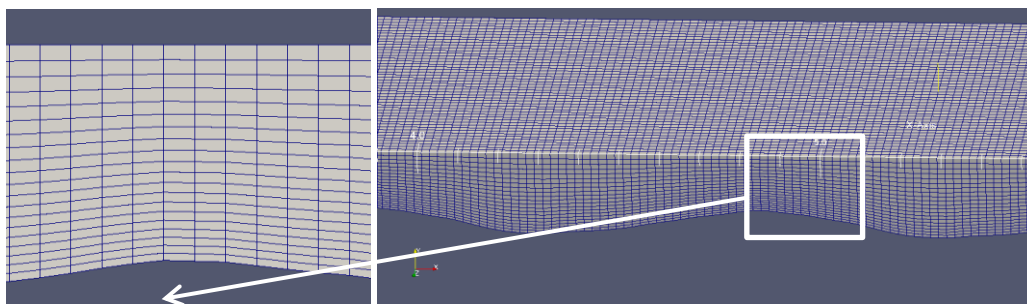
#### شبیه سازی جریان سطحی

در تحقیق حاضر از نرم افزار متن باز اوپن فوم (OpenFOAM) به منظور شبیه سازی جریان سطحی استفاده شد که معادلات حاکم را به روش حجم محدود حل می کند. حل کننده های مختلفی با توجه به مشخصات میدان حل ارائه شده است که در بین آن ها حل کننده interFoam برای حل جریان دو فازی، غیر قابل تراکم، هم دما و مخلوط نشدنی مناسب است. برای شبیه سازی جریان دوفازی در این حل کننده، از مدل یک سیال<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این مدل فقط به حل یک دسته معادلات پایستاری برای هر دو فاز نیاز است. این حل کننده از روش حجم سیال<sup>۲</sup> برای تعیین سطح آزاد آب (مرز بین هوا و آب) استفاده می کند که روش یادشده به تخمین کسری از سیال در هر یک از سلول های محاسباتی وابسته است. معادله کسر حجمی به صورت رابطه ۲ است:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (2)$$

که U میدان سرعت و  $\alpha$  کسر حجمی آب و هواست. مقدار  $\alpha$  برای فاز مایع (آب) یک، برای فاز هوا صفر و برای فصل مشترک بین صفر و یک تغییر می کند. چگالی سیال داخل هر سلول مش می تواند با استفاده از کسر حجمی، که به عنوان کسر فازی  $\alpha$  نیز شناخته می شود، تخمین زده شود (رابطه ۳):

بود. همچنین، در راستای عمق کانال مش به صورت غیر یکنواخت با رزولوشن ۲۰ در نظر گرفته شد، به طوری که با نزدیک شدن به فرم بستر، اندازه مش ریزتر می شد. شکل ۳، شمایی از هندسه مش خورده کانال را نشان می دهد. مش شامل سلول های شش وجهی بود که در مجموع تعداد سلول های محاسباتی، ۳۶۶۵۲۰ سلول بودند. در تحقیق حاضر به منظور شبیه سازی جریان سطحی، هندسه کانال کاملاً مشابه آزمایشگاه انتخاب شده و تعداد پنج سیکل خیزاب-چالاب بررسی شد.



شکل ۳. شمایی از هندسه مش خورده کانال در فاصله بین دو چالاب متوالی

با معرفی یک تابع دیواره برای شرط مرزی در سطح فرم بستر، شرایط ناحیه متخلخل زیرین (با اعمال زبری ای معادل اندازه متوسط مصالح بستر)، شبیه سازی شد. برای بقیه مرزها هم شرط گرادیان صفر در نظر گرفته شد. برای همگراشدن حل، باید باقی مانده خطاها کمتر از یک مقدار مشخصی شود. این امر در فایلی به نام fvsvolution صورت می گیرد که برای هر یک از پارامترها این مقدار  $10^{-7}$  معرفی شد. این باقی مانده ها در فایل های خروجی چاپ شده توسط نرم افزار هنگام حل و انتهای آن درخور توجه اند. پس از اطمینان از همگرایی حل، به منظور تحلیل نتایج، نیاز به نرم افزاری است که قابلیت خواندن خروجی های اوپن فوم را داشته باشد. یکی از این نرم افزارها paraview است که نوعی نرم افزار متن باز است و قابلیت اندازه گیری، محاسبه، رسم نمودار و استخراج داده را دارد.

#### شبیه سازی جریان زیرسطحی

برای حل جریان محیط متخلخل زیرین، دو دسته معادلات داری و پیوستگی با داشتن توزیع فشار در امتداد فرم بستر، کوپل می شوند. در تحقیق حاضر فشار روی سطح فرم بستر که با استفاده از حل جریان سطحی (اوپن فوم) به دست آمده بود، به عنوان شرط مرزی روی مرز بالا (سطح فرم بستر) در

Matlab توسط مؤلفان استفاده شد، که خروجی نهایی آن فایل blockMeshDict بوده که یک دیکشنری برای ساخت مش پایه است. این کد می تواند به راحتی هندسه های مختلف فرم بستر و اندازه مش در هر راستا را تغییر دهد و فایل بلاک مش را چاپ کند. اندازه های مختلف مش اجرا شد و در انتهای هر اجرا، پروفیل سطح آب و پروفیل های سرعت با مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. در نهایت، اندازه مش در راستای طول و عرض کانال ۰/۰۲ متر انتخاب شد که نتایج آن به نتایج آزمایشگاهی نزدیک

شرایط مرزی که باید روی هر مرز اعمال شود، در واقع معرف شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار ثابت یا داشتن یک گرادیان در آن مرز است. در نرم افزار اوپن فوم باید شرط مرزی را برای هر یک از متغیرهای سرعت و فشار برای تمامی مرزهای آن (مرز ورودی، خروجی، دیواره ها و سطح آب) معرفی کرد. برای سرعت در ورودی شرط مرزی سرعت، در خروجی شرط مرزی گرادیان صفر، و برای جداره ها و کف شرط مرزی عدم لغزش انتخاب شد. برای مرز بالا نیز از شرط مرزی فشار استفاده شد. برای فشار در ورودی، جداره ها و کف از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شد. برای شرط مرزی بالا و خروجی، شرط مرزی فشار معرفی شد. در حل جریان های دوفازی، باید شرط اولیه ای برای سلول های دارای فاز آب و هوا معرفی شود که این امر در فایلی به نام alpha.water صورت می گیرد، که با توجه به تراز سطح آب در آزمایشگاه، مقدار اولیه ای به مدل معرفی شد. برای مدل آشفتگی به کار برده شده در تحقیق حاضر، لازم است فایلی به نام nutSgs، که در واقع متغیر لزجت دینامیکی است، به مدل معرفی شده و برای آن نیز شرایط مرزی برای هر یک از مرزها اعمال شود. یکی از نوآوری های تحقیق حاضر در همین فایل اعمال شد که

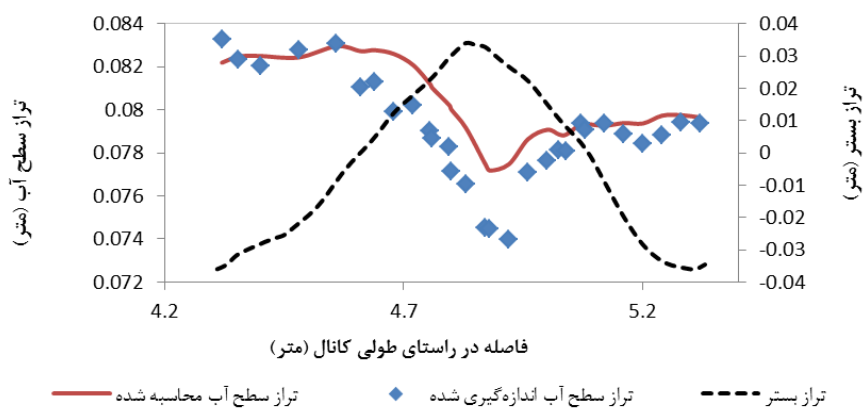
تراز سطح آب محاسباتی و مشاهداتی برای آزمایش ۲ ترسیم شده است. همان طور که ملاحظه می شود، نتایج تطابق خوبی با مدل شبیه سازی شده، به ویژه در مناطق چالاب که آشفتگی ها کم ترند، دارند. در جدول ۲ مقادیر پارامترهای آماری برای این سه آزمایش ارائه شده است. در شکل ۵، تغییرات سرعت محاسباتی و مشاهداتی در طول کانال برای آزمایش ۳ ترسیم شده است. در این نمودار سرعت و عمق به ترتیب نسبت به سرعت متوسط و عمق متوسط جریان بی بعد شده است. همان طور که ملاحظه می شود، علاوه بر پروفیل سطح آب، پروفیل های سرعت محاسباتی نیز تطابق خوبی با سرعت های اندازه گیری شده در آزمایشگاه دارند. مقادیر  $RMSE=0.04$  متر بر ثانیه و  $R^2=0.78$  معرف دقت مدل عددی ارائه شده اند. خطوط جریان اطراف خیزاب-چالاب در دبی حداقل و حداکثر در شکل ۶ ارائه شده است. در دبی های کم دو گردابه کل ناحیه چالاب را می پوشانند، این در حالی است که در دبی های زیاد یک گردابه ها در عمیق ترین نقطه چالاب مشاهده می شود. علت به وجود آمدن پروفیل سرعت منفی در ناحیه چالاب (شکل ۵-الف)، نیز وجود گردابه برگشتی (مانند شکل ۶) در این ناحیه است.

مدل آب زیرزمینی MODFLOW قرار گرفت. با استفاده از یک رابط گرافیکی، شبکه پایه ای مطابق با هندسه مسئله ایجاد شده و سپس توپوگرافی و توزیع فشار در سطح فرم بستر به مدل معرفی می شود. برای ایجاد هندسه مدل، اندازه مش در راستای طولی و عرضی کانال مطابق با اندازه مش در حل جریان سطحی (دو سانتی متر) و تعداد لایه ها متناسب با عمق بستری رسوبی در آزمایشگاه (۳۴ سانتی متر) انتخاب شد که اندازه مش در این راستا یک سانتی متر انتخاب شد. نهایت، با اعمال شرط مرزی فشار برای ورودی و خروجی، مدل MODFLOW اجرا شده و سپس ماژول MODPATH، به منظور استفاده از تکنیک ردیابی ذرات برای تعیین مشخصات ناحیه هاپیریک استفاده شد.

## نتایج و بحث

### شبیه سازی جریان سطحی

پس از اجرای مدل سه بعدی خیزاب-چالاب در اوپن فوم و اطمینان از پایداری حل، نتایج تراز سطح آب و پروفیل سرعت برای محدوده مطالعه شده در آزمایشگاه با استفاده از ابزار پس پردازش پاراوو استخراج شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در شکل ۴، توپوگرافی بستر و

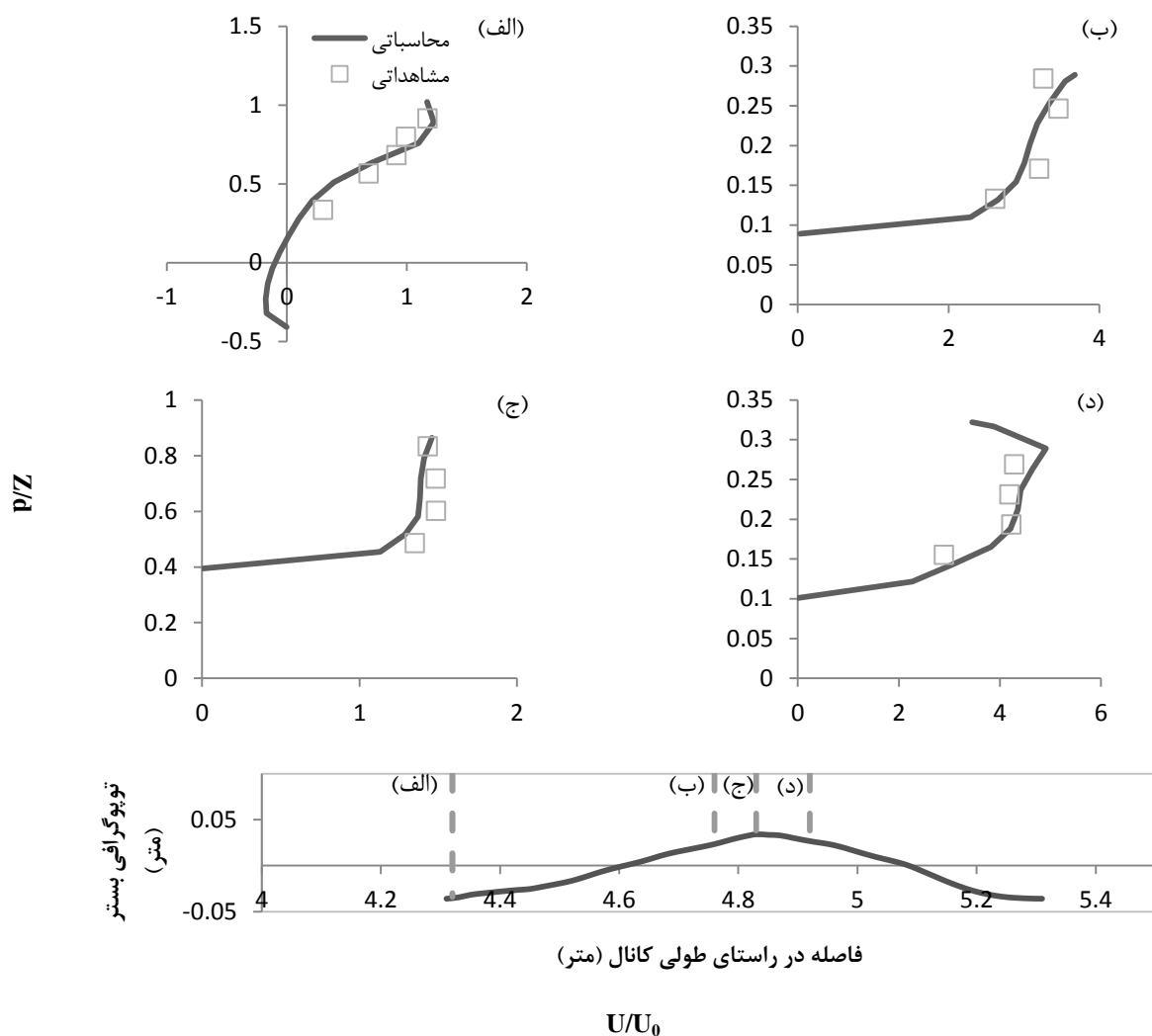


شکل ۴. پروفیل سطح آب اندازه گیری شده در آزمایشگاه و شبیه سازی شده با اوپن فوم

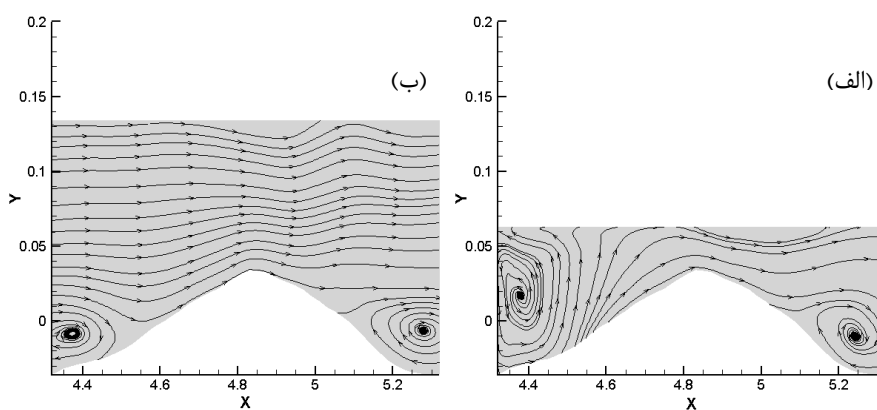
جدول ۲. پارامترهای آماری برای پروفیل سطح آب اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

پارامتر آماری	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳
ضریب نش ساتکلیف (NASH)	۰/۱۰۲	۰/۴۹۶	۰/۵۸۰
ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۶
درصد میانگین خطا (MPE)	۲/۳۷۴	۱/۵۹۴	۱/۳۶۳





شکل ۵. نمودارهای پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و شبیه‌سازی شده با اویلنوم



شکل ۶. خطوط جریان برای دبی (الف) ۶ لیتر بر ثانیه، و (ب) ۶۰ لیتر بر ثانیه

دبی‌های کمتر و بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (۶، ۳۰، ۳۵، ۵۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه)، به بیانی تنوع بخشیدن به عدد رینولدز انجام پذیرفت و نتایج فشار

همان طور که در بخش مواد و روش‌ها گفته شد، پس از کالیبراسیون مدل و اطمینان از درستی نتایج مدل، به‌منظور غنی‌سازی داده‌ها، شبیه‌سازی عددی برای



بستر دیون نشان داده بود که با افزایش عدد رینولدز، کمترین و بیشترین فشار به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

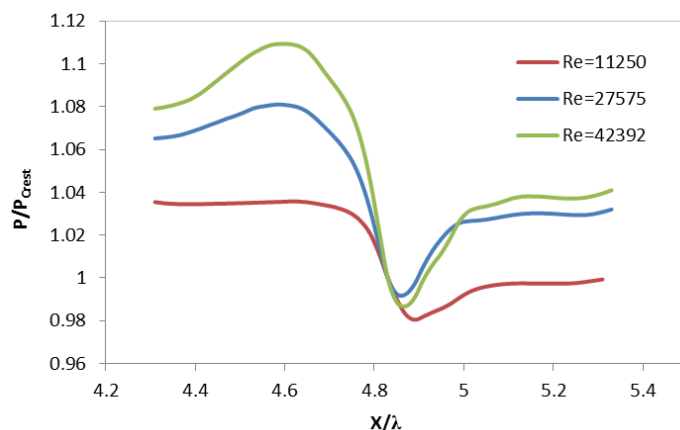
#### شبیه‌سازی جریان زیرسطحی

همان طور که در بخش قبل گفته شد، به‌منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات آزمایشگاهی، از روش ردیابی ذرات در MODPATH استفاده شد. به این صورت که در همان نقاطی که در آزمایشگاه تزریق ماده رنگی صورت گرفته بود، ذره رها شد و با استفاده از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب، پارامترها طول طی‌شده توسط ذره در زمان‌های مختلف محاسبه شده و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد که نشان دهنده دقت مناسب مدل بود. همچنین، بیشترین عمق خطوط جریان هاپیریک، محل خروج ذره و سرعت داخل محیط متخلخل برآورد و سپس با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در شکل ۸-الف، خطوط جریان داخل محیط متخلخل که با استفاده از تزریق ماده رنگی به دست آمده، ارائه شده است. شکل ۸-ب نیز خطوط جریان محاسباتی را در خط مرکزی کانال نشان می‌دهد. مقایسه مقدار متوسط سرعت مشاهداتی (یک سانتی‌متر بر ثانیه) و محاسباتی (۰/۷۹ سانتی‌متر بر ثانیه) برای آزمایش ۳، بیان‌کننده دقت مدل آب زیرزمینی یادشده در برآورد مشخصات ناحیه متخلخل زیرین است و اختلاف ناچیز موجود می‌تواند به علت معرفی یک ناحیه متخلخل کاملاً یکنواخت باشد. هرچند دقت زیاد این مدل می‌تواند ناشی از دقت توزیع فشار معرفی‌شده در سطح فرم بستر نیز باشد که با استفاده از مدل آب سطحی، به‌خوبی برآورد شده بود.

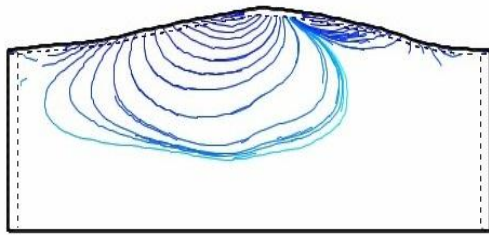
بر سطح فرم بستر در هر یک از این آزمایش‌ها، برای تعیین مشخصات ناحیه هاپیریک به مدل آب زیرزمینی معرفی شد. عدد رینولدز مطابق پیشنهاد کاردنس و ویلسون (۲۰۰۶) طبق رابطه ۸ محاسبه شده است:

$$Re = \frac{U_{ave} \Delta}{\nu} \quad (8)$$

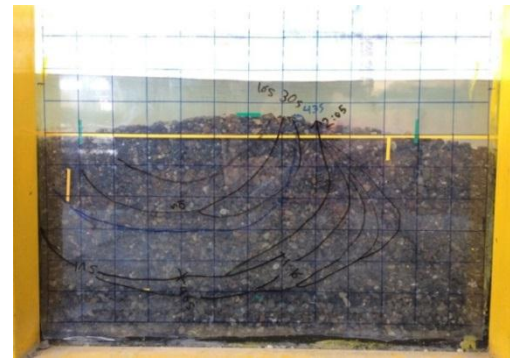
که در آن  $U_{ave}$  سرعت متوسط است و از میانگین‌گیری پروفیل سرعت عمودی در تاج خیزاب به دست می‌آید.  $\Delta$  فاصله تاج خیزاب تا کف چالاب و  $\nu$  ضریب لزجت سینماتیک است. در شکل ۷ نمودار تغییرات فشار در سطح فرم بستر برای دبی حداقل، حداکثر و متوسط ترسیم شده است. در این نمودار فشار بر سطح فرم بستر در هر نقطه، نسبت به فشار در تاج خیزاب بی‌بعد شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، محل بیشترین فشار قبل از تاج خیزاب و کمترین فشار بعد از تاج خیزاب است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان یا به بیان دیگر افزایش عدد رینولدز، اختلاف کمترین و بیشترین فشار، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، محل بیشترین فشار از تاج خیزاب دور شده و محل کمترین فشار به تاج خیزاب نزدیک‌تر می‌شود، به‌طوری که فاصله بین محل کمترین و بیشترین فشار اندکی از یکدیگر دور می‌شوند. فاصله بین محل کمترین و بیشترین فشار، عمق ناحیه هاپیریک را تعیین می‌کند [۱۱]. در بخش بعد ملاحظه خواهد شد که با توجه به تغییر اندک این فاصله، عمق ناحیه هاپیریک ثابت باقی می‌ماند. این نتایج با تحقیق کاردنس و ویلسون (۲۰۰۷) که به بررسی عددی تبادلات هاپیریک در فرم بستر دیون پرداختند، مطابقت ندارد. نتایج آنان در فرم



شکل ۷. نمودار تغییرات فشار در سطح فرم بستر برای دبی‌های مختلف



(ب)

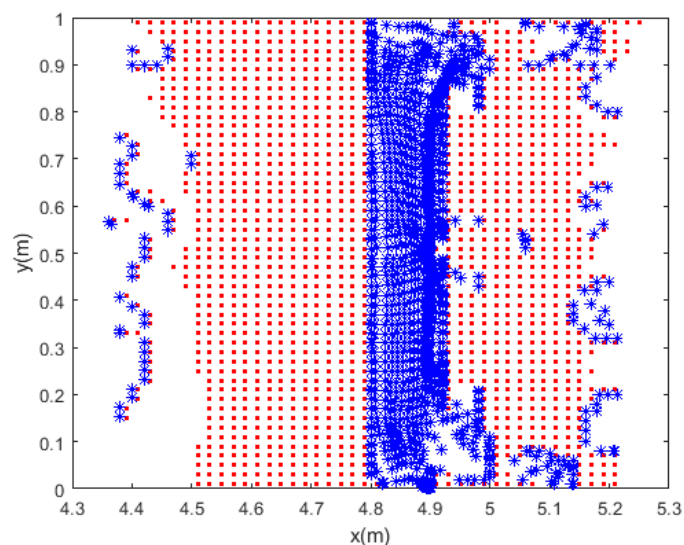


(الف)

شکل ۸. خطوط جریان داخل محیط متخلخل برای آزمایش ۳: (الف) مشاهده‌ای، (ب) محاسباتی

اعداد رینولدز تحقیق حاضر برابر ۲۷ سانتی‌متر است. این نتایج با تحقیق کاردنس و ویلسون (۲۰۰۷) که به بررسی عددی تبادلات هاپریک در فرم بستر دیون پرداختند، مطابقت دارد. نتایج آنان در فرم بستر دیون نیز نشان داده بود در اعداد رینولدز بالا، فاصله بین کمترین و بیشترین فشار ثابت می‌ماند [۱۱]. شکل ۹ محل رها شدن ذره (نقاط توپر) و خروج آن (ستاره) را برای آزمایش ۳ نشان می‌دهد. محدوده‌هایی که محل ورود و خروج ذره نیستند (نواحی سفیدرنگ)، نواحی‌ای هستند که ذرات شرایط جریان هاپریک ندارند. همان طور که ملاحظه می‌شود، بیشتر ذرات از نقاط بعد از تاج خیزاب که کمترین فشار را دارند، خارج شده‌اند.

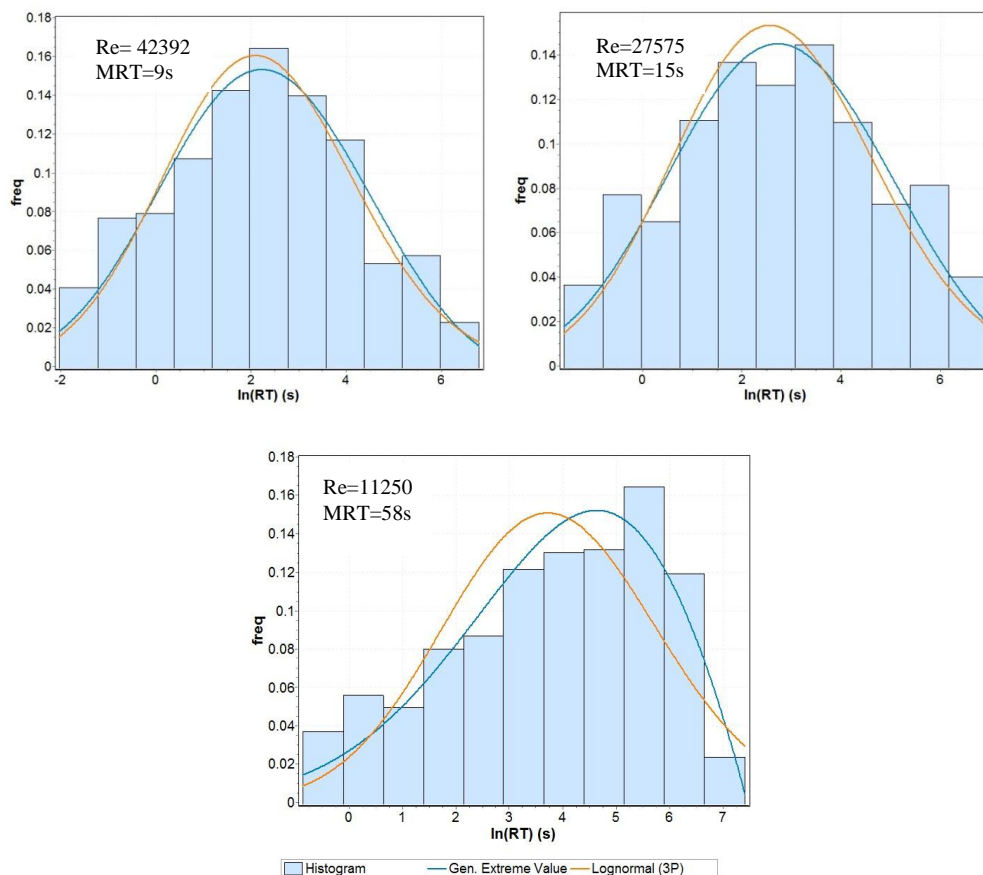
مشخصات ناحیه هاپریک، شامل دبی تبادلی، زمان ماند و عمق نفوذ جریان است که به‌منظور تعیین آنها، از کل سطح فرم بستر یعنی فاصله یک چالاب تا چالاب بعدی (یک سیکل)، ۲۵۵۰ ذره رها شد و ذراتی که از فرم بستر خارج می‌شدند، به بیان دیگر در پدیده هاپریک شرکت داشتند، تحلیل شدند. همچنین، ذراتی که زمان ماند صفر داشتند، به این معنا که از همان نقطه رها شده، خارج شده بودند، نیز حذف شدند. همان طور که در بخش قبل گفته شد، فاصله بین کمترین و بیشترین فشار که در واقع عمق ناحیه هاپریک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در تحقیق حاضر بسیار اندک بود. نتایج حل جریان زیرسطحی نیز نشان داد عمق نفوذ جریان برای تمامی



شکل ۹. محل رها شده ذره (نقاط قرمز رنگ) و محل خروج ذرات (نقاط آبی رنگ) - آزمایش ۳

لوگ نرمال ارائه می کند. همان طور که دیده می شود با کاهش عدد رینولدز نمودار برازش داده شده به سمت راست تمایل پیدا می کند، به این معنا که با کاهش رینولدز، تعداد ذراتی که زمان ماند طولانی تری دارند، افزایش می یابد. مقایسه مقادیر میانه و میانگین نیز مؤید همین مطلب است. در شکل ۱۱، مقادیر میانه و میانگین زمان ماند برای کلیه آزمایش های تحقیق حاضر مقایسه شده اند. همان طور که ملاحظه می شود در تمامی رینولدزها، مقادیر میانگین بیشتر از میانه بوده که نشان دهنده چولگی مثبت است، به بیانی توزیع مقادیر به سمت راست است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که در مواقع کم آبی، مدت زمانی که مواد محلول درون ناحیه هایپرک باقی می ماند بیشتر است، در نتیجه فرصت بیشتری برای انجام برخی واکنش های شیمیایی و نیز کاهش یا حذف آلاینده هایی که همراه جریان وارد این ناحیه شده اند، وجود خواهد داشت.

یکی از مشخصات مهم ناحیه هایپرک زمان ماند است، که معمولاً برای ارائه مقدار آن از شاخص آماری میانه زمان ماند<sup>۱</sup> استفاده می کنند. این شاخص نشان می دهد ۵۰ درصد داده ها از آن کوچک تر و ۵۰ درصد داده ها از آن بزرگ تر است. در شکل ۱۰، هیستوگرام زمان ماند<sup>۲</sup> و توزیع برازش یافته برای آن، برای سه دبی ۶، ۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه ترسیم شده است. با استفاده از نرم افزار آماری EasyFit سعی شد تا توزیع های مختلفی بر این نمودارها برازش داده شود. نتایج نشان داد در بین توزیع های موجود، توزیع مقدار حدی تعمیم یافته<sup>۳</sup>، به ویژه در رینولدزهای پایین به خوبی می تواند بر هیستوگرام های زمان ماند منطبق شود. ترات و همکارانش (۲۰۱۳) و کاردنس و ویلسون (۲۰۰۶) توزیع لوگ نرمال را پیشنهاد دادند، اما نتایج بررسی آماری این تحقیق نشان داد توزیع مقدار حدی تعمیم یافته به مراتب توزیع دقیق تری را در مقایسه با توزیع



شکل ۱۰. هیستوگرام توزیع زمان ماند و نمودار برازش داده شده در ناحیه هایپرک - برای دبی ۶، ۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه

1. Median Residence Time (MRT)
2. Residence Time Distribution (RTD)
3. Generalized extreme value distribution



شکل ۱۱. مقادیر میانگین و میانگین زمان ماند در ناحیه هایپریک

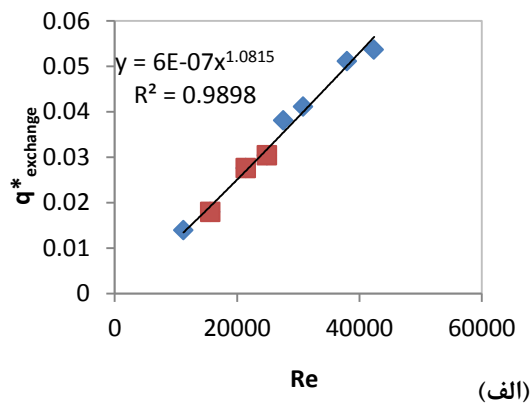
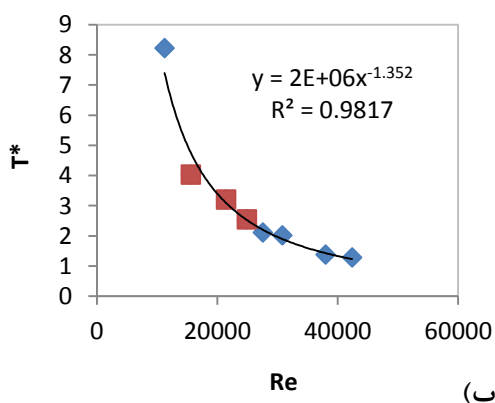
رینولدز، به دلیل افزایش سرعت جریان داخل محیط متخلخل، زمان ماند کاهش یافته و دبی تبادل افزایش می یابد. همان طور که ملاحظه می شود، دبی جریان و زمان ماند با عدد رینولدز رابطه توانی دارند که این با نتایج ترات و همکارانش (۲۰۱۳) و کاردنس و ویلسون (۲۰۰۶) تطابق دارد. هانگ و چوی (۲۰۱۸) در مقاله اخیر خود روابطی را برای محاسبه مشخصات ناحیه هایپریک ارائه کردند [۲۲] که رابطه ارائه شده به خوبی می تواند مقادیر زمان ماند را تخمین بزند. همچنین، نتایج نشان داد در تمامی رینولدزها، به طور متوسط ۲۰ درصد جریان سطحی در تبادل با ناحیه هایپریک است.

دبی تبدیلی نیز با توجه به سرعت نفوذ ذرات به داخل بستر و زمان ماند آن تعیین شدند. دبی تبدیلی و زمان ماند به ترتیب به صورت روابط ۹ و ۱۰ بی بعد شده اند:

$$q_{exchange}^* = \frac{Q_{exchange} / W}{K \times \lambda} \tag{9}$$

$$T^* = \frac{MRT \times K}{\lambda} \tag{10}$$

که در آنها  $Q_{exchange}$  دبی تبدیلی (مترمکعب بر ثانیه)،  $W$  عرض کانال (متر)،  $K$  هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه) و  $\lambda$  طول موج است. شکل ۱۲ نمودار تغییرات دبی تبدیلی بی بعد و زمان ماند بی بعد را برای محدوده رینولدزهای بررسی شده در تحقیق حاضر نشان می دهد. با افزایش عدد



شکل ۱۲. تأثیر رینولدز جریان بر (الف) دبی تبدیلی و (ب) زمان ماند

## نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی پدیده‌هایپرریک در فرم بستر خیزاب-چالاب در شرایط هیدرولیکی مختلف صورت گرفت. سپس، از مدل‌های نرم‌افزاری OpenFOAM و MODFLOW به‌ترتیب به‌منظور شبیه‌سازی جریان سطحی و جریان زیرسطحی بهره گرفته شد. به طور کلی نتایج زیر از تحقیق حاضر به دست آمد:

- نرم‌افزار اوپن‌فوم با در نظر گرفتن یک تابع دیواره برای فرم بستر به عنوان شرط مرزی پایین (سطح فرم بستر) و استفاده یک شرط اولیه برای سلول‌های آب و هوا در مرز بالا، به خوبی قادر است جریان سطحی را شبیه‌سازی کند. به طوری که پروفیل سطح آب و پروفیل سرعت را با دقت زیادی برآورد می‌کند و می‌توان نتیجه گرفت فشارهای محاسبه‌شده در سطح فرم بستر نیز با دقت مناسبی تخمین خواهد زد.

- مقایسه سرعت متوسط جریان زیرسطحی با نتایج مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد مدل یادشده قادر است خصوصیات ناحیه متخلخل زیرین را به‌درستی برآورد کند.

- مطالعاتی که تا کنون صورت گرفته به اتفاق توزیع لوگ نرمال را بر هیستوگرام‌های زمان ماند برآزش داده بودند، اما نتایج تحقیق حاضر نشان داد توزیع مقدار حدی تعمیم‌یافته برآزش بهتری را ارائه می‌کند.

- با افزایش عدد رینولدز، تبادلات هایپرریک افزایش یافته و زمان ماندگاری کاهش می‌یابد، به طوری که رابطه توانی بین آن‌ها برقرار است.

- با توجه به تحقیق حاضر، اگر سعی شود در پروژه‌های احیای رودخانه به طور مصنوعی توالی‌های خیزاب-چالاب به وجود آید، می‌توان توان خودپالایی یک رودخانه را در جذب و کاهش آلاینده‌ها با توجه به زمان ماند آن درون بستر را تعیین کرد و افزایش داد.

## منابع

- [3]. Buffington JM, and Tonina D. Hyporheic exchange in mountain rivers II: Effects of Channel Morphology on Mechanics, Scales, and Rates of Exchange. *Geography Compass*. 2009: 3(3), 1038-1062.
- [4]. Stonedahl SH. Investigation of the Effect Multiple Scales of Topography on Hyporheic Exchange. PhD Dissertation, Northwestern University, 2011.
- [5]. Biddulph M. Hyporheic Zone: In Situ Sampling, Geomorphological Techniques. Chapter 3, Section 11.1, 2015.
- [6]. Thibodeaux LJ, Boyle JD. Bedform-generated convective transport in bottom sediment. *Nature*. 1987: 325(6102), 341-343.
- [7]. Elliott AH, Brooks NH. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments. *Water Resources Research*. 1997: 33(1), 137-151.
- [8]. Packman AI, Salehin M, Zaramella M. Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004: 130(7), 647-656.
- [9]. Fox A, Boano F, Arnon S. Impact of losing and gaining streamflow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by dune shaped bed forms. *Water Resources Research*. 2014: 50(3), 1895-1907.
- [10]. 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.
- [11]. Cardenas MB, Wilson JL. Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments. *Water Resource Research*. 2007: 43(8).
- [12]. Blois G, Best JL, Sambrook Smith GH, Hardy RJ. Effect of bed permeability and hyporheic flow on turbulent flow over bed forms. *Geophysical Research Letters*. 2014: 41(18), 6435-6442.
- [13]. Lee DH, Kim YJ, Lee S. Numerical modeling of bed form induced hyporheic exchange. *Paddy and Water Environment*. 2014: 12(1): 89-97.
- [14]. Chen X, Cardenas MB, Chen L. Three-dimensional versus two-dimensional bed form-induced hyporheic exchange. *Water Resources Research*. 2015: 51(4), 2923-2936.
- [15]. Rodríguez JF, García CM, García MH. Three-dimensional flow in centered pool-riffle sequences. *Water Resources Research*. 2013: 49(1), 202-215.
- [1]. Boano F, Harvey JW, Marion A, Packman AI, Revelli R, Ridolfi L, Wörman A. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Reviews of Geophysics*. 2014: 52(4), 603-679.
- [2]. Tonina D, Buffington JM. Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects. *Geography Compass*. 2009: 3(3), 1063-1086.

- [16]. Tonina D, Buffington JM. Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. *Water Resources Research*. 2007; 43(1).
- [17]. Zhou T, Endreny T A. Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: Flume and hydrodynamic experiments. *Water Resources Research*. 2013; 49(8), 5009-5020
- [18]. 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
- [19]. Buffington JM, Montgomery DR. Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research*. 1999; 35, 3507– 3521.
- [20]. McSherry RJ, Chua KV, Stoesser T. Large eddy simulation of free-surface flows. *Journal of Hydrodynamics*. 2017, 29(1): 1-12.
- [21]. Rodi W, Constantinescu G, Stoesser T. Large eddy simulation in hydraulics. IAHR Monograph, London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [22]. 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.