



## مقایسه تبادلات هایپرریک در خیزاب- چالاب دو بعدی و سه بعدی

نشاط موحدی<sup>۱</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۲\*</sup>، کریستین اشمیت<sup>۳</sup>، نیکو ترات<sup>۴</sup> و مهدی مفتاح هلقی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۳</sup> پژوهشگر، دانشکده هیدروژئولوژی، مرکز تحقیقات محیط زیست هلمهولتز، لایپزیگ، آلمان  
<sup>۴</sup> مهندس هیدرولیک، شرکت مهندسی مشاور، لایپزیگ، آلمان  
<sup>۵</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۰۳  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۱۹  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹

### کلمات کلیدی:

خیزاب-چالاب  
OpenFOAM  
MODFLOW  
تبادلات هایپرریک  
زمان ماندگاری

**خلاصه:** تبادل آب و مواد محلول بین جریان سطحی و جریان داخل محیط متخلخل بستر رودخانه بعنوان تبادلات هایپرریک شناخته می‌شود. تبادلات هایپرریک آب و مواد مغذی را به ارگانسیم‌هائی که در ناحیه هایپرریک زندگی می‌کنند، رسانیده و شرایط اکولوژیکی و چرخه مواد غذایی را در این ناحیه تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از عوامل مؤثر بر این تبادلات، گرادیان‌های فشار در اطراف فرم بستر رودخانه می‌باشد. خیزاب‌ها و چالاب‌ها از اشکال ژئومورفیک رودخانه‌ها تلقی می‌شوند که گرادیان فشار در امتداد آن‌ها منجر به تبادلات هایپرریک شده و اخیراً در پروژه‌های احیاء رودخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف از تحقیق حاضر مقایسه میزان دبی تبادلات هایپرریک و زمان ماندگاری جریان داخل بستر رسوبی در خیزاب-چالاب دو بعدی و سه بعدی می‌باشد. برای این منظور ابتدا به شبیه‌سازی جریان سطحی با استفاده از مدل OpenFOAM پرداخته شده و سپس فشار حاصله بر روی فرم بستر بعنوان شرط مرزی به مدل آب زیرزمینی MODFLOW معرفی می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش تقریباً ۵۰ درصدی دامنه فرم بستر، دبی تبادلات هایپرریک هم در حالت دو بعدی و هم در حالت سه بعدی ۲۶ درصد افزایش و زمان ماندگاری در مدل دو بعدی ۳۶ درصد و در مدل سه بعدی ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، مقایسه نتایج خیزاب-چالاب سه بعدی با مدل دو بعدی معادل آن نشان می‌دهد که دبی تبادلات هایپرریک و زمان ماندگاری به ترتیب ۳ و ۴ درصد افزایش می‌یابند.

### ۱- مقدمه

مسافت‌های نسبتاً طولانی در نظر گرفته می‌شود. برای مثال، جریان آب زیرزمینی اغلب توسط بارندگی در تپه‌ها تغذیه شده، به سمت رودخانه حرکت کرده و در رودخانه تخلیه می‌شود. بنابراین آنچه باعث تمایز آب زیرزمینی از هایپرریک می‌شود، وابسته به مقیاس است [۱]. تبادل آب بین جریان سطحی و ناحیه هایپرریک تابع اختلاف فشار در مقیاس‌های مختلف می‌باشد. در مقیاس حوضه‌ای<sup>۲</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>۳</sup>، اثر متقابل بین جریان رودخانه و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، مانند

ناحیه هایپرریک<sup>۱</sup> به حجمی از رسوبات اشباع بستر و اطراف رودخانه اطلاق می‌شود که تبادل بین جریان سطحی و زیرسطحی در آن رخ می‌دهد. جریان‌های هایپرریک معمولاً با توجه به ماهیت دوطرفه بودن آن‌ها از جریان‌های آب زیرزمینی متمایز می‌شوند. هایپرریک، جریان رفت و برگشتی در امتداد عمود بر بستر می‌باشد که در مقیاس نسبتاً کوچکی، معمولاً از چند سانتی‌متر تا ده‌ها متر، رد و بدل می‌گردد، در حالی که تخلیه یا تغذیه آب زیرزمینی بصورت تبادل یک‌طرفه در

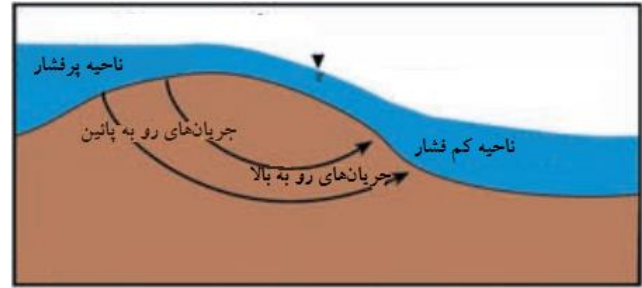
1 Hyporheic zone

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.dehghani@gau.ac.ir

2 Catchment, Basin or Watershed Scale  
3 Reach Scale



در فرم بستر دیون و خیزاب-چالاب دو بعدی به طور وسیعی بصورت آزمایشگاهی [۶-۱۲] و عددی [۱۳-۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. اما با توجه به ماهیت سه بعدی این اشکال ژئومورفیک و ساختار پیچیده‌ای که در امتداد ناحیه تداخلی جریان و رسوب ایجاد می‌کنند، لازم است تا تبدلات هایپرریک در حالت سه بعدی مورد بررسی قرار گیرد. تونینا و بافینگتن<sup>۵</sup> (۲۰۰۷) بطور آزمایشگاهی و عددی به بررسی تأثیر دبی جریان و دامنه فرم بستر در توالی خیزاب-بار-چالاب سه بعدی پرداختند. در تحقیق آنان مشخصات ناحیه هایپرریک با استفاده از تزریق فلورسین بداخل جریان و ثبت میزان کاهش آن با زمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق آنان نشان داد که دامنه فرم بستر به تنهایی منجر به ایجاد تبدلات هایپرریک نمی‌شود، بلکه دبی جریان و توپوگرافی فرم بستر هر دو با هم بر روی مقدار و الگوی تبدلات هایپرریک تأثیرگذار خواهند بود. همچنین در تحقیق آنان، مقایسه فشارهای دینامیک و هیدرواستاتیک در سطح فرم بستر نشان داد در جریان‌های بالا و در دامنه‌های کوچک فرم بستر، استفاده از فشار هیدرواستاتیک می‌تواند منجر به نتایجی منطقی از مشخصه‌های جریان هایپرریک باشد [۱۶]. ترات و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۳) به بررسی عددی تأثیر دبی جریان و مرفولوژی بستر بر تبدلات هایپرریک در حضور فرم بستر خیزاب-چالاب سه بعدی و تحت شرایط مختلف آب زیرزمینی محصور پرداختند. در تحقیق آنان فشار بدست آمده از شبیه‌سازی جریان سطحی در سطح فرم بستر بعنوان شرط مرزی درישلت برای شبیه‌سازی ناحیه متخلخل زیرین مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد با افزایش دبی جریان، تبدلات هایپرریک افزایش و زمان ماندگاری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دامنه فرم بستر از یک مقدار مشخص، دبی تبدلات هایپرریک ثابت باقی می‌ماند [۱۷]. چن و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۵) نیز تبدلات هایپرریک را در دیون دو بعدی و سه بعدی مورد مقایسه قرار دادند. در تحقیق آنان میانگین دامنه فرم بستر سه بعدی بعنوان دامنه فرم بستر دوبعدی در نظر گرفته شده بود. نتایج آنان نشان داد در رینولدزهای بالا، دبی تبدلات هایپرریک در حالت دیون سه بعدی بیشتر از دو بعدی بوده و زمان ماندگاری تقریباً در هردو حالت یکسان خواهد بود [۱۸]. بطور معمول دیون‌ها بر روی بسترهای ماسه‌ای شکل گرفته و دارای یک



شکل ۱: تبدلات هایپرریک در یک توالی خیزاب-چالاب [۳]

Fig. 1. Hyporheic exchanges in a sequence of riffle-pool

شیب، دیون و توالی‌های خیزاب-چالاب<sup>۱</sup> و توالی پله‌ها<sup>۲</sup> سبب ایجاد اختلاف فشار خواهد شد [۲]. تبادل جریان بین فرم بستر و جریان سطحی، منجر به تغییرات پروفیل سطح آب و بدنبال آن تغییرات مکانی در عمق و گرادیان‌های فشار می‌گردد. این تبدلات منجر به ایجاد یک ناحیه پر فشار در بالادست و یک ناحیه کم فشار در پائین دست شده و جریان از بالادست بداخل ناحیه متخلخل وارد شده و از ناحیه کم فشار دوباره به جریان سطحی باز می‌گردد<sup>۳</sup> (شکل ۱). تبدلات هایپرریک بر روی اکوسیستم رودخانه‌ای تأثیر می‌گذارند. جریان‌های رو به پائین، مواد محلول و آب سطحی که دارای اکسیژن زیاد می‌باشد را بداخل رسوبات حمل کرده و ارگانیسیم‌هایی که در این ناحیه زندگی می‌کنند، غلظت این مواد محلول و بخشی از مواد زائدی که همراه جریان وارد این ناحیه شده‌اند را تغییر می‌دهند. در مقابل، جریان‌های رو به بالا این عناصر و مواد تغییر و تقلیل یافته را به رودخانه باز می‌گرداند. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که تبدلات هایپرریک بر روی کیفیت آب در سیستم رودخانه‌ای نیز تأثیرگذار خواهند بود [۳، ۴]. علاوه بر این، ناحیه هایپرریک نقش بسیار مهمی در تنظیم نیتروژن بین جریان سطحی و آب زیرزمینی از طریق شماری از فرآیندهای متابولیک از جمله نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون دارد [۵].

خیزاب‌ها و چالاب‌ها از اشکال ژئومورفیک رودخانه‌ها تلقی می‌شوند که شکل موجی به بستر کانال داده و باعث تنوع در عرض و عمق در امتداد کانال می‌شوند و همانطور که ذکر شد گرادیان فشار در دو طرف آن منجر به تبدلات هایپرریک می‌گردد. تبدلات هایپرریک

5 Tonina and Buffington  
6 Trauth et al.  
7 Chen et al.

1 Riffle-pool sequences  
2 Step  
3 Downwelling flux  
4 Upwelling flux

پنج سیکل متوالی از فرم بستر خیزاب-چالاب دو بعدی با استفاده از یک شابلون چوبی طبق رابطه سینوسی زیر ایجاد شد:

$$z(x) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \quad (1)$$

که در آن  $A$  نصف دامنه فرم بستر و  $\lambda$  طول موج فرم بستر،  $x$  فاصله در راستای طولی کانال و  $z(x)$  ارتفاع فرم بستر در فاصله  $x$  می‌باشد. فرم بستر دارای دامنه  $0/068$  متر و طول موج یک متر بوده که نسبت دامنه فرم بستر به طول موج آن  $0/068$  می‌باشد. طبق تحقیق بافینگتن و مونتگمری<sup>۱</sup> (۱۹۹۹) امکان تشکیل چنین فرم بستری در رودخانه های شنی وجود دارد [۱۹]. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق دارای اندازه متوسط ذرات ( $d_{50}$ )  $6/8$  میلی‌متر بودند. طبق مطالعات تایبادوکس و بویل<sup>۲</sup> (۱۹۸۷)، عمق تبادلات هایپریک تا پنج برابر ارتفاع فرم بستر خواهد رسید [۱۲]، لذا در تحقیق حاضر عمق بستر رسوبی  $34$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد. پس از ایجاد هندسه مورد نظر، پمپ روشن شده و جریان به آرامی در دبی‌های کم وارد کانال می‌گردید. دریچه انتهائی کانال نیز در ابتدا بالا نگه داشته می‌شد تا سطح آب در کانال کمی بالا بیاید، سپس دبی جریان را به مقدار مورد نظر رسانده و دریچه به آرامی بطور کامل باز می‌شد تا جریان آزاد در داخل محیط متخلخل برقرار گردد. در این تحقیق دبی جریان و دریچه انتهائی به نحوی تنظیم می‌گردید که ضمن استغراق کامل فرم بستر، هیچگونه حرکت ذرات رسوبی ملاحظه نگردد. پس از اطمینان از توسعه یافتگی جریان، برداشت داده‌های مورد نیاز برای تعیین مشخصات ناحیه هایپریک آغاز می‌گردید. علاوه بر برداشت پروفیل سطح آب و سرعت، با تزریق ماده‌رنگی (پرمنگنات سدیم) داخل بستر رسوبی در نزدیکی جداره کانال، و با ثبت زمان و طول مسیر طی شده بر روی طلق مدرج نصب شده بر روی جداره شیشه‌ای کانال، سرعت داخل محیط متخلخل برآورد می‌گردید. کلیه اندازه‌گیری‌ها در سیکل وسط (سیکل سوم)، در فاصله یک چالاب تا چالاب بعدی صورت می‌گرفت. در شکل ۲ نمائی از فلوم آزمایشگاهی و خیزاب - چالاب ایجاد شده ارائه شده است.

## ۲-۲- شبیه‌سازی عددی

علاوه بر مدل آزمایشگاهی که مشخصات آن در بخش قبل ذکر

وجه با شیب ملایم و طولانی در بالادست و یک وجه با شیب تندتر و کوتاه در پائین‌دست می‌باشند و عبارتی مواد بستر و هندسه آن‌ها با خیزاب-چالاب‌ها متفاوت می‌باشد، اما تاکنون تحقیقی به منظور مقایسه مشخصات ناحیه هایپریک در خیزاب-چالاب دو بعدی با سه بعدی صورت نگرفته است.

هدف از تحقیق حاضر این است که با ساده‌سازی هندسه خیزاب-چالاب، عبارتی با در نظر گرفتن خیزاب-چالاب بطور دو بعدی چه میزان خطا در برآورد مشخصات ناحیه هایپریک (دبی تبادلی و زمان ماندگاری) ایجاد خواهد شد. لذا در این تحقیق ابتدا مکانیزم جریان‌های هایپریک در خیزاب-چالاب دو بعدی بطور آزمایشگاهی بررسی شده، سپس نتایج آن به منظور ارزیابی مدل‌های جریان سطحی OpenFOAM و جریان زیرسطحی MODFLOW مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت پس از اطمینان از دقت مدل‌های مذکور در برآورد مشخصات ناحیه هایپریک، خیزاب-چالاب‌های دو بعدی و سه بعدی در دو دامنه متفاوت، بطور عددی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل آزمایشگاهی

کانال آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۱ و  $0/8$  متر می‌باشد. دیواره‌های جانبی کانال برای تسهیل در مشاهدات از جنس پلکسی‌گلاس می‌باشد که پایداری آن توسط قاب‌های فولادی حفظ می‌گردد. در قسمت ورودی کانال مخزن آرام کننده جریان به طول یک متر وجود دارد که آشفتگی‌های جریان ورودی توسط این مخزن گرفته شده و جریان به آرامی وارد کانال می‌گردد. همچنین کانال آزمایشگاهی مجهز به دستگاه عمق‌سنج دیجیتالی با دقت  $0/1$  میلی‌متر می‌باشد که در عرض و طول کانال براحتی حرکت می‌کند و به منظور قرائت تراز سطح آب و توپوگرافی بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک دستگاه سرعت‌سنج میکرو نیز به منظور برداشت سرعت‌های در راستای جریان مورد استفاده قرار گرفته است. با قرار دادن پروانه آن درون جریان، با توجه به تعداد دور چرخش پروانه در هر ثانیه، ضرایب کالیبراسیون معرفی شده به دستگاه طبق کاتالوگ، مقادیر سرعت بر روی صفحه نمایش دستگاه نمایش داده می‌شود.

1 Buffington and Montgomery

2 Thibodeaux and Boyle



شکل ۲: نمایی از کانال آزمایشگاهی و فرم بستر خیزاب-چالاب  
Fig. 2. A view of laboratory flume and riffle-pool bed form

جدول ۱: مشخصات مدل‌های مورد بررسی

Table 1. Characteristics of investigated models

رینولدز جریان	دامنه فرم بستر (متر)	سناریو	مدل
۲۲۸۰۰	۰/۰۶۸	۲D۱	آزمایشگاهی
	۰/۱۴۱	۲D۲	عددی
	۰/۰۶۸	۳D۱	
	۰/۱۴۱	۳D۲	

شد، سه مدل دیگر نیز بطور عددی مورد بررسی قرار گرفتند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول D1 نشان‌دهنده دامنه کوچکتر یعنی ۰/۰۶۸ متر و D2 دامنه بزرگتر یعنی ۰/۱۴۱ می‌باشد. 2D و 3D نیز به ترتیب خیزاب-چالاب دو بعدی و سه بعدی می‌باشند. هندسه‌های سه بعدی فرم بستر خیزاب-چالاب نیز طبق رابطه زیر ایجاد شدند:

$$z(x, y) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) \quad (2)$$

که در آن،  $x$  و  $y$  به ترتیب فاصله در راستای طول و عرض کانال،  $\lambda$  طول موج و  $w$  عرض کانال می‌باشد.

به منظور شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی از نرم‌افزارهای OpenFOAM و MODFLOW استفاده شد که در ادامه به اختصار توضیحاتی در مورد این مدل‌های شبیه‌سازی ارائه می‌گردد:

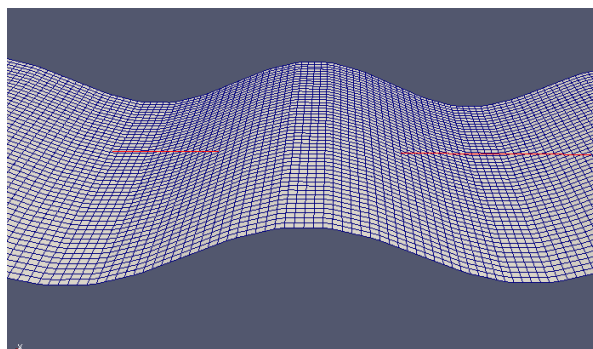
#### ۲-۱- شبیه‌سازی جریان سطحی

نرم‌افزار OpenFOAM یک نرم‌افزار متن باز بوده که معادلات حاکم را به روش حجم محدود حل می‌کند. برای شبیه‌سازی

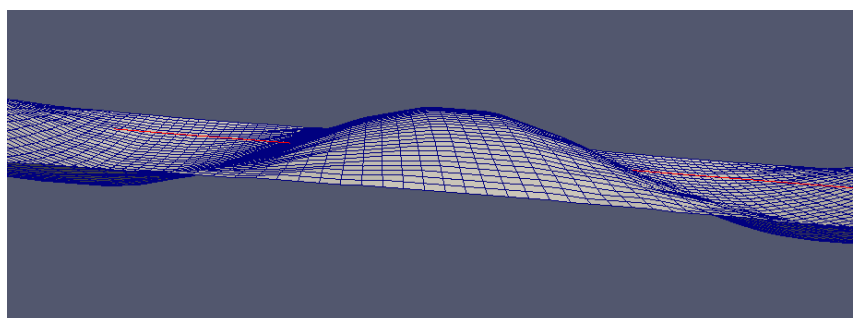
جریان‌های دو فازی در این نرم‌افزار از حلگر interFOAM که برای حل جریان دو فازی، غیرقابل تراکم، هم‌دما و مخلوط نشدنی مناسب است، استفاده شد. این حلگر از روش حجم سیال<sup>۱</sup> برای تعیین سطح آزاد آب (مرز بین هوا و آب) استفاده می‌کند که این روش وابسته به تخمین کسری از سیال در هر یک از سلول‌های محاسباتی می‌باشد. طبق توصیه مک‌شری و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۷)، در این تحقیق از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) استفاده شد [۲۰]. یکی از

1 Volume of fluid

2 McSherry



(الف)



(ب)

شکل ۳: شمائی از (الف) هندسه دو بعدی، و (ب) هندسه سه بعدی خیزاب-چالاب  
**Fig. 3. Schematic of (a) 2D, and (b) 3D geometry of riffle-pool**

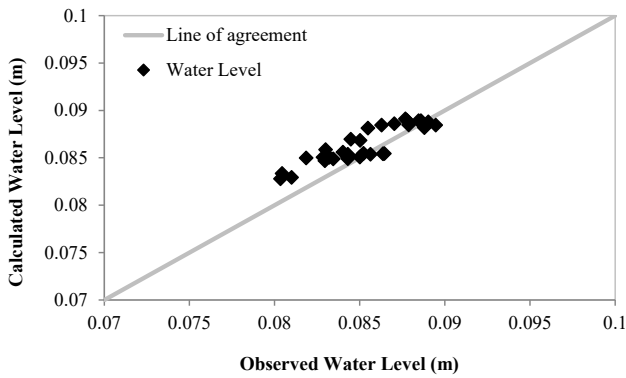
جداره‌ها و کف شرط مرزی عدم لغزش انتخاب شد. برای مرز بالا نیز از شرط مرزی فشار استفاده شد. برای فشار در ورودی، جداره‌ها و کف از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شد. برای شرط مرزی بالا و خروجی، شرط مرزی فشار معرفی شد. در حل جریان‌های دوفازی، باید شرط اولیه‌ای برای سلول‌های دارای فاز آب و هوا معرفی شود که این کار در فایل به نام `alpha.water` صورت می‌گیرد، که با توجه به تراز سطح آب در آزمایشگاه، مقدار اولیه‌ای به مدل معرفی گردید. برای مدل آشفتگی بکار برده شده در این تحقیق، نیاز است تا فایل 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 گردد. برای بقیه مرزها هم شرط گرادیان صفر در نظر گرفته شد. پس از اطمینان از پایداری حل، به منظور تحلیل نتایج، نیاز به نرم‌افزاری است که قابلیت خواندن خروجی‌های `OpenFOAM` را داشته باشد. یکی از این نرم‌افزارها پاراوو<sup>۲</sup> می‌باشد که یک نرم‌افزار

مشهورترین مدل‌های آشفتگی به روش گردابه‌های بزرگ (`LES`)، مدل دینامیکی اسماگورینسکی<sup>۱</sup> می‌باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت [۲۱]. مش‌ها، شامل سلول‌های شش وجهی بود که در شکل ۳، هندسه مش‌بندی شده سطح فرم بستر در حالت دو بعدی و سه بعدی ارائه شده است. نتایج استقلال از مش نیز نشان داد اندازه مش در راستای طول و عرض کانال مقدار ۲ سانتی‌متر و در راستای عمق کانال با رزولوشن ۲۰ مناسب بوده، بطوریکه در راستای عمق کانال با نزدیک شدن به سطح فرم بستر، اندازه مش ریزتر می‌گردید. در این تحقیق تعداد پنج سیکل خیزاب-چالاب مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

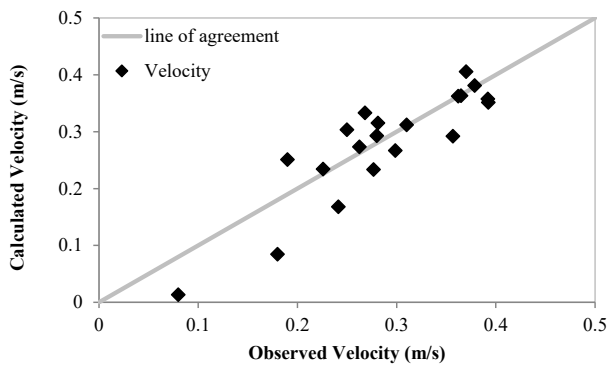
در نرم‌افزار `OpenFOAM` باید شرط مرزی را برای هر یک از متغیرهای سرعت و فشار برای تمامی مرزهای آن (مرز ورودی، خروجی، دیواره‌ها و سطح آب) معرفی نمود. برای سرعت در ورودی شرط مرزی دبی، در خروجی شرط مرزی گرادیان صفر، و برای

2 Paraview

1 Smagorinsky



(الف)



(ب)

شکل ۴: مقادیر محاسباتی و مشاهداتی (الف) تراز سطح آب، (ب) سرعت در راستای جریان، در فاصله بین دو چالاب متوالی

Fig. 4. Calculated and observed values of (a) water surface elevation, and (b) streamwise velocity, between two sequential pools

به ترتیب ۱/۷ میلی‌متر و ۱۸ درصد تراز سطح آب و ۰/۰۴ متر بر ثانیه و ۱۴ درصد مقادیر سرعت را در فاصله یک چالاب تا چالاب بعدی تخمین بزند. شایان ذکر است که پروفیل‌های سرعت در پنج مقطع در مرکز کانال و در امتداد دو چالاب متوالی اندازه‌گیری شدند. در شکل ۴ الف و ب، مقادیر محاسباتی با OpenFOAM و مشاهداتی به ترتیب برای تراز سطح آب و سرعت‌های در راستای جریان ترسیم شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌گردد نتایج تطابق خوبی با خط ۴۵ درجه دارند. در شکل ۴-ب، با توجه به اینکه سرعت‌سنج مورد استفاده در سرعت‌های پائین نتایج خوبی ارائه نمی‌دهد، مقادیر محاسباتی با مشاهداتی تفاوت بیشتری نشان داده است.

پس از ارزیابی مدل جریان سطحی و اطمینان از درستی حل، مقادیر فشار بر روی سطح فرم بستر، بعنوان شرط مرزی بر روی مدل شبیه‌سازی جریان زیرسطحی قرار گرفت. به منظور ارزیابی این

متن باز بوده و قابلیت اندازه‌گیری، محاسبه، رسم نمودار و استخراج داده را دارا می‌باشد.

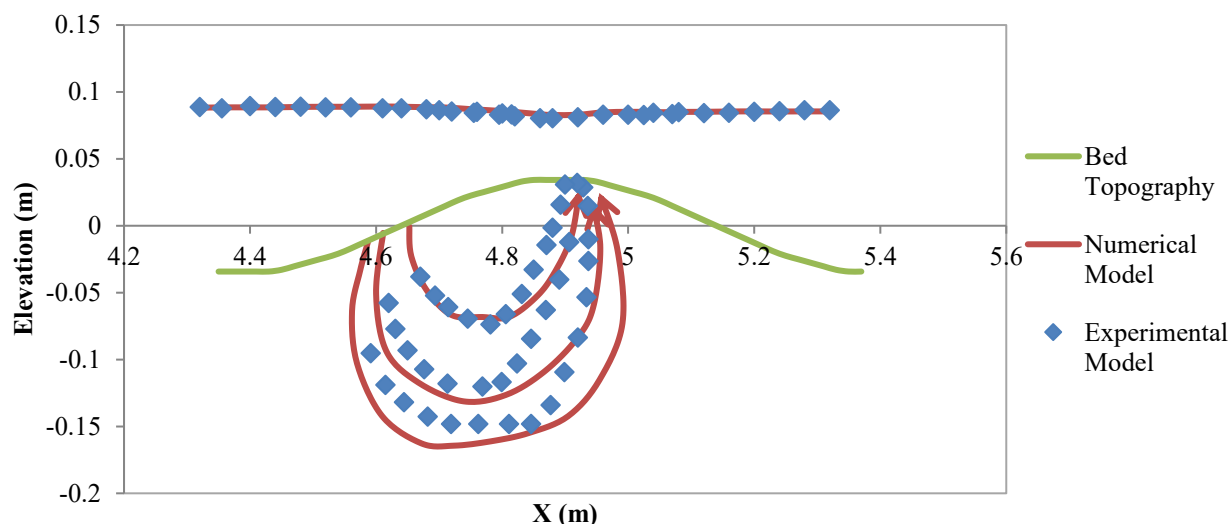
### ۲-۲-۲- شبیه‌سازی جریان زیرسطحی

به منظور بررسی تبادلات هایدروپیک از مدل آب زیرزمینی مادفلو استفاده شد که توسط محقق زیادی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲-۲۴]. در این مدل، دو دسته معادلات داری و پیوستگی با داشتن توزیع فشار در امتداد فرم بستر، کوپل می‌شوند که در این مطالعه فشار بدست آمده از OpenFOAM بر روی سطح فرم بستر، بعنوان شرط مرزی بر روی مرز بالا (سطح فرم بستر) در مدل آب زیرزمینی قرار گرفت و برای بقیه مرزها نیز شرط مرزی بدون جریان<sup>۱</sup> اعمال شد. برای ایجاد هندسه مدل، اندازه مش در راستای طولی و عرضی کانال مطابق با اندازه مش در حل جریان سطحی (دو سانتی‌متر) و تعداد لایه‌ها متناسب با عمق بستری رسوبی در آزمایشگاه (۳۴ سانتی‌متر) انتخاب شد که اندازه مش در این راستا در سلول‌های نزدیک به بستر ۸ میلی‌متر و در باقی سلول‌ها یک سانتی‌متر انتخاب گردید. در نهایت مدل مادفلو اجرا شده و سپس ماژول MODPATH، به منظور استفاده از تکنیک ردیابی ذرات برای تعیین مشخصات ناحیه هایدروپیک استفاده شد. شایان ذکر است که در مدل‌سازی جریان زیرسطحی نیز تعداد پنج سیکل مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است، اما با توجه به شباهت فرم‌های بستر، نتایج مشخصات ناحیه هایدروپیک تنها برای سیکل وسط ارائه خواهد شد.

### ۳- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی مدل شبیه‌سازی جریان سطحی از داده‌های آزمایشگاهی فرم بستر خیزاب-چالاب دوبعدی استفاده شد. تنها پارامتری که در شبیه‌سازی عددی تغییر داده شد تا پروفیل‌های سطح آب و سرعت در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی تطابق پیدا کنند، مقدار ارتفاع زبری در تابع wallFunction در شرط مرزی کف برای فرم بستر بود. نتایج کالیبراسیون نشان داد به ازای زبری معادل اندازه متوسط مصالح بستر ( $d_{50}$ )، مدل بخوبی قادر خواهد بود با ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار نرمال شده آن (NRMSE)

1 No flow



شکل ۵: خطوط جریان هایپرریک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده  
 Fig. 5. Observed and simulated hyporheic path lines

آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد.

همانطور که ملاحظه گردید مدل‌های مذکور توانائی خوبی در شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی دارند. لذا در ادامه شبیه‌سازی هندسه تئوری دو بعدی و سه بعدی طبق رابطه (۱) و (۲) در دو دامنه متفاوت و تأثیر آن بر مشخصات ناحیه هایپرریک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

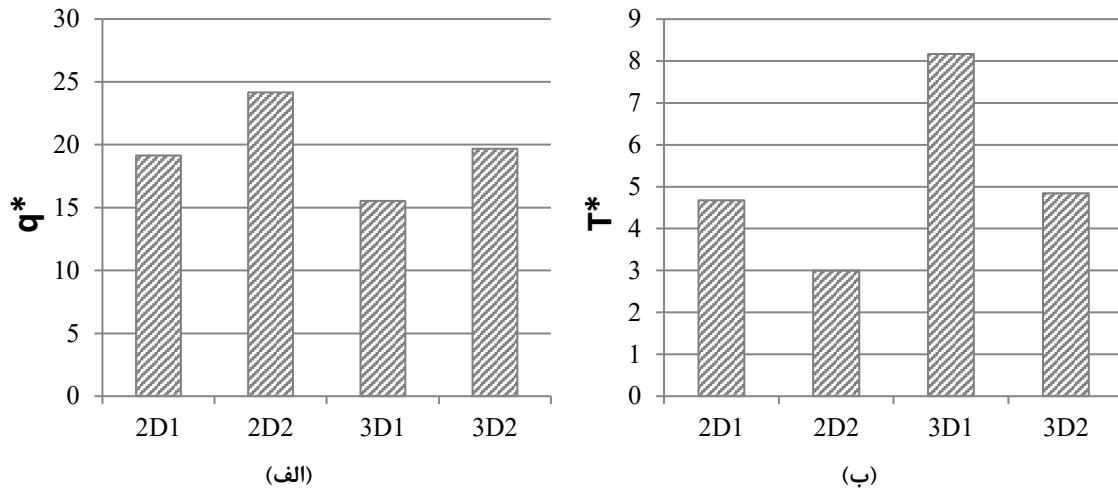
برای تعیین تبدلات هایپرریک، سرعت نفوذ هر ذره در هر سلول محاسبه شده، در سطح آن سلول ضرب و در نهایت از مجموع دبی تمام سلول‌ها در سطح فرم بستر، دبی تبدالی ( $Q_{ex}$ ) بدست می‌آید. سپس دبی تبدالی بدست آمده، طبق رابطه زیر بی بعد می‌گردد [۱۵]:

$$q^* = \frac{Q_{ex}}{\lambda w K} \quad (3)$$

که در آن  $K$  هدایت هیدرولیکی می‌باشد. برای تعیین دبی تبدالی و زمان ماندگاری، خروجی‌های MODPATH مورد تحلیل قرار گرفته، بدینصورت که تنها ذراتی در محاسبات مد نظر قرار می‌گیرند که پس از رها کردن ذره از سطح فرم بستر، مسیری را در مدت زمان مشخص داخل محیط متخلخل طی کرده و سپس به بستر بازگشته‌اند. زمان ماندگاری نیز طبق رابطه زیر بی بعد شده است [۲۶]:

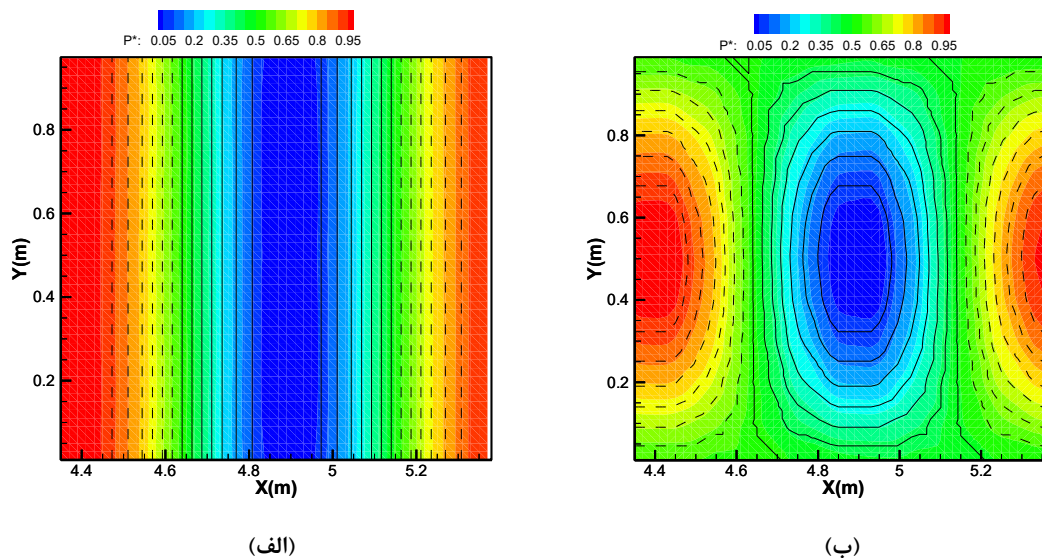
$$T^* = \frac{MRT \times K}{\lambda} \quad (4)$$

مدل، از نتایج تزریق ماده رنگی در نزدیکی جداره کانال (شکل ۲) که در عمق‌ها و مکان‌های مختلف در حد فاصل بین دو چالاب متوالی صورت گرفته بود، استفاده شد. به این نحو که با ثبت زمان و ترسیم مسیر طی شده توسط ماده رنگی بر روی طلق مدرج، سرعت هریک از خطوط هایپرریک داخل ناحیه متخلخل زیرین برآورد گردید. سپس در همان نقاط در مدل عددی نیز ذره رها شد و مدل MODPATH اجرا گردید و خروجی‌های آن به کد متلب نوشته شده توسط نویسندگان منتقل و سرعت هر ذره محاسبه شد و مورد مقایسه با سرعت‌های مشاهده‌ای در آزمایشگاه قرار گرفت. به منظور کالیبراسیون مدل MODFLOW، پارامتر هدایت هیدرولیکی ( $K$ ) تغییر داده می‌شد تا جائیکه حداکثر عمق تبدالات هایپرریک و سرعت داخل محیط متخلخل در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی تطابق داشته باشد. نتایج نشان داد که به ازای هدایت هیدرولیکی ۰/۲ متر بر ثانیه، شرایط فوق ارضا می‌گردد. همچنین مطابق مرجع [۲۵] این مقدار با اندازه ذرات رسوبی بکار رفته در این تحقیق مطابقت داشت. سرعت متوسط هریک از این خطوط در آزمایشگاه، یک سانتی‌متر بر ثانیه و در مدل عددی ۰/۷۹ سانتی‌متر بر ثانیه برآورد گردید که اختلاف ناچیز موجود می‌تواند ناشی از معرفی یک ناحیه متخلخل کاملاً یکنواخت در مدل عددی باشد. شکل ۵، تراز سطح آب و خطوط جریان هایپرریک را برای فرم بستر خیزاب-چالاب دو بعدی در مدل



شکل ۶: مشخصات جریان هایپرریک؛ (الف) دبی تبادل بی بعد، و (ب) زمان ماندگاری بی بعد

Fig. 6. Hyporheic characteristics; (a) dimensionless hyporheic exchange, and (b) dimensionless residence time



شکل ۷: توزیع فشار در امتداد فرم بستر (الف) 2D1، و (ب) 3D2. (خطوط ممتد محل خیزاب و خطوط نقطه چین محل چالاب)

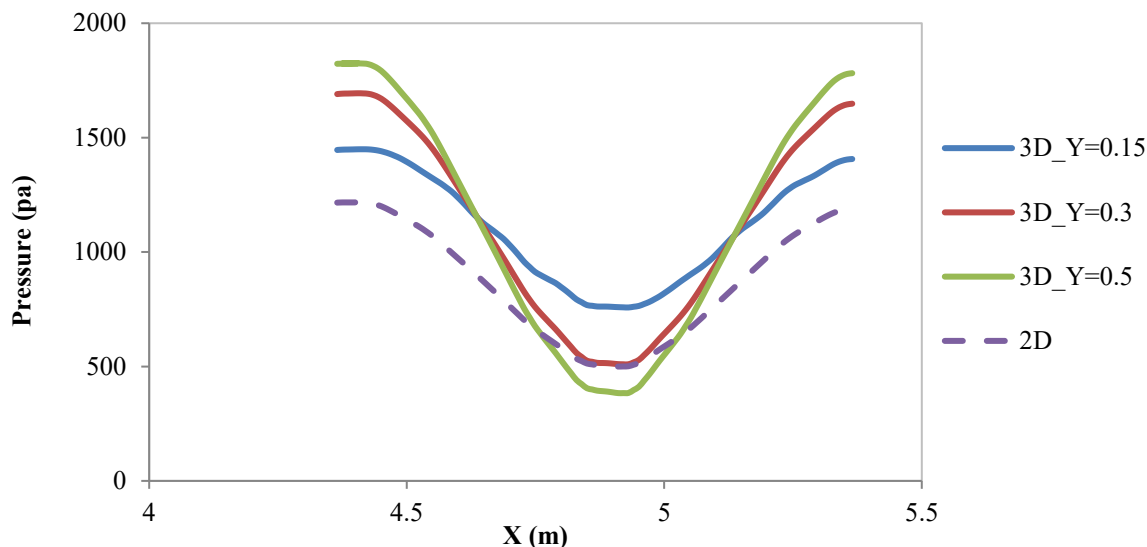
Fig. 7. Pressure distributions along bed form; (a) 2D1, and (b) 3D2 (dashed lines are riffle areas and dotted lines are pool areas)

نتیجه با نتایج ترات و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد چنانچه دامنه خیزاب-چالاب سه بعدی در مرکز کانال برابر با دامنه خیزاب-چالاب دو بعدی در نظر گرفته شود، در هر دو دامنه، میزان تبادلات هایپرریک در شرایط دو بعدی بیشتر از حالت سه بعدی خواهد بود. اما چنانچه میانگین دامنه خیزاب-چالاب سه بعدی (3D2) بعنوان دامنه‌ی خیزاب-چالاب دو بعدی (2D1) در نظر گرفته شود، عبارتی خیزاب-چالاب معادل در نظر بگیریم، میزان

که در آن  $MRT$ ، میانگین زمان ماندگاری می‌باشد و محققین زیادی از این شاخص برای گزارش زمان ماندگاری در ناحیه هایپرریک استفاده نموده‌اند.

مقادیر دبی تبادل و زمان ماندگاری بی بعد به ترتیب در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش تقریباً ۵۰ درصدی دامنه فرم بستر، چه در حالت دو بعدی و چه در حالت سه بعدی، دبی تبادلات هایپرریک افزایش می‌یابد که این





شکل ۸: توزیع فشار در سطح فرم بستر در امتداد طولی کانال، در مدل 3D2 و 2D1  
 Fig. 8. Pressure profiles at bed form along flume length for 2D1 and 3D2

بعدی (3D2) در سه مقطع  $Y=0.15, 0.3, 0.5$  و مدل دوبعدی (2D1) ترسیم شده است. بررسی مقادیر فشار حداقل و حداکثر در این سناریوها نشان می‌دهد که در حالت سه بعدی اختلاف حداکثر و حداقل فشار بیشتر از حالت دو بعدی بوده که منجر به تبادلات بیشتری شده است.

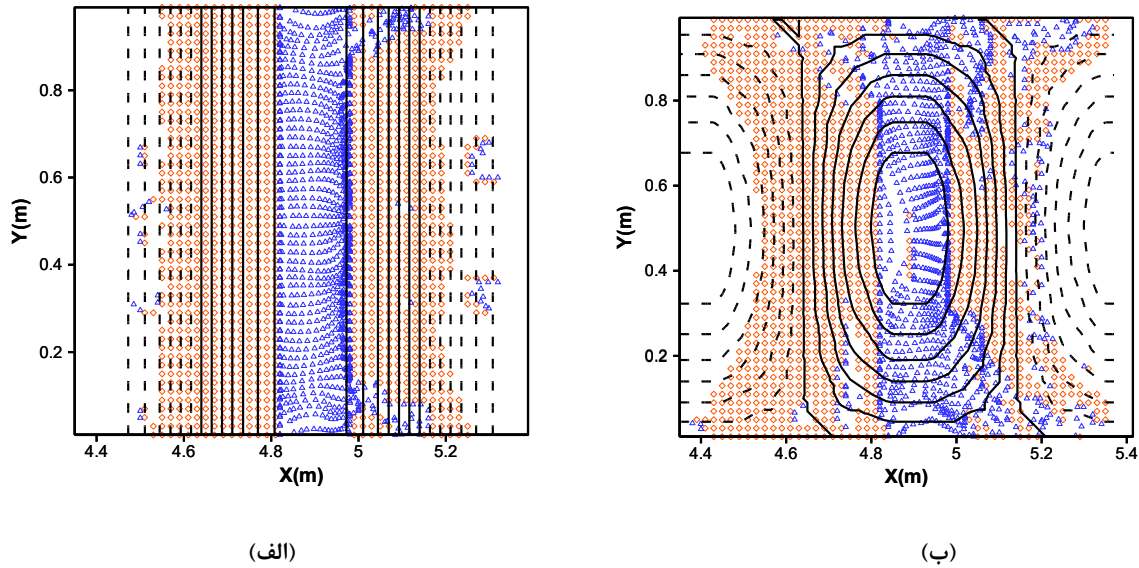
در مورد زمان ماندگاری نیز، اولاً هم در حالت دو بعدی و هم در حالت سه بعدی، با افزایش تقریباً ۵۰ درصدی دامنه، زمان ماندگاری کاهش می‌یابد. ثانیاً همواره مدل سه بعدی دارای زمان ماندگاری بیشتری نسبت به مدل دو بعدی می‌باشد (حدود ۶۲ درصد در دامنه اول و ۷۵ درصد در دامنه دوم). اما چنانچه خیزاب-چالاب‌های معادل را مورد بررسی قرار دهیم (3D2 و 2D1)، زمان ماندگاری بی بعد در حالت سه بعدی ۳/۶۷ درصد بیشتر از دو بعدی می‌باشد. چن و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند در رینولدزهای بالا، تفاوت چندانی بین زمان ماندگاری در حالت دو بعدی و سه بعدی وجود ندارد

در شکل ۹، نقاط تزریق ذره (نقاط قرمز رنگ)، خروج آن (نقاط آبی رنگ) و توپوگرافی بستر در فاصله بین دو چالاب متوالی برای سناریوهای 3D2 و 2D1 ترسیم شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد ذراتی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند که اولاً در این فاصله تزریق شده و از همین فاصله نیز خارج شده باشند، ثانیاً دارای زمان ماندگاری مخالف

تبادلات هاپیریک در حالت سه بعدی ۲/۹ درصد بیشتر از هندسه دو بعدی خیزاب-چالاب خواهد بود.

چن و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که در رینولدزهای بالا (بزرگتر از ۱۵۰۰۰)، میزان تبادلات هاپیریک در حالت سه بعدی بیش از دو برابر حالت دو بعدی خواهد بود، که در تحقیق حاضر این مقدار افزایش مشاهده نمی‌شود و علت آن تفاوت میزان حداقل و حداکثر فشار و هندسه متفاوت دیون و خیزاب-چالاب می‌باشد.

همانطور که پیشتر ذکر شد، آنچه که بر تخمین تبادلات هاپیریک تأثیرگذار است، گرادیان‌های فشار بر روی سطح فرم بستر می‌باشد. در شکل ۷، خطوط هم‌فشار بی‌بعد  $P^* = (P - P_{min}) / (P_{max} - P_{min})$  در سطح خیزاب-چالاب و توپوگرافی بستر برای سیکل وسط در حد فاصل یک چالاب تا چالاب بعدی در حالت دو بعدی و سه بعدی ترسیم شده است. همانطور که مشخص است در فرم بستر دو بعدی، توزیع فشار شکل یکنواختی دارد و با سه بعدی شدن هندسه، توزیع فشار از حالت یکنواخت خارج شده است. نواحی قرمز رنگ که در کف چالاب مشاهده می‌شوند، مناطق پرفشار هستند که جریان‌های سطحی از این مناطق وارد بستر می‌شوند. نواحی آبی رنگ در تاج خیزاب نیز مناطق کم‌فشار هستند که در این مکان‌ها خطوط هاپیریک به جریان سطحی باز می‌گردند. در شکل ۸، تغییرات طولی فشار برای مدل سه



شکل ۹: نقاط تزریق (نقاط قرمز رنگ) و خروج ذرات (نقاط آبی رنگ) بر روی سطح خیزاب-چالاب؛ (الف) مدل 2D1، و (ب) مدل 3D2

Fig. 9. Injected (red) and emerged (blue) points of particles at riffle-pool; (a) 2D1, and (b) 3D2 models

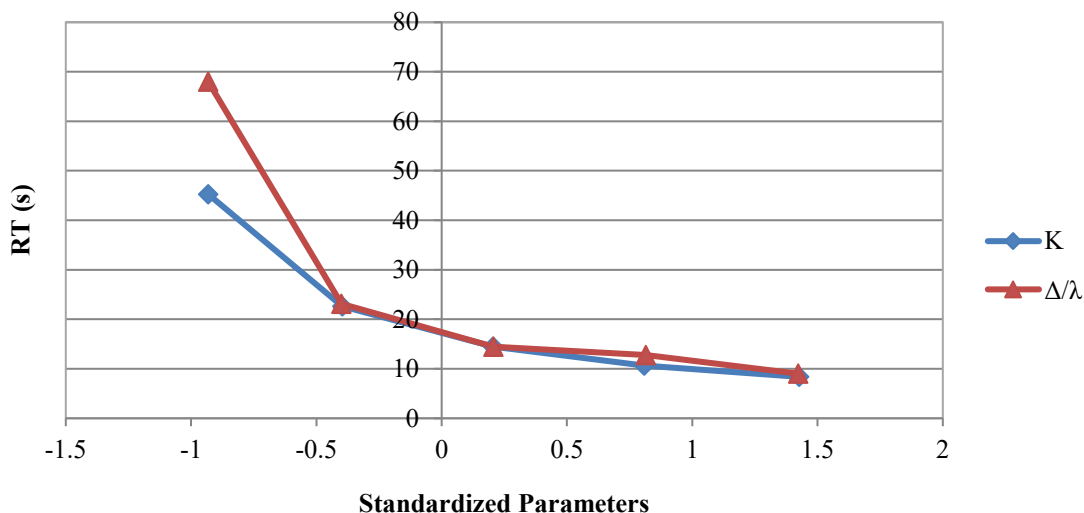
شد و نتایج فشار بر روی سطح فرم بستر به مدل آب زیرزمینی معرفی گردید و در یک  $(\Delta/\lambda)$  ثابت ۰/۱۱ پنج مقدار مختلف هدایت هیدرولیکی، در همان درصد کاهش و افزایش دامنه نسبت به طول موج، مورد بررسی قرار گرفت. از آنجائیکه  $(\Delta/\lambda)$  بی بعد و  $K$  دارای بعد می باشد، طبق رابطه زیر استاندارد شدند:

$$n = \frac{X - \bar{X}}{Sd} \quad (5)$$

در این رابطه  $X$  پارامتر مورد نظر،  $\bar{X}$  میانگین و  $Sd$  انحراف معیار پارامتر مورد بررسی می باشد. شکل ۱۰ آنالیز حساسیت زمان ماندگاری را نسبت به هدایت هیدرولیکی و هندسه فرم بستر نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد برای مقادیر پائین استاندارد شده هدایت هیدرولیکی و هندسه فرم بستر، شیب نمودار هندسه فرم بستر استاندارد شده تندتر از شیب نمودار هدایت هیدرولیکی استاندارد شده بوده که نشان می دهد زمان ماندگاری حساسیت بیشتری نسبت به هندسه فرم بستر دارد و برای نسبت های بالاتر حساسیت هر دو پارامتر یکسان می باشد. در شکل ۱۱ نیز، آنالیز حساسیت دبی تبدالی نسبت به هدایت هیدرولیکی و هندسه فرم بستر استاندارد شده ارائه شده است. در تمامی محدوده مورد بررسی،

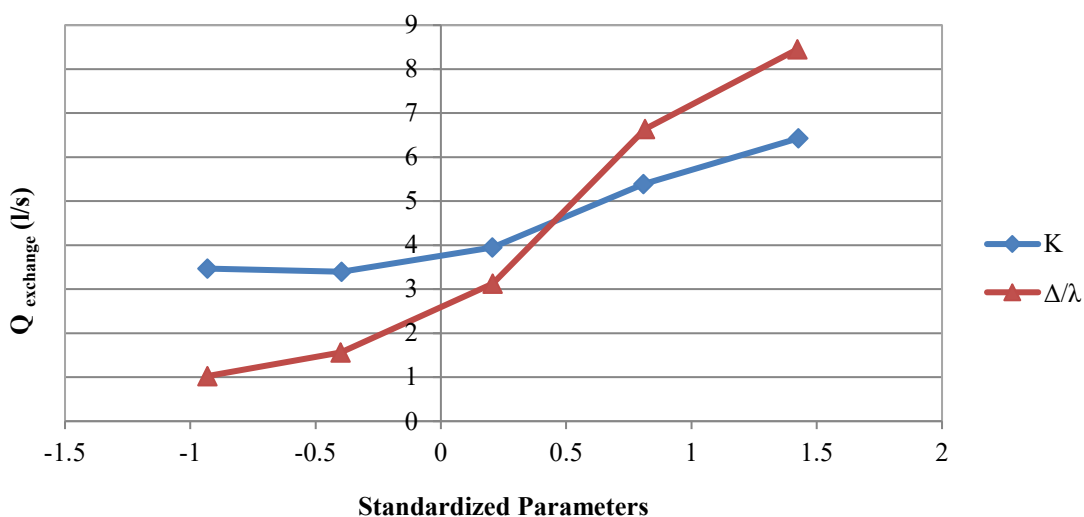
صفر باشند. بنابراین طبق این تعریف نواحی سفید رنگ، نواحی ای هستند که یا محل خروج آن ها خارج از محدوده مورد مطالعه بوده و یا دارای زمان ماندگاری صفر بوده اند. همانطور که ملاحظه می گردد تمامی ذرات از محل تاج خیزاب که محل حداقل فشار می باشد، وارد جریان سطحی می گردند. همچنین در حالت سه بعدی نقاط واقع در چالاب که در تراز بالاتری نسبت به کف چالاب قرار دارند نیز در تبدالات هایپریک شرکت می کنند که منجر به ایجاد دبی تبدالی بیشتری نسبت به حالت دو بعدی می گردند.

بطور کلی مشخصات ناحیه هایپریک شامل دبی تبدالی ( $Q_{\text{exchange}}$ ) و زمان ماندگاری ( $RT$ ) تابعی از ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح بستر و ابعاد هندسی خیزاب-چالاب می باشد که سعی شد در این تحقیق آنالیز حساسیت بر روی این پارامترها انجام گیرد. بدین نحو که در یک هدایت هیدرولیکی ثابت (۰/۲ متر بر ثانیه)، نسبت دامنه به طول موج فرم بستر  $(\Delta/\lambda)$  در محدوده ۰/۳۵ تا ۰/۱۹، تغییر داده می شد. این محدوده با توجه مصالح بستر و هندسه ای که با توجه به مصالح بستر امکان تشکیل آن وجود دارد انتخاب گردید. سپس با ثابت نگه داشتن  $(\Delta/\lambda)$  در میانگین خود (۰/۱۱)، اثر هدایت هیدرولیکی مورد بررسی قرار می گرفت. در مدلسازی جریان سطحی به ازای پنج مقدار برای  $(\Delta/\lambda)$  مدل خیزاب-چالاب دو بعدی اجرا



شکل ۱۰: آنالیز حساسیت زمان ماندگاری نسبت به هدایت هیدرولیکی و هندسه فرم بستر

Fig. 10. Sensitivity analysis of residence time to hydraulic conductivity and bed form geometry



شکل ۱۱: آنالیز حساسیت دبی تبدالی نسبت به هدایت هیدرولیکی و هندسه فرم بستر

Fig. 11. Sensitivity analysis of hyporheic exchange to hydraulic conductivity and bed form geometry

چالاب‌های دو بعدی و سه بعدی صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش تقریباً ۵۰ درصدی دامنه فرم بستر، چه در حالت دو بعدی و چه در حالت سه بعدی، دبی تبادلات هایپرریک افزایش و زمان ماندگاری کاهش می‌یابد همچنین چنانچه همانند مقاله چن و همکاران (۲۰۱۵) میانگین دامنه خیزاب-چالاب سه بعدی بعنوان دامنه‌ی خیزاب-چالاب دو بعدی در نظر گرفته شود، یعنی مقایسه

شیب نمودار استاندارد شده پارامتر فرم بستر، بیشتر از شیب نمودار هدایت هیدرولیکی بوده که حاکی از حساسیت بیشتر دبی تبدالی به هندسه فرم بستر نسبت به هدایت هیدرولیکی می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف مقایسه تبادلات هایپرریک در خیزاب-

- L. Ridolfi, A. Wörman, Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications, *Reviews of Geophysics*, 52(4) (2014) 603-679.
- [2] M. Biddulph, Hyporheic Zone: In Situ Sampling., in: *Geomorphological Techniques*, British Society for Geomorphology., London, UK, Chap. 3, Sec. 11.1 2015.
- [3] D. Tonina, J.M. Buffington, Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects, *Geography Compass*, 3(3) (2009) 1063-1086.
- [4] S.H. Stonedahl, Investigation of the Effect Multiple Scales of Topography on Hyporheic Exchange, Susa Stonedahl, 2011.
- [5] R.C. Naranjo, R.G. Niswonger, C.J. Davis, Mixing effects on nitrogen and oxygen concentrations and the relationship to mean residence time in a hyporheic zone of a riffle-pool sequence, *Water Resources Research*, 51(9) (2015) 7202-7217.
- [6] A.H. McCluskey, Quantifying multi-scale advective hyporheic exchange through mass transfer, 2015.
- [7] A. Fox, F. Boano, S. Arnon, Impact of losing and gaining streamflow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by dune-shaped bed forms, *Water Resources Research*, 50(3) (2014) 1895-1907.
- [8] T. Zhou, T.A. Endreny, Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: Flume and hydrodynamic experiments, *Water Resources Research*, 49(8) (2013) 5009-5020.
- [9] F. Janssen, M.B. Cardenas, A.H. Sawyer, T. Dammrich, J. Krietsch, D. de Beer, A comparative experimental and multiphysics computational fluid dynamics study of coupled surface-subsurface flow in bed forms, *Water Resources Research*, 48(8) (2012).
- [10] A.I. Packman, M. Salehin, M. Zaramella, Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(7) (2004) 647-656.
- [11] A.H. Elliott, N.H. Brooks, Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments, *Water Resources Research*, 33(1) (1997) 137-151.

سناریوهای (3D2) و (2D1)، نتایج نشان می‌دهد میزان تبادلات هایپرریک در حالت سه بعدی بیشتر از دو بعدی می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که چنانچه تحقیقی با هدف بررسی فرآیندهای بیوشیمیائی که زمان ماندگاری در آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد صورت گیرد، چه در دیون‌ها و چه در خیزاب-چالاب‌ها، در نظر گرفتن هندسه دو بعدی، در رینولدزهای بالا، خطای چندانی در محاسبه زمان ماندگاری ایجاد نخواهد کرد. همچنین نتایج نشان داد، بین هدایت هیدرولیکی مصالح و نسبت دامنه به طول موج فرم بستر، مشخصات ناحیه هایپرریک به نسبت دامنه به طول موج حساسیت بیشتری دارد.

## ۵- فهرست علائم علائم انگلیسی

A	دامنه فرم بستر، m
$d_{50}$	اندازه متوسط ذرات، mm
K	هدایت هیدرولیکی، m/s
MRT	میانه زمان ماندگاری، s
MRT	میانه زمان ماندگاری، s
$m$	پارامتر مورد نظر برای استانداردسازی
$\bar{m}$	میانگین پارامتر مورد نظر برای استانداردسازی
P	فشار در امتداد فرم بستر، Pa
$P_{min}$	حداقل فشار در امتداد فرم بستر، Pa
$P_{max}$	حداکثر فشار در امتداد فرم بستر، Pa
$q^*$	دبی بی بعد تبادلات هایپرریک، -
$Q_{ex}$	دبی تبادلات هایپرریک، l/s
Sd	انحراف معیار
$T^*$	زمان ماندگاری بی بعد، -
x	فاصله در راستای طول کانال، m
y	فاصله در راستای عرض کانال، m
z	فاصله در راستای ارتفاع کانال، m
$\lambda$	طول موج، m
$\Delta$	دامنه فرم بستر، m

## علائم یونانی

## ۶- منابع

- [1] F. Boano, J.W. Harvey, A. Marion, A.I. Packman, R. Revelli,

- [19] J.M. Buffington, D.R. Montgomery, Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers, *Water Resources Research*, 35(11) (1999) 3507-3521.
- [20] R.J. McSherry, K.V. Chua, T. Stoesser, Large eddy simulation of free-surface flows, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 29(1) (2017) 1-12.
- [21] W. Rodi, G. Constantinescu, T. Stoesser, *Large-eddy simulation in hydraulics*, Crc Press, 2013.
- [22] T. Kasahara, S.M. Wondzell, Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams, *Water Resources Research*, 39(1) (2003) SBH 3-1-SBH 3-14.
- [23] L.K. Lautz, D.I. Siegel, Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D, *Advances in Water Resources*, 29(11) (2006) 1618-1633.
- [24] T. Chui, S. Liu, Evaluation of hyporheic zone residence time distribution, in: AOGS (Asia Oceania Geosciences Society) 12th Annual Meeting, 2015, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS). 2015.
- [25] A. Ahmadi, M. Akhbari, M. Karamouz, *Groundwater hydrology: engineering, planning, and management*, Crc Press, 2011.
- [26] A. Marzadri, D. Tonina, A. Bellin, G. Vignoli, M. Tubino, Semianalytical analysis of hyporheic flow induced by alternate bars, *Water Resources Research*, 46(7) (2010).
- [12] L.J. Thibodeaux, J.D. Boyle, Bedform-generated convective transport in bottom sediment, *Nature*, 325(6102) (1987) 341.
- [13] M.B. Cardenas, J.L. Wilson, Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments, *Water Resources Research*, 43(8) (2007).
- [14] Y.J. Kim, S. Lee, Numerical modeling of bed form induced hyporheic exchange, *Paddy and water environment*, 12(1) (2014) 89-97.
- [15] X. Chen, M.B. Cardenas, L. Chen, Hyporheic Exchange Driven by Three-Dimensional Sandy Bed Forms: Sensitivity to and Prediction from Bed Form Geometry, *Water Resources Research*, 54(6) (2018) 4131-4149.
- [16] D. Tonina, J.M. Buffington, Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling, *Water Resources Research*, 43(1) (2007).
- [17] N. Trauth, C. Schmidt, U. Maier, M. Vieweg, J.H. Fleckenstein, 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*, 49(9) (2013) 5834-5850.
- [18] X. Chen, M.B. Cardenas, L. Chen, Three-dimensional versus two-dimensional bed form-induced hyporheic exchange, *Water Resources Research*, 51(4) (2015) 2923-2936.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Movahedi, A.A. Dehghani, CH. Schmidt, N. Trauth, M. Meftah Halaghi, *Comparison of Hyporheic Exchanges in 2D and 3D Riffle-Pool bed form structures*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(8) (2020) 2059-2072.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15864.6058](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15864.6058)



