

Laboratory and Numerical Investigation of the Effect of Riffle-Pool Bed-Form Areas on Pollution Transmission in Gravel-Bed Rivers

MOHAMMAD MIRNASERI¹, ALIREZA EMADI^{1*}, ABDOLREZA ZAHIRI², MOHAMMAD-ALI GHOLAMI-SEFIDKOUHI¹

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2. Department of Water Engineering, Faculty of Water and soil Engineering, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources University, Gorgan, Iran.

(Received: Dec. 17, 2020- Revised: Feb. 8, 2021- Accepted: March. 2, 2021)

ABSTRACT

In the present study, the efficiency of the advection-dispersion equation in simulation of the pollution transport through the Gravel-Bed Rivers with Riffle-Pool bed-form was investigated. Experiments of tracer material (NaCl) were performed in a flume with a length of 11 m, width of 0.5 m and height of 0.7 m and with a longitudinal slope of 0.006 in three flow discharges (7.5, 10 and 12.5 lit/s). Four bed-forms of Riffle-Pool with different heights and wavelengths were considered to simulate hyporheic exchanges. The laboratory results were also simulated by the OTIS numerical model. The laboratory results showed that in bedless-form flow, increasing the flow rate increases the longitudinal dispersion coefficient. The opposite of this trend was observed at the presence of bed-form due to hyporheic exchanges. Increasing the height of the bed-form increases the Reynolds number in the hyporheic zone and consequently hyporheic exchanges increase and the longitudinal dispersion coefficient increases. Simultaneous increase of flow rate and the bed-form height causes excessive increase of hyporheic exchanges. Therefore, the residence time of the pollution in the sedimentary bed area is reduced and as a result, the pollution returns to the main flow area with less temporary storage in the storage zones. Therefore, increasing the longitudinal dispersion coefficient with increasing the bed-form height in the range of high flow rates is not significant. Increasing the wavelength of the bed-form also increases the residence time of contamination in the hyporheic zone, which increases the longitudinal dispersion coefficient. Increasing the flow rate reduces the role of hyporheic exchanges so that the main volume of pollution is transferred to the main flow area. Therefore, the effect of increasing the wavelength of the bed-form on the longitudinal dispersion coefficient decreases with increasing the flow rate. The comparison of laboratory results with numerical solution of OTIS model shows the high accuracy of this model in predicting the transmission of contamination.

Keywords: Riffle-Pool, Hyporheic Exchanges, Transmission of Contamination, Advection-Dispersion, OTIS.

بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر نواحی فرم بستر خیزاب-چالاب بر جابجایی آلودگی در رودخانه‌های با بستر شنی

محمد میرناصری^۱، علیرضا عمادی^{۱*}، عبدالرضا ظهیری^۲، محمدعلی غلامی سفیدکوهی^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
 ۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲)

چکیده

در تحقیق حاضر کارایی معادله انتقال-پراکنش در شبیه‌سازی جابجایی آلودگی در رودخانه‌های شنی با فرم بستر خیزاب-چالاب بررسی شد. آزمایش‌های ماده ردیاب (NaCl) در یک کانال آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۷ متر و با شیب طولی ۰/۰۰۶ در سه دبی جریان ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه انجام شدند. چهار فرم بستر خیزاب-چالاب با ارتفاع و طول موج متفاوت برای شبیه‌سازی تبادلات هاپیریک در نظر گرفته شد. نتایج آزمایشگاهی توسط مدل عددی OTIS نیز شبیه‌سازی شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در جریان بدون فرم بستر، افزایش دبی جریان موجب افزایش ضریب پراکنش طولی می‌شود، در حالیکه در جریان با فرم بستر به دلیل تبادلات هاپیریک، عکس این روند مشاهده شد. افزایش ارتفاع فرم بستر باعث افزایش عدد رینولدز جریان در ناحیه هاپیریک می‌شود. افزایش عدد رینولدز نیز سبب افزایش تبادلات هاپیریک و در نتیجه افزایش ضریب پراکنش طولی می‌شود. افزایش هم‌زمان دبی جریان و ارتفاع فرم بستر موجب افزایش بیش از حد دبی تبادلی می‌شود. بنابراین مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه بستر رسوبی کاهش پیدا کرده و در نتیجه آلودگی با ذخیره موقت کم‌تر در ناحیه نگهداشت به ناحیه اصلی جریان بازمی‌گردد. لذا افزایش ضریب پراکنش طولی با افزایش ارتفاع فرم بستر در محدوده دبی‌های جریان زیاد قابل توجه نمی‌باشد. افزایش طول موج فرم بستر نیز موجب افزایش زمان ماند آلودگی در ناحیه هاپیریک شده که این امر باعث افزایش ضریب پراکنش طولی می‌گردد. افزایش دبی جریان موجب کاهش نقش تبادلات هاپیریک شده بنابراین حجم اصلی آلودگی در ناحیه اصلی جریان منتقل می‌شود. لذا تأثیر افزایش طول موج بر ضریب پراکنش طولی با افزایش دبی جریان کاهش پیدا می‌کند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با حل عددی مدل OTIS نشان از دقت بالای این مدل در پیش‌بینی نحوه جابجایی آلودگی دارد.

واژه‌های کلیدی: خیزاب-چالاب، تبادلات هاپیریک، جابجایی آلودگی، انتقال-پراکنش، OTIS.

مقدمه

مطالعات در خصوص آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی و نحوه انتقال و پخش آن‌ها به دلیل ورود فاضلاب‌های شهری و صنعتی، پساب‌های کشاورزی، شیرابه‌های ناشی از دفع زباله‌ها، مواد نفتی و سایر آلودگی‌ها به آب‌های سطحی و دریاچه‌ها از جمله موارد تأثیرگذار بر کیفیت آب بوده است. تحقیق و پژوهش در این خصوص به علت افزایش روزافزون جمعیت و صنعتی شدن دنیا از یک سو و همچنین بحران‌های ناشی از کم‌آبی از سوی دیگر، دارای اهمیت بیشتری شده است.

ضریب پراکنش طولی^۱ یکی از پارامترهای مهم در مطالعات انتقال آلودگی در آب‌های سطحی بوده که با اطلاع دقیق از این ضریب در یک رودخانه یا آبراهه می‌توان نحوه جابجایی آلودگی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف پایین‌دست را پیش‌بینی نمود.

تاکنون معادلات ریاضی و تجربی مختلفی به منظور پیش‌بینی این ضریب ارائه شده اما نتایج نشان از عدم مطابقت کامل این معادلات با ضرایب نمونه‌های واقعی به دلیل ماهیت هیدرولیکی پیچیده جریان‌های طبیعی دارد. این موضوع نشان‌دهنده این است که روابط ارائه شده برای تخمین‌های اولیه مناسب بوده و مقادیر دقیق ضرایب پراکنش طولی باید بر اساس اندازه‌گیری میدانی و آزمایش‌های ماده ردیاب^۲ برای یک مطالعه موردی خاص تعیین و ارزیابی شوند.

(Seo and Cheong (2001) به حل عددی معادله یک بعدی انتقال-پراکنش در آبراهه‌های طبیعی پرداختند. نتایج این مطالعه عواملی مثل نواحی ماندابی، پیچان‌رودی رودخانه‌ها و نامنظمی مسیر آبراهه‌ها را دلیلی برای عدم تطابق بین نتایج داده‌های ردیابی و حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش نشان داد. آن‌ها

¹ Longitudinal Dispersion Coefficient

² Tracer

تبادل آب بین جریان‌های سطحی و لایه بستر رودخانه (زیرسطحی) جریان هایپریک^۱ نامیده می‌شود. جریان هایپریک به دلیل گرادیان‌های فشار هیدرودینامیکی ایجاد می‌شود، به طوری که در مناطق پرفشار، جریان به داخل بستر هدایت شده و در مناطق کم‌فشار دوباره به بدنه جریان برمی‌گردد. فرم بستر^۲ یکی از عوامل موثر بر شکل‌گیری و افزایش جریان‌های هایپریک در رودخانه‌ها بوده که به شکل‌های مختلف در بستر رودخانه و در اثر حرکت جریان به وجود آمده و تأثیر مستقیمی روی زبری بستر و در نتیجه مقاومت جریان دارد. تبادلات هایپریک ناشی از فرم بستر در یک رودخانه موجب می‌شود که مواد آلاینده برای مدت زمانی که زمان ماند^۳ اطلاق می‌شود در ناحیه بستر باقی مانده و سپس به دلیل تبادلات هایپریک، مجدداً به ناحیه اصلی جریان اضافه گردد.

تبادلات و وسعت ناحیه هایپریک^۴ به عوامل مختلفی مانند خصوصیات رسوب بستر رودخانه، تراز سطح آب زیرزمینی و توپوگرافی کف رودخانه وابسته می‌باشد (Stonedahl, 2011). تبادلات هایپریک تحت تأثیر اختلاف فشار در مقیاس‌های مختلف می‌باشد. در مقیاس حوضه‌ای^۵، این تبادل به دلیل اختلاف فشار ناشی از تفاوت تراز رودخانه و تراز سطح آب زیرزمینی ایجاد می‌شود در حالی که در مقیاس رودخانه‌ای^۶، این اختلاف فشار ناشی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها مانند تلماسه‌ها^۷، خیزاب-چالاب‌ها^۸ و سایر فرم‌های بستر ایجاد می‌شود (Biddulph, 2015).

خیزاب-چالاب‌ها یکی از انواع مختلف توپوگرافی بستر رودخانه‌های مستقیم، مارپیچی و شاخه‌ای می‌باشند. این نوع فرم بستر یکی از عوامل اصلی در توسعه مارپیچی شدن رودخانه‌ها است. تغییرات هیدرودینامیکی خیزاب‌ها و چالاب‌ها، موجب تنوع زیستگاه‌های زیستی برای جانداران رودخانه‌ای می‌شود که این امر استفاده از خیزاب-چالاب‌های مصنوعی را در پروژه‌های احیای رودخانه‌ها مورد توجه قرار داده است (Rodríguez et al., 2013). از سوی دیگر تبادلات هایپریک موجب حمل آلاینده‌ها، اکسیژن، کربن آلی و سایر مواد محلول و معلق در آب به ناحیه بستر شده که این امر می‌تواند موجب تغییر خصوصیات کیفی جریان آب خروجی از یک آبراهه شود (Boano et al., 2014).

بررسی آزمایشگاهی تأثیر وجود فرم بستر خیزاب-چالاب در تبادلات هایپریک رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای در مطالعات Tonina and Buffington 2007; Zhou and Endreny, 2013;

همچنین اصلاح در این معادله را برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در شرایط مذکور لازم ارزیابی کردند.

(Kashefipour and Falconer 2002) یک رابطه تجربی را برای پیش‌بینی ضریب پراکنش طولی در آبراهه‌های طبیعی با استفاده از داده‌های میدانی ارائه کردند. نتایج نشان داد که ضریب پراکنش طولی ارتباط مستقیم با سرعت متوسط طولی جریان و عمق متوسط مقطع عرضی داشته و در ارتباط معکوس با سرعت برشی جریان می‌باشد.

(Zeng and Huai 2014) سرعت جریان (U)، عمق جریان (H)، سرعت برشی (U*)، عرض کف (B) و ضریب پراکنندگی طولی (D_x) را به عنوان پارامترهای موثر بر جابجایی و انتقال آلودگی دانسته و با انجام آنالیز رگرسیونی، رابطه بین ضریب پراکنندگی طولی و ضرایب BU و HU را خطی و با ضریب همبستگی ۰/۵۶ و ۰/۷ ارزیابی کردند.

(Meddah et al. 2015) مدلی با عنوان ماتریس انتقال خطی را برای پیش‌بینی ضریب پراکنندگی طولی در آبراهه‌های طبیعی ارائه و دقت این مدل را با مقایسه نتایج خروجی در پیش-بینی ضرایب پراکنندگی طولی و نتایج آزمایش‌های ماده ردیاب در رودخانه‌های طبیعی، مناسب و دارای تطابق بالا ارزیابی کردند.

(Sokác 2017) نتایج حاصل از آزمایش‌های ردیابی میدانی در سه رودخانه مختلف را بررسی نمود. در این مطالعه وجود نواحی راکد به دلیل وجود پوشش گیاهی را عاملی جهت نگهداشت موقت آلودگی دانسته و رودخانه‌ای که دارای پوشش گیاهی بیشتر در خط مرکزی جریان بوده را دارای بالاترین میزان نگهداشت موقت آلودگی نسبت به دو رودخانه دیگر ارزیابی کرد. وی همچنین این نتایج را با حل تحلیلی و همچنین نتایج خروجی نرم‌افزاری تحت عنوان OTIS مقایسه و دقت مناسب این نرم-افزار را در شبیه‌سازی انتشار و پخش آلودگی نشان داد.

(Azhdan et al. 2018, a) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی دقت روش حل تحلیلی معادله کلاسیک انتقال-پراکنش در رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از معادله کلاسیک انتقال-پراکنش در پیش‌بینی شاخه پایین‌رونده با خطا همراه بوده و استفاده از آن را برای نواحی دارای ذخیره موقت توصیه نکردند. (Azhdan et al. 2018, b) همچنین رابطه بین تغییرات دبی جریان و ضریب پراکنش طولی انتقال آلودگی در شرایط شبیه‌سازی مذکور را مستقیم ارزیابی کردند.

انتقال^۳ در آب جاری، جابجا می‌شود. معادله حاکم بر این فرآیندها که با عنوان معادله انتقال-پراکنش^۴ (ADE) شناخته شده است از ترکیب قانون اول فیک^۵ و معادله پیوستگی به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید:

(رابطه ۱)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

که در این رابطه: C غلظت متوسط ماده آلاینده (ماده ردیاب) در مقطع عرضی جریان آبراهه، t مدت زمان سپری شده بعد از تزریق آلودگی، x، y، z به ترتیب جهت‌های طولی، عرضی و عمقی، u، v، w به ترتیب مولفه‌های سرعت متوسط جریان در جهت‌های x، y، z و D_x، D_y، D_z به ترتیب ضرایب پراکنش در جهت‌های x، y، z می‌باشند (Mahmoodian Shooshtari, 2009). فرآیندهای پخشیدگی و پراکنش در زمان ورود آلاینده به داخل یک جریان سطحی و با گذشت زمان در جهت‌های عرضی و عمقی به طور کامل توسعه یافته و صرفاً این فرایندها در جهت طولی جریان همواره در حال توسعه باقی می‌مانند. تغییرات عمده و مهم غلظت در جهت طولی باعث شده است که رابطه (۱) که یک معادله سه بعدی است در عمل به رابطه یک بعدی تبدیل شود.

برای حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش با توجه به مقدار غلظت اولیه آلاینده ورودی و همچنین نوع و نحوه ورود آلودگی به سیستم، روش‌های متفاوتی وجود دارد. مقدار غلظت متوسط آلاینده C با استفاده از حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش در حالت یک بعدی (رابطه ۱) در فاصله x از ابتدای محل تزریق آلودگی و پس از مدت زمان t سپری شده بعد از تزریق آلودگی با ضریب پراکنش طولی D_x و سرعت جریان ثابت U و تزریق آلودگی M₀ در داخل یک کانال به سطح مقطع A صورت رابطه (۲) می‌باشد (Chanson, 2004):

$$C(x, t) = \frac{M_0}{2A\sqrt{\pi D_x t}} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{4D_x t}\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

کانال آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌های این تحقیق در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و عرض ۰/۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. مخزن این فلوم قابلیت تامین دبی جریان تا ۶۰ لیتر بر ثانیه به وسیله سه پمپ را دارد. فلوم آزمایشگاهی دارای شاسی و کف فلزی بوده و جنس کف و دیواره‌های آن از جنس پلکسی گلس شفاف می‌باشد. با توجه به شکل‌گیری فرم بستر خیزاب-چالاب در نواحی

(Trauth et al., 2013) پرداخته شد. آن‌ها خصوصیات از جریان-های هایپرریک همچون زمان ماند، دبی تبدالی، فشار در ناحیه هایپرریک و عمق نفوذ را مورد بررسی قرار دادند.

(Movahhedi et al., 2019) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تبادلات هایپرریک در حضور فرم بستر خیزاب و چالاب پرداختند. آنها با بررسی مشخصات ناحیه هایپرریک نتیجه گرفتند که با افزایش عدد رینولدز، تبادلات هایپرریک افزایش یافته و زمان ماند کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که به طور متوسط حدود ۲۰ درصد جریان‌های سطحی در تبادل با جریان‌های زیرسطحی قرار دارند که اگر سعی شود در پروژه‌های احیای رودخانه به طور مصنوعی توالی‌های خیزاب-چالاب به وجود آید، می‌توان قدرت خودپالایی یک رودخانه را در جذب و کاهش آلاینده‌ها با توجه به زمان ماند آن درون بستر را تعیین و افزایش داد.

بررسی پژوهش‌های پیشین در خصوص انتقال آلودگی نشان می‌دهد که اغلب مطالعات در خصوص حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش بوده و در اکثر مطالعات به داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرایی استناد شده و کمتر به بررسی آزمایشگاهی پرداخته شده است. بررسی‌ها در مقیاس آزمایشگاهی قابلیت تعمیم به نمونه‌های واقعی را داشته و منحصر به یک مطالعه موردی نمی‌باشد. از طرفی بررسی مطالعات حاکی از این می‌باشد که به شرایط ژئومورفولوژی رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی به عنوان یکی از عوامل موثر بر ضریب پراکنش طولی آلودگی پرداخته نشده است. همچنین در خصوص تبادلات هایپرریک به عدم بررسی تأثیر این تبادلات بر ضریب پراکنش طولی آلودگی در رودخانه‌ها می‌توان اشاره کرد. لذا در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر تبادلات هایپرریک در انتقال و پخش آلودگی، با مطالعات آزمایشگاهی اقدام به ایجاد فرم بستر خیزاب-چالاب در بستر شنی شد. علاوه بر حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش، از مدل عددی OTIS نیز برای پیش‌بینی دقیق‌تر نحوه انتقال و پخش آلودگی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی و همچنین حل تحلیلی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

معادله انتقال-پراکنش و حل تحلیلی آن

جابجایی آلاینده‌ها در آب، منحصراً توسط جریان آب و همراه با آن صورت نمی‌گیرد، بلکه آلاینده‌ها در درون توده آب جاری به جنبش درآمده و به علت فرآیندهای پخشیدگی^۱ (پراکنش^۲) و

⁴ Advection-Dispersion Equation

⁵ Fick's Law

¹ Diffusion

² Dispersion

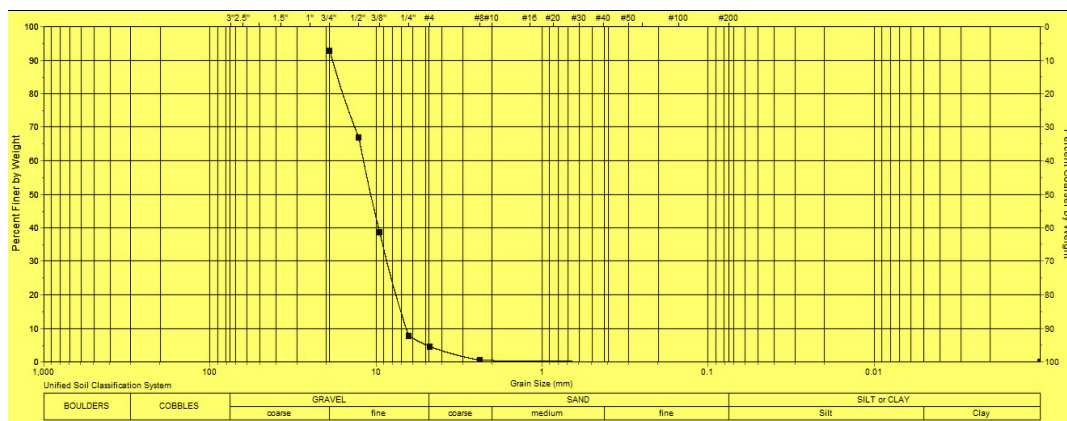
³ Advection

مولفه‌های اصلی در معادله انتقال-پراکنش می‌باشد، از یک دستگاه لوله پیتوت متصل به فشارسنج استفاده شد. این دستگاه نیز قابلیت ثبت سرعت لحظه‌ای جریان به وسیله یک دستگاه ثبات متصل به رایانه در هر چهار ثانیه را دارد. سرعت متوسط مورد نیاز برای معادله انتقال-پراکنش از میانگین سرعت‌های لحظه‌ای ثبت شده در زمان و مکان‌های متفاوت مورد نیاز محاسبه شده است.

ایجاد فرم بستر

تحقیقات (Leopold et al., 1964; Keller and Melhorn, 1978) نشان داد که رودخانه‌هایی که فرم بستر خیزاب-چالاب در آن‌ها بصورت طبیعی شکل گرفته است دارای طول موجی در حدود ۵ تا ۷ برابر عرض رودخانه می‌باشند. همچنین در مطالعات (Carling and Orr, 2000) مقادیر کمتری در حدود ۳ برابر عرض رودخانه نیز گزارش شده است. (Montgomery et al., 1995) این طول موج را برابر عرض آبراهه در نظر گرفته‌اند. در این تحقیق با توجه به مطالعات اشاره شده، طول موج فرم‌های بستر ۱ متر و ۳ متر (به ترتیب دو و شش برابر عرض آبراهه) انتخاب شد. به منظور شبیه‌سازی رودخانه با بستر سنگریزه‌ای از مصالح تهیه شده از معدن تولید شن و ماسه نکا رود استفاده شد. مصالح رودخانه‌ای پس از تمیز و شسته شدن به داخل کانال آزمایشگاهی ریخته شده و بستری با ضخامت ۳۲ سانتی‌متر، عرض ۰/۵ متر و طول ۱۰ متر با اندازه متوسط (d₅₀) ۱۱/۸۵ میلی‌متر، انحراف معیار هندسی (σ_g) ۱/۵۵ و تخلخل (n) ۰/۲۸ تهیه شد. شکل (۱) منحنی دانه‌بندی مصالح بستر رسم شده با استفاده از نرم‌افزار WinSieve را نشان می‌دهد. ضخامت بستر رسوبی بر اساس یافته Thibodeaux and Boyle (1987) مبنی بر اینکه عمق جریان هایپریک تا پنج برابر ارتفاع فرم بستر متغیر است، انتخاب شد.

کوهستانی و دارای شیب نسبتاً غیرملازم، شیب کانال مورد استفاده در این پژوهش ۰/۰۰۶ تنظیم شده و آزمایش‌ها تحت شرایط جریان پایدار و یکنواخت انجام شده است. در این پژوهش به منظور جلوگیری از عدم بازگشت جرم برگشتی آلودگی به جریان ورودی، فلوم آزمایشگاهی طوری طراحی و اجرا شد که جریان غیرچرخشی در آن برقرار شود. بدین منظور در طی انجام آزمایش‌ها، جریان آب تازه به داخل مخزن وارد شده و جریان همراه با آلودگی از انتهای آن خارج گردیده و به داخل چرخه جریان بازنگشته است. برای تنظیم دبی جریان در آزمایش‌ها از یک شیر فلکه‌ای کالیبره شده در مسیر جریان استفاده شده است که میزان دقیق جریان ورودی به داخل لوله رانش پمپ توسط یک دبی‌سنج صوتی اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها برای سه دبی جریان ۰/۷، ۱۰، ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه انجام پذیرفت. برای اندازه‌گیری عمق جریان در داخل فلوم آزمایشگاهی از یک دستگاه عمق‌سنج صوتی با دقت ۰/۱ میلی‌متر در چهار نقطه مختلف کانال استفاده شده است. این دستگاه این قابلیت را دارد که هر دو ثانیه عمق جریان برداشت شده را به وسیله دستگاه ثابتی که به رایانه متصل شده، ثبت نماید. عمق جریان در گودترین نقاط (چالاب‌ها) و در آزمایش‌های بدون فرم بستر نسبت به سطح رسوب بستر اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق محدوده نسبت عمق جریان به عمق بستر رسوبی بین ۰/۲۷ تا ۰/۴۹ بوده است. با انجام آزمایش‌های متعدد در محدوده‌های بالاتر مشخص گردید که با افزایش بیشتر این نسبت، سهم جریان سطحی در انتقال آلودگی - ها افزایش یافته و آلودگی با مدت زمان ماند کم‌تر و گاهی بدون این‌که در نواحی هایپریک، نگهداشت موقت گردد از ناحیه جریان خارج می‌شود. بنابراین محدوده دبی‌های مذکور برای بررسی دقیق‌تر تأثیر نواحی هایپریک بر نگهداشت موقت آلودگی انتخاب شدند. برای اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان که یکی از



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر با استفاده از نرم‌افزار WinSieve

در این پژوهش با استفاده از رابطه (۳)، چهار نوع فرم بستر

Z ارتفاع فرم بستر، A نصف دامنه فرم بستر کانال و λ طول موج فرم بستر می‌باشند (Trauth et al., 2013).

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر ارتفاع و طول موج فرم بستر بر جابجایی آلودگی در جریان از دو طول موج و ارتفاع متفاوت استفاده شد. شکل (۲) نمایی از بستر بدون فرم و همچنین دارای فرم بستر RP1 را نشان می‌دهد.

خیزاب- چالاب دو بعدی در دو دامنه Δ^1 و دو طول موج λ^2 متفاوت در کف فلوم ایجاد شدند. مشخصات کامل این فرم‌های بستر در جدول (۱) ارائه شده است:

$$Z(x) = A * \sin\left(\frac{2*\pi}{\lambda}x\right) \quad (\text{جدول ۱})$$

در رابطه بالا، x فاصله طولی راستای کانال در مسیر جریان،

جدول ۱- مشخصات فرم بستر خیزاب- چالاب ایجاد شده در آزمایش‌ها

نوع فرم بستر	دامنه فرم بستر Δ (cm)	طول موج فرم بستر λ (m)	تعداد سیکل N
RP1	۱۲/۵	۱	۱۰
RP2	۶/۲۵	۱	۱۰
RP3	۱۲/۵	۳	۳
RP4	۶/۲۵	۳	۳



شکل ۲- سمت راست: کانال با فرم بستر RP1. سمت چپ: کانال بدون فرم بستر

برای هر یک از حسگرها استخراج شد و غلظت جریان با استفاده از این رابطه در هر ۲ ثانیه برای هر یک از آزمایش‌ها محاسبه گردید. در شکل (۳) کانال آزمایشگاهی و ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۳- a: عمق سنج، b: فلومتر، c: نمای جانبی کانال آزمایشگاهی با فرم بستر RP3، d: حسگر اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، e: لوله پیتوت

از کلرید سدیم به عنوان ماده ردیاب استفاده شد. غیرواکنشی بودن این ماده با بدنه اصلی جریان و همچنین وجود تجهیزاتی به منظور اندازه‌گیری تغییرات غلظت، دلیل انتخاب این ماده به عنوان ردیاب بوده است. غلظت اولیه آلودگی نیز از حل کردن ۲۴۰ گرم کلرید سدیم ۹۹ درصد در ۴ لیتر آب تهیه شد که این محلول به صورت آبی (لحظه‌ای) در نقطه‌ای به فاصله ۱ متر از بالادست شروع بستر رسوبی در بالادست جریان تزریق شده و برای ردیابی این ماده از حسگرهای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در پایین دست استفاده شد. بدین منظور ۶ حسگر اندازه‌گیری هدایت الکتریکی به ترتیب در فواصل ۳، ۶ و ۹ متری از ابتدای شروع جریان نصب شدند. در جریان همراه با فرم بستر، حسگرها آنها در خیزاب قرار گرفتند. حسگرهای نصب شده در خط مرکزی جریان ۳ قابلیت اندازه‌گیری و ثبت هدایت الکتریکی جریان در هر ۲ ثانیه را به وسیله یک دستگاه ثبت داده متصل به رایانه دارند. میانگین هدایت الکتریکی ثبت شده در یک مقطع عرضی به عنوان هدایت آن مقطع در نظر گرفته شد. پیش از شروع آزمایش‌ها، یک رابطه واسنجی شده بین غلظت ماده ردیاب و هدایت الکتریکی

مدل ریاضی

مدل ریاضی OTIS^۱ یک مدل شبیه‌سازی ریاضی برای بررسی انتقال مواد محلول در نهرها و رودخانه‌ها است که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۲ ارائه شده است. در این مدل، معادله انتقال-پراکنش با استفاده از روش تفاضل‌های محدود ضمنی کرانک-نیکلسون حل شده است. معادله انتقال-پراکنش اصلاح شده با ترم‌های ذخیره موقت، جریان‌های جانبی تحت عنوان مدل ذخیره موقت^۳ مطابق روابط (۴) و (۵) به صورت حل هم‌زمان جفت معادله دیفرانسیل در نظر گرفته می‌شود (Runkel, 1998):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (C_L - C) + \alpha (C_S - C) \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{dC_S}{dt} = -\alpha \frac{A}{A_S} (C_S - C) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط فوق، A_S مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت موقت، C غلظت ماده حل شده در کانال اصلی، C_L غلظت ماده حل شده در جریان ورودی جانبی، C_S غلظت ماده حل شده در ناحیه نگهداشت، D_x ضریب پراکنش طولی، Q دبی جریان، q_L دبی جریان در واحد عرض جریان ورودی جانبی، α ضریب تبادل ناحیه نگهداشت موقت می‌باشد.

برای حل عددی مدل OTIS علاوه بر داده‌های جریان و رسوب شامل دبی جریان، عمق جریان و ضخامت ناحیه رسوبی، باید داده‌های برداشت شده آزمایشگاهی غلظت-زمان آلودگی در بالادست را به عنوان شرایط مرزی وارد تا مقادیر غلظت در فواصل مکانی و زمانی معین در پایین‌دست محاسبه شود. در این پژوهش داده‌های برداشت شده غلظت آلودگی بازه ۱ که در فاصله ۳ متری از محل تزریق قرار دارد به عنوان شرایط مرزی بالادست به نرم‌افزار داده شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار اقدام به شبیه‌سازی بازه‌های ۲ و ۳ در فواصل ۶ و ۹ متری از محل تزریق آلودگی شد.

ارزیابی آماری روش‌های شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی و بررسی روش‌های حل‌های تحلیلی و عددی (OTIS) در برآورد غلظت و نحوه زمانی توزیع آلودگی و در نتیجه بازسازی منحنی رخنه، از معیارهای متداول آماری شامل ضریب تعیین^۴ (R^2)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده^۵ (NRMSE)، میانگین خطای مطلق^۶ (MAE) و ضریب نش-ساتکیلف^۷ (NS) به ترتیب مطابق روابط (۶) تا (۹) استفاده شد:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})(C_{sim,i} - \bar{C}_{sim,i})}{\left(\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})^2 \right)^{0.5} \left(\sum_{i=1}^N (C_{sim,i} - \bar{C}_{sim,i})^2 \right)^{0.5}} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$NRMSE = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - C_{sim,i})^2}{N} \right)^{0.5}}{\bar{C}_{lab,i}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |C_{lab,i} - C_{sim,i}|}{N} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - C_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در روابط بالا N تعداد کل داده‌ها، $C_{lab,i}$ و $C_{sim,i}$ به ترتیب غلظت آزمایشگاهی و غلظت شبیه‌سازی شده، $\bar{C}_{lab,i}$ و $\bar{C}_{sim,i}$ به ترتیب میانگین غلظت آزمایشگاهی و غلظت شبیه‌سازی می‌باشند.

نتایج و بحث

حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش

در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری نحوه توزیع ماده ردیاب در ناحیه جریان پس از آماده‌سازی بستر رسوبی و همچنین چهار حالت مختلف فرم بستر خیزاب-چالاب، حسگرهای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در فواصل ۳، ۶ و ۹ متری از ابتدای کانال آزمایشگاهی قرار گرفتند. منحنی‌های رخنه^۸ که تغییرات غلظت آلودگی در برابر زمان را نشان می‌دهند، برای تمام حالات آزمایش در هر سه بازه قرارگیری حسگرها و در سه دبی جریان ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه رسم شدند. همچنین ضریب پراکنش طولی انتقال آلودگی در هر یک از حالات فوق با حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش به روش بهینه‌سازی برازش منحنی با روش کم-ترین مربعات خطا^۹ و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB به دست آمد. منحنی‌های رخنه پس از تعیین ضریب پراکنش طولی به روش حل تحلیلی در هر بازه و با استفاده از معادله انتقال-پراکنش در فواصل زمانی دو ثانیه بازسازی شدند. شکل (۴) منحنی‌های رخنه حاصل از نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌های رخنه بازسازی شده با روش حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش را در هر چهار حالت مختلف فرم بستر در دبی جریان ۱۰ لیتر بر ثانیه در بازه دوم را نشان می‌دهد.

شکل (۵) منحنی‌های رخنه برداشتی از نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌های رخنه بازسازی شده با روش حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش را در حالت بدون فرم بستر در دبی جریان ۱۰ لیتر بر ثانیه و در هر سه بازه مسیر جریان را نشان می‌دهد.

6 Mean Absolute Error

7 Nash-Sutcliffe

8 Breakthrough Curve

9 Least Square Curve Fitting

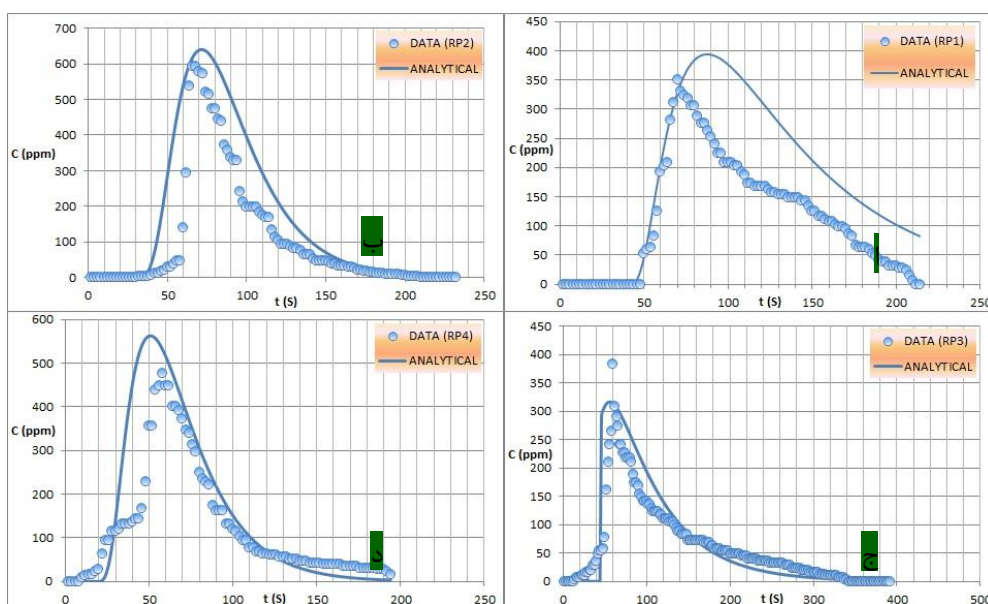
۱ One-Dimensional Transport with Inflow and Storage

۲ USGS (The United States Geological Survey)

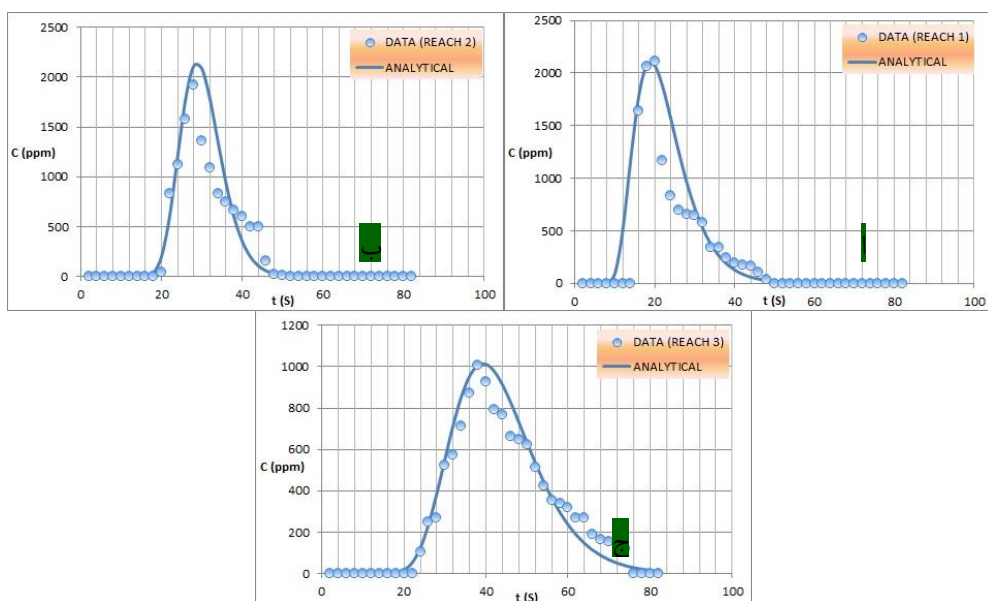
۳ Transient Storage Model (TSM)

۴ Determination Coefficient

۵ Normalized Root Mean Square Error



شکل ۴- منحنی رخنه آزمایشگاهی و بازسازی شده به روش حل تحلیلی در دبی جریان ۱۰ لیتر بر ثانیه برای حالات چهارگانه فرم بستر



شکل ۵- منحنی رخنه آزمایشگاهی و بازسازی شده به روش حل تحلیلی در دبی جریان ۱۰ لیتر بر ثانیه برای حالت بدون فرم بستر

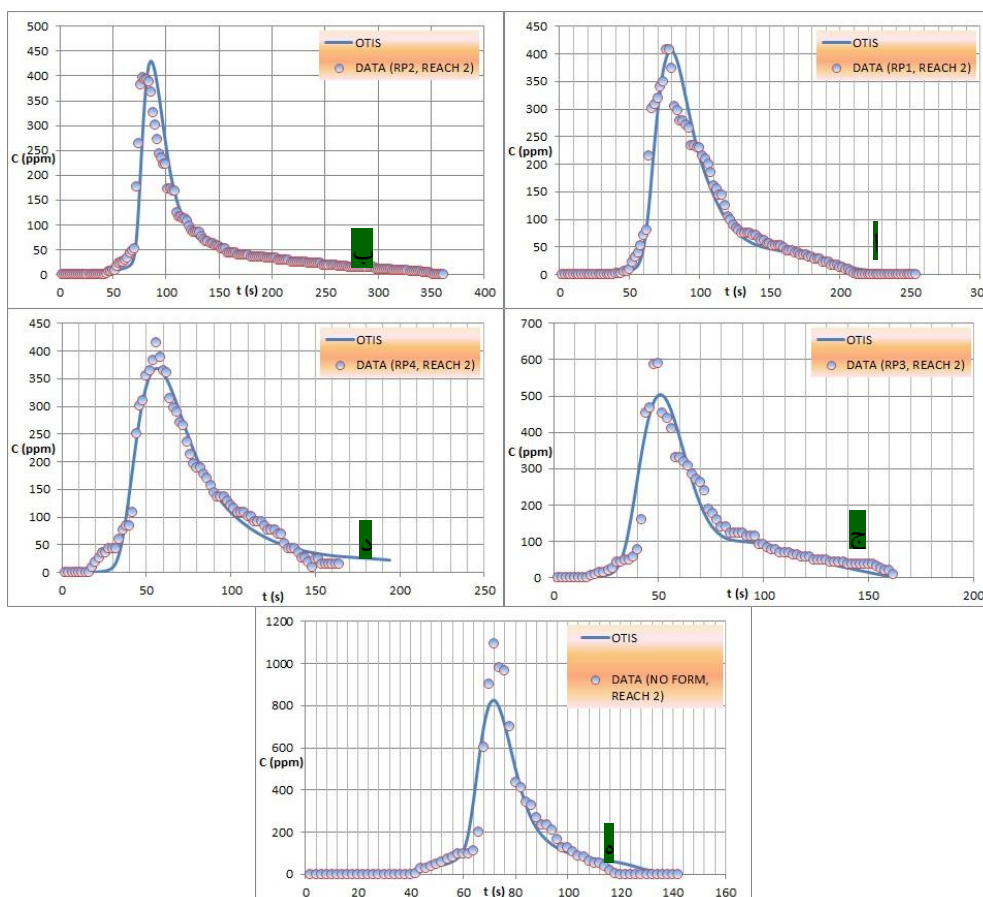
از فرم بستر پیش‌بینی نشده و این امر موجب عدم تطابق بین منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده و منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی ماده ردیاب شده است. در شکل (۴) به دلیل همین تبدلات هایپرریک و نگهداشت موقت آلودگی در نواحی بستر، نتایج حل تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی نداشته و معمولاً حل تحلیلی به دلیل عدم در نظر گرفتن نواحی نگهداشت موقت، غلظت اوج بیش‌تری را نسبت به شرایط واقعی شبیه‌سازی خواهد کرد.

نتایج کامل ضرایب پراکنش طولی به دست آمده از حل تحلیلی و همچنین ضرایب آماری مقایسه نتایج بازسازی شده با این روش و نتایج آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج

منحنی‌های رخنه شکل (۵) نشان می‌دهد که حل تحلیلی تا حد زیادی قادر به پیش‌بینی نقاط اوج منحنی‌های رخنه و بازوی بالارونده آزمایشگاهی در تمامی بازه‌ها می‌باشد. اما آزمایش‌های با فرم بستر سبب ایجاد تبدلات هایپرریک در ناحیه زیر بستر رسوبی می‌شود. تبدلات هایپرریک سبب می‌شود که هنگام ورود آلودگی به داخل جریان، بخش عمده‌ای از آن مدت زمانی در بستر رسوبی نگهداشت موقت شده و سپس به ناحیه اصلی جریان بازگردد. این امر موجب می‌شود که تغییراتی در منحنی رخنه هم در نقطه اوج و هم در کشیدگی منحنی و همچنین در روند حرکت بازوی پایین‌رونده آن رخ دهد. حال آن‌که در معادله انتقال-پراکنش، این نگهداشت موقت آلودگی در نواحی هایپرریک ناشی

ارزیابی شدند. با دقت در شکل (۵) و مقایسه منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و حل تحلیلی در آزمایش‌های بدون فرم بستر می‌توان تطابق بین این منحنی‌ها را مشاهده کرد اما از سوی دیگر در سایر مقایسه‌ها در شکل (۴) تطابق قابل قبولی بین منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و حل تحلیلی مشاهده نمی‌شود.

این جدول نشان می‌دهند که با دو روند متفاوت در مقایسه حل تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی مواجه بوده‌ایم. از یک سو حل تحلیلی در آزمایش‌های بدون فرم بستر دارای بالاترین ضرایب آماری بوده اما از سوی دیگر در سایر آزمایش‌ها که بستر دارای فرم خیزاب-چالاب بوده، ضرایب آماری در مقایسه با حالات قبل پایین‌تر



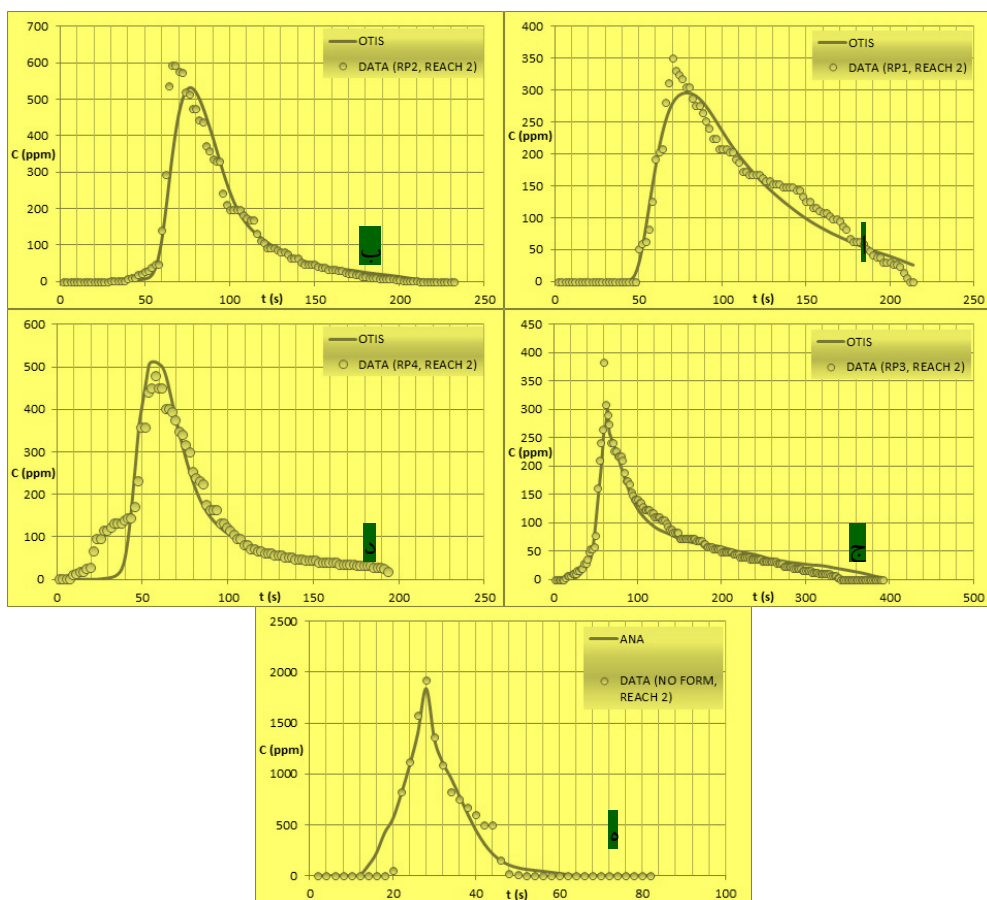
شکل ۶- منحنی رخنه آزمایشگاهی و بازسازی شده با نرم‌افزار OTIS در دبی جریان ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه برای تمام حالات بستر در بازه دوم

یک روش جایگزین در چنین شرایطی استفاده شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار OTIS از ضرایب پراکنش طولی محاسبه شده توسط روش حل تحلیلی استفاده شده است. همچنین با توجه به این‌که داده‌های برداشتی غلظت ماده ردیاب در بازه ۱ به عنوان شرایط مرزی بالادست به مدل داده شد، لذا نرم‌افزار صرفاً در بازه‌های ۲ و ۳ قادر به شبیه‌سازی خواهد بود. مقایسه آماری نتایج بازسازی شده با نرم‌افزار OTIS در بازه‌های دوم و سوم با نتایج آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب منحنی‌های رخنه برداشتی از نتایج آزمایشگاهی و منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار OTIS را در هر پنج حالت مختلف بستر در دبی جریان ۱۲/۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه در بازه دوم را نشان می‌دهند.

نتایج آزمایش‌های بدون فرم بستر با نتیجه پژوهش Azhdan *et al.* (2018, a) تطابق دارد. از سوی دیگر نتایج آزمایش‌های با فرم بستر به دلیل نگهداشت موقت آلودگی به علت تبادلات هاپیریک، نشان از عدم تطابق با نتایج آن‌ها را دارند. عدم کارایی حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش در بازسازی منحنی‌های رخنه برداشتی در مناطق دارای نگهداشت موقت توسط Seo and Cheong (2001) نیز گزارش شده است. آنها تأثیر مناطق ماندابی و ماندیری آبراه‌ها را عامل این عدم انطباق ذکر کرده‌اند.

حل عددی با نرم‌افزار OTIS

با توجه به عدم کارایی مناسب حل تحلیلی برای بازسازی منحنی رخنه در جریان‌های دارای نواحی هاپیریک، در این پژوهش از نرم‌افزار OTIS برای بازسازی این منحنی‌ها به عنوان



شکل ۷- منحنی رخنه آزمایشگاهی و بازسازی شده با نرم‌افزار OTIS در دبی جریان ۱۰ لیتر بر ثانیه برای تمام حالات بستر در بازه دوم

در محیط متخلخل بستر و برگشت آن پس از مدت زمانی به ناحیه اصلی جریان موجب شکل‌گیری بازوی پایین‌رونده با شیب ملایم-تر و زمان طولانی‌تر می‌گردد. حال آن‌که وجود نواحی هایپرریک ناشی از فرم بستر خیزاب-چالاب موجب کندتر شدن این تبادل و در نتیجه تغییرات عمده در بازوی پایین‌رونده شده و از طرفی نگهداشت موقت آلودگی در فرم‌های بستر در غلظت اوج و در نتیجه بازوی بالارونده نیز تا حدودی تأثیر خواهند داشت. این موضوع در جریان‌های دارای فرم بستر باعث عدم پیش‌بینی صحیح غلظت اوج و بازوی بالارونده و همچنین بازوی پایین‌رونده توسط حل تحلیلی شد. اما منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار OTIS نشان می‌دهند که زمان شروع آلودگی، زمان پایان آلودگی و زمان رسیدن به غلظت بیشینه در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی تا حد زیادی تطابق دارند. لحاظ شدن جداگانه مساحت ناحیه اصلی جریان (A) و مساحت ناحیه بستر رسوبی (A_s) در معادله اصلاح شده انتقال-پراکنش حاکم در نرم‌افزار OTIS سبب می‌شود که نقش نواحی هایپرریک و تبدلات آن در انتقال آلودگی به صورت دقیق‌تری شبیه‌سازی گردد. نتایج آماری جدول (۲) نشان می‌دهد که نرم‌افزار OTIS

مقایسه آماری جدول (۲) نشان از تطابق منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار OTIS در مقابل منحنی‌های رخنه برداشتی دارد. در نرم‌افزار OTIS برای حل عددی انتقال و پراکنش آلودگی، مدل ذخیره موقت به عنوان معادله اساسی حاکم با ترم‌های اضافی شامل ذخیره موقت، جریان جانبی در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن ترم اضافی ذخیره موقت در معادله انتقال-پراکنش در نرم‌افزار OTIS برای شبیه‌سازی موجب شده که روند تدریجی خروج آلودگی از فضای محیط متخلخل بستر به بدنه اصلی جریان و مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه بستر نیز به خوبی در نظر گرفته شود. لذا بازوی پایین‌رونده منحنی رخنه شبیه‌سازی شده همانند منحنی برداشتی با شیب ملایم‌تر و با کشیدگی بیشتری به سمت پایین میل کرده که این مسأله موجب افزایش دقت شبیه‌سازی شده است.

بخشی از آلودگی پس از تزریق همراه با جریان آب در مدت زمان کمی حرکت کرده و به محل حسگرها رسیده که در واقع غلظت حداکثر و بازوی بالارونده را شامل شده و به همین دلیل حل تحلیلی قادر به ارزیابی و شبیه‌سازی نسبتاً درستی از آن در جریان‌های بدون فرم بستر بوده است. اما به تله افتادن آلودگی‌ها

موجب افزایش عدد رینولدز در ناحیه هایپرریک می‌شود. از طرفی بر مبنای مطالعات فوق، افزایش عدد رینولدز در نواحی هایپرریک باعث کاهش زمان ماند آلودگی در ناحیه هایپرریک و همچنین افزایش دبی تبدلی بین ناحیه هایپرریک و بدنه اصلی جریان آب می‌شود. بنابراین در نواحی پایین دست هر فرم بستر، غلظت اوج آلودگی افزایش می‌یابد. در نتیجه در جریان‌های دارای فرم بستر، افزایش دبی سبب افزایش غلظت اوج آلودگی شده و این امر موجب کاهش ضریب پراکنش طولی می‌شود.

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که ضریب پراکنش طولی در تمام حالات فرم بستر در دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه دارای بیشترین مقدار و در دبی جریان ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه دارای مقدار کمتری می‌باشد. با توجه به اینکه رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی خصوصاً در مناطق کوهستانی دارای فرم بستر می‌باشند و امکان ذخیره موقت آلودگی در این نواحی هایپرریک و بازسانی آن به بدنه اصلی جریان رودخانه وجود دارد، لذا در نظر گرفتن این نواحی در انتقال و پخش آلودگی از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و موجب تغییرات هیدرولوژیکی زیادی در انتشار و پخش آلودگی خواهند شد. در این پژوهش با انجام یک سری پیش آزمایش‌ها مشخص شد که در محدوده‌های دبی بالاتر، سهم بدنه اصلی جریان بسیار زیاد شده و در واقع آلودگی ورودی بدون اینکه در نواحی هایپرریک دچار نگهداشت موقت شود از ناحیه جریان خارج خواهد شد. بنابراین در این شرایط بررسی تأثیر تبدلات هایپرریک بر جابجایی آلودگی معنی نخواهد داشت. در واقع وجود یا عدم وجود فرم بستر در محدوده‌های دبی بالاتر بر روند جابجایی آلودگی تأثیر خود را از دست خواهند داد.

تأثیر ارتفاع فرم بستر بر ضریب پخشیدگی طولی

مقایسه نتایج ضرایب پراکنش طولی در دو حالت با و بدون فرم بستر نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع فرم بستر موجب افزایش ضریب پراکنش در نمونه‌های دارای فرم بستر نسبت به نمونه‌های بدون فرم بستر می‌شود. در واقع وجود این نواحی هایپرریک باعث افزایش مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه بستر رسوبی شده که این امر باعث کاهش غلظت آلودگی انتقالی در ناحیه اصلی جریان می‌شود. وجود این نواحی هایپرریک و نگهداشت موقت آلودگی سبب می‌شود که در یک شرایط هیدرولیکی یکسان، جریان با فرم بستر دارای ضریب پراکنش طولی به مراتب بیش‌تری نسبت به حالت بدون فرم بستر باشد.

قابلیت بالایی در شبیه‌سازی نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب دارد. در روش حل تحلیلی صرفاً برای آزمایش‌های بدون فرم بستر به دلیل عدم وجود جریان‌های هایپرریک و نگهداشت موقت کمتر، انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده اما در شبیه‌سازی با نرم‌افزار OTIS برای تمامی حالات آزمایش این تطابق با توجه به نتایج آماری مناسب ارزیابی شد.

تأثیر دبی بر ضریب پخشیدگی طولی

نتایج جدول (۲) نشان داد که ضریب پراکنش طولی در جریان‌های بدون فرم بستر با افزایش دبی جریان افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. دلیل این مساله این است که با افزایش دبی جریان در یک شرایط هیدرولیکی ثابت، عمق جریان افزایش یافته و در نتیجه غلظت اوج آلودگی اختلاطی در ناحیه جریان کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش دبی جریان باعث افزایش سرعت جریان شده و این امر سبب می‌شود که ابر آلودگی که دارای غلظت اوج کم‌تری نیز شده است با سرعت بیشتری به سمت پایین دست حرکت کند. تأثیر هم‌زمان این دو مولفه سبب می‌شود که ضریب پراکنش طولی افزایش یابد که این با نتایج Azhdan *et al.* (2018, b) مطابقت دارد. از طرفی نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که بر خلاف جریان‌های بدون فرم بستر، افزایش دبی جریان در جریان‌های دارای فرم بستر موجب کاهش ضریب پراکنش طولی می‌شود که دلیل این موضوع را می‌بایست با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان در نواحی هایپرریک تحلیل و بررسی نمود. عدد رینولدز یکی از پارامترهای اصلی در تحلیل تبدلات هایپرریک می‌باشد که از رابطه (۱۰) بدست می‌آید (Cardenas and Wilson, 2006):

$$Re = \frac{U_{ave} \Delta}{\nu} \quad (\text{رابطه } 10)$$

در این رابطه U_{ave} سرعت متوسط جریان، Δ فاصله تاج خیزاب تا کف چالاب و ν ضریب لزجت سینماتیک آب می‌باشد. مطالعات موحدی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی مشخصات نواحی هایپرریک ناشی از فرم بستر خیزاب-چالاب نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز در این نواحی موجب افزایش دبی تبدلی بین ناحیه هایپرریک و ناحیه جریان شده و کاهش آن، موجب کاهش مدت زمان ماند جریان در نواحی هایپرریک می‌شود.

در این پژوهش محدوده سرعت‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها با وجود فرم بستر از ۰/۰۸ تا ۰/۱۷ متر بر ثانیه متغیر بوده، بطوری که افزایش دبی جریان موجب افزایش سرعت متوسط جریان شده است. مطابق رابطه (۱۰)، افزایش سرعت جریان

جدول ۲- نتایج ضریب پراکنش طولی به روش حل تحلیلی و مقایسه شبیه‌سازی به روش تحلیلی و عددی با نتایج آزمایشگاهی

MAE (mg/lit)	NRMSE	NS	R ²	نوع شبیه سازی	ضریب پراکنش طولی (m ² /s)	فاصله از محل تزریق (m)	دبی جریان (lit/s)	نوع بستر
۱۱۲/۲۱	۰/۳۲	۰/۷۶	۰/۸۲	Analytical	۰/۰۱۵	۳	۷/۵	No Form
-	-	-	-	OTIS				
۹۱/۶۵	۰/۲۱	۰/۸۷	۰/۹۱	Analytical	۰/۰۲۵	۶		
۹۱/۷۴	۰/۱۹	۰/۹۱	۰/۹۲	OTIS				
۶۳/۴۲	۰/۱۸	۰/۹۳	۰/۸۷	Analytical	۰/۰۳۵	۹		
۲۴/۱۶	۰/۱۹	۰/۹۱	۰/۸۴	OTIS				
۲۱۶/۲	۰/۸۵	۰/۳۶	۰/۴۵	Analytical	۰/۰۳	۳		
-	-	-	-	OTIS				
۱۲۶/۷	۰/۳۲	۰/۸۷	۰/۸۸	Analytical	۰/۰۴	۶		
۹/۸۸	۰/۲۴	۰/۹۳	۰/۸۹	OTIS				
۸۰/۴۴	۰/۲۸	۰/۸۸	۰/۹	Analytical	۰/۰۵	۹		
۹۸/۳۷	۰/۳۴	۰/۸۳	۰/۸۳	OTIS				
۰	۰	۰/۹۹	۰/۸	Analytical	۰/۰۶	۳	۱۲/۵	
-	-	-	-	OTIS				
۰	۰	۰/۹۹	۰/۹۱	Analytical	۰/۰۷	۶		
۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۹۱	OTIS				
۰/۰۳	۰	۰/۹۹	۰/۸۹	Analytical	۰/۰۹	۹		
۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۹۶	۰/۹۲	OTIS				
۱۱۷/۹۳	۲/۱۸	-۰/۶۲	۰/۵۵	Analytical	۰/۲۱	۳	۷/۵	RP1
-	-	-	-	OTIS				
۶۰/۲۱	۰/۵۸	۰/۳	۰/۷۷	Analytical	۰/۱۵	۶		
۱۹/۷۷	۰/۱۸	۰/۹۲	۰/۹۳	OTIS				
۳۸/۹۳	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۹۷	Analytical	۰/۱۷	۹		
۱۹/۴	۰/۲۲	۰/۸۶	۰/۸۹	OTIS				
۱۳۹/۹۶	۴/۰۴	-۰/۲۶	۰/۵۴	Analytical	۰/۱۶	۳		
-	-	-	-	OTIS				
۷۱/۱۵	۰/۸۵	۰/۳	۰/۸۷	Analytical	۰/۰۸	۶		
۳۴/۱۷	۰/۴۶	۰/۷۶	۰/۸۸	OTIS				
۴۹/۴۹	۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۸۳	Analytical	۰/۱۸	۹		
۲۵/۹	۰/۳۲	۰/۸۵	۰/۹۱	OTIS				
۱۰۴/۳۷	۹/۳۷	-۰/۲۶	۰/۷۷	Analytical	۰/۱۸	۳	۱۲/۵	
-	-	-	-	OTIS				
۴۸/۴۲	۲/۱	۰/۶۷	۰/۸۳	Analytical	۰/۱۲	۶		
۱۲/۶۴	۰/۷۵	۰/۹۷	۰/۹۵	OTIS				
۳۹/۰۸	۱/۱۱	۰/۵۱	۰/۸۵	Analytical	۰/۱۴	۹		
۱۸/۷۴	۰/۵۷	۰/۹۳	۰/۸۹	OTIS				
۷۱/۴۸	۲/۹۵	۰/۳۷	۰/۸۸	Analytical	۰/۰۶	۳	۷/۵	RP2
-	-	-	-	OTIS				
۵۴/۳۱	۱/۱۸	۰/۶۱	۰/۸۶	Analytical	۰/۰۹	۶		
۱۸/۱۶	۰/۵۲	۰/۹۲	۰/۹۴	OTIS				
۴۵/۴۸	۰/۹۴	۰/۵	۰/۹	Analytical	۰/۱۵	۹		
۲۴/۹۴	۰/۵۱	۰/۸۵	۰/۹	OTIS				
۱۲۹/۸۳	۵/۴۷	-۰/۳۲	۰/۶۷	Analytical	۰/۰۵	۳		
-	-	-	-	OTIS				
۶۸/۰۵	۲/۴۷	-۰/۵۵	۰/۸۲	Analytical	۰/۰۷	۶		
۱۹/۸۵	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	OTIS				
۵۵/۳۴	۱/۰۰	۰/۴۸	۰/۸۶	Analytical	۰/۱۴	۹		
۲۶/۱۷	۰/۴۴	۰/۹	۰/۹۴	OTIS				
۳۵/۳۳	۳/۷۴	۰/۳۵	۰/۶۷	Analytical	۰/۰۲	۳	۱۲/۵	
-	-	-	-	OTIS				
۳۶/۶۹	۲/۴۶	۰/۳	۰/۷۳	Analytical	۰/۰۷	۶		
۱۰/۵	۰/۹۲	۰/۹	۰/۹۱	OTIS				
۳۵/۰۹	۱/۵۴	۰/۴	۰/۸۶	Analytical	۰/۱۵	۹		
-	-	-	-	OTIS				

MAE (mg/lit)	NRMSE	NS	R ²	نوع شبیه سازی	ضریب پراکنش طولی (m ² /s)	فاصله از محل تزریق (m)	دبی جریان (lit/s)	نوع بستر
۱۵/۵۷	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۸۶	OTIS				
۹۹/۳۱	۲/۰۳	-۱/۹۶	۰/۵۹	Analytical	۰/۴۱	۳	۷/۵	RP3
-	-	-	-	OTIS				
۵۶/۹۶	۱/۴۰	-۰/۱۳	۰/۸۲	Analytical	۰/۴۱	۶		
۹/۹۳	۰/۴۱	۰/۹	۰/۹	OTIS				
۴۱/۴۰	۰/۹۶	۰/۰۲	۰/۸۶	Analytical	۰/۲۷	۹		
۱۸/۲۲	۰/۳۵	۰/۸۶	۰/۸۹	OTIS				
۲۳/۸۶	۱/۰۲	۰/۶۴	۰/۷۳	Analytical	۰/۱۶	۳	۱۰	
-	-	-	-	OTIS				
۳۰/۴	۱/۴۹	۰/۰۷	۰/۴۸	Analytical	۰/۰۹	۶		
۱۱/۳۲	۰/۴	۰/۹۴	۰/۹۵	OTIS				
۲۴	۱/۱۳	۰/۲۸	۰/۴۵	Analytical	۰/۱۸	۹		
۸/۳۸	۰/۳	۰/۹۴	۰/۹۴	OTIS				
۱۱۳/۲۳	۳/۰۱	-۰/۳۲	۰/۴۷	Analytical	۰/۱۵	۳	۱۲/۵	
-	-	-	-	OTIS				
۷۰/۳۷	۱/۸۶	۰/۴۶	۰/۷۷	Analytical	۰/۰۵	۶		
۲۵/۹۵	۰/۷۶	۰/۹۱	۰/۹	OTIS				
۵۲/۸۳	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۸۶	Analytical	۰/۰۵	۹		
۲۰/۴۱	۰/۲۹	۰/۹۴	۰/۹۴	OTIS				
۱۰۵/۹۴	۲/۴۸	-۰/۳۴	۰/۶۳	Analytical	۰/۲۲	۳	۷/۵	
-	-	-	-	OTIS				
۲۱/۶۹	۰/۴۲	۰/۵۹	۰/۶۶	Analytical	۰/۱۴	۶		
۳۶/۵	۰/۵۲	۰/۴	۰/۷۲	OTIS				
۴۲/۷۳	۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۷۵	Analytical	۰/۱۷	۹		
۲۹/۶۶	۰/۵۲	۰/۶۸	۰/۷۱	OTIS				
۹۸/۹	۴/۴	۰/۳۱	۰/۷۲	Analytical	۰/۱۹	۳	۱۰	
-	-	-	-	OTIS				
۵۵/۳۴	۱/۵۳	۰/۵	۰/۷۹	Analytical	۰/۱	۶		
۲۸/۸۸	۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۹۱	OTIS				
۴۴/۴۴	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۸۴	Analytical	۰/۱۷	۹		
۳۰/۶	۰/۵۵	۰/۸۲	۰/۹	OTIS				
۱۰۲/۰۶	۴/۵۳	۰/۴۱	۰/۷۹	Analytical	۰/۰۶	۳	۱۲/۵	
-	-	-	-	OTIS				
۵۸/۰۵	۰/۸۴	-۰/۴۸	۰/۸۳	Analytical	۰/۰۵	۶		
۴۲/۲۳	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۹۲	OTIS				
۶۲/۱۵	۰/۷	۰/۶۳	۰/۸۵	Analytical	۰/۰۷	۹		
۳۱/۴۰	۰/۳۶	۰/۹	۰/۹	OTIS				

رینولدز در نواحی هایپرک برای فرم بستر RP1 بیش تر از فرم بستر RP2 و به همین ترتیب برای فرم بستر RP3 بیش تر از فرم بستر RP4 می باشد. افزایش عدد رینولدز در نواحی هایپرک همان طور که پیش تر اشاره شد موجب افزایش دبی تبدالی بین ناحیه هایپرک و ناحیه اصلی جریان می شود. افزایش دبی تبدالی در محدوده دبی های کم سبب شده تا آلودگی بیش تری از ناحیه اصلی جریان به ناحیه هایپرک وارد شده که همین امر باعث کاهش غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان شده و در نتیجه باعث افزایش ضریب پراکنش طولی خواهد شد. اما افزایش همزمان دبی جریان و ارتفاع فرم بستر موجب افزایش بیش از حد دبی تبدالی شده لذا مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه بستر

از سوی دیگر مقایسه نتایج فرم بسترهای RP1 و RP3 به ترتیب با فرم بسترهای RP2 و RP4 که در آن ها ارتفاع فرم بستر با یک طول موج ثابت به ترتیب از ۱۲/۵ سانتی متر به ۶/۲۵ سانتی متر کاهش می یابد، نشان از افزایش ضریب پراکنش طولی در برابر افزایش ارتفاع فرم بستر دارد. به طوری که ضرایب پراکنش طولی RP1 در اکثریت موارد بیش تر از ضرایب پراکنش طولی RP2 و به همین ترتیب ضرایب پراکنش طولی RP3 بیش تر از RP4 می باشد.

علت این روند تغییرات را نیز می توان با توجه به نحوه تغییر عدد رینولدز در نواحی هایپرک تحلیل و بررسی کرد. عدد رینولدز در نواحی هایپرک مطابق رابطه (۱۰) با افزایش Δ (فاصله تاج خیزاب تا کف چالاب) افزایش پیدا می کند. در واقع مقدار عدد

چالاب بر جابجایی آلودگی در شرایط هیدرولیکی مختلف رودخانه با بستر شنی صورت پذیرفت. از روش حل تحلیلی و همچنین مدل عددی OTIS به منظور شبیه‌سازی جابجایی آلودگی در شرایط فوق و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نیز استفاده شد. بدین منظور محلول NaCl با تزریق آبی غلظت اولیه ۶۰۰۰۰ ppm در یک بستر رسوبی با مصالح شنی با قطر متوسط (d₅₀) ۱۱/۸۵ میلی‌متر با ضخامت ۳۲ سانتی‌متر در یک حالت بدون فرم بستر و چهار حالت مختلف فرم بستر خیزاب-چالاب با دو دامنه و دو طول موج متفاوت در سه دبی جریان ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه مورد ردیابی قرار گرفت. به طور کلی نتایج زیر از تحقیق حاضر به دست آمد:

(۱) در شرایط جریان بدون فرم بستر، افزایش دبی جریان موجب افزایش ضریب پراکنش طولی می‌شود. به طوری که بیش‌ترین ضریب پراکنش طولی در دبی جریان ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه و کم‌ترین ضریب پراکنش طولی در دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه مشاهده شده که با نتایج Azhdan et al., 2018,b مطابقت دارد.

(۲) وجود فرم بستر خیزاب-چالاب سبب ایجاد تبدلات هایپرریک بین بدنه اصلی جریان و بستر رسوبی شده و آلودگی ورودی مدت زمان بیش‌تری نسبت به شرایط عدم وجود فرم بستر، در ناحیه رسوبی ذخیره موقت می‌شود. بنابراین ضریب پراکنش طولی در جریان‌های با فرم بستر به مراتب بیش‌تر از جریان‌های با بستر صاف می‌باشد. در این مطالعه، بیش‌ترین مدت زمان ذخیره موقت در ناحیه رسوبی برای دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه و کم‌ترین مدت زمان ذخیره موقت در ناحیه رسوبی برای دبی جریان ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه مشاهده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش مدت زمان ذخیره موقت آلودگی در ناحیه رسوبی سبب افزایش ضریب پراکنش طولی می‌شود. به طوری که در تمام حالات فرم بستر، بیش‌ترین ضریب پراکنش طولی برای دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه و کمترین ضریب پراکنش طولی برای دبی جریان ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه ارزیابی شد.

(۳) نتایج نشان داد که در جریان‌های با فرم بستر، افزایش دبی جریان موجب افزایش عدد رینولدز در ناحیه بستر رسوبی شده که این افزایش سبب تبدلات هایپرریک بیشتر می‌گردد. بنابراین افزایش دبی جریان موجب کاهش مدت زمان ذخیره موقت آلودگی در ناحیه رسوبی و در نتیجه افزایش تبدلات هایپرریک از ناحیه بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان شده و در نتیجه ضریب پراکنش طولی از بیش‌ترین دبی جریان به کم‌ترین دبی جریان، کاهش می‌یابد.

(۴) افزایش ارتفاع فرم بستر در یک دبی جریان ثابت سبب افزایش عدد رینولدز در نواحی هایپرریک شده که همین امر موجب

رسوبی به شدت کاهش پیدا کرده و در نتیجه آلودگی با ذخیره موقت کم‌تر در ناحیه نگهداشت به ناحیه اصلی جریان بازگشته که همین امر سبب شده تا در محدوده دبی‌های جریان بالاتر همزمان با افزایش ارتفاع فرم بستر، تغییرات افزایشی ضریب پراکنش طولی محسوس نباشد.

تأثیر طول موج فرم بستر بر ضریب پخشیدگی طولی

مقایسه نتایج فرم بسترهای RP3 و RP4 به ترتیب با فرم بسترهای RP1 و RP2 که در آن‌ها طول موج فرم بستر با یک ارتفاع ثابت به ترتیب از ۳ متر به ۱ متر کاهش یافته، نشان از افزایش ضریب پراکنش طولی در برابر افزایش طول موج فرم بستر در محدوده دبی پایین دارد. به طوری که در تمامی بازه‌ها در دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه، ضرایب پراکنش طولی RP3 بیش‌تر از ضرایب پراکنش طولی RP1 و به همین ترتیب ضرایب پراکنش طولی RP4 بیش‌تر از RP2 می‌باشد.

افزایش طول موج فرم بستر در محدوده دبی‌های کم موجب افزایش مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه هایپرریک می‌شود. از طرفی افزایش مدت زمان نگهداشت موقت در ناحیه بستر رسوبی موجب می‌شود که دبی تبدالی بین بستر رسوبی و جریان کم‌تر شده که این امر موجب کاهش غلظت آلودگی پراکنده شده همراه با جریان می‌شود. این کاهش غلظت آلودگی در ناحیه جریان در شرایط یکسان هیدرولیکی سبب افزایش ضریب پراکنش طولی می‌شود.

با دقت در نتایج جدول (۲) می‌توان دریافت که افزایش ضریب پراکنش طولی همراه با افزایش طول موج یک روند ثابت نداشته و در برخی نقاط شاهد کاهش ضریب پراکنش طولی بوده‌ایم. هنگامی که دبی جریان افزایش پیدا می‌کند در واقع ناحیه جریان سهم بیشتری در جابجایی آلودگی ایفا کرده و در نتیجه تبدلات هایپرریک بین ناحیه جریان و بستر رسوبی کم‌تر شده لذا آلودگی کم‌تری در ناحیه هایپرریک دچار ماند موقت شده و در نتیجه شاهد افزایش غلظت آلودگی در ناحیه جریان خواهیم بود که همین امر موجب کاهش ضریب پراکنش طولی می‌شود. در نتیجه افزایش ضریب پراکنش طولی به دلیل افزایش طول موج فرم بستر بیش‌تر در دبی‌های کم مشهود بوده، چرا که جریان‌های هایپرریک سهم بیش‌تری در انتقال آلودگی داشته و ناحیه اصلی جریان به صورت مداوم در حال تبدلات هایپرریک است و در نتیجه ذخیره موقت آلودگی بیش‌تر شده که این امر موجب افزایش ضریب پراکنش طولی در این حالت می‌گردد.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر فرم بستر خیزاب-

(۷) از آنجایی که نقش ذخیره موقت در معادله انتقال-پراکنش در جابجایی آلودگی جریان‌های روباز در نظر گرفته نشده، لذا حل تحلیلی این معادله در پیش‌بینی ضریب پراکنش طولی در جریان‌های با فرم بستر که نقش ذخیره موقت به دلیل تبدلات هایدروپیک بسیار مشهود بوده، مناسب ارزیابی نشده که با نتایج Seo and Cheong (2001) در نواحی دارای مناطق ذخیره موقت مئاندری و ماندابی مطابقت دارد.

(۷) مدل عددی OTIS که بر پایه اصلاحاتی در معادله انتقال-پراکنش و با در نظر گرفتن نقش ذخیره موقت و مساحت ناحیه رسوبی و مساحت ناحیه اصلی جریان بر جابجایی آلودگی استوار بوده، قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی جابجایی آلودگی در حالت با فرم بستر و بدون فرم بستر دارد. این نرم‌افزار با توجه به در نظر گرفتن ناحیه بدنه اصلی جریان و بستر رسوبی به صورت جداگانه و همچنین نقش ذخیره موقت در جابجایی آلودگی، قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی جابجایی آلودگی در جریان‌های با فرم بستر را دارد.

(۸) نتایج شبیه‌سازی‌های با حل تحلیلی و مدل عددی OTIS با نتایج آزمایشگاهی به صورت آماری مقایسه و مشخص شد که نتایج مدل عددی OTIS از تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی در همه حالات با فرم بستر و همچنین بدون فرم بستر برخوردار می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Azhdan, Y., Emadi, A., Chabokpour, J. and Daneshfaraz, R. (2018, a). Experimental investigation and evaluation results of numerical simulation and analytical solution of classical ADE for conservative solutes. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(2), 39-55.
- Azhdan, Y., Emadi, A., Chabokpour, J. and Daneshfaraz, R. (2018, b). Experimental and Numerical Study of Advection-Dispersion of Pollutant in a Gravel Bed Rivers. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28(4), 127-140.
- Biddulph, M. (2015). Hyporheic Zone: In Situ Sampling, *Geomorphological Techniques*. Chapter 3, Section 11.1.
- Boano, F., Harvey, J. W., Marion, A., Packman, A. I., Revelli, R., Ridolfi, L. and Wörman, A. (2014). Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 603-679.
- Cardenas, M. B. and Wilson, J. L. (2006). The influence of ambient groundwater discharge on hyporheic zones induced by current-bedform interactions. *Journal of Hydrology*, 331(1-2), 103-109.
- Carling, P. and Orr, H. G. (2000). Morphology of riffle-pool sequences in the River Severn, England. *Earth Surf. Processes Landforms*, 25(4), 369 - 384.
- Chanson, H. (2004). Environmental hydraulics of open channel flows. *Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford*.
- Kashefipour, S. M. and Falconer, R. A. (2002). Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research*, 36(6), 1596-1608.
- Keller, E. A. and Melhorn, W. N. (1978). Rhythmic spacing and origin of pools and riffles. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89(5), 723 - 730.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G. and Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman, New York, 522 pp.
- Mahmoodian-Shooshtari, M. (2009). Principles of flow in open channels (2nd ed). Iran, Ahwaz: Shahid Chamran University. (In Farsi)
- Meddah, S., Saidane, A., Hadjel, M. and Hireche, O. (2015). Pollutant dispersion modeling in natural streams using the transmission line matrix method. *Journal of Water*, 7(12), 4932-4950.
- Montgomery, D. R., Buffington, J. M., Smith, R. D., Schmidt, K. M. and Pess, G. (1995). Pool spacing in forest channels. *Water Resource. Res.*, 31(4),

افزایش تبادل هایدروپیک از ناحیه اصلی جریان به بدنه بستر رسوبی می‌گردد. لذا افزایش ارتفاع فرم بستر باعث کاهش غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان در پایین‌دست شده و در نتیجه ضریب پراکنش طولی افزایش پیدا می‌کند. از طرفی با افزایش همزمان ارتفاع فرم بستر و دبی جریان، مقدار عدد رینولدز در نواحی هایدروپیک به شدت افزایش یافته و لذا مقدار تبدلات هایدروپیک از بدنه بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان نیز به مراتب بیشتر شده و در نتیجه آلودگی با مدت زمان ماند کم‌تری به ناحیه اصلی جریان بازمی‌گردد. که همین امر سبب شده تا در محدوده دبی-های جریان بالاتر همزمان با افزایش ارتفاع فرم بستر، تغییرات افزایشی ضریب پراکنش طولی محسوس نباشد.

(۵) افزایش طول موج فرم بستر در جریان‌های با دبی کم باعث افزایش مدت زمان ذخیره موقت آلودگی در ناحیه رسوبی شده که همین امر دلیل افزایش ضریب پراکنش طولی در طول موج‌های بیشتر فرم بستر می‌شود. البته از آنجاییکه افزایش دبی جریان سبب کاهش تأثیر تبدلات هایدروپیک بر جابجایی آلودگی شده، لذا تأثیر افزایشی طول موج فرم بستر بر ضریب پراکنش طولی در دبی‌های کم‌تر جریان قابل مشاهده بوده است.

(۶) حل تحلیلی معادله انتقال-پراکنش در پیش‌بینی ضریب پراکنش طولی و شبیه‌سازی جابجایی آلودگی در جریان‌های بدون فرم بستر مناسب ارزیابی شده که با نتایج Azhdan et al., 2018, a در جریان‌های بدون فرم بستر تطابق دارد.

- 1097-1105.
- Rodríguez, J. F., García, C. M. and García, M. H. (2013). Three-dimensional flow in centered pool-riffle sequences. *Water Resources Research*, 49(1), 202-215.
- Seo, I. W. and Cheong, T. S. (2001). Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(6), 453-465.
- Sokác, M. (2017). Determination of the longitudinal dispersion coefficient in lowland streams with occurrence of dead zones. *Environmental Engineering 10th International Conference, Vilnius Gediminas Technical University Lithuania*, 27-28 April.
- Stonedahl, S. H. (2011). Investigation of the Effect Multiple Scales of Topography on Hyporheic Exchange. PhD Dissertation, Northwestern University.
- Thibodeaux, L. J. and Boyle, J. D. (1987). Bedform-Generated convective transport in bottom sediment. *Nature*: 325(6102), 341-343.
- Tonina, D. and Buffington, J. M. (2007). Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. *Water Resources Research*, 43(1), 1-16.
- Trauth, N., Schmidt, C., Maier, U., Vieweg, M. and Fleckenstein, J. H. (2013). 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), 5834-5850.
- Zeng, Y. and Huai, W. (2014). Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8(1), 2-8.
- Zhou, T. and Endreny, T. A. (2013). Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: Flume and hydrodynamic experiments. *Water Resources Research*, 49(8), 5009-5020.