

Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Sediment Bed Thickness and Dune Bed-Form on Contamination Transmission in Rivers

Mohammad Mirnaseri¹, Alireza Emadi^{2*}, Abdolreza Zahiri³, Mohammad-Ali Gholami-Sefidkouhi²

1-Ph.D. Candidate of Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

2,4- Associate Professor of Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

3- Associate Professor of Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Water and soil Engineering, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources University, Gorgan, Iran.

* Emadia355@yahoo.com

Received: 24 April 2021, Accepted: 27 July 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The industrialization of human societies is one of the factors in increasing the injection of pollution into surface waters. Contamination in the river is maintained both in the water stream and in the sediment bed of the river. The hyporheic zone is the saturation zone of the riverbed, which has a very important function in the transmission of pollution. River bed-form is one of the effective factors in creating hyporheic exchanges between surface flow and sediment bed. Transient Storage Model (TSM) is one of the suitable methods in the analysis of advection and dispersion of pollution in rivers with hyporheic zone. The efficiency of the Transient Storage Model (TSM) depends on accurate estimation of the four parameters of the model (D_x , A_s , A and α). Previous studies have examined the effect of bed-form on hyporheic exchanges, but the effect of these exchanges on contamination transmission has not been considered. On the other hand, previous studies have not explored the effect of hyporheic exchanges caused by the formation of the bed-form on the four parameters of the transient storage model (TSM). In this study, the effect of dune bed-form on the transmission of pollution was analyzed. The effect of dune formation on the four parameters of the transient storage model (TSM) with a numerical model (OTIS and OTIS-P) and the temporal moment approach (TM) was also discussed.

Methodology: Experiments of tracer material (NaCl) were performed in a flume with a length of 12 m, a width of 0.5 m and a height of 0.7 m applying four different flow discharges (5, 7.5, 10 and 12.5 l/s). The experiments were performed in the range of average flow velocity (U) from 0.087 to 0.361 and in the range of Froude number (Fr) from 0.069 to 0.290. An ultrasonic flow-meter was used to measure the flow discharge in all experiments. Grain material with an average diameter (D_{50}) of 11.85 mm and the porosity (n) of 0.28 were used to create a sedimentary bed. The first bed (WF1) with a thickness of 32 cm, a width of 0.5 m and a length of 10 m was created in the Flume. In order to examine the effect of sediment bed thickness on contamination transmission, a second bed (WF2) with a thickness of 8 cm, a width of 0.5 m and a length of 10 m was also created. In this study, the effect of dune bed-form on the transmission of contamination was analyzed by creating three dune bed-forms (D1, D2 and D3) with different wavelengths (λ) and different amplitudes (Δ) in the second bed (WF2). The

length of the flume was divided into three equal reaches. Two sensors were placed to measure the electrical conductivity (EC) of water in each reach aiming to monitor the concentration of contamination. A Pitot tube and an ultrasonic depth-gauge were used to measure the velocity (U) and depth (d) of water flow at each reach, respectively. The laboratory results were simulated by the OTIS-P numerical model and the four parameters of the Transient Storage Model (TSM) were estimated. OTIS-P numerical model estimates the four parameters of the Transient Storage Model (TSM) using the Nonlinear Least Squares (NLS) optimization algorithm and then simulates the breakthrough curves using the Crank-Nicolson implicit finite difference method. The parameters of the transient storage model (TSM) were estimated by optimizing the temporal moment approach (TM) relations using the Genetic Algorithm (GA) method and the breakthrough curves were reproduced using these parameters in OTIS software.

Results and Discussion: The results showed that increase the thickness of the sediment bed reduces the longitudinal dispersion coefficient (D_x). Hyporheic exchanges decrease with increasing d_b/d , so the amount of hyporheic exchanges in WF2 bed is more than WF1 bed. Increasing hyporheic exchanges in the WF2 bed-form reduces the amount of contamination concentration in the main flow area, so the amount of longitudinal dispersion coefficient (D_x) in this bed-form increases. The results showed that increasing Froude number (Fr) increases the longitudinal dispersion coefficient (D_x) in both cases of bed thickness. The results showed that the storage zone exchange coefficient (α) in WF2 bed was higher than WF1 bed. Decreasing d_b/d increases the hyporheic exchanges at the time scale (t_f^*), so the residence time of contamination in the sediment bed increases. Since the storage zone exchange coefficient (α) indicates the amount of time exchanges of contamination in hyporheic zone, so reducing the bed thickness (d_b) increases this parameter. The main channel area (A) considering the D2 bed-form case was estimated more than that in the D1 bed-form case. Therefore, increasing the wavelength of the bed-form (λ) increases the share of the main flow region area (A) in the contamination transmission. On the other hand, in the case of less exchanges of contamination with the storage zone, the share of the storage zone area (A_s) decreases with increasing wavelength of the bed-form (λ). The results showed that the effect of dune bed-form on changes in TSM parameters was in the range of $Fr < 0.1$. Based on the results, that the breakthrough curves simulated using both methods (TM and OTIS-P) are in good fit with the laboratory results.

Conclusion: The results of using numerical models showed that increasing d_b/d causes decreasing the longitudinal dispersion coefficient (D_x) and decreasing the storage zone exchange coefficient (α). The results also showed that the presence of dune bed-form increases the main channel area (A) and the storage zone area (A_s). On the other hand, the presence of dune bed-form increases hyporheic exchanges, so the amount of changes in the longitudinal dispersion coefficient (D_x) and the storage zone exchange coefficient (α) depends on the amount of hyporheic exchanges in these conditions. The BTCs simulated by the OTIS-P numerical model and the temporal moment approach (TM) were highly agreement with the laboratory BTCs with the Nash-Sutcliffe index between 0.89 to 0.98 and 0.85 to 0.98.

Keywords: Temporal Moment Approach (TM), Hyporheic zone, Transient Storage Model (TSM), OTIS-P.

© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر ضخامت بستر رسوبی و شکل بستر تلماسه بر انتقال آلودگی در رودخانه‌ها

محمد میرنصری^۱، علیرضا عمادی^{۲*}، عبدالرضا ظهیری^۳، محمدعلی غلامی سفیدکوهی^۴

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۲ و ۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

*Emadia355@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: صنعتی شدن جامعه‌های بشری از جمله عامل‌های افزایش ورود آلاینده‌ها به آب‌های سطحی می‌باشد. شکل بستر رودخانه‌ها با ایجاد ناحیه‌های نگهداشت موقت در ناحیه جریان زیرین (هایپرریک) و افزایش تبادل‌ها در این ناحیه، تاثیر زیادی در جابه‌جایی آلاینده‌ها ایفا می‌کنند. مدل نگهداشت موقت (TSM) با در نظر گرفتن گستره ناحیه نگهداشت (A_s) و همچنین ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) یکی از مناسب‌ترین روش‌های تحلیل انتقال و پراکنش آلودگی در رودخانه‌های دارای ناحیه‌های هایپرریک می‌باشد. در این پژوهش، فراسنجه‌های چهارگانه مدل (TSM)، با بهینه‌سازی معادله‌های گشتاورگیری زمانی (TM) با الگوریتم ژنتیک (GA) و همچنین با استفاده از مدل عددی OTIS-P برآورد شدند و منحنی‌های رخنه بازتولید شدند. سپس تاثیر ضخامت بستر رسوبی (d_b) و همچنین وجود شکل بستر تلماسه با طول‌های موج بستر (λ) و دامنه‌های بستر (Δ) متفاوت بر جابه‌جایی آلودگی در بسترهای شنی بررسی شد. آزمایش‌های ماده ردیاب (NaCl) در یک آبراهه (کانال آزمایشگاهی) در محدوده سرعت میانگین جریان (U) ۰/۰۷۸ تا ۰/۳۶۱ متر بر ثانیه و در محدوده عدد فرود جریان (Fr) ۰/۰۶۹ تا ۰/۲۹۰ انجام شدند. نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که کاهش نسبت ضخامت بستر رسوبی به عمق میانگین جریان (d_b/d) موجب افزایش مدت زمان میانگین ماند آلودگی در ناحیه اصلی جریان (MRT) و همچنین کاهش میزان غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان می‌شود. نتایج مدل عددی نشان داد که افزایش (d_b/d) باعث کاهش ضریب پراکنش طولی (D_x)، کاهش (A_s) و کاهش (α) می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش نزدیک به ۱۶ تا ۳۲ برابری فراسنجه بی‌بعد (Δ/d)، ضریب α در حدود ۶۵ تا ۹۵ درصد افزایش یافته که میزان این تغییرپذیری‌های به محدوده عدد رینولدز در ناحیه‌های هایپرریک (Re^*) بستگی داشته است. نتایج نشان داد که تاثیر وجود شکل بستر تلماسه بر تغییرپذیری‌های فراسنجه‌های مدل (TSM) تا محدوده $Fr < 0.1$ می‌باشد. منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی OTIS-P و روش گشتاورگیری زمانی (TM) سازگاری بالایی با منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی با شاخص نش ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) بین ۰/۸۹ تا ۰/۹۸ و ۰/۸۵ تا ۰/۹۸ داشتند.

کلیدواژه‌ها: گشتاورگیری زمانی (TM)، ناحیه‌های هایپرریک، مدل نگهداشت موقت (TSM)، OTIS-P.

۱- مقدمه

مطرح شد که در واقع ترکیب پیشوند یونانی (hypo) با واژه ریشه (rheos) است و جریان زیرین معنا می‌دهد (Boano et al., 2014 و Movahedi et al., 2020). فعل و انفعال‌های جریان بین آبراهه‌ها با محیط متخلخل بستر باعث ایجاد تبادل جرم املاح محلول و مواد معلق بین جریان آب و ناحیه هایپرریک می‌شود. فرآیندهای هیدرودینامیکی باعث

رودخانه‌ها به طور طبیعی با انواع فرآیندهای شیمیایی، زیستی (بیولوژیکی) و فیزیکی یکی از پیچیده‌ترین سامانه‌های منابع آبی هستند. رسوب‌های اشباع بستر و حاشیه رودخانه‌ها با عنوان ناحیه هایپرریک عنوان می‌شود. عبارت هایپرریک نخستین بار توسط (Orghidan 1959)

تبادل‌های هایپریک را بررسی کردند.

Chen et al. (2015) به بررسی تاثیر شکل بستر تلماسه دو بعدی و سه بعدی بر تبادل‌های هایپریک پرداختند. در این بررسی عددی، میانگین ارتفاع شکل بستر سه بعدی تلماسه به عنوان ارتفاع شکل بستر دو بعدی تلماسه فرض شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، دبی تبدالی در شکل بستر سه بعدی تلماسه بیشتر از شکل بستر دو بعدی تلماسه شده اما زمان ماند تا حدودی یکسان می‌باشد.

Packman et al. (2004) در بررسی خود روی تبادل‌های هایپریک در شکل بستر تلماسه شنی به تکمیل بررسی Elliot and Brooks (1997a) پرداخته و میزان تبادل‌های هایپریک در مقیاس زمانی در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها را بر مبنای رابطه (۱) ارزیابی کرد:

$$t_f^* = 0.28 \frac{kKt \tanh(kd_b) U^2}{d_b 2g} \begin{cases} \left(\frac{\Delta/d}{0.34}\right)^{3/8} & \Delta/d \leq 0.34 \\ \left(\frac{\Delta/d}{0.34}\right)^{3/2} & \Delta/d > 0.34 \end{cases} \quad (1)$$

که در این رابطه: t_f^* میزان تبادل‌های هایپریک در مقیاس زمانی، K ضریب هدایت هیدرولیکی جریان در بستر رسوبی، d_b میزان ضخامت لایه رسوبی، U سرعت میانگین جریان آبراهه، Δ دامنه شکل بستر دون (فرورفتگی تا تاج شکل بستر)، t زمان، d عمق میانگین جریان در آبراهه بوده و k بر مبنای λ (طول موج شکل بستر) به صورت رابطه $k=2\pi/\lambda$ تعریف می‌شود.

Movahedi et al. (2020) به بررسی آزمایشگاهی تبادل‌های هایپریک در حضور شکل بستر خیزاب-گوداب دو بعدی و سه بعدی پرداختند. آنان گرادیان‌های فشار در پیرامون شکل بستر رودخانه‌ها را یکی از عامل‌های موثر بر تبادل‌های هایپریک دانستند. نتایج این تحقیق نشان دادند که با افزایش نزدیک به ۵۰ درصدی ارتفاع شکل بستر، دبی تبادل‌های هایپریک در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی ۲۶ درصد افزایش و زمان ماند در مدل دو بعدی ۳۶ درصد و در مدل سه بعدی نیز ۴۱ درصد کاهش پیدا می‌کند.

Bancala and Walters (1983) در بررسی‌های خود به انجام آزمایش‌های ماده ردیاب در رودخانه‌های نامنظم کوهستانی با استفاده از معادله یک بعدی انتقال-پراکنش (ADE)

ترسیب آلودگی در بستر آبراهه‌ها و در پی آزادسازی آن از رسوب‌های آلوده بستر می‌شود (Reible and Savant- Malhiet, 1993). به‌طور کلی، جریان آب در محیط متخلخل بستر یک نقش مهم در کیفیت آب رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی ایفا می‌کند. همچنین تبادل کربن و مواد مغذی بین آبراهه و ناحیه بستر رسوبی برای حفظ سلامت بوم‌سامانه (اکوسیستم) رودخانه‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد (Vittal et al., 1977). در واقع شناخت تبادل املاح محلول بین آبراهه اصلی و رسوب‌های بستر به منظور فهم و درک بیش‌تر اصول حاکم بر هیدرودینامیک جریان همراه با تبدالات هایپریک دارای اهمیت فراوانی می‌باشد (Packman et al., 2004). بر خلاف تغذیه آب‌های زیرزمینی که در مقیاس‌های بزرگ و یک‌طرفه بوده، تبادل‌های هایپریک در مقیاس‌های کوچک و به صورت دو سوپه و از تبادل آب بین جریان سطحی و ناحیه هایپریک انجام می‌شود و در واقع به دلیل اختلاف فشار ناشی از اثر متقابل جریان آب رودخانه‌ها و ویژگی‌های زمین ریختارشناسی (ژئومورفولوژیکی) مانند شکل بسترها ایجاد می‌شوند (Boano et al., 2014).

در مهندسی رودخانه و هیدرولیک، تلماسه‌ها یکی از شکل‌های مهم بستر بوده و تاثیر زیادی بر ایجاد تبادل‌های هایپریک در جریان‌های رودخانه‌ای دارند. تلماسه‌ها در رودخانه‌ها، مصب‌های جزری و مدی و خلیج‌ها وجود دارند. Thibodeaux and Boyle (1987) برای نخستین بار جریان‌های هایپریک در حضور شکل بستر تلماسه را بررسی و مشاهده کردند که جریان‌های هایپریک به دلیل اختلاف فشار پویایی (دینامیکی) در طول شکل بستر حرکت کرده و از منطقه‌های پرفشار به درون شکل بستر هدایت شده و مجدد از منطقه‌های کم‌فشار به درون ناحیه اصلی جریان بازمی‌گردد.

Elliot and Brooks (1997b) روی شکل بستر ماسه‌ای تلماسه، Packman et al. (2004) روی بستر صاف و همچنین دارای شکل بستر شنی تلماسه، تبادل‌های هایپریک را بررسی کردند. Fox et al. (2014) به صورت آزمایشگاهی و همچنین Lee et al. (2014) به صورت عددی، تاثیر وجود شکل بستر تلماسه بر چگونگی تغییر در

شکل بستر، پیچان رودی و نامنظمی مسیر آبراهه‌ها مناسب ارزیابی کردند.

Azhdan et al. (2019) طی بررسی‌های آزمایشگاهی به برآورد فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM) برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در بسترهای سنگریزه‌ای پرداختند. آنان نشان دادند که در موارد نگهداشت موقت به کارگیری معادله انتقال-پراکنش کلاسیک در این نوع آبراهه‌ها با یک‌چند اشکال‌هایی همراه است. لذا برای شبیه‌سازی دقیق فرایند انتقال ماده حل شده در چنین محیط‌هایی باید اصلاح‌هایی در نظر گرفت و از معادله‌های نگهداشت موقت استفاده کردند. در این بررسی با استفاده از مدل عددی OTIS-P ضرائب چهارگانه معادله‌های بالا برآورد شد و سپس منحنی‌های رخنه بازتولید شد. نتایج نشان از سازگاری منحنی‌های رخنه پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده داشت.

استفاده از روش‌های گشتاورگیری زمانی^۵ نیز یکی از روش‌های ارزیابی انتقال و پراکنش آلودگی در بسترهای رودخانه‌ای بوده که با استفاده از این روش‌ها می‌توان فراسنجه‌های چهارگانه مدل (TSM) را نیز برآورد کرد. Gonzales et al. (2013) در یک بررسی، فراسنجه‌های چهارگانه مدل (TSM) را با اعمال روش‌های گشتاورگیری زمانی (TM) روی جفت معادله دیفرانسیل مدل (TSM) برآورد کردند. آن‌ها در نهایت به سه معادله دست یافتند که با حل همزمان این معادله‌ها می‌توان فراسنجه‌های مدل (TSM) را ارزیابی کرد. Pang et al. (2003) کارآیی روش گشتاورگیری زمانی در برآورد ضریب پراکنش در محیط‌های متخلخل را مناسب ارزیابی کردند. Chabokpour et al. (2017) به بررسی آزمایشگاهی برآورد ضریب پراکنش طولی رسوب‌های معلق درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه پرداختند. آنان دقت روش‌های گشتاورگیری زمانی در شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه پایین‌دست را نسبت به حل تحلیلی معادله کلاسیک انتقال-پراکنش دارای سازگاری و دقت بالاتری ارزیابی کردند.

پرداختند. مقایسه نتایج آزمایش‌های ماده ردیاب و حل تحلیلی معادله یک بعدی انتقال-پراکنش نشان داد که بین منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده با منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری شده، ناسازگاری زیادی وجود دارد. آن‌ها وجود ناحیه‌های نگهداشت موقت در آبراهه‌های طبیعی را عامل اصلی این ناسازگاری دانستند و وجود این ناحیه‌های را بسیار موثر بر ضریب پراکنش طولی ارزیابی کردند. آنان برای شبیه‌سازی جابه‌جایی آلودگی در رودخانه‌های دارای ناحیه‌های ماندابی با در نظر گرفتن منطقه‌های راکد در طول آبراهه، فرض کردند که این ناحیه‌های نسبت به ناحیه اصلی جریان ساکن بوده و با در نظر گرفتن قانون‌های انتقال جرم مرتبه اول^۱ در زمینه تبادل ماده آلاینده بین منطقه‌های نگهداشت و ناحیه اصلی جریان، مدل نگهداشت موقت (TSM)^۲ را برابر رابطه‌های (۲) و (۳) پیشنهاد دادند:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \alpha (C_s - C) \quad (2)$$

$$\frac{dC_s}{dt} = -\alpha \frac{A}{A_s} (C_s - C) \quad (3)$$

که در رابطه‌های بالا، A گستره مقطع عرضی ناحیه جریان اصلی^۳، A_s گستره مقطع عرضی ناحیه نگهداشت^۴، C غلظت ماده حل شده در ناحیه اصلی جریان، C_s غلظت ماده حل شده در ناحیه نگهداشت، D_x ضریب پراکنش طولی^۵، Q دبی جریان، t زمان، x فاصله طولی از محل ورود آلودگی و α ضریب تبادل ناحیه نگهداشت^۶ می‌باشند.

Seo and Cheong (2001) به بررسی درزمینه جابه‌جایی آلودگی در رودخانه‌های دارای ناحیه‌های ماندابی پرداختند. آنان نتیجه گرفتند که معادله انتقال-پراکنش (ADE) قابلیت مناسب در شبیه‌سازی چگونگی پراکنش غلظت آلاینده را نداشته و اصلاح در این معادله ضروری می‌باشد. آنان با استفاده از روش‌های نظری (تئوری) به تخمین دقیق فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM) پرداختند و این مدل را برای شبیه‌سازی انتقال و پراکنش آلودگی در آبراهه‌های طبیعی به ویژه دارای منطقه‌های ماندابی در کنار

⁵ Longitudinal Dispersion Coefficient

⁶ Storage Zone Exchange Coefficient

⁷ Temporal Moment (TM)

¹ First-order mass transfer

² Transient Storage Model (TSM)

³ Main Channel Cross-Sectional Area

⁴ Storage Zone Cross-Sectional Area

دبی سنج فراصوتی (اولتراسونیک^۱) با دقت ± 0.5 لیتر بر ثانیه استفاده شد. آزمایش‌های این پژوهش در محدوده عدد فرود جریان (Fr) 0.69 تا 29.0 و هم‌معی آزمایش‌ها در شرایط جریان آشفته ($Re > 5000$) وانجام پذیرفتند. محدوده سرعت میانگین جریان (U) در آزمایش‌های جریان با بستر صاف 0.153 تا 0.361 متر بر ثانیه و در آزمایش‌های جریان با شکل بستر تلماسه 0.078 تا 0.221 متر بر ثانیه بوده است.

در این تحقیق به منظور جلوگیری از بازگشت جرم برگشتی آلودگی به جریان ورودی، آبراهه آزمایشگاهی طوری طراحی و اجرا شد که جریان یک‌سویه و غیرچرخشی در آن برقرار باشد. بدین منظور در طی انجام آزمایش‌ها، جریان آب تازه به درون حوضچه وارد شده و جریان همراه با آلودگی از انتهای آبراهه آزمایشگاهی خارج گردیده و به درون چرخه جریان باز نمی‌گردد. نمای جانبی آبراهه آزمایشگاهی با شکل بستر D2 در شکل ۱ ارائه شده است.

۲-۲- ایجاد شکل بستر تلماسه

در این پژوهش به منظور ایجاد بستر رسوبی از مصالح تهیه شده از معدن شن و ماسه رودخانه نکارود با قطر میانگین (D_{50}) $11/85$ میلی‌متر و تخلخل (n) 0.28 استفاده شد. بستر اول (WF1) با ضخامت 32 سانتی‌متر، عرض 0.5 متر در طول 10 متر از آبراهه آزمایشگاهی برقرار شد. همچنین به منظور بررسی تاثیر ضخامت بستر رسوبی بر جابه‌جایی آلودگی، بستر دوم (WF2) با ضخامت 8 سانتی‌متر، عرض 0.5 متر و طول 10 متر ایجاد شد.

در این تحقیق با ایجاد سه تلماسه مصنوعی (D2, D3) و D1) با طول موج (λ) و دامنه (Δ) متفاوت در بستر دوم (WF2) به بررسی تاثیر ایجاد شکل بستر تلماسه بر چگونگی جابه‌جایی آلودگی پرداخته شد. در جدول ۱ ویژگی‌های کلی بسترهای مورد آزمایش در این پژوهش ارائه شده است. گزینش ابعاد تلماسه‌ها با توجه به تحقیقات (1999) carling و (2015) Gasemi et al. صورت گرفته است. گزینش محدوده اندازه ذرات محیط متخلخل بستر رسوبی نیز با توجه به پژوهش‌های (1966) Guy، (1985) Allen و

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد که تاثیر وجود شکل بستر آبراهه‌ها در انتقال مواد محلول در جریان یا در واقع ایجاد تبادل‌های هایدپریک بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی بررسی شده است اما بررسی تاثیر این تغییرپذیری‌ها بر فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) در پژوهش‌های پیشین یافت نشد. لذا در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر تبادل‌های هایدپریک در انتقال و پراکنش آلودگی، با بررسی‌های آزمایشگاهی اقدام به ایجاد سه نوع مختلف شکل بستر تلماسه شنی با طول موج‌های شکل بستر (λ) و دامنه‌های بستر (Δ) متفاوت شد. فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از مدل عددی OTIS-P برآورد شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. همچنین در بخش دیگری از این بررسی، کارایی روش گشتاورگیری زمانی (TM) در شرایط جریان دارای شکل بستر تلماسه که دارای تبادل‌های هایدپریک زیاد بوده نیز بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آبراهه آزمایشگاهی

برای اجرای آزمایش‌های این پژوهش از آبراهه موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با طول 12 متر، عرض 0.5 متر و ارتفاع دیواره 0.7 متر با شیب طولی 0.06 استفاده شد. آب مورد نیاز در این آبراهه آزمایشگاهی به وسیله یک مخزن هوایی آب در یک حوضچه با حجم تقریبی $8/75$ مترمکعب ذخیره شده و جریان آب به وسیله پمپاژ توسط سه پمپ با بیشینه دبی جریان 60 لیتر بر ثانیه از این حوضچه تامین شده است. در این تحقیق از چهار دبی جریان 5 ، $7/5$ ، 10 و $12/5$ لیتر بر ثانیه استفاده شد. گزینش این چهار دبی جریان به این دلیل بوده که در پیش آزمایش‌های انجام شده مشخص شد که در دبی‌های جریان بالاتر از این محدوده، سهم جریان‌های هایدپریک ناچیز بوده و جریان عبوری با کمترین تبادل با ناحیه بستر رسوبی از آبراهه بیرون می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی جریان در تمامی آزمایش‌ها از یک دستگاه

¹ Ultrasonic Flow Measurement

حسگرهای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی جانمایی شده در طی مسیر جریان را نشان می‌دهد. (2015) Ghasemi et al. انجام شده است. شکل ۲ نمایی از انتهای آبراهه آزمایشگاهی با شکل بستر D1 همراه با

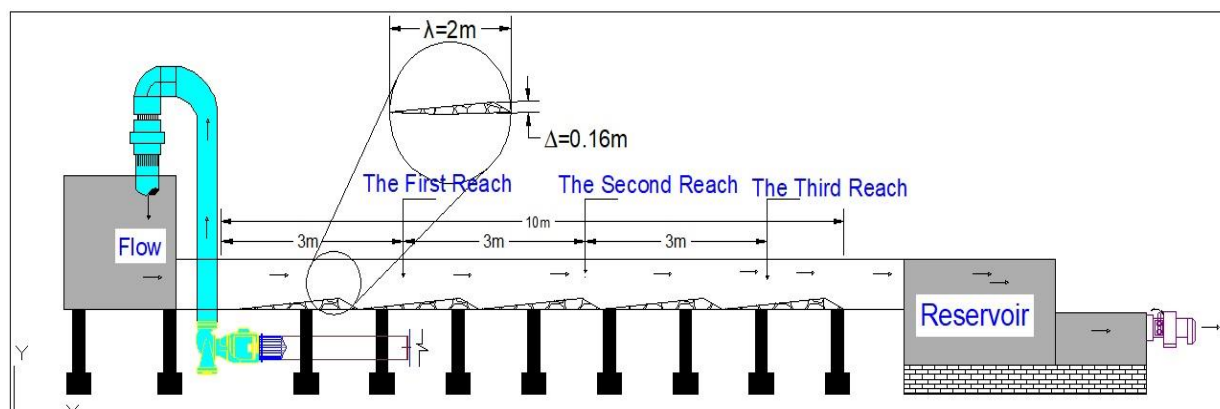


Fig.1 Schematic side view of flume with D2 bed-form
 شکل ۱ نمای کلی جانبی آبراهه آزمایشگاهی با شکل بستر D2

Table 1 Dimensions of the dune bed-form created in the experiments

جدول ۱ ابعاد شکل بستر تلماسه ایجاد شده در آزمایش‌ها

Type of Bed-Form	Bed thickness d_b (cm)	Bed-Form amplitude Δ (cm)	Bed-Form Wavelength λ (m)	Number of Cycle N
WF1	32	-	-	-
WF2	8	-	-	-
D1	8	16	1	10
D2	8	16	2	5
D3	8	8	2	5

جریان‌های دارای بستر شنی و همچنین برآورد تاثیر ایجاد شکل بستر تلماسه بر این جابه‌جایی از کلرید سدیم (NaCl) به عنوان ماده ردیاب استفاده شد. افزون بر بی‌واکنش بودن کلرید سدیم با محیط آزمایشگاهی، وجود دستگاه ثبات اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نیز در گزینش این ماده به عنوان ردیاب موثر بوده است. آلودگی اولیه از یک محلول چهار لیتری آب حاوی ۲۴۰ گرم کلرید سدیم ۹۹ درصد تهیه و به صورت لحظه‌ای (آنی) از یک متری بالادست آبراهه آزمایشگاهی به جریان آب عبوری در هریک از آزمایش‌ها تزریق شد.

در این بررسی، آبراهه آزمایشگاهی به سه بازه تقسیم شده و در انتهای هر بازه دو حسگر اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب در خط مرکزی جریان به منظور سنجش میزان آلودگی ارزیابی شد. بازه ۱ در فاصله ۳ متری پایین‌دست از محل تزریق آلودگی، بازه ۲ در فاصله ۶ متری پایین‌دست از محل



Fig.2 View of the end of flume with D1 bed-form and sensors located in the flow path
 شکل ۲ نمایی از انتهای آبراهه آزمایشگاهی با شکل بستر D1 و حسگرهای جانمایی شده در مسیر جریان

۲-۳- آزمایش‌های ماده ردیاب

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی جابه‌جایی آلودگی در

محدود ضمنی کرانک-نیکلسون حل شده و منحنی‌های رخنه باز تولید می‌شوند. فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت در مدل عددی OTIS می‌بایست توسط کاربر وارد شود تا مدل عددی قادر به شبیه‌سازی منحنی رخنه در پایین دست باشد. اما در نسخه اصلاح شده مدل عددی OTIS با عنوان OTIS-P، مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی^۳، با حل همزمان رابطه‌های (۳) و (۴) فراسنجه‌های چهارگانه A_s ، A ، α و D_x را تعیین می‌کند (Runkel, 1998).

در این پژوهش غلظت‌های آلودگی برداشت شده در بازه ۱ و در فاصله‌های زمانی ۲ ثانیه به عنوان شرایط مرزی بالادست و غلظت‌های آلودگی برداشت شده در بازه ۳ و در فاصله‌های زمانی ۲ ثانیه به عنوان شرایط مرزی پایین دست به عنوان ورودی مدل عددی OTIS-P تعریف شده و سپس فراسنجه‌های بهینه مدل نگهداشت موقت توسط مدل عددی برآورد شد. مدل عددی OTIS-P پس از تخمین فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت، منحنی رخنه را در بازه ۲ و در فاصله‌های زمانی ۲ ثانیه شبیه‌سازی کرد.

۲-۵- روش گشتاورگیری زمانی^۴

به طور کلی گشتاور مطلق مرتبه n تابع $C(x,t)$ حول مبدا زمانی ($t=0$) به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\mu_n = \int_0^{\infty} t^n c(x,t) d(t) \quad (5)$$

گشتاور مطلق (عادی) شده مرتبه n تابع $C(x,t)$ حول مبدا زمانی ($t=0$) به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\mu_n^* = \frac{\mu_n}{\mu_0} \quad (6)$$

که در رابطه‌های بالا، μ_n گشتاور مطلق مرتبه n تابع $C(x,t)$ حول مبدا زمانی، μ_0 گشتاور مطلق مرتبه صفر تابع $C(x,t)$ حول مبدا زمانی و μ_n^* گشتاور مطلق عادی شده مرتبه n تابع $C(x,t)$ می‌باشد.

از آنجایی که میانگین زمان ماندگاری آلودگی در جریان دارای اهمیت است، در محاسبه‌های گشتاورهای زمانی در بسیاری از موارد به جای گشتاورگیری نسبت به مبدا مختصات، نسبت به میانگین زمان ماندگاری آلودگی در یک

توزیع آلودگی و بازه ۳ در فاصله ۹ متری پایین دست از محل تزریق آلودگی قرار دارند. این حسگرها به یک دستگاه ثابت متصل به رایانه وصل بوده که قادر به ثبت هدایت‌های الکتریکی جریان آب در هر ۲ ثانیه می‌باشند. میانگین هدایت الکتریکی ثبت شده توسط دو حسگر در انتهای هر بازه به عنوان هدایت الکتریکی آن مقطع در نظر گرفته شد. پیش از آغاز آزمایش‌ها، یک رابطه واسنجی شده بین غلظت ماده ردیاب (ppm) و هدایت الکتریکی ($\mu\text{s/cm}$) برای هر یک از شش حسگر استخراج شد و در نتیجه غلظت جریان با استفاده از این رابطه در هر ۲ ثانیه برای هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان آب در هر یک از بازه‌ها، از یک دستگاه لوله پیتو متصل به فشارسنج استفاده شد. این دستگاه نیز قابلیت ثبت سرعت لحظه‌ای جریان به وسیله یک دستگاه ثابت متصل به رایانه در هر چهار ثانیه را دارد. سرعت میانگین مورد نیاز برای تکمیل معادله انتقال-پراکنش از میانگین سرعت‌های لحظه‌ای ثبت شده در زمان‌ها و مکان‌های مختلف هر بازه محاسبه شد. همچنین برای تعیین عمق جریان آب در درون آبراهه آزمایشگاهی از یک دستگاه عمق‌سنج صوتی با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. حسگرهای این دستگاه ارتفاع عمق جریان عبوری از روی ناحیه بستر رسوبی را در هر دو ثانیه به وسیله یک دستگاه ثابت متصل به رایانه برداشت می‌کنند. در همه‌ی آزمایش‌ها یک حسگر در هر بازه در محل تقاطع دو تلماسه (گودترین نقطه) به منظور برداشت عمق جریان عبوری قرار گرفته و همچنین در آزمایش‌های بدون شکل بستر (WF1 و WF2) نیز در هر بازه یک حسگر در میانه بازه قرار گرفته است.

۲-۴- مدل ریاضی OTIS¹-P

مدل ریاضی OTIS یک مدل شبیه‌سازی ریاضی برای بررسی انتقال مواد محلول در رودخانه‌ها بوده که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۲ ارائه شده است. در این مدل عددی، مدل نگهداشت موقت با استفاده از روش تفاضل‌های

⁴ Temporal Moment Approach (TM)

¹ One-Dimensional Transport with Inflow and Storage

² USGS (The United States Geological Survey)

³ Nonlinear Least Squares Optimization Algorithm

نگهداشت موقت در کدنویسی الگوریتم در نظر گرفته شد.

۲-۶- ارزیابی آماری روش‌های شبیه‌سازی

برای ارزیابی و بررسی روش‌های حل‌های تحلیلی و عددی (OTIS-P) در برآورد غلظت و چگونگی زمانی پراکنش آلودگی و در نتیجه بازسازی منحنی رخنه، از معیارهای متداول آماری شامل ضریب تعیین R^2 ، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده $(NRMSE)$ ، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب نش-ساتکیلف (NS) به ترتیب برابر رابطه‌های (۱۵) تا (۱۸) استفاده شد (Azhdan, 2018):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})(C_{sim,i} - \bar{C}_{sim,i})}{(\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^N (C_{sim,i} - \bar{C}_{sim,i})^2)^{0.5}} \right]^2 \quad (15)$$

$$NRMSE = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - C_{sim,i})^2}{N} \right)^{0.5}}{\bar{C}_{lab,i}} \quad (16)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |C_{lab,i} - C_{sim,i}|}{N} \quad (17)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - C_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})^2} \quad (18)$$

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

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر ضخامت بستر (db) بر انتقال و پراکنش

آلودگی

در این پژوهش، آزمایش‌های ماده ردیاب (NaCl) در بسترهای WF1 و WF2 برای بررسی تاثیر ضخامت بستر رسوبی (db) بر فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) انجام شدند. آزمایش‌های ماده ردیاب بستر WF1 در محدوده عدد فرود جریان (Fr) ۰/۱۹۴ تا ۰/۲۹۰، محدوده عدد رینولدز جریان (Re) ۹۳۳۳ تا ۲۴۳۸۸ و محدوده سرعت میانگین جریان (U) ۰/۱۵۳ تا ۰/۲۶۸ متر بر ثانیه و همچنین آزمایش‌های ماده ردیاب بستر WF2

آبراهه انجام می‌شود. رابطه (۷) گشتاور زمانی نسبت به میانگین زمان ماندگاری آلودگی در یک آبراهه می‌باشد:

$$m_n = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{\infty} (t - \mu_1^*)^n c(x, t) dt \quad (7)$$

که m_n گشتاور عادی مرکزی مرتبه n یا همان گشتاور عادی نسبت به میانگین زمان ماندگاری آلودگی می‌باشد. با استفاده از تبدیل دو جمله‌ای معکوس^۱، رابطه (۷) قابل بازنویسی به رابطه (۸) می‌باشد:

$$m_n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \mu_{n-i}^* (-\mu_1^*)^i \quad (8)$$

که i شمارنده می‌باشد. با استفاده از رابطه (۸) می‌توان گشتاور عادی مرکزی مرتبه اول (میانگین زمان ماندگاری آلودگی)، گشتاور عادی مرکزی مرتبه دوم (واریانس منحنی رخنه آلودگی) و گشتاور عادی مرکزی مرتبه سوم (چولگی منحنی رخنه آلودگی) را به ترتیب برابر رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) محاسبه کرد:

$$m_1 = \mu_1^* \quad (9)$$

$$m_2 = \mu_2^* - \mu_1^{*2} \quad (10)$$

$$m_3 = \mu_3^* - 3\mu_1^* \mu_2^* + 2\mu_1^{*3} \quad (11)$$

(Gonzales et al., 2013) با استفاده از روابط فوق و اعمال آن روی زوج معادله‌های دیفرانسیل مدل (TSM)، روابط (۱۲) تا (۱۴) را استخراج کردند:

$$m_1 = \bar{T}(1 + \beta) \quad (12)$$

$$m_2 = \frac{2(1+\beta)^2 \bar{T}^2}{Pe} + \frac{2\beta \bar{T}}{\alpha_2} \quad (13)$$

$$m_3 = \frac{12(1+\beta)^3 \bar{T}^3}{Pe^2} + \frac{12 \bar{T}^2 \beta (1+\beta)}{(\alpha_2) Pe} + \frac{6\beta \bar{T}}{(\alpha_2)^2} \quad (14)$$

در این رابطه‌ها، $\alpha_2 = \frac{\alpha}{\beta}$ ، $\beta = \frac{A_s}{A}$ ، $\bar{T} = \frac{L}{U}$ ، طول بازه، U سرعت میانگین جریان و $Pe = \frac{UL}{D_x}$ عدد پکلت می‌باشد. در این پژوهش گشتاورهای عادی مرکزی مرتبه‌های اول تا سوم از نتایج آزمایشگاهی با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB 2014 محاسبه و در سمت چپ رابطه‌ها (۱۲) تا (۱۴) جایگزین و رابطه‌ها تکمیل شد. برای برآورد فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت از روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و کدنویسی آن در نرم‌افزار MATLAB 2014 استفاده شد. مجموع رابطه‌ها (۱۲) تا (۱۴) با هدف کمینه‌سازی به عنوان تابع هدف به الگوریتم ژنتیک معرفی شد. همچنین برای تعیین قیود فراسنجه‌های، بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۹ برای همه‌ی فراسنجه‌های چهارگانه مدل

⁴ Mean Absolute Error

⁵ Nash-Sutcliffe

¹ Inverse Binomial Transform

² Determination Coefficient

³ Normalized Root Mean Square Error

بررسی کارایی فراسنجه‌های برآوردی توسط این روش، مقایسه آماری بین نتایج بازتولید منحنی‌های رخنه در مدل عددی OTIS-P و نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب نیز انجام پذیرفت. به منظور بررسی روند تغییرات فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM)، فراسنجه‌های بی‌بعد نسبت سرعت میانگین جریان به سرعت برشی ($\frac{U}{U_*}$) و همچنین فراسنجه بی‌بعد نسبت ضخامت بستر رسوبی به عمق میانگین جریان ($\frac{d_b}{d}$) در هریک از آزمایش‌ها محاسبه شدند. نتایج نهایی عدد فرود جریان (Fr)، عدد رینولدز جریان (Re)، فراسنجه بی‌بعد ($\frac{U}{U_*}$) و همچنین فراسنجه بی‌بعد ($\frac{d_b}{d}$) در هر یک از آزمایش‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

تاثیر ضخامت بستر بر ضریب پراکنش طولی (D_x)

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهند که میزان فراسنجه‌های بی‌بعد $\frac{U}{U_*}$ ، $\frac{d_b}{d}$ و همچنین عدد فرود جریان (Fr) در بستر WF1 در تمامی حالت‌های آزمایش بیشتر از بستر WF2 بوده است. افزایش عدد فرود جریان (Fr) سبب می‌شود تا بخش عمده‌ای از آلودگی همراه با ناحیه اصلی جریان جابه‌جا شده و میزان کمتری از آلودگی وارد فضای تبادل‌های هاپیریک بستر رسوبی گردد. از سوی دیگر، کاهش فراسنجه بی‌بعد $\frac{U}{U_*}$ سبب می‌شود تا ابر آلودگی در ناحیه اصلی جریان با سرعت کمتری جابه‌جا شود و بخش عمده‌ای از آلودگی فرصت ورود به ناحیه هاپیریک را پیدا کنند. از سوی دیگر مطابق آن چه در بخش ۳-۱ بیان شد، کاهش فراسنجه بی‌بعد $\frac{d_b}{d}$ باعث افزایش تبادل‌های هاپیریک در ناحیه بستر رسوبی می‌گردد. بنابراین تغییرات کاهش‌ی این فراسنجه‌های بی‌بعد در بستر WF2 نسبت به بستر WF1 سبب می‌شود تا بخش عمده‌ای از آلودگی وارد فضای تبادل‌های هاپیریک بستر رسوبی شده و همین امر موجب کاهش غلظت اوج آلودگی در ناحیه اصلی جریان (C_{max}) می‌گردد. لذا از آنجایی که میزان ضریب پراکنش طولی (D_x) با غلظت اوج آلودگی در ناحیه اصلی جریان (C_{max}) رابطه عکس دارد، میزان این ضریب در بستر WF2 بیشتر از بستر WF1 خواهد بود.

محدوده عدد فرود جریان (Fr) ۰/۰۶۹ تا ۰/۱۳۰، محدوده عدد رینولدز جریان (Re) ۵۹۶۷ تا ۲۱۶۰۰ و محدوده سرعت میانگین جریان (U) ۰/۲۲۱ تا ۰/۳۶۱ متر بر ثانیه انجام شدند.

در جدول ۲ فراسنجه‌های مدت زمان میانگین ماند آلودگی^۱ در ناحیه اصلی جریان (MRT) و همچنین غلظت اوج آلودگی در ناحیه اصلی جریان (C_{max}) ارائه شده است. نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که کاهش نسبت ضخامت بستر رسوبی به عمق میانگین جریان $\frac{d_b}{d}$ موجب افزایش مدت زمان میانگین ماند آلودگی در ناحیه اصلی جریان (MRT) می‌شود. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهند که در همه‌ی محدوده‌های عدد فرود جریان (Fr)، مدت زمان میانگین ماند آلودگی (MRT) در بستر WF2 به مراتب بیشتر از بستر WF1 می‌باشد که با نتایج Packman et al. (2004) (رابطه ۱)، کاهش ضخامت بستر رسوبی (d_b) باعث افزایش میزان تبادل‌های هاپیریک در مقیاس زمانی (t_f^*) شده، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدت زمان میانگین ماند آلودگی (MRT) افزایش می‌یابد.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهند که کاهش فراسنجه بی‌بعد d_b/d موجب افزایش تبادل‌های هاپیریک از ناحیه اصلی جریان به ناحیه بستر رسوبی شده، بنابراین میزان غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان (Fr) در هر دو بستر WF1 و WF2 میزان تبادل‌های هاپیریک افزایش یافته و در این شرایط، بخش عمده‌ای از آلودگی در ناحیه‌های نگهداشت موقت بستر رسوبی تبادل می‌شوند.

۲-۳- حل عددی با مدل OTIS-P

برای برآورد فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) از مدل عددی OTIS-P استفاده شد که این مدل عددی بر مبنای فراسنجه‌های برآوردی اقدام به شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه نیز می‌کند. در جدول ۳ نتایج نهایی مدل عددی OTIS-P در برآورد بهینه فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) در تمامی آزمایش‌های ماده ردیاب در دو بستر WF1 و WF2 ارائه شده است. به منظور

¹ Medium Residence Time

جدول ۲ نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی ماده ردیاب در بسترهای WF1 و WF2

Bed-Form	Discharge Q (l/s)	Fr	C _{max} (ppm)	MRT (s)	$\frac{d_b}{d}$
WF1	5	0.194	1231	42	5.21
	7.5	0.231	1115	60	4.57
	10	0.274	1006	72	3.95
	12.5	0.290	818	84	3.51
WF2	5	0.069	1055	132	2.96
	7.5	0.087	636	214	2.10
	10	0.109	400	230	1.60
	12.5	0.130	539	190	1.33

جدول ۳ نتایج برآورد فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت با مدل عددی OTIS-P در تمامی حالات بستر

Table 3 Results of estimating the parameters of the transient storage model (TSM) with the OTIS-P numerical model in all bed-form conditions

Bed-Form	Fr	Re	$\frac{U}{U_*}$	D _x (m ² /s)	A (m ²)	A _s (m ²)	α (1/s)	R ²	NS	NRMSE	MAE	$\frac{d_b}{d}$
WF1	0.194	9333	3.409	0.010	0.024	0.017	0.009	0.84	0.86	2.86	104.15	5.21
	0.231	13440	3.428	0.015	0.022	0.014	0.012	0.90	0.91	1.15	96.63	4.57
	0.274	19845	4.082	0.020	0.040	0.012	0.021	0.88	0.89	1.89	96.90	3.95
	0.290	24388	4.276	0.032	0.046	0.009	0.023	0.93	0.93	2.34	36.62	3.51
WF2	0.069	5967	1.106	0.010	0.010	0.019	0.047	0.95	0.95	1.62	29.52	2.96
	0.087	9879	1.409	0.026	0.020	0.016	0.049	0.91	0.90	1.95	33.71	2.10
	0.109	14100	1.778	0.230	0.015	0.018	0.052	0.92	0.92	0.86	21.42	1.60
	0.130	21660	2.126	0.370	0.015	0.023	0.043	0.97	0.97	0.40	11.97	1.33

تأثیر ضخامت بستر بر گستره ناحیه اصلی جریان (A) بررسی برداشت‌های آزمایشگاهی نشان داد که در یک دبی جریان ثابت، میزان عمق جریان در بستر WF1 به مراتب بیشتر از بستر WF2 می‌باشد. بنابراین با توجه به ثابت بودن عرض جریان در هر دو حالت بستر، گستره ناحیه اصلی جریان (A) در بستر WF1 بیشتر از بستر WF2 بوده که نتایج جدول ۲ نیز نشان می‌دهد که مدل عددی OTIS-P میزان این فراسنجه را در بستر WF1 بیشتر از بستر WF2 برآورد کرده است. تخمین صحیح در میزان تغییر این فراسنجه نشان‌دهنده برآورد درست مدل در برآورد فراسنجه A دارد.

تأثیر عدد فرود جریان (Fr) بر ضریب پراکنش طولی (D_x) بررسی نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که در هر دو حالت بستر WF1 و WF2، افزایش عدد فرود جریان (Fr) باعث افزایش ضریب پراکنش طولی (D_x) شده است. همان‌طور که بیان شد، افزایش عدد فرود جریان (Fr) موجب می‌شود تا ناحیه اصلی جریان نقش بیشتری در جابه‌جایی آلودگی ایفا نماید. در واقع در این شرایط، نقش تبادل‌های هاپریک در انتقال و پراکنش آلودگی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین ضریب پراکنش طولی (D_x) در هریک از این حالت‌های بستر، با افزایش عدد فرود جریان (Fr) افزایش می‌یابد، که با نتایج (Azhdan et al. (2019 مبنی بر افزایش ضریب پراکنش طولی (D_x) با افزایش دبی جریان مطابقت دارد.

جریان ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. نمودارهای شکل ۲ نشان می‌دهند که مدل عددی OTIS-P در شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه دارای عملکرد مناسب بوده است.

۳-۳- تاثیر وجود شکل بستر تلماسه بر فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت

در این بخش از پژوهش، آزمایش‌های ماده ردیاب (NaCl) در بسترهای D1، D2 و D3 برای بررسی تاثیر ایجاد شکل بستر تلماسه بر فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) انجام شدند. آزمایش‌های ماده ردیاب بستر D1 در محدوده عدد فرود جریان (Fr) ۰/۰۶۹ تا ۰/۱۳۰، محدوده عدد رینولدز ناحیه‌های هایپرریک (Re*) ۱۲۵۴۰ تا ۲۶۷۴۵ و محدوده سرعت میانگین جریان (U) ۰/۰۷۸ تا ۰/۱۶۶ متر بر ثانیه، آزمایش‌های ماده ردیاب بستر D2 در محدوده عدد فرود جریان (Fr) ۰/۰۷۱ تا ۰/۱۵۱، محدوده عدد رینولدز ناحیه‌های هایپرریک (Re*) ۹۸۳۰ تا ۲۴۱۷۲ و محدوده سرعت میانگین جریان (U) ۰/۰۷۱ تا ۰/۱۵۱ متر بر ثانیه و آزمایش‌های ماده ردیاب بستر D3 در محدوده عدد فرود جریان (Fr) ۰/۱۲۷ تا ۰/۲۲۱، محدوده عدد رینولدز ناحیه‌های هایپرریک (Re*) ۸۲۵۰ تا ۱۶۵۶۴ و محدوده سرعت میانگین جریان (U) ۰/۱۲۷ تا ۰/۲۲۱ متر بر ثانیه انجام شدند. معادله‌های نهایی گشتاورگیری شده مدل نگهداشت موقت (TSM) به کمک الگوریتم ژنتیک (GA) و در محیط نرم‌افزار MATLAB 2014 حل شده و فراسنجه‌های بهینه چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از برداشت‌های آزمایشگاهی برآورد شدند. در جدول ۴ فراسنجه‌های بهینه چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) توسط روش گشتاورگیری زمانی (TM) ارائه شده است.

تاثیر شکل بستر تلماسه بر ضریب پراکنش طولی (D_x)

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد در جریان‌های بدون شکل بستر، ضریب پراکنش طولی تابع عدد رینولدز جریان (Re) بوده و با افزایش عدد رینولدز جریان (Re) افزایش پیدا خواهد کرد. اما نقش تبادل‌های هایپرریک از ناحیه اصلی

تاثیر ضخامت بستر بر گستره ناحیه نگهداشت (A_s) نتایج جدول ۳ نشان می‌دهند که در یک دبی جریان ثابت، سطح گستره ناحیه نگهداشت (A_s) برآورد شده توسط مدل عددی OTIS-P در بستر WF2 بیشتر از بستر WF1 می‌باشد. همان‌طور که بیان شد کاهش ضخامت بستر موجب کاهش عمق جریان سطحی در یک دبی ثابت شود. بنابراین با کاهش ضخامت بستر، تاثیر ناحیه اصلی جریان در جابه‌جایی آلودگی کاهش یافته و تاثیر ناحیه‌های بستر رسوبی در این جابه‌جایی افزایش می‌یابد لذا می‌توان تصور کرد که در بستر WF2 تاثیر فراسنجه A_s در انتقال و جابه‌جایی آلودگی به مراتب بیشتر از بستر WF1 می‌باشد. در واقع از آنجایی که در یک دبی جریان ثابت، میزان فراسنجه A در بستر WF2 به مراتب کمتر از بستر WF1 بوده لذا می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه اصلی جریان در انتقال و جابه‌جایی آلودگی در برخورد بیشتری به ناحیه بستر رسوبی بوده و در نتیجه این ناحیه تاثیر به مراتب بیشتری در جابه‌جایی آلودگی دارد. از سوی دیگر، بیش‌تر بودن فراسنجه A در یک دبی جریان ثابت در بستر WF1 سبب می‌شود تا حجم بیشتری از آلودگی در ناحیه اصلی جریان جابه‌جا شده و در نتیجه نقش ناحیه بستر رسوبی در این جابه‌جایی کمتر شود.

تاثیر ضخامت بستر بر ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α)

نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ نشان می‌دهند که فراسنجه بی‌بعد $\frac{d_b}{d}$ در تمامی حالت‌های آزمایش در بستر WF2 بیش‌تر از بستر WF1 می‌باشد. برابر رابطه (۱)، کاهش ضخامت بستر رسوبی (d_b) باعث افزایش میزان تبادل‌های هایپرریک در مقیاس زمانی (t_f*) می‌شود و در نتیجه مدت زمان ماند آلودگی در بستر رسوبی افزایش می‌یابد. از آنجایی که ضریب α نشان از میزان تبادل زمانی آلودگی در این ناحیه‌های هایپرریک دارد لذا کاهش فراسنجه بی‌بعد $\frac{d_b}{d}$ باعث افزایش این ضریب می‌گردد. بنابراین میزان (α) در بستر WF2 بیشتر از بستر WF1 می‌باشد.

شکل ۲ منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی OTIS-P و منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی در دبی

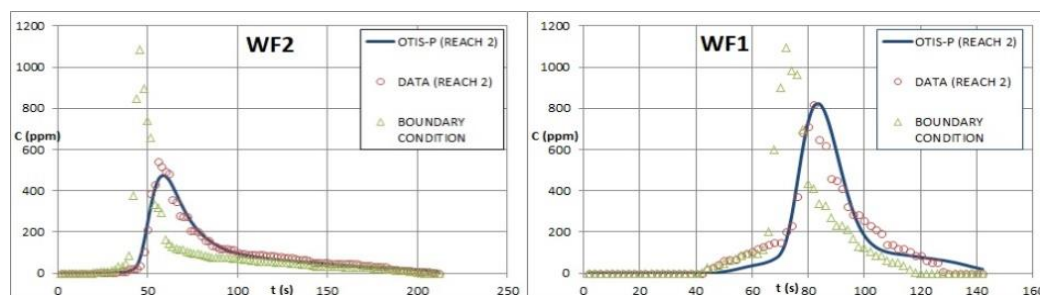


Fig.3 Comparison of breakthrough curves simulated in OTIS-P and laboratory data at 12.5 l/s

شکل ۳ مقایسه منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار OTIS-P و برداشت‌های آزمایشگاهی در دبی جریان ۵ لیتر بر ثانیه برای بستر WF2 و حالات سه گانه فرم بستر تلماسه

Table 4 Results of estimating the parameters of the transient storage model (TSM) by optimizing the temporal moment equations (TM) in dune bed-form conditions

جدول ۴ نتایج برآورد فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM) با بهینه‌سازی معادله‌های گشتاورگیری زمانی (TM) در حالت‌های دارای شکل بستر تلماسه

Bed-Form	Discharge Q (l/s)	Fr	$\frac{U}{U_*}$	D_x (m ² /s)	A (m ²)	A_s (m ²)	α (1/s)	R ²	NS	NRMSE	MAE	Re*	$\frac{\Delta}{d}$
D1	5	0.069	1.106	0.0943	0.0172	0.0146	0.5472	0.86	0.87	0.91	15.53	12540	1.40
	7.5	0.087	1.409	0.1483	0.0203	0.0107	0.1146	0.94	0.93	0.38	13.11	16122	1.31
	10	0.109	1.778	0.0274	0.0507	0.0146	0.0527	0.94	0.92	1.32	27.14	21405	1.23
	12.5	0.130	2.126	0.0118	0.0700	0.0130	0.0353	0.97	0.97	0.48	14.31	26745	1.20
D2	5	0.064	0.988	0.0115	0.0426	0.0113	0.4769	0.84	0.85	26.23	48.16	9830	1.33
	7.5	0.082	1.292	0.1436	0.0474	0.0155	0.1191	0.96	0.96	0.86	15.18	14235	1.20
	10	0.101	1.676	0.2148	0.0617	0.0139	0.0322	0.92	0.92	1.76	28.16	19724	1.14
	12.5	0.119	1.980	0.0156	0.0997	0.0121	0.0177	0.94	0.94	0.93	16.12	24172	1.09
D3	5	0.141	2.092	0.0178	0.0399	0.0107	0.0493	0.97	0.95	0.83	30.66	8250	1.14
	7.5	0.183	2.755	0.0408	0.0489	0.0113	0.0444	0.96	0.95	0.89	16.31	12480	1.00
	10	0.195	3.001	0.1029	0.0500	0.0107	0.0225	0.94	0.94	2.18	26.14	14630	0.85
	12.5	0.208	3.245	0.0324	0.0531	0.0058	0.0169	0.90	0.91	2.91	36.15	16564	0.78

سینماتیکی آب می‌باشد. بررسی Movahedi et al., (2020) در زمینه تبادل‌های هایپرریک در شکل بستر خیزاب-گوداب نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز در ناحیه‌های هایپرریک (Re^*)، به دلیل افزایش سرعت جریان ورودی به ناحیه محیط متخلخل، میزان دبی تبدلی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش عدد رینولدز در ناحیه‌های هایپرریک (Re^*)، جرم بیشتری از آلودگی همراه با جریان به درون محیط متخلخل بستر هدایت شده و این امر موجب کاهش غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان خواهد شد. اما از سوی دیگر، با افزایش بیش از حد عدد (Re^*)، سرعت جریان در درون محیط متخلخل بستر رسوبی نیز افزایش پیدا کرده و

جریان به بستر رسوبی و برعکس با ایجاد شکل بستر در ناحیه رسوبی به مراتب افزایش پیدا کرده و بخش عمده جرم آلودگی در ناحیه‌های نگهداشت موقت ناشی از وجود بستر رسوبی جابه‌جا خواهند شد. برای در نظر گرفتن نقش تبادل‌های هایپرریک بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی در جریان‌های دارای شکل بستر، از عدد رینولدز در ناحیه‌های هایپرریک (Re^*) برابر نتایج پژوهش Cardenas and Wilson (2006) استفاده می‌شود:

$$Re^* = \frac{U_{ave}\Delta}{\nu} \quad (19)$$

در این رابطه U_{ave} سرعت میانگین جریان است که از میانگین‌گیری رخ‌نمای (پروفیل) سرعت عمودی در تاج شکل بستر محاسبه شده، Δ دامنه شکل بستر و ν لزوجت

افزایش فراسنجه بی بعد $\frac{A}{d}$ در یک دامنه شکل بستر (Δ) ثابت، به دلیل کاهش عمق جریان (d) رخ می دهد. کاهش عمق جریان (d) در یک شکل بستر مشخص، باعث می گردد تا تبادل های هاپیریک از ناحیه اصلی جریان به ناحیه بستر رسوبی افزایش پیدا کند. حضور بیشتر آلودگی در ناحیه بستر رسوبی و تبادل های بیشتر در این ناحیه سبب افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) خواهد شد.

ایجاد شکل بستر تلماسه با افزایش تبادل های هاپیریک، موجب افزایش میزان آلودگی ورودی به ناحیه بستر رسوبی می گردد. در نتیجه غلظت بیشتری از آلودگی در ناحیه های هاپیریک تبادل شده که همین امر موجب افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) در همه ی حالت های جریان با شکل بستر تلماسه نسبت به بستر WF2 می گردد. اما از سوی دیگر با افزایش همزمان عدد فرود جریان (Fr) در آزمایش های دارای شکل بستر تلماسه، میزان عدد رینولدز ناحیه هاپیریک (Re^*) افزایش بیشتری پیدا کرده و در اثر افزایش عدد (Re^*) علاوه بر این که میزان تبادل هاپیریک از ناحیه اصلی جریان به ناحیه بستر رسوبی افزایش خواهد داشت، میزان تبادل جریان از ناحیه بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان نیز افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد. بنابراین با افزایش بیشتر محدوده عدد (Re^*)، مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه های بستر رسوبی کاهش یافته لذا میزان ضریب α نیز به مراتب کاهش پیدا خواهد کرد. در واقع با افزایش عدد فرود جریان (Fr)، حجم بیشتری از آلودگی توسط ناحیه اصلی جریان جابه جا شده لذا نقش تبادل های هاپیریک بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی به مراتب کاهش می یابد. بنابراین وجود یا نبود شکل بستر تلماسه در حدود $Fr > 0.1$ ، تفاوت تاثیرگذاری در انتقال و پراکنش آلودگی نسبت به حالت بدون شکل بستر نداشته و در نتیجه تاثیر وجود شکل بستر تلماسه در جابجایی آلودگی و نگهداشت موقت آن، در حدود $Fr < 0.1$ می باشد.

منحنی های رخنه در بازه دوم توسط مدل عددی OTIS و با استفاده از فراسنجه های چهارگانه روش گشتاورگیری زمانی (TM) بازتولید شدند. در شکل ۴ مقایسه منحنی های رخنه شبیه سازی شده توسط مدل عددی OTIS با فراسنجه های بهینه شده توسط روش گشتاورگیری زمانی

بنابراین آلودگی با دبی تبدالی بیشتر و مدت زمان ماند کمتر از ناحیه بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان باز می گردد. لذا افزایش عدد Re^* تا محدوده ای مشخص با افزایش تبادل جریان از ناحیه اصلی جریان به ناحیه بستر رسوبی موجب کاهش غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان شده و پس از این محدوده، با افزایش تبادل جریان از ناحیه بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان، موجب افزایش غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان می شود.

نتایج جدول ۴ نشان می دهند که ایجاد شکل بستر تلماسه، یک روند افزایش یا کاهشی مطلق در میزان (D_x) نسبت به جریان بدون شکل بستر (WF2) ایجاد نکرده است. در شکل بستر D1 تا محدوده در حدوداً $Re^* < 21405$ ، در شکل بستر D2 تا محدوده در حدوداً $Re^* < 19724$ و در شکل بستر D3 نیز تا محدوده حدوداً $Re^* < 14630$ ، میزان (D_x) نسبت به حالت بدون شکل بستر روند افزایشی دارد. با افزایش بیشتر محدوده عدد (Re^*) در هر یک از این حالت های شکل بستر، دبی تبدالی از ناحیه بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان نیز بیشتر شده و روند کاهشی در میزان ضریب پراکنش طولی (D_x) مشاهده گردید.

تاثیر شکل بستر تلماسه بر ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α)

بررسی نتایج جدول ۴ نشان می دهد که در هر سه حالت شکل بستر، میزان ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) با افزایش عدد رینولدز در ناحیه های هاپیریک (Re^*)، کاهش می یابد. همانطور که بیان شد، افزایش عدد Re^* موجب افزایش تبادل های هاپیریک از ناحیه اصلی جریان به بستر رسوبی و برعکس می شود. در واقع افزایش عدد Re^* موجب کاهش مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه بستر رسوبی به علت افزایش سرعت جریان در درون محیط متخلخل می شود. بنابراین میزان ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) با افزایش عدد Re^* در هر سه حالت شکل بستر کاهش می یابد.

از سوی دیگر، مقایسه نتایج جدول ۴ در زمینه ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) نشان می دهد که افزایش فراسنجه بی بعد $\frac{A}{d}$ موجب افزایش این ضریب شده است. در واقع

رسیدن به غلظت اوج، بازوی پایین‌رونده و همچنین مدت زمان ماندگاری آلودگی در ناحیه اصلی جریان داشته که نتایج آماری جدول ۴ نیز تطابق شبیه‌سازی‌ها توسط این مدل عددی برای پیش‌بینی فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM) را نشان می‌دهد.

(TM) در مقابل منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی در دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همچنین در جدول ۴ نیز مقایسه آماری بین این منحنی‌های رخنه نیز ارائه شده است. مقایسه تطبیقی منحنی‌های رخنه خروجی شکل ۴ نشان از دقت بالای روش گشتاورگیری زمانی (TM) در شبیه‌سازی نحوه شکل‌گیری بازوی بالارونده، زمان

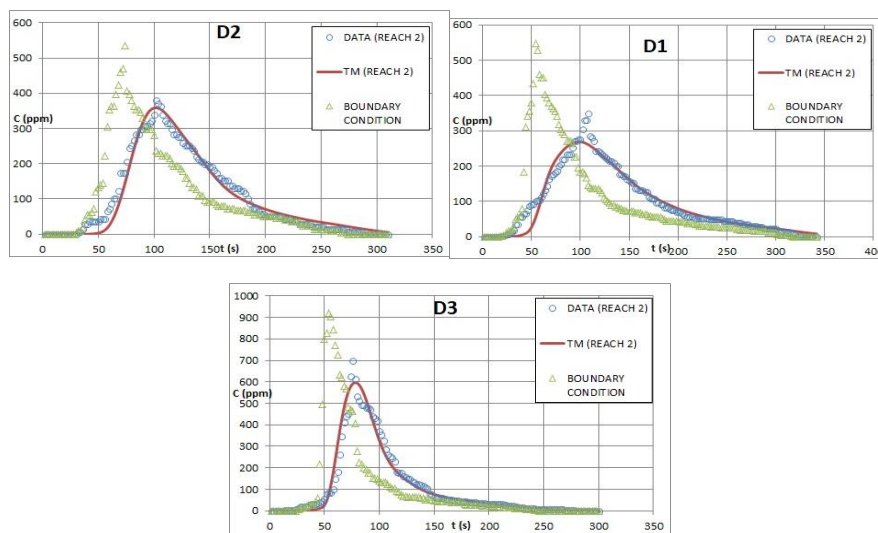


Fig 4. Comparison of simulated breakthrough curves in OTIS With the parameters of the temporal moment (TM) method and laboratory data at 7/5 l/s flow discharge for triple dune bed-form modes

شکل ۴ مقایسه منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده در مدل عددی OTIS با فراسنجه‌های روش گشتاورگیری زمانی (TM) و برداشت‌های آزمایشگاهی در دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه برای حالت‌های سه گانه شکل بستر تلماسه

می‌دهد. منحنی‌های این شکل‌ها نشان از قابلیت مناسب مدل عددی OTIS-P در شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه با وجود تبادل‌های هایپریک ناشی از ایجاد شکل بستر دارد. نقطه اوج، بازوی بالارونده و نحوه حرکت بازوی پایین‌رونده و همچنین کشیدگی منحنی رخنه که نشان‌دهنده مدت زمان ماندگاری آلودگی در جریان بوده، عنصرهای تشکیل‌دهنده یک منحنی رخنه بوده که شکل ۵ نشان از تطبیق مناسب منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی OTIS-P و منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی داشته که نتایج آماری جدول ۵ نیز تطابق شبیه‌سازی‌ها توسط این مدل عددی برای پیش‌بینی فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM) را نشان می‌دهد.

۴-۳- حل عددی با مدل OTIS-P

در این پژوهش همچنین فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت با استفاده از مدل عددی OTIS-P در هر سه حالت شکل بستر تلماسه برآورد شدند. در جدول ۵ نتایج نهایی مدل عددی OTIS-P در برآورد فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت در تمامی آزمایش‌های ماده ردیاب با حالت‌های مختلف شکل بستر تلماسه ارائه شده است. به منظور بررسی کارایی فراسنجه‌های برآوردی توسط این روش، مقایسه آماری بین نتایج بازتولید منحنی‌های رخنه در مدل عددی OTIS-P و نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب نیز انجام پذیرفت. شکل ۵ منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی OTIS-P و منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی در دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه برای بستر WF2 و حالت‌های سه گانه شکل بستر تلماسه را نشان

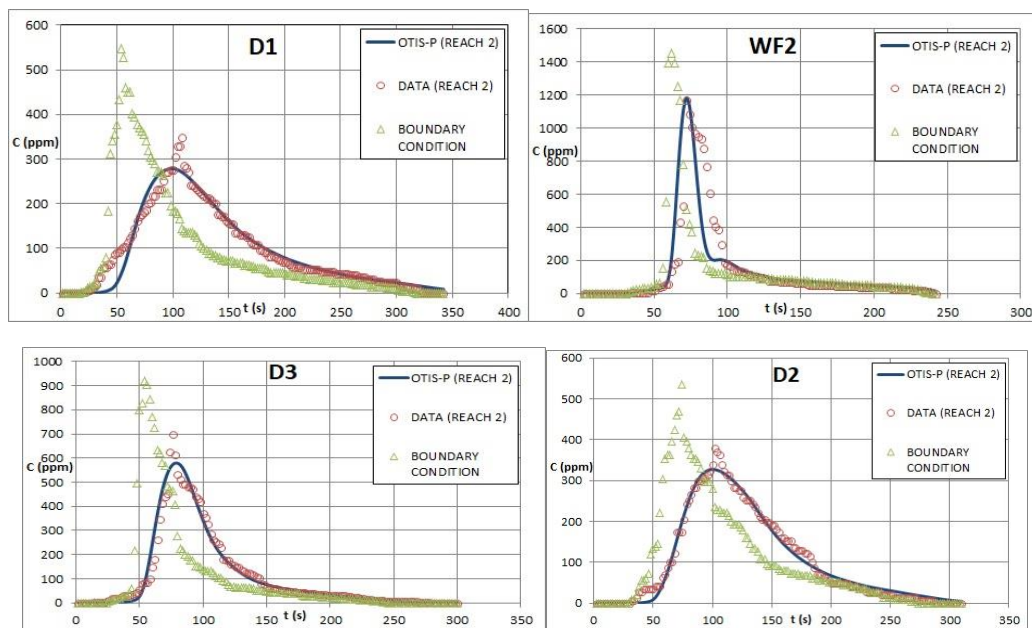


Fig 5. Comparison of simulated breakthrough curves in OTIS-P and laboratory data at 7.5 l/s flow discharge for WF2 bed-form and triple dune bed-form modes

شکل ۵ مقایسه منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده در مدل عددی OTIS-P و برداشت‌های آزمایشگاهی در دبی جریان ۷/۵ لیتر بر ثانیه برای بستر WF2 و حالت‌های سه گانه شکل بستر تلماسه

Table 5 Results of estimating the parameters of the transient storage model (TSM) with the OTIS-P numerical model in all bed-form conditions

جدول ۵ نتایج برآورد فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت با مدل عددی OTIS-P در همه‌ی حالت‌های بستر

Bed-Form	Fr	D_x (m ² /s)	A (m ²)	A_s (m ²)	α (1/s)	R ²	NS	NRMSE	MAE
D1	0.069	0.12	0.018	0.049	0.640	0.97	0.97	0.26	8.81
	0.087	0.330	0.033	0.041	0.190	0.94	0.95	0.36	12.12
	0.109	0.045	0.059	0.027	0.063	0.94	0.95	0.94	16.61
	0.130	0.087	0.060	0.015	0.042	0.97	0.97	1.04	15.31
D2	0.064	0.012	0.040	0.030	0.600	0.96	0.93	0.17	32.68
	0.082	0.210	0.049	0.026	0.100	0.98	0.98	0.28	11.10
	0.101	0.350	0.062	0.013	0.031	0.91	0.89	2.81	30.47
D3	0.119	0.015	0.100	0.019	0.010	0.95	0.96	0.62	9.11
	0.141	0.018	0.030	0.017	0.051	0.92	0.93	1.19	44.44
	0.183	0.040	0.036	0.012	0.042	0.96	0.97	0.84	15.24
	0.195	0.210	0.045	0.011	0.022	0.96	0.94	1.80	27.79
	0.208	0.029	0.060	0.010	0.012	0.96	0.96	2.40	22.53

محلول در ناحیه اصلی جریان و بخشی در ناحیه‌های نگهداشت شامل بستر رسوبی، پوشش‌های گیاهی و ناحیه‌های ماندابی نگهداشت موقت شده و دوباره به ناحیه اصلی جریان باز می‌گردد.

مقایسه نتایج جدول‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهند که به طور کلی ایجاد شکل بستر باعث افزایش (A) نسبت به حالت بدون شکل بستر شده است. ایجاد شکل بستر تلماسه در

تاثیر شکل بستر تلماسه بر گستره ناحیه اصلی

جریان (A) و گستره ناحیه نگهداشت (A_s)

میزان (A) با اندازه‌گیری عمق جریان و مقطع عرضی ناحیه جریان قابل تعیین بوده اما تعیین سهم ناحیه اصلی جریان در انتقال و پراکنش آلودگی در مجاری باز دارای ناحیه‌های نگهداشت موقت، از موارد مهم در تکمیل مدل نگهداشت موقت (TSM) می‌باشد. به طور کلی بخشی از آلاینده،

خروجی‌های مدل عددی OTIS-P بوده است. به طور کلی با توجه به نتایج آماری جدول ۴، فراسنجه‌های خروجی روش گشتاورگیری زمانی قابلیت مناسی در شبیه‌سازی انتقال و پراکنش آلودگی در جریان‌های دارای ناحیه‌های هایپرک را دارند. البته مقایسه نتایج آماری جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که مدل عددی OTIS-P اندکی با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسب‌تری دارد اما در کل هر دو روش قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جابه‌جایی آلودگی تحت مدل نگهداشت موقت (TSM) دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به شبیه‌سازی آزمایشگاهی تاثیر ضخامت بستر رسوبی (d_b) و همچنین وجود شکل بستر تلماسه بر چگونگی جابه‌جایی آلودگی با استفاده از برداشتهای آزمایشگاهی ماده ردیاب (NaCl) در شرایط مختلف ضخامت بستر رسوبی (d_b)، دامنه شکل بستر تلماسه (Δ) و همچنین طول موج شکل بستر تلماسه (λ) پرداخته شد. به دلیل تاثیر وجود شکل بستر بر تبادل‌های هایپرک و افزایش آن و به منظور در نظر گرفتن ناحیه‌های نگهداشت موقت آلودگی ایجاد شده در بستر رسوبی از مدل نگهداشت موقت (TSM) در تحلیل و بررسی انتقال و پراکنش آلودگی استفاده شد. فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (D_x ، A_s ، A و α) با استفاده از مدل عددی OTIS-P همچنین بهینه‌سازی معادله‌های گشتاورگیری زمانی (TM) با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) برآورد و ارزیابی شدند. نتایج زیر به طور خلاصه به دست آمدند:

۱) کاهش فراسنجه بی‌بعد نسبت ضخامت بستر رسوبی به عمق جریان ($\frac{d_b}{d}$) باعث افزایش تبادل‌های هایپرک در ناحیه بستر رسوبی می‌گردد. لذا با توجه به تغییرپذیری کاهشی این فراسنجه بی‌بعد در بستر WF2، غلظت اوج ابر آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان در این بستر به مراتب کم‌تر از بستر WF1 خواهد بود. از آنجایی که میزان ضریب پراکنش طولی (D_x) با غلظت اوج آلودگی (C_{max}) رابطه عکس دارد، میزان این ضریب در بستر WF2 بیشتر از بستر WF1 خواهد بود.

یک دبی جریان ثابت سبب افزایش عمق جریان نسبت به حالت بدون شکل بستر شده بنابراین افزایش (A) در جریان‌های دارای شکل بستر، قابل پیش‌بینی می‌باشد اما برآورد درست چگونگی تغییر این فراسنجه نشان از برآورد درست مدل عددی OTIS-P در ارزیابی این فراسنجه دارد. میزان (A) در شکل بستر D2 بیش‌تر از شکل بستر D1 بوده که این موضوع نشان می‌دهد که افزایش طول موج شکل بستر (λ) باعث افزایش سهم ناحیه اصلی جریان (A) در جابه‌جایی آلودگی شده و همین امر سبب ورود کمتر آلودگی به ناحیه نگهداشت موقت شده بنابراین سهم ناحیه نگهداشت (A_s) در جابه‌جایی آلودگی با افزایش طول موج شکل بستر (λ) کاهش می‌یابد.

همچنین مقایسه نتایج جدول‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهند که میزان (A_s) با ایجاد شکل بستر تلماسه نسبت به حالت بدون شکل بستر دارای افزایش می‌باشد. میزان (A_s) در شکل بستر D2 بیش‌تر از شکل بستر D3 بوده که این موضوع نشان از تاثیر افزایش دامنه شکل بستر (Δ) بر افزایش (A_s) در جریان‌های دارای شکل بستر دارد. از سوی دیگر، میزان (A_s) در شکل بستر D1 بیشتر از شکل بستر D2 بوده که این موضوع نیز نشان می‌دهد افزایش طول موج شکل بستر (λ) باعث کاهش تاثیر ناحیه نگهداشت بر جابه‌جایی آلودگی شده لذا میزان (A_s) کاهش می‌یابد.

۳-۵- مقایسه نتایج روش TM و مدل عددی

بررسی نتایج فراسنجه‌های برآورد توسط روش گشتاورگیری زمانی (TM) نشان می‌دهند که روند تغییرپذیری فراسنجه‌های چهارگانه مدل نگهداشت موقت (TSM) تاحدودی همانند با فراسنجه‌های تخمینی توسط مدل عددی OTIS-P بوده و یک سیر افزایشی و کاهشی به نسبت همانند در پیش‌بینی فراسنجه‌های این دو روش وجود دارد. مقایسه نتایج فراسنجه‌های برآوردی دو روش نشان می‌دهد که ضریب پراکنش طولی (D_x) و ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) در روش گشتاورگیری زمانی (TM) میزانی کمتر از خروجی مدل عددی OTIS-P برآورد شده است اما روند تغییرپذیری افزایشی یا کاهشی این فراسنجه‌ها همانند

بستر (WF2) دارای روند افزایشی بوده است. (۱۰) مقایسه نتایج فراسنجه‌های برآوردی روش گشتاورگیری زمانی و خروجی‌های مدل عددی OTIS-P نشان می‌دهد که ضریب پراکنش طولی (D_x) و ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) در روش گشتاورگیری زمانی میزانی کمتر از خروجی مدل عددی OTIS-P پیش‌بینی شده است اما روند تغییرپذیری افزایشی یا کاهشی این فراسنجه‌ها در روش گشتاورگیری زمانی (TM) همانند خروجی‌های مدل عددی OTIS-P بوده است.

(۱۱) هر دو روش گشتاورگیری زمانی (TM) و خروجی‌های مدل عددی OTIS-P قابلیت بالایی در شبیه‌سازی انتقال و پراکنش آلودگی در محیط‌های مورد آزمایش را داشتند و منحنی‌های رخنه بازسازی شده توسط هر دو روش تطابق قابل‌پذیرشی با نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب داشتند.

۵- فهرست نشانه‌ها

t_f^*	میزان تبادل‌های هایپریک در مقیاس زمانی (s)
K	ضریب هدایت هیدرولیکی بستر (m/s)
d_b	میزان ضخامت لایه رسوبی (m)
d	عمق میانگین جریان (m)
D_{50}	قطر میانگین مصالح رسوبی (mm)
n	تخلخل مصالح رسوبی
C	غلظت میانگین ماده آلاینده (ppm)
t	مدت زمان سپری شده پس از تزریق آلودگی (s)
U	سرعت میانگین جریان (m/s)
D_x	ضریب پراکنش طولی (m^2/s)
U_{ave}	میانگین سرعت عمودی در تاج شکل بستر (m/s)
A	گستره مقطع عرضی ناحیه جریان اصلی (m^2)
A_s	گستره مقطع عرضی ناحیه نگهداشت (m^2)
Pe	عدد پکلت
L	طول بازه (m)
N	شمار چرخه شکل بستر
C_s	غلظت ماده حل‌شده در ناحیه نگهداشت (ppm)
Q	دبی جریان (l/s)
x	فاصله طولی از محل ورود آلودگی (m)
m_n	گشتاور نرمال

(۲) ضریب پراکنش طولی (D_x) در هریک از حالت‌ها بستر WF1 و WF2، با افزایش عدد فرود جریان (Fr) افزایش می‌یابد، که با نتایج Azhdan et al., (2019) مبنی بر افزایش ضریب پراکنش طولی (D_x) با افزایش دبی جریان در جریان‌های بدون شکل بستر همخوانی دارد.

(۳) کاهش فراسنجه بی‌بعد $\frac{d_b}{d}$ باعث افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) شد، بنابراین میزان (α) در بستر WF2 بیشتر از بستر WF1 ارزیابی شد.

(۴) میزان گستره ناحیه نگهداشت (A_s) با ایجاد شکل بستر تلماسه نسبت به حالت بدون شکل بستر (WF2) دارای افزایش می‌باشد.

(۵) افزایش طول موج شکل بستر (λ) باعث افزایش سهم ناحیه اصلی جریان (A) در جابه‌جایی آلودگی شده و همین امر سبب ورود کمتر آلودگی به ناحیه نگهداشت موقت شده بنابراین سهم ناحیه نگهداشت (A_s) در جابه‌جایی آلودگی با افزایش طول موج شکل بستر (λ) کاهش می‌یابد.

(۶) در جریان‌های دارای شکل بستر تلماسه، عدد رینولدز ناحیه‌های هایپریک (Re^*) یکی از عامل‌های موثر بر فراسنجه‌های مدل نگهداشت موقت (TSM) می‌باشد.

(۷) ایجاد شکل بستر تلماسه موجب افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) می‌شود. اما نتایج نشان داد که تاثیر وجود شکل بستر در افزایش (α)، در محدوده $Fr < 0.1$ بوده است.

(۸) نتایج این تحقیق نشان داد با ۱۶ تا ۳۲ برابر شدن فراسنجه بی‌بعد ($\frac{d_b}{d}$)، ضریب α در حدود ۶۵ تا ۹۵ درصد افزایش یافته که میزان این تغییرپذیری‌ها به محدوده عدد رینولدز در ناحیه‌های هایپریک (Re^*) بستگی داشته است.

(۹) با ایجاد شکل بستر تلماسه، روند افزایش یا کاهشی مطلق در میزان (D_x) نسبت به جریان بدون شکل بستر (WF2) به وجود نیامده است. در شکل بستر D1 تا محدوده در حدود $Re^* < 21405$ ، در شکل بستر D2 تا محدوده در حدود $Re^* < 19724$ و در شکل بستر D3 نیز تا محدوده در حدود $Re^* < 14630$ ، میزان (D_x) نسبت به حالت بدون شکل

M. (2017). Estimation of longitudinal dispersion coefficient of suspended sediments through the large porous Medias. *Journal of Water and Soil Conservation*. 23(6), 317-332. (In Persian)

Chen, X., Cardenas, M.B. and Chen, L. (2015). Three-dimensional versus two-dimensional bed form-induced hyporheic exchange. *Water Resources Research*. 51(4), 2923-2936.

Elliott, A.H. and Brooks, N.H. (1997a). Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory. *Water Re-sour. Research*. 33(1), 123-136.

Elliott, A.H. and Brooks, N.H. (1997b). Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bedforms: Laboratory experiments. *Water Re-sour. Research*. 33(1), 137-151.

Fox, A., Boano, F. and Arnon, S. (2014). Impact of losing and gaining streamflow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by dune shaped bed-forms. *Water Resources Research*. 50(3), 1895-1907.

Ghasemi, M., Heidarpour, M. (2015). Investigation of Distribution of Velocity and Turbulence Intensity in Presence of Dunes and Vegetation in a Rectangular Open Channel. *Journal of Hydraulics*, 10(3), 1-14.

Gonzales-Pinzon, R., Haggerty, R. and Dentz, M. (2013). Scaling and predicting solute transport processes in streams. *Water Resources Research*. 49(7), 4071-4088.

Guy, H.P., Simons, D.D. and Richardson, E.V. (1966). Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-1961. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 462-I: 96.

Lee, D.H., Kim, Y.J. and Lee, S. (2014). Numerical modeling of bed form induced hyporheic exchange. *Paddy and Water Environment*. 12(1), 89-97.

Movahedi, N., Dehghani, A.A., Schmidt, Ch., Trauth, N. and Meftah, M. (2020). Comparison of Hyporheic Exchanges in 2D and 3D Riffle-Pool bed form structures. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 52 (8), 1-3. (In Persian)

Orghidan, T. (1959), Ein neuer Lebensraum des unterirdischen Wassers: Der hyporheische Biotop, *Archiv für Hydrobiologie*, 55, 392-414.

Packman, A.I., Salehin, M. and Zaramella, M. (2004). Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. *J. Hydraul. Engineering*. 130(7), 647-656.

Re عدد رینولدز در ناحیه جریان

Re* عدد رینولدز در ناحیه‌های هایپرلیک

Fr عدد فرود جریان

U* سرعت برشی (m/s)

i شمارنده

μ گشتاور

ν لزوجت سینماتیک آب (m²/s)

λ طول موج شکل بستر (m)

α ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (1/s)

Δ دامنه شکل بستر (m)

۶- منابع ها

Allen, J.R.L. (1985). Principles of physical sedimentology. Chapman and Hall, New York, 272 pp.

Azhdan, Y. (2018). Experimental investigating of the advection-dispersion equations for pollutant transport in the Gravel-Bed Rivers. Ph.D. Thesis, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari. Iran, 299 pp. (In Persian).

Azhdan, Y., Emadi, A., Chabokpour, J. and Daneshfaraz, R. (2019). Estimation of Transient Storage Parameters for Simulation of Pollution Transport in the Gravel Bed Rivers. *Iranain Journal of Soil and Water Research*. 50(1), 65-76. (In Persian)

Bancala, K.E. and Walters, R.A. (1983). Simulation of solute transport in a mountain pool-and riffle stream: a transient storage model. *Water Resources Research*. 19(3), 718-724.

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.A. (1999). Subaqueous gravel dunes. *J. Sediment. Res.*, 69, 534-545.

Chabokpour, J., Amiri Takoldani, E. and Sedghi Asl,

- Pang, L., Goltz, M. and Close, M. (2003). Application of the method of temporal moments to interpret solute transport with sorption and degradation. *Journal of Contaminant Hydrology*. 60(1-2), 123– 134.
- Reible, D.D. and Savant-Malhiet, S.A. (1993). Comparison of physical transport processes in no cohesive river sediments. *J. Environ. Engineering*. 119(1), 90–102.
- Runkel, R.L. (1998). One dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers. U.S. Geological Survey. Water-Resources investigations. Report 98-4018. 73 p. Denver, Colorado.
- 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.
- Thibodeaux, L.J. and Boyle, J.D. (1987). Bedform-generated convective transport in bottom sediment. *Nature*. 325(6102), 341-343.
- Vittal, N., RangaRaju, K.G. and Garde, R.J. (1977). Resistance of two-dimensional triangular roughness. *J. Hydraul. Research*. 15(1), 19–36.
- Wood, P.J. and Armitage, P.D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environ. Management*. 21(2), 203–217.