

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 5, pp: 66-88

The Effect of Changing Bed Roughness on the Pollution Mixing Process of Meandering

S. Nojumi Siahmard¹, M. Meftah Halaghi^{2*}, M. Esmaeili Varaki³, A. Ahmad Dehghani⁴, A. Zahiri⁴

1. PhD. Candidate, Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
(Corresponding Author) meftahhalaghi@gmail.com
3. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran
4. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(Received Aug. 23, 2023 Accepted Nov. 27, 2023)

To cite this article:

Nojumi Siahmard, S., Meftah Halaghi, M., Esmaeili Varaki, M., Ahmad Dehghani, A., Zahiri, A. 2024. "The effect of changing bed roughness on the pollution mixing process of meandering" *Journal of Water and Wastewater*, 34(5), 66-88. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.412853.3368>.

Abstract

The understanding of the mechanisms underlying the diffusion, advection, and mixing of pollutants constitutes a crucial aspect in monitoring water resources quality, particularly in the context of river systems. The longitudinal dispersion coefficient holds significant importance in predicting and illustration of pollutants in river systems. The current study investigated the advection and dispersion of pollution in meandering rivers experimentally. A series of experiments were undertaken to quantify the tracer concentration within a laboratory flume. The meandering flume with 8 bends was used to consider variation of tracer concentration for different discharges and solid and sedimentary beds. Utilizing the collected experimental data and employing the routing process, the longitudinal dispersion coefficient was determined across various segments of meandering rivers. Comparison of results for both solid and sedimentary bed indicates that as the flow discharge increases, the tracer's transfer speed increases while the transfer time decreases. Consequently, the difference between the peak concentration of tracer on the hydrographs (C_r) of input and output sections in the range of 21 to 100 percent decreases. Furthermore, by changing the bed from solid to sedimentary, C_r and the longitudinal mixing coefficient (D_L) increased noticeably. In the mentioned conditions, the lowest values of C_r and D_L parameters were obtained with 100 and 85% increase in value, respectively. Additionally, the results revealed a positive correlation between the mixing parameters and the length of the traversed tracer along the bends. The analysis of the data indicated that as the Reynolds number increased, the longitudinal mixing coefficient increased in both solid and sedimentary bed.

Keywords: Mixing, Routing Process, Longitudinal Dispersion Coefficient, Meandering, Solid Beds, Sedimentary Bed.



Extended Abstract

1. Introduction

Industrial, agricultural and urban development are the main sources of pollution of rivers which cause environmental problems. Understanding the mixing and dilution processes is necessary for self-purification of rivers and pollution control (Yeberehpour et al., 2019). The longitudinal dispersion coefficient is an important parameter for describing pollution transport in waterways and rivers, and it can be estimated using various methods such as integration, tracer experiments, and empirical relationships. Fischer et al. extended the use of the Fisher tracking method to calculate the longitudinal dispersion coefficient in a one-dimensional mixing model by measuring concentration rates at two points and comparing the measured and calculated concentration curves (Fischer et al., 1979).

The first step in solving problems related to the dispersion and mixing of pollutants is to identify dispersion coefficients, which can be accurately measured through tracer experiments. However, research on the effect of bed roughness on the mixing process in channels has not been conducted yet. In current study, the changes in mixing components in the two form of bed under different hydraulic conditions using tracer were investigated experimentally to estimate the longitudinal mixing coefficient for different lengths using the trend analysis method based on the measurements.

2. Methodology

By application of dimensional analysis, equation 1 is considered to the dimensionless parameters and the effective equation for the current research

$$\text{Mixing} = f(S, f, C, W/h, R/h, Re, Fr) \quad (1)$$

Where

S: meandering coefficient, f: flow resistance coefficient, C: Pollutant concentration, W: canal width, h: flow height, Re: Reynolds number and Fr: Froude number.

The experiments of this research were carried out in a flume with 16m length, 1.5m width, and 1m depth with a recirculation system in the hydraulic and physical models laboratory of the water engineering department of the University of Guilan.

A centrifugal pump with a motor speed control device was used to provide flow. To reduce flow turbulence, flow calming plates were used at the inlet of the flow and the beginning of the return path. Ultrasonic flow meters with an accuracy of ±0.01 liters per second were used to measure the flow rate.

Mineral sand with a diameter of 2.5 mm was used to simulate the sedimentary bed.

Water and salt solution (NaCl) was used as a tracer material due to the ease of measurements, easy access, and low cost.

In each experiment, the flow rate was adjusted and the desired depth was set using the final valve maneuver. Tracer tests were conducted after ensuring water stability and equilibrium in the sediment bed. The experiments were performed in both solid and sediment beds for six different intervals. The concentration of the injected solution was measured at the beginning and end of each experiment. The sensor measured the concentration at the middle width and depth, a few seconds before injection and a few seconds after the tracer entered and reached the initial concentration value. The location of the EC meter sensors and the length of measurement sections are shown in Fig. 1.

Table 1 shows the range of Hydraulic parameters of the experiment for mixing parameters.

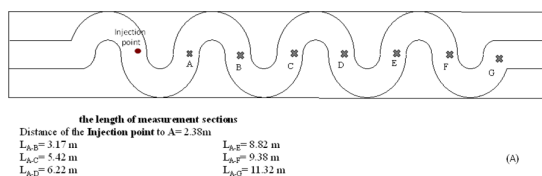


Fig. 1. The location of the EC meter sensors and the length of measurement sections

Table 1. Range of Hydraulic parameters of experiment for mixing parameters

Parameters	Value
q (m ³ /m.s)	0.014 to 0.026
V (m/s)	0.14 to 0.26
h (m)	0.1
R/h	7.5
W/h	5
Re	28000 to 52000
Fr	0.099 to 0.185

3. Discussion and Results

In this paper, the concentration variations of input and output in different intervals for solid and sedimentary bed form were estimated. Fig. 2 shows the time-concentration profile for the first and last sections. The results showed that increasing the distance between measurement points and applying more transverse mixing cycles resulted in a greater difference in the peak concentration of the output curve compared to the input curve. The observations indicated that the flow substrate transition from solid to sedimentary increased the duration of concentration curve return.

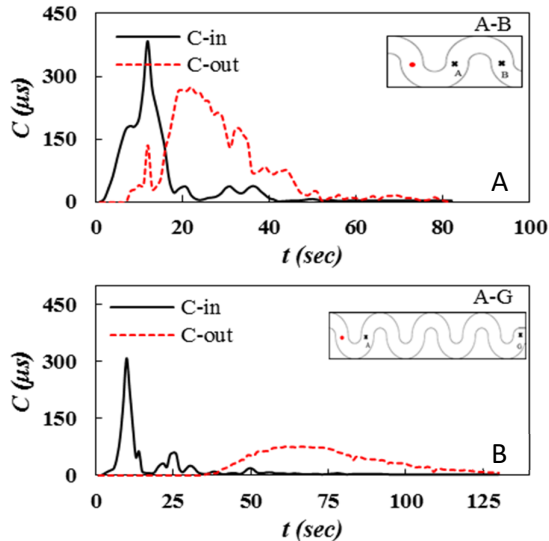


Fig. 2. Temporal concentration profiles of Ec for different locations in solid bed for $q=0.018\text{m}^3/\text{m.s}$.

4. Dimensionless parameters

The effect of hydraulic parameters and bed material on the changes in tracer concentration was investigated with dimensionless parameters such as: Cr, T_{pr} and T_{dr} . These parameters are defined by equations 2 to 4

$$Cr = \frac{C_{\max_u} - C_{\max_o}}{C_{\max_u}} \quad (2)$$

$$T_{pr} = \frac{T_{\max_o} - T_{\max_u}}{T_{\max_o}} \quad (3)$$

$$T_{dr} = \frac{T_{\max_o} - T_{\max_u}}{T_{\max_o}} \quad (4)$$

The parameters used in equations 2 to 4 are extracted from time concentration profiles.

The results show that increasing the flow rate in solid bed experiments, results in a decrease in Cr values. Sediment beds lead to a decrease in Cr concentration, as well as a decrease in the parameter T_{pr} . The comparison of results in sediment beds shows that increasing the flow rate results in a decrease in Cr concentration, except in the A-C sections. The parameter T_{dr} increases with an increase in flow rate in all sections except A-C, indicating the accumulation and retention of tracer materials in sediment beds.

The study of the effect of the distance traveled by the tracer carrier flow on the mixing parameters in the solid bed showed that with the increase of the relative distance of the parameters Cr, T_{pr} and T_{dr} , except for the flow rate of 0.022 which decreased by almost 4%, increase significantly. The study on the sediment beds showed

that increasing the distance traveled and the relative distance resulted in an average increase in Cr values by 40% for different discharges and an average increase in T_{pr} values by 50% for all discharges. The range of T_{dr} values increased by 0 to 57%. Increasing the flow path length and the number of bends in the path led to an increase in Cr, thereby improving and accelerating the mixing process. This has been reported in previous studies on tracer tracking and mixing by (Boxall and Guymmer, 2007; Zhang, 2011; Seo et al., 2016; Park and Seo, 2018).

Changing the substrate from solid to sedimentary resulted in an increase in Cr concentration in some sections and a decrease in others. The parameter T_{pr} showed a decrease in value with the change in substrate, while T_{dr} showed a decreasing trend in all sections. Overall, changing the substrate from solid to sedimentary increased the concentration difference (Cr) in all sections and decreased the time parameters (T_{pr} and T_{dr}).

In the present research, the longitudinal dispersion coefficient (D_L) and transfer speed of the tracer (U) were calculated using the routing process. In the routing process D_L was estimated using the curve of time changes of the concentration in two sections at the beginning and at the end of the span, for different hydraulic conditions, the output concentration from the downstream section of the span is estimated and then it is compared with the curve of the time changes of the observed output concentration. Fig. 3 shows the comparison of observed concentration and calculated concentration for min and max discharge and different sections.

The study found that the velocity of tracer transport (U) increases with increasing flow rate for both solid and sedimentary substrates. Changing the substrate from solid to sedimentary and creating roughness in the substrate can cause the velocity of tracer transport to either increase or decrease depending on different flow conditions. Overall, the average value of parameter U increased by 11% with the creation of roughness in the substrate.

Experiment result shows that, the coefficient of dispersion is directly proportional to the velocity of the tracer transport and increases with increasing velocity. Changing the bed from solid to sedimentary reduces the values of the parameters U and D_L .

The Reynolds number (Re) can be used to interpret the mixing process, and its value increases with increasing flow rate. The results indicate that increasing the Reynolds number and turbulence leads to an increase in the mixing coefficient D_L . The relationship between the changes in D_L and Reynolds numbers shows that D_L decreases with a decrease in Reynolds number and increases with an increase in Reynolds number.



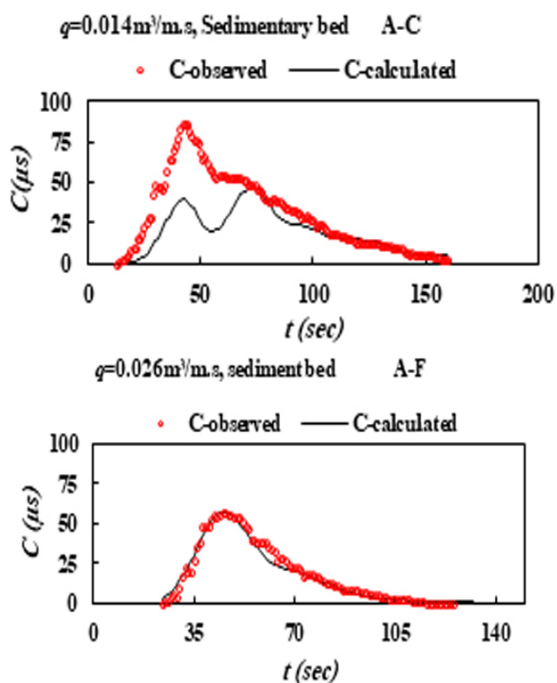


Fig. 3. Comparison of observed concentration and calculated concentration for different discharge and sections

5. Conclusions

River restoration and ecosystem preservation are important aspects of environmental conservation. This study investigated one of the effective parameters on the self-purification capacity of rivers, that is, the longitudinal dispersion coefficient, by measuring the concentration of pollutants in different flow rates and sediment types. Increasing the flow rate resulted in a decrease in the parameter C_r (relative difference between input and output concentrations) by 43-100% and an increase in the parameter T_{pr} (relative time difference to maximum concentration) by 5-41% in the initial section and up to 13% in the final section, while the parameter T_{dr} (relative time difference between two measurement points) decreased by 14-47% in different sections, and the coefficient of variation D_L increased by 9-38% in different sections; changing the material of bed, from solid to sediment also led to a decrease in C_r by 23-93% and a decrease in T_{pr} by up to 32%, while T_{dr} increased by 7-59% in different sections. Comparing the results for two different bed conditions, solid and sediment, showed that changing the bed material from solid to sediment resulted in variations in the parameters C_r and D_L , with an increase in their values; overall, the sediment bed performed better in improving mixing parameters, but the effect of bed material was more significant in shorter intervals due to increased mixing parameters.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۵، صفحه: ۶۶-۸۸

تأثیر تغییرات ناهمواری بستر بر پارامترهای اختلاط آلاینده‌ها در پیچان رود

سمانه نجومی سیاهمرد^۱، مهدی مفتاح هلقی^{۲*}، مهدی اسمعیلی ورکی^۳، امیر احمد دهقانی^۴، عبدالرضا ظهیری^۴

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

(نویسنده مسئول) mefthahalaghi@gmail.com

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی

و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پذیرش ۱۴۰۲/۹/۶

(دریافت ۱۴۰۲/۷/۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

نجومی سیاهمرد، س.، مفتاح هلقی، م.، اسمعیلی ورکی، م.، دهقانی، ا.ا.، ظهیری، ع.، ۲۰۲۰، ۱۴۰۲، "تأثیر تغییرات ناهمواری بستر بر پارامترهای اختلاط آلاینده‌ها در پیچان رود" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۵)، ۶۶-۸۸. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.412853.3368>

چکیده

درک فرایند پخش، انتقال و اختلاط آلاینده‌ها، از موضوعات مهم در پایش کیفی منابع آبی به‌ویژه رودخانه‌ها است. ضریب پراکندگی طولی، یکی از پارامترهای مهم برای پیش‌بینی و توصیف فرایند اختلاط و انتقال آلودگی در رودخانه‌ها است. در این پژوهش، فرایند انتقال و اختلاط آلاینده‌ها در پیچان رودها به روش آزمایشگاهی بررسی شد. برای این منظور آزمایش‌های سنجش غلظت ردیاب در یک فلوم آزمایشگاهی که به شکل پیچان رود و متشکل از ۸ قوس بود، برای شرایط هیدرولیکی مختلف و با دو بستر صلب و رسوبی انجام شد. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و روش روندیابی، برای بازه‌های مختلف از مسیر پیچان رود، ضریب پراکندگی طولی برآورد شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای هر دو بستر نشان داد که با افزایش دبی، سرعت انتقال ردیاب افزایش و زمان انتقال ردیاب کاهش یافته است که به دنبال آن مقدار اختلاف بیشینه غلظت ورودی و خروجی از بازه (Cr) در محدوده ۲۱ تا ۱۰۰ درصد، کاهش یافت. نتایج حاکی از آن بود که با ناهموار شدن بستر جریان، مؤلفه‌های اختلاط مثل Cr و ضریب اختلاط طولی (D_L) افزایش قابل توجهی پیدا می‌کنند. در شرایط مذکور کمترین مقدار پارامترهای Cr و D_L به ترتیب با ۱۰۰ و ۸۵ درصد افزایش مقدار حاصل شد. همچنین بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش طول مسیر پیمایش ردیاب و تعداد قوس‌ها، پارامترهای اختلاط افزایش یافتند. مقایسه نتایج نشان داد که برای هر دو بستر صلب و رسوبی، در هر بازه با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب اختلاط طولی افزایش یافتند.

واژه‌های کلیدی: اختلاط، آزمایش ردیاب، ضریب اختلاط طولی، پیچان رود، بستر صلب، بستر رسوبی



۱- مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت و توسعه شهری، صنعتی و کشاورزی، رودخانه‌ها به محیطی برای تخلیه پساب صنعتی و فاضلاب‌های شهری و روستایی و زهاب‌های کشاورزی تبدیل شده‌اند. با ورود بیش از حد سموم و آلاینده‌ها به این منبع آبی، شاهد مشکلات محیط‌زیستی فراوانی در این اکوسیستم آبی هستیم. از این رو کاهش و رفع آلودگی وارد شده به رودخانه‌ها به چالشی مهم تبدیل شده است. درک فرایند اختلاط در رودخانه‌ها و آبراه‌ها، یکی از مراحل ضروری کنترل آلودگی در منابع آبی است. بنابراین برای بازیابی و امکان استفاده مجدد از آبهای آلوده، شناخت فرایندهای اختلاط و رقیق‌سازی آلودگی ضروری است (Yeberehpour et al., 2019).

آلاینده‌ها بر اثر عواملی مانند حرکت مولکولی، آشفتگی و توزیع غیریکنواختی سرعت، در کل مقطع جریان توزیع می‌شوند (Kianersi and Shafai Bagestan, 2018). با ورود آلاینده به جریان آبراه، ابتدا مومنتوم اولیه و شناوری، باعث رقیق‌سازی آلاینده می‌شود. پس از رقیق شدن آلاینده، اثرات مومنتوم اولیه و شناوری نیز کاهش می‌یابند و زمانی که آلاینده در حال پخش شدن در عرض مقطع است، آشفتگی و جریان‌های ثانویه ناشی از آن باعث اختلاط می‌شوند. هنگامی که آلاینده‌ها کاملاً در سراسر عرض آبراه مخلوط شدند، جریان‌های برشی طولی باعث محو کامل تغییرات طولی غلظت در آبراه می‌شوند و غلظت در تمامی سطح مقطع به مقدار ثابت رسیده و اختلاط کامل انجام خواهد شد (Fischer et al., 1979).

یکی از پارامترهای مهم برای توصیف انتقال آلودگی در آبراه‌ها و رودخانه‌ها، ضریب پراکندگی طولی است. از این رو، برآورد این ضریب حائز اهمیت است. این ضریب را می‌توان از روش‌هایی مانند انتگرال‌گیری، آزمایش‌های ردیابی و روابط تجربی به دست آورد. در طی سال‌های گذشته پژوهشگران با استفاده از معادله یک‌بعدی انتشار-انتقال و حل این معادله از روش‌های عددی و تحلیلی، انتقال آلاینده‌ها را در کانال‌ها و آبراه‌ها توسعه و شبیه‌سازی کرده‌اند.

فیشر و همکاران در سال ۱۹۷۹، روش روندیابی را که اغلب برای پیش‌بینی سیلاب در هیدرولوژی استفاده می‌شود، برای محاسبه ضریب پراکندگی طولی به مدل یک‌بعدی اختلاط تعمیم داد. ایشان نیم‌رخ زمانی غلظت را در دو نقطه، در پایین‌دست محل

تزیق ردیاب اندازه‌گیری کرد و سپس با استفاده از تقریب ابر ردیاب، منحنی تغییرات زمانی غلظت را در نقطه دوم محاسبه و با مقایسه منحنی تغییرات زمانی غلظت اندازه‌گیری و محاسبه شده، مقدار ضریب پراکندگی طولی (D_L) را برآورد کرد (Fischer et al., 1979). برای برآورد نیم‌رخ زمانی غلظت در نقطه دوم معادله ۱ ارائه شد

$$(1) \quad c(x_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Uc(x_1, \tau)}{\sqrt{4\pi D(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}} \exp\left\{-\frac{[U(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau)]^2}{4D(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right\} d\tau$$

که در آن

$c(x_2, t)$ غلظت محاسبه شده در مقطع پایین‌دست (x_2)، $c(x_1, \tau)$ غلظت مشاهده شده در مقطع بالادست (x_1)، U متوسط سرعت انتقال ردیاب که از معادله ۲ به دست می‌آید، t زمان، \bar{t}_1 متوسط زمان عبور ابر ردیاب از مقطع بالادست، \bar{t}_2 متوسط زمان عبور ابر ردیاب از مقطع پایین‌دست و D ضریب پراکندگی است

$$(2) \quad U = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

که در آن

$x_2 - x_1$ ، فاصله دو مقطع اندازه‌گیری از یکدیگر در بازه مورد مطالعه است.

باکسل و گایمر در سال ۲۰۰۷، با استفاده از روش روندیابی، معادله یک‌بعدی انتشار-انتقال را حل و مقدار ضریب پخش طولی (D_L) به دست آمده از این روش را بهینه کردند. آنها دریافتند که ضرایب به دست آمده با توجه به طول قوس، هندسه کانال و دبی جریان متفاوت هستند (Boxall and Guymer, 2007).

بیک و سئو در سال ۲۰۱۰، روش روندیابی ارائه شده توسط فیشر و همکاران را توسعه دادند و برای برآورد هم‌زمان ضریب پخش طولی و عرضی، روش روندیابی دوبعدی را پیشنهاد دادند (Baek and Seo, 2010).

والیس و همکاران در سال ۲۰۱۴، در پژوهش خود مدل ارائه شده توسط فیشر و همکاران (Fischer et al., 1979) را با روش ارائه شده توسط سینک و بیک (Singh and Beck, 2003) مقایسه کردند و دریافتند که نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده توسط



هم پوشانی بهتری با ضرایب مشاهده شده دارد (Madvar et al., 2020).

شین و همکاران در سال ۲۰۲۰، در پژوهش خود با استفاده از داده‌های سرعت و غلظت به دست آمده از آزمایش ردیاب در مدل پیچان رودی بزرگ مقیاس، ضرایب طولی و عرضی را در معادله انتشار - انتقال محاسبه کردند. مقایسه ضرایب محاسبه شده از روش‌های مبتنی بر سرعت و روش روندیابی نشان داد که ضرایب طولی حاصل از روش روندیابی چندین مرتبه بزرگتر از روش مبتنی بر سرعت است. ولی ضرایب عرضی به دست آمده از هر دو روش، هم پوشانی خوبی با یکدیگر دارند (Shin et al., 2020).

میرناصری و همکاران در سال ۲۰۲۱، به منظور بررسی کارایی معادله انتقال - پراکنش در شبیه‌سازی جابه‌جایی آلاینده در رودخانه‌های شنی با بستر خیزاب و چالاب، آزمایش‌های ردیابی را در فلومی آزمایشگاهی با شیب طولی ثابت برای سه دبی و چهار فرم بستر مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که در حالت بدون شکل بستر، به دنبال افزایش دبی جریان، ضریب پراکندگی طولی نیز افزایش می‌یابد، در حالی که در حضور شکل بستر عکس این روند اتفاق می‌افتاد. آنها اظهار داشتند که تغییرات عدد رینولدز و ضریب پراکندگی طولی مستقیم است. همچنین به دنبال افزایش طول موج شکل بستر، ضریب پراکندگی طولی نیز با افزایش مقدار حاصل می‌شود (Mirnaseri et al., 2021).

همان طور که بیان شد، ضریب پراکندگی طولی یکی از پارامترهای شناخته شده در انتقال یک بعدی آلودگی در آبراهه‌ها است. از این رو، اولین قدم برای حل مسائل مربوط به پراکندگی و اختلاط آلاینده، شناسایی ضرایب پراکندگی است. بررسی سوابق پژوهش‌های انجام شده نشان داد که می‌توان با دقت قابل قبول ضریب پراکندگی را با آزمایش‌های ردیاب اندازه‌گیری کرد. از آنجا که تاکنون پژوهشی در خصوص اثر ناهمواری بستر در پیچان رودها بر فرایند انتقال و اختلاط آلاینده‌ها در آبراهه‌ها انجام نشده است، در این پژوهش، تغییرات مولفه‌های اختلاط در بستر صلب و رسوبی در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی شد. به این منظور، برای شرایط هیدرولیکی مختلف، به کمک آزمایش‌های ردیابی پارامترهای اختلاط در کانال پیچان رودی بررسی شد و سپس با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، ضریب اختلاط طولی از روش

سینک و بیک هم پوشانی بهتری با داده‌های واقعی دارد (Wallis et al., 2014).

سئو و همکاران در سال ۲۰۱۶، با استفاده از آزمایش‌های ردیاب، ضرایب پخش عرضی و طولی را از روش روندیابی برآورد کردند. نتایج آنها نشان داد که این ضرایب با افزایش نسبت سرعت جریان به سرعت برشی (u/u^*) و نسبت عرض به ارتفاع جریان (W/h) افزایش می‌یابند. همچنین آنها دریافتند که برخلاف ضریب پخش عرضی، انحنای جریان بر ضریب پخش طولی تأثیر ندارد (Seo et al., 2016).

پارک و سئو در سال ۲۰۱۸، با استفاده از محاسبات گام به گام که شامل انتقال عرضی و اختلاط عمودی بود، ضرایب پراکندگی عرضی و طولی را برای کانال‌های پیچان رودی بررسی کردند. مقایسه نتایج نشان داد که استفاده از روش مذکور نسبت به روش قانون فیک (Fischer et al., 1979)، هم پوشانی بهتری با نمودار غلظت دارد (Park and Seo, 2018).

آژدان و همکاران در سال ۲۰۱۸، انتقال آلاینده را در فلوم آزمایشگاهی با بستر رسوبی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های ردیاب نشان داد که در شیب طولی و دبی ثابت، با افزایش فاصله از محل تزریق، ضریب پراکندگی طولی افزایش می‌یابد. همچنین آنها اظهار کردند که در شیب ثابت، رابطه تغییرات دبی و ضریب پراکندگی طولی مستقیم است. همچنین، برای دبی ثابت با افزایش شیب بستر، ضریب پراکندگی طولی کاهش می‌یابد (Azhdan et al., 2018).

پارک و آن در سال ۲۰۱۹، الگوی جریان و اختلاط را در پیچان رودها بررسی کردند. آنها در پژوهش خود از روش مبتنی بر سرعت و روش ردیاب استفاده کردند. آزمایش‌های ردیاب نشان دادند که ابر ردیاب به دنبال خط بیشینه سرعت پراکنده می‌شود و حداکثر سرعت نیز، صرف نظر از شرایط جریان، در کوتاه‌ترین مسیر کانال اتفاق می‌افتد (Park and Ahn, 2019).

مدوار و همکاران در سال ۲۰۲۰، با استفاده از پارامترهای ورودی عمق جریان، عرض آبراهه، سرعت متوسط جریان و سرعت برشی، دو معادله صریح برای پیش‌بینی ضریب انتشار طولی را ارائه دادند و با مقایسه معادلات خود با معادلات پژوهشگران دریافتند که معادله آنها، دقیق‌تر و پایدارتر بوده و



با ۸ قوس ایجاد شد. در شکل ۱ طرح کلی فلوم آزمایشگاهی و مسیر پیچان‌رودی نشان داده شده است.

برای تأمین جریان، از پمپ سانتریفیوژ مجهز به دستگاه تنظیم دور موتور استفاده شد. جریان از مخزن پایین دست به مخزن بالادست پمپاژ شده و پس از عبور از حوضچه آرام‌کننده، وارد فلوم شد. به منظور کاهش تلاطم جریان از صفحه‌های آرام‌کننده در ورودی فلوم و ابتدای مسیر پیچان‌رودی استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج التراسونیک با دقت ± 0.1 لیتر بر ثانیه استفاده شد. همچنین اندازه‌گیری عمق جریان با استفاده از دو عمق‌سنج که بر روی ارابه متحرک نصب شده و دارای قابلیت جابه‌جایی در سه جهت بودند، انجام شد.

به منظور انجام آزمایش‌های ردیاب، با توجه به پژوهش‌های انجام شده در سوابق پژوهشی، از محلول آب و نمک (NaCl) به‌عنوان ماده ردیاب استفاده شد (Peruzzi et al., 2021). (Mansouri Kargar et al., 2021) از مزیت‌های محلول آب و نمک نسبت به محلول‌های دیگر برای ردیابی می‌توان به سهولت اندازه‌گیری غلظت و همچنین دسترسی ساده و کم هزینه‌تر آن اشاره کرد.

سیستم تزریق متشکل از مخزن اولیه برای تهیه محلول، پمپ سانتریفیوژ، مخزن تأمین هد ثابت ثانویه، شیلنگ و اتصالات مربوطه برای تزریق بود. محل تزریق ردیاب پس از انجام آزمایش‌های اولیه در ورودی دومین قوس انتخاب شد تا اثرات ناشی از نوسان‌های ورودی حداقل شود. در تمامی آزمایش‌ها، مدت‌زمان آزادسازی ردیاب ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. پس از تزریق ردیاب، در دو نقطه در پایین دست محل تزریق، شوری جریان به کمک دو دستگاه شوری‌سنج ساخت شرکت YSI، اندازه‌گیری شد. در شکل ۲ تصویری از دستگاه‌ها آمده است. اندازه‌گیری غلظت جریان به صورت پیوسته قبل از ورود ابر ردیاب به نقطه اندازه‌گیری تا زمانی که ابر ردیاب از نقطه اندازه‌گیری خارج شد، انجام شد.

در هر آزمایش، برای دو نقطه در پایین دست محل آزادسازی ردیاب، یکی در ورودی بازه مورد آزمایش و دیگری در پایین دست بازه مورد آزمایش، غلظت جریان توسط دو دستگاه شوری‌سنج به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شد. برای این منظور،

روندیابی برای بازه‌هایی با طول‌هایی مختلف برآورد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

اختلاط در آبراهه‌های طبیعی متأثر از عوامل متعددی است که شامل چهار دسته: (۱) پارامترهای سیال، (۲) پارامترهای هیدرولیکی جریان، (۳) پارامترهای هندسی آبراهه و قوس و (۴) پارامترهای آلاینده هستند که می‌توان آنها را به صورت معادله ۳ نوشت

$$\text{Mixing} = f(\rho, \mu, g, V, h, W, f, R, S, C) \quad (3)$$

که در آن

ρ چگالی جریان، μ لزجت، g شتاب گرانش، V متوسط سرعت جریان، h عمق جریان، W عرض آبراهه، f ضریب مقاومت جریان، R شعاع قوس، S ضریب پیچان‌رودی و C غلظت آلاینده است. با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، از معادله ۳ معادله بی‌بعد ۴ حاصل می‌شود

$$\text{Mixing} = f(S, f, C, \mu/\rho Vh, hg/V^2, W/h, R/h) \quad (4)$$

با ساده‌سازی معادله ۴، خواهیم داشت

$$\text{Mixing} = f(S, f, C, W/h, R/h, Re, Fr) \quad (5)$$

که در آن

Re و Fr به ترتیب نشان‌دهنده عدد رینولدز و عدد فرود است. در این پژوهش، از معادله ۵ به‌عنوان معادله پایه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی به طول ۱۶، عرض ۱/۵ و عمق ۱ متر انجام شد. برای مدل‌سازی پیچان‌رود در داخل این فلوم، با استفاده از ورق‌های فلزی مسیر پیچان‌رودی به طول ۱۵/۵ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر



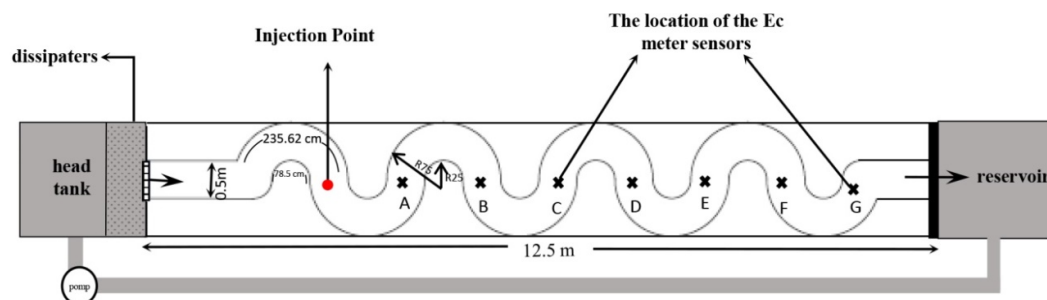


Fig. 1. Scheme of experimental flume and meandering channel

شکل ۱- طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی و کانال پیچان رود

آزمایش‌های ردیابی انجام شد. در هر دو بستر صلب و رسوبی، آزمایش‌ها برای ۶ بازه با طول‌ها و تعداد قوس‌های متفاوت (شکل ۲) انجام شد. در هر آزمایش غلظت محلول تزریق شده در ابتدا و انتهای آن توسط دو شوری‌سنج اندازه‌گیری شد. در هر اندازه‌گیری، سنسور شوری‌سنج در حد وسط عرضی و عمقی نصب و از غلظت جریان چند ثانیه قبل از شروع تزریق و ورود ابر ردیاب تا چند ثانیه پس از خروج ابر ردیاب و رسیدن به مقدار اولیه غلظت شوری، اندازه‌گیری به عمل آمد.

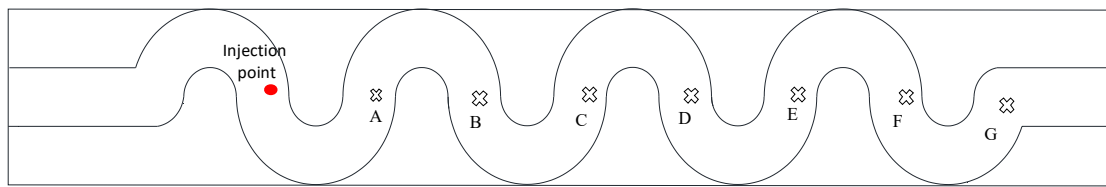
در این پژوهش، به منظور بررسی مولفه‌های اختلاط در آبراهه پیچان‌رودی، در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شد. در جدول ۱ دامنه پارامترهای هیدرولیکی آزمایش شده در این پژوهش نشان داده شده است.

از چند ثانیه قبل از شروع آزادسازی ردیاب در جریان، فیلم‌برداری از نمایشگر دستگاه شوری‌سنج آغاز و تا زمانی که به نمایشگر غلظت اولیه را نشان دهد، ادامه پیدا کرد. سپس با بازبینی فیلم‌ها، غلظت مربوط به هر ثانیه در هر کدام از نقاط اندازه‌گیری، استخراج و ثبت شد.

به منظور شبیه‌سازی بستر رسوبی، ماسه معدنی به قطر ۲/۵ میلی‌متر تهیه و در سراسر طول پیچان‌رود به ارتفاع ۰/۱۴ متر قرار داده شد. در شکل ۳ مسیر پیچان‌رود پس از ایجاد بستر، نشان داده شده است.

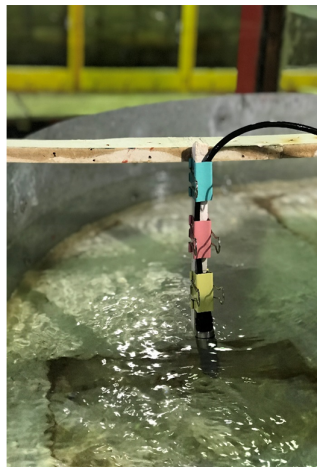
برای هر آزمایش، ابتدا دبی جریان تنظیم و سپس با مانور دریچه انتهایی، عمق مورد نظر تنظیم شد. در آزمایش‌های بستر رسوبی، پس از اطمینان از تثبیت آب‌شستگی و تعادل در بستر،





the length of measurement sections
 Distance of the Injection point to A= 2.38m
 $L_{A-B} = 3.17$ m
 $L_{A-C} = 5.42$ m
 $L_{A-D} = 6.22$ m
 $L_{A-E} = 8.82$ m
 $L_{A-F} = 9.38$ m
 $L_{A-G} = 11.32$ m

(A)



(B)



Fig. 2. A) The location of the Ec meter sensors and the length of measurement sections and B) Scheme of Ec-meter and its sensor's location in the meandering

شکل ۲- A) موقعیت قرارگیری حسگر شوری سنج‌ها و طول بازه‌های اندازه‌گیری و B) تصویری از دستگاه شوری سنج و نحوه قرارگیری حسگر دستگاه



Fig. 3. View of bed morphology at bend of meandering channel

شکل ۳- تصویری از ریخت‌شناسی بستر پیچان رود



جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی برای مطالعه مولفه‌های اختلاط

Table 1. Range of Hydraulic parameters of experiment for mixing parameters

Re	Fr	q (m ³ /m.s)	V (m/s)	h (m)	R/h	W/h
52000	0.185	0.026	0.26	0.1	7.5	5
44000	0.157	0.022	0.22			
36000	0.128	0.018	0.18			
28000	0.099	0.014	0.14			

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای هیدرولیکی و جنس بستر بر

تغییرات غلظت ردیاب

برای بررسی ویژگی‌های اختلاط ردیاب، در هر آزمایش دو نمودار غلظت ورودی به بازه مورد مطالعه و غلظت خروجی از بازه مورد مطالعه نسبت به زمان ترسیم شد. شکل‌های ۴ و ۵، مقایسه منحنی تغییرات زمانی غلظت ورودی و خروجی بازه‌های مختلف برای دو بستر صلب و رسوبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش فاصله نقاط اندازه‌گیری و در نتیجه اعمال سیکل‌های بیشتری از اختلاط عرضی در قوس‌ها و نیز طول طی شده ردیاب تزریق شده، نقطه اوج منحنی زمانی غلظت خروجی اختلاف بیشتری نسبت به ورودی پیدا می‌کند.

بررسی نتایج نشان داد که در تمامی اندازه‌گیری‌ها برای دبی‌های واحد عرض مختلف، منحنی تغییرات زمانی غلظت ورودی، نوسان‌های زیادی دارد که در آزمایش‌های پارک و سئو (Park and Seo, 2018) و شین و همکاران (Shin et al., 2020) نیز گزارش شده است. ولی با افزایش مسیر پیمایش محلول ردیاب تزریق شده در طول پیچان‌رود به دلایل مختلفی از جمله: تله‌اندازی مواد ردیاب در مناطق ذخیره موقت در قوس داخلی، اثرات توسعه عرضی جریان ناشی از جریان‌های ثانویه در قوس‌ها و افزایش اختلاط طولی، به تدریج منحنی‌های غلظت ردیاب خروجی دارای نوسان کمتری می‌شود. مقایسه نتایج حاکی از آن است که با تغییر بستر جریان از صلب به رسوبی، مدت‌زمان برگشت منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت، طولانی‌تر می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که ناهمواری بستر و وقوع چاله‌های آب‌شستگی در قوس‌ها ناشی از گردابه‌های حاصل از جریان حلزونی، بخشی از ابر ردیاب را در درون خود به تله انداخته و به تدریج رها می‌سازد. این موضوع باعث به تأخیر افتادن خروج کامل ابر آلودگی یا ردیاب از قوس‌ها می‌شود.

به‌منظور بررسی اثر پارامترهای هیدرولیکی و جنس بستر بر تغییرات غلظت ردیاب، اختلاف بیشینه غلظت ثبت شده در منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت ورودی و خروجی تعیین و به کمک معادله ۶ بی‌بعد شد. همچنین در منحنی تغییر زمانی، برای دو نیم‌رخ زمانی غلظت، اختلاف زمان رسیدن غلظت‌ها به مقدار بیشینه با معادله ۷ و اختلاف زمان خروج ابر ردیاب از نقاط اندازه‌گیری پایین دست و بالادست در هر آزمایش به کمک معادله ۸ بی‌بعد شد

$$C_{r} = \frac{C_{\max_u} - C_{\max_o}}{C_{\max_o}} \quad (6)$$

$$T_{pr} = \frac{T_{\max_o} - T_{\max_u}}{T_{\max_o}} \quad (7)$$

$$T_{dr} = \frac{T_{\max_o} - T_{\max_u}}{T_{\max_o}} \quad (8)$$

در معادله ۶، C_{\max_u} بیانگر بیشترین غلظت اندازه‌گیری شده در نیم‌رخ غلظت ورودی به بازه اندازه‌گیری و C_{\max_o} برابر با بیشترین مقدار غلظت اندازه‌گیری شده در نیم‌رخ غلظت خروجی در بازه اندازه‌گیری مورد آزمایش است. همچنین پارامتری بی‌بعد است که نشانگر اختلاف غلظت ورودی و خروجی از بازه اندازه‌گیری است. T_{\max_o} و T_{\max_u} در معادله ۷ به ترتیب نشان‌دهنده زمان رسیدن نیم‌رخ زمانی غلظت به بیشینه غلظت در نقطه اندازه‌گیری پایین دست و بالادست است. در معادله ۸، T_{\max_o} نشان‌دهنده مدت‌زمان خروج ابر ردیاب از نقطه خروجی (پایین دست بازه) و T_{\max_u} نشان‌دهنده مدت‌زمان خروج ابر ردیاب از نقطه اندازه‌گیری در بالادست بازه مورد آزمایش است. T_{pr} و T_{dr} به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف زمان نسبی خروج ابر ردیاب از دو نقطه اندازه‌گیری و اختلاف زمان نسبی رسیدن به بیشینه غلظت در دو نقطه اندازه‌گیری است.



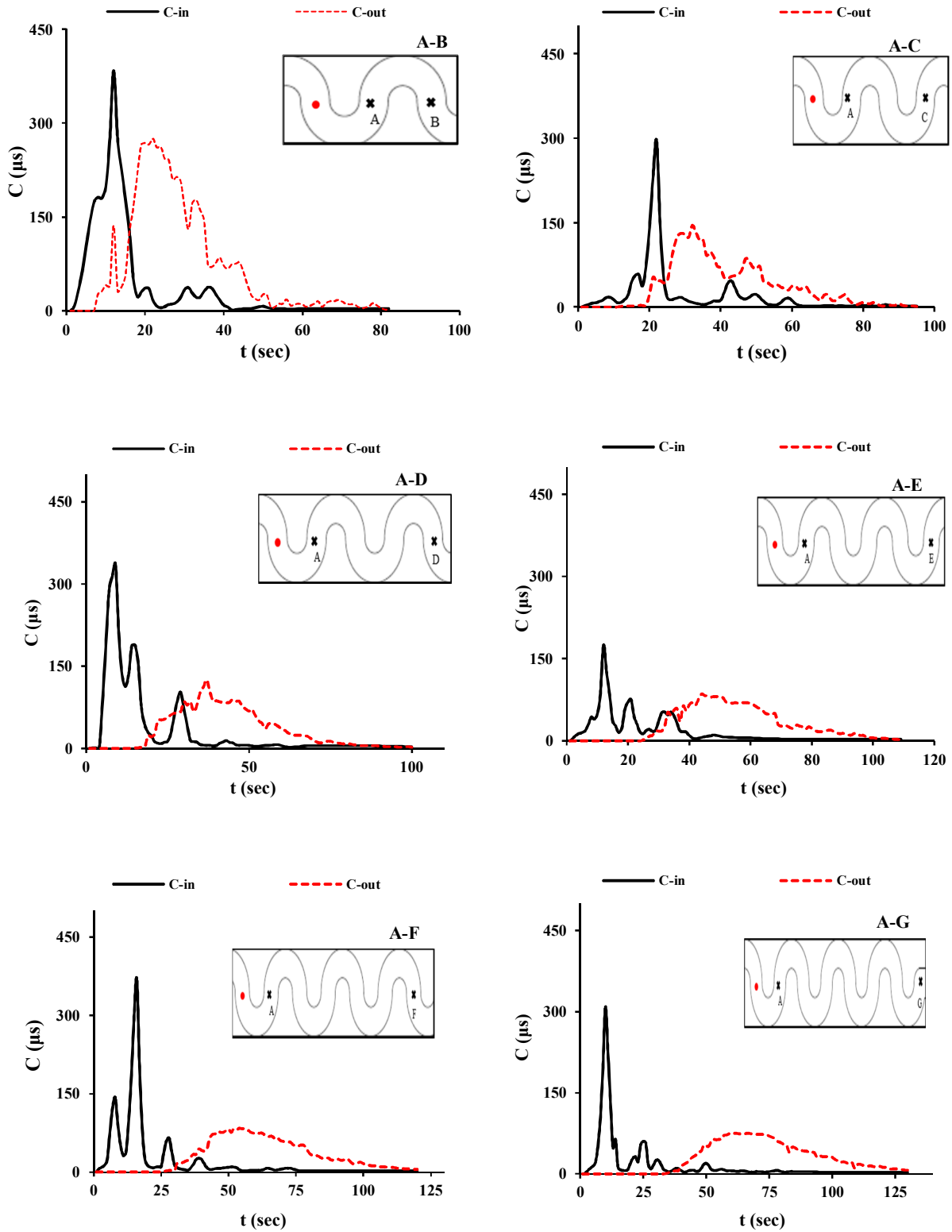


Fig. 4. Temporal concentration profiles of E_c for different locations in solid bed for $q=0.018\text{m}^3/\text{m.s}$

شکل ۴- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در موقعیت‌های مختلف برای دبی $0.018\text{m}^3/\text{m.s}$ در شرایط بستر صلب



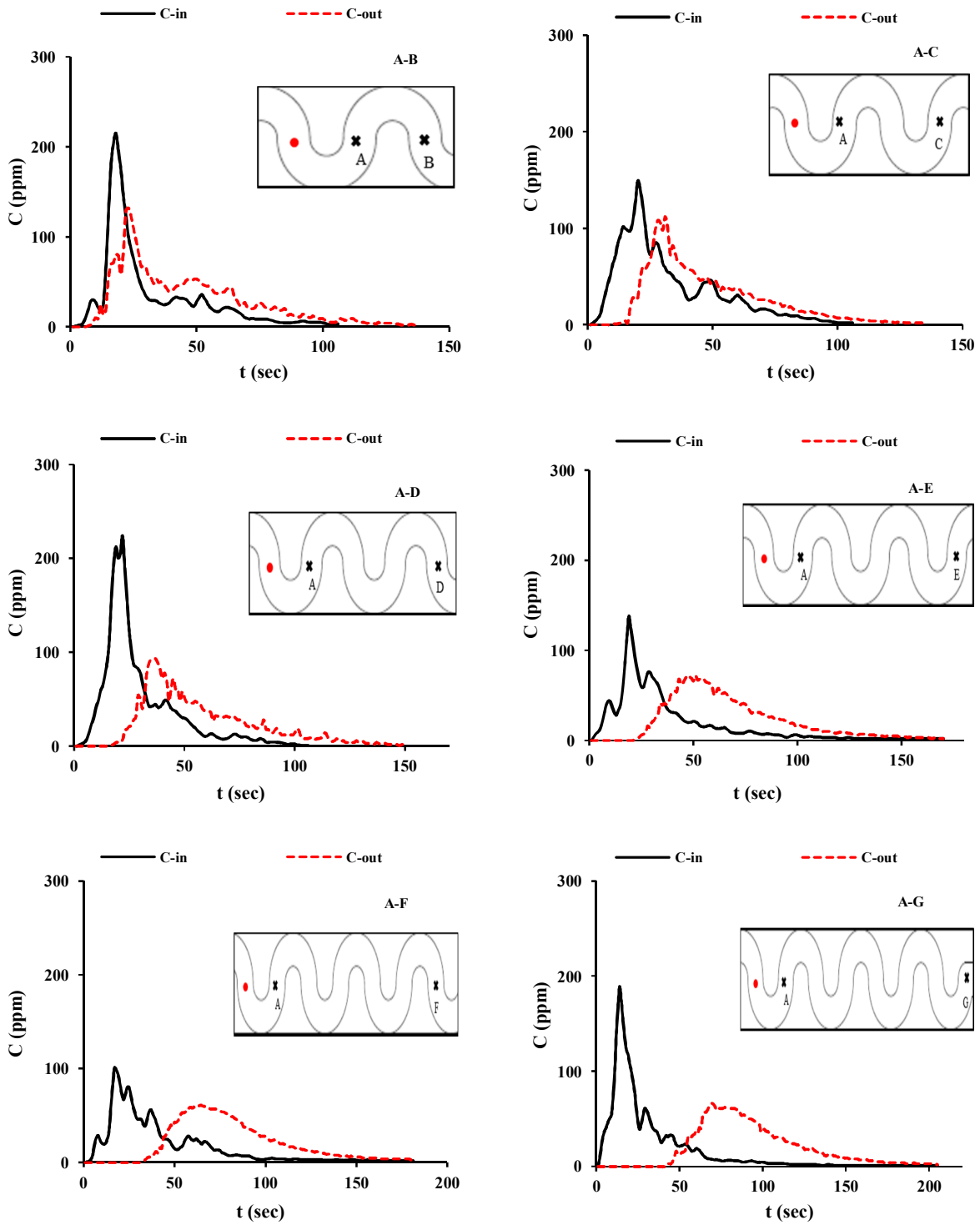


Fig. 5. Temporal concentration profiles of *Ec* for different locations in sedimentary bed for $q=0.018\text{m}^3/\text{m.s}$

شکل ۵- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در موقعیت‌های مختلف برای دبی $0.018\text{m}^3/\text{m.s}$ در شرایط بستر رسوبی



مقایسه با مقدار این پارامتر در دبی‌های کمتر، مقدار بیشتری دارد و در نتیجه اختلاف Cr در مقایسه با دبی‌های کمتر، کوچکتر به‌دست آمده است.

مقایسه مقدار T_{pr} نشان داد که در بازه‌های A-B، A-C، A-D و A-F سیر نزولی و در بازه‌های A-E و A-G سیر صعودی دارد. بیشترین مقدار به‌دست آمده برای T_{pr} برابر با $0/836$ برای دبی $0/312$ در بازه A-G و کمترین مقدار برابر با $0/217$ در بازه‌های مختلف کاهش یافته و محدوده تغییرات این پارامتر از $0/217$ تا $0/732$ حاصل شد.

مقایسه نتایج حاصله در بستر رسوبی حاکی از آن است که با افزایش دبی جریان از $0/14$ به $0/26$ $m^3/m.s$ ،

نتایج آزمایش‌ها در قالب شکل ۶ و جدول ۲ آمده است. در شکل ۶ مقدار محاسبه شده T_{pr} ، Cr و U که از معادله ۲ به‌دست آمده، در موقعیت‌های مختلف اندازه‌گیری برای بستر صلب و رسوبی و در جدول ۲ علاوه بر پارامترهای بیان شده، مقدار T_{dr} نیز نشان داده شده است.

بررسی نتایج برای آزمایش‌ها در بستر صلب نشان داد که با افزایش دبی واحد عرض از $0/14$ به $0/26$ $m^3/m.s$ در بازه‌های مختلف، مقدار Cr کاهش می‌یابد. با افزایش دبی و به‌دنبال آن افزایش سرعت و تلاطم جریان، ردیاب با سرعت بیشتری در عرض آبراهه پخش شده و نمودار نیم‌رخ زمانی غلظت در نقطه اندازه‌گیری اول دارای چولگی کمتری است. بنابراین با همگن شدن ردیاب و جریان، غلظت ثبت شده در نقطه اندازه‌گیری اول در

جدول ۲- مقایسه مقدار Cr به‌دست آمده برای دبی‌های متفاوت در بازه‌های مختلف در دو بستر صلب و رسوبی

Table 2. Value of calculated Cr for different discharge and sections for solid and sedimentary bed

Section name	q ($m^3/m.s$)	Solid bed				Sedimentary bed			
		Cr	T_{pr}	T_{dr}	U (m/s)	Cr	T_{pr}	T_{dr}	U (m/s)
A-B	0.014	0.105	0.5862	0.4028	0.049	0.457	0.1667	0.0909	0.132
	0.018	0.284	0.4545	0.3086	0.099	0.386	0.2174	0.1603	0.158
	0.022	0.349	0.5200	0.4103	0.158	0.452	-0.375	0.1913	0.263
	0.026	0.000	0.3478	0.2174	0.099	0.093	0.0000	0.1604	0.263
A-C	0.014	0.552	0.6000	0.4845	0.190	0.034	0.6190	0.2739	0.112
	0.018	0.510	0.3125	0.2174	0.276	0.248	0.3548	0.1417	0.276
	0.022	0.412	0.3913	0.2317	0.253	0.497	0.3077	0.1756	0.337
	0.026	0.231	0.4138	0.4143	0.253	0.500	0.1304	0.1881	0.608
A-D	0.014	0.338	0.6939	0.4720	0.120	0.648	0.5763	0.2167	0.132
	0.018	0.628	0.7568	0.3700	0.137	0.585	0.3889	0.3133	0.240
	0.022	0.562	0.5333	0.3953	0.183	0.653	0.4138	0.1783	0.226
	0.026	0.192	0.5714	0.3774	0.202	0.369	0.6471	0.2941	0.175
A-E	0.014	0.597	0.6481	0.6015	0.170	0.562	0.6792	0.1856	0.179
	0.018	0.509	0.7273	0.3271	0.201	0.478	0.5957	0.2622	0.230
	0.022	0.221	0.7500	0.4592	0.215	0.548	0.6190	0.2857	0.239
	0.026	0.083	0.7838	0.4675	0.257	0.012	0.6222	0.3022	0.230
A-F	0.014	0.685	0.6912	0.6258	0.170	0.689	0.7059	0.3046	0.146
	0.018	0.773	0.7037	0.4370	0.235	0.396	0.7258	0.2333	0.152
	0.022	0.552	0.8235	0.3866	0.223	0.714	0.6600	0.3012	0.271
	0.026	0.268	0.6512	0.4205	0.298	0.513	0.6667	0.1552	0.298
A-G	0.014	0.263	0.5747	0.7320	0.150	0.733	0.8372	0.3160	0.122
	0.018	0.757	0.8361	0.5039	0.172	0.651	0.7971	0.4208	0.160
	0.022	0.662	0.6800	0.4444	0.223	0.366	0.6094	0.4645	0.208
	0.026	0.291	0.7021	0.5072	0.271	0.563	0.6964	0.4357	0.218



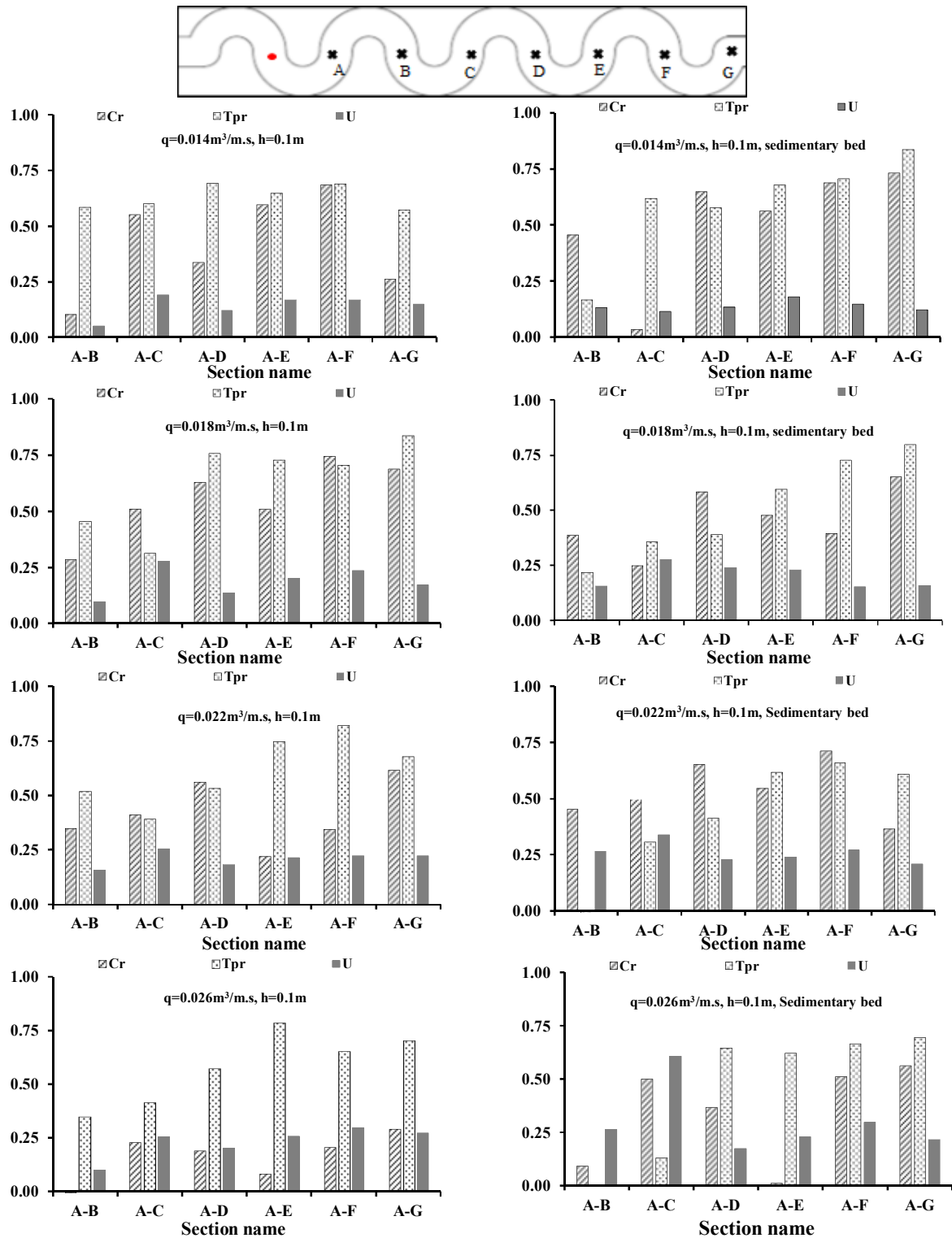


Fig. 6. Cr, Tr and U values calculated in different section and discharges in solid and sedimentary beds

شکل ۶- مقدار Cr, Tr و U به دست آمده در بازه‌های مختلف برای دبی‌های مختلف در بستر صلب و بستر رسوبی



پارامتر Cr به غیر از بازه A-C در بقیه بازه‌ها با کاهش مقدار همراه است. متوسط مقدار به دست آمده برای این پارامتر برابر با $0/464$ بود. بررسی تغییرات T_{pr} نشان داد که با افزایش دبی این پارامتر در بازه‌های A-C، A-D، A-F، A-G و کاهش و در بازه‌های A-B و A-E افزایش دارد. دامنه تغییرات این پارامتر در محدوده $0/37$ تا $0/83$ حاصل شد.

بررسی نتایج نشان داد که مقدار T_{dr} نیز با افزایش دبی واحد عرض از $0/14$ به $0/26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ در تمامی بازه‌ها، به جز بازه A-C، از $0/09$ به $0/54$ افزایش پیدا می‌کند. همان طور که اشاره شد، افزایش زمان خروج ابر ردیاب در بازه‌های مورد آزمایش برای بستر رسوبی نشان‌دهنده انباشت و ذخیره مواد ردیاب در چاله‌های آب‌سستگی است که به طور تدریجی آزاد می‌شوند و منجر به طولانی تر شدن زمان خروج ابر ردیاب از بازه و اتمام آزمایش می‌شود.

برای بررسی تأثیر مسافت طی شده جریان حامل ردیاب بر پارامترهای اختلاط و مقایسه پارامترها در بازه‌های مختلف (A-B تا A-G)، پارامتر بی بعد نسبت طول طی شده توسط جریان حامل ردیاب به عمق جریان با عنوان فاصله نسبی در نظر گرفته شد. بررسی تأثیر تغییر مسافت طی شده بر پارامترهای اختلاط حاکی از آن است که در بازه A-D پارامترهای Cr، T_{pr} و T_{dr} برای بستر صلب، نسبت به کوتاه‌ترین بازه یعنی بازه A-B، در تمامی موارد، به جز پارامتر T_{dr} که در دبی $0/22 \text{ m}^3/\text{m.s}$ به طور تقریبی با ۴ درصد کاهش همراه بود، افزایش پیدا کرد، به طوری که برای دبی‌های مختلف با ۳۰ برابر شدن فاصله نسبی (فاصله مقطع $3/17$ تا $6/22$)، پارامتر Cr بین ۳۷ تا ۱۰۰ درصد، T_{pr} تا ۴۰ درصد و پارامتر T_{dr} تا ۴۳ درصد افزایش پیدا کرد.

نتایج بررسی‌های به عمل آمده برای بستر رسوبی نشان داد که با افزایش مسافت طی شده و فاصله نسبی، به طور متوسط مقدار Cr برای دبی‌های مختلف با ۴۰ درصد افزایش و مقدار T_{pr} برای تمامی دبی‌ها به طور متوسط با ۵۰ درصد افزایش همراه بود. همچنین دامنه افزایش مقدار T_{dr} برای دبی $0/14$ تا $0/26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، با ۵۷ درصد حاصل شد.

مقایسه اثر افزایش فاصله نسبی بین کوتاه‌ترین بازه (A-B) و طولانی‌ترین بازه (A-G)، که فاصله‌ای به مقدار ۸۲ برابر عمق جریان را شامل می‌شود، حاکی از آن است برای بستر صلب مقدار

مقایسه نتایج برای دو بستر صلب و رسوبی نشان داد که با تغییر جنس بستر از صلب به رسوبی در آزمایش‌های مربوط به کمترین دبی ($0/14 \text{ m}^3/\text{m.s}$) مقدار Cr برای مقاطع A-D، A-B، A-F و A-G افزایش و در مقطع A-C کاهش داشته‌اند. دامنه تغییرات مقدار T_{pr} بین $0/26$ تا $0/42$ بود و بیشترین تغییر مربوط به بازه A-B با ۷۲ درصد کاهش نسبت به مقدار به دست آمده در بستر صلب بود. مقدار T_{dr} به دست آمده از بستر رسوبی در مقایسه با بستر صلب، در تمامی بازه‌ها سیر نزولی داشت و بیشترین تغییر مربوط به بازه A-B با ۷۷ درصد کاهش بود.

نتایج حاکی از آن است که با تغییر جنس بستر از بستر صلب به رسوبی در بالاترین دبی ($0/26 \text{ m}^3/\text{m.s}$) مقدار Cr در مقطع A-B با ۱۰۰ درصد، در مقطع میانی (A-D) با ۴۷ درصد و در طولانی‌ترین مقطع (A-G) با ۳ درصد افزایش همراه بوده است. پارامتر T_{pr} در بازه ابتدایی (A-B) ۱۰۰ درصد کاهش، در بازه میانی (A-D) با ۱۰ درصد افزایش و در بازه A-G تغییر محسوسی پیدا نکرد. همچنین بررسی پارامتر T_{dr} نشان داد که با ایجاد ناهمواری در بستر این پارامتر در بازه‌های ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب با ۲۳، ۵ و ۱۴ درصد کاهش همراه بود.

در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با تغییر جنس بستر از صلب به بستر رسوبی، اختلاف غلظت اندازه‌گیری شده (Cr) در هر یک از بازه‌ها افزایش یافت. از طرف دیگر، پارامترهای مربوط به

مجله آب و فاضلاب
دوره ۳۴، شماره ۵، سال ۱۴۰۲

مختلف مانند فیشر و همکاران (Fischer et al., 1979)، باکسل و گایمر (Boxall and Guymer, 2007)، سینک و بیک (Singh and Beck, 2003) و پارک و آن (Park and Ahn, 2019)، روش روندیابی و استفاده از آزمایش‌های ردیاب، یکی از روش‌های برآورد ضریب اختلاط طولی (D_L) است. در این پژوهش نیز برای برآورد ضریب اختلاط طولی، از روش روندیابی که روابط آن توسط فیشر و همکاران ارائه شده است (معادلات ۱ و ۲) استفاده شد (Fischer et al., 1979). در این روش با در اختیار داشتن منحنی تغییرات زمانی غلظت در دو مقطع ابتدا و انتهای بازه، برای شرایط هیدرولیکی مختلف، با استفاده از معادله ۱، غلظت خروجی از مقطع پایین دست بازه برآورد شده و سپس با مقایسه آن با منحنی تغییرات زمانی غلظت خروجی مشاهده شده، مقدار D_L برآورد می‌شود. در شکل ۷ مقایسه نیم‌رخ‌های غلظت مشاهده و برآورد شده در مقاطع مختلف برای شرایط هیدرولیکی مختلف نشان داده شده است. نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهند که مقدار غلظت مشاهده شده و مقدار محاسبه شده از روش روندیابی، هم‌پوشانی تقریباً خوبی دارند. شکل ۸ مقدار سرعت انتقال ردیاب (U) و ضریب پخشیدگی طولی (D_L) به دست آمده از روش روندیابی (معادلات ۱ و ۲) در هر مقطع برای دبی‌های مختلف در دو حالت بستر صلب و رسوبی را نشان می‌دهد.

با تجزیه و تحلیل نتایج می‌توان دریافت که مقدار ضریب پخشیدگی با مقدار سرعت انتقال ردیاب نسبت مستقیم دارند و با افزایش سرعت، ضرایب نیز افزایش می‌یابند. برای نمونه در آزمایش‌ها با دبی واحد عرض $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ در بستر صلب، مقدار پارامتر U در بازه A-G نسبت به مقدار آن در بازه A-B، ۶۷ درصد افزایش یافته که در نتیجه آن مقدار ضریب اختلاط طولی (D_L) نیز از 0.01 به $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت. همچنین در آزمایش‌ها با دبی $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ در بستر صلب، مقدار پارامتر U در بازه A-C نسبت به مقدار آن در بازه A-B، ۶۰ درصد افزایش یافته که در نتیجه آن ضریب اختلاط طولی (D_L) از 0.03 به $0.24 \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش پیدا کرد.

با تغییر بستر از صلب به رسوبی در دبی $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ برای بازه A-G، پارامترهای U و D_L به ترتیب با ۷ و ۳۰ درصد نسبت به بازه A-B کاهش پیدا کرد. با افزایش دبی جریان به $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ در بازه A-B، U در بازه A-B، ۶۲ درصد افزایش یافته و در نتیجه آن

سنجش زمان (T_{pr} و T_{dr}) با کاهش مقدار همراه بود. همان طور که بیان شد به دلیل وجود چاله‌های آب‌شستگی و تله‌اندازی مواد ردیاب در این چاله‌ها و همچنین افت و خیز بیشتر جریان در بستر رسوبی، سرعت زمان عبور ردیاب از بازه مورد آزمایش کاهش می‌یابد و زمان بیشتری طول می‌کشد تا ابر ردیاب از محدوده نقاط اندازه‌گیری شوری خارج شود، به عبارت دیگر در بستر رسوبی زمان عبور ابر ردیاب از هر یک از نقاط اندازه‌گیری، نسبت به بستر صلب طولانی‌تر می‌شود.

بررسی مقدار سرعت انتقال ردیاب (U) در آزمایش‌های مختلف نشان داد که برای هر دو جنس بستر صلب و رسوبی، با افزایش دبی، U نیز افزایش می‌یابد. با افزایش دبی از 0.14 به $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ در بستر صلب متوسط مقدار این پارامتر در بازه‌های مختلف با ۳۸ درصد و در بستر رسوبی با ۴۵ درصد افزایش همراه بوده است.

مقایسه سرعت انتقال ردیاب نشان داد که با تغییر جنس بستر از صلب به رسوبی و ایجاد ناهمواری در بستر، به دلیل شرایط متفاوت جریان در بستر رسوبی در بازه‌های مختلف، برای دبی‌های متفاوت گاهی با افزایش و گاهی با کاهش مقدار همراه است. برای نمونه مقدار این پارامتر برای دبی $0.18 \text{ m}^3/\text{m.s}$ در بازه A-B، A-D و A-E به ترتیب ۳۷، ۴۲ و ۱۲ درصد افزایش، در بازه A-F و A-G به ترتیب ۳۵ و ۶ درصد کاهش یافت و در بازه A-C سرعت انتقال ردیاب در دو بستر صلب و رسوبی با یکدیگر تقریباً برابر بود. به طور کلی با ایجاد ناهمواری در بستر، متوسط مقدار پارامتر U ، ۱۱ درصد افزایش پیدا کرد.

مقایسه نتایج به دست آمده از کوتاه‌ترین (A-B) و طولانی‌ترین (A-G) بازه برای بستر صلب، حاکی از آن است که با افزایش طول بازه آزمایش در کمترین دبی، مقدار پارامتر U ، ۶۷ درصد و در بیشترین دبی مقدار این پارامتر، ۶۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین برای بستر رسوبی نیز با افزایش مسافت پیمایش جریان حامل ردیاب، سرعت انتقال ردیاب در دبی $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، ۷ درصد و در دبی $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، ۱۷ درصد کاهش یافت.

۲-۳- بررسی اثر پارامترهای هیدرولیکی و جنس بستر بر تغییرات ضریب اختلاط طولی

مبنی بر سوابق پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران



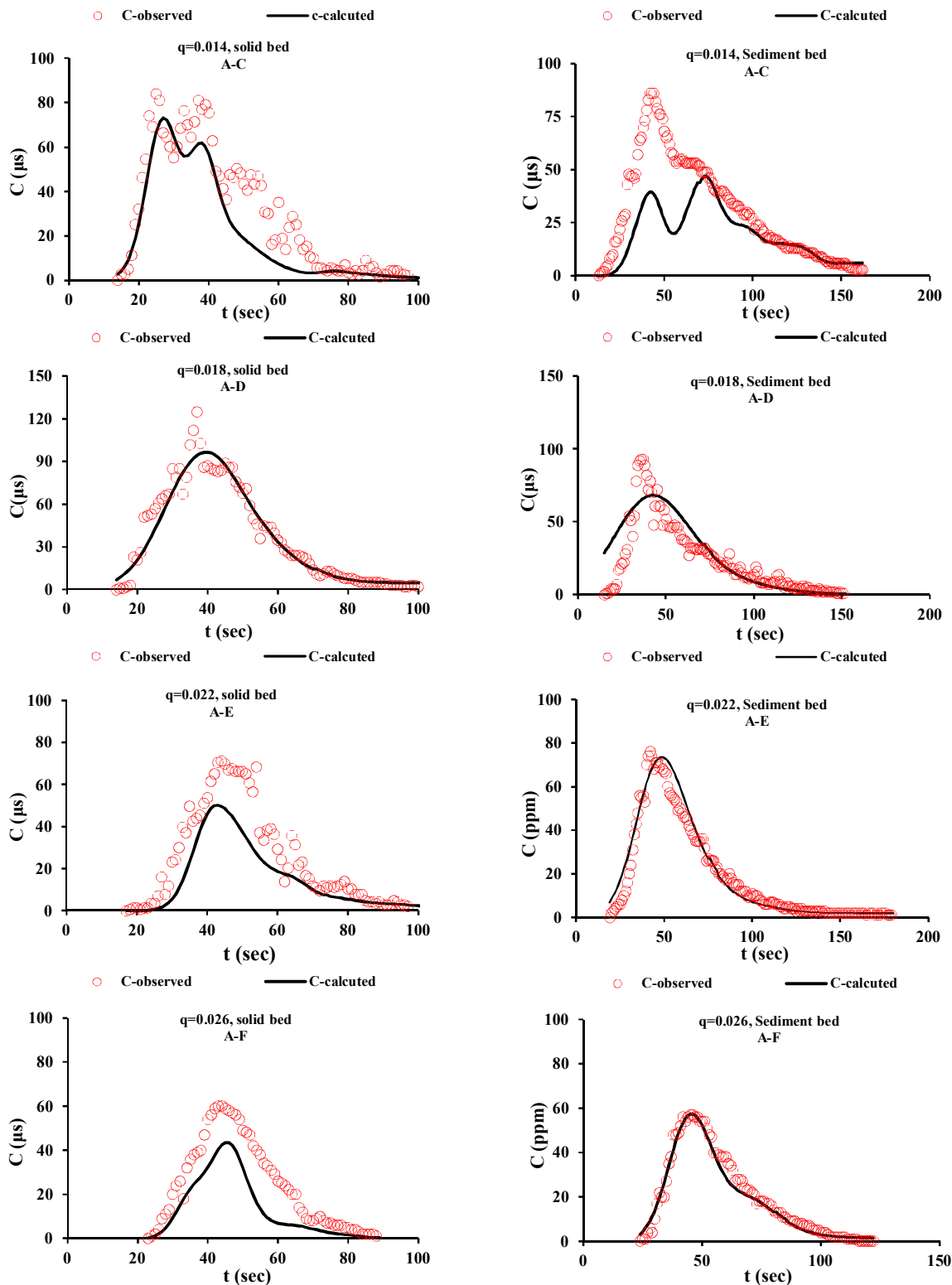


Fig. 7. Comparison of observed concentration and calculated concentration for different discharge and sections
 شکل ۷- مقایسه غلظت مشاهده و محاسبه شده برای مقاطع و دبی‌های مختلف



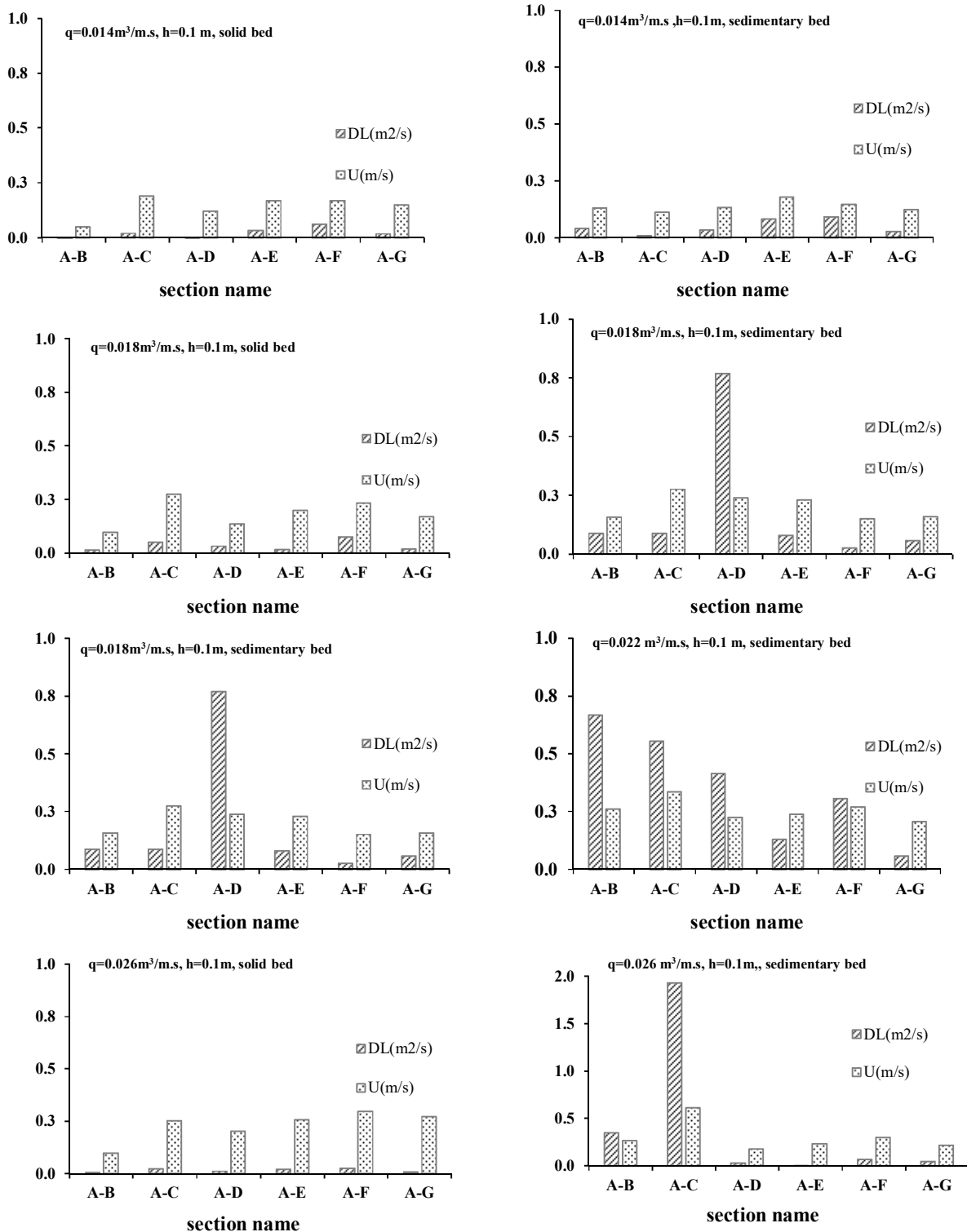


Fig. 8. Comparison of longitudinal mixing coefficient and velocity of transfer tracer for different discharge with two types of solid and sediment beds at different sections

شکل ۸- مقایسه ضرایب اختلاط طولی و سرعت انتقال ردیاب برای بازه‌ها و دبی‌های مختلف با دو بستر رسوبی و صلب



بزرگتر باشد، میزان اختلاط بیشتر و طول اختلاط کامل کوتاه‌تر می‌شود. بنابراین بستر رسوبی برای فرایند اختلاط عملکرد بهتری دارد.

عدد رینولدز (Re) که معرف آشفتگی جریان است، می‌تواند در تفسیر فرایند اختلاط موثر واقع شود. مقدار محاسبه شده برای ضریب اختلاط (D_L) و عدد رینولدز (Re) در دو بستر صلب و رسوبی برای هر بازه در جدول ۳ آمده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده برای بازه A-B نشان داد که با افزایش دبی، عدد رینولدز افزایش می‌یابد، به طوری که در بازه A-B عدد رینولدز برای دبی $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ برای بستر صلب و رسوبی به ترتیب برابر با 14107 و 37619 به دست آمد. با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر ($0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$) این ضریب در بازه A-B برای دو بستر صلب و رسوبی به ترتیب برابر با 28214 و 75238 حاصل شد.

همچنین نتایج نشان می‌دهند مقدار عدد رینولدز در اغلب آزمایش‌ها برای بستر رسوبی، بیشتر از مقدار این پارامتر در بستر صلب به دست آمد. به عنوان نمونه در دبی $0.18 \text{ m}^3/\text{m.s}$ با تغییر بستر از صلب به رسوبی، عدد رینولدز در بازه A-B، 37 درصد، در بازه A-D، 49 درصد و در بازه A-E، 12 درصد افزایش داشت و در بازه‌های A-F و A-G به ترتیب با 35 و 8 درصد کاهش یافته و در بازه A-C تغییر چندانی نداشت. در شرایط بستر رسوبی، عمق جریان به دلیل وقوع چاله‌های آب‌شستگی متفاوت بوده و در نتیجه در برخی از مقاطع، به دلیل افزایش عمق جریان عدد رینولدز کاهش پیدا می‌کند.

بررسی ارتباط تغییرات D_L حاصل شده نسبت به عدددهای رینولدز در آزمایش‌ها حاکی از آن است که در هر بازه به دنبال افزایش عدد رینولدز و به تبع آن افزایش میزان آشفتگی، مقدار D_L بیشتر شد. در بازه A-C، با تغییر جنس بستر از صلب به رسوبی، برای دبی $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ با کاهش 40 درصدی عدد رینولدز، D_L نیز 60 درصد کاهش یافت. برای دبی $0.18 \text{ m}^3/\text{m.s}$ با ثابت بودن مقدار Re ، مقدار D_L 40 درصد افزایش یافت. همچنین برای دبی $0.22 \text{ m}^3/\text{m.s}$ با افزایش Re به میزان 25 درصد، D_L نیز 38 درصد افزایش پیدا می‌کند و با افزایش دبی جریان به $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، با افزایش 47 درصدی عدد رینولدز، مقدار D_L ، 98 درصد افزایش یافت.

مقدار پارامتر D_L از 0.03 به $0.346 \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر پیدا کرد. بررسی نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی واحد عرض از کمترین مقدار ($0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$) به بیشترین مقدار ($0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$) برای آزمایش‌ها با بستر صلب، مقدار D_L در بازه A-B، 73 درصد، بازه A-C، 22 درصد و بازه A-D، 69 درصد افزایش می‌یابد. همچنین به دنبال افزایش دبی واحد عرض از کمترین مقدار به بیشترین مقدار، با افزایش فاصله طولی، پارامتر D_L در بازه A-E، 35 درصد، بازه A-F، 59 درصد و بازه A-G، 58 درصد کاهش پیدا کرد.

مقایسه نتایج نشان داد که با تغییر جنس بستر از صلب به رسوبی، با افزایش دبی از $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ به $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، پارامتر D_L در بازه‌های A-B، A-C و A-G به ترتیب با 88 ، 99 و 36 درصد افزایش و در بازه‌های A-D با 2 درصد، A-E با 86 درصد و A-F با 29 درصد کاهش همراه بود.

بررسی نتایج برای آزمایش‌ها با شرایط بستر صلب نشان داد که با افزایش فاصله از محل تزریق ردیاب به 30 برابر عمق جریان (مقطع A-D)، مقدار D_L در دبی $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، 74 درصد افزایش یافته و با 82 برابر شدن فاصله نسبت به عمق جریان (مقطع A-G)، مقدار D_L ، 93 درصد افزایش پیدا کرد. با بیشتر شدن دبی جریان به $0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، مقدار D_L در بازه A-G، 42 درصد بزرگتر از مقدار این پارامتر در بازه A-B حاصل شد.

نتایج آزمایش‌ها در بستر رسوبی نشان داد که برای دبی جریان $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، با 30 برابر شدن فاصله طولی نسبت به عمق جریان، مقدار پارامتر D_L با 15 درصد کاهش و با 82 برابر شدن فاصله نسبی مقدار این پارامتر با 30 درصد کاهش همراه بوده است. با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر ($0.26 \text{ m}^3/\text{m.s}$)، با افزایش 30 برابری فاصله نسبی، D_L به میزان 90 درصد کاهش و با افزایش 82 برابری فاصله نسبی، D_L ، 87 درصد کاهش پیدا کرد.

مقایسه نتایج نشان داد که با تغییر جنس بستر رسوبی از صلب به رسوبی ضرایب اختلاط ردیاب افزایش پیدا می‌کند. در آزمایش‌های مربوط به دبی $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، در بازه A-B با تغییر بستر از صلب به رسوبی مقدار D_L با افزایش 75 درصدی همراه بود. در طولانی‌ترین بازه (A-G) نیز با ایجاد ناهم‌آوری در بستر مقدار D_L ، 40 درصد بزرگتر به دست آمد. هر چه ضریب اختلاط



جدول ۳- مقدار D_L و Re به دست آمده در بازه‌های مختلف برای دبی‌های مختلف در بستر صلب و رسوبی

Table 3. D_L and Re values in different sections and discharge with solid bed and sedimentary bed

Section name	q ($m^3/m.s$)	Solid bed		Sedimentary bed	
		D_L (m^2/s)	Re	D_L (m^2/s)	Re
A-B	0.014	0.001	14107	0.039	37619
	0.018	0.014	28214	0.089	45142
	0.022	0.059	45142	0.669	75238
	0.026	0.003	28214	0.346	75238
A-C	0.014	0.018	54285	0.007	32169
	0.018	0.051	78961	0.088	78961
	0.022	0.034	72380	0.556	96507
	0.026	0.024	72380	1.929	173714
A-D	0.014	0.004	34285	0.033	37832
	0.018	0.034	39183	0.770	68571
	0.022	0.019	52244	0.415	64537
	0.026	0.012	57744	0.032	49870
A-E	0.014	0.032	48571	0.082	51111
	0.018	0.017	57500	0.079	65714
	0.022	0.017	61333	0.131	68148
	0.026	0.020	73600	0.011	65714
A-F	0.014	0.062	48571	0.092	41666
	0.018	0.078	67218	0.026	43478
	0.022	0.029	63857	0.308	77402
	0.026	0.025	85142	0.065	85142
A-G	0.014	0.016	42857	0.027	34990
	0.018	0.019	49120	0.058	45612
	0.022	0.053	63857	0.059	59401
	0.026	0.006	77402	0.043	62299

۴- نتیجه‌گیری

معرف اختلاف زمان نسبی رسیدن به بیشینه غلظت در دو نقطه اندازه‌گیری در بازه‌های ابتدایی، روند کاهشی بین ۵ تا ۴۱ درصد و بازه‌های انتهایی تا ۱۳ درصد افزایش داشته است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی مقدار T_{df} (اختلاف زمان نسبی خروج ابر ردیاب از دو نقطه اندازه‌گیری) نیز در بازه‌های مختلف بین ۱۴ تا ۴۷ درصد کاهش یافت. بررسی نتایج نشان داد که به‌طور متوسط مقدار ضریب اختلاط (D_L) در طول بازه‌های مختلف به ترتیب ۳۸ و ۹ درصد افزایش یافته است.

مقایسه نتایج حاکی از آن است که با تغییر جنس مصالح بستر از صلب به رسوبی، با افزایش دبی واحد عرض از کمترین به بیشترین مقدار، پارامتر Cr در اغلب بازه‌ها با کاهش مقدار بین ۲۳

احیای رودخانه‌ها و حفظ اکوسیستم آن از مباحث مهم حفاظت از محیط‌زیست است. برای بررسی توان خودپالایی رودخانه‌ها، شناخت ضرایب اختلاط، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، ورود آلاینده به پیچان رودها، به‌وسیله آزمایش‌های ردیاب برای دو نوع بستر صلب و رسوبی برای دبی‌های مختلف در طول ۶ بازه مسیر پیچان‌رود، اندازه‌گیری و بررسی شد.

مقایسه نتایج آزمایش‌ها با دبی‌های مختلف نشان داد که با افزایش دبی از کمترین به بیشترین مقدار، در بستر صلب پارامتر Cr که معرف اختلاف نسبی غلظت ورودی و خروجی از بازه اندازه‌گیری است، در غالب بازه‌های مسیر پیچان‌رودی با کاهش ۴۳ تا ۱۰۰ درصد همراه بود. در شرایط مذکور پارامتر T_{pr} به‌عنوان



مقدار همراه بود. بررسی نتایج حاکی از آن است که با تغییر جنس بستر، پارامترهای Cr و D_L افزایش پیدا کرد. بنابراین می‌توان بیان کرد که به‌طور کلی بستر رسوبی عملکرد بهتری در بهبود پارامترهای اختلاط دارد، اما با توجه به افزایش هم‌زمان پارامترهای اختلاط در بازه‌های ابتدایی تأثیر جنس بستر در بازه‌های کوتاه‌تر بیشتر است.

۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش، از گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان به‌دلیل همکاری‌های لازم و همچنین در اختیار قرار دادن آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی و تجهیزات آزمایشگاهی، کمال تشکر را دارند.

تا ۹۳ درصد همراه بود. همچنین برای همین شرایط پارامتر T_{Pr} در غالب بازه‌ها تا ۳۲ درصد کاهش یافته و پارامتر T_{dr} نیز در بازه‌های مختلف بین ۷ تا ۵۹ درصد افزایش یافته است. مقایسه نتایج برای دو حالت بستر صلب و رسوبی نشان داد که با تغییر جنس بستر از صلب به رسوبی در دبی‌ها و بازه‌های متفاوت، پارامترهای Cr در محدوده از صفر تا $0/773$ به $0/012$ تا $0/733$ و پارامتر D_L از $0/001$ تا $0/078$ به $0/007$ تا $1/929$ تغییر یافت.

همچنین با تغییر جنس بستر و ایجاد ناهمواری ناشی از فرسایش در بستر رسوبی، در کمترین دبی پارامتر T_{Pr} در بازه‌های ابتدایی با کاهش مقدار و در بازه‌های طولانی‌تر با افزایش مقدار حاصل شد. با افزایش دبی پارامتر مذکور در غالب بازه‌ها با کاهش

References

- Azhdan, Y., Emadi, A. R., Chabokpour, J. & Daneshfaraz, R. 2018. Experimental and numerical study of advection- dispersion of pollutant in a Gravel Bed Rivers. *Water and Soil Science*, 28, 127-139. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.244186.667776>.
- Baek, K. O. & Seo, I. W. 2010. Routing procedures for observed dispersion coefficients in two-dimensional river mixing. *Advances in Water Resources*, 33, 1551-1559. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.005>.
- Boxall, J. & Guymer, I. 2007. Longitudinal mixing in meandering channels: new experimental data set and verification of a predictive technique. *Water Research*, 41, 341-354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.10.010>.
- Fischer, H. B. Imberger, J., John List, E., Koh, R. C. Y. & Brooks, N. H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, London, UK.
- Kianersi N. & Shafai Bagestan, M. 2018. Variation of transverse mixing pollutants in a straight channel with and without submerged vanes. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19, 101-114. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/idser.2018.115506.1256>.
- Madvar, H. R., Dehghani, M., Memarzadeh, R., Salwana, E., Mosavi, A. & Shahab, S. 2020. Derivation of optimized equations for estimation of dispersion coefficient in natural streams using hybridized ANN with PSO and CSO algorithms. *IEEE Access*, 8, 156582-156599. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019362>.
- Mansouri Kargar, S., Shafai Bejestan, M. & Zayeri, M. 2021. Experimental study of the effect of rectangular weir and u-weir on contaminants' transverse mixing coefficient and mixing length. *Iran-Water Resources Research*, 17, 290-301. (In Persian)
- Mirnaseri, M., Emadi, A., Zahiri, A. & Gholami Sefidkouhi, M. A. 2021. Laboratory and numerical investigation of the effect of riffle-pool bed-form areas on pollution transmission in Gravel-Bed Rivers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52, 1025-1040. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.315188.668831>.





- Park, I. & Seo, I. W. 2018. Modeling non-Fickian pollutant mixing in open channel flows using two-dimensional particle dispersion model. *Advances in Water Resources*, 111, 105-120. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.035>.
- Park, S. W. & Ahn, J. 2019. Experimental and numerical investigations of primary flow patterns and mixing in laboratory meandering channel. *Smart Water*, 4, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40713-019-0016-y>.
- Peruzzi, C., Galli, A., Chiaradia, E. A. & Masseroni, D. 2021. Evaluating longitudinal dispersion of scalars in rural channels of agro-urban environments. *Environmental Fluid Mechanics*, 21, 925-954. <https://doi.org/10.1007/s10652-021-09804-7>.
- Seo, I. W., Choi, H. J., Kim, Y. D. & Han, E. J. 2016. Analysis of two-dimensional mixing in natural streams based on transient tracer tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142, 04016020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001118).
- Shin, J., Seo, I. W. & Baek, D. 2020. Longitudinal and transverse dispersion coefficients of 2D contaminant transport model for mixing analysis in open channels. *Journal of Hydrology*, 583, 124302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124302>.
- Singh, S. K. & Beck, M. 2003. Dispersion coefficient of streams from tracer experiment data. *Journal of Environmental Engineering*, 129, 539-546. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2003\)129:6\(539\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:6(539)).
- Wallis, S., Bonardi, D. & Silavwe, D. 2014. Solute transport routing in a small stream. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 1894-1907. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.863425>.
- Yeberehpour, E., Shafai Bagestan, M. & Kashefiour, S. M. 2019. Investigation of transverse distribution of pollutant and flow pattern in the present of triangular vane in the straight channels. *Ferdowsi Civil Engineering*, 32, 17-34. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/civil.v32i3.70258>.
- Zhang, W. 2011. A 2-D numerical simulation study on longitudinal solute transport and longitudinal dispersion coefficient. *Water Resources Research*, 47. <https://doi.org/10.1029/2010WR010206>.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

