

Laboratory study of the effect of the bendway weirs on pollutant mixing parameters in a laboratory meandering river with a rigid bed

Extended Abstract

Objective

Pollutant transport and mixing in meandering waterways are governed by the combined effects of hydraulic conditions, channel geometry, and flow structure. Bendway weirs, which are commonly used for riverbank protection and erosion control, may also influence tracer transport and dispersion by modifying the flow structure. Previous studies suggest that such modifications may be associated with changes in velocity heterogeneity, secondary currents, recirculation, and local turbulence. However, the combined effects of bendway weir arrangement and relative spacing on tracer transport behavior and longitudinal dispersion in rigid-bed meandering channels have received comparatively limited attention. Therefore, this study aimed to investigate the effects of different bendway weir arrangements on tracer transport behavior and longitudinal dispersion in a laboratory meandering channel with a rigid bed under different hydraulic conditions.

Methods

The experiments were conducted in the Hydraulic and Physical Modeling Laboratory of the Department of Water Engineering at the University of Guilan. The experimental facility consisted of a 16-m-long, 1.5-m-wide, and 1-m-deep recirculating flume. An eight-bend meandering channel, 15.5 m long and 0.5 m wide, was constructed inside the flume using metal sheets and had a rigid bed. A sodium chloride (NaCl) solution was used as a tracer and injected for 15 s in each experimental condition. Tracer concentration was monitored using two YSI electrical conductivity meters installed at the upstream and downstream measurement sections of each investigated reach. Concentration was recorded continuously from the arrival of the tracer cloud until its complete passage.

Four bendway weir arrangements were examined and compared with a no-weir control condition (W_{R0-0}). W_{R1-1} consisted of weirs installed on both sides of the channel at a relative spacing of 2.5 and a 0.3-m distance between successive weirs. W_{R1-0} consisted of weirs installed along the inner bank at a relative spacing of 2.5. W_{R2-2} consisted of weirs installed on both sides of the channel at a relative spacing of 5 and a 0.6-m distance between successive weirs. W_{R3-3} consisted of symmetrically installed weirs on both sides of the channel at a relative spacing of 1.7 and a 0.2-m distance between successive weirs. Relative spacing was defined as the ratio of the distance between successive weirs to weir length. A total of 330 experimental conditions were tested, combining five structural conditions, six investigated reaches, and 11 hydraulic conditions. The unit discharge ranged from 0.014 to 0.050 $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$, and flow depth was 0.10 or 0.20 m.

Tracer transport behavior was quantified using three parameters derived from concentration–time curves measured at the upstream and downstream sections: Cr , T_{pr} , and T_{dr} . Cr represents the peak concentration reduction ratio between the two sections, with higher values indicating a greater reduction in the downstream peak concentration. T_{pr} represents the difference in the time to reach peak concentration between the two sections, whereas T_{dr} represents the difference in tracer-cloud exit time between the upstream and downstream sections. Tracer transport velocity (U) and the effective longitudinal dispersion coefficient (D_L) were also estimated. The latter was determined using the routing method proposed by Fischer (1968), by matching the calculated downstream concentration–time curve to the measured curve.

Results

The results demonstrated that unit discharge, flow depth, relative weir spacing, and transport distance influenced tracer transport and dispersion. Under the no-weir condition, increasing the unit discharge from 0.014 to 0.050 $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ generally reduced Cr , T_{pr} , and T_{dr} while increasing U and D_L . Under these conditions, U and D_L increased by up to 86% and 97%, respectively. In the W_{R1-1} arrangement at a flow depth of 0.20 m, increasing the unit discharge reduced Cr , T_{pr} , and T_{dr} by 40–64%, up to 57%, and up to 67%, respectively, while substantially increasing U and D_L . Reducing flow depth from 0.20 to 0.10 m also generally decreased Cr , T_{pr} , and T_{dr} and increased U and D_L . For W_{R1-1} , the maximum reductions in T_{pr} , Cr , and T_{dr} were 65%, 83%, and 83%, respectively, whereas U and D_L increased by up to 73% and 91%, respectively.

For W_{R1-0} , a 50% reduction in flow depth generally decreased Cr and T_{pr} while increasing U , T_{dr} , and D_L . The maximum changes were reductions of 72% and 35% in Cr and T_{pr} , respectively, and increases of 44%, 51%, and 95% in U , T_{dr} , and D_L , respectively. In W_{R2-2} , increasing the unit discharge reduced T_{pr} , Cr , and T_{dr} by 5–97%, 6–76%, and 21–56%, respectively, whereas U and D_L increased approximately ninefold and fourteenfold, respectively. In W_{R3-3} , increasing the unit discharge reduced Cr and T_{pr} by up to 69% and 48%, respectively, while U and D_L increased approximately threefold and eightfold, respectively. Reducing the flow depth in W_{R3-3} resulted in reductions of up to 88%, 28%, and 24% in T_{pr} , Cr , and T_{dr} , respectively, while U and D_L increased by up to 56% and 88%, respectively.

Comparison of the investigated weir arrangements with the no-weir condition showed that the effects of bendway weirs on D_L and tracer peak concentration varied with hydraulic conditions, weir arrangement, and investigated reach length, with increases in D_L observed under many of the tested conditions. The contrasting response of U to weir installation at the two flow depths indicates that the observed changes in D_L cannot be attributed solely to changes in mean tracer transport velocity. Changes in flow structure and velocity heterogeneity may have contributed to the observed dispersion behavior; based on previous studies, secondary currents, recirculation, local turbulence, and momentum exchange may also provide plausible hydrodynamic mechanisms.

The Cr results further indicated that the response to bendway weir installation was governed not only by the presence of the structures but also by their arrangement and relative spacing. Greater relative spacing was accompanied by higher D_L under most conditions; however, changes in relative spacing were also associated with changes in effective transport distance in the present experimental design. Concentration–time curves generally became broader downstream, indicating progressive development of dispersion along the flow path. The effects of the weirs on T_{pr} and T_{dr} varied with hydraulic conditions and arrangement. In particular, the response of T_{dr} in WR_{1-0} differed from that of the other arrangements. Because recirculation and secondary currents were not directly measured, their role is interpreted only as a plausible hydrodynamic explanation consistent with previous studies.

Conclusion

The experimental results indicate that bendway weirs can modify tracer transport and effective longitudinal dispersion in rigid-bed meandering channels. Increasing the unit discharge and reducing the flow depth generally increased tracer transport velocity and D_L , whereas the response of the concentration- and time-based parameters depended on the hydraulic and structural conditions. The effect of bendway weirs on dispersion varied with their arrangement, relative spacing, flow depth, and discharge. Changes in flow structure and velocity heterogeneity may contribute to the observed dispersion behavior; however, secondary currents, recirculation zones, and local turbulence were not directly measured in the present study and should therefore be regarded as plausible hydrodynamic mechanisms rather than direct experimental observations. Among the investigated configurations, WR_{3-3} , with symmetric placement of bendway weirs on both sides of the channel and a relative spacing of 1.7, may be considered a promising configuration for enhancing pollutant dispersion and mixing under the tested laboratory conditions. Its applicability to natural rivers requires further evaluation under field-scale hydraulic conditions and mobile-bed environments.

Abstract

Keywords: *Tracer experiments, pollution mixing, rigid-bed channel, concentration distribution, longitudinal dispersion coefficient.*

حکیده

کلیدواژه‌ها: آزمایش‌های ردیابی، اختلاط آلاینده، بستر صلب، توزیع غلظت، ضریب پراکندگی طولی.

مقدمه

رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب سطحی و تأمین‌کننده آب شرب، کشاورزی و صنعت هستند و نقش مهمی در پایداری زیست‌بوم‌های آبی دارند. رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های شهری و صنعتی و ورود پساب‌ها، کیفیت آب رودخانه‌ها را کاهش داده است. از این‌رو، شناخت فرآیند انتقال و اختلاط آلاینده‌ها برای مدیریت کیفیت آب اهمیت دارد. اختلاط در آب‌های طبیعی را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: اختلاط ذرات جامد معلق یا حباب‌های گاز در آب، اختلاط توده‌های آب با دماهای متفاوت و اختلاط آب‌های حاوی مواد محلول با غلظت یا چگالی متفاوت که اساس مطالعات انتقال آلاینده‌های محلول است (Starosolszky, 1994).

انتقال و اختلاط آلاینده‌ها در رودخانه‌ها به توزیع سرعت، ناهم‌واری بستر، هندسه مسیر و جریان‌های ثانویه وابسته است (Baek & Seo, 2016). در رودخانه‌های پیچان‌رودی، انحنای مسیر و شکل‌گیری گردابه‌ها و نواحی بازچرخش، تبادل عرضی جرم و اختلاط را تقویت می‌کنند. بر اساس مطالعات پیشین، ضریب اختلاط عرضی در کانال‌های قوسی و پیچان‌رودی می‌تواند ۷ تا ۲۰ برابر کانال‌های مستقیم باشد (Sharma & Ahmad, 2012). در مقیاس رودخانه، پراکندگی هیدرودینامیکی معمولاً بر انتشار مولکولی غالب است، بنابراین، پس از مرحله اولیه اختلاط، می‌توان در بسیاری از کاربردهای مهندسی، ضریب مؤثر انتقال جرم را تقریباً برابر ضریب پراکندگی در نظر گرفت (Baek & Seo, 2010). ضریب پراکندگی با کنترل گسترش ابر آلاینده و تغییرات مکانی و زمانی غلظت، از پارامترهای اصلی مدل‌سازی انتقال آلاینده‌هاست (Park et al., 2020). ضرایب پراکندگی با استفاده از روابط نظری و تجربی مبتنی بر مشخصات هیدرولیکی و هندسی رودخانه یا از طریق تحلیل داده‌های آزمایش‌های ردیابی در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی برآورد می‌شوند (Baek & Seo, 2010). برای تعیین ضریب پراکندگی طولی نیز روش‌هایی مانند تحلیل مومنتوم (Moment Method)، روندیابی ابر آلاینده (Routing Method) و حل عددی یا تحلیلی معادله جابه‌جایی-پراکندگی به کار می‌روند.

با وجود مطالعات گسترده درباره اختلاط در کانال‌های مستقیم و پیچان‌رودی، بیشتر پژوهش‌ها بر اثر هندسه مسیر و شرایط هیدرولیکی متمرکز بوده‌اند. در مقابل، تأثیر سازه‌های عرضی، به‌ویژه سرریزهای قوس‌رودخانه، بر انتقال ردیاب، توزیع غلظت و ضریب پراکندگی طولی کمتر بررسی شده است. از این‌رو، بررسی اثر آرایش این سازه‌ها بر انتقال و اختلاط آلاینده‌ها ضروری است.

پیشینه پژوهش

مطالعات نشان داده‌اند که ضرایب پراکندگی به شرایط هیدرولیکی، هندسه کانال و جریان‌های ثانویه وابسته‌اند (Baek & Seo, 2013). Launay et al., (2015) با استفاده از نتایج پنج آزمایش ردیابی فلورسنت در سامانه‌های کانال باز با شرایط متفاوت، عملکرد روابط مختلف برآورد ضریب پراکندگی طولی را در مدل‌های هیدرولیکی یک‌بعدی شبکه‌های رودخانه‌ای بررسی کردند. Seo et al., (2016) با روش روندیابی نشان دادند که افزایش نسبت سرعت متوسط به سرعت برشی (u/u^*) و نسبت عرض کانال به عمق جریان (W/h) موجب افزایش ضرایب پراکندگی طولی و عرضی می‌شود. درحالی‌که انحنای مسیر بر پراکندگی عرضی اثر چشمگیری دارد، تأثیر آن بر پراکندگی طولی محدودتر است. Park & Seo (2018)، یک مدل ذره‌ای دوبعدی برای شبیه‌سازی اختلاط غیرفیکتی آلاینده در کانال‌های روباز ارائه کردند. مدل پیشنهادی توانست رفتار نامتقارن منحنی‌های غلظت و فرآیند اختلاط در کانال‌های پیچان‌رودی را با دقت مناسبی بازنمایی کند.

آژدان و همکاران (۱۳۹۷)، انتقال و پراکندگی آلاینده را در فلومی با بستر رسوبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در شیب ثابت، افزایش دبی موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی می‌شود، درحالی‌که در دبی ثابت، افزایش شیب بستر آن را کاهش می‌دهد. همچنین، ضریب پراکندگی با افزایش فاصله از محل تزریق آلاینده افزایش یافت. Park & Ahn (2019) با استفاده از داده‌های سرعت و ردیاب، انتقال آلاینده را در کانال‌های پیچان‌رودی بررسی کردند. نتایج نشان داد که ابر ردیاب عمدتاً در امتداد مسیر بیشینه سرعت گسترش می‌یابد و ساختار میدان سرعت نقش مهمی در الگوی انتقال و اختلاط دارد. Shin et al., (2020)، ضرایب پراکندگی طولی و عرضی را در یک مدل بزرگ‌مقیاس کانال پیچان‌رودی برآورد کردند. ضریب پراکندگی طولی حاصل از روش روندیابی در برخی موارد چندین برابر مقدار برآوردشده با روش مبتنی بر سرعت بود؛ درحالی‌که نتایج دو روش برای پراکندگی عرضی تطابق بیشتری داشتند. این یافته،

اهمیت روش محاسبه ضریب پراکندگی را نشان می‌دهد. (Bielski (2021، انتقال آلاینده را در رودخانه‌ای با مقطع مستطیلی و توزیع غیریکنواخت سرعت بررسی کرد. نتایج نشان داد که اختلاط عرضی در فاصله نسبتاً کوتاهی از محل ورود آلاینده تکمیل می‌شود، بنابراین، پس از مرحله اولیه اختلاط عرضی، می‌توان از مدل یک‌بعدی جابه‌جایی-پراکندگی برای توصیف انتشار آلاینده استفاده کرد. (Nogare & Bauer (2022، عملکرد ۲۶ رابطه تجربی برآورد ضریب پراکندگی طولی را با استفاده از آزمایش‌های ردیابی ارزیابی کردند. هیچ‌یک از روابط در تمام شرایط عملکرد رضایت‌بخشی نداشتند و خطای برآورد در برخی موارد به حدود ۵۰ درصد رسید. روابطی که علاوه بر نسبت عرض به عمق (W/h) و نسبت سرعت متوسط به سرعت برشی (U/u^*) عدد فرود را نیز لحاظ می‌کردند، عملکرد بهتری داشتند. نجومی سیاه‌مرد و همکاران (۱۴۰۲)، با انجام آزمایش‌های ردیابی، فرآیند انتقال و پراکندگی آلاینده را در کانال‌های پیچان‌رودی با بستر صلب و رسوبی، تحت شرایط مختلف دبی جریان و طول بازه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در هر دو نوع بستر، افزایش عدد رینولدز با افزایش ضریب پراکندگی طولی همراه است. همچنین، مقایسه دو نوع بستر نشان داد که تغییر بستر از حالت صلب به رسوبی، علاوه بر افزایش اختلاف نسبی پیشینه غلظت بین مقاطع ورودی و خروجی، موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی نیز می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، بستر رسوبی در مقایسه با بستر صلب، ظرفیت بیشتری برای تقویت فرآیند اختلاط و پراکندگی آلاینده دارد و اثر نوع بستر بر فرآیند اختلاط در بازه‌های کوتاه‌تر محسوس‌تر است. این یافته‌ها بر اهمیت ویژگی‌های بستر در تعیین رفتار انتقال و پراکندگی آلاینده در کانال‌های پیچان‌رودی تأکید می‌کند.

همان‌طور که بیان شده، از مهم‌ترین عوامل هیدرولیکی مؤثر بر فرآیند انتقال و پراکندگی آلاینده‌ها می‌توان به سرعت برشی، شدت آشفتگی و جریان‌های ثانویه اشاره کرد (بیاره‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). در ادامه، مطالعات مرتبط با اثر عوامل و سازه‌های هیدرولیکی بر ساختار جریان و اختلاط بررسی می‌شود.

(Chen et al (2016، اثر پوشش یخ بر پراکندگی طولی رودخانه‌ها را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که در رودخانه‌های عریض و کم‌عمق، سهم پراکندگی ناشی از سرعت برشی عرضی می‌تواند تا حدود ۵۰٪ برابر سهم مؤلفه طولی باشد. همچنین، پوشش یخ در شرایط بررسی شده ضریب پراکندگی طولی را تا حدود سه برابر افزایش داد. (Sharma & Ahmad (2018، اثر ارتفاع و آرایش پره‌های مستغرق را بر اختلاط عرضی بررسی کردند. در نسبت ارتفاع پره به عمق جریان کمتر یا مساوی ۰/۵، انتقال همرفتی نقش غالبی داشت. همچنین، افزایش ارتفاع و تعداد ردیف‌های پره، ضریب پراکندگی عرضی را افزایش داد که به نقش سازه‌ها در تقویت جریان‌های چرخشی و اختلاط اشاره دارد. (Ratha et al., (2018، نشان دادند که پوشش گیاهی صلب می‌تواند ضریب پراکندگی طولی را افزایش دهد و قطر عناصر گیاهی، در مقایسه با تعداد ردیف‌های آن‌ها، تأثیر بیشتری بر این ضریب دارد. (بیاره‌پور و همکاران (۱۳۹۸)، اثر صفحات مثلی متصل به دیواره کانال را بررسی کردند. افزایش مؤلفه عرضی سرعت و سرعت برشی در حضور این صفحات، انتقال عرضی آلاینده و کاهش غلظت در پایین‌دست را تقویت کرد. منصوری کارگر و همکاران (۱۴۰۰)، عملکرد سرریزهای مستطیلی و U شکل را در یک مجرای مستقیم بررسی کردند. سرریز U شکل با تقویت جریان‌های ثانویه، ضریب پراکندگی عرضی را افزایش داد و طول لازم برای دستیابی به اختلاط کامل را کاهش داد. نجومی سیاه‌مرد و همکاران (۱۴۰۵)، اثر آرایش سرریزهای قوس‌رودخانه را بر انتقال و اختلاط آلاینده در آبراهه پیچان‌رودی با بستر رسوبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دبی و شدت آشفتگی، شاخص‌های اختلاط و ضریب پراکندگی طولی را افزایش می‌دهد. همچنین، آرایش سرریزها با تغییر میدان جریان و تقویت جریان‌های ثانویه بر اختلاط اثر گذاشت. آرایش دوطرفه با نسبت فاصله به طول سرریز برابر با ۱/۷، در میان آرایش‌های بررسی شده، بهبود بیشتری در شاخص‌های اختلاط و ضریب پراکندگی طولی ایجاد کرد.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که سازه‌های هیدرولیکی با تغییر میدان سرعت، آشفتگی و جریان‌های ثانویه می‌توانند انتقال و اختلاط آلاینده‌ها را تقویت کنند. با این حال، اثر آرایش سرریزهای قوس‌رودخانه تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، به‌ویژه در شرایط بستر صلب و بدون اثر تغییرات بستر و فرآیندهای رسوبی، به بررسی بیشتری نیاز دارد.

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر آرایش‌های مختلف سرریزهای قوس رودخانه بر انتقال ردیاب و پراکندگی طولی در یک آبراهه پیمان‌رودی با بستر صلب انجام شد. برای این منظور، آزمایش‌های ردیابی در فلومی متشکل از هشت قوس، تحت شرایط هیدرولیکی مختلف و با آرایش‌های متفاوت سرریزها انجام گرفت. تغییرات زمانی غلظت ردیاب در مقاطع مختلف اندازه‌گیری شد و ضریب پراکندگی طولی با روش روندیابی برآورد گردید. نتایج می‌تواند به شناخت نقش آرایش سرریزها در تغییر ساختار جریان و اختلاط آلاینده‌ها و ارزیابی ظرفیت آن‌ها برای تقویت پراکندگی در آبراهه‌های پیمان‌رودی کمک کند.

روش‌شناسی پژوهش

تحلیل ابعادی

انتقال و پراکندگی طولی ردیاب در کانال‌های پیمان‌رودی تحت تأثیر هم‌زمان شرایط هیدرولیکی، هندسه آبراهه، طول مسیر انتقال و ویژگی‌های هندسی سرریزهای قوس رودخانه قرار دارد. از آنجا که هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تغییرات ضریب پراکندگی طولی D_L تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و آرایش‌ها است، این کمیت را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای مؤثر زیر بیان کرد:

$$D_L = f(\rho, \mu, g, V, h, W, R, L, l_w, s, h_w) \quad (1)$$

در این رابطه D_L ضریب پراکندگی طولی، ρ چگالی جریان، μ لزجت، g شتاب گرانش، V متوسط سرعت جریان، h عمق جریان، W عرض آبراهه، R شعاع قوس، L طول مسیر مورد بررسی، l_w طول سرریز، s فاصله بین دو سرریز و h_w ارتفاع سرریز است. با توجه به تعدد متغیرهای مؤثر بر فرآیند پراکندگی، بیان مستقیم رابطه بین D_L و متغیرهای ابعادی، مقایسه شرایط مختلف آزمایش را دشوار می‌کند. از این رو، به منظور تبدیل متغیرهای ابعادی به گروه‌های بدون بعد و ایجاد چارچوبی منسجم برای مقایسه شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی، از تحلیل ابعادی و قضیه π باکینگهام استفاده شد. با در نظر گرفتن ابعاد بنیادی جرم، طول و زمان، از رابطه (۱) مجموعه گروه‌های بدون بعد زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{D_L}{Vh} = f\left(\frac{\rho Vh}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{W}{h}, \frac{R}{h}, \frac{L}{h}, \frac{h_w}{h}, \frac{l_w}{h}, \frac{s}{l_w}\right) \quad (2)$$

در این پژوهش رابطه (۲) را می‌توان به صورت رابطه (۳) و بعنوان چارچوبی برای سازمان‌دهی متغیرهای هیدرولیکی و هندسی و تفسیر نتایج آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

$$\frac{D_L}{Vh} = f(Re, Fr, \frac{W}{h}, \frac{R}{h}, \frac{L}{h}, \frac{h_w}{h}, \frac{l_w}{h}, \frac{s}{l_w}) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، Re برابر با $\frac{Vh}{\nu}$ و Fr برابر با $\frac{V}{\sqrt{gh}}$ است که به ترتیب نشان‌دهنده عدد رینولدز و عدد فرود می‌باشند.

روابط کاربردی

به منظور ارزیابی اثر آرایش‌های مختلف سرریزهای قوس رودخانه بر فرآیند انتقال و اختلاط آلاینده، تغییرات الگوی غلظت ردیاب در مقاطع بالادست و پایین‌دست سرریزها مورد مقایسه قرار گرفت. برای کمی‌سازی تغییرات ایجادشده در منحنی‌های زمانی غلظت، سه پارامتر شامل Cr ، T_{pr} و T_{dr} تعریف شد. این پارامترها به ترتیب بیانگر تغییرات بیشینه غلظت ردیاب، اختلاف زمان رسیدن غلظت به مقدار بیشینه و اختلاف زمان خروج ابر ردیاب از مقاطع اندازه‌گیری بالادست و پایین‌دست در هر آزمایش هستند. به منظور حذف اثر مقیاس و فراهم کردن امکان مقایسه مستقیم نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف، پارامترهای مذکور بر اساس روابط (۴) تا (۶) به صورت بی‌بعد تعریف شدند.

$$Cr = \frac{C_{max_u} - C_{max_o}}{C_{max_u}} \quad (4)$$

$$T_{pr} = \frac{T_{pmax_o} - T_{pmax_u}}{T_{pmax_o}} \quad (5)$$

$$T_{dr} = \frac{T_{max_o} - T_{max_u}}{T_{max_o}} \quad (6)$$

در معادله (۴)، 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 می‌باشد. T_{Pmax-o} و T_{Pmax-u} در معادله (۵) به ترتیب نشان‌دهنده زمان رسیدن نیمرخ زمانی غلظت به بیشینه غلظت در نقطه اندازه‌گیری پایین‌دست و نقطه اندازه‌گیری بالادست است. در معادله (۶)، T_{max-o} نشان‌دهنده مدت زمان خروج ابر ردیاب از نقطه خروجی (پایین‌دست بازه) و T_{max-u} نشان‌دهنده مدت زمان خروج ابر ردیاب از نقطه اندازه‌گیری در بالادست بازه مورد آزمایش است.

از آنجا که ضریب پراکندگی طولی در پژوهش حاضر بر اساس روش روندیابی و از روی تغییرات منحنی غلظت ردیاب بین دو مقطع اندازه‌گیری در بازه مورد مطالعه برآورد می‌شود، این کمیت در این مقاله به عنوان ضریب پراکندگی طولی مؤثر در نظر گرفته می‌شود، به این معنا که مقدار آن بیانگر رفتار پراکندگی ردیاب تحت شرایط هیدرولیکی، هندسی و آرایش سازه‌ای حاکم در هر بازه آزمایش است و نباید به عنوان ضریب ذاتی و مستقل از شرایط آزمایش تفسیر شود. برای اختصار، از این پس در متن مقاله، عبارت ضریب پراکندگی طولی به طور یکسان برای اشاره به همین ضریب پراکندگی طولی مؤثر و با نماد D_L به کار می‌رود.

در پژوهش حاضر، ضریب پراکندگی طولی (D_L) با استفاده از روش پیشنهادی فیشر (Fischer, 1968) و بر مبنای رویکرد روندیابی ابر ردیاب برآورد شد. Fischer با بهره‌گیری از مفهوم روندیابی در مدل‌های هیدرولوژیکی و تعمیم آن به فرآیند انتقال و اختلاط یک‌بعدی آلاینده، روشی برای تعیین ضریب پراکندگی طولی ارائه کرد. در این روش، منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت ردیاب در دو مقطع عرضی واقع در پایین‌دست محل تزریق ثبت می‌شوند. سپس، با استفاده از منحنی غلظت اندازه‌گیری شده در مقطع بالادست و با فرض حرکت و تغییر شکل ابر ردیاب در طول مسیر، منحنی غلظت در مقطع پایین‌دست به صورت نظری محاسبه می‌شود. در ادامه، مقدار ضریب پراکندگی طولی به گونه‌ای تعیین می‌شود که منحنی غلظت محاسبه شده بیشترین تطابق را با منحنی غلظت اندازه‌گیری شده در مقطع پایین‌دست داشته باشد. رابطه (۷) بیان‌گر رابطه مورد استفاده برای محاسبه منحنی تغییرات زمانی غلظت در مقطع پایین‌دست است.

$$c(x_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Uc(x_1, \tau)}{\sqrt{4\pi D(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}} \exp \left\{ -\frac{[U(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau)]^2}{4D(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)} \right\} d\tau \quad (7)$$

در معادله (۷)، $c(x_2, t)$ 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 رابطه (۸) بدست 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.

$$U = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، $x_2 - x_1$ فاصله دو مقطع اندازه‌گیری از یکدیگر در بازه مورد مطالعه است.

تجهیزات آزمایشگاهی

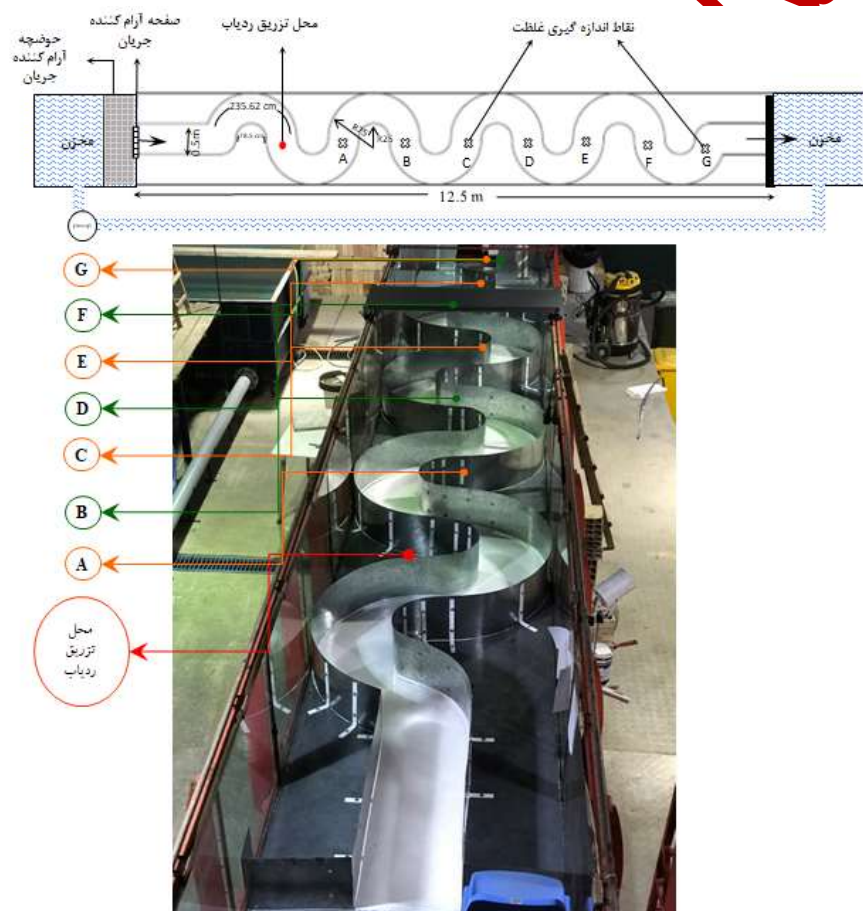
آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی به طول ۱۶، عرض ۱/۵ و عمق ۱ متر انجام شد. برای مدل‌سازی پیچان‌رود در داخل این فلوم، با استفاده از ورق‌های فلزی مسیر پیچان‌رودی به طول ۱۵/۵ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر با ۸ قوس ایجاد شد. در شکل (۱) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی و مسیر پیچان‌رودی با بستر صلب نشان داده شده است.

برای تأمین جریان در فلوم آزمایشگاهی، از یک پمپ سانتریفیوژ مجهز به سیستم کنترل دور موتور استفاده شد. جریان آب از مخزن پایین‌دست به مخزن بالادست انتقال یافته و پس از عبور از حوضچه آرامش، وارد فلوم آزمایشگاهی می‌گردد. به منظور کاهش آشفته‌گی‌ها

و یکنواخت‌سازی شرایط جریان، در ورودی فلوم و ابتدای مسیر پیچان‌رود، صفحه‌های آرام‌کننده نصب شد. اندازه‌گیری دبی جریان، با استفاده از دبی‌سنج التراسونیک با دقت ± 0.1 لیتر بر ثانیه انجام شد. همچنین عمق جریان بوسیله دو عمق‌سنج نصب شده بر روی یک اربابه متحرک با قابلیت جابجایی در سه جهت، اندازه‌گیری گردیده است.

به‌منظور انجام آزمایش‌های ردیابی، محلول آب و نمک (NaCl) بعنوان ماده ردیاب انتخاب شد. این انتخاب بدلیل سهولت اندازه‌گیری غلظت، دسترسی آسان، هزینه مناسب‌تر و همچنین قابلیت اطمینان قابل قبول در مطالعات آزمایشگاهی صورت پذیرفت. سیستم تزریق شامل مخزن اولیه برای تهیه محلول، پمپ سانتریفیوژ، مخزن تامین هد ثابت ثانویه، شیلنگ و اتصالات مربوطه برای تزریق بود. در هر آزمایش، مدت زمان آزادسازی ردیاب ۱۵ ثانیه از شیلنگی به قطر ۰/۰۱ متر و در فاصله ۰/۰۵ متری از کف فلوم، در نظر گرفته شد. این شرایط برای همه آزمایش‌ها یکسان و ثابت بود.

پس از تزریق ردیاب، شوری جریان در دو مقطع واقع در پایین‌دست محل تزریق، با استفاده از دو دستگاه شوری‌سنج ساخت شرکت YSI اندازه‌گیری شد. ثبت تغییرات غلظت به‌صورت پیوسته، از زمان ورود ابر ردیاب به مقطع اندازه‌گیری تا خروج کامل آن از مقطع مذکور انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها در مقاطع ورودی و خروجی هر بازه صورت پذیرفت. مشخصات طول بازه‌های مورد بررسی و فاصله هر بازه از محل تزریق ردیاب در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. طرح کلی فلوم و مسیر پیچان‌رود آزمایشگاهی

سرریزهای قوس رودخانه با ابعاد ۸ در ۱۲ سانتی‌متر و از جنس صفحات ضدآب ساخته شدند. هندسه سرریزها شامل ارتفاع ۸ سانتی‌متر، طول ۱۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر بود. این سرریزها به‌وسیله آهن‌ریا با زاویه ۹۰ درجه نسبت به دیواره فلوم نصب شدند. جانمایی سرریزها در چهار آرایش مختلف و بر اساس فاصله نسبی، که به‌صورت نسبت فاصله بین سرریزها به طول سازه تعریف

می‌شود، انجام گرفت. این آرایش‌ها شامل: ۱- استقرار در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۲/۵، به گونه‌ای که فاصله بین سازه‌ها ۳۰ سانتی‌متر بوده است (مجموعه آزمایش W_{R1-1})؛ ۲- استقرار در قوس داخلی با فاصله نسبی ۲/۵، به گونه‌ای که فاصله بین سازه‌ها ۳۰ سانتی‌متر بوده است (مجموعه آزمایش W_{R1-0})؛ ۳- استقرار در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۵، با فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین سازه‌ها (مجموعه آزمایش W_{R2-2})؛ و ۴- استقرار در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۱/۷، با فاصله ۲۰ سانتی‌متر بین سرریزها (مجموعه آزمایش W_{R3-3}) بوده است. شایان ذکر است که منظور از فاصله نسبی نسبت فاصله بین دو سرریز به طول سرریز می‌باشد. همچنین با توجه به ارتفاع ۸ سانتی‌متری سرریزها، در عمق جریان ۰/۲ متر، سطح آب ۰/۱۲ متر بالاتر از تاج سرریز و در عمق جریان ۰/۱ متر، ۰/۰۲ متر بالاتر از تاج سرریز قرار داشت.

جدول ۱. فاصله نقطه تزریق از اولین نقطه اندازه‌گیری شوری و طول بازه‌های مورد آزمایش

نام بازه مورد آزمایش	فاصله نقاط اندازه‌گیری غلظت از یکدیگر (m)	مسافت نسبی بازه‌ها (نسبت طول بازه به عمق جریان)	
		عمق ۰/۱ متر	عمق ۰/۲ متر
Injection point-A	۲/۳۸	-	-
A-B	۳/۱۷	۳۱/۷	۱۵/۸۵
A-C	۵/۴۲	۵۴/۲	۲۷/۱
A-D	۶/۲۲	۶۲/۲	۳۱/۱
A-E	۸/۸۲	۸۸/۲	۴۴/۱
A-F	۹/۳۸	۹۳/۸	۴۶/۹
A-G	۱۱/۳۳	۱۱۳/۳	۵۶/۶

به‌منظور ارزیابی کارایی سرریزهای قوس رودخانه در آرایش‌های مختلف، نتایج آزمایش‌های مذکور با نتایج شرایط بدون کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه (مجموعه آزمایش W_{R0-0}) مقایسه شدند. نمونه‌ای از نحوه استقرار سرریزها در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. نمونه‌ای از نحوه استقرار سرریزها در مجموعه آزمایش W_{R3-3} (کارگذاری سرریزها در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۱/۷)

در هر آزمایش، ابتدا دبی جریان مطابق با شرایط مورد نظر تنظیم شد و سپس با تنظیم دریچه انتهایی فلوم، عمق جریان به مقدار هدف رسانده و تثبیت گردید. آزمایش‌ها به‌صورت مقایسه‌ای در دو حالت، شامل بدون استقرار سرریزهای قوس رودخانه (حالت شاهد) و با استقرار سرریزها، انجام شدند. این آزمایش‌ها برای شش بازه جریان با طول‌های متفاوت و تعداد قوس‌های مختلف انجام گرفت تا اثر طول مسیر و توسعه تدریجی فرآیند اختلاط در طول آبراهه مورد ارزیابی قرار گیرد. در مجموع، به‌منظور بررسی اثر استقرار سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف بر فرآیند انتقال و مؤلفه‌های اختلاط آلاینده، ۳۳۰ آزمایش طراحی و اجرا شد. دامنه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مورد استفاده در آزمایش‌ها

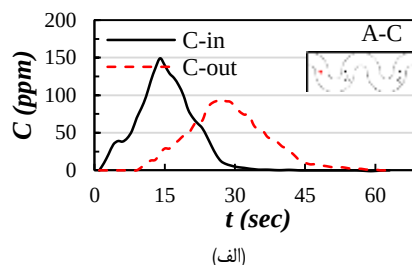
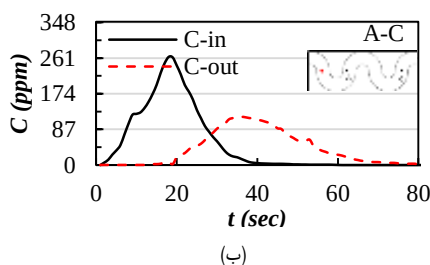
Re	Fr	دبی واحد عرض (m ³ /m.s)	سرعت جریان (m/s)	عمق جریان (m)	R/h	W/h
۱۱۰۶۶۸	۰/۱۷۸	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۹۲۹۶۱	۰/۱۵۰	۰/۰۴۲	۰/۲۱۰	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۷۹۶۸۱	۰/۱۲۹	۰/۰۳۶	۰/۱۸	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۵۷۵۴۸	۰/۰۹۳	۰/۰۲۶	۰/۱۳۰	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۴۸۶۹۴	۰/۰۷۹	۰/۰۲۲	۰/۱۱۰	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۳۹۸۴۱	۰/۰۶۴	۰/۰۱۸	۰/۰۹۰	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۳۰۹۸۷	۰/۰۵۰	۰/۰۱۴	۰/۰۷۰	۰/۲	۳/۷۵	۲/۵
۳۷۹۹۰	۰/۲۶۳	۰/۰۲۶	۰/۲۶	۰/۱	۷/۵	۵
۶۲۶۰۷	۰/۲۲۲	۰/۰۲۲	۰/۲۲	۰/۱	۷/۵	۵
۵۱۲۲۴	۰/۱۸۲	۰/۰۱۸	۰/۱۸	۰/۱	۷/۵	۵
۳۹۸۴۱	۰/۱۴۱	۰/۰۱۴	۰/۱۴	۰/۱	۷/۵	۵

بحث و نتیجه‌گیری

پس از تزریق ردیاب، تغییرات زمانی هدایت الکتریکی جریان در دو مقطع پایین‌دست محل تزریق، با استفاده از دو دستگاه شوری‌سنج ساخت شرکت YSI ثبت شد. مقادیر هدایت الکتریکی پس از اعمال تصحیح دمایی و تبدیل به غلظت معادل ردیاب، برای تشکیل منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت و محاسبه پارامترهای T_{pr} ، Cr و T_{dr} مورد استفاده قرار گرفتند. بدنبال استخراج داده‌های غلظت از مقاطع اندازه‌گیری در تمامی آزمایش‌ها، منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت در نقاط ورودی و خروجی هر بازه ترسیم شد. به‌عنوان نمونه، شکل (۳) منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت مربوط به آزمایش WR_{3-3} را نشان می‌دهد. بررسی منحنی‌های حاصل نشان می‌دهد که با عبور ابر ردیاب از طول بازه، منحنی غلظت در مقطع خروجی نسبت به مقطع ورودی یکنواخت‌تر و پهن‌تر می‌شود. همچنین، با افزایش طول مسیر انتقال و تعداد قوس‌های طی‌شده توسط ابر ردیاب، اختلاف بین مقادیر غلظت اندازه‌گیری‌شده در مقاطع ورودی و خروجی افزایش می‌یابد که بیانگر توسعه فرآیند پراکندگی و اختلاط در طول مسیر جریان است.

با تحلیل نمودارهای حاصله و بهره‌گیری از روابط (۴) تا (۶) پارامترهای توصیف‌کننده رفتار ابر ردیاب شامل نسبت کاهش بیشینه غلظت ردیاب بین منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت در مقاطع ورودی و خروجی (Cr)، اختلاف زمان رسیدن غلظت به مقدار بیشینه در ابتدای و انتهای هر آزمایش (T_{pr})، و اختلاف زمان خروج ابر ردیاب از نقاط اندازه‌گیری بالادست و پایین‌دست در هر آزمایش (T_{dr}) محاسبه شدند. همچنین با استفاده از روابط (۷) و (۸) پارامترهای سرعت انتقال ردیاب (U) و ضریب پراکندگی طولی (DL) برآورد گردیدند.

در ادامه، نتایج در دو بخش اصلی ارائه و تحلیل می‌شوند. در بخش نخست، اثر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آبراهه بر رفتار انتقال ردیاب، توزیع زمانی غلظت و ضریب پراکندگی طولی بررسی می‌شود. در بخش دوم، اثر استقرار سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف بر پارامترهای توصیف‌کننده اختلاط و رفتار انتقال ردیاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان هر بخش، نتایج حاصل با تکیه بر مبانی هیدرولیکی و یافته‌های مطالعات پیشین تفسیر و مورد بحث قرار می‌گیرند.



شکل ۳. نمودار تغییرات زمانی غلظت ردیاب در مجموعه آزمایش W_{R3-3} الف: دبی واحد عرض ۰/۳۶ متر مکعب بر ثانیه در متر و عمق جریان ۰/۲ متر ب: دبی واحد عرض ۰/۱۸ متر مکعب بر ثانیه در متر و عمق جریان ۰/۱ متر

بررسی اثر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آبراهه بر رفتار انتقال ردیاب، توزیع زمانی غلظت و ضریب پراکندگی طولی

نتایج مجموعه آزمایش‌های بدون کارگذاری سرریز قوس رودخانه (W_{R0-0}) نشان داد که تغییرات دبی و طول بازه جریان، تأثیر قابل توجهی بر رفتار انتقال ردیاب و پارامترهای توصیف‌کننده فرایند اختلاط دارد. در این مجموعه آزمایش با عمق جریان ۰/۲ متر، افزایش دبی واحد عرض از ۰/۱۴ به ۰/۵ مترمکعب بر متر در ثانیه در اغلب آزمایش‌ها با کاهش مقادیر پارامترهای T_{dr} و T_{pr} ، Cr همراه بود. اختلاف این پارامترها بین بیشترین و کمترین دبی، به ترتیب در محدوده ۰/۵ تا ۰/۳۹، ۰/۱۱ تا ۰/۳۱ و ۰/۳ تا ۰/۱۹ متغیر بودند. هم‌زمان با افزایش دبی واحد عرض، پارامتر سرعت انتقال ردیاب (U) تا ۷/۵ برابر و ضریب پراکندگی طولی (D_L) تا ۳۴ برابر مقدار اولیه رسید که این تغییر را می‌توان به افزایش سرعت جریان و تغییر شرایط هیدرودینامیکی، از جمله افزایش شدت آشفتگی و انتقال مومنتوم در جریان، نسبت داد که موجب گسترش سریع‌تر ابر ردیاب در راستای طولی می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش طول بازه جریان و در نتیجه افزایش مسافت طی‌شده توسط ابر ردیاب، مقادیر پارامترهای توصیف‌کننده انتقال و اختلاط نیز روند افزایشی نشان دادند. دامنه تغییرات این پارامترها در بازه‌های مختلف، بین ۱۱ تا ۹۷ درصد گزارش شد. این افزایش بیانگر آن است که با افزایش مسیر طی‌شده و تعداد قوس‌های تجربه‌شده توسط ابر ردیاب، فرصت بیشتری برای توسعه فرایند پراکندگی و اختلاط فراهم شده و اثر تجمعی انحنای متوالی بر رفتار انتقال آلاینده آشکارتر می‌شود.

نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های مربوط به کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در ارایش‌های مختلف نشان داد که تغییرات دبی واحد عرض، فاصله نسبی و عمق جریان، تأثیر قابل توجهی بر فرایند انتقال، پراکندگی و اختلاط ردیاب در طول پیکان‌رود آزمایشگاهی دارند. مقادیر پارامترهای توصیف‌کننده رفتار انتقال و اختلاط ردیاب، شامل T_{dr} ، T_{pr} ، Cr و U و D_L ، در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی مسیر جریان برای بیشینه و کمینه دبی واحد عرض همه آزمایش‌های انجام شده، در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

در مجموعه آزمایش‌های W_{R1-1} با عمق جریان ۰/۲ متر، افزایش دبی واحد عرض از ۰/۱۴ به ۰/۵ مترمکعب بر متر در ثانیه، در اغلب آزمایش‌ها با کاهش مقادیر پارامترهای T_{dr} و T_{pr} ، Cr همراه بود. پارامتر Cr با افزایش دبی روندی کاهشی نشان داد و میزان کاهش آن در محدوده ۴۰ تا ۶۴ درصد قرار گرفت. این رفتار را می‌توان به افزایش سرعت انتقال و تغییر شرایط هیدرودینامیکی جریان در اثر افزایش دبی نسبت داد. همچنین، با افزایش دبی واحد عرض، پارامتر T_{pr} ، در اغلب آزمایش‌ها تا ۵۷ درصد کاهش یافت، درحالی‌که مقدار T_{dr} نیز در همین شرایط تا ۶۷ درصد کاهش نشان داد. کاهش این دو پارامتر بیانگر کاهش زمان رسیدن ابر ردیاب به اوج غلظت و کوتاه‌تر شدن زمان حضور آن در محدوده اندازه‌گیری است. از سوی دیگر، افزایش مسافت نسبی در مجموعه W_{R1-1} موجب افزایش مقادیر T_{dr} و T_{pr} ، Cr شد. بیشترین میزان افزایش این پارامترها به ترتیب با ۶۷، ۷/۵ و ۳/۵ برابر نسبت به حالت اولیه گزارش شد. افزایش این پارامترها را می‌توان به طولانی‌تر شدن مسیر انتقال و در نتیجه توسعه بیشتر پراکندگی، کاهش قله غلظت و افزایش زمان انتقال ابر ردیاب نسبت داد. پارامتر سرعت متوسط انتقال ردیاب (U) با افزایش دبی واحد عرض روندی افزایشی داشت و مقدار آن بین ۳ تا ۷ برابر رشد داشت. افزایش مسافت نسبی نیز موجب افزایش ۴ برابری پارامتر U شد. این رفتار را می‌توان به افزایش سرعت جریان و تغییر شرایط هیدرودینامیکی حاکم بر انتقال ردیاب در مسیر پیکان‌رودی نسبت داد. ضریب پراکندگی طولی (D_L) نیز با افزایش دبی

واحد عرض روندی افزایشی نشان داد و میزان افزایش آن در محدوده ۲ تا ۷ برابر شدن قرار گرفت. همچنین، افزایش مسافت نسبی در اغلب آزمایش‌ها موجب افزایش D_L تا ۴۱ برابر شد. افزایش D_L بیانگر تقویت فرآیند پراکندگی طولی و توسعه سریع‌تر ابر ردیاب در راستای جریان است. مقایسه نتایج حاصل از دو عمق جریان ۰/۲ و ۰/۱ متر در مجموعه W_{R1-1} نشان داد که کاهش عمق جریان تأثیر محسوسی بر رفتار پارامترهای انتقال و اختلاط دارد. با کاهش عمق جریان از ۰/۲ به ۰/۱ متر، پارامترهای Cr ، T_{pr} و T_{dr} در اغلب آزمایش‌ها کاهش، درحالی‌که پارامترهای U و D_L افزایش یافتند. بیشترین میزان تغییرات این پارامترها به ترتیب برابر با ۸۳ و ۸۳ درصد کاهش برای Cr ، T_{pr} و T_{dr} و ۷۳ و ۹۱ درصد افزایش برای U و D_L بود. افزایش D_L در عمق کمتر را می‌توان به تغییر شرایط هیدرولیکی جریان، افزایش سرعت متوسط و احتمالاً افزایش شدت آشفتگی نسبت داد که در مجموع شرایط مناسب‌تری را برای انتقال و پراکندگی طولی ردیاب فراهم می‌کنند.

در مجموعه آزمایش‌های W_{R1-0} با عمق جریان ۰/۲ متر، افزایش دبی واحد عرض از ۰/۱۴ به ۰/۵۰ مترمکعب بر متر در ثانیه نیز با کاهش مقادیر پارامترهای Cr ، T_{pr} و T_{dr} همراه بود. دامنه تغییرات این پارامترها به ترتیب بین ۰/۱۶ تا ۰/۳۴، ۰/۳۴ تا ۰/۴ و ۰/۲۹ تا ۰/۴۰ قرار داشت. با وجود روند کاهشی این پارامترها در اثر افزایش دبی، افزایش مسافت نسبی موجب افزایش مقادیر هر سه پارامتر شد، به‌طوری‌که بیشترین میزان افزایش Cr ، T_{pr} و T_{dr} به ترتیب برابر با ۸، ۴ و ۵ برابر رشد بود. این رفتار را می‌توان به افزایش طول مؤثر مسیر و فراهم شدن زمان و مسافت بیشتر برای توسعه، کشیدگی و بازآرایی ابر ردیاب نسبت داد. هم‌زمان با افزایش دبی واحد عرض در مجموعه W_{R1-0} ، سرعت انتقال ردیاب (U) افزایش یافت و ضریب پراکندگی طولی (D_L) نیز در اغلب آزمایش‌ها تا ۱۰۴ برابر بزرگتر شد. علاوه بر این، افزایش ۳/۵ برابری مسافت نسبی موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی شد، به‌گونه‌ای که مقادیر D_L در محدوده ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۷ مترمربع بر ثانیه تغییر کردند. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت ضریب پراکندگی طولی به نحوه جانمایی سرریزها و طول مسیر انتقال در آبراهه پیچان‌رودی است. مقایسه نتایج دو عمق جریان ۰/۱ و ۰/۲ متر نشان داد که کاهش ۵۰ درصدی عمق جریان، در اغلب آزمایش‌ها موجب کاهش پارامترهای Cr و T_{pr} و افزایش پارامترهای U و D_L شده است. بیشترین میزان تغییرات گزارش شده برای این پارامترها به ترتیب برابر با ۷۲ و ۳۵ درصد کاهش و ۴۴، ۵۱ و ۹۵ درصد افزایش بود. این نتایج بار دیگر بیانگر نقش تعیین‌کننده عمق جریان در کنترل ویژگی‌های هیدرودینامیکی، سرعت انتقال ردیاب و شدت پراکندگی طولی در آبراهه‌های پیچان‌رودی است.

جدول ۳. نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های مختلف با و بدون کارگذاری سرریزهای فوس رودخانه در آرایش‌های گوناگون

خطای میانگین مربعات	D _L (m ² /s)	U (m/s)	T _{dr}	T _{pr}	Cr	مجموعه آزمایش	دبی واحد عرض (m ³ /m.s)	عمق جریان (m)	نام بازه	
۲/۲۲	۰/۰۰۱	۰/۰۴۹۳	۰/۴۰۳	۰/۵۸۶	۰/۱۰۵	W _{R0-0}	۰/۱۴	۰/۱	A-B	
۱/۴۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۶۰۷	۰/۰۵۴	۰/۴۱۹	۰/۳۳۳	W _{R1-1}				
۴/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۸۷۸	۰/۲۱۷	۰/۵۷۶	۰/۱۹۲	W _{R1-0}				
۲/۶۹	۰/۰۲۵۴	۰/۰۹۸۸	۰/۱۷۰	۰/۱۰۳	۰/۲۸۵	W _{R2-2}				
۱/۶۷	۰/۰۰۲۱	۰/۰۸۷۸	۰/۲۷۵	۰/۲۹۱	۰/۰۵۵	W _{R3-3}				
۴/۰۲	۰/۰۰۳۸	۰/۰۹۸۸	۰/۲۱۷	۰/۳۴۸	۰/۰۰۰	W _{R0-0}	۰/۰۲۶			
۰/۷۱	۰/۰۵۳۴	۰/۱۵۸۰	۰/۰۴۴	۰/۰۵۲	۰/۴۰۹	W _{R1-1}				
۳/۲۶	۰/۰۰۵۴	۰/۰۹۸۸	۰/۴۳۷	۰/۲۷۷	۰/۱۶۰	W _{R1-0}				
۲/۴۰	۰/۰۰۶۹	۰/۰۹۸۸	۰/۱۶۶	۰/۲۸۵	۰/۳۴۶	W _{R2-2}				
۲/۳۳	۰/۰۲۸۹	۰/۰۹۸۸	۰/۱۷۸	۰/۳۳۳	۰/۴۸۸	W _{R3-3}				

جدول ۳. نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های مختلف با و بدون کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در آرایش‌های گوناگون - ادامه

خطای میانگین مربعات	D _L (m ² /s)	U (m/s)	T _{dr}	T _{pr}	Cr	مجموعه آزمایش	دبی واحد عرض (m ³ /m.s)	عمق جریان (m)	نام بازه		
۲/۳۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۲۶	۰/۲۲۸	۰/۵۵۶	۰/۱۴۹	W _{R0-0}	۰/۰۱۴	۰/۲	A-B		
۱/۹۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۶۴	۰/۳۳۳	۰/۴۰۵	۰/۰۸۳	W _{R1-1}					
۳/۲۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۱۰	۰/۳۱۴	۰/۴۰۶	۰/۰۹۷	W _{R1-0}					
۲/۷۱	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۴۵	۰/۱۵۶	۰/۳۵۳	۰/۴۵۵	W _{R2-2}					
۲/۱۰	۰/۰۲۸۷	۰/۰۵۶۴	۰/۲۸۷۰	۰/۴۴۴۴	۰/۴۶۵۸	W _{R3-3}					
۱/۲۳	۰/۰۱۵۹	۰/۱۹۸	۰/۱۶۰	۰/۲۶۱	۰/۰۹۴	W _{R0-0}	۰/۰۵۰	۰/۲		A-B	
۲/۲۵	۰/۰۰۳۳	۰/۱۱۲۹	۰/۱۷۰	۰/۳۰۰	۰/۰۹۱	W _{R1-1}					
۲/۲۵	۰/۰۵۳۲	۰/۱۵۸۰	۰/۳۷۵	۰/۳۳۳	۰/۴۶۰	W _{R1-0}					
۱/۹۲	۰/۰۱۳۴	۰/۱۵۸۰	۰/۱۰۲	۰/۳۳۳	۰/۱۷۴	W _{R2-2}					
۰/۸۲	۰/۰۱۶۲	۰/۱۵۸۰	۰/۲۱۰۵	۰/۲۳۰۸	۰/۲۴۰۸	W _{R3-3}					
۲/۵۰	۰/۰۰۳۲	۰/۱۲۲	۰/۴۷۲	۰/۶۹۴	۰/۳۳۸	W _{R0-0}	۰/۰۱۴	A-D	۰/۱		
۱/۶۶	۰/۰۱۳۸	۰/۱۳۷۰	۰/۳۷۸	۰/۵۶۰	۰/۵۹۱	W _{R1-1}					
۲/۲۰	۰/۰۲۱۳	۰/۱۲۲۹	۰/۶۲۸	۰/۷۶۱	۰/۴۶۹	W _{R1-0}					
۱/۲۹	۰/۰۴۱۰	۰/۱۵۲۶	۰/۵۳۳	۰/۵۶۲	۰/۴۶۶	W _{R2-2}					
۱/۴۴	۰/۰۳۳۷	۰/۱۰۳۸	۰/۴۹۱	۰/۶۹۲	۰/۵۹۵	W _{R3-3}					
۲/۰۱	۰/۰۱۲۹	۰/۲۰۲۱	۰/۳۷۷	۰/۵۷۱	۰/۱۹۲	W _{R0-0}	۰/۰۲۶			A-D	۰/۱
۰/۸۴	۰/۲۳۶۶	۰/۲۱۳۳	۰/۲۲۲	۰/۵۲۶	۰/۴۶۰	W _{R1-1}					
۱/۳۵	۰/۰۲۸۷	۰/۲۰۲۱	۰/۶۳۸	۰/۵۸۰	۰/۴۱۶	W _{R1-0}					
۱/۷۳	۰/۱۰۰۷	۰/۲۵۶۰	۰/۴۳۴	۰/۶۸۵	۰/۲۹۲	W _{R2-2}					
۱/۷۶	۰/۰۸۷۳	۰/۱۵۳۶	۰/۴۳۹	۰/۷۴۳	۰/۶۲۸	W _{R3-3}					
۱/۱۵	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷۳	۰/۳۳۲	۰/۵۷۱	۰/۳۱۱	W _{R0-0}	۰/۰۱۴	۰/۲			
۰/۹۱	۰/۰۰۸۲	۰/۰۵۷۳	۰/۵۵۷	۰/۷۶۴	۰/۵۶۲	W _{R1-1}					
۱/۹۱	۰/۰۲۶۱	۰/۰۸۰۰	۰/۵۵۷	۰/۷۴۶	۰/۶۹۱	W _{R1-0}					
۲/۱۲	۰/۰۴۱۰	۰/۰۸۰۰	۰/۵۳۷	۰/۷۷۹	۰/۷۱۰	W _{R2-2}					
۱/۰۰	۰/۰۲۷۱	۰/۰۸۰۰	۰/۴۴۱۳	۰/۶۵۷۱	۰/۶۱۸۶	W _{R3-3}					
۱/۱۸	۰/۰۳۶۴	۰/۲۵۶	۰/۳۷۷	۰/۳۳۳	۰/۵۶۷	W _{R0-0}	۰/۰۵۰			۰/۲	
۲/۱۷	۰/۰۵۵۳	۰/۲۹۵۴	۰/۴۵۰	۰/۳۲۲	۰/۲۴۸	W _{R1-1}					
۱/۱۳	۰/۰۲۴۶	۰/۱۹۲۰	۰/۴۶۶	۰/۶۶۷	۰/۳۶۵	W _{R1-0}					
۱/۲۶	۰/۰۱۳۵	۰/۱۹۲۰	۰/۲۴۱	۰/۷۴۱	۰/۱۷۶	W _{R2-2}					
۰/۹۰	۰/۰۵۲۷	۰/۲۲۵۹	۰/۵۴۲۴	۰/۶۲۰۷	۰/۲۴۵۱	W _{R3-3}					
۱/۲۵	۰/۰۱۶۴	۰/۱۵	۰/۷۳۲	۰/۵۷۵	۰/۲۶۳	W _{R0-0}	۰/۰۱۴	۰/۱	A-G		
۰/۷۵	۰/۱۴۹۰	۰/۰۴۰۸	۰/۴۵۵	۰/۷۳۱	۰/۶۵۴	W _{R1-1}					
۱/۶۲	۰/۰۴۳۸	۰/۱۵۴۱	۰/۷۶۸	۰/۷۸۳	۰/۵۲۹	W _{R1-0}					
۱/۷۹	۰/۰۳۷۲	۰/۱۵۹۶	۰/۶۳۱	۰/۶۷۵	۰/۴۷۵	W _{R2-2}					
۱/۱۱	۰/۰۶۴۸	۰/۱۴۹۰	۰/۵۷۱	۰/۸۴۲	۰/۷۰۶	W _{R3-3}					
۱/۴۹	۰/۰۰۶۷	۰/۲۷۰۹	۰/۵۰۷	۰/۷۰۲	۰/۲۹۱	W _{R0-0}	۰/۰۲۶			۰/۱	A-G
۰/۸۰	۰/۳۰۷۶	۰/۲۸۸۴	۰/۴۰۶	۰/۵۹۶	۰/۴۳۶	W _{R1-1}					
۰/۸۲	۰/۰۳۶۹	۰/۲۱۸۰	۰/۷۷۲	۰/۸۳۶	۰/۴۳۷	W _{R1-0}					
۱/۴۲	۰/۴۰۹۹	۰/۲۷۹۴	۰/۵۵۵	۰/۶۵۳	۰/۶۶۸	W _{R2-2}					
۱/۰۸	۰/۱۰۳۴	۰/۲۱۲۹	۰/۶۷۲	۰/۷۰۱	۰/۶۳۹	W _{R3-3}					

جدول ۳. نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های مختلف با و بدون کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در آرایش‌های گوناگون - ادامه

خطای میانگین مربعات	D_L (m ² /s)	U (m/s)	T_{dr}	T_{pr}	Cr	مجموعه آزمایش	دبی واحد عرض (m ³ /m.s)	عمق جریان (m)	نام بازه
۰/۴۵	۰/۰۶۸۲	۰/۰۱۳	۰/۷۱۰	۰/۸۵۱	۰/۸۰۳	W_{R0-0}	۰/۰۱۴	۰/۲	
۰/۶۳	۰/۰۳۵۰	۰/۱۲۱۶	۰/۶۸۷	۰/۸۶۱	۰/۷۰۷	W_{R1-1}			
۰/۷۸	۰/۰۷۸۶	۰/۱۰۱۶	۰/۷۱۵	۰/۹۰۳	۰/۸۱۰	W_{R1-0}			
۰/۶۸	۰/۰۱۸۳	۰/۰۸۲۰	۰/۶۷۷	۰/۸۳۹	۰/۷۱۰	W_{R2-2}			
۱/۲۵	۰/۱۰۶۲	۰/۰۹۳۱	۰/۷۱۷۵	۰/۸۷۱۶	۰/۸۱۲۵	W_{R3-3}			
۰/۴۸	۰/۰۴۰۴	۰/۳۷۱	۰/۵۱۲	۰/۵۳۸	۰/۴۰۹	W_{R0-0}	۰/۰۵۰		
۱/۱۲	۰/۰۲۹۰	۰/۱۲۳۹	۰/۵۹۷	۰/۶۲۵	۰/۳۶۹	W_{R1-1}			
۱/۱۱	۰/۰۶۲۷	۰/۲۹۸۰	۰/۵۸۶	۰/۶۰۹	۰/۵۸۶	W_{R1-0}			
۰/۳۲	۰/۰۵۰۳	۰/۲۵۵۴	۰/۵۳۶	۰/۸۰۹	۰/۴۸۴	W_{R2-2}			
۰/۸۱	۰/۱۰۷۳	۰/۳۴۳۸	۰/۵۶۲۵	۰/۶۲۵۰	۰/۳۲۹۸	W_{R3-3}			

در مجموعه آزمایش‌های W_{R2-2} ، افزایش دبی واحد عرض از ۰/۰۱۴ به ۰/۰۵۰ مترمکعب بر متر در ثانیه، موجب کاهش مقادیر پارامترهای T_{dr} و T_{pr} و Cr شد. میزان کاهش این پارامترها به ترتیب در محدوده ۲۱ تا ۷۵ درصد، ۳ تا ۲۷ درصد و ۲۱ تا ۵۶ درصد قرار داشت. روند کاهشی این پارامترها با افزایش دبی را می‌توان به تغییر شرایط هیدرودینامیکی جریان، افزایش سرعت انتقال و تشدید فرآیندهای اختلاط و پراکندگی ردیاب نسبت داد. در چنین شرایطی، ابر ردیاب با سرعت بیشتری در مسیر حرکت کرده و تحت تأثیر آشفستگی و ساختارهای جریان ثانویه، تغییر شکل و پراکندگی بیشتری می‌یابد. در مقابل، پارامتر U با افزایش ۹ برابری و ضریب پخش طولی D_L با افزایش ۱۴ برابری نسبت به مقادیر اولیه همراه شدند. افزایش قابل توجه این دو پارامتر بیانگر تسریع فرآیند انتقال و تقویت پراکندگی طولی ردیاب در شرایط دبی بالاتر است. بررسی اثر مسافت نسبی در مجموعه W_{R2-2} نشان داد که افزایش ۴۱ واحدی این متغیر، تغییرات محسوسی در تمامی پارامترهای مورد بررسی ایجاد کرده است. بیشترین تغییرات مشاهده شده در پارامترهای T_{pr} ، Cr ، T_{dr} و U و به ترتیب معادل ۱۳، ۲/۵، ۲۴، ۴/۵ و ۳۷ برابر مقدار اولیه بود این تغییرات را می‌توان به افزایش طول مسیر انتقال، فرصت بیشتر برای تکامل ابر ردیاب و مواجهه آن با نواحی بیشتری تحت تأثیر اختلاط و جریان‌های ثانویه نسبت داد. همچنین، کاهش عمق جریان از ۰/۲ به ۰/۱ متر در اغلب دبی‌های مورد بررسی موجب کاهش مقادیر Cr و T_{pr} و افزایش مقادیر U و D_L شد. بیشترین تغییرات این پارامترها به ترتیب شامل ۸۵ و ۷۴ درصد کاهش و ۶۶، ۸۵ و ۹۶ درصد افزایش بود. افزایش U و D_L در عمق کمتر را می‌توان به افزایش سرعت متوسط جریان و تغییر ساختار هیدرودینامیکی جریان ناشی از کاهش عمق نسبت داد این تغییرات، همراه با افزایش اثر نسبی آشفستگی و جریان‌های ثانویه، می‌تواند شرایط مناسب‌تری را برای انتقال و پراکندگی طولی ردیاب فراهم کند.

در مجموعه آزمایش‌های W_{R3-3} ، که در آن سرریزها در دو طرف مسیر با فاصله ۰/۲ متر از یکدیگر کارگذاری شده بودند، افزایش دبی واحد عرض از کمترین به بیشترین مقدار، تأثیر محسوسی بر پارامترهای انتقال و اختلاط ردیاب داشت. در این شرایط، پارامترهای Cr و T_{pr} به ترتیب تا ۶۹ و ۴۸ درصد کاهش یافتند، درحالی که پارامترهای U و D_L به ترتیب ۳ و ۸ برابر افزایش نشان دادند. کاهش Cr و T_{pr} را می‌توان به افزایش سرعت جریان و تغییر شرایط هیدرودینامیکی ناشی از افزایش دبی نسبت داد، درحالی که افزایش چشمگیر U و D_L بیانگر تسریع انتقال ابر ردیاب و تقویت فرآیند پراکندگی طولی در شرایط دبی بالاتر است.

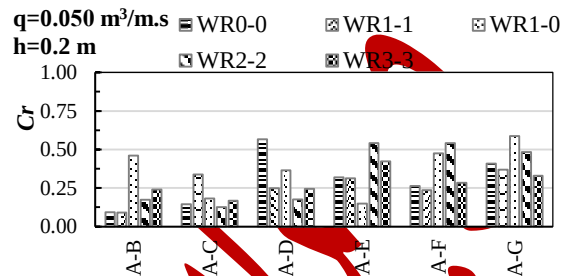
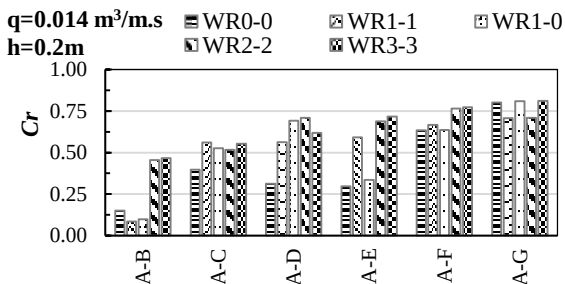
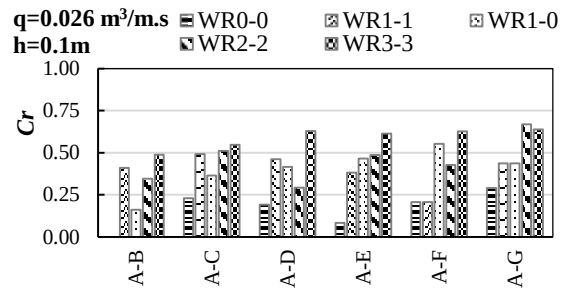
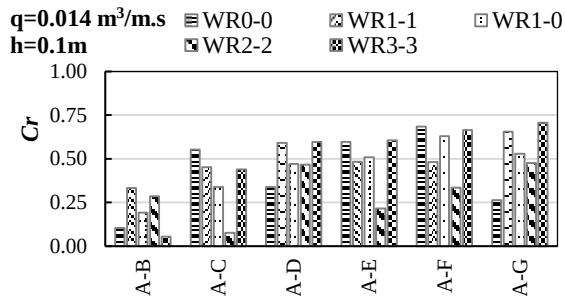
بررسی اثر افزایش مسافت نسبی در مجموعه W_{R3-3} نشان داد که افزایش این پارامتر موجب افزایش تمامی پارامترهای مورد بررسی شد. بیشترین تغییرات در دبی‌های بالاتر مشاهده شد، به‌طوری که مقدار پارامتر Cr در دبی ۰/۰۴۲ مترمکعب بر متر در ثانیه، حدود ۲ برابر افزایش یافت. همچنین، پارامترهای U و D_L در دبی ۰/۰۳۶ مترمکعب بر متر در ثانیه، به ترتیب افزایش ۱/۵ و ۹ برابری را تجربه کردند. افزایش پارامتر D_L با افزایش مسافت نسبی را می‌توان به افزایش طول مسیر مؤثر انتقال و فراهم شدن فرصت بیشتر برای توسعه و تغییر شکل ابر ردیاب نسبت داد. افزون بر این، در آرایش دوطرفه سرریزها، ابر ردیاب در طول مسیر تحت تأثیر متناوب و

تجمعی نواحی آشفته‌گی، گردابه‌ها و جریان‌های ثانویه ناشی از سازه‌ها قرار می‌گیرد که می‌تواند به افزایش پراکندگی در راستای جریان منجر شود. در نهایت، بررسی اثر عمق جریان در مجموعه WR_{3-3} نشان داد که کاهش عمق جریان از 0.2 به 0.1 متر، در غالب آزمایش‌ها موجب کاهش مقادیر پارامترهای Cr ، T_{pr} و T_{dr} شد، به‌طوری‌که میزان کاهش این پارامترها به‌ترتیب 88 ، 28 و 24 درصد گزارش گردید. در مقابل، کاهش عمق جریان و افزایش متعاقب سرعت جریان و شدت آشفته‌گی، موجب افزایش پارامترهای سرعت انتقال ردیاب (U) و ضریب پراکندگی طولی (D_L) شد. بیشترین میزان افزایش این دو پارامتر به‌ترتیب برابر با 86 و 88 درصد بود. این رفتار را می‌توان به تغییر شرایط هیدرولیکی جریان در اثر کاهش عمق، از جمله افزایش سرعت متوسط و تغییر شدت آشفته‌گی، نسبت داد که شرایط مساعدتری را برای انتقال سریع‌تر و پراکندگی طولی ردیاب فراهم می‌کند.

در مجموع تغییرات دبی واحد عرض، مسافت نسبی و عمق جریان، صرف‌نظر از آرایش سرریزها، بر رفتار انتقال و پراکندگی ردیاب اثرگذار بودند. این روند نشان می‌دهد که افزایش دبی، از طریق افزایش سرعت متوسط جریان و تغییر شرایط هیدرودینامیکی، از جمله تشدید آشفته‌گی و افزایش تبادل مومنوم، موجب تسریع انتقال ردیاب و تقویت پراکندگی آن در راستای جریان می‌شود. این یافته با نتایج آردان و همکاران (1392) و نجومی سیاهمرد و همکاران (1402) مطابقت دارد، به‌طوری‌که در مطالعات مذکور نیز افزایش دبی جریان و در پی آن افزایش عدد رینولدز، با افزایش ضریب پراکندگی طولی همراه بوده است. همچنین، نتایج حاضر با یافته‌های Seo et al. (2016) همخوانی دارد که نقش نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت برشی را در کنترل فرآیندهای اختلاط و پراکندگی نشان داده‌اند. افزایش مسافت نسبی، با افزایش طول مسیر انتقال، در اغلب شرایط موجب افزایش D_L شد. این رفتار را می‌توان به فرصت بیشتر برای تکامل مکانی اختلاط، تغییر شکل ابر ردیاب و برهم‌کنش آن با جریان‌های ثانویه و انحراف‌های متوالی پیچان‌رود نسبت داد. به‌علاوه، کاهش عمق جریان از 0.2 به 0.1 متر نیز در غالب آزمایش‌ها با افزایش D_L همراه بود، این رفتار را می‌توان با افزایش نسبت عرض به عمق و تغییر شرایط هیدرودینامیکی جریان در عمق‌های کمتر مرتبط دانست. در چنین شرایطی، اثر نسبی تنش برشی بستر و نواحی اختلال جریان در مجاورت سرریزها بر کل عمق جریان افزایش یافته و می‌تواند موجب تغییر توزیع سرعت و تقویت نوسانات جریان شود. در نتیجه، شرایط مناسب‌تری برای انتقال مومنوم و پراکندگی ردیاب در راستای جریان فراهم می‌شود. این نتیجه با یافته‌های Seo et al. (2016) و Nogare and Bauer (2022) نیز سازگار است. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که رفتار انتقال و پراکندگی ردیاب در آبراهه پیچان‌رودی حاصل برهم‌کنش هم‌زمان شرایط هیدرولیکی و هندسی است و نمی‌توان اثر دبی، عمق و طول مسیر انتقال را به‌صورت مستقل از یکدیگر تفسیر کرد. افزایش دبی عمدتاً با افزایش سرعت انتقال و ظرفیت پراکندگی، کاهش عمق با تغییر ساختار هیدرودینامیکی و افزایش اثر نسبی بستر و سازه‌ها، و افزایش طول مسیر با فراهم کردن فرصت بیشتر برای تکامل ابر ردیاب همراه است. بنابراین، پاسخ ضریب پراکندگی طولی (D_L) حاصل برهم‌کنش میان سرعت جریان، مقیاس هندسی آبراهه، ویژگی‌های آشفته‌گی و فرآیندهای ثانویه جریان است؛ برهم‌کنشی که در حضور سرریزهای قوس رودخانه می‌تواند تحت تاثیر مستقیم نحوه استقرار و فاصله سازه‌ها قرار گیرد.

ارزیابی اثر استقرار سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف بر پارامترهای توصیف‌کننده اختلاط و رفتار انتقال ردیاب

نمودارهای شکل (۴) نمونه‌ای از مقایسه اثر کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف بر پارامتر انتقال غلظت (Cr) را در شرایط هیدرولیکی مختلف نشان می‌دهند. این مقایسه برای آزمایش‌های انجام‌شده در کمینه و بیشینه دبی واحد عرض و در دو عمق جریان، با در نظر گرفتن حالت بدون سرریز به‌عنوان شرایط شاهد، انجام شده است. مقایسه مقادیر Cr در شرایط مختلف نشان می‌دهد که استقرار سرریزها، متناسب با آرایش هندسی آن‌ها و شرایط هیدرولیکی جریان، موجب تغییر در میزان کاهش و بازتوزیع غلظت ردیاب در طول مسیر پیچان‌رود شده است. در ادامه، نتایج بررسی اثر آرایش‌های مختلف سرریزهای قوس رودخانه بر D_L ، Cr ، T_{pr} و T_{dr} ارائه شده است.



شکل ۴. مقایسه عملکرد سرریزهای قوس رودخانه در آرایش‌های گوناگون برای بیشینه و کمینه دبی واحد عرض با دو عمق جریان ۰/۱ و ۰/۲ متر بر روی پارامتر انتقال

ردیاب

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های بدون سرریز (مجموعه آزمایش W_{R0-0}) با آزمایش‌های دارای سرریزهای قوس رودخانه نشان داد که استقرار این سازه‌ها، متناسب با آرایش هندسی و شرایط هیدرولیکی، موجب تغییر محسوس در میزان افت پیک غلظت ردیاب در طول مسیر و در نتیجه تغییر در فرآیند اختلاط می‌شود. در جریان با عمق ۰/۱ متر، میانگین مقدار پارامتر Cr در حالت کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۲/۵ (مجموعه آزمایش‌های W_{R1-1}) از ۰/۳۹ به ۰/۴۷ افزایش یافته است. با تغییر آرایش جانمایی سرریز و کارگذاری فقط در قوس داخلی با همان فاصله نسبی (مجموعه آزمایش W_{R1-0}) این پارامتر از ۰/۳۹ به ۰/۴۳ افزایش یافت، که نسبت به حالت استقرار در دو سمت کانال (مجموعه آزمایش‌های W_{R1-1}) حدود ۷ درصد کاهش یافته است. در شرایطی که سرریزهای قوس رودخانه در دو طرف مسیر با افزایش پنج برابری فاصله نسبی در مجموعه آزمایش W_{R2-2} نصب شدند، مقدار متوسط پارامتر Cr از ۰/۳۵ به ۰/۴۱ افزایش یافت. در این مجموعه آزمایش پارامتر مذکور نسبت به مجموعه آزمایش W_{R1-1} با ۱۱ درصد و نسبت به مجموعه آزمایش W_{R1-0} با ۴ درصد کاهش مقدار مواجه شد. همچنین، بررسی مقادیر Cr در شرایط استقرار سرریز در دو سوی مسیر با فاصله نسبی ۱/۷ (مجموعه آزمایش W_{R3-3}) با شرایط هیدرولیکی یادشده نشان داد که نسبت به مقادیر حاصله از مجموعه آزمایش‌های W_{R0-0} ، W_{R1-1} ، W_{R1-0} و W_{R2-2} به ترتیب با ۳۷، ۱۴، ۲۳ و ۲۹ درصد افزایش مقدار مواجه شد. بنابراین در عمق ۰/۱ متر، آرایش دوطرفه متراکمتر عملکرد مؤثرتری در کاهش پیک غلظت داشت.

با تغییر شرایط هیدرولیکی و افزایش عمق آب به ۰/۲ متر، مقایسه نتایج با و بدون کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه نشان داد که بیشترین تغییرات پارامتر Cr مربوط به مجموعه آزمایش W_{R3-3} بوده که نسبت به حالت بدون سرریز، افزایش ۳۱ درصدی را نشان می‌دهد. در حالی که در مجموعه آزمایش‌های W_{R1-1} ، W_{R1-0} و W_{R2-2} این افزایش به ترتیب برابر با ۸، ۱۴ و ۲۷ درصد نسبت به حالت پایه (مجموعه آزمایش W_{R0-0}) بوده است. همچنین مقادیر Cr در مجموعه آزمایش W_{R1-0} ، W_{R2-2} و W_{R3-3} به ترتیب با ۵، ۱۷ و ۲۱ درصد بیشتر از مقدار متناظر در مجموعه آزمایش W_{R1-1} بدست آمده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که مقدار پارامتر Cr در مجموعه آزمایش‌های W_{R2-2} و W_{R3-3} به ترتیب ۱۱ و ۱۴ درصد بیشتر از مجموعه آزمایش W_{R1-0} است. همچنین مقایسه مقادیر Cr حاصله از دو مجموعه آزمایش W_{R2-2} و W_{R3-3} نشان داد که با کاهش فاصله نسبی از ۵ به ۱/۷ پارامتر مذکور از ۰/۴۷ به ۰/۴۸ تغییر کرد. اگرچه این افزایش از نظر مقدار مطلق محدود است، کاهش فاصله بین سرریزهای متوالی می‌تواند با تقویت اثر تجمعی سازه‌ها، تداوم ساختارهای ثانویه و آشفته را افزایش داده و افت پیک غلظت را تقویت کند.

بعنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که با توجه به تعریف پارامتر Cr به‌صورت نسبت کاهش بیشینه غلظت خروجی به مقدار متناظر در ورودی، افزایش این پارامتر بیانگر افت بیشتر پیک غلظت و تقویت اختلاط است. مقایسه نتایج نشان داد که استقرار سرریزهای قوس رودخانه، می‌تواند با ایجاد تغییر در میدان سرعت و تقویت جریان‌های ثانویه و نواحی آشفتگی در اطراف سازه، موجب پارامتر Cr و در نتیجه بهبود فرآیند اختلاط می‌شود. این اثر به نحوه آرایش سازه‌ها وابسته بوده و استقرار سرریزها در دو طرف آبراهه، در شرایط مورد بررسی، عموماً عملکرد مؤثرتری نسبت به استقرار یک‌طرفه نشان داد، موضوعی که می‌تواند ناشی از تأثیرگذاری هم‌زمان سازه‌ها بر میدان جریان در دو سوی آبراهه و افزایش برهم‌کنش جریان‌های عرضی باشد. همچنین، کاهش فاصله نسبی بین سرریزهای متوالی در آرایش دوطرفه، با افزایش پارامتر Cr همراه بود که می‌توان آن را به کاهش فاصله بین نواحی اختلال جریان، تداوم بیشتر ساختارهای ثانویه و آشفته و تقویت اثر تجمعی سرریزها در طول مسیر نسبت داد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که هندسه و نحوه آرایش سرریزهای قوس رودخانه، در تعامل با شرایط هیدرولیکی جریان، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان افت پیک غلظت و تقویت فرآیند اختلاط آلاینده در پیکان‌رود دارد.

مقایسه مقادیر پارامتر T_{pr} در آزمایش‌های مختلف قبل و بعد از کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه نشان داد که تأثیر این سازه‌ها بر زمان انتقال ابر ردیاب تابعی از شرایط هیدرولیکی و نحوه آرایش سرریزها است. در آزمایش‌های انجام شده با عمق جریان $0/1$ متر، پارامتر مذکور در مجموعه آزمایش‌های WR_{1-1} و WR_{2-2} نسبت به شرایط بدون سرریز بین 3 تا 10 درصد کاهش یافت، که بیانگر تسریع نسبی در انتقال پیک غلظت و کاهش زمان تاخیر ردیاب در مسیر جریان است. در مقابل، در مجموعه آزمایش‌های WR_{1-0} و WR_{3-3} مقدار پارامتر مذکور بین 3 تا 8 درصد افزایش نشان داد. بررسی تغییرات پارامتر T_{pr} نشان داد که با افزایش عمق جریان به $0/2$ متر، کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در تمامی آرایش‌های مورد مطالعه موجب افزایش این پارامتر شده است، به‌طوری‌که پارامتر مذکور با کارگذاری سازه در دو طرف مسیر با فاصله نسبی $2/5$ ، از $0/6$ به $0/62$ ، با کارگذاری سازه فقط در قوس داخلی با همان فاصله از $0/60$ به $0/64$ ، با کارگذاری سرریز در دو طرف مسیر با فاصله نسبی 5 از $0/62$ به $0/60$ و با کارگذاری سازه در دو طرف مسیر با فاصله نسبی $1/7$ از $0/60$ به $0/63$ تغییر یافت.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که استقرار سرریزهای قوس رودخانه، متناسب با شرایط هیدرولیکی و نحوه آرایش سازه‌ها، موجب تغییر محسوس در رفتار زمانی ابر ردیاب می‌شود. در اغلب شرایط، حضور سرریزها با ایجاد نواحی گردابه‌ای و بازچرخش، تغییر توزیع سرعت، افزایش تبادل مومنتوم بین نواحی مختلف جریان و تقویت جریان‌های ثانویه همراه بوده و در نتیجه، موجب افزایش زمان حضور و گسترش زمانی ابر ردیاب در مسیر می‌شود. این تغییرات در افزایش پارامتر T_{dr} ، که بیانگر اختلاف زمان خروج ابر ردیاب از مقاطع بالادست و پایین‌دست است، بازتاب می‌یابد. بیشترین تغییر T_{dr} نسبت به حالت بدون سرریز، در آرایش WR_{1-0} ، یعنی استقرار سرریزها در قوس داخلی با فاصله نسبی $2/5$ ، در هر دو عمق جریان $0/1$ و $0/2$ متر مشاهده شد و مقدار این پارامتر تا حدود 40 درصد افزایش یافت. افزایش T_{dr} در این آرایش را می‌توان به شکل‌گیری نواحی بازچرخش در مجاورت سرریزهای واقع در قوس داخلی و ایجاد ناهمگنی بیشتر در میدان سرعت نسبت داد. چنین شرایطی می‌تواند موجب به‌دام‌افتادن موقت بخشی از ابر ردیاب در نواحی کم‌سرعت و بازچرخش و در نتیجه، افزایش کشیدگی زمانی منحنی غلظت در مقطع پایین‌دست شود. در مجموع، افزایش T_{dr} در حضور سرریزها را می‌توان نشانه‌ای از تغییر رژیم انتقال و افزایش زمان ماند نسبی ردیاب در مسیر دانست؛ با این حال، این پارامتر به‌تنهایی شاخص مستقیمی از شدت اختلاط نیست و تفسیر آن باید در کنار تغییرات Cr و D_L صورت گیرد. در واقع، هنگامی که افزایش T_{dr} هم‌زمان با افزایش Cr و D_L مشاهده شود، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش زمان ماند و کشیدگی زمانی ابر ردیاب با تقویت فرآیندهای اختلاط و پراکندگی همراه بوده است.

بررسی نتایج حاکی از آن است که کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های انتقال و اختلاط ردیاب در شرایط هیدرولیکی متفاوت دارد. به‌گونه‌ای که در جریان با عمق $0/1$ متر، حضور سرریزها موجب کاهش سرعت انتقال ردیاب شد، در حالی که در جریان با عمق $0/2$ متر افزایش سرعت انتقال ردیاب مشاهده گردید. به‌طور مشخص مقادیر

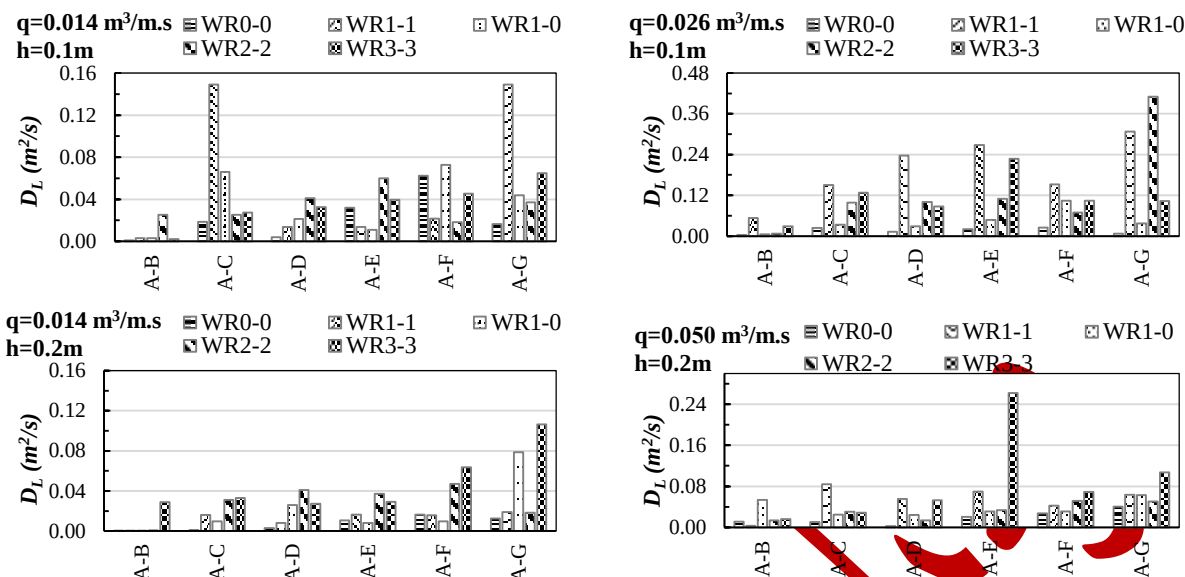
پارامتر U پس از کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در مجموعه آزمایش‌های W_{R1-0} ، W_{R1-1} ، W_{R2-2} و W_{R3-3} برای جریان با عمق $0/1$ به ترتیب برابر با $0/18$ ، $0/17$ ، $0/18$ و $0/15$ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد، در حالی که مقدار این پارامتر در حالت بدون سرریز (مجموعه آزمایش W_{R0-0}) $0/19$ متر بر ثانیه گزارش شد. کاهش سرعت انتقال در این شرایط را می‌توان به افزایش مقاومت هیدرولیکی، شکل‌گیری نواحی بازچرخش و ایجاد ناهمگنی بیشتر در میدان سرعت در اثر حضور سرریزها نسبت داد. در مقابل برای جریان با عمق $0/2$ متر، مقدار پارامتر سرعت انتقال ردیاب (U) از $0/14$ در حالت بدون سرریز به ترتیب به $0/16$ ، $0/15$ ، $0/16$ و $0/17$ متر بر ثانیه افزایش یافت. این افزایش را می‌توان ناشی از تغییر ساختار میدان جریان در اثر برهم‌کنش جریان با سرریزها و بازتوزیع مومنوم در مقطع دانست. در مجموع، تفاوت پارامتر U در دو عمق نشان می‌دهد که پاسخ سرعت انتقال ردیاب به حضور سرریزها، تابعی از برهم‌کنش میان هندسه سازه، عمق جریان و ساختار هیدرودینامیکی حاکم بر آبراهه است.

علی‌رغم تفاوت رفتار پارامتر U در عمق‌های مختلف جریان، نتایج نشان داد که ضریب پراکندگی طولی (D_L) با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در تمامی آرایش‌های مورد بررسی، افزایش یافت. به‌طوری که میانگین مقادیر پارامتر D_L در مجموعه آزمایش W_{R1-0} ، W_{R2-2} و W_{R3-3} به ترتیب $11/5$ ، 4 ، 12 و 22 برابر بیشتر از مقدار متناظر در مجموعه آزمایش W_{R0-0} گزارش گردید.

افزایش قابل توجه پارامتر D_L به‌ویژه در آرایش‌های W_{R2-2} و W_{R3-3} ، نشان‌دهنده آن است که سرریزها ظرفیت پراکندگی طولی ابر ردیاب را به‌طور محسوسی افزایش داده‌اند. این افزایش را نمی‌توان صرفاً به تغییر سرعت متوسط انتقال نسبت داد؛ زیرا در شرایط عمق $0/1$ متر، با وجود کاهش پارامتر U ، مقدار پارامتر D_L افزایش یافته است. از این‌رو، تغییر ساختار میدان جریان، ناهمگنی سرعت، جریان‌های ثانویه، نواحی بازچرخش و تبادل مومنوم می‌توانند از سازوکارهای محتمل مؤثر بر پراکندگی طولی باشند. این فرآیندها با ایجاد مسیرهای انتقال با سرعت‌های متفاوت و افزایش تبادل بین نواحی سریع و کند جریان، موجب کشیدگی و گسترش ابر ردیاب در راستای جریان می‌شوند.

مقایسه آرایش‌های مختلف سرریزها نشان داد که بیشترین مقدار ضریب پراکندگی طولی و در نتیجه، مؤثرترین عملکرد در تقویت پراکندگی و اختلاط ردیاب، مربوط به آرایش W_{R3-3} ، استقرار سرریزها در دو طرف مسیر با فاصله نسبی $1/7$ است. برتری این آرایش را می‌توان به فاصله کمتر بین سرریزهای متوالی و در نتیجه، تداوم بیشتر نواحی اختلال و برهم‌کنش هیدرودینامیکی میان سازه‌ها نسبت داد. استقرار متقارن سرریزها در دو طرف مسیر نیز می‌تواند با ایجاد اختلال در هر دو سوی آبراهه، تبادل عرضی مومنوم و تعامل میان جریان‌های ثانویه را تقویت کرده و در مقایسه با آرایش یک‌طرفه، شرایط مناسب‌تری برای توسعه و پراکندگی ابر ردیاب فراهم سازد.

در مجموع، مقایسه حالت بدون سرریز با آرایش‌های مختلف سرریزهای قوس رودخانه نشان داد که حضور این سازه‌ها، می‌تواند با تغییر ساختار میدان جریان و توزیع سرعت، بر فرآیند انتقال و پراکندگی آلاینده‌ها اثرگذار باشند. بر اساس مطالعات پیشین، این اثر می‌تواند با تغییر جریان‌های ثانویه، نواحی بازچرخش و آشفتگی موضعی همراه باشد. تقویت پراکندگی طولی در حضور سرریزها عمدتاً حاصل تغییر و پیچیده‌تر شدن ساختار میدان جریان است و الزاماً به افزایش سرعت متوسط انتقال ردیاب وابسته نیست. در میان آرایش‌های بررسی‌شده نیز W_{R3-3} ، با استقرار متقارن و فاصله نسبی کمتر بین سرریزها، بیشترین ظرفیت را برای افزایش پارامتر D_L و تقویت فرآیند پراکندگی نشان داد. مقایسه مقادیر پارامتر D_L در شرایط هیدرولیکی و آرایش‌های مختلف سرریز در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵. مقایسه عملکرد سرریزهای قوس رودخانه بر آرایش‌های گوناگون برای بیشینه و کمینه دبی واحد عرض با دو عمق جریان ۰/۱ و ۰/۲ متر بر روی پارامتر ضریب پراکندگی طولی

یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش حاضر، تاثیر قابل توجه سرریزهای قوس رودخانه بر فرآیند اختلاط و افزایش ضریب پراکندگی طولی بود. نتایج نشان داد که استقرار این سازه‌ها در تمامی آرایش‌های مورد بررسی، موجب افزایش مقادیر پارامتر D_L و بهبود شاخص Cr شده است. که بیانگر گسترش و پراکندگی بیشتر ابر ردیاب در طول آبراهه است. این رفتار را می‌توان با تغییر ساختار میدان جریان و افزایش ناهمگنی توزیع سرعت در اثر حضور سازه‌ها مرتبط دانست. همچنین، بر اساس یافته‌های مطالعات پیشین، تغییر جریان‌های ثانویه، ایجاد نواحی بازچرخش و افزایش آشفتگی موضعی می‌تواند در گسترش و کشیدگی ابر ردیاب و در نتیجه افزایش پراکندگی طولی نقش داشته باشد. با این حال، از آنجا که این کمیت‌ها در پژوهش حاضر به صورت مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند، این موارد به عنوان سازوکارهای محتمل تفسیر می‌شوند، نه نتایج مستقیم آزمایش. نتایج حاصل از این پژوهش از نظر مفهومی با مطالعات Chen et al. (2016)، Sharma and Ahmad (2018)، Ratha et al. (2018)، بیاره‌پور و همکاران (۱۳۹۸) و منصوری کارگر و همکاران (۱۴۰۰) همسو است. پژوهشگران مذکور نیز نشان داده‌اند که استقرار موانع و سازه‌های هیدرولیکی در مسیر جریان، با ایجاد تغییر در ساختار جریان، افزایش ناهمگنی سرعت و تقویت جریان‌های عرضی و گردابه‌ای، می‌تواند فرآیند انتقال و اختلاط ماده ردیاب را تشدید کند. بنابراین، اگرچه نوع و هندسه سازه‌های مورد استفاده در مطالعات مختلف متفاوت بوده است، اثر مشترک آن‌ها را می‌توان در تغییر ساختار میدان جریان و افزایش تبادل بین بخش‌های مختلف جریان جست‌وجو کرد.

به نظر می‌رسد کاهش فاصله بین سرریزهای متوالی در آرایش WR_{3-3} ، موجب تداوم بیشتر نواحی اختلال و افزایش اندرکنش هیدرودینامیکی میان سازه‌های متوالی شده باشد. همچنین، استقرار سازه‌ها در دو طرف مسیر می‌تواند با ایجاد اختلال در هر دو سوی آبراهه و تغییر هم‌زمان میدان جریان در نواحی داخلی و خارجی پیچان‌رود، تبادل عرضی مومنتوم و انتقال بین نواحی مختلف جریان را تقویت کند. این نتیجه با یافته‌های Sharma and Ahmad (2018) مبنی بر افزایش کارایی اختلاط در اثر افزایش برهم‌کنش ساختارهای گردابه‌ای همخوانی دارد.

به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر ضمن تأیید بخش قابل توجهی از یافته‌های مطالعات پیشین، نشان داد که سرریزهای قوس رودخانه، علاوه بر نقش متداول خود در حفاظت از کناره‌ها و کنترل فرسایش، می‌توانند با تغییر ساختار هیدرودینامیکی جریان، بر فرآیند انتقال، اختلاط و پراکندگی آلاینده‌ها نیز اثرگذار باشند. وجه تمایز این پژوهش با مطالعات پیشین، بررسی نظام‌مند اثر آرایش و فاصله نسبی

سرریزهای قوس رودخانه بر پارامترهای انتقال و پراکندگی ردیاب در یک آبراهه پیچان‌رودی با بستر صلب و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف است. نتایج نشان داد که انتخاب مناسب آرایش و فاصله استقرار این سازه‌ها می‌تواند موجب افزایش پارامتر D_L و کاهش پیک غلظت آلاینده در پایین‌دست شود. از این منظر، استفاده هدفمند از این سازه‌ها، علاوه بر اهداف هیدرولیکی و حفاظت کناره‌ها، می‌تواند از نظر بهبود شرایط پراکندگی آلاینده و افزایش پتانسیل خودپالایی رودخانه نیز قابل توجه باشد، هرچند ارزیابی مستقیم اثر آن‌ها بر خودپالایی نیازمند بررسی هم‌زمان فرآیندهای واکنش، تجزیه و مصرف آلاینده در مقیاس زمانی و مکانی واقعی رودخانه است. همچنین پژوهش حاضر دارای برخی محدودیت‌ها است. آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و در یک کانال با بستر صلب انجام شدند، میدان سرعت و جریان‌های ثانویه به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشدند. از این‌رو، تعمیم نتایج به شرایط رودخانه‌های طبیعی باید با احتیاط انجام شود و بررسی هم‌زمان شرایط هیدرولیکی طبیعی، بستر متحرک و فرآیندهای مرتبط با رسوب در مطالعات آینده ضروری است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، تأثیر آرایش‌های مختلف سرریزهای قوس رودخانه بر انتقال ردیاب و ضریب پراکندگی طولی (D_L) در یک پیچان‌رود آزمایشگاهی با بستر صلب و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که دبی واحد عرض، عمق جریان و فاصله نسبی سازه‌ها از عوامل مؤثر بر رفتار انتقال و پراکندگی ردیاب هستند. در اغلب شرایط، افزایش دبی واحد عرض و کاهش عمق جریان موجب افزایش سرعت انتقال ردیاب (U) و کاهش پارامترهای Cr (نسبت کاهش بیشینه غلظت ردیاب بین منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت در مقاطع ورودی و خروجی)، T_{pr} (اختلاف زمان رسیدن غلظت به مقدار بیشینه در ابتدای و انتهای هر آزمایش) و T_{dr} (اختلاف زمان خروج ابر ردیاب از نقاط اندازه‌گیری بالادست و پایین‌دست در هر آزمایش) شد. همچنین، افزایش فاصله نسبی و طول مسیر انتقال، در اغلب شرایط با افزایش پارامتر D_L همراه بود. مقایسه حالت بدون سرریز با آرایش‌های مختلف نشان داد که در بازه‌های طولانی‌تر استقرار سرریزهای قوس رودخانه در آرایش‌های مورد بررسی موجب افزایش D_L و Cr و در نتیجه، افزایش پراکندگی و کاهش پیک غلظت ردیاب شد. با وجود آنکه اثر سرریزها بر سرعت انتقال ردیاب به عمق جریان وابسته بود، افزایش D_L در غالب آرایش‌ها نشان داد که تقویت پراکندگی طولی صرفاً تابع سرعت متوسط جریان نیست و تغییر ساختار میدان جریان و افزایش تبادل بین نواحی مختلف جریان نیز می‌تواند در آن نقش داشته باشد. در میان آرایش‌های بررسی‌شده WR_{3-3} ، شامل استقرار متقارن سرریزها در دو طرف مسیر با فاصله نسبی $1/7$ ، بیشترین مقدار D_L و بالاترین میزان کاهش پیک غلظت را ایجاد کرد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مناسب آرایش و فاصله استقرار سرریزهای قوس رودخانه می‌تواند علاوه بر اهداف حفاظتی، به‌عنوان ابزاری هیدرولیکی برای تقویت پراکندگی و بهبود اختلاط آلاینده‌ها مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- آزادان، یعقوب، عمادی، علیرضا، چابک‌پور، جعفر و دانشفراز، رسول. (۱۳۹۷). مطالعه آزمایشگاهی و عددی جابجایی و پراکندگی آلودگی در رودخانه‌های با یستر سنگریزه‌ای. نشریه آب و خاک. ۲۸ (۴)، ۱۲۷-۱۳۹.
- منصوری کارگر، سمیه، شفاعی بجستان، محمود و زایری، محمدرضا. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی اثر سرریزهای مستطیلی و U شکل بر ضریب اختلاط عرضی و طول اختلاط آلاینده‌ها. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷ (۱)، ۲۹۰-۳۰۱.
- نجومی سیاه‌مرد، سمانه؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ اسمعیلی ورکی، مهدی؛ دهقانی، امیراحمد و ظهیری، عبدالرضا (۱۴۰۲). تأثیر تغییرات ناهم‌واری بستر بر پارامترهای اختلاط آلاینده‌ها در پیچان‌رود. مجله آب و فاضلاب، ۳۴ (۵)، ۶۶-۸۸.
- نجومی سیاه‌مرد، سمانه؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ اسمعیلی ورکی، مهدی؛ دهقانی، امیراحمد و ظهیری، عبدالرضا (۱۴۰۵). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سرریزهای قوس رودخانه بر انتقال آلاینده در رودخانه‌های پیچان‌رودی با بستر رسوبی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۱)، ۱۴۹-۱۲۷.

بیاره‌پور، الهام، شفاعی‌بجستان، محمود. و کاشفی‌پور، محمود. (۱۳۹۸). بررسی اثرات صفحه‌مثلثی بر توزیع غلظت آلاینده و الگوی جریان در کانال‌های مستقیم. نشریه مهندسی عمران فردوسی. ۳۲(۳): ۱۷-۳۲.

REFERENCES

- Azhdan, Y., Emadi, A. R., Chabokpour, J., & Daneshfaraz, R. (2018). Experimental and numerical study of advection–dispersion of pollutant in gravel bed rivers. *Water and Soil Science*, 28, 127–139. (In Persian).
- Baek, K. O., & Seo, I. W. (2010). Routing procedures for observed dispersion coefficients in two-dimensional river mixing. *Advances in Water Resources*, 33(12), 1551–1559. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.005>
- Baek, K. O., & Seo, I. W. (2013). Empirical equation for transverse dispersion coefficient based on theoretical background in river bends. *Environmental Fluid Mechanics*, 13, 465–477. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9276-5>
- Baek, K. O., & Seo, I. W. (2016). On the methods for determining the transverse dispersion coefficient in river mixing. *Advances in Water Resources*, 90, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.01.009>
- Bielski, A. (2021). Mixing effects in the river downstream from pollution discharge point. *Technical Transactions*, 118(1), e2021004. <https://doi.org/10.37705/techtrans/e2021004>
- Chen, Y., Wang, Z., Zhu, D., & Liu, Z. (2016). Longitudinal dispersion coefficient in ice-covered rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 54(5), 558–566. doi: 10.1080/00221686.2016.1175519
- Fischer, H. B. (1968). Methods for predicting dispersion coefficients in natural streams: With applications to lower reaches of the Green and Duwamish Rivers, Washington (Professional Paper 582-A). U.S. Geological Survey.
- Launay, M., Le Coz, J., Camenen, B., Walter, C., Angot, H., Dramais, G., Faure, J.-B., & Coquery, M. (2015). Calibrating pollutant dispersion in 1-D hydraulic models of river networks. *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(1), 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.07.005>
- 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).
- Nogare, M. A., & Bauer, B. O. (2022). A field-based evaluation of the reliability of empirical formulae for quantifying the longitudinal dispersion coefficient in small channels. *Geosciences*, 12(7), Article 281. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070281>
- Nojourni 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 rivers. *Journal of Water and Wastewater*, 34(5), 66–88. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.412853.3368>
- Nojourni Siahmard, S., Meftah Halaghi, M., Esmaeili Varaki, M., Dehghani, A., & Zahiri, A. (2026). Laboratory study of the effect of bendway weirs on pollution transfer in meandering rivers with sedimentary bed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33(1), 127–149. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2025.22996.3772>.

- Park, I., & Seo, I. W. (2018). Modeling non-Fickian pollutant mixing in open channel flows using a two-dimensional particle dispersion model. *Advances in Water Resources*, 111, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.035>
- Park, I., Seo, I. W., Shin, J., & Song, C. G. (2020). Experimental and numerical investigations of spatially varying dispersion tensors based on vertical velocity profile and depth-averaged flow field. *Advances in Water Resources*, 142, Article 103606. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103606>
- Park, S. W., & Ahn, J. (2019). Experimental and numerical investigations of primary flow patterns and mixing in laboratory meandering channels. *Smart Water*, 4(1), Article 4. <https://doi.org/10.1186/s40713-019-0016-y>
- Ratha, D., Chandra, A., Babbar, R., & Sarkar, A. (2018). Longitudinal dispersion subjected to rigid vegetation in a channel. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(12), 5242–5252. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2894-6>
- 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(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001118)
- Sharma, H., & Ahmad, Z. (2012). *A new technique for enhancing transverse mixing of pollutants in streams*. International Conference on Environmental Research.
- Sharma, H., & Ahmad, Z. (2018). Enhancing transverse mixing in streams with submerged vanes. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(3), 661–681. <https://doi.org/10.1007/s10652-017-9565-5>
- 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124302.
- Starosolszky, O. (1994). Mixing of pollutants in rivers. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 38(3), 289–302.
- Yebarehpour, E., Shafai Bejestan, M., & Kashefipour, S. M. (2019). Investigation of transverse distribution of pollutant and flow pattern in the presence of triangular vanes in straight channels. *Ferdowsi Civil Engineering*, 32(3), 17–34. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/civil.v32i3.70258>