

بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر سدهای اصلاحی گابیونی بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) در انتقال آلودگی در رودخانه‌ها

زهرا نیکبخت^۱، علیرضا عمادی^{۲*} و محمد میرناصری^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: کارشناس ارشد؛ دانشیار؛ و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۶

چکیده

سدهای اصلاحی گابیونی از انواع سازه‌هایی هستند که با توجه به متخلخل بودن محیط‌شان می‌توانند نقش مهمی در کنترل آلودگی رودخانه‌ها و آبراهه‌ها داشته باشند. مدل نگهداشت موقت (TSM) یکی از روش‌های تحلیل انتقال آلودگی در مجاری باز به‌شمار می‌آید که دقت آن در تخمین صحیح پارامترهای چهارگانه مدل (D_x ، A_s ، A و α) است. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تاثیر سدهای گابیونی بر انتقال آلودگی و همچنین پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از مدل عددی OTIS پرداخته شد. آزمایش‌های ماده ردیاب (NACL) در یک کانال آزمایشگاهی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع دیواره ۰/۷ متر اجرا شد. بستر رسوبی از مصالح شنی با قطر متوسط (D_{50}) ۱۱/۸۵ میلی‌متر و تخلخل (N) ۰/۲۸ به طول ۱۲ متر و ضخامت ۱۲ سانتی‌متر در کف کانال آزمایشگاهی ایجاد شد. در این مطالعه، از دو نوع سد اصلاحی گابیونی با تخلخل‌های مختلف مصالح با اندازه میانه (D_G) ۱۱ میلی‌متر (ریزدانه) و ۱۹ میلی‌متر (درشت‌دانه) در تعداد (N) و طول‌های (A) مختلف استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش تعداد سدهای گابیونی (N) از یک به سه، موجب خواهد شد تا ضریب پراکندگی طولی (D_x) حدود ۱/۴۳ تا ۱/۷۱ برابر شود. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد که افزایش طول سدهای گابیونی (A) موجب افزایش حدود ۱/۴۳ تا ۲/۴۹ برابر در مقدار ضریب پراکندگی طولی (D_x) و افزایش حدود ۱/۱۰ تا ۴/۴۳ برابر در ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) می‌شود. نتایج به‌دست آمده حاکی از افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) با استفاده از مصالح ریزدانه‌تر در بدنه سدهای گابیونی است.

واژه‌های کلیدی

انتقال-پراکندگی، ضریب پراکندگی طولی (D_x)، ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α)، نواحی نگهداشت

مقدمه

و کنترل آن‌ها هستند.

مشخصات فیزیکی، هندسی و هیدرولیکی آبراهه‌ها و رودخانه‌ها در انتقال آلودگی نقش مهمی دارند (Chapra, 1997). ذخیره موقت آلودگی در نواحی ماندابی آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، پیمان‌رود بودن

امروزه آلودگی یکی از چالش‌های مدیریتی کشورهاست و انتقال و انتشار آن تابعی از فرآیند روزافزون جمعیت است. در این خصوص پژوهشگران به دنبال روش‌های مختلف به‌منظور کاهش آلاینده‌ها

α مدل ذخیره موقت (TSM) موجب افزایش کارایی این مدل برای شبیه‌سازی دقیق‌تر انتقال آلودگی خواهد شد. روش‌های میدانی برای تخمین پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از تزریق لحظه‌ای یا ثابت ماده ردیاب معمولاً فقط برای اندازه‌گیری منحنی‌های غلظت- زمان (رخنه)^۲ برای تعریف شرایط مرزی بالادست، شرایط اولیه و شرایط پایین‌دست در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تاثیر عوامل متعددی بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM)، تخمین و تفسیر منحصر به فرد پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از روش‌های میدانی معمولاً همواره با چالش‌هایی در محاسبات همراه خواهد بود (Phanikumar *et al.*, 2007; Camacho & González, 2008; Kelleher *et al.*, 2013). پیاده‌سازی نرم‌افزاری رایگان و در دسترس با رویکرد انتقال تک‌بعدی املاح با ذخیره‌سازی موقت برای حل مدل نگهداشت موقت (TSM) تحت عنوان OTIS^۱ و مدل‌سازی معکوس آن تحت عنوان OTIS-P راه مناسبی برای محققان در این زمینه برای پیش‌بینی انتقال املاح و همچنین تخمین پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از داده‌های ردیاب فراهم می‌کند (Runkel, 1998). یکی از دلایل اصلی محبوبیت مدل عددی OTIS، سادگی و سهولت استفاده جامعه پژوهشی از نظر جمع‌آوری، آماده‌سازی و کاربرد داده‌هاست (Rana *et al.*, 2019).

در مطالعات متعدد گزارش شده‌است که تفاوت‌ها

مسیر جریان، و فرم‌بسترهای شکل گرفته در ناحیه رسوبی عواملی هستند که تغییرات زیادی را در نحوه انتقال آلودگی، مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه بستر رسوبی، کل زمان پیمایش، غلظت اوج آلودگی در ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی ایجاد می‌کنند. بنابراین استفاده از معادله انتقال-پراکنندگی کلاسیک^۱ (ADE) برای رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی دارای شرایط خاص جریان با اشکالات فراوان در پیش‌بینی نحوه انتقال آلودگی همراه خواهد بود (Seo & Cheong, 2001). بانکالا و والترز (Bencala & Walters, 1983) برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه‌های دارای نواحی ماندابی، مدل ذخیره موقت^۲ (TSM) را مطابق روابط (۱) و (۲) پیشنهاد دادند:

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

$$\frac{dC_s}{dt} = -\alpha \frac{A}{A_s} (C_s - C) \quad (2)$$

که در آنها،

A = مساحت مقطع عرضی ناحیه جریان اصلی^۳؛
 A_s = مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت^۴؛
 C = غلظت ماده حل شده در ناحیه اصلی جریان؛
 C_s = غلظت ماده حل شده در ناحیه نگهداشت؛
 D_x = ضریب پراکنندگی طولی^۵؛ Q = دبی جریان؛
 t = زمان؛ x = فاصله از محل تزریق آلودگی؛
 α = ضریب تبادل ناحیه نگهداشت^۶.

برآورد دقیق پارامترهای چهارگانه (A ، A_s ، D_x) و

1- Advection-Dispersion Equation (ADE)
 3- Main Channel Cross-Sectional Area
 5- Longitudinal Dispersion Coefficient
 7- Breakthrough Curves (BTCs)

2- Transient Storage Model (TSM)
 4- Storage Zone Cross-Sectional Area
 6- Storage Zone Exchange Coefficient
 8- One-Dimensional Transport with Inflow and Storage (OTIS)

در مقدار جریان به طور قابل توجهی پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) را تغییر می‌دهند. والت و همکاران (Vallet *et al.*, 1996) پارامترهای TSM را برای بازه‌های متفاوت با جریان‌های مختلف تخمین زدند و ارتباط معنی‌داری بین پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) و مقدار جریان یافتند. رانا و همکاران (Rana *et al.*, 2019) با بررسی قطعیت پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) با تغییر مقدار جریان نتیجه گرفتند که پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) در دبی‌های جریان بالا با محدودیت‌های عدم قطعیت دارای اهمیت کم‌تری خواهند شد و در واقع اهمیت پارامترهای این مدل در حمل و نقل املاح با کاهش جریان، افزایش می‌یابد.

عدم قطعیت پارامترها باید در اکثر روش‌های تخمینی در نظر گرفته شود و به‌ویژه هنگام مقایسه پارامترهای تخمین زده شده برای بازه‌های مختلف یا آزمایش‌های ردیاب با دبی‌های جریان مختلف مفید است. اطلاعات عدم قطعیت در مورد پارامترها بینش بیشتری در مورد وجود همبستگی یا نبود همبستگی بین پارامترها ارائه می‌دهد (Rana *et al.*, 2019). عدد دام‌کولر (Dal) عددی است بی‌بعد که نشان‌دهنده میزان تبادل بین ناحیه اصلی جریان و ناحیه نگهداشت موقت در طول (X) از مسیر جریان آبراهه با سرعت متوسط (V) است و مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$Dal = \alpha \left(1 + \frac{A}{A_s} \right) \frac{X}{V} \quad (3)$$

در واقع مقدار این عدد می‌تواند قابلیت اعتماد به پارامترهای برآورد شده توسط مدل ذخیره موقت (TSM) را نشان دهد. بزرگ بودن بازه این عدد

نشان می‌دهد که میزان انتقال آلودگی در نواحی نگهداشت موقت در طول مسیر جریان زیاد است و این امر می‌رساند که تبادل آلودگی در ناحیه اصلی جریان کند است که در این شرایط مقادیر تخمینی α و A_s دارای عدم قطعیت‌اند و از سوی دیگر کوچک بودن بازه این عدد ($Dal < 0.01$) نشان‌دهنده آن است که میزان انتقال آلودگی در نواحی نگهداشت موقت در طول مسیر جریان بسیار کم است و در واقع جریان بدون نگهداشت موقت در ناحیه اصلی جریان منتقل می‌شود که در این شرایط نیز برای مقادیر تخمینی α و A_s عدم قطعیت وجود دارد. در این پژوهش برای بررسی اعتمادپذیری پارامترهای برآورد شده مدل ذخیره موقت (TSM) از عدد دام‌کولر (Dal) استفاده شد و مطابق تحقیقات، محدوده ۰/۱ تا ۱۰ به عنوان بازه قابل اعتماد برای این عدد در نظر گرفته شد (Bahr & Rubin, 1987; Wagner & Harvey, 1997; Fernald *et al.*, 2001; Ramaswami *et al.*, 2005; Jin *et al.*, 2009; Zaramella *et al.*, 2016; Azhdan, 2018; Mirnaseri, 2021).

سوکاک (Sokác, 2017) طی پژوهشی به بررسی ضریب پراکندگی طولی (D_x) در سه آبراهه دارای پوشش گیاهی در کشور اسلواکی پرداخت و نتیجه گرفت که حضور پوشش گیاهی عاملی مهم در نگهداشت موقت آلودگی است و از مدل ذخیره موقت (TSM) برای ارزیابی ضریب پراکندگی طولی (D_x) استفاده کرد. وی همچنین این نتایج را با حل تحلیلی و همچنین نتایج خروجی مدل عددی تحت عنوان OTIS^۱ مقایسه کرد. وی در مطالعات خود نشان داد که در یکی از این آبراهه‌ها که پوشش گیاهی بیش‌تری داشته است، نسبت مساحت ناحیه ذخیره (A_s) به ناحیه اصلی جریان (A) در این آبراهه در مقایسه با دو آبراهه دیگر بیش‌تر است.

پیچیدگی‌ها، الگوریتم IMSA می‌تواند پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت (TSM) را با دقت بالایی پیش‌بینی کند. میرناصری و همکاران (Mirnaseri *et al.*, 2021, b) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی انتقال آلودگی در جریان‌های رودخانه‌ای با فرم بستر خیزاب-چالاب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نقش ذخیره موقت در معادله انتقال-پراکندگی کلاسیک (ADE) در انتقال آلودگی جریان‌های باز در نظر گرفته نشده است و از این رو حل تحلیلی این معادله در پیش‌بینی ضریب پراکندگی طولی (D_x) در جریان‌های با فرم بستر، که نقش ذخیره موقت به دلیل تبادلات هاپریک بسیار مشهود بوده، مناسب ارزیابی نشده است. این نتیجه‌گیری با نتایج بررسی‌های (Seo & Cheong, 2005) در نواحی دارای مناطق ذخیره موقت مئاندری و ماندابی مطابقت دارد. این دو محقق استفاده از مدل عددی OTIS را که مبتنی بر مدل نگهداشت موقت (TSM) بوده است در این‌گونه ارزیابی‌ها مناسب دانستند.

دیواید و همکاران (Dewaide *et al.*, 2016) با بررسی انتقال املاح در سیستم‌های کارستی ناهمگن با استفاده از مدل عددی OTIS از طریق نمونه برداری ماده ردیاب و هم‌چنین با برآورد پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) به این نتیجه رسیدند که مدل‌های مفهومی ارائه شده توسط مدل عددی OTIS، دقیق و واقع‌گرایانه است و به شدت با منحنی‌های رخنه برداشت‌های میدانی مطابقت دارند. آنالیزهای حساسیت در این مطالعه نشان داد که مدل عددی OTIS پایدار است و معادلات حاکم بر مدل عددی OTIS را علتی برای پایداری این نرم‌افزار دانستند. مدل عددی OTIS را دارای امکان گسسته‌سازی سیستم مورد بررسی به ویژه در

آزدان و همکاران (Azhdan *et al.*, 2019) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) با استفاده از مدل عددی OTIS-P در رودخانه‌های سنگریزه‌ای بدون فرم بستر را برآورد و انطباق منحنی‌های رخنه بازتولید شده توسط حل عددی و همچنین نتایج آزمایشگاهی را مناسب ارزیابی کردند و دقت بالای مدل عددی OTIS-P را با شاخص‌های آماری در تخمین پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) نتیجه گرفتند و در نهایت اعتبار این پارامترها را با استفاده از عدد بدون بعد دام‌کولر (Dal) تایید کردند. این محققان روند افزایشی مساحت ناحیه اصلی جریان (A) و مساحت ناحیه نگهداشت (A_s) در مقابل افزایش دبی جریان را نتیجه گرفتند.

وارد و همکاران (Ward *et al.*, 2018) با چهار آزمایش ماده ردیاب در دو بازه مختلف رودخانه و با افزایش دبی جریان، ضریب تغییرات α و A_s را کاهش و ضریب تغییرات D و A_s را افزایش برآورد کردند. نپ و کلر (Knapp & Kelleher, 2020) در پژوهشی، مدل ذخیره موقت (TSM) را به دلیل سازگاری و قابلیت دسترسی از پرکاربردترین ابزارها در بررسی و فرآیندهای حمل و نقل و مبادله املاح در جریان دانستند. در این مطالعه، چشم‌انداز چگونگی استفاده از مدل ذخیره موقت (TSM) برای بهبود درک از حمل و نقل املاح بررسی و پیشنهادهایی ارائه شد. مددی و همکاران (Madadi *et al.*, 2020) در مطالعه‌ای برای پیش‌بینی پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) از نسخه بهبودیافته الگوریتم^۱ (IMSA) استفاده کردند و با استفاده از ۵۸ داده هیدرولیکی و هندسی اندازه‌گیری شده به بررسی دقت مدل پرداختند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد که به‌رغم

ایجاد نواحی نگهداشت^۲ به صورت مصنوعی، موجب ذخیره موقت آلودگی شوند و بنابراین بخش عمده‌ای از غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در نقاط پایین دست جریان کاهش می‌یابد و از سوی دیگر، محیط متخلخل این‌گونه سدها تأثیرات زیادی در میزان تبدلات هایپرریک^۳ دارد و همین امر موجب تغییر مدت زمان ماند^۴ آلاینده‌ها در جریان‌های آبراهه‌ها و رودخانه‌ها خواهد شد.

رائو و همکاران (Rao *et al.*, 2018) با استفاده از یک آبشکن متخلخل در کانال آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده کانال فاضلاب میزان حذف آلاینده را قبل و بعد از ساخت آبشکن بررسی کردند. در این تحقیق برای محاسبه میزان حذف آلاینده با اتصال به میدان جریان داخلی نواحی متخلخل آبشکن از نیترات استفاده شد. تغییرات کل میزان حذف آلاینده‌ها در کانال، با توجه به تخلخل‌های مختلف و فاصله رخنه بین آبشکن و سرعت جریان ورودی بررسی شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که آبشکن متخلخل می‌تواند به‌طور موثری ظرفیت نیترات موجود را بهبود بخشد.

رانا و همکاران (Rana *et al.*, 2017) اثر سرریزهای در مسیر جریان رودخانه را بر ذخیره موقت آلودگی بررسی کردند. آن‌ها یک آبراهه زهکشی به طول تقریبی ۱ کیلومتر و با شیب نسبی ۰/۰۵۶ را در جنوب ویرجینیا^۵ برای مطالعات خود برگزیدند و با ساخت یک سری از سرریزها در مسیر جریان در سه حالت: ۳ سرریز در مسیر جریان، ۷ سرریز در مسیر جریان و ۱۰ سرریز در مسیر جریان و تزریق کلرید سدیم (NaCl) به عنوان منبع آلودگی و با استفاده از نرم‌افزار OTIS-P به حل عددی مدل ذخیره موقت (TSM) در انتقال آلودگی پرداختند.

سیستم‌های دارای هندسه‌های ناهمگن نتیجه گرفتند. نتایج تحقیقان آن‌ها نشان داد که ذخیره موقت فرآیندی اصلی در مناطق سیل‌خیز است و تأثیر عمده‌ای بر شکل منحنی‌ها رخنه دارد.

میرناصری و همکاران (Mirnaseri *et al.*, 2021) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی تأثیر ضخامت بستر رسوبی و شکل بستر تلماسه را بر انتقال آلودگی در آبراهه‌ها بررسی و پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) را با استفاده از مدل عددی OTIS-P و نیز روش گشتاورگیری زمانی^۱ برآورد کردند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد که افزایش پارامتر بی بعد نسبت ضخامت بستر رسوبی به عمق جریان $(\frac{d_b}{d})$ باعث کاهش ضریب پراکندگی طولی (D_x)، کاهش (A_s) و کاهش (α) می‌شود. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد که تأثیر وجود شکل بستر تلماسه بر تغییرات پارامترهای مدل (TSM) تا محدوده $Fr < 0.1$ است. این محققان نتیجه گرفتند که منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی OTIS تطابق بالایی با منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی دارد و نیز اینکه پارامترهای تخمینی توسط مدل عددی OTIS-P را دارای روند تقریباً یکسان تغییرات و مقادیر نسبتاً برابر با روش گشتاورگیری زمانی ارزیابی کردند.

یکی از راه‌کارهای کنترل آلودگی، استفاده از سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه‌هاست و سدهای اصلاحی گابیونی نیز یکی از انواع این سازه‌ها هستند که فرض می‌شود با توجه به متخلخل بودن این‌گونه سدها می‌توانند نقش مهمی در کنترل آلودگی و کمک به خودپالایی رودخانه داشته باشند (Pal & Galelli, 2019) خلل و فرج ایجاد شده در محیط داخلی سدهای اصلاحی گابیونی می‌تواند با

1- Temporal Moment Approach (TM)
3- Hyporheic Exchange
5- Virginia

2- Storage Zone
4- Residence Time

آزمایشگاهی دارای کف و دیواره شیشه‌ای به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از جنس پلاکسی‌گلاس است. برای ایجاد جریان در کانال آزمایشگاهی از دو پمپ با حداکثر دبی جریان تحویلی ۶۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد. دبی خروجی از پمپ با شیر اهرمی تعبیه شده روی لوله رانش پمپ و در سه محدوده ۲/۵، ۵ و ۷/۵ لیتر بر ثانیه تنظیم شد.

طبق تحقیقات آزدان (Azhdan, 2018)، محدوده قطر ذرات بسیار درشت‌دانه در بستر رودخانه‌ها موجب تبادل سریع بین محیط متخلخل و بدنه اصلی جریان می‌شود و آلودگی مستقیماً به پایین دست هدایت می‌گردد و تبادلات هاپریک بسیار ناچیز خواهد بود. از سوی دیگر، ذرات بسیار ریزدانه در بستر رودخانه‌ها نیز موجب تبادل کند بین دو محیط می‌شود و در نتیجه مدت زمان عبور آلاینده‌های محلول در جریان آب از محیط متخلخل بسیار طولانی خواهد بود. بنابراین، در آزمایش‌های تحقیق حاضر به منظور ایجاد بستر رودخانه‌ای در کانال آزمایشگاهی، از مصالح بستر سنگریزه‌ای با قطر متوسط (D₅₀) ۱۱/۸۵ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی (σ_g) ۱/۵۵ و تخلخل (n) ۰/۲۸ استفاده شد. یک بستر رسوبی با ضخامت ۱۲ سانتی‌متر، عرض ۰/۵ متر و طول ۱۲ متر در کف کانال آزمایشگاهی ایجاد شد.

به منظور طراحی سدهای گابیونی و تعبیه آن در مسیر جریان، از دو نوع سد گابیونی با تخلخل مختلف مصالح با اندازه میانه (d_g) ۱۱ میلی‌متر (ریزدانه) و ۱۹ میلی‌متر (درشت‌دانه) استفاده شد. در هر یک از آزمایش‌ها (به غیر از آزمایش شاهد) از ۱ تا ۳ سد گابیونی در فواصل ۲/۵، ۵ و ۷/۵ متری از ابتدای کانال آزمایشگاهی و عمود بر جهت جریان استفاده شد. سدهای به کار رفته در این پژوهش با

این محققان نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد سرریزها، پارامترهای مساحت ناحیه اصلی جریان (A) و مساحت ناحیه ذخیره (As) افزایش می‌یابد ولی مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) کاهش پیدا می‌کند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد که وجود سدهای گابیونی در رودخانه‌ها صرفاً از نگاه هیدرولیکی بررسی شده است در حالی که وجود این سازه‌ها در مسیر جریان روی مسائل زیست محیطی مانند انتقال آلودگی نیز موثر خواهند بود. در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر وجود سدهای گابیونی در انتقال و پراکندگی آلودگی رودخانه‌ها و آبراهه‌ها با شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی ماده ردیاب، حالت‌های مختلف سدهای گابیونی در طول و تعداد متفاوت با تخلخل‌های مختلف ریزدانه و درشت‌دانه در بدنه این سدها ایجاد شد. پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت (TSM) با استفاده از مدل عددی OTIS-P تخمین زده شد و سپس با استفاده از این پارامترها، منحنی‌های رخنه با مدل عددی OTIS بازتولید و با منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی ماده ردیاب مقایسه شدند. در بخش دیگری از پژوهش نیز تاثیر تفاوت طول، تعداد و تخلخل بدنه سدهای گابیونی بر مقدار تغییرات پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت (TSM) نیز بررسی و نتیجه‌گیری شد.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در کانال آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. طول این کانال ۱۲ متر، عرض آن ۰/۵ متر، عمق آن ۰/۷ متر است، شیب طولی ۰/۰۰۶ در نظر گرفته شد. این کانال

طول‌های متفاوت ۰/۷۵ و ۰/۳۵ متر، استفاده شدند. عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۴ متر در نظر گرفته و در تمامی آزمایش‌ها به صورت غیرمستغرق و در شکل (۱) سد گابیونی تعبیه شده در کانال آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۱- سد گابیونی تعبیه شده در کانال آزمایشگاهی

Fig. 1- Gabion Dam Located in Flume

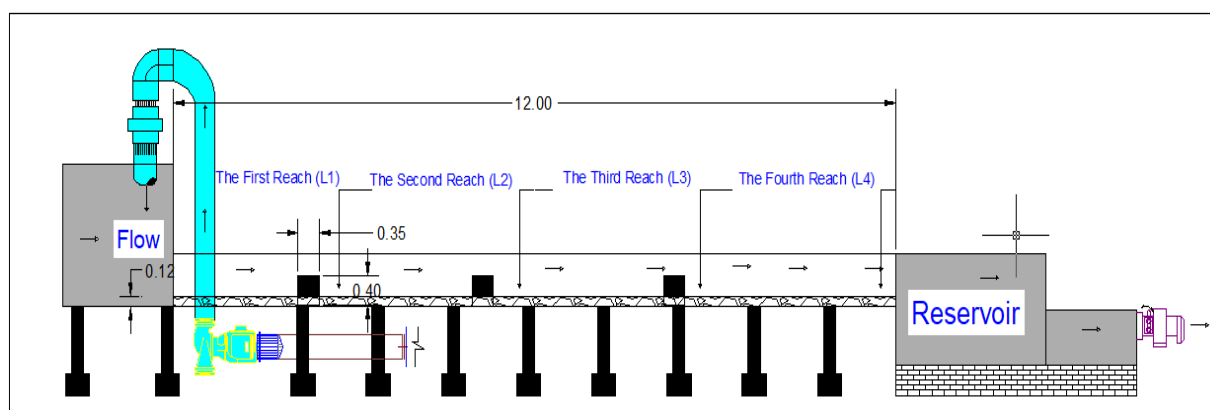
جریان در نظر گرفته شد. مادهٔ ردیاب تزریقی به کانال آزمایشگاهی در جریان آب حل می‌شود و به سمت پایین دست حرکت می‌کند. به منظور جلوگیری از برگشت آلودگی به جریان ورودی، جریان آب در این کانال آزمایشگاهی به صورت یک‌طرفه طراحی شد. آب از منبع هوایی از طریق چاه آب تامین و با سه پمپ با قابلیت تامین حداکثر دبی جریان ۶۰ لیتر بر ثانیه به داخل کانال آزمایشگاهی وارد می‌شود. به سخی دیگر، جریان آب تازه به صورت مداوم به داخل حوضچه وارد و جریان همراه با آلودگی از انتهای آن خارج می‌شود و به داخل چرخه جریان هیچ‌گونه برگشتی ندارد.

برای بررسی دقیق‌تر نحوهٔ انتقال و پراکندگی مادهٔ ردیاب، طول کانال آزمایشگاهی به چهار بازهٔ مساوی تقسیم شد و برداشت‌های آزمایشگاهی برای هر یک از بازه‌ها جداگانه صورت پذیرفت. بازهٔ اول (L1) به فاصلهٔ سه متری از ابتدای بستر رسوبی، بازهٔ

در این مطالعه محلول کلرید سدیم (NaCl) به عنوان ماده ردیاب به کار گرفته شد. دلیل استفاده از این ماده عدم واکنش و زوال و غیرسمی بودن آن در ناحیهٔ اصلی جریان و سهولت دسترسی به تجهیزات اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب (EC) بوده است. غلظت اولیه آلودگی (C_0) با استفاده از حل کردن ۲۸۰ گرم کلرید سدیم ۹۹ درصد در یک ظرف ۴ لیتری آب تهیه و به عنوان آلودگی اولیه به صورت (آنی) لحظه‌ای^۱ در فاصلهٔ ۱/۵ متری بالادست کانال آزمایشگاهی به ناحیه اصلی جریان تزریق شد. برای ردیابی نحوهٔ انتقال و پراکندگی آلودگی تزریقی از حسگرهای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب در فاصله‌های مختلف پایین دست استفاده شد. در آزمایش‌های مختلف در این پژوهش، مقدار هدایت الکتریکی پایه جریان آب جاری در کانال آزمایشگاهی در حدود ۱/۵ میلی‌زیمنس بر متر بوده است که این مقدار با اعمال ضریب تصحیح در تمامی آزمایش‌ها به عنوان غلظت پایهٔ آلودگی

شکل (۲) نمایی شماتیک از کانال آزمایشگاهی با ۳ سد گابیونی جانمایی شده در آن را نشان می‌دهد که در آن بازه‌های در نظر گرفته شده و همچنین حسگرهای قرار گرفته در انتهای هر بازه نشان داده شده‌اند.

دوم (L2) به فاصله شش متری از ابتدای بستر رسوبی، بازه سوم (L3) به فاصله نه متری از ابتدای بستر رسوبی و بازه چهارم (L4) نیز در سه متر انتهایی کانال آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.



شکل ۲- نمای شماتیک از کانال آزمایشگاهی (اعداد بر مبنای متر)

Fig. 2- Schematic View of Flume (Metric Unit)

داخل کانال آزمایشگاهی از یک دستگاه عمق‌سنج صوتی با دقت ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. این دستگاه چهار حسگر دارد و هر یک از حسگرها در یک بازه قرار دارد و مجموع حسگرها به وسیله یک دستگاه ثبات به رایانه متصل است و هر دو ثانیه یک بار عمق جریان برداشتی را اندازه‌گیری و ثبت می‌کردند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان نیز از یک میکرومولینه در نقاط مختلف هر بازه استفاده شد و از میانگین سرعت‌های لحظه‌ای ثبت شده در هر یک از بازه‌ها، سرعت متوسط (V) در آن بازه و در کل کانال آزمایشگاهی برآورد شد. مشخصات کامل آزمایش‌های این پژوهش و سدهای گابیونی به کار رفته در هر یک از آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

در انتهای هر یک از بازه‌ها، ۲ عدد حسگر اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب (EC) به منظور اندازه‌گیری و ثبت تغییرات این پارامتر در خلال اجرای هر یک از آزمایش‌ها کار گذاشته شدند. این حسگرها از طریق یک دستگاه ثبات به رایانه متصل شدند و هر ۲ ثانیه یک بار مقدار هدایت الکتریکی جریان آب را اندازه‌گیری و ثبت می‌کردند. کالیبراسیون ۸ حسگر به کار رفته در این پژوهش با استفاده از محلول یک لیتری از جرم‌های مختلف نمک و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی توسط دستگاه GENWAY به منظور محاسبه روابط واسنجی برای تبدیل هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده محلول توسط حسگرها و این دستگاه بوده است. برای اندازه‌گیری عمق متوسط جریان (h) در

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌ها
Table 1- Details of Experiments

شماره آزمایش Test Number	سری آزمایش Experimental Series	طول سد (سانتی‌متر) Dam Length (cm)	دبی جریان (لیتر بر ثانیه) Flow Discharge (lit/s)	نوع مصالح سد Type of Dam materials	تعداد سد Number of Dams
1				درشت‌دانه	1
2	1	75	2.5	Coarse-Grained	2
3					3
4				درشت‌دانه	1
5	2	75	5	Coarse-Grained	2
6					3
7				درشت‌دانه	1
8	3	75	7.5	Coarse-Grained	2
9					3
10				درشت‌دانه	1
11	4	35	2.5	Coarse-Grained	2
12					3
13				درشت‌دانه	1
14	5	35	5	Coarse-Grained	2
15					3
16				درشت‌دانه	1
17	6	35	7.5	Coarse-Grained	2
18					3
19				ریزدانه	1
20	7	75	2.5	Fine-Grained	2
21					3
22				ریزدانه	1
23	8	75	5	Fine-Grained	2
24					3
25				ریزدانه	1
26	9	75	7.5	Fine-Grained	2
27					3
28				ریزدانه	1
29	10	35	2.5	Fine-Grained	2
30					3
31				ریزدانه	1
32	11	35	5	Fine-Grained	2
33					3
34				ریزدانه	1
35	12	35	7.5	Fine-Grained	2
36					3
37	شاهد		2.5		
38	Control	-	5	-	-
39			7.5		

آنالیز ابعادی

کمک روش π باکینگهام و در نظر گرفتن سه متغیر h ، V و ρ به عنوان متغیرهای تکراری، توابع به صورت روابط (۶) و (۷) تعریف خواهند شد:

$$f_1\left(\frac{h}{B}, S_0, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{V^2}{gh}, \frac{\rho V h}{\mu}, \frac{h}{d_b}, \frac{h}{d_g}, N, \frac{h}{a}, \frac{h}{b}, \frac{h}{H}, \frac{D_x}{V h}\right) = 0 \quad (۶)$$

$$f_2\left(\frac{h}{B}, S_0, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{V^2}{gh}, \frac{\rho V h}{\mu}, \frac{h}{d_b}, \frac{h}{d_g}, N, \frac{h}{a}, \frac{h}{b}, \frac{h}{H}, \frac{a h}{V}\right) = 0 \quad (۷)$$

که رابطه $\frac{V^2}{gh}$ بیانگر عدد فرود جریان (Fr) و رابطه $\frac{\rho V h}{\mu}$ نشان دهنده عدد رینولدز جریان (Re) است. با توجه به آشفتگی بودن جریان در تمامی آزمایش‌های این پژوهش، ثابت بودن متغیرهای عرض کانال (B)، شیب طولی کانال (S_0)، عرض (b) و ارتفاع سد گابیونی (H)، چگالی (ρ_s) و قطر میانه رسوبات بستر (d_b) و نیز برخی ساده‌سازی‌های ریاضی، روابط (۳) و (۴) به ترتیب به فرم ساده‌تری در روابط (۸) و (۹) ظاهر خواهند شد:

$$\frac{D_x}{h V} = f_1(Fr, N, \frac{h}{d_g}, \frac{h}{a}) \quad (۸)$$

$$\frac{a h}{V} = f_2(Fr, N, \frac{h}{d_g}, \frac{h}{a}) \quad (۹)$$

بنابراین هر دو متغیر وابسته (ضریب پراکندگی طولی D_x و نیز ضریب تبادل ناحیه نگهداشت α) تابعی از عدد فرود جریان (Fr)، تعداد سدهای گابیونی (N)، نسبت عمق جریان به قطر مصالح سد ($\frac{h}{d_g}$) و طول سد ($\frac{h}{a}$) هستند.

مدل عددی

مدل عددی OTIS که سازمان زمین شناسی آمریکا^۲ ارائه داده‌است، یک مدل شبیه‌سازی ریاضی متن باز برای بررسی انتقال مواد محلول است. مدل

تحلیل ابعادی ضمن بی‌بعد کردن پارامترهای موثر بر پدیده مورد نظر و در نتیجه کاهش قابل توجه تعداد پارامترها و آزمایش‌ها، امکان کاربرد و تعمیم نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های واقعی^۱ را نیز فراهم می‌کند. در پدیده انتقال و پراکندگی مواد آلاینده در آبراهه‌ها و رودخانه‌های در شرایط احداث سدهای گابیونی متغیرهای متعددی مؤثرند. برای محاسبه و تخمین ضرایب پراکندگی طولی (D_x) و همچنین تبادل ناحیه نگهداشت (α)، پارامترهای متعددی شامل مشخصات و هندسه سد گابیونی: تعداد سد (N)، طول سد (a)، عرض سد (b)، ارتفاع (H) و همچنین تخلخل مصالح سد (d_g)؛ هندسه کانال آزمایشگاهی: عرض کانال (B) و شیب طولی کانال (S_0)؛ پارامترهای هیدرولیک جریان: سرعت متوسط جریان (V) و عمق متوسط جریان (h)؛ پارامترهای مصالح بستر کانال: قطر میانه ذرات (d_b) و جرم حجمی رسوبات (ρ_s)؛ خصوصیات سیال: جرم حجمی (ρ) و لزوجت دینامیکی سیال (μ)، غلظت اولیه (C_0) و شتاب ثقل (g) دارای اهمیت هستند.

با در نظر گرفتن متغیرهای موثر که در بالا گفته شد، توابع زیر به ترتیب برای متغیرهای وابسته ضریب پراکندگی طولی (D_x) و نیز ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) قابل تعریف خواهند بود:

$$f_1(h, V, B, S_0, \rho, \rho_s, g, \mu, d_b, N, d_g, a, b, H, D_x) = 0 \quad (۴)$$

$$f_2(h, V, B, S_0, \rho, \rho_s, g, \mu, d_b, N, d_g, a, b, H, \alpha) = 0 \quad (۵)$$

که در آنها،

f_1 ، f_2 نشان‌دهنده توابع هستند. با تحلیل ابعادی به

واریانس باقیمانده مدل و حساسیت پارامترها را از طریق تقریب خطی بررسی می‌کند. چنین تخمین‌های تقریبی عدم قطعیت زمانی می‌تواند ناکافی باشد که باقیمانده‌ها نسبتاً بزرگ هستند یا مدل عددی با توجه به پارامترها بسیار غیرخطی است (Aster *et al.*, 2005).

در این پژوهش داده‌های برداشت شده آلودگی در انتهای بازه L1 در بازه زمانی هر ۲ ثانیه به عنوان شرایط مرزی بالادست برای مدل عددی OTIS-P و همچنین داده‌های برداشت شده غلظت-زمان آلودگی در انتهای بازه‌های L2 و L3 نیز به عنوان ورودی‌های موردنیاز مدل عددی OTIS-P در پایین‌دست تعریف شدند و سپس پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت (TSM) توسط مدل عددی OTIS-P تخمین زده شدند. از پارامترهای تخمینی به عنوان ورودی‌های مدل OTIS استفاده و منحنی‌های رخنه در بازه L4 بازتولید و با منحنی‌های رخنه حاصل از برداشت‌های آزمایشگاهی ماده ردیاب در این بازه مقایسه شدند.

به منظور ارزیابی آماری دقت نتایج حل مدل عددی OTIS-P در برآورد مقدار و نحوه زمانی توزیع آلودگی و در نتیجه بازسازی منحنی رخنه، از معیارهای متداول آماری شامل: جذر مربعات خطای نرمال شده $(RMSE)^2$ و ضریب تعیین (R^2) به ترتیب مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده شد (Azhdan *et al.*, 2019).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})(C_{sim,i} - \bar{C}_{sim,i})}{\left[\left(\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - \bar{C}_{lab,i})^2 \right)^{0.5} \left(\sum_{i=1}^N (C_{sim,i} - \bar{C}_{sim,i})^2 \right)^{0.5} \right]} \quad (10)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (C_{lab,i} - C_{sim,i})^2}{N} \right)^{0.5} \quad (11)$$

که در آنها،

عددی OTIS بر پایه مدل نگهداشت موقت (TSM) با در نظر گرفتن نقش ذخیره موقت و مساحت ناحیه رسوبی (A_s) و مساحت ناحیه اصلی جریان (A)، بر انتقال آلودگی استوار است و قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی انتقال آلودگی در جریان‌های دارای مناطق نگهداشت زیاد دارد. این نرم‌افزار با توجه به ناحیه بدنه اصلی جریان و ناحیه بستر رسوبی به صورت جداگانه و همچنین نقش ذخیره موقت در انتقال آلودگی، قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی‌های انتقال املاح در مجاری باز دارد (Mirnaseri *et al.*, 2021, b).

این مدل عددی با استفاده از روش تفاضل‌های محدود ضمنی کرانک‌نیکلسون اقدام به حل هم‌زمان جفت معادله دیفرانسیل مدل ذخیره موقت (TSM) می‌کند و مقادیر غلظت-زمان ماده ردیاب را در نقاط پایین‌دست شبیه‌سازی می‌کند (Runkel, 1998). مزیت عمده در OTIS امکان گسسته‌سازی سیستم است که در محیط‌هایی ناهمگن مانند جریان رودخانه با حضور سدهای گابیونی یا سایر سازه‌های متقاطع در مسیر جریان، یک ویژگی مناسب است. بنابراین، هر سیستم نیاز به تعریف بازه‌های مختلفی از مسیر جریان دارد تا به طور جداگانه مدل شود (Dewaide *et al.*, 2016). برای بازتولید منحنی‌های رخنه در پایین‌دست لازم است تا مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده ماده ردیاب در زمان‌های مختلف در بالادست را به عنوان شرط مرزی در مدل تعریف شوند (Runkel, 1998).

الحاقیه مدل عددی OTIS تحت عنوان OTIS-P پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) را با استفاده از روش تخمین حداقل مربعات غیرخطی^۱ تخمین می‌زند و عدم قطعیت را با استفاده از

1- Non-Linear Least Squares
3- Determination Coefficient

2- Root Mean Square Error

تعداد سدهای گابیونی (N) بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) از نتایج برآوردهای مدل عددی OTIS-P با استفاده از آزمایش‌های سری اول تا سوم (جدول ۲) استفاده شده است. در هر یک از این سری آزمایش‌ها، جریان با یک مقدار دبی مشخص (۲/۵، ۵ و ۷/۵ لیتر بر ثانیه) در شرایط وجود سد گابیونی با طول ۷۵ سانتی‌متر و با مصالح درشت‌دانه عبور کرده و فقط تعداد سدهای گابیونی (N) در هر یک از شماره آزمایش‌ها به ترتیب از ۱ به ۳ افزایش داشته است.

$N =$ تعداد کل داده‌ها؛ $C_{lab,i}$ و $C_{sim,i} =$ به ترتیب غلظت آزمایشگاهی و غلظت شبیه‌سازی شده ماده آلاینده؛ $\bar{C}_{lab,i}$ و $\bar{C}_{sim,i} =$ به ترتیب میانگین غلظت آزمایشگاهی و غلظت شبیه‌سازی.

نتایج و بحث

تاثیر تعداد سدهای گابیونی (N) بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) در این بخش از پژوهش به منظور بررسی تاثیر

جدول ۲- برآورد پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) با مدل عددی OTIS-P برای آزمایش‌های سری اول تا سوم

Table 2- Estimation of Transient Storage Model (TSM) Parameters with OTIS-P for 1th to 3th Series Experiments

شماره آزمایش Test Number	D_x (m^2/s)	A (m^2)	A_s (m^2)	α (1/s)	Dal	R ²	RMSE
1	0.082	0.018	0.036	0.034	0.90	0.94	0.06
2	0.116	0.020	0.046	0.048	1.22	0.91	0.08
3	0.141	0.019	0.052	0.061	1.55	0.95	0.05
4	0.105	0.038	0.029	0.011	0.37	0.88	0.13
5	0.181	0.039	0.032	0.025	0.91	0.95	0.06
6	0.184	0.040	0.038	0.034	1.35	0.92	0.09
7	0.211	0.043	0.018	0.012	0.23	0.98	0.03
8	0.246	0.043	0.026	0.017	0.71	0.98	0.04
9	0.302	0.044	0.032	0.022	0.96	0.94	0.05

بستر رسوبی عمل می‌کند که همین امر نیز موجب افزایش تبادلات هایپرریک بین ناحیه اصلی جریان و محیط متخلخل این‌گونه سدها می‌شود و سبب خواهد شد تا حجم بیشتری از جریان از ناحیه اصلی وارد فضای محیط متخلخل سدهای گابیونی شود و این امر نیز موجب کاهش مجدد غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان خواهد شد. کاهش غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان نیز موجب افزایش ضریب پراکنندگی طولی (D_x) در این نواحی خواهد شد. افزایش تعداد سدهای گابیونی از

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که مقدار ضریب پراکنندگی طولی (D_x) در آزمایش‌های شماره (۱) تا (۳) در سری اول افزایش داشته که این افزایش در آزمایش‌های سری دوم و سوم نیز مشاهده شده است. وجود سدهای گابیونی در مسیر جریان سبب افزایش نگهداشت موقت مواد محلول همراه با جریان در درون محیط متخلخل این‌گونه سدها می‌شود و در نتیجه غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان تا حدودی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، وجود این سدها در مسیر جریان همانند یک فرم

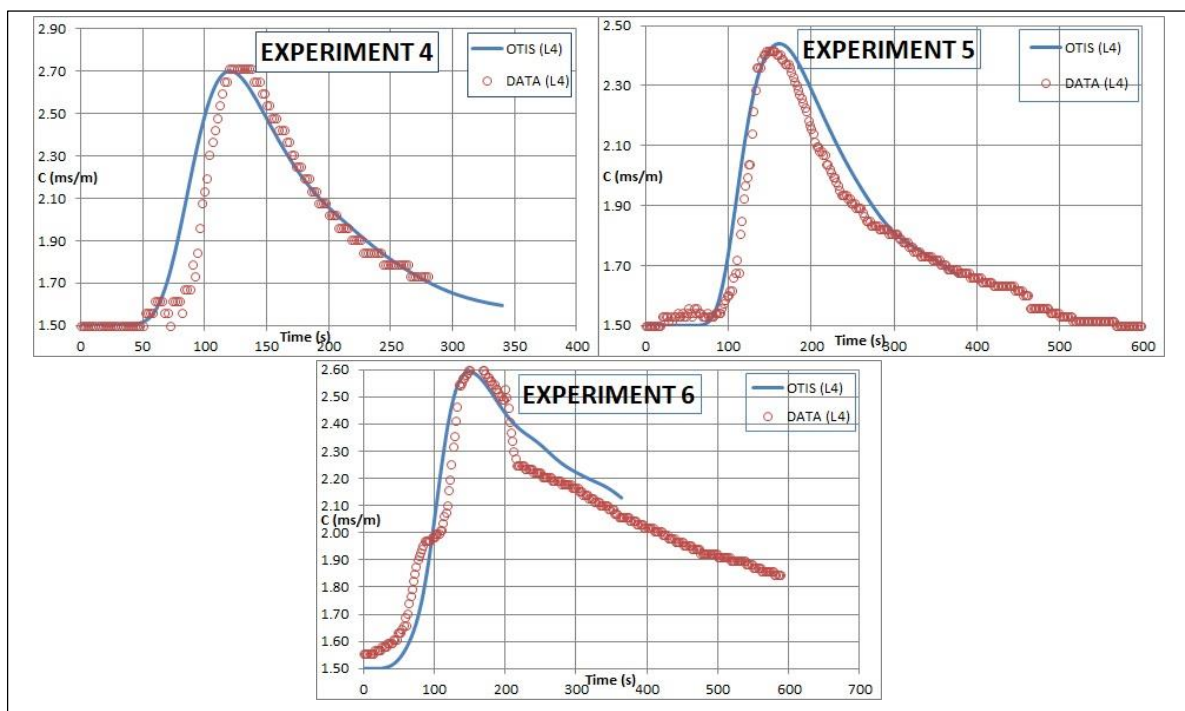
متخلخل بستر رسوبی و همچنین نواحی متخلخل سدهای گابیونی با مدت زمان ماند کمتر نسبت به شرایط جریان با دبی پایین‌تر، از این نواحی نگهداشت خارج خواهند شد. بنابراین، مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) با افزایش دبی جریان کاهش می‌یابد که با نتایج تحقیقات میرناصری و همکاران (Mirnaseri *et al.*, 2021, a) در مطالعه جریان با نواحی فرم‌های بستر مطابقت دارد. از سوی دیگر، افزایش دبی جریان موجب افزایش حجم جریان جاری در کانال می‌شود از این رو مقدار غلظت اوج آلودگی (C_{max}) کاهش می‌یابد و همین امر موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در این شرایط خواهد شد که با نتایج بررسی‌های آژدان و همکاران (Azhdan *et al.*, 2019) در مطالعه انتقال آلودگی در شرایط جریان با بستر صاف نیز مطابقت دارد.

به منظور بررسی تاثیر تعداد سدهای گابیونی بر انتقال و پراکندگی ماده ردیاب در کانال آزمایشگاهی، منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل عددی OTIS برای آزمایش‌های شماره (۴)، (۵) و (۶) در شکل (۳) نشان داده شده است. برای بررسی میزان دقت پارامترهای تخمینی توسط مدل OTIS-P، مقایسه آماری بین نتایج بازتولید منحنی‌های رخنه در مدل عددی OTIS و نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب نیز صورت گرفت که در جدول (۲) ارائه شدند. مقایسه آماری نتایج این جدول نشان از دقت بالای روش مدل‌سازی معکوس توسط OTIS-P در تخمین پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت دارد که مقایسه تطبیقی نمودارهای شکل (۳) نیز تطابق منحنی‌های رخنه بازتولید شده به کمک این روش و نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب را نشان می‌دهد.

یک به سه موجب $1/71$ برابر شدن مقدار ضریب پراکندگی طولی (D_x) در برآورد نتایج آزمایش‌های سری اول، $1/75$ برابر شدن در برآورد نتایج آزمایش‌های سری دوم و $1/43$ برابر شدن در برآورد نتایج آزمایش‌های سری سوم می‌شود که همین امر نشان می‌دهد تاثیر افزایش تعداد سدهای گابیونی بر افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در دبی‌های جریان کم مشهودتر بوده است. در واقع، افزایش دبی جریان سبب خواهد شد تا مقدار بیشتری از آلودگی در ناحیه اصلی جریان جابه‌جا شود و بدین ترتیب تاثیر افزایش تعداد سدهای گابیونی در مسیر جریان بر افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) کم‌تر گردد.

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) در آزمایش‌های شماره (۱) تا (۳) در سری اول افزایش دارد که این افزایش در آزمایش‌های سری دوم و سوم نیز مشاهده می‌شود. با افزایش تعداد سدهای گابیونی در مسیر جریان، شرایط نگهداشت موقت بیشتری فراهم می‌شود و از این رو مقدار بیشتری از مواد محلول همراه با جریان وارد نواحی متخلخل سدهای در مسیر جریان می‌گردد و زمان بیشتری نیز در این نواحی به طور موقت ذخیره خواهند شد که همین امر موجب افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) با افزایش تعداد سدهای گابیونی (N) خواهد شد.

مقایسه نتایج آزمایش‌های شماره (۱)، (۴) و (۷)، (۲)، (۵) و (۸) و (۳)، (۶) و (۹) نشان می‌دهد که افزایش دبی جریان از $2/5$ لیتر بر ثانیه به $7/5$ لیتر بر ثانیه موجب کاهش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) گردیده است. افزایش دبی جریان موجب افزایش دبی تبدالی از ناحیه متخلخل بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان خواهد شد (Movahedi *et al.*, 2020)، از این رو مواد محلول همراه با جریان در نواحی



شکل ۳- منحنی‌های رخنه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مدل عددی OTIS در بازه L4 برای آزمایش‌های ۴، ۵ و ۶
Figure 3- Breakthrough Curves of Laboratory Results and OTIS in L4 Reach for experiments 4, 5 and 6

نیز مقدار بیشترین مدت زمان ماندگاری آلودگی (T_{max}) در ناحیه اصلی جریان کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش تعداد سدهای گابیونی (N) موجب افزایش مدت زمان ماند آلودگی خواهد شد. افزایش تعداد سدهای گابیونی (N) سبب می‌شود تا فضای متخلخل ایجاد شده در نواحی اصلی جریان افزایش یابد و آلودگی با مدت زمان ماند بیشتری در نواحی متخلخل این سدها نگهداشت شود و مجدد به ناحیه اصلی جریان بازگردد که با مقایسه نتایج برآورد ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) برای این سری آزمایش‌ها نیز نشان از افزایش این ضریب با افزایش تعداد سدهای گابیونی داشته است. از سوی دیگر، افزایش تعداد سدهای گابیونی سبب می‌شود تا حجم

نتایج عدد دام‌کولر (Dal) در ستون ششم جدول (۲) بر مبنای پارامترهای تخمینی برای هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شد. بررسی نتایج این عدد نشان می‌دهد که محدوده آن از ۰/۲۳ تا ۱/۵۵ است که در همه نتایج در بازه قابل قبول گزارش شده توسط دیگر محققان قرار داشته است.

در واقع این محدوده اعداد دام‌کولر (Dal) نشان می‌دهد که قطعیت لازم در برآورد پارامترهای تخمینی توسط مدل‌سازی عددی در هر یک از آزمایش‌های ماده ردیاب وجود داشته است.

مقایسه منحنی‌های رخنه شکل (۳) نشان می‌دهد که مدت زمان ماند آلودگی در بازه L4 از آزمایش شماره (۶) به آزمایش شماره (۵) کاهش یافته و از آزمایش شماره (۵) به آزمایش شماره (۴)

تأثیر طول سدهای گابیونی (a) بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM)

نتایج برآورد پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) برای آزمایش‌های سری چهارم تا ششم با استفاده از مدل عددی OTIS-P در جدول (۳) ارائه شده است. مقایسه نتایج آزمایش‌های سری اول تا سوم (جدول ۲) با نتایج آزمایش‌های سری چهارم تا ششم (جدول ۳) نشان از کاهش ضریب پراکندگی طولی (D_x) با کاهش طول سدهای گابیونی (a) دارد.

بیشتری از آلودگی در نواحی نگهداشت این سدها به صورت موقت ذخیره شود بنابراین، انتظار کاهش غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در بازه‌های پایین دست جریان (L4) قابل پیش‌بینی خواهد بود. کاهش غلظت اوج آلودگی (C_{max}) یکی از موارد موثر در افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) خواهد بود که این موضوع در نتایج جدول (۲) نیز برآورد شده است.

جدول ۳- برآورد پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) با مدل عددی OTIS-P برای آزمایش‌های سری چهارم تا ششم

Table 3- Estimation of Transient Storage Model (TSM) Parameters with OTIS-P for 4th to 6th Series Experiments

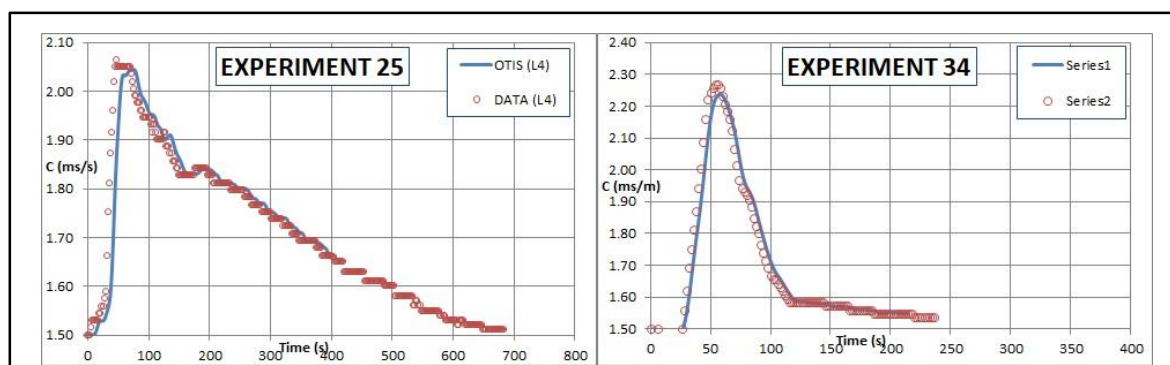
شماره آزمایش Test Number	D_x (m ² /s)	A (m ²)	A_s (m ²)	α (1/s)	Dal	R ²	RMSE
10	0.035	0.014	0.039	0.012	0.26	0.95	0.06
11	0.064	0.014	0.038	0.019	0.45	0.98	0.02
12	0.081	0.017	0.054	0.016	0.40	0.96	0.04
13	0.073	0.032	0.032	0.010	0.28	0.98	0.03
14	0.086	0.034	0.031	0.016	0.51	0.97	0.02
15	0.078	0.030	0.049	0.023	0.71	0.92	0.08
16	0.112	0.041	0.009	0.009	0.61	0.97	0.03
17	0.108	0.042	0.022	0.011	0.43	0.96	0.05
18	0.121	0.040	0.019	0.012	0.63	0.93	0.07

برآورد شده مدل عددی OTIS-P از آزمایش‌های سری اول تا سوم (جدول ۲) با نتایج برآورد شده این مدل عددی از آزمایش‌های سری چهارم تا ششم (جدول ۳) نیز نشان از کاهش این ضریب با کاهش طول سدهای گابیونی (a) دارد. در واقع، با کاهش طول سدهای گابیونی، سطح فضای محیط متخلخل در مسیر جریان کاهش می‌یابد و در نتیجه مواد محلولی که به محیط متخلخل این گونه سدها وارد خواهند شد با مدت زمان ماند کمتری از این نواحی نگهداشت خارج می‌شوند و به مسیر اصلی جریان بازمی‌گردند. بنابراین، مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) نیز با کاهش طول سرریز (a) کاهش

کاهش طول سدهای گابیونی (a) تعبیه شده در مسیر جریان موجب می‌شود تا حجم کمتری از جریان و مواد محلول همراه با آن در نواحی متخلخل این گونه سدها نگهداشت موقت می‌شوند و در نتیجه مقدار غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان افزایش می‌یابد که همین امر موجب کاهش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در این شرایط خواهد شد. مقایسه نتایج ضریب پراکندگی طولی (D_x) در آزمایش‌های جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که مقدار این ضریب با افزایش طول سدهای گابیونی (a) حدود ۱/۴۳ تا ۲/۴۹ برابر افزایش یافته است. مقایسه ضریب‌های تبادل ناحیه نگهداشت (α)

عددی OTIS-P با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس قابلیت مناسبی در تخمین پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت (TSM) دارد که مقایسه تطبیقی نمودارهای شکل (۴) نیز تطابق منحنی‌های رخنه بازتولید شده به کمک مدل عددی OTIS-P و نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب را نشان می‌دهد.

می‌یابد. منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل عددی OTIS برای آزمایش‌های شماره (۲۵) و (۳۴) در شکل (۴) نشان داده شده است. مقایسه آماری بین منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و بازسازی شده توسط پارامترهای تخمینی مدل OTIS-P در جدول (۳) نشان می‌دهد که مدل



شکل ۴- منحنی‌های رخنه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مدل عددی OTIS در بازه L4 برای آزمایش‌های ۲۵ و ۳۴
Figure 4- Breakthrough Curves of Laboratory Results and OTIS in L4 Reach for experiments 25 and 34

افزایش طول سدهای گابیونی موجود در مسیر جریان بر نگهداشت موقت بیشتر آلودگی از نظر زمانی در نواحی متخلخل سدهاست که این موضوع سبب خواهد شد تا آلودگی با مدت زمانی به مراتب طولانی‌تر در نواحی اصلی جریان در پایین دست (بازه L4) حضور داشته باشد. افزایش طول سدهای گابیونی سبب رخنه غلظت بیشتری از آلودگی در نواحی متخلخل این سدها شده است و از این رو مقدار غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در نواحی پایین دست (بازه L4) در منحنی رخنه آزمایش شماره ۲۵، در مقایسه با آزمایش شماره ۳۴ به مراتب کمتر بوده است. مقایسه نتایج جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که افزایش طول سدهای گابیونی (a) موجب افزایش حدود ۱/۴۳ تا ۲/۴۹ برابری

نتایج عدد دام‌کولر (Dal) در ستون ششم جدول (۳) بر مبنای پارامترهای تخمینی برای هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شد. بررسی نتایج این عدد نشان می‌دهد که محدوده آن از ۰/۲۶ تا ۰/۷۱ است که در همه نتایج در بازه قابل قبول گزارش شده توسط دیگر محققان قرار دارد. در واقع، این محدوده اعداد دام‌کولر (Dal) نشان می‌دهد که قطعیت لازم در برآورد پارامترهای تخمینی توسط مدل‌سازی عددی در هر یک از آزمایش‌های ماده ردیاب وجود داشته است.

مقایسه مدت زمان منحنی‌های رخنه این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مدت زمان ماند آلودگی در آزمایش شماره (۲۵) به مراتب بیشتر است تا در آزمایش شماره (۳۴) که این موضوع به علت تاثیر

شده است و از سوی دیگر در آزمایش‌های سری (۱) تا (۶) از مصالح با اندازه میانه (d_g) ۱۹ میلی‌متر (درشت‌دانه) استفاده شده است. نتایج برآورد پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) برای آزمایش‌های شماره (۱۹) تا (۲۱) با استفاده از مدل عددی OTIS-P در جدول (۴) ارائه شده است. مقایسه نتایج این آزمایش‌ها با پارامترهای تخمینی آزمایش‌های شماره (۱) تا (۳)، که صرفاً در مقدار تخلخل مصالح سدهای گابیونی تفاوت دارند، نشان از افزایش ضریب پراکنندگی طولی تخمینی (D_x) در بازه چهارم (L4) دارد.

مقدار ضریب پراکنندگی طولی (D_x) و افزایش حدود ۱/۱۰ تا ۲/۸۳ برابری مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) خواهد شد.

تاثیر تخلخل سدهای گابیونی (d_g) بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM)

تفاوتی که در آزمایش‌های سری (۷) تا (۱۲) وجود دارد در مقدار تخلخل مصالح تشکیل دهنده سدهای گابیونی به کار رفته در مراحل این پژوهش بوده است. در این سری آزمایش‌ها در سدهای گابیونی تعبیه شده در مسیر جریان از مصالح با اندازه میانه (d_g) ۱۱ میلی‌متر (ریزدانه) استفاده

جدول ۴- برآورد پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) با مدل عددی OTIS-P در آزمایش‌های ۱۹ تا ۲۱

Table 4- Estimation of Transient Storage Model (TSM) Parameters with OTIS-P for Experiments 19 to 21

شماره آزمایش Test Number	D _x (m ² /s)	A (m ²)	A _s (m ²)	α (1/s)	Dal	R ²	RMSE
19	0.091	0.019	0.032	0.030	0.91	0.98	0.02
20	0.140	0.017	0.058	0.063	1.48	0.95	0.06
21	0.211	0.018	0.074	0.081	1.89	0.93	0.12

از سوی دیگر، استفاده از مصالح ریزدانه‌تر در بدنه سدهای گابیونی باعث کاهش فضای خلل و فرج شده و در نتیجه سرعت تبادل جریان در داخل محیط متخلخل این سدها نیز کاهش خواهد یافت. کاهش سرعت جریان در داخل محیط متخلخل سدهای گابیونی سبب خواهد شد تا مدت زمان ماند آلودگی در بدنه این سدها افزایش یابد و در نتیجه آلودگی همراه با جریان مدت زمان بیشتری در این نواحی نگهداشت موقت شود که همین امر موجب افزایش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) در این شرایط خواهد شد.

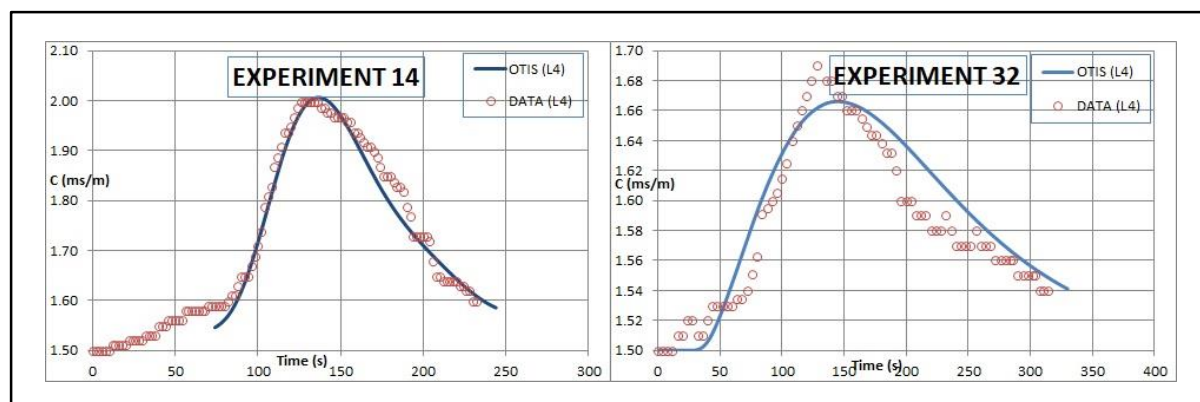
نتایج محاسبه عدد دام‌کولر (Dal) در ستون ششم جدول (بازه ۰/۹۱ تا ۲/۲۵) نشان می‌دهد که

وجود مصالح ریزدانه‌تر در سدهای گابیونی سبب کاهش دبی تبدالی بین سد گابیونی و ناحیه اصلی جریان می‌شود. در واقع، استفاده از مصالح ریزدانه‌تر موجب کاهش تخلخل نواحی نگهداشت سدهای گابیونی می‌شود و در نتیجه مقدار ذخیره موقت آلودگی در جریان آب و همچنین بستر رسوبی بالادست سدهای گابیونی افزایش می‌یابد. استفاده از مصالح ریزدانه‌تر موجب کاهش سرعت انتقال آلودگی به نقاط پایین دست می‌شود و در نتیجه غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در نقاط پایین دست کاهش خواهد یافت که همین امر موجب افزایش ضریب پراکنندگی طولی (D_x) در این شرایط در بازه چهارم (L4) خواهد شد.

داده شده است. در ستون‌های هفتم و هشتم جدول (۴) بین منحنی‌های رخنه برداشت‌های آزمایشگاهی و منحنی‌های رخنه بازتولیدی با بهره‌گیری از پارامترهای تخمینی توسط OTIS-P مقایسه آماری صورت گرفت. نتایج این مقایسه آماری نشان از دقت مناسب در بازسازی منحنی‌های رخنه توسط این پارامترهای تخمینی داشته است که مقایسه تطبیقی نمودارهای شکل (۵) نیز تطابق منحنی‌های رخنه بازتولید شده به کمک مدل عددی OTIS-P و نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب را نشان می‌دهد.

قطعیت لازم در برآورد پارامترهای تخمینی توسط مدل‌سازی عددی در هر یک از آزمایش‌ها وجود داشته است. افزایش این عدد از آزمایش شماره (۱۹) تا (۲۱) را می‌توان به علت هم‌زمانی افزایش ضریب تبادل نگهداشت (α) و کاهش سرعت جریان (V) در این آزمایش‌ها نتیجه گرفت.

به منظور بررسی تاثیر تخلخل سدهای گابیونی (dg) بر انتقال و پراکندگی ماده ردیاب در کانال آزمایشگاهی، منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و همچنین شبیه‌سازی شده با مدل عددی OTIS برای آزمایش‌های شماره (۱۴) و (۳۱) در شکل (۵) نشان



شکل ۵- منحنی‌های رخنه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مدل عددی OTIS در بازه L4 برای آزمایش‌های ۱۴ و ۳۲
Figure 5- Breakthrough Curves of Laboratory Results and OTIS in L4 Reach for experiments 14 and 32

کشیدگی بیشتری نسبت به آزمایش شماره (۱۴) باشد. افزایش نگهداشت موقت ماده ردیاب در بدنه سدهای گابیونی با محیط متخلخل دارای مصالح ریزدانه‌تر سبب خواهد شد تا غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در نواحی پایین‌دست کاهش یابد. مقدار غلظت اوج آلودگی (C_{max}) ۱/۶۹ میلی‌زیمنس بر متر در آزمایش شماره (۳۲) و ۲/۰۳ میلی‌زیمنس بر متر در آزمایش شماره (۱۴) است که همین امر موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در شرایط وجود مصالح ریزدانه‌تر در بدنه سدهای گابیونی خواهد شد.

مقایسه منحنی رخنه آزمایش شماره (۱۴) و آزمایش شماره (۳۲) نشان می‌دهد که وجود مصالح با دانه‌بندی ریزدانه‌تر در بدنه سدهای گابیونی تعبیه شده در مسیر جریان موجب افزایش مدت زمان ماند آلودگی در بازه انتهایی مسیر جریان (L4) شده است. وجود مصالح ریزدانه سبب می‌شود تا نگهداشت موقت آلودگی در داخل محیط متخلخل بدنه سدهای گابیونی افزایش یابد و آلودگی‌های تبدالی با زمان تاخیر بیشتر به ناحیه اصلی جریان بازگردند. این شرایط سبب خواهد شد تا منحنی رخنه بازه L4 در آزمایش شماره (۳۲) دارای

پراکندگی ماده ردياب، آزمایش‌های شماره (۳۷) تا (۳۹) اجرا شدند. نتایج برآورد پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) برای آزمایش‌های بدون سدهای گابیونی (شاهد) با استفاده از مدل عددی OTIS-P در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۵- برآورد پارامترهای مدل ذخیره موقت (TSM) با مدل عددی OTIS-P در آزمایش‌های ۳۷ تا ۳۹

Table 5- Estimation of Transient Storage Model (TSM) Parameters with OTIS-P for Experiments 37 to 39

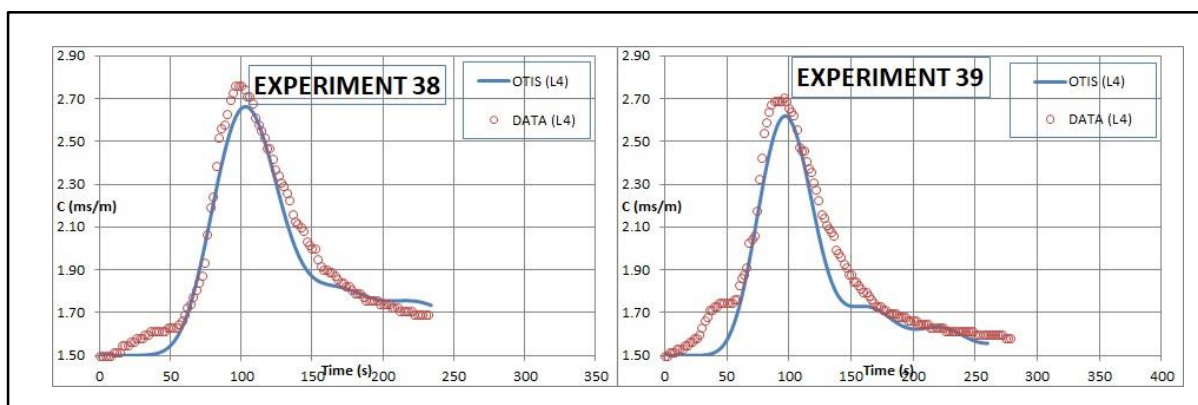
شماره آزمایش Test Number	Fr	Re	D _x (m ² /s)	A (m ²)	A _s (m ²)	α (1/s)	Dal	R ²	RMSE
37	0.061	5630	0.008	0.011	0.046	0.032	0.35	0.97	0.08
38	0.068	8346	0.014	0.019	0.041	0.027	0.31	0.97	0.05
39	0.084	12450	0.089	0.018	0.032	0.019	0.21	0.96	0.06

و بخش کمتری وارد محیط بستر رسوبی شود که همین امر باعث کاهش ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) با افزایش عدد فرود جریان (Fr) خواهد شد. منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل عددی OTIS برای آزمایش‌های شماره (۳۸) و (۳۹) در شرایط نبود سدهای گابیونی در مسیر جریان در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج محاسبه عدد دام‌کولر (Dal) در ستون ششم جدول (بازه ۰/۲۱ تا ۰/۳۵) نشان‌دهنده قطعیت لازم در برآورد پارامترهای تخمینی توسط مدل‌سازی عددی در هر یک از آزمایش‌ها بوده است.

تاثیر وجود سدهای گابیونی بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM)

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر بودن یا نبودن سدهای گابیونی در مسیر جریان بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت (TSM) و نیز نحوه انتقال و

بررسی نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود جریان (Fr) از آزمایش‌های شماره (۳۷) تا (۳۹) موجب کاهش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در پارامترهای تخمینی شده است. افزایش عدد فرود جریان (Fr) سبب می‌گردد تا غلظت آلودگی در جریان با سرعت متوسط بیشتری به سمت پایین دست حرکت کند و بنابراین مقدار پراکندگی غلظت ماده ردياب در بازه‌های برداشتی پایین دست کمتر می‌شود که همین امر موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) خواهد شد. از سوی دیگر، افزایش عدد فرود جریان (Fr) سبب می‌شود تا بخش عمده‌ای از ماده ردياب در ناحیه اصلی جریان منتقل



شکل ۶- منحنی‌های رخنه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مدل عددی OTIS در بازه L4 برای آزمایش‌های ۳۸ و ۳۹

Figure 6- Breakthrough Curves of Laboratory Results and OTIS in L4 Reach for experiments 38 and 39

نتیجه‌گیری

در این پژوهش که با هدف تخمین پارامترهای چهارگانه مدل ذخیره موقت (TSM) در انتقال و پراکندگی آلودگی اجرا شد، از روش حل عددی به کمک نرم‌افزار OTIS-P برای برآورد این ضرایب و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی استفاده شد. بدین منظور محلول NaCl با تزریق آبی غلظت اولیه ۷۰۰۰۰ ppm در یک بستر رسوبی با مصالح شنی با قطر میانه ۱۱/۸۵ (d_b) میلی‌متر با ضخامت ۱۲ سانتی‌متر در یک حالت بدون سدهای گابیونی در مسیر جریان (آزمایش شاهد) و سه حالت مختلف با یک، دو و سه سد گابیونی با طول (a) و تخلخل (d_g) مختلف مصالح سد، در سه دبی جریان ۲/۵، ۵ و ۷/۵ لیتر بر ثانیه ردیابی شد. به طور کلی نتایج زیر از این تحقیق به دست آمد:

۱) وجود سدهای گابیونی در مسیر جریان سبب افزایش نگهداشت موقت مواد محلول همراه با جریان در درون محیط متخلخل سدها می‌شود و در مقایسه با حالت بدون وجود سد گابیونی (آزمایش شاهد) غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان کاهش می‌یابد. کاهش غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان نیز موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در این نواحی خواهد شد به طوری که افزایش تعداد سدهای گابیونی (N) از یک به سه موجب ۱/۴۳ تا ۱/۷۱ برابر شدن مقدار ضریب پراکندگی طولی (D_x) می‌شود.

۲) با افزایش طول (a) سدهای گابیونی، سطح فضای محیط متخلخل در مسیر جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه مواد محلول ذخیره شده در

سدهای گابیونی در مسیر جریان آبراهه‌ها با افزایش مناطق نگهداشت سبب می‌شوند تا حجم عمده‌ای از آلاینده محلول در جریان آب به محیط متخلخل این سدها وارد و مدت زمانی در آن ذخیره موقت شود. در واقع، وجود سدهای گابیونی سبب کاهش غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان در پایین دست خواهد شد. از طرفی، با فرض نبود زوال و نگهداشت در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، سطح زیر منحنی‌های رخنه همواره ثابت و معین کننده مقدار غلظت آلاینده موجود در ناحیه اصلی جریان است. بنابراین، کاهش غلظت اوج آلودگی (C_{max}) در ناحیه اصلی جریان به علت وجود سدهای گابیونی، با افزایش مدت زمان ماند آلودگی در ناحیه اصلی جریان جبران خواهد شد. بنابراین می‌توان وجود سدهای گابیونی در مسیر جریان را از یک‌سو عامل کاهش غلظت اوج آلودگی (C_{max}) و از سوی دیگر عامل افزایش مدت زمان ماند آلودگی (T_{max}) در ناحیه‌های اصلی جریان در بازه‌های پایین دست دانست.

مقایسه پارامترهای A و A_s در آزمایش‌های بدون سد با تمام آزمایش‌های با وجود سد نشان از کاهش این دو پارامتر دارد که با نتایج بررسی‌های رانا و همکاران (Rana et al., 2017) در خصوص وجود سرریزها در مسیر جریان، تطابق دارد. وجود سدها یا سرریزها در مسیر جریان از یک‌سو باعث افزایش حجم جریان به دلیل انباشت آب پشت سازه‌ها می‌شود و از سوی دیگر مقدار مساحت نواحی رسوبی در مسیر جریان یا همان پارامتر A_s را افزایش خواهد داد.

۴) استفاده از مصالح ریزدانه‌تر موجب کاهش تخلخل نواحی نگهداشت سدهای گابیونی می‌شود و در نتیجه مقدار ذخیره موقت آلودگی در جریان آب و بستر رسوبی بالادست سدهای گابیونی افزایش می‌یابد، در نتیجه منجر به افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در این شرایط خواهد شد.

۵) مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه با مدل عددی OTIS-P با نتایج آزمایشگاهی ماده ردیاب و همچنین مقایسه تطبیقی منحنی‌های رخنه نشان از دقت بالای پارامترهای تخمینی توسط OTIS-P و قابلیت اعتمادپذیری پارامترهای تخمینی دارد.

۶) به‌منظور کمک به کنترل آلاینده‌ها در رودخانه‌های دارای سدهای گابیونی، چنانچه هیچ‌گونه محدودیتی از نظر هیدرولیکی در انتخاب این‌گونه سدها نباشد، توصیه می‌شود که از سدهای گابیونی تا جای ممکن دارای تخلخل پایین‌تر و همچنین طول بیش‌تر در مسیر جریان استفاده شود تا در این شرایط با کاهش غلظت اوج آلاینده‌ها در نقاط پایین‌دست، شدت تاثیرگذاری آنها کاهش یابد.

محیط متخلخل این گونه سدها با مدت زمان ماند بیشتری از این نواحی نگهداشت خارج می‌شوند و به مسیر اصلی جریان بازمی‌گردند. بنابراین، مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) نیز با افزایش طول سدهای گابیونی (α) افزایش خواهد یافت، به‌طوری‌که افزایش طول سدهای گابیونی (α) از ۳۵ سانتی‌متر به ۷۵ سانتی‌متر موجب افزایش ۱/۱۰ تا ۴/۴۳ برابر در مقدار ضریب تبادل ناحیه نگهداشت (α) می‌شود.

۳) افزایش طول سدهای گابیونی (α) تعبیه شده در مسیر جریان نشان داد که حجم بیشتری از جریان و مواد محلول همراه با آن در نواحی متخلخل این‌گونه سدها نگهداشت موقت می‌شوند و در نتیجه غلظت آلودگی در ناحیه اصلی جریان کاهش می‌یابد که همین امر موجب افزایش ضریب پراکندگی طولی (D_x) در این شرایط خواهد شد، به‌طوری‌که افزایش طول سدهای گابیونی (α) از ۳۵ سانتی‌متر به ۷۵ سانتی‌متر موجب افزایش ۱/۴۳ تا ۲/۴۹ برابر در مقدار ضریب پراکندگی طولی (D_x) می‌شود.

مراجع

- Aster, R.C., Borchers, B. & Thurber, C.H. (2005). Nonlinear Regression. In Parameter Estimation and Inverse Problems, Dmowska, R., , Holton, J.R., , Rossby, H.T. (eds). Elsevier Academic Press: Burlington, MA 01803, USA; 171–190.
- Azhdan, Y. (2018). Experimental investigating of the advection-dispersion equations for pollutant transport in the Gravel-Bed Rivers (Ph. D. Thesis), Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. (In Persian)
- Azhdan, Y., Emadi, A., Chabokpour, J. and Daneshfaraz. R. (2019). Estimation of Transient Storage Parameters for Simulation of Pollution Transport in the Gravel Bed Rivers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50 (1), 65-76. (In Persian)
- Bahr, J.M. & Rubin, J. (1987). Direct comparison of kinetic and local equilibrium formulations for solute transport affected by surface reaction. *Water Resources Research*, 23(3),438-452.

- Bancala, K.E. & Walters, R.A. (1983). Simulation of solute transport in a mountain pool-and riffle stream: a transient storage model. *Water Resources Research*, 19(3), 718–724.
- Camacho, L.A. & González, R.A. (2008). Calibration and predictive ability analysis of longitudinal solute transport models in mountain streams. *Environmental fluid mechanics*, 8(5):597–604.
- Chapra, S.C. (1997). *Surface water-quality modeling*. New York: McGraw-Hill.
- Dewaid, L., Bonniver, I., Rochez, G. & Hallet, V. (2016). Solute transport in heterogeneous karst systems: Dimensioning and estimation of the transport parameters via multi-sampling tracer-tests modelling using the OTIS (One-dimensional Transport with Inflow and Storage) program. *Journal of Hydrology*, 534, 567-578.
- Fernald, A. G., Wigington, P. J. & Landers, D. H. (2001). Transient storage and hyporheic flow along the willamette river Oregon: Field measurements and model estimates. *Water Resources Research*, 37(6), 1681-1694.
- Jin, L., Siegel, D.I., Lautz, L.K. & Otz, M.H. (2009). Transient storage and downstream solute transport in nested stream reaches affected by beaver dams, *Hydrological Processes*, 23(17), 2438–2449.
- Kelleher, C., Wagener, T., McGlynn, B., Ward, A.S., Gooseff, M.N. & Payn, R.A. (2013). Identifiability of transient storage model parameters along a mountain stream. *Water Resources Research*, 49(9): 5290–5306.
- Knapp, J.L.A., & Kelleher. C. (2020). A perspective on the future of transient storage modeling: Let's stop chasing our tails. *Water Resources Research*, 56, e2019WR026257.
- Madadi, M.R., Akbarifard, S. & Qaderi. K. (2020). Improved Moth-Swarm Algorithm to predict transient storage model parameters in natural streams. *Environmental Pollution*, 262(114258): 1-9.
- Mirnasari, M. (2021). Numerical and Laboratory Investigation of the Effect of Bed Form and Suspended Load on Transmission of Pollution in Rivers (Ph. D. Thesis), Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. (In Persian)
- Mirnasari, M., Emadi, A., Zahiri, A., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2021, a). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Sediment Bed Thickness and DUNE Bed-Form on Contamination Transmission in Rivers. *Journal of Hydraulics*, 16(4), 1-20. (In Persian)
- Mirnasari, M., Emadi, A., Zahiri, A., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2021, b). 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(4), 1025-1040.

- Movahedi, N., Dehghani, A.A., Schmidt, Ch., Trauth, N. & Meftah, M. (2020). Comparison of Hyporheic Exchanges in 2D and 3D Riffle-Pool bed form structures. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 52 (8), 1-3. (In Persian)
- Pal, D. & Galelli, S. (2019). A numerical framework for the multi-objective optimal design of check dam systems in erosion-prone areas. *Environmental modelling & software*, 119(3), 21-31.
- Phanikumar, M.S., Aslam, I., Shen, C., Long, D.T. & Voice, T.C. (2007). Separating surface storage from hyporheic retention in natural streams using wavelet decomposition of acoustic Doppler current profiles. *Water resources research*, 43, W05406.
- Ramaswami, A., Milford, J.B. & Small, M.J. (2005). Integrated environmental modeling: pollutant transport, fate and risk in the environment, John Wiley & Sons, Inc.
- Rana, S. M. M., Scott, D. T. & Hester, E. T. (2017). Effects of in-stream structures and channel flow rate variation on transient storage. *Journal of Hydrology*, 548, 157-169.
- Rana, S.M.M., Boccelli, D.L., Scott, D.T., Hester, E.T. (2019). Parameter Uncertainty with Flow Variation of the One-dimensional Solute Transport Model for Small Streams using Markov chain MonteCarlo. *Journal of Hydrology*, 575, 1145-1154.
- Rao, L., Wang, P.F., Dai, O.S. & Wang, C. (2018). The coupling between hydrodynamic and purification efficiencies of ecological porous spur-dike in field drainage ditch. *Journal of Hydrodynamics*, 30(3), 373-383.
- Runkel, R.L. (1998). One dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers. U.S. Geological Survey. Water-Resources investigations. Report 98-4018. 73 p. Denver, Colorado.
- Seo, I. W. & Cheong, T. S. (2001). Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(6), 453-465.
- Seo, I.W. & Cheong, T.S. (2001). Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(6), 453-465.
- Sokác, M. (2017). *Determination of the longitudinal dispersion coefficient in lowland streams with occurrence of dead zones. In Environmental Engineering 10th International Conference. 27-28 April, Vilnius Gediminas Technical University Lithuania.*
- Valett, H.M., Morrice, J.A., Dahm, C.N. & Campana, M.E. (1996). Parent lithology, surface-groundwater exchange, and nitrate retention in headwater streams. *Limnology and Oceanography*, 41(2): 333-345.
- Wagner, B.J. & Harvey, J.W. (1997). Experimental design for estimating parameters of rate-limited mass transfer: Analysis of stream tracer studies, *Water Resources Research*, 33(7), 1731-1741.

- Ward, A.S., Kelleher, C.A., Mason, S.J.K., Wagener, T., McIntyre, N., McGlynn, B., Runkel, R.L., Payn, R.A. (2017). A software tool to assess uncertainty in transient-storage model parameters using Monte Carlo simulations. *Freshwater Science*, 36(1):195–217.
- Zaramella, M., Marion, A., Lewandowski, j. & Nutzmann G. (2016). Assessment of transient storage exchange and advection-dispersion mechanisms from concentration signatures along breakthrough curves. *Journal of Hydrology*, 538,794-801.

Laboratory and Numerical Investigation of the Effect of Gabion Check Dams on the Transient Storage Model (TSM) Parameters in Pollution Transport in Rivers

Z. Nikbakht, A. Emadi* and M. Mirnaseri

* Corresponding Author: Associated professor, Water engineering department, Faculty of agricultural engineering, Sari agricultural sciences and natural resources university, Sari, Iran. Email: emadia355@yahoo.com

Received: 29 June 2022, Accepted: 8 October 2022

Introduction

In recent years, pollution of surface water resources, especially rivers, has posed an environmental challenge. Pollution from municipal or industrial wastewater and waste disposal into rivers are important problems for human societies to protect the environment. Knowing the level of river water pollution as one of the sources of human water needs is essential and therefore modeling the quality of river water is very important. Hydraulic structures in rivers are one of the ways to control pollution in open-channel flows. Check dams are one of the types of these structures that due to the porosity of their environment can play a controlling role in the transport of contamination by increasing hyporheic exchanges as well as transient storage of contamination in their porous media. Transient storage model (TSM) is one of the methods of pollution transport analysis, especially in rivers with high hyporheic exchanges. The efficiency of the Transient Storage Model (TSM) is in the correct estimation of the four parameters of the model (D_x , A_s , A and α). Previous studies have not investigated the effect of hyporheic exchanges due to gabion check dams on the four parameters of the transient storage model (TSM). In this study, the effect of gabion check dams on pollution transport and the four parameters of the transient storage model (TSM) with OTIS numerical model were investigated.

Methodology

Experiments of tracer material (NaCl) were performed in a flume with a length of 12 m, a width of 0.5 m and a height of 0.7 m in four flow discharges (2.5, 5 and 7.5 lit/s). An ultrasonic flow meter was used to measure the flow discharge in all experiments. Materials with medium diameter (D_b) of 11.85 mm and porosity (n) of 0.28 were used to create a sedimentary bed with a length of 12 m and a thickness of 12 cm at the bottom of the flume. In this study, two types of gabion check dams with medium diameter (d_g) of 11 mm (fine-grained) and 19 mm (coarse-grained) were used. In each experiment (except for the control experiment), 1 to 3 check dams were used at intervals of 2.5, 5 and 7.5 meters from the beginning of the flume, respectively. In this study, check dams with lengths of 0.75 and 0.35 m, widths of 0.5 and heights of 0.4 m were used. The length of the flume was divided into four equal reaches (L1, L2, L3 and L4). Two sensors were placed to measure the electrical conductivity (EC) of water at the end of each reach to measure the amount of contamination. Micro-propeller and ultrasonic depth-gauge were used to measure the velocity (V) and depth (h) of water flow in each reach. The laboratory results in L4 reach were simulated by the OTIS-P numerical model and the four parameters of the Transient Storage Model (TSM) were estimated. The OTIS-P numerical model estimates the four parameters of the Transient Storage Model (TSM) using the Nonlinear Least Squares (NLS) optimization algorithm and then simulates the breakthrough curves (BTCs) at L4 reach using the Crank-Nicolson implicit finite difference method.

Results and Discussion

The results showed that gabion check dams increased the transient storage of solute in the porous media of such dams, thus reducing the peak contamination concentration (C_{max}) in the main flow area. On the other hand, check dams in the flow path will act as a sedimentary bed-form, which increases the hyporheic exchanges between the main flow area and the porous media of such dams. Increasing hyporheic exchanges into the porous media of the dams will also reduce the contamination concentration (C_{max}) in the main flow area. Increasing hyporheic exchanges into the porous media of the dams also reduces the contamination concentration (C_{max}) in the main flow area. Reducing the contamination concentration (C_{max}) in the main flow area will also increase the longitudinal dispersion coefficient (D_x).

The results showed that reducing the length of check dams (a) causes a smaller volume of flow and solute in the porous media of such dams to be temporarily maintained. As a result, the amount of contamination concentration (C_{max}) in the main flow area increases, which reduces the longitudinal dispersion coefficient (D_x) in these conditions.

Comparison between the storage zone exchange coefficients (α) estimated by the OTIS-P numerical model showed that these coefficients decreased with decreasing the length of check dams (a). Reducing the length of check dams (a) will reduce the space of the porous media in the flow path. Therefore, the solute will leave these storage zones with a shorter residence time, so the storage zone exchange coefficient (α) decreases with decreasing the length of check dams (a).

Gabion check dams made of fine-grained materials reduce the exchange discharge between the check dams and the main flow area. The use of fine-grained materials reduces the rate of contamination transfer to the downstream reaches, so the peak contamination concentration (C_{max}) in the downstream reaches will decrease, so the longitudinal dispersion coefficient (D_x) will increase in the fourth interval (L4).

Conclusions

- Increasing the number of gabion dams (N) from one dam to three dams caused an approximately 1.43 to 1.71 times the value of longitudinal dispersion coefficient (D_x).
- Increasing the length of gabion dams (a) from 35 cm to 75 cm caused approximately 1.43 to 2.49 times the value of the longitudinal dispersion coefficient (D_x).
- Increasing the length of gabion dams (a) from 35 cm to 75 cm caused an approximately 1.10 to 4.43 times the value of the storage zone exchange coefficients (α).
- The use of fine-grained materials in gabion dams increased the storage zone exchange coefficients (α).

Keywords: Advection-Dispersion, longitudinal dispersion coefficient (D_x), storage zone exchange coefficients (α), Storage Zone.