Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2020.286707.668285 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۵، مرداد ماه ۱۳۹۹ (ص ۱۱۵۰-۱۱۳۷)

The Performance Assessment of the Hybrid Cells in Series and Transient Storage Models in the Tracer Routing through the Interconnected Reservoirs

JAFAR CHABOKPOUR[1*], MOHAMMAD ZABIHI[1]
1. Civil Engineering Department, Faculty of engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
(Received: Oct. 1, 2019- Revised: Feb. 3, 2020- Accepted: Feb. 5, 2020)

ABSTRACT

Some parts of the free surface flow including river networks in which the velocities is low, can act as dead or hyporheic zones. These areas can help to the temporary storage of the tracers and consequently increasing the residence time parameter. In this study, the effects of consecutive reservoirs caused by construction of gabion flood control structures have been investigated in terms of dead zones creation and residence time expansion. For this purpose, 36 experiments were performed in the laboratory flume, including two gabion dams. The experimental variables included three rock median diameters, four entrance discharges and three entrance concentrations. The HCIS model, which includes temporal parameters of the λ, T_1, and T_2, has been used to obtain the residence time, the reservoirs volume behind the gabion dams and flow hydraulic parameters. The results showed that the transport time parameters were increased linearly with reservoir volume (V) and number (N). Also, linear regressions were established between the number of dams and the other temporal parameters obtained from experimental breakthrough curves (BC). It was found that the slopes of N-t_t and V-t_t (t_t is total duration time of the BC) linear regressions were bigger than the similar values for t_1 (time from the injection time origin to the rising point of BC curve), indicating a higher residence time due to transient storage of the pollution. Also, it was found that the time parameters obtained from HCIS model are increased linearly with N and distance from the injection point.

Keywords: Reservoirs in Series, Tracer Test, Transient Storage, Transportation Time, HCIS Model.

* Corresponding Author's Email: mohammad_zbh70@yahoo.com
www.SID.ir

Archive of SID

بررسی کارکرد مدل سلول‌های ترکیبی و ذخیره-موقت بر فرآیند عبور ردیاب از مخازن متوالی

جعفر چابک‌پور[1*]، محمد ذبیحی[1]

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۹- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶)

چکیده

قسمت‌هایی از مجاری روباز اعم از رودخانه‌ها که در آن معمولا جریان سرعت پایین‌تری دارد، مانند مناطق ماندابی و مناطق هایپوریک، می‌توانند به ذخیره‌سازی موقت مواد ردیاب کمک کنند و باعث نگه‌داشت آلودگی و افزایش پارامتر زمان ماند شده و انتقال آلودگی در جریان را تحت تاثیر قرار دهند. در این تحقیق، اثر مخازن پشت سر هم ایجاد شده در رودخانه‌ها تحت تاثیر احداث بندهای گابیونی که معمولاً برای کنترل سیلاب اجرا می‌گردند، در ایجاد مناطق ماندابی و افزایش زمان ماند مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ۳۶ آزمایش مختلف با متغیرهایی شامل ۳ نوع سنگ‌دانه، ۴ دبی و ۳ غلظت ورودی بر روی ۲ مخزن سری گابیونی نصب‌شده داخل یک فلوم آزمایشگاهی انجام گردید. از مدل HCIS که شامل پارامترهای (λ، T_1 و T_2) است، برای به‌دست آوردن زمان ماند و حجم مخازن پشت بندها و تعیین پارامترهای هیدرولیکی جریان استفاده گردید. با بررسی نتایج مشاهده گردید که پارامترهای زمان انتقال برای تست‌های ردیاب، به‌صورت خطی با تعداد بندها (N) و حجم مخزن پشت آن افزایش می‌یابد. همچنین بین سایر پارامترهای زمانی به‌دست آمده از منحنی‌های رخنه آزمایشگاهی و تعداد بندها، رگرسیون خطی برقرار گردید. شیب رگرسیون خطی برای t_t (زمان از آغاز تا انتهای بازوی پایین‌رونده) در مقابل N و حجم مخزن، بزرگتر از مقدار مشابه برای t_1 (زمان از لحظه تزریق آلودگی تا زمان آغاز حرکت صعودی بازوی بالارونده منحنی رخنه) بود که بیانگر زمان ماند بیشتر در اثر ذخیره‌سازی موقت در سیستم است. همچنین مشاهده گردید که پارامترهای زمانی استخراج شده از مدل HCIS نیز به‌صورت خطی با N و فاصله از نقطه‌ی تزریق افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخازن سری، تست ردیاب، ذخیره‌سازی موقت، زمان انتقال، مدل HCIS.

مقدمه

ذخیره سازی موقت آلاینده‌ها در محیط‌های مختلف به‌خاطر برخی از ویژگی‌های هندسی، هیدرولیکی و شیمیایی جریان‌های سطحی وجود داشته و باعث تاخیر در انتقال آلودگی به پایین-دست می‌شود و میزان و مقدار آن با شرایط فیزیکی آبراهه و ساختار کانال و بستر رودخانه تعیین می‌شود (Harvey and Bencala, 1993; Kasahara and Wondzell, 2003; Wondzell, 2006)، به همین دلیل، اساس ارائه‌ی مدل‌های ذخیره‌ای به نحوه‌ی تبادل جرم مابین این منطقه و بدنه‌ی اصلی جریان مربوط می‌شود (Valett *et al*., 1996; Winter *et al*., 1999; Harvey *et al*., 2003). گاهاً رودخانه‌ها و جریان‌های سطحی حاوی چنین شرایطی را تحت عنوان رودخانه‌های شامل مناطق هایپوریک[1] نیز نام‌گذاری می‌نمایند (Thackston and Schnelle, 1970; Bencala, 1983; Harvey and Bencala, 1993; Wondzell, 2006). ذخیره‌سازی موقت، انتقال ردیاب به پایین‌دست جریان را به تاخیر می اندازد. بنابراین زمان بیشتری برای فرآیندهای ژئوشیمیایی و بیوشیمیایی در کانال اصلی و در جریان آهسته آب در اطراف کانال، در حوضچه‌ی پشت سد و یا در بستر فراهم می‌کند (Findlay, 1995; 1998; Doyle *et al*., 2003; Harvey *et al*., 2003; Ensign and Doyle, 2005). مطالعات قبلی به وضوح نشان می‌دهد که ساختارهای ژئومورفولوژی موجود در رودخانه‌ها باعث افزایش قدرت ذخیره‌سازی موقت و افزایش زمان ماند آلاینده در جریان می‌شوند (Harvey and Bencala, 1993; Kasahara and Wondzell, 2003; Lautz *et al*., 2006; Wondzell, 2006; Gooseff *et al*., 2007). علاوه بر مورفولوژی طبیعی رودخانه‌ها، احداث سازه‌های هیدرولیکی متنوع در مسیر جریان‌های سطحی نیز باعث ایجاد تغییرات زیادی در شرایط ذخیره‌ای آلاینده‌ها می‌شود. یکی از انواع این سازه‌ها بندهای گابیونی هستند که برای تخفیف اثرات سیلاب و معمولاً به‌صورت پشت سرهم در مسیر جریان رودخانه ایجاد می‌شوند. مخازن متوالی ایجاد شده در بستر رودخانه‌ها با افزایش سطح آب باعث افزایش زمان ماند آلاینده‌ها در بازه‌های رودخانه‌ای می‌گردند.

*نویسنده مسئول: j.chabokpour@matragheh.ac.ir

۱. Hyperopic zone

www.SID.ir

Archive of SID

بنابراین موانع موجود می‌تواند فرآیند ذخیره‌سازی موقت را با نگهداشت موقت آب و آلاینده و افزایش تراز آب سطحی و زیر زمینی و در نهایت انتقال آلاینده به پایین‌دست تحت تاثیر قرار دهد (Johnston and Naiman, 1987, 1990; Woo and Waddington, 1990; Westbrook *et al*., 2006; Apple, 1985; Woo and Waddington, 1990; Lautz *et al*., 2006; Westbrook *et al*., 2006).

مدل سلول‌های سری ترکیبی (HCIS[1]) ابتدا توسط Gosh (2001)، برای شبیه‌سازی منحنی‌های رخنه حاوی چولگی و همچنین غلبه بر معایب مدل سلول‌های سری (CIS) ارائه گردید. Kumarasamy (2015)، مدل HCIS را در رودخانه برهمانی[2] با در نظر گرفتن معادله‌ی زوال درجه‌ی اول برای تحلیل تغییرات زمانی و مکانی پارامتر DO مورد استفاده قرار داد و نتیجه گرفت که در این رودخانه با شرایط ویژه هندسی و هیدرولیکی مخصوص به خود، به‌منظور حل مشکلات آلودگی، به آزادسازی حداقل جریانی برابر با ۱۱۸۰ مترمکعب بر ثانیه نیاز است. Olowe and Kumarasamy (2017)، بر روی اثرات مقادیر موادی مانند آمونیاک بر کاهش DO و در نتیجه رشد جلبک در رودخانه Umgeni مطالعه نمودند. آن‌ها یک راه‌حل تحلیلی بر اساس ترکیب مدل HCIS که حاوی یک سلول انتقالی و یک سلول انتشاری با معادله سنتیکی آمونیاک بود را توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از مدل توسعه‌یافته جدید، تغییرات غلظت آمونیاک در قسمت‌های مختلف رودخانه را مورد بررسی قرار دادند. Chabokpour *et al*., (2018) از روش گشتاورگیری زمانی به‌منظور استخراج پارامترهای انتقال و انتشار درون مصالح سنگ‌دانه‌ای استفاده نمودند و با استخراج روابط صریح بر اساس مدل کلاسیک انتقال و انتشار (ADE[3])، نتیجه‌گیری نمودند که با حل هم‌زمان معادلات گشتاورهای زمانی به طریق عددی، می‌توان پارامترهای مربوطه را به سادگی استخراج نموده و در معادلات مدل برای محاسبات بعدی از آن‌ها استفاده نمود. Chabokpour (2019)، از مدل توسعه یافته توسط Gosh (2001) به‌منظور بررسی انتقال مواد ردیاب در مصالح سنگی لایه‌ای استفاده نمود و نتیجه‌گیری کرد که این مدل حتی با استفاده از یک واحد سلولی نیز قادر به پیش‌بینی دقیق منحنی‌های غلظت-زمان در نقاط مختلف مصالح لایه‌ای می‌باشد. Ganesh *et al*., (2019) به بررسی جریان غیرخطی درون بندهای سنگ‌ریزه‌ای پرداخت. ایشان با جمع‌آوری داده‌های صحرایی ادعا نمودند که مطالعه ایشان محدودیت‌های داده‌های آزمایشگاهی را نداشته و پس از آنالیز آماری بر روی داده‌های برداشتی چنین نتیجه‌گیری نمود که رابطه سرعت توانی بهتر از مدل‌های دیگر در این زمینه جواب‌گو بوده و علاوه بر آن، بعضی از مدل‌های متداول ارائه شده توسط سایر محققین را نیز راستی‌آزمائی نمودند. علاوه بر مباحث متنوع جریان درون‌گذر از بندهای سنگ‌ریزه‌ای، ارزیابی ایستائی و پایداری چنین سازه‌هایی نیز توسط تعدادی از محققان انجام شده است (Ravindra *et al*., 2018).

با توجه به موارد ذکر شده در خصوص تغییرات هیدولیکی ایجاد شده تحت اثر ایجاد سازه‌های گابیونی متوالی در بستر رودخانه‌ها و همچنین تاثیر این تغییرات در مشخصه‌های انتقال آلاینده‌ها اعم از زمان ماند، مطالعه‌ی حاضر تلاش می‌کند تا علاوه بر بررسی قابلیت استفاده از مدل‌های HCIS و TS بر روی مخازن سری با استفاده از مجموعه تست‌های ردیاب انجام گرفته در محیط آزمایشگاهی، تاثیر افزایش تعداد مخازن گابیونی بر روی ذخیره‌سازی موقت و انتقال محلول به پایین‌دست را نیز مورد بررسی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی مربوط به این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی با ابعاد (۱ × ۲ / ۱ × ۱۲) متر انجام شد (شکل ۱). اندازه‌گیری دبی بر روی این فلوم با استفاده از یک دبی‌سنج صوتی انجام شده و برای تشکیل مخازن سری در این فلوم از دو بند گابیونی استفاده گردید. مصالح سنگی تشکیل‌دهنده این بندهای گابیونی دارای قطرهای متوسط ۱/۱، ۲/۳ و ۳/۶ سانتی‌متری بوده و تخلخل آن‌ها نیز به‌ترتیب ۴۳٪، ۴۴٪ و ۴۵٪ اندازه‌گیری شده بود. ابعاد بندهای گابیونی ایجاد شده (شکل ۲- الف) نیز به‌صورت (۱ × ۱/۲ × ۰/۵) متر به‌ترتیب از راست برای ارتفاع، عرض و طول بود. جهت ساخت مخازن گابیونی، توری مصرفی از جنس گالوانیزه با چشمه‌ی ۱ سانتی‌متری انتخاب و برای حفظ پایداری و جلوگیری از تغییر شکل مخازن در اثر وزن حاصله از سنگ‌دانه‌ها، چهارچوب‌هایی فلزی با ابعاد متناظر با مخازن، طراحی و توری‌ها به آن دوخته شد. پس از آماده‌سازی گابیون و قراردادن آن در محل از قبل تعیین‌شده، مصالح سنگی در ۳ مرحله از سنگ پر نموده و سپس با سیم مهار گردید. این عمل به خاطر جلوگیری از تغییر شکل گابیون‌ها می‌باشد. سنگدانه یکی از دو ماده اصلی تشکیل‌دهنده گابیون بوده و نقش مهمی در بررسی هیدرولیک

۱. Hybrid cells in series model
۲. Brahmani River
۳. Advection dispersion equation

www.SID.ir

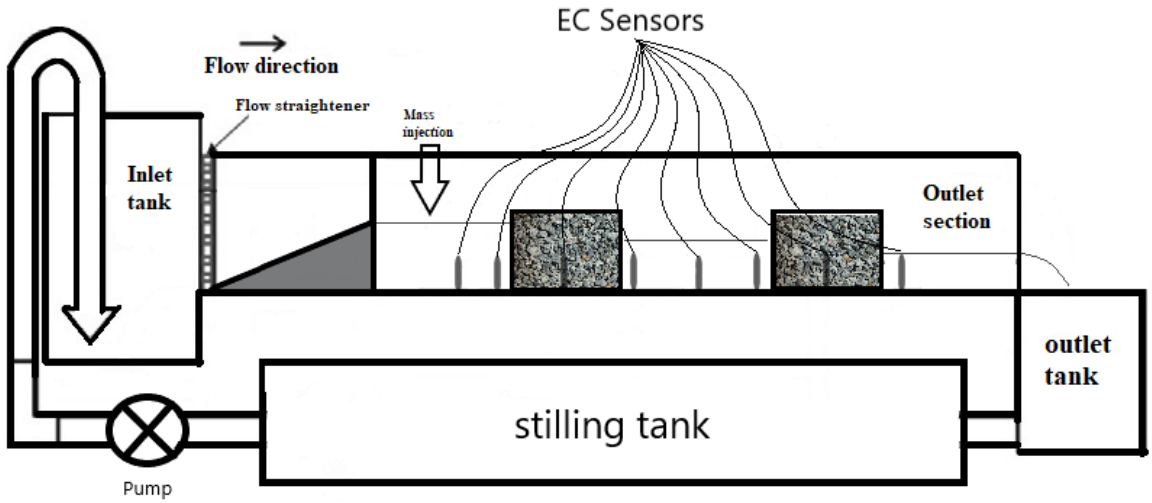
Archive of SID

جریان عبوری دارد. انتخاب مصالح شکسته در ساخت گابیون‌ها به دو دلیل توسط استفنسون (Stephenson, 1979) توصیه شده است: اولاً اینکه مصالح شکسته قادر به عبور سرعت جریان کمتر نسبت به مصالح گرد گوشه به میزان ۴۱ درصد می‌باشند، ثانیاً قفل شدن این مصالح در یکدیگر باعث افزایش پایداری سازه می‌گردند. در پژوهش حاضر از دو مخزن به‌صورت سری با ابعاد مشابه و با فاصله‌ی ۳۷۱ سانتی‌متر از یکدیگر (یکی در بالادست و دیگری در پایین‌دست) استفاده شد. اولین مخزن به فاصله‌ی ۲۴۰ سانتی‌متر از محل تزریق آلاینده و دیگری ۶۱۱ سانتی‌متر از محل تزریق آلاینده فاصله دارد.

از کلرید سدیم (NaCl)، به‌عنوان ردیاب زوال‌ناپذیر استفاده شد و داده‌های مربوط به هدایت الکتریکی توسط سنسورهای مربوطه که در فواصل ۰/۹، ۲/۱۵، ۲/۶۵، ۳، ۴/۳۴، ۶، ۶/۳۶ و ۶/۷۱ متری از محل تزریق نصب شده بودند و در فواصل زمانی دو ثانیه‌ای ثبت شده و توسط روابط مربوطه به غلظت تبدیل گردید. از یک تزریق کننده عرضی مطابق با شکل (۲-ب) برای تزریق محلول ردیاب در عرض فلوم استفاده شد و ۴ دبی ورودی به میزان ۷/۵ ، ۹، ۱۱ و ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه و سه غلظت ورودی برابر با ۱۰۰، ۱۴۰ و ۲۰۰ گرم بر لیتر به‌عنوان متغیرهای جریان تعیین شدند. شیب کف کانال در طول آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰ درصد در نظر گرفته شده و تعداد آزمایش‌ها در حالت کلی برابر با ۳۶ عدد تعیین گردید. با توجه به موقعیت‌های جای-گذاری سنسورها، بازه‌ی مطالعاتی به ۳ قسمت تقسیم شده (جدول ۱) و محل تزریق آلاینده به‌عنوان نقطه‌ی مرجع انتخاب گردید. بازه‌ی اول (S_1) از محل تزریق تا سنسور دوم با طول ۲/۱۵ متر، بازه‌ی دوم (S_2) از محل تزریق تا سنسور پنجم با طول ۴/۳۴ متر و بازه‌ی سوم از محل تزریق تا سنسور هشتم (S_3) که دارای طول ۶/۷۱ می‌باشد که به‌ترتیب دارای ۰، ۱ و ۲ مخزن هستند. همچنین با برداشت داده‌های مربوط به عمق جریان در بخش‌های مختلف پروفیل طولی تشکیل شده تحت اثر دبی‌ها و سنگ‌دانه-های مختلف به‌دست آمده و بیشترین حجم ذخیره جریان در بخش‌های مختلف مخازن سری، به‌دست آمد. بیشترین احجام ذخیره‌ای مربوط به دبی ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه و قطر سنگ‌دانه ۱/۱ سانتی‌متری می‌باشد که مشخصات کلی حجم ذخیره جریان مطابق با جدول (۱) استخراج گردیده است.

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایش

بازه	طول بازه (متر)	تعداد سد	حجم ذخیره‌ای (متر مکعب)
S_1	۲/۱۵	۰	۱/۲۵
S_2	۴/۳۴	۱	۱/۹۶
S_3	۶/۷۱	۲	۲/۵۸



شکل ۱- شماتیک مدل آزمایشگاهی برای برداشت داده‌ها

مدل‌های نظری مورد استفاده در پژوهش

در این تحقیق از مدل HCIS (Hybrid Cells in Series) برای تحلیل داده‌ها استفاده گردید و نتایج حاصل از تست‌های ردیاب برای کمی‌سازی پارامترهای زمان عبور استفاده شد. این مدل بر اساس مزایایی که بر دیگر مدل‌های سلولی ترکیبی[1] دارد برای این مطالعه انتخاب شده است. یک واحد منفرد از این مدل توانایی

۱. The mixing cells model

www.SID.ir

Archive of SID

تولید الگوی نامتقارنی از منحنی غلظت-زمان می‌باشد و بازوهای بالارونده و پایین‌رونده را نشان می‌دهد (Ghosh et al., 2004). رفتار این مدل مشابه حل تحلیلی معادله‌ی انتقال-انتشاری است که اندازه‌ی یک واحد طولی آن بیشتر از $4\,D/V$ باشد، که در آن D ضریب پخشیدگی طولی و V سرعت متوسط جریان می‌باشد. در این مدل، طول هر نوع محیط هیدرولیکی به تعدادی واحدهای متصل به‌هم تقسیم شده و هر واحد از سه سلول متفاوت تشکیل می‌شود. اولین سلول یک سلول صرفاً انتقالی در مرحله اول انتشار آلودگی است، حجم، زمان انتشار و شرایط اولیه آن به‌ترتیب برابر V_0، λ و C_i می‌باشد. در سلول دوم و سوم فرض می‌شود که انتقال و انتشار انجام می‌شود. غلظت خروجی از مخزن اول به مخزن دومی متصل شده و غلظت خارج شده از سلول انتشار دومی می‌تواند به‌عنوان غلظت دبی واحد اول در نظر گرفته شود (Ghosh, 2001). معادلات مدل HCIS با اعمال تعادل جرمی به سلول اول تا سوم (شکل ۳) و مطابق با معادلات (۱) تا (۱۰) که توسط Ghosh (2001) و Ghosh et *al.* (2004) استخراج شده است، به‌دست می‌آید.

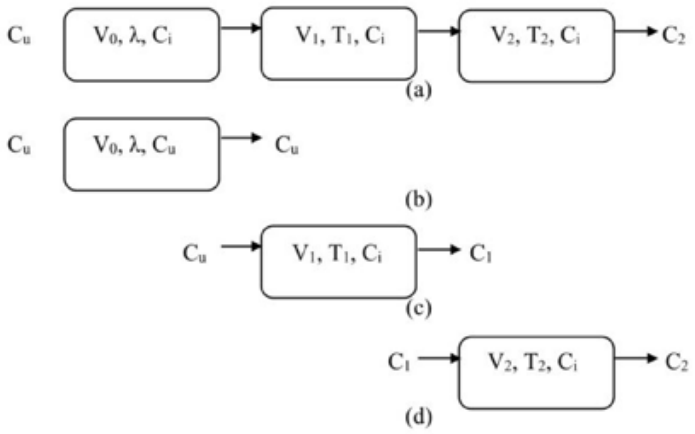


(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) نمای کلی از فلوم آزمایشگاهی و سدهای سنگریزه‌ای، ب)دستگاه تزریق آلودگی به صورت عرضی



شکل ۳- شکل مفهومی از فرایند انتقال در بخش‌های مختلف مدل

غلظت خروجی در سلول صرفاً انتقالی می‌تواند از طریق معادله‌ی (۱) به‌صورت زیر محاسبه شود:

(رابطه ۱)

$$C(\lambda V, t) = C_u \mathrm{Dirac}(t-\lambda) + (1-\mathrm{Dirac}(t-\lambda))C_u$$

که در آن V نشان‌دهنده سرعت متوسط جریان، C_u غلظت ورودی از بالادست، λ زمان تاخیر در سلول انتقال، t زمان و تابع دیراک برای مقادیر مثبت یا صفر برابر با ۱ و برای مقادیر منفی برابر با صفر است.

با اعمال تعادل جرمی در سلول دوم که به‌عنوان سلول انتشار اول نیز شناخته می‌شود، معادله دیفرانسیل زیر به‌صورت معادله (۲) تشکیل می‌شود.

(رابطه ۲)

www.SID.ir

Archive of SID

$$\frac{dC_1(t)}{dt}+\frac{C_1(t)}{T_1}=\frac{C_u Dirac(t-\lambda)}{T_1}$$

با فرض $t > \lambda$ و همچنین اعمال شرایط اولیه‌ای مطابق با رابطه (۳)، حل دقیق معادله‌ی (۲)، به‌صورت معادله (۴) به‌دست می‌آید:

$$C_1(\lambda)=C_i \quad , \quad C_2(\lambda)=C_i \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

$$C_1(t)=C_u Dirac(t-\lambda)+(C_i-C_u)e^{-\frac{t-\lambda}{T_1}} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن T_1، زمان ماند آلودگی در سلول انتشاری اول، C_i غلظت پایه جریان در سلول‌های مدل، $C_1(t)$ تابع غلظت در سلول انتشاری اول و C_u شرط مرزی اعمال شده در بالادست سلول‌ها می‌باشد. با ادامه همین روند و اعمال تعادل جرمی به سلول انتشار دوم (سومین سلول در یک واحد) و حل معادله دیفرانسیل و ساده‌سازی معادله به‌دست آمده با اعمال غلظت اولیه برابر صفر $(C_i = 0)$، در نهایت به رابطه (۵) می‌رسیم.

(رابطه ۵)

$$C_2(t)=C_u Dirac(t-\lambda)-C_u Dirac(t-\lambda)\times \left[\frac{T_1}{T_1-T_2}e^{-\frac{t-\lambda}{T_1}}-\frac{T_2}{T_1-T_2}e^{-\frac{t-\lambda}{T_2}}\right]$$

که در آن $C_2(t)$ تابع غلظت در سلول انتشاری دوم و T_2 زمان ماند در سلول انتشاری دوم می‌باشد.

با مشتق‌گیری از $C_2(t)$ نسبت به زمان و با درنظر گرفتن $C_u = 1$ توابع پاسخ برای ورودی پالسی $(L_3(t))$ مطابق معادله‌ی (۶) به‌دست می‌آید.

$$L_3(t)=\frac{Dirac(t-\lambda)}{(T_1-T_2)}\left[e^{-\frac{t-\lambda}{T_1}}-e^{-\frac{t-\lambda}{T_2}}\right] \qquad \text{(رابطه ۶)}$$

با مساوی صفر قرار دادن معادله (۶) زمان رسیدن به اوج $(t_p(t))$ به‌دست می‌آید (معادله ۷) و با جایگذاری این زمان در تابع پاسخ (معادله ۶)، حداکثر غلظت $(C_p(t_p))$ مطابق معادله (۸) به‌دست می‌آید:

$$t_p(t)=\frac{T_1T_2}{(T_1-T_2)}\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)+\lambda \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

(رابطه ۸)

$$C_p(t_p)=\frac{C_u Dirac(t-\lambda)}{(T_1-T_2)}\left[\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{T_2}{(T_1-T_2)}}-\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{T_1}{(T_1-T_2)}}\right]$$

با استفاده از تکنیک تئوری کانوولیشن[۱]، همانند معادله‌ی (۹)، پاسخ n امین واحد به‌صورت معادله (۱۰) محاسبه می‌شود (Ghosh et al. 2008).

(رابطه ۹)

$$C(n\Delta x,t)=\int_0^t C_2((n-1)\Delta x.\tau)\times C_2(\lambda,T_1,T_2,t-\tau)d\tau$$

(رابطه ۱۰)

$$C(n\Delta x,t)=$$

$$\frac{Dirac(t-n\lambda)}{(T_1-T_2)^n}\left[\sum_{i=1}^{n}(-1)^{i-1}\frac{n!(t-n\lambda)^{n-i}}{(n-1)!(n-i+1)!}\left(\frac{T_1T_2}{(T_1-T_2)}\right)^{i-1}\times \{\exp(-\frac{(t-n\lambda)}{T_1})-(-1)^{n-i}\times\exp(-\frac{(t-n\lambda)}{T_2})\}\right]$$

که در آن $C_2(\Delta x,t)=C_2(\lambda,T_1,T_2,\tau)$، خروجی اولین واحد ترکیبی، $C(n\Delta x,t)$ خروجی n امین واحد ترکیبی و n تعداد واحدها است و به ازای $t \geq n\lambda$ تابع $Dirac(t-n\lambda)=1$ و برای $t \leq n\lambda$ تابع $Dirac(t-n\lambda)=0$ خواهد بود.

علاوه بر مدل HCIS که معادلات مربوط به آن در قسمت بالا توضیح داده شد، مدل TS[۲] نیز یکی از مدل‌های پرکابرد برای بررسی انتقال و انتشار مواد ردیاب می‌باشد. این مدل از دو معادله دیفرانسیل به‌صورت معادلات (۱۱) و (۱۲) تشکیل شده است.

$$\frac{\partial C}{\partial t}+V\frac{\partial C}{\partial x}=D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-\beta T^{-1}(C-C_s) \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t}=T^{-1}(C-C_s) \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$

که در روابط فوق، C غلظت متوسط جریان اصلی، C_s غلظت منطقه ذخیره‌ای، β نسبت مساحت منطقه ذخیره‌ای به مساحت کل جریان، T زمان ماند، x پارامتر طول، t پارامتر زمان، D ضریب انتشار طولی و V سرعت متوسط جریان می‌باشند.

یکی از روش‌های حل مدل فوق، استفاده از مدل عددی OTIS می‌باشد که توسط USGS ارائه شده و در این تحقیق از آن برای استخراج پارامترهای مربوطه مدل TS استفاده گردید. در ادامه برای ارزیابی حساسیت داده‌های ردیاب و قابلیت اطمینان داده‌های شبیه‌سازی شده، عدد دامکولر[۳] (DaI) نیز از روی پارامترهای مدل TS محاسبه گردید (رابطه ۱۳).

$$DaI=\frac{\propto\left(1+\frac{A}{A_s}\right)L}{V} \qquad \text{(رابطه ۱۳)}$$

که در آن V سرعت جریان (متر بر ثانیه) ، L (متر) طول جریان، $\propto$ ضریب تبادل جرم مابین بدنه‌ی اصلی جریان و منطقه‌ی ذخیره‌ای، A (مترمربع) مساحت بدنه‌ی اصلی جریان و A_s (مترمربع) مساحت منطقه‌ی ذخیره‌ای می‌باشد. عدد DaI معمولاً برای توصیف درجه‌ی توازن مابین فرایندهای انتقال پایین‌دست و فرایند ذخیره‌سازی به‌کار برده می‌شود. هنگامی که DaI به عدد یک نزدیک باشد بیانگر حساسیت و قابلیت اطمینان بالاتر داده‌ی ردیاب می‌باشد و هرچه این عدد بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک باشد عدم قطعیت داده‌ها افزایش می‌یابد (Wagner and Harvey, 1997; Harvey, 2000). به‌عنوان مثال هنگامی که DaI بسیار کوچک‌تر از ۱ باشد تعداد کمی از ردیاب‌ها وارد منطقه‌ی ذخیره‌سازی موقت می‌شود و منحنی رخنه تنها بیانگر فرایند انتقال و انتشار است و هنگامی که DaI بسیار بزرگ‌تر از واحد

۱. Theoretical convolution technique

۲. Transient Storage

۳. Damkohler number

www.SID.ir

Archive of SID

باشد تمام ردیاب‌ها با منطقه‌ی ذخیره‌سازی موقت تعامل انجام داده و تبادل جرم دیگر قابل تمایز با فرایند اختلاط انتشاری نخواهد بود. از پارامترهای استخراج شده توسط مدل OTIS، که یک مدل عددی برای حل معادلات (۱۱) و (۱۲) است، (α، A، A_s) برای محاسبه‌ی معیارهای ذخیره‌سازی موقت در هر آزمایش و از ۲ پارامتر F_{mean} و F^{L}_{med} (مطابق با روابط ۱۴ و ۱۵) برای توصیف تاثیر ذخیره‌سازی موقت بر روی زمان ماند محلول در هر محدوده استفاده شد.

$$F_{mean} = \frac{A_s}{A + A_s} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

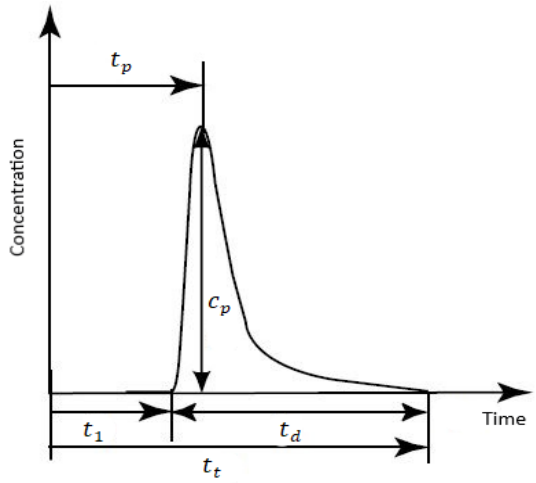
$$F^{L}_{med} \cong (1 - e^{-L\left(\frac{\alpha}{v}\right)}) \frac{A_s}{A+A_s} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

F_{mean} برابر با درصدی از میانگین زمان جابه‌جایی است که در اثر ذخیره‌سازی موقت ردیاب ایجاد شده و برابر با درصدی از کل حجم بازه‌ای می‌باشد که توسط منطقه‌ی ذخیره‌سازی اشغال شده است، F^{L}_{med} درصدی از میانه‌ی زمان جابه‌جایی است که به خاطر ذخیره‌سازی موقت در طول L می‌باشد. بازه‌هایی از جریان که در آن ذخیره‌سازی موقت تاثیر بیشتری در انتقال آلودگی به پایین‌دست می‌گذارد، دارای مقادیر بزرگتری از F^{L}_{med} می‌باشند که بیانگر این حقیقت است که درصد بیشتری از زمان انتقال آلودگی در جریان بر اثر ذخیره‌سازی موقت است (Runkel, 2002).

نتایج و بحث

منحنی‌های رخنه و پارامترهای زمان عبور

در شکل (۴) شماتیک عمومی منحنی رخنه به‌دست آمده از تزریق آنی یک ردیاب را نشان می‌دهد (Jobson, 1996; Gurdak *et al.*, 2002). منحنی‌های رخنه‌ی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تحقیق حاضر به شکل زنگوله نامتقارن می‌باشند که شیب بازوی بالارونده‌ی آن تند بوده و بازوی پایین‌رونده به‌علت شیب ملایم آن طولانی‌تر می‌باشد. پارامترهای زمان عبور، انتقال آب و محلول (آلودگی) را در جریان توصیف می‌کنند و از روی منحنی رخنه قابل استخراج می‌باشند (Jobson, 1996). پارامتر-های زمانی مورد استخراج به‌صورت t_1، t_p، t_t و t_d است که: t_1 معرف زمان از لحظه تزریق آلودگی تا زمان آغاز حرکت صعودی بازوی بالارونده منحنی رخنه، t_p زمان وقوع غلظت بیشینه، t_t زمان ار آغاز تا انتهای بازوی پایین‌رونده و t_d مدت زمان استمرار ابر آلودگی بوده که برابر با $(t_t - t_1)$ می‌باشد. در این تحقیق انتهای بازوی پایین‌رونده برابر با زمان وقوع غلظت پس‌زمینه (زمان برگشت به غلظت پس‌زمینه) و زمان صعود بازوی بالارونده نیز لحظه‌ی آغازین افزایش مقدار غلظت پس‌زمینه تعریف شده است.



شکل ۴- منحنی رخنه و پارامترهای زمان

این پارامترها برای تمامی آزمایش‌ها مورد محاسبه قرار گرفتند و نتایج مربوط به یک آزمایش با قطر سنگدانه ۱/۱ سانتی-متری، غلظت تزریقی ۱۴۰ گرم بر لیتر و دبی عبوری ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه مطابق با جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای زمان عبور برای قسمت‌های مختلف آزمایش قطر سنگ‌دانه ۱/۱ سانتی‌متر، دبی عبوری ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه و غلظت تزریقی ۱۴۰ گرم بر لیتر

نام بازه	طول بازه (متر)	پارامترهای زمان انتقال			زمان t_d (ثانیه)	غلظت بیشینه C_p (میلی‌گرم/ لیتر)
		t_1 (ثانیه)	t_p (ثانیه)	t_t (ثانیه)		
S_1	۲/۱۵	۱۶	۲۰	۲۵۰	۲۳۴	۱۷۹۸/۳
S_2	۴/۳۴	۴۴	۵۶	۳۲۲	۲۸۶	۱۶۶۸/۶
S_3	۶/۷۱	۷۶	۱۰۰	۳۸۴	۳۰۸	۸۵۷/۸

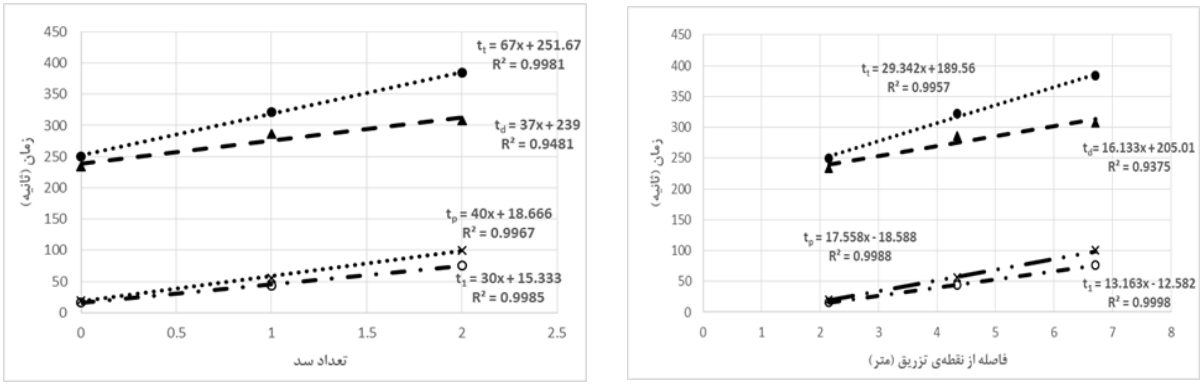
پارامترهای زمان عبور، t_1، t_p، t_t و t_d، به دلیل پیمودن مسافت بیشتر از S_1 تا S_3 افزایش یافته است با ترسیم این مقادیر در مقابل فاصله و تعداد بندها، پارامترهای زمان عبور به صورت خطی با فاصله افزایش یافت (شکل ۵- الف). بیشترین افزایش در t_t وکوچکترین افزایش خطی در t_1 رخ داد. شکل (۵-ب) نشان-دهنده‌ی برازش عالی ($R^2 > 0.99$) بین تعداد سد و پارامترهای زمان عبور t_1، t_p و t_t و $R^2 > 0.94$ برای t_d است.

زمان رسیدن به حداکثر غلظت و غلظت بیشینه دو پارامتر

www.SID.ir

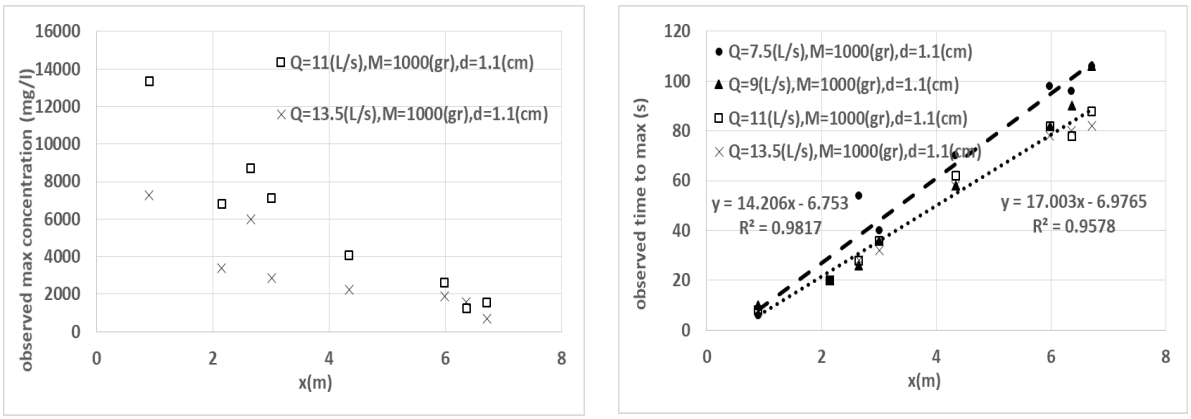
Archive of SID

مهم در انتقال آلودگی محسوب می‌شوند. دو پارامتر مذکور محاسبه و در شکل (۶) ترسیم شده است. با حرکت ابر آلودگی از درون بدنه سدهای گابیونی به سمت پایین‌دست، زمان رسیدن به غلظت بیشینه افزایش می‌یابد. همچنین در دبی‌های کم‌تر به خاطر مقادیر پایین‌تر سرعت عبوری و حرکت نزولی ابر آلودگی، شاهد مقادیر بالاتر غلظت در دبی‌های پایین‌تر هستیم.



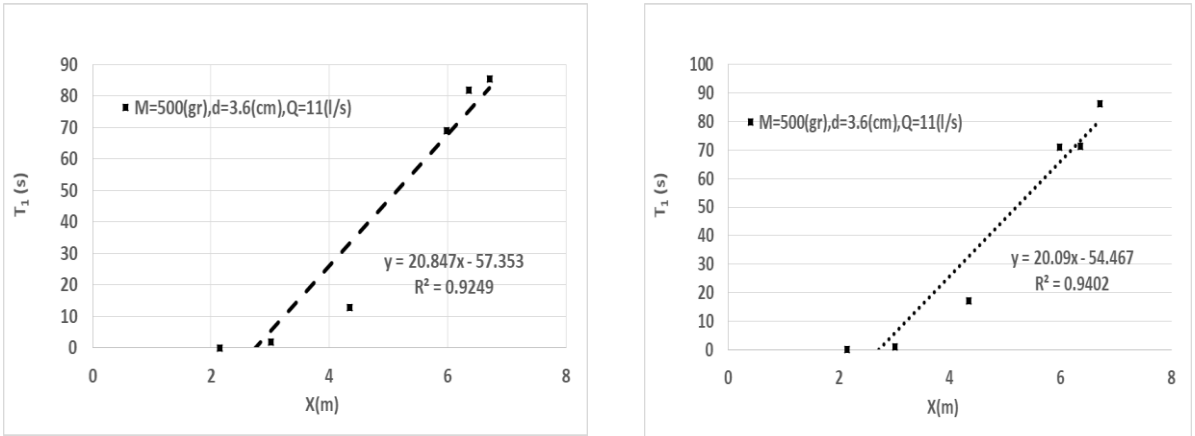
(الف) (ب)

شکل ۵- پارامترهای زمان عبور در برابر الف) فاصله، ب): تعداد سد



(الف) (ب)

شکل ۱- الف) زمان رسیدن به حداکثر غلظت در مقابل فاصله ب)حداکثر غلظت مشاهداتی در برابر فاصله برای جرم تزریقی ۱۰۰۰ گرم (غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر) و قطر سنگ‌دانه برابر با ۱/۱ سانتی‌متر



(الف) (ب)

شکل۷- مقدار پارامتر T_1 محاسبه شده از روش HCIS برحسب ثانیه در مقابل فاصله از نقطه‌ی تزریق بر حسب متر برای دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه، قطر سنگ‌دانه‌ی ۳/۶ سانتی‌متر و الف) جرم تزریقی ۵۰۰ گرم (غلظت ۱۰۰ گرم بر لیتر) و ب) جرم تزریقی ۷۰۰ گرم (غلظت ۱۴۰ گرم بر لیتر).

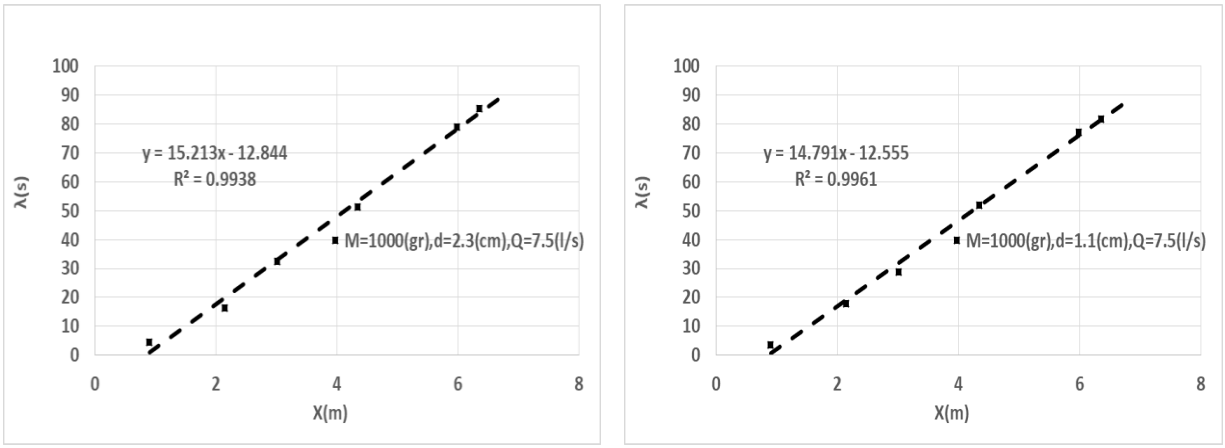
در شکل (۷) مقادیر محاسبه شده از طریق مدل HCIS را برای دبی ۱۱ (لیتر بر ثانیه) و ۲ جرم تزریقی مختلف در برابر

www.SID.ir

Archive of SID

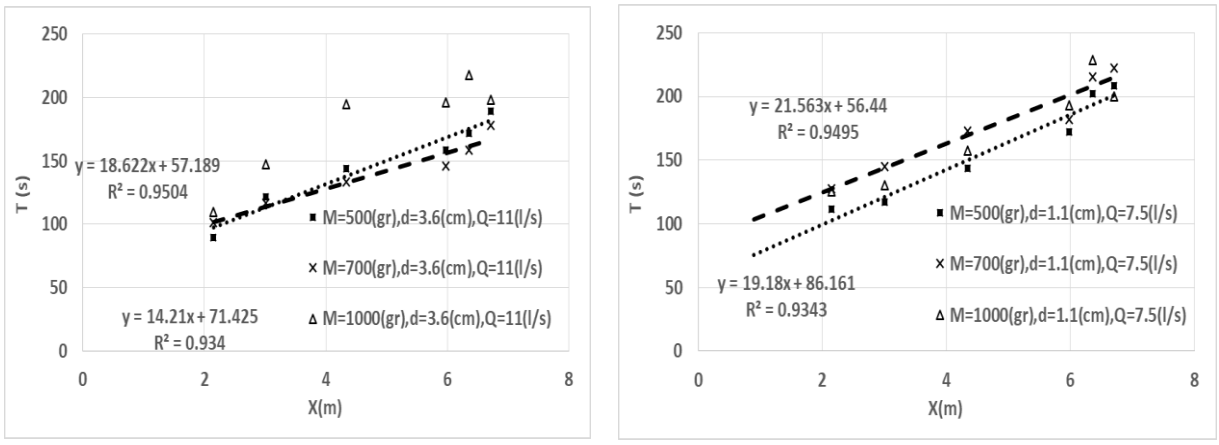
فاصله (متر) ترسیم شده است و نتایج نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین این دو پارامتر خطی بوده و با افزایش فاصله از محل تزریق افزایش می‌یابد، همچنین نتایج نشان‌دهنده‌ی ارتباط قوی مابین مقادیر T_1 استخراج شده و فاصله از نقطه‌ی تزریق می‌باشد ($R^2 > 0.92$).

شکل (۸) نیز نشان دهنده‌ی افزایش λ (پارامتر زمان منطقه‌ی انتقالی) در راستای طولی می‌باشد به طوری‌که با فاصله گرفتن از محل تزریق آلودگی به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقدار $R^2 > 0.99$ مبین معنی‌داری بالا و ارتباط قوی بین این دو پارامتر است.



(ب) (الف)

شکل ۸- مقدار پارامتر λ محاسبه شده از روش HCIS برحسب ثانیه در مقابل فاصله از نقطه‌ی تزریق بر حسب متر برای دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه، جرم تزریقی ۱۰۰۰ گرم (غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر) و الف) قطر سنگدانه‌ی ۱/۱ سانتی‌متر؛ ب) قطر سنگدانه‌ی ۲/۳ سانتی‌متر.



(ب) (الف)

شکل ۹- مقدار پارامتر T (زمان ماند) محاسبه شده از روش HCIS برحسب ثانیه در مقابل فاصله از نقطه‌ی تزریق بر حسب متر برای سه جرم تزریقی مختلف و الف) دبی ۷/۵ لیتر بر ثانیه و قطر سنگدانه‌ی ۱/۱ سانتی‌متر؛ ب) دبی ۱۱ لیتر بر ثانیه و قطر سنگدانه‌ی ۳/۶ سانتی‌متر.

شکل (۹) بیانگر ارتباط بین زمان ماند ($T = T_1 + T_2 +$ λ) بر حسب ثانیه و فاصله از محل تزریق برحسب متر می‌باشد. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش کلی زمان ماند با فاصله گرفتن از محل تزریق است. خط رگرسیون بین این دو پارامتر خطی بوده و $R^2 > 0.93$ نیز بیانگر معنی‌داری بالای این برازش است.

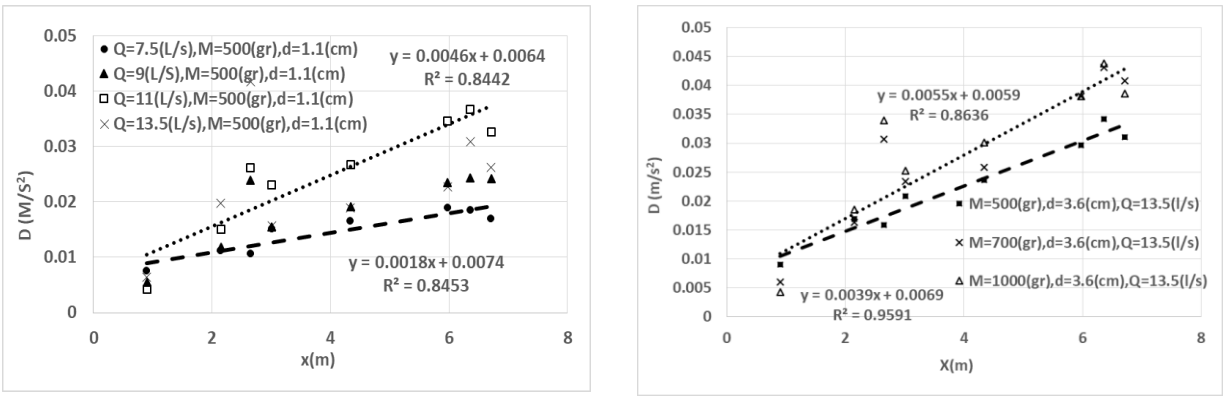
در شکل (۱۰)، تغییرات ضریب انتشار طولی (D) در مقابل فاصله ترسیم شده است. مشاهده می‌گردد که در هر صورت با افزایش فاصله، ضریب انتشار طولی نیز افزایش یافته و به نظر می‌رسد که منحنی‌های غلظت-زمان اشکال متقارن‌تری را نیز داشته باشند. البته در قسمت (الف) این شکل، تغییر غلظت ورودی نیز مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده می‌گردد که با افزایش غلظت تزریقی، ضریب انتشار طولی افزایش یافته است. در قسمت (ب) این نمودار نیز تاثیر افزایش دبی بر ضریب انتشار طولی مورد بررسی قرار گرفته است. از دقت در این شکل نیز چنین دریافت می‌گردد که ضریب انتشار طولی رابطه مستقیمی نیز با دبی دارد و مقدار $R^2 > 0.85$ نشان‌دهنده‌ی تطابق مطلوب

www.SID.ir

Archive of SID

برازش مابین این پارامترها است. همچنین می‌توان گفت که در آزمایش‌های انجام شده، مقادیر عددی ضریب انتشار کوچک بوده به‌طوری که مقادیر آن برای آزمایش‌های این تحقیق از ۰/۰۴۶۹ متر مربع بر ثانیه کمتر است.

در شکل ۱۰ (الف و ب)، مشاهده می‌شود که در طول‌های ۰/۹ و ۲/۶۵ متری مقداری انحراف از روند خطی وجود دارد. به‌نظر می‌رسد که موقعیت مکانی این دو نقطه در رفتار آن‌ها تاثیرگذار می‌باشد. محاسبه ضرایب انتشار طولی در این مطالعه با دو چالش اساسی مواجه بود؛ اول اینکه می‌بایستی توزیع ردیاب طوری صورت می‌پذیرفت که اختلاط‌های عرضی و عمقی قبل از سنسور-ها تکمیل می‌گردیدند. انتشار عرضی با استفاده از توزیع‌کننده عرضی (برابر با عمق کانال) تکمیل شد و برای تکمیل اختلاط عمقی نیز محلول آلاینده از بالا و در تمام عمق جریان توزیع شد. البته هیچ وقت نمی‌توان مدعی تکمیل ۱۰۰٪ این دو فرآیند در طول‌های ابتدائی بود که گاهاً موارد مشابهی همانند موارد مورد اشاره را ایجاد می‌نمایند. علاوه بر آن می‌توان گفت که در روند انتقال و انتشار ردیاب‌ها از درون محیط‌های متخلخل، فرآیندهای اتفاقاتی نیز تاثیر داشته و همین امر باعث می‌گردد که فرآیندها مقداری از روندهای نرمال خود فاصله بگیرند.



(ب) (الف)

شکل ۱۰- ضریب انتشار در مقابل فاصله الف) برای جرم‌های تزریقی متفاوت ب) برای دبی‌های مختلف

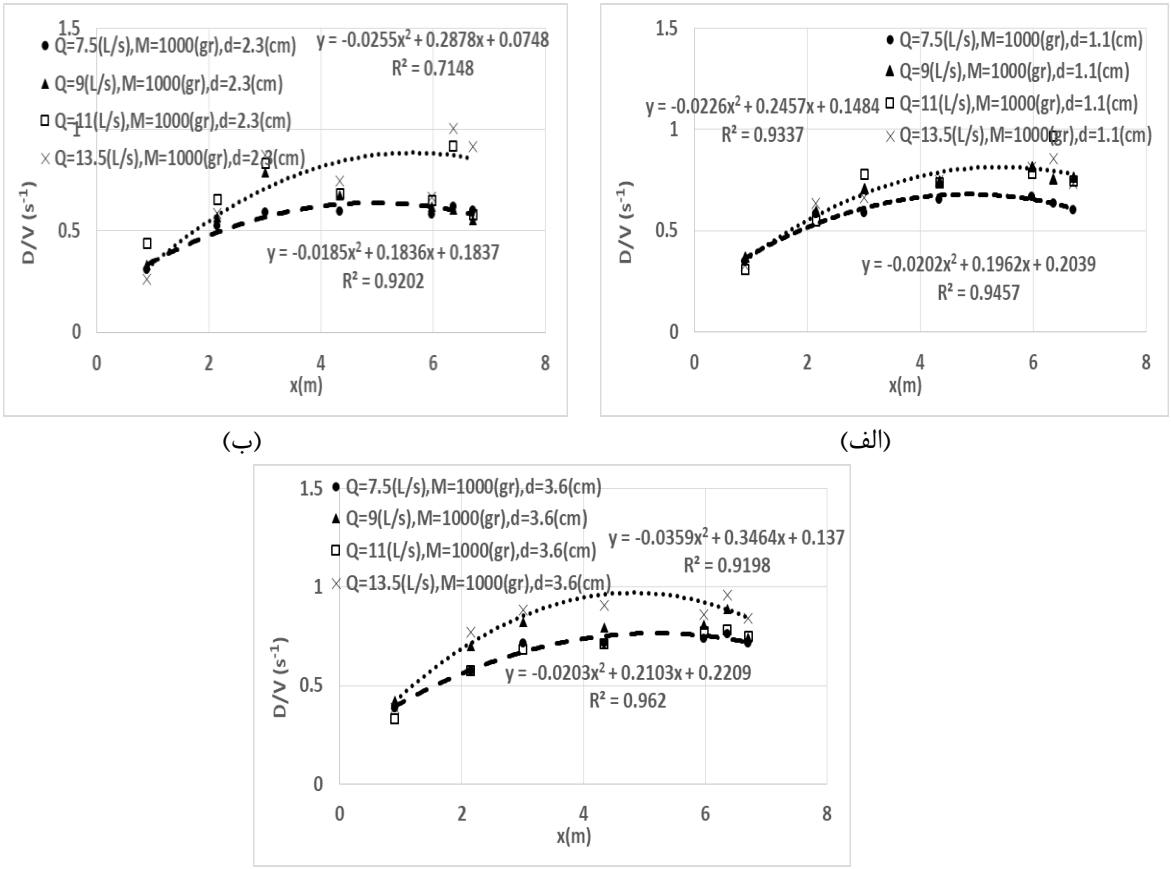
بعد از تعیین مقادیر D و V، مقدار انتشارپذیری طولی از رابطه‌ی D/V محاسبه و تغییرات آن در برابر فاصله در شکل (۱۱) ترسیم گردید. بررسی مقادیر انتشارپذیری و تغییرات آن با فاصله از منبع آلاینده نشان داد که الف) میزان انتشارپذیری طولی با افزایش فاصله از منبع آلاینده افزایش یافته است. ب) بهترین تابع برای تخمین رابطه بین اکثر نقاط به‌دست آمده یک سه‌جمله‌ای درجه دو است. از آنجایی که شکل سنگ‌دانه محیط متخلخل مورد استفاده در این آزمایش از ذرات تیزگوش و شکسته تشکیل شده است اولاً سطح تماس محلول با محیط افزایش می‌یابد و ثانیاً محلول با طی مسیر پر پیچ و خم از محیط متخلخل خارج می‌شود، بنابراین محلول در ارتباط بیشتری با سطح محیط قرار گرفته و جذب سطحی و تنش بین سطوح محیط و محلول مانع از انتشار سریع آن می‌گردد و علاوه بر آن فضای خالی بین ذرات بسیار پیچیده و نامنظم است و در بسیاری از موارد بعضی حفرات در دبی‌های بالا قادر به انتقال محلول از خود می‌باشند. انتشارپذیری برای یک دبی با افزایش فاصله از محل تزریق تا حدود ۵ متر روند افزایشی و سپس روند کاهشی نشان داد.

مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای D، A_s، A، $\propto$ و T در جدول (۳) قید شده است. مقادیر محاسبه شده برای DaI مابین ۱/۰۵ و ۱/۴۶ است که نشان از اعتبار بالای نتایج مستخرج از مدل می‌باشد. علاوه بر آن، با ملاحظه‌ی جدول (۳) درمی‌یابیم که مقادیر ضریب انتشار (D) به‌دست آمده در بازه‌های S_1 تا S_3 افزایش می‌یابد و مساحت بدنه‌ی اصلی جریان (A) از بازه S_1 تا S_3 کاهش یافته همچنین مساحت منطقه‌ی ذخیره‌ای A_s از الگوی مشابهی پیروی کرده و بیشترین مقدار را در بازه S_1 و کمترین مقدار را در بازه S_3 دارا می‌باشد. ضریب تبادل جرم مابین بدنه‌ی اصلی جریان و منطقه‌ی ذخیره‌ای ($\propto$)، مقدار کوچکی در هر سه بازه دارد (0.00075~0.0045). ۲ پارامتر F_{mean} و F_{med}^{L} که برای توصیف تاثیر ذخیره‌سازی موقت بر انتقال آلاینده استفاده می‌شود نیز از الگویی مشابه A و A_s پیروی کرده و از بازه‌های S_1 تا S_3 روندی نزولی داشتند. شکل (۱۲) نیز نشان‌دهنده‌ی ارتباط قوی بین پارامترهای F_{mean} ، F_{med}^{L} و A_s و D با تعداد سدها می‌باشد. A_s/A بزرگ‌تر، بیانگر پتانسیل ذخیره‌سازی موقت بیشتر است، اما فقط هنگامی که نرخ تبادل آلاینده و آب بین کانال اصلی و منطقه‌ی ذخیره‌ای به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا امکان استفاده از محل برای ذخیره‌سازی فراهم شود. F_{med}^{L} به ضریب

www.SID.ir

Archive of SID

تبادل جرم مابین بدنه‌ی اصلی جریان و منطقه‌ی ذخیره‌ای (∝)، بستگی دارد، با افزایش فاصله و تعداد سدها با وجود اینکه پتانسیل زیادی برای ذخیره‌ی موقت ایجاد می‌شود، اما به دلیل نرخ تبادل کم آلاینده و آب این پتانسیل نادیده گرفته می‌شود.



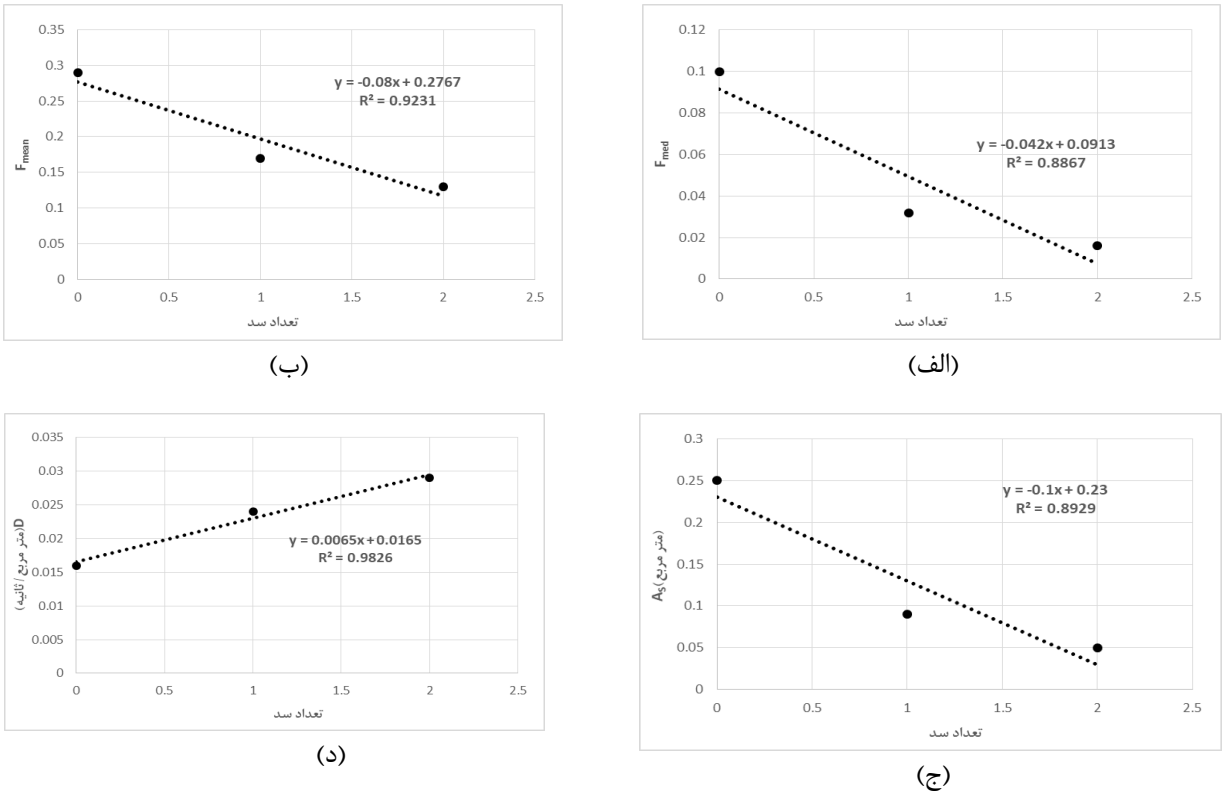
شکل ۱۱- نمودار تغییرات فاصله (متر) در برابر انتشارپذیری طولی، (الف): برای سنگدانه به قطر۱/۱ سانتی‌متر، (ب): برای سنگ‌دانه به قطر۲/۳ سانتی‌متر؛ (پ): برای سنگ‌دانه به قطر ۳/۶ سانتی‌متر

جدول ۲- مقادیر به‌دست آمده از مدل TS و HCIS

پارامتر	S1	S2	S3
(m^2/s) V	۰/۰۲	۰/۰۳۲	۰/۰۳۹
(m^2/s) D	۰/۰۱۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲۹
(s) T	۹۲/۵۷	۱۴۵/۳۶	۱۹۰/۹۶
(m^2) A	۰/۶	۰/۴۴	۰/۳۵
(m^2) A_s	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۵
(s^{-1}) α	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۱۴۳	۰/۰۰۰۷۸
DaI	۱/۴۶	۱/۱۷	۱/۰۵
A_s/A	۰/۴۲	۰/۲۱	۰/۱۵
F_{mean}	۰/۲۹	۰/۱۷	۰/۱۳
F_{med}^{L}	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۱۶

www.SID.ir

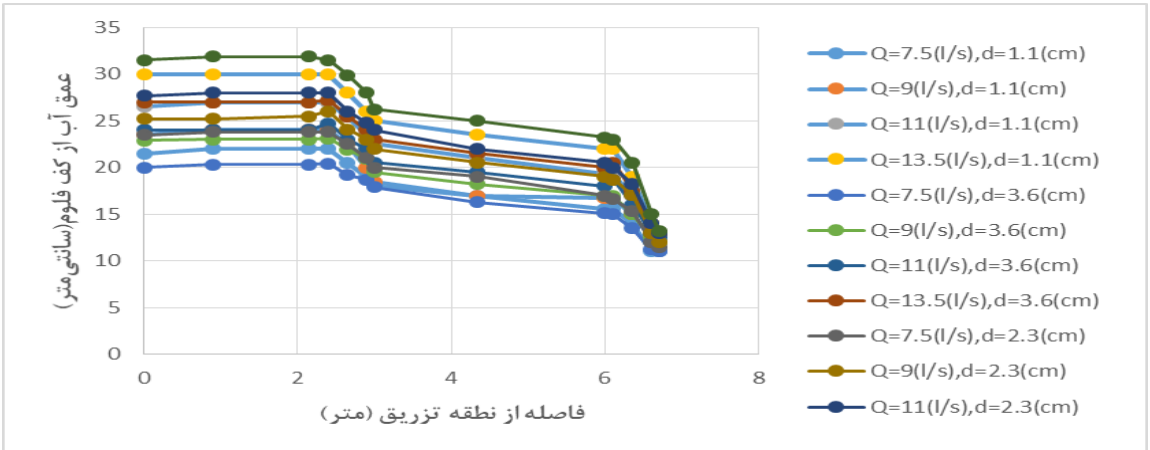
Archive of SID



شکل ۱۲- شکل‌های ترسیمی به‌ترتیب از (الف) تا (د) مقادیر F_{med}^{L}، F_{mean}، A_s و D در مقابل تعداد سد

پروفیل‌های طولی جریان

در این پژوهش فاصله دو بند گابیونی در طول تمامی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است ولی مهمترین بحث در خصوص پروفیل جریان تشکیل شده درون بندهای گابیونی و مابین آن‌ها، شرایط مرزی بالادست و پائین‌دست موجود است. با این تفسیر که معمولاً عمق جریان خروجی از بند گابیونی دوم تابع عمق جریان بحرانی برای دبی مربوطه بوده و درون بند گابیونی دوم یک منحنی M2 ایجاد می‌گردد که آن هم به نوبه خود تابعی از قطر سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده بدنه گابیون است. در ادامه عمق انتهائی مربوط به پروفیل M2، عمق جریان درون مخزن دوم بوده و به‌عنوان شرط مرزی پائین‌دست به گابیون اول منتقل می‌گردد و پروفیل M2 دوم را درون گابیون اول تشکیل می‌دهد. در ادامه، عمق انتهائی تشکیل شده در بدنه گابیون اول نیز به‌عنوان عمق آب در مخزن اول تعیین شده است. به‌منظور خروج آزاد جریان از بدنه سد سنگ‌ریزه‌ای دوم و عدم تاثیر آن در عمق‌های بالادست خود، در انتهای مخزن ریزش آزاد در نظر گرفته شد. پروفیل‌های طولی تشکیل شده در آزمایش‌های مختلف انجام شده به صورت شکل (۱۳) استخراج و ترسیم گردیده است.



شکل ۱۳- پروفیل‌های طولی جریان برای تمامی آزمایش‌های انجام شده

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

در دو دهه‌ی گذشته، توجه به مبحث ذخیره‌سازی موقت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، نتایج حاصل از ۳۶ آزمایش بر روی مخازن سری برای آنالیز تاثیر ذخیره‌سازی موقت در اثر حرکت ابر آلودگی به پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای زمان عبور دارای رابطه‌ی رگرسیون خطی با تعداد سدها و همچنین فاصله از محل تزریق هستند و با افزایش پارامترهای مذکور افزایش می‌یابند. شیب رگرسیون خطی برای t_t در مقابل N بزرگتر از مقدار مشابه برای t_1 است که بیانگر زمان ماند بیشتر در اثر ذخیره‌سازی موقت در سیستم است. نتایج ناشی از مدل‌سازی نشان داد که با فاصله گرفتن از محل تزریق و حرکت به سمت پایین‌دست، ضریب پخشیدگی افزایش یافت. پارامترهای F_{med}^{L} و F_{mean} از بازه‌های S_1 تا S_3 روند کاهشی داشت که نشان‌دهنده‌ی نرخ تبادل پایین در نقاطی است که تعداد سدها افزایش می‌یابد. مقادیر DaI بین ۱/۰۵ و ۱/۴۶ می‌باشد که نشان از اعتبار بالای نتایج مستخرج از مدل می‌باشد. A_s/A، بیانگر پتانسیل ذخیره‌سازی موقت است و همانطور که انتظار می‌رفت روندی نزولی داشت. موارد مذکور نشان می‌دهد که مناطق ماندابی که در اثر سدهای موجود در جریان به‌وجود آمده است، باعث ایجاد ذخیره‌سازی موقت می‌شوند.

REFERENCES

Apple, L. L. (1985). Riparian habitat restoration and beavers. Riparian ecosystems and their management: reconciling conflicting uses. US Forest Service General Technical Report RM-120, 489-490.

Bencala, K. E. (1983). Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream with a kinetic mass transfer model for sorption. Water Resources Research, 19(3), 732-738.

Chabokpour, J., Samadi, A., & Merikhi, M. (2018). Application of method of temporal moments to the contaminant exit breakthrough curves from rockfill media. Iran Journal of Soil and Water research, 49(3): 629-640. (In Persian)

Chabokpour, J. (2019). Application of Hybrid Cells in Series Model in the Pollution Transport through Layered Material. Pollution. 5(3):473-486.

Doyle, M. W., Stanley, E. H., & Harbor, J. M. (2003). Hydrogeomorphic controls on phosphorus retention in streams. Water Resources Research, 39(6).

Ensign, S. H., & Doyle, M. W. (2005). In-channel transient storage and associated nutrient retention: Evidence from experimental manipulations. Limnology and Oceanography, 50(6), 1740-1751.

Findlay, S. (1995). Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: The hyporheic zone. Limnology and oceanography, 40(1), 159-164.

Ghosh, N. C. (2001). Study of solute transport in a river. Ph.D. thesis, I.I.T, Roorkee, India.

Ghosh, N. C., Mishra, G. C., & Ojha, C. S. P. (2004). Hybrid-cells-in-series Model for Solute Transport in a River. Journal of Environmental Engineering, 130(10), 1198-1209.

Ghosh, N. C., Mishra, G. C., & Kumarasamy, M. (2008). Hybrid-cells-in-series model for solute transport in streams and relation of its parameters with bulk flow characteristics. Journal of Hydraulic Engineering, 134(4), 497-502.

Gooseff, M. N., Hall Jr, R. O., & Tank, J. L. (2007). Relating transient storage to channel complexity in streams of varying land use in Jackson Hole, Wyoming. Water Resources Research, 43(1).

Ganesh, H. R. Ravindra, Fjóla G., Sigtryggsdóttir & Øyvind A. Høydal. (2019). Non-linear flow through rockfill embankments, Journal of Applied Water Engineering and Research,
7:4, 247-262.

Gurdak, J. J., Spahr, N. E., & Szmajter, R. J. (2002). Traveltime Characteristics of Gore Creek and Black Gore Creek, Upper Colorado River Basin, Colorado. US Geological Survey.

Harvey, J. W. (2000). Quantifying hydrologic interactions between streams and their subsurface hyporheic structure. Streams and ground waters, 3-44.

Harvey, J. W., & Bencala, K. E. (1993). The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. Water Resources Research, 29(1), 89-98.

Harvey, J. W., Conklin, M. H., & Koelsch, R. S. (2003). Predicting changes in hydrologic retention in an evolving semi-arid alluvial stream. Advances in Water Resources, 26(9), 939-950.

Jobson, H. E. (1996). Prediction of traveltime and longitudinal dispersion in rivers and streams. United States Geological Survey.

Johnston, C. A., & Naiman, R. J. (1987). Boundary dynamics at the aquatic-terrestrial interface: the influence of beaver and geomorphology. Landscape Ecology, 1(1), 47-57.

Kasahara, T., & Wondzell, S. M. (2003). Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams. Water Resources Research, 39(1), SBH-3.

Kumarasamy, M. V. (2015). Deoxygenation and Reaeration Coupled hybrid Mixing cells Based Pollutant Transport Model to Assess water Quality Status of a River. International journal of environmental research, 9(1), 341-350.

Lautz, L. K., Siegel, D. I., & Bauer, R. L. (2006). Impact of debris dams on hyporheic interaction along a semi-arid stream. Hydrological Processes: An International Journal, 20(1), 183-196.

Olowe, K. O., & Kumarasamy, M. (2017). Development of the hybrid cells in series model to simulate

www.SID.ir

Archive of SID

ammonia nutrient pollutant transport along the Umgeni River. Environmental Science and Pollution Research, 24(29), 22967-22979.

Ravindra, G. H. R., Sigtryggsdottir, F.G. & Lia, L. (2018). Evaluation of Design Criteria for Downstream Riprap of Rockfill Dams. In: Proceedings of the 26th Congress on Large Dams; Vienna.

Runkel, R. L. (2002). A new metric for determining the importance of transient storage. Journal of the North American Benthological Society, 21(4), 529-543.

Stephenson, D. (1979). Gabion energy dissipators. In Proc. 13th ICOLD Congress (pp. 33-43).

Thackston, E. L., & Schnelle, K. B. (1970). Predicting effects of dead zones on stream mixing. Journal of the Sanitary Engineering Division, 96(2), 319-331.

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.

Westbrook, C. J., Cooper, D. J., & Baker, B. W. (2006). Beaver dams and overbank floods influence groundwater–surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area. Water Resources Research, 42(6).

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1999). Ground water and surface water. A single resource. USGS Circular, 1139.

Wondzell, S. M. (2006). Effect of morphology and discharge on hyporheic exchange flows in two small streams in the Cascade Mountains of Oregon, USA. Hydrological Processes: An International Journal, 20(2), 267-287.

Woo, M. K., & Waddington, J. M. (1990). Effects of beaver dams on subarctic wetland hydrology. Arctic, 223-230.

www.SID.ir