نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۳۶-۶۲۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 623-636

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی-عددی تأثیر طول پوشش گیاهی نی بر انتقال املاح و تبادلات هایپریک در آبراهه‌ها

فاطمه نازدانه[۱]، علیرضا عمادی[۲*]، محمد میرناصری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

چکیده

پوشش‌های گیاهی مختلفی در اکوسیستم رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و تالاب ها وجود دارند که بخش مهمی از اکوسیستم رودخانه‌ها هستندکه بر محیط پیرامونی خود تأثیر می‌گذارند. وجود گیاهان می‌توانند تأثیر قابل توجهی در بهبود کیفیت آب، از جمله کاهش غلظت آلاینده‌ها به علت توانایی در جذب و رقیق‌سازی آنها بوجود آورد. لذا در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عدم پوشش گیاهی، وجود پوشش گیاهی نی بر انتقال آلودگی در یک فلوم آزمایشگاهی و نحوه تغییرات غلظت آنها در پایین‌دست آلودگی پرداخته شده است. آزمایش‌های این پژوهش در یک کانال مستطیلی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۵ و عمق ۰/۷ متر انجام شد از تزریق محلول کلرید (NaCl) به عنوان ماده‌ردیاب در ناحیه اصلی جریان و محلول پرمنگنات پتاسیم ($KMnO_4$) به‌عنوان ماده‌ردیاب رنگی در تبادلات هایپریک ناحیه بستر رسوبی استفاده شد. در آزمایشات ۲۲۵ گرم آن در ۶ لیتر آب محلول شده و به عنوان آلودگی به جریان تزریق شد. برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی آبراهه از نی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد افزایش دبی جریان (Q) از ۴ به ۲۲/۵ لیتر بر ثانیه موجب افزایش پارامترهای حداکثر طول نفوذ جریان هایپریک (L_{HZ})، از ۰/۱۴ به ۰/۳۲ متر، معادل ۱۲۸ درصد و میانگین زمان مدت ماند جریان هایپریک (RT) از ۲۹۰ به ۵۸۴ ثانیه، معادل ۵۰ درصد می‌شود. همچنین نتایج نشان دادند افزایش طول پوشش گیاهی (L) از ۲ به ۶ متر، بسته به شرایط جریان، سبب کاهش ۱۵ تا ۵۲ درصدی (RT) و در برخی موارد افزایش تا ۵۶ درصدی حداکثر زمان تبادلات هایپریک (L_{HZ}) گردید. این نتایج بیانگر تأثیر مستقیم طول پوشش گیاهی (L) در تعدیل تبادلات هایپریک و تغییر الگوی نفوذ جریان در بستر رسوبی است.

واژه‌های کلیدی: انتقال آلاینده، پوشش گیاهی نی، تبادلات هایپریک، زمان ماند، مدل OTIS

مقدمه

آلودگی آب عبارتست از یک تغییر نامطلوب در کیفیت شیمیایی، فیزیکی و زیستی آب‌های طبیعی بواسطه تخلیه مواد زائد مثل فاضلاب‌های بهداشتی، رواناب‌های شهری، پساب‌های کشاورزی، دامداری و صنعتی و دیگر مواد زائد صنعتی، شهری و کشاورزی که به صورت مستقیم و غیر مستقیم وارد آب می‌شود (عزیزپورپیرسرائی و تکلدانی، ۱۳۹۰). انواع بسیاری از پوشش‌های گیاهی در اکوسیستم رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و تالاب‌ها وجود دارد. پوشش گیاهی می‌تواند طبیعی یا به صورت مصنوعی توسط انسان برای بهبود زیست گاه‌های گیاهی و جانوری، جلوگیری از فرسایش و همچنین زیباسازی محیط کشت شود(Kadlec, 1997). وجود گیاهان می‌توانند تأثیر قابل توجهی در بهبود کیفیت آب، از جمله کاهش غلظت آلاینده‌ها به علت توانایی در جذب و رقیق‌سازی بوجود آورد.(Lou et al., 2021) در کانال‌های طبیعی، پوشش گیاهی از طریق ایجاد آشفتگی در اطراف ساقه‌ها و برگ‌های گیاه موجب افت انرژی شده و در مقابل حرکت آب مقاومت ایجاد می‌کند. همچنین استفاده از پوشش گیاهی، کاهش میانگین سرعت جریان، کاهش عرض رودخانه، افزایش رسوب‌گذاری در بستر رودخانه و در نتیجه کاهش دبی جریان عبوری رودخانه را به همراه دارد ودر مواردی ممکن است باعث بالا آمدن آب و افزایش عمق جریان آب گردد (Ebrahimi, 2008).

افضلی مهر و دی برهمکنش پوشش‌گیاهی دیواره و بستر شنی را بر توزیع‌های سرعت به ویژه محل وقوع سرعت بیشینه و تنش رینولدز در جریان یکنواخت بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲-استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران)
۳- استادیارگروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(*نویسنده مسئول: Emadia355@yahoo.com)
DOI: 10.22034/idj.2026.557615.2642

بیشینه سرعت در زیر سطح آب تا ۹۱ درصد عمق جریان رخ می‌دهد و اختلاف بین بیشترین مقدار سرعت و سرعت در سطح آب در حضور آب مقاومت ایجاد می‌کند. همچنین استفاده از پوشش گیاهی، کاهش میانگین سرعت جریان، کاهش عرض رودخانه، افزایش رسوب‌گذاری در بستر رودخانه و در نتیجه کاهش دبی جریان عبوری رودخانه را به همراه دارد ودر مواردی ممکن است باعث بالا آمدن آب و افزایش عمق جریان آب گردد (Ebrahimi, 2008).

افضلی مهر و دی برهمکنش پوشش‌گیاهی دیواره و بستر شنی را بر توزیع‌های سرعت به ویژه محل وقوع سرعت بیشینه و تنش رینولدز در جریان یکنواخت بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که بیشینه سرعت در زیر سطح آب تا ۹۱ درصد عمق جریان رخ می‌دهد و اختلاف بین بیشترین مقدار سرعت و سرعت در سطح آب در حضور پوشش گیاهی بر روی دیواره‌های کانال قابل توجه است (Afzalimehr and Dey, 2009).

نصیری دهسرخ و همکاران اثر شکل‌های بستر مختلف با تغییر زاویه وجه بالادست و پوشش گیاهی دیواره را روی سرعت جریان، تنش رینولدز و شدت‌های آشفتگی بررسی کرده اند Dehsorkhi et (Nasiri al., 2010).

چوها و لی به بررسی تأثیر پوشش‌گیاهی بر انتقال آلودگی در کانال‌های دارای پوشش‌گیاهی پرداختند. نتایج نشان داد که پوشش-گیاهی منجر به افزایش سرعت جریان در ناحیه بدون پوشش و کاهش سرعت در ناحیه پوشیده از گیاه می‌شود؛ بنابراین با شدت یافتن جریان برشی در مرز دو ناحیه با (پوشش و بدون پوشش) انتقال آلودگی در محیط نیز شدت می یابد(Choi and Lee., 2012).

روی و همکاران در پژوهشی به بررسی تأثیر پوشش گیاهی کناره بر تغییرات بستر رودخانه، خصوصیات جریان و تغییرات بستر رودخانه را زمانی که آب از پوشش گیاهی کناره عبور می‌کند، پرداختند و به این نتیجه رسیدند که وقتی جریان از پوشش گیاهی عبور می‌کند، جریان ورودی در منطقه پوشش گیاهی در طول دیواره کانال کندتر و در قسمت کانال اصلی شتاب می گیرد (Ruei et al., 2014).

لی جرن و همکاران در یک مطالعه روی رودخانه لور فرانسه میله‌هایی را در یک قسمت مستقیم کار گذاشتند. نتایج نشان داد انحراف جریان ناشی از حضور میله‌ها در کانال با قبل حضور میله‌ها متفاوت است. کم شدن جریان در حضور میله‌ها مناطق انبساط و انقباض در کانال ایجاد می‌کند و باعث ایجاد یک هندسه موقت که منجر به ایجاد تعادل و رسوب می شوند(Le Guern et al., 2023).

اسدی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی تبادلات هایپریک در حفره برداشت شن و ماسه پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که افزایش طول حفره برداشت موجب افزایش زمان ماند، عمق نفوذ و کاهش درصد دبی تبادل می گردد(Asadi et al., 2024).

میرناصری به بررسی آزمایشگاهی عددی تأثیر پره‌های متقاطع در طرح‌های احیای رودخانه بر تبادلات هایپریک پرداخت نتایج نشان داد که h_{st}در سازه پره متقاطع I شکل سبب افزایش ۸ تا ۱۱۵ درصدی مقدار L_{HZ} شد اما از سوی دیگر، یک روند ثابت بین L_{HZ} با h_{st} در پره‌های متقاطع U شکل مشاهده نشد(Mirnaseri, 2025).

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده در زمینه پوشش گیاهی در آبراهه‌ها عمدتاً به بررسی اثر آن بر ویژگی-های هیدرولیکی جریان از جمله تغییرات سرعت، تنش برشی و ساختار آشفتگی متمرکز بوده است و در برخی موارد نیز نقش آن در انتقال آلاینده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود، در اغلب این مطالعات پوشش گیاهی به صورت یک عامل کلی در نظر گرفته شده و اثر طول ناحیه پوشش گیاهی نی به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر فرآیند انتقال املاح و تبادلات جریان بین بستر و جریان سطحی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بررسی همزمان تأثیر طول پوشش گیاهی بر نحوه شکل‌گیری منحنی رخنه، حداکثر عمق نفوذ جریان در ناحیه هایپریک و زمان تبادلات این ناحیه در مطالعات پیشین کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، شناخت دقیق‌تر تأثیر طول پوشش گیاهی بر فرآیند انتقال املاح و تبادلات هایپریک در آبراهه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر همین اساس، در پژوهش حاضر تلاش شده است با انجام آزمایش‌های فیزیکی در فلوم آزمایشگاهی و تحلیل نتایج به کمک مدل عددی انتقال املاح، اثر طول‌های مختلف پوشش‌گیاهی نی بر انتقال املاح، شکل‌گیری منحنی رخنه و ویژگی‌های تبادلات هایپریک مورد بررسی قرار گیرد؛ و درک دقیق‌تری از این فرآیندها در آبراهه‌های دارای پوشش گیاهی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با استفاده از یک کانال مستطیلی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۵ متر، ارتفاع دیواره-های کناری ۰/۷ متر دارای دیواره از جنس پلکسی گلس و کف شفاف و شیب طولی ۰/۰۰۶ طراحی واجرا شده است. شکل (۱) نمایی از فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

پوشش گیاهی

آزمایش‌ها در دو گروه بدون پوشش‌گیاهی و با پوشش‌گیاهی انجام شده است. در این پژوهش از پوشش‌گیاهی طبیعی نی که بخش مهمی از اکوسیستم رودخانه هستند استفاده شد. در آزمایش‌های با پوشش‌گیاهی نی ارتفاع ساقه‌های نی ۳۵ سانتی متر در نظر گرفته

شده است به طوری‌که نی‌ها مستغرق نباشند. برای تعیین قطر نی‌ها ۲۰ نمونه تصادفی به وسیله کولیس اندازه گیری شد که متوسط قطر آن‌ها ۱۳ میلیمتر به دست آمد. نی‌ها به فاصله ۵×۵ سانتیمتر (فاصله در راستای طولی × فاصله در راستای عرضی) در سه طول ۴،۲ و ۶ متر چیدمان شد که چیدمان مورد نظر با مقادیر بکار رفته توسط محققین پیشین از قبیل نف (Nepf, 1997) همخوانی داشته و بخوبی می‌تواند دامنه وسیعی از تراکم پوشش‌گیاهی در طبیعت را شامل شود.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۲- نمایی از راستای طولی چیدمان پوشش گیاهی

ماده ردیاب

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی انتقال آلودگی در جریان‌های دارای بستر شنی و همچنین پیش‌بینی تأثیر پوشش‌گیاهی بر این جا به جایی از محلول کلریدسدیم (NaCl) به عنوان ماده‌ردیاب استفاده شد. محلول با غلظت معین تهیه و به صورت آنی (لحظه‌ای) در ابتدای بستر رسوبی به ناحیه اصلی جریان تزریق گردید. به منظور ردیابی املاح از یک دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی ۱۶ کاناله هدایت‌الکتریکی (EC) استفاده شد. جریان در کانال آزمایشگاهی به صورت یکطرفه می‌باشد. از سوی دیگر، به منظور تعیین مشخصات جریان در ناحیه جریان زیرسطحی از پرمنگنات سدیم روش تزریق ماده رنگی در ناحیه بستر رسوبی استفاده شد. همچنین مدت زمان طی شدن این ماده رنگی در نواحی نگهداشت بستر رسوبی توسط زمان سنج اندازه-گیری و به همراه حداکثر عمق نفوذ برای هر یک از آزمایش‌ها به صورت جداگانه ثبت شده تا مقدار سرعت جریان در نواحی متخلخل زیرین با ثبت زمان و طول مسیر طی شده (L_{HZ}) محاسبه گردد.

دبی جریان به گونه‌ای در آزمایش‌ها لحاظ شد که رژیم جریان از نوع زیربحرانی برقرار بوده و مقدار عدد (F_d)در محدوده کمتر از (۱) قرار گیرد. در هر آزمایش نیز مقدار جریان ورودی به کانال آزمایشگاهی توسط یک دستگاه دبی‌سنج صوتی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان با استفاده از یک دستگاه لوله پیتو متصل به فشارسنج انجام شد. در نهایت سرعت متوسط (U) با استفاده از میانگین این اندازه‌گیری‌ها برآورد شد. عمق جریان آب (d) نیز توسط یک دستگاه عمق‌سنج صوتی با دقت ۰/۱± میلیمتر اندازه‌گیری گردید. در این پژوهش مجموعاً ۲۰ آزمایش هیدرولیکی انجام پذیرفتند. در جدول (۱) شرح کامل این آزمایش‌ها ارائه شده است



شکل ۳- نحوه شکل‌گیری جریان هایپریک زیر پوشش گیاهی

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌ها

شماره آزمایش	سری آزمایش	L(m)	Q(l/s)	d(m)	V(m/s)	F_d
۱	سری اول	شاهد	۴	۰/۰۴	۰/۳	۰/۰۲۴
۲			۷	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۱۱
۳			۱۰	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۰۸
۴			۱۳	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۰۸
۵			۲۲/۵	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۰۱۵
۶	سری دوم	۲ متر	۴	۰/۱۱	۰/۳۶	۰/۰۳۴
۷			۷	۰/۱۳	۰/۳۶	۰/۰۳۱
۸			۱۰	۰/۱۵	۰/۳۶	۰/۰۲۹
۹			۱۳	۰/۱۷	۰/۳۶	۰/۰۲۷
۱۰			۲۲/۵	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۰۲۴
۱۱	سری سوم	۴ متر	۴	۰/۱	۰/۲۹	۰/۰۲۹
۱۲			۷	۰/۱۴	۰/۲۹	۰/۰۲۴
۱۳			۱۰	۰/۱۶	۰/۲۹	۰/۰۲۳
۱۴			۱۳	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۰۲۱
۱۵			۲۲/۵	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۰۱
۱۶	سری چهارم	۶ متر	۴	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۰۲۲
۱۷			۷	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۰۲۰
۱۸			۱۰	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۰۱۲
۱۹			۱۳	۰/۲	۰/۱۸	۰/۰۱۲
۲۰			۲۲/۵	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۰۱۰

مدل نگهداشت موقت (TSM)[1]

وجود مانع در مسیر جریان همانند پوشش‌گیاهی موجب تغییرات در ذخیره موقت املاح در ناحیه اصلی جریان و همچنین بستر رسوبی شده است. لذا استفاده از معادله همرفت-انتشار (ADE)[2] برای رودخانه‌ها و آبراهه‌های طبیعی دارای پوشش‌گیاهی در مسیر جریان با اشکالات فراوان در پیش‌بینی نحوه جابجایی املاح همراه خواهد بود(نیکبخت و همکاران، ۱۴۰۱؛ غلامی و همکاران،۱۴۰۳). همچنین

1- Transient storage Model (TSM)

2- Advection – Dispersion Equation(ADE)

بر اساس مدل بانکالا و والترز (Bencala and Walters., 1983) برای شبیه‌سازی همرفت و انتشار املاح در آبراهه‌ها مدلی تحت عنوان مدل نگهداشت موقت (TSM) را مطابق روابط (۱) و (۲) پیشنهاد دادند:

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{Q}{A}\frac{\partial c}{\partial x}=\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}(AD_x\frac{\partial c}{\partial x})+\alpha(c_s-c) \quad (۱)$$

$$\frac{dc_s}{dt}=\alpha\frac{A}{A_S}(c_s-c) \quad (۲)$$

که در روابط فوق،A مساحت مقطع عرضی ناحیه جریان اصلی،A_S مساحت مقطع عرضی ناحیه نگهداشت،C غلظت ماده حل شده در ناحیه اصلی جریان،C_Sغلظت ماده حل شده در ناحیه نگهداشت،D_x ضریب پراکنش طولی،Q دبی جریان،t زمان،x فاصله از محل تزریق آلودگی وα ضریب تبادل ناحیه نگهداشت می باشد(Marion et al., 2008).

مدل عددی (OTIS)

برآورد دقیق پارامترهای چهارگانه A_S ،D_X ،A و α مدل نگهداشت موقت (TSM) موجب افزایش کارایی این مدل برای شبیه‌سازی دقیق‌تر جا به جایی املاح خواهد شد. مدل عددی **(OTIS)** یک مدل شبیه‌سازی ریاضی برای بررسی انتقال و انتشار آلودگی در آبراهه‌ها و رودخانه‌ها بوده که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا ارائه شده است. در این نرم افزار، مدل نگهداشت موقت (TSM) با استفاده از روش تفاضل‌های محدود نیمه ضمنی کرانک – نیکلسون حل شده و منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی می‌شوند. به منظور این شبیه‌سازی ضروری است که منحنی رخنه ماده ردیاب (NaCl) اندازه‌گیری شده در بالادست را به عنوان شرط مرزی به نرم افزار تعریف کرده تا در نهایت منحنی‌های رخنه پایین‌دست بدست آیند. لذا در این مطالعه در نظر است تا با استفاده از نرم‌افزار **(OTIS)** انتقال و انتشار املاح با وجود پوشش‌گیاهی در ناحیه اصلی جریان شبیه‌سازی شده و همچنین تأثیر وجود پوشش‌گیاهی بر پارامترهای انتقال املاح نیز بررسی و مقایسه شد(Runkel, 1987).

نتایج و بحث

آنالیز ابعادی

مشخصه‌های جریان هایپریک در یک مطالعه آزمایشگاهی وجود پوشش‌گیاهی در شرایط آزمایشگاهی ازجمله:L_{HZ}=حداکثرطول نفوذ جریان هایپریک (m)،d_{HZ} = حدکثر عمق نفوذ جریان هایپریک و RT= میانگین مدت زمان ماند جریان هایپریک در ناحیه بستر رسوبی (S) می‌توانند در پارامترهایی همچون K=ضریب هدایت‌هیدرولیکی(m/s)، d_{HZ}= حداکثر عمق نفوذ جریان هایپریک و RT= میانگین مدت زمان ماند جریان هایپریک در ناحیه بستر رسوبی L= طول پوشش‌گیاهی (m)، B= عرض کانال اصلی آبراهه (m)، Δy= اختلاف سطح آب در بالادست و پایین‌دست پوشش‌گیاهی (m)، Q= دبی جریان (m^3/s)، ρ_S=چگالی مصالح بستر رسوبی (kg/m3)، ρ= چگالی آب (kg/m3)، g= شتاب ثقل(m^2/s)، d_{50}= قطرمتوسط ذرات رسوبی بستر(m)، S_0= شیب طولی کف کانال اصلی آبراهه تعریف شوند:

$$(d_{HZ},RT,L_{HZ})=f(K,,,B,\Delta,Q,\rho_s,\rho,g,,d_{50},S) \quad (۳)$$

پارامترهای بی‌بعد متشکل از متغیرهای رابطه (۳) با استفاده از اصل آنالیز آبعادی و تئوری پی‌باکینگهام عبارتند از:

$$f(\frac{d_{HZ}}{L},\frac{L_{HZ}}{L},\frac{l}{B},\frac{d_{50}}{L},\frac{\rho_s}{\rho},\frac{Q^2}{g*L^5},\frac{\Delta y}{L},\frac{B}{L},\frac{L^2*K}{Q},\frac{RT*Q}{L^3},S_0) \quad (۴)$$

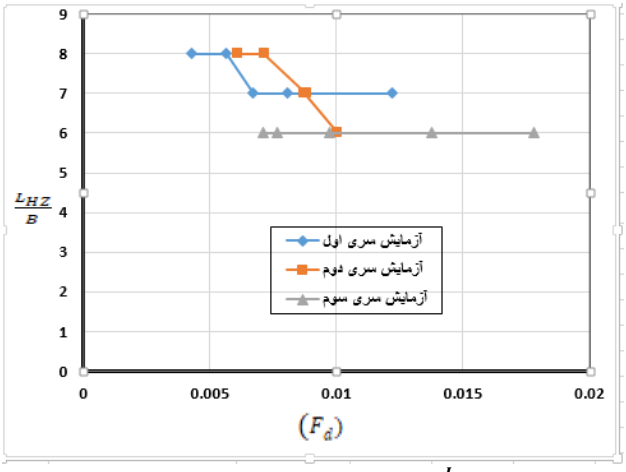
باترکیب پارامترهای (۹) و (۱۰) در رابطه (۴) می‌توان به رابطه بی‌بعد$\frac{RT*K}{B}$ در خصوص میانگین مدت زمان ماند (RT) دست یافت. از سوی دیگر از آن جا که در این پژوهش مقدار شیب طولی کانال اصلی آبراهه (S_0) ثابت بوده از لذا از پارامتر یازدهم در رابطه (۴) نیز می‌توان صرف‌نظر کرد. هم‌چنین با ترکیب $\frac{B}{L}$ در پارامترهای نظیر$\frac{\Delta y}{L}$, $\frac{l}{L}$,$\frac{L_{HZ}}{L}$, $\frac{d_{HZ}}{L}$ می‌توان به تغییرات پارامترهای بی‌بعدی که تغییرات متغیرهای هم‌چون l, L_{HZ}, d_{HZ} و Δy را نسبت به عرض کانال اصلی (B) را بررسی می‌کنند، دست یافت. از سوی دیگر با استفاده از ترکیب‌های بی‌بعد $\frac{l}{h_{st}}$,$\frac{d_{50}}{L}$,$\frac{\rho_s}{\rho}$,$\frac{Q^2}{g*L^5}$ نیز می‌توان به عدد فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) رسید ودر نهایت با ترکیب پارامترهای $\frac{RT*K}{B}$ و $\frac{B}{L}$ رابطه (۵) به عنوان شش پارامتر بی‌بعد در این مطالعه آزمایشگاهی تأثیر طول پوشش‌گیاهی بر تبادلات هایپریک عبارتند از:

$$f(\frac{d_{HZ}}{B},\frac{L_{HZ}}{B},\frac{l}{B},F_d,\frac{\Delta y}{B},,\frac{RT*K}{B})=0 \quad (۵)$$

تأثیر پوشش‌گیاهی بر طول تبادلات ناحیه هایپریک (L_{HZ}) شکل (۴) تغییرات پارامتر بی‌بعد$\frac{L_{HZ}}{B}$ در مقابل محدوده عدد فرود چگالی ذره بستر رسوبی (F_d) برای آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم را نشان می‌دهد.

نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذره بستر رسوبی(F_d)، نسبت$\frac{L_{HZ}}{B}$ کاهش می‌یابد. این روند ناشی از تغییرات فیزیکی در ساختار جریان است؛ افزایش (F_d) به این معناست که افزایش انرژی و شدت جریان موجب تمرکز گرادیان فشار در مقیاس-های کوتاه‌تر شده و در نتیجه طول مؤثر ناحیه تبادل جریان میان لایه‌های سطحی و زیرسطحی کاهش می‌یابد. افزایش طول پوشش‌گیاهی (L) نیز همین روند را تشدید می‌کند. حضور پوشش گیاهی با افزایش مقاومت هیدرولیکی و افت انرژی جریان، سبب کاهش سرعت جریان در بستر شده این رفتار موجب کوتاه‌تر شدن مسیر تبادل هایپریک و کاهش نسبت $\frac{L_{HZ}}{B}$ می‌شود. همچنین کاهش دبی جریان (Q) در نواحی که طول پوشش گیاهی افزایش می‌یابد نشان دهنده کاهش ظرفیت تبادل میان جریان سطحی و زیرسطحی است. به‌طور کلی، کاهش نسبت$\frac{L_{HZ}}{B}$ نتیجه هم‌زمان سه عامل اصلی

است: ۱) افزایش انرژی جریان (F_d) ، ۲) افزایش مقاومت و افت انرژی ناشی از پوشش گیاهی (L)، ۳)کاهش توان تبادلات میان لایه در اثر کاهش دبی (Q)، ترکیب این عوامل باعث کوچک‌تر شدن مقیاس تبادل هایپریک و کاهش مقیاس فضایی ناحیه تبادل در امتداد جریان می‌شود. از این رو، روند مشاهده شده در شکل (۴) بیانگر تغییرات معنا داری در الگوی تبادلات سطحی–زیرسطحی در اثر تغییر پارامترهای هیدرولیکی و مورفولوژیکی مجرا است.



شکل ٤- تغییرات $\frac{L_{HZ}}{B}$ به عدد F_d در آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم

تأثیر پوشش گیاهی برحداکثر عمق تبادلات ناحیه هایپریک (d_{HZ})

شکل (۵) تغییرات $\frac{RT*K}{B}$ در مقابل $\frac{d_{HZ}}{B}$ در آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم را نشان می‌دهد. مطابق شکل روند شکل‌گیری یک جریان هایپریک در زیر پوشش‌گیاهی دارای یک انحنا به سمت پایین بوده که در یک بخش از حرکت به بیشترین عمق نفوذ در بستر رسوبی رسیده و مجدداً پس از آن به سمت خروج از بستر رسوبی حرکت می‌کند. بیشترین مقدار عمق نفوذ در بستر رسوبی در اندازه گیری‌های جریان هایپریک (d_{HZ}) نامیده می‌شود. طبق تغییرات منحنی‌ها در شکل (۵) نتایج بیانگر آن است که با افزایش نسبت $\frac{d_{HZ}}{B}$ مقدار $\frac{RT*K}{B}$ نیز افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که با افزایش عمق نفوذ جریان هایپریک در بستر رسوبی، مدت‌زمان ماند جریان زیرسطحی و در نتیجه توان تبادل آب میان لایه‌های سطحی و زیر سطحی افزایش پیدا می‌کند.

تأثیر پوشش گیاهی برحداکثر زمان تبادلات ناحیه هایپریک (RT)

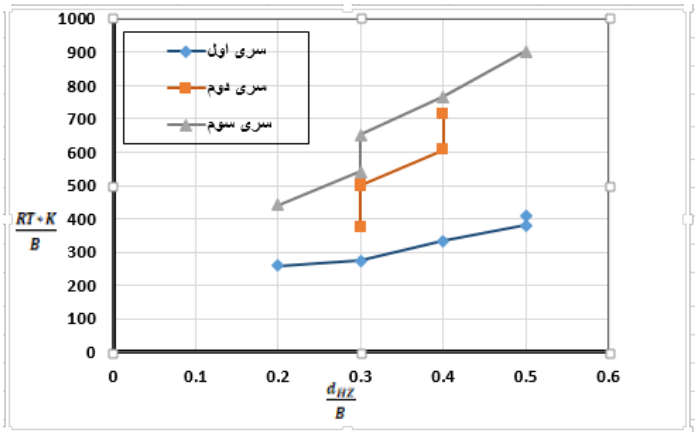
به منظور تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی رسوبات (K) مطابق رابطه (۶)، جریان به گونه‌ای که مماس بر سطح بستر رسوبی بوده و هیچگونه تماسی با سطح آزاد نداشته باشد، برقرارگردید(Tonina and Buffington., 2007).

$$K=\frac{Q}{AS_f} \quad (۶)$$

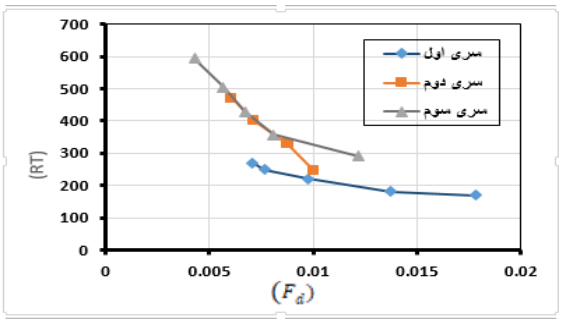
که در این رابطه (Q)، دبی جریان مماسی، (A) سطح مقطع عرضی رسوبات اشباع (S_f) شیب خط انرژی جریان است. مقدار ضریب هدایت هدرولیکی مصالح مورد استفاده در این پژوهش مطابق روش مقدار ۰/۷۶ متر بر ثانیه برآورده شد که با مقادیر ارائه شده توسط محققین برای محدوده هدایت هدرولیکی بسترهای شنی که مقادیر ۰/۰۰۰۰۱ تا ۱ متر بر ثانیه ارزیابی شده بود، مطابقت دارد . (Karamouz et al., 2011) از سوی دیگر، برای بررسی تغییرات میانگین مدت زمان ماند املاح در شرایط مختلف آزمایشگاهی از تغییرات پارامتر بی‌بعد $\frac{RT*K}{B}$ استفاده گردید. که؛ که این رابطه، مقادیر (K)و (B) برای بستر رسوبی و شرایط آزمایش‌های مختلف در این پارامتر بی‌بعد ثابت بوده لذا تغییرات مقادیر (RT) می‌تواند به عنوان یک متغیر در حالت‌های مختلف آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

همچنین تغییرات منحنی شکل (۵) نشان دهنده افزایش عمق نفوذ جریان هایپریک (d_{HZ})، ک سبب می‌شود جریان در خلاف جهت گرادیان فشار به نواحی عمیق‌تری از بستر رسوبی وارد شود و سپس در مسیر جریان سطحی به خروجی بازگردد. افزایش این عمق موجب افزایش مسیر جریان زیرسطحی و در نتیجه افزایش زمان ماند هایپریک (RT) می‌گردد. ب؛ براین، افزایش مقدار $\frac{RT*K}{B}$ در شکل (۵) نتیجه مستقیم افزایش عمق نفوذ و توسعه فضایی مسیر تبادلات زیرسطحی است. در مقابل، نتایج مربوط به تغییر عدد فرود ذره بستر رسوبی (F_d) نشان می‌دهد که افزایش انرژی و شدت جریان منجر به کاهش عمق نفوذ جریان هایپریک (d_{HZ}) شده و در نتیجه مقدار

$\frac{RT*K}{B}$ را کاهش می‌دهد. این رفتار ناشی از تمرکز گرادیان‌های هیدرولیکی در نواحی کم‌عمق و محدود شدن توان نفوذ جریان به لایه‌های زیرین بستر است. همچنین افزایش طول پوشش گیاهی (L) سبب افزایش مقاومت هیدرولیکی و کاهش سرعت جریان سطحی می‌شود که به نوبه خود افزایش عمق نفوذ هایپریک و افزایش مدت‌زمان تبادل را به دنبال دارد. این روند در سری آزمایش-هایی که پوشش گیاهی طولانی‌تر بوده، به‌خوبی قابل مشاهده است و بیانگر نقش پوشش گیاهی در تقویت فرایند تبادلات سطحی–زیرسطحی است. به‌طور کلی، افزایش $\frac{RT*K}{B}$ در شکل (۵) ناشی از تأثیر هم‌زمان دو عامل اصلی است: ۱) افزایش عمق نفوذ جریان هایپریک ۲) کاهش شدت جریان و تقویت مسیرهای زیر سطحی در حضور پوشش گیاهی(L) بنابراین، روندهای مشاهده‌شده در این شکل نشان می‌دهد که تغییرات هیدرولیکی و مورفولوژیکی مجرا می‌تواند به‌طور معناداری الگوی تبادلات سطحی–زیرسطحی را تحت‌تأثیر قرار دهد.



شکل ۵- تغییرات $\frac{RT*K}{B}$ در مقابل $\frac{d_{HZ}}{B}$ در آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم



شکل ٦- تغییرات RT در مقابل F_d در آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم

شکل (۶) تغییرات زمان ماند جریان هایپریک (RT) را در مقابل عدد فرود ذره بستر رسوبی (F_d) برای آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش (F_d) مقدار (RT) به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد. این روند بیانگر آن است که افزایش انرژی و شدت جریان، مدت زمان ماند جریان در ناحیه هایپریک را کاهش می‌دهد و تبادلات سطحی–زیرسطحی در بازه زمانی کوتاه‌تری رخ می‌دهد. افزایش عدد فرود ذره به (F_d) معنی افزایش نیروی برشی جریان و گرادیان هیدرولیکی در مجاورت بستر رسوبی است. در چنین شرایطی، مسیرهای زیرسطحی کوتاه‌تر شده و حجم آب درگیر در تبادلات هایپریک کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، زمان ماند جریان هایپریک کاهش (F_d) پیدا می‌کند. این رفتار در هر سه سری آزمایش قابل مشاهده است، هرچند در سری سوم به‌دلیل افزایش پوشش گیاهی و افزایش مقاومت هیدرولیکی، مقادیر (F_d) در تمامی سطوح نسبت (F_d) به دو سری دیگر بزرگ‌تر است که نشان‌دهنده تقویت نسبی تبادلات زیرسطحی در حضور پوشش گیاهی است. به‌طور کلی، نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که افزایش انرژی جریان (افزایش (F_d)) تمایل سیستم را به سمت تبادلات سریع‌تر و کم‌عمق‌تر سوق می‌دهد و در مقابل، وجود مقاومت اضافی ناشی از پوشش گیاهی می‌تواند تا حدی این اثر را تعدیل کرده و زمان ماند جریان هایپریک را افزایش دهد.

جدول ۲- نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی جریان هایپریک

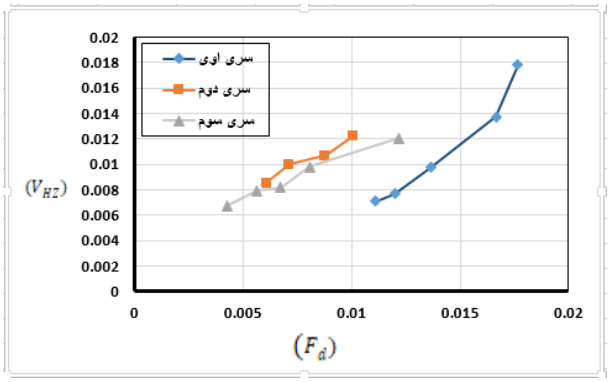
شماره آزمایش	سری آزمایش	L(m)	Q(l/s)	L_{HZ}(m)	D_{HZ}(m)	RT(s)
۱	سری اول	۲ متر	۴	۰/۰۴	۰/۲۵	۵۹۴
۲			۷	۰/۰۴	۰/۲۵	۵۰۵
۳			۱۰	۰/۰۳۵	۰/۲	۴۲۹
۴			۱۳	۰/۰۳۵	۰/۱۵	۳۵۷
۵			۲۲/۵	۰/۰۳۵	۰/۱	۲۹۰
۶	سری دوم	۴ متر	۴	۰/۰۴	۰/۲	۴۷۰
۷			۷	۰/۰۴	۰/۲	۴۰۰
۸			۱۰	۰/۰۳۵	۰/۱۵	۳۲۸
۹			۱۳	۰/۰۳۵	۰/۱۵	۳۳۰
۱۰			۲۲/۵	۰/۰۳	۰/۱۵	۲۴۶
۱۱	سری سوم	۶ متر	۴	۰/۰۳	۰/۲۵	۲۷۰
۱۲			۷	۰/۰۳	۰/۲	۲۵۰
۱۳			۱۰	۰/۰۳	۰/۱۵	۲۲۰
۱۴			۱۳	۰/۰۳	۰/۱۵	۱۸۰
۱۵			۲۲/۵	۰/۰۲	۰/۱	۱۷۰

تأثیر پوشش گیاهی بر سرعت تبادلات ناحیه هایپریک (V_{HZ})

شکل (۷) تغییرات عدد فرود را (F_d) در مقابل سرعت تبادل در ناحیه هایپریک (V_{HZ}) برای آزمایش‌های سری اول، دوم و سوم نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش (F_d) مقدار سرعت (V_{HZ}) نیز در هر سه سری آزمایش افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که شیب افزایش در سری سوم (با افزایش طول پوشش گیاهی) از دو سری دیگر بیشتر است. این روند بیانگر آن است که افزایش انرژی جریان در مجاورت بستر رسوبی، نفوذپذیری هیدرولیکی مؤثر و گرادیان فشار وارد بر منفذهای رسوب را تقویت کرده و در نتیجه، سرعت تبادلات سطحی–زیرسطحی در ناحیه هایپریک افزایش می‌یابد. در سری اول که پوشش گیاهی وجود ندارد، افزایش (F_d) عمدتاً ناشی از افزایش دبی جریان (Q) است و در مقادیر پایین (F_d) ، سرعت هایپریک (V_{HZ}) نسبتاً کوچک باقی می‌ماند. با افزودن پوشش گیاهی (سری دوم و سوم)، مقاومت هیدرولیکی بستر افزایش یافته و الگوی توزیع سرعت در نزدیکی بستر تغییر می‌کند؛ در نتیجه، گرادیان فشار موضعی در اطراف ساقه‌ها تشدید شده و مسیرهای تبادل آب سطحی–زیرسطحی فعال‌تر می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود برای یک مقدار مشخص (F_d) ، مقادیر (V_{HZ})در سری سوم به‌طور محسوسی بزرگ‌تر از سری اول و دوم باشد. به‌طور کلی، نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که عدد فرود ذره (F_d) با سرعت تبادلات هایپریک (V_{HZ})رابطه مستقیم دارد و حضور و افزایش طول پوشش گیاهی (L) با ایجاد گرادیان‌های فشاری قوی‌تر نقش تقویت‌کننده‌ای در این رابطه ایفا می‌کند.

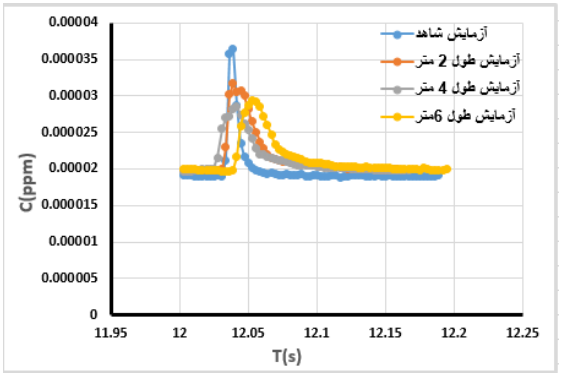
آزمایش‌های ماده ردیاب

تأثیر وجود پوشش‌گیاهی بر تبادلات هایپریک ناحیه‌زیرین جریان در بخش‌های قبل پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. حال اگر چنان‌چه نحوه همرفت املاح در ناحیه اصلی جریان در حضور پوشش‌گیاهی بررسی گردد می‌توان علاوه بر تأثیرپذیری جریان‌های زیرین تحت حضور پوشش‌گیاهی به بررسی تأثیر آن‌ها بر همرفت املاح در ناحیه اصلی جریان نیز پرداخت؛ بنابراین در این بخش از پژوهش به بررسی منحنی‌های رخنه برداشتی از آزمایش‌های ماده‌ردیاب (NACL) پرداخته شد. شکل‌های (۸) تا (۱۲) به ترتیب منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب از آزمایش شاهد در مقابل آزمایش‌های پوشش‌گیاهی طول‌های ۶،۴،۲ در محل تعبیه شده حسگر ۶ قبل پوشش‌گیاهی را نشان می‌دهند. دبی‌تبادلی (Q_{ex}) بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی یکی از پارامترهای مهم در بحث تبادلات هایپریک است.

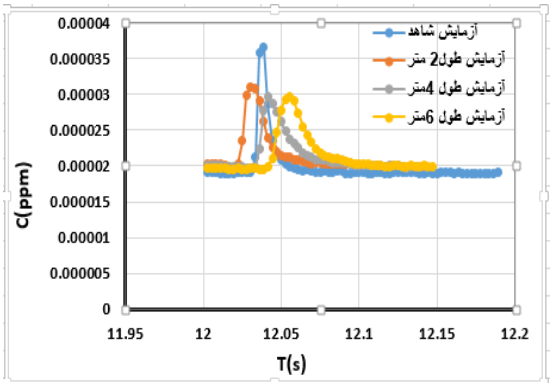


شکل ۷- تغییرات عدد F_d درمقابل V_{ZH} درآزمایش‌های سری اول، دوم و سوم

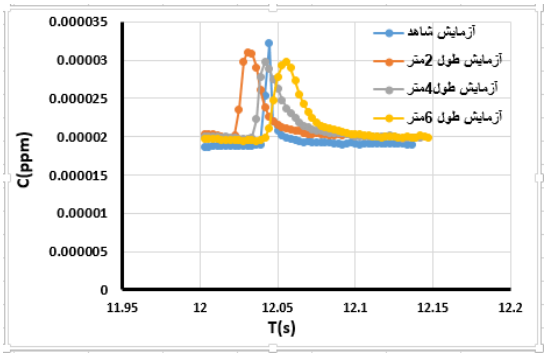
دبی‌تبادلی (Q_{ex}) تحت تأثیر مساحت ناحیه بستر رسوبی (A_S) وهمچنین سرعت جریان در این ناحیه (V_S) بوده و از رابطه $A_S * V_S = Q_{ex}$ محاسبه می‌شود. از سوی دیگر سرعت جریان در ناحیه بستر رسوبی (V_S) با استفاده از رابطه $\frac{L_{HZ}}{RT}$ محاسبه شده و در واقع مقدار سرعت جریان در این ناحیه با افزایش (L_{HZ}) و یا کاهش مقدار (RT) افزایش یافته لذا مقدار دبی‌تبادلی (Q_{ex}) نیز دچار افزایش خواهد شد. پس مجموعاً دبی‌تبادلی (Q_{ex}) تحت تأثیر سه پارامتر L_{HZ}، RT و A_S بوده و ایفای نقش هر یک از این پارامترها موجب افزایش یا کاهش دبی‌املاح ورودی به نواحی هایپریک یا دبی‌املاح خروجی از این نواحی خواهد شد.



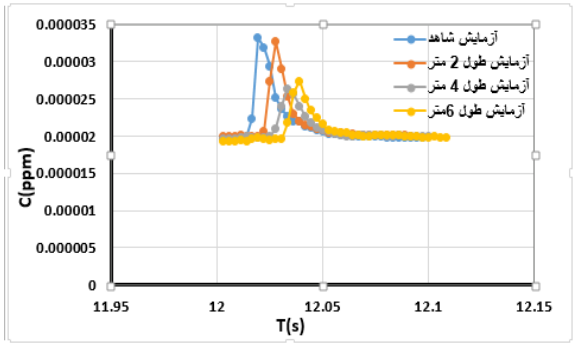
شکل۸- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در آزمایش‌های شاهد، آزمایش‌های طول۲،٤و٦متر حسگر٦ قبل پوشش گیاهی برای دبی ٤ لیتر برثانیه دبی ۷لیتر برثانیه



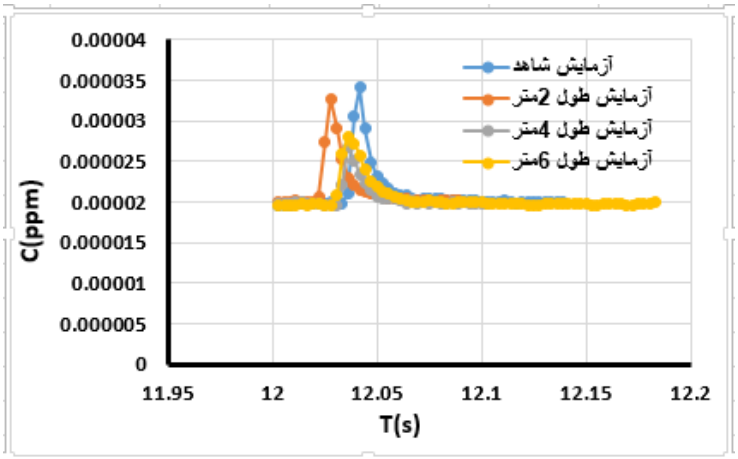
شکل۹- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در شاهد، طول۲،٤و٦متر حسگر٦ قبل پوشش گیاهی برای



شکل ۱۰- منحنی های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در آزمایش‌های شاهد، آزمایش طول۲،٤و٦متر حسگر٦ قبل پوشش گیاهی برای دبی ۱۰ لیتر برثانیه دبی ۱۳لیتر بر ثانیه

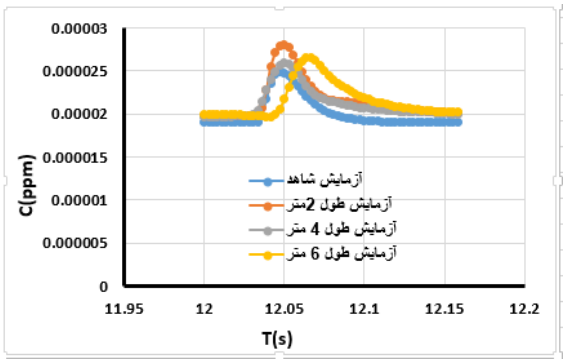


شکل۱۱- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در شاهد، طول۲،٤و٦متر حسگر٦ قبل پوشش گیاهی برای

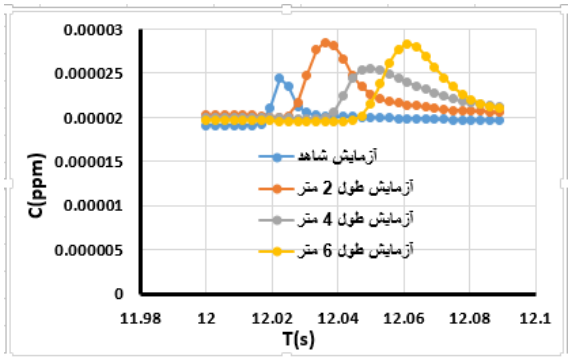


شکل ۱۲- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در آزمایش‌های شاهد، طول۲،٤و ٦متر حسگر٦ قبل پوشش گیاهی برای دبی ۲۲/۵ لیتر برثانیه

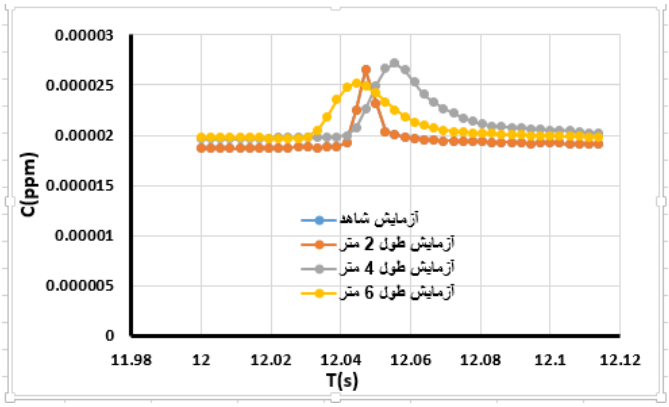
بررسی منحنی‌های رخنه برداشتی در شکل‌های (۸) تا (۱۲) که مربوط به حالت بدون پوشش گیاهی و طول‌های بستر ۲، ۴ و ۶ متر هستند، نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، غلظت اوج املاح (C_{max}) افزایش یافته و زمان وقوع آن کاهش می‌یابد. این رفتار بیانگر آن است که با افزایش دبی، سهم جریان اصلی در حمل مستقیم ردیاب تقویت شده و بخش کمتری از ردیاب وارد ناحیه زیرسطحی می‌شود. در نتیجه، زمان ماند ردیاب (RT) کاهش پیدا کرده و منحنی‌ها حالت فشرده‌تری به خود می‌گیرند. در مقابل، افزایش طول مسیر جریان از ۲ به ۴ و سپس ۶ متر باعث تغییر قابل توجه در شکل منحنی‌ها شده است. با افزایش طول، منحنی‌ها کشیده‌تر شده و دنباله آن‌ها افزایش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده افزایش حجم تبادلات زیرسطحی (V_{HZ}) و زمان تأخیر بازگشت ردیاب به جریان اصلی است. در این شرایط، ردیاب مدت بیشتری در ناحیه هایپریک باقی مانده و بخشی از آن با تأخیر وارد جریان می‌شود که موجب کاهش مقدار پیک و افزایش زمان ماند می‌گردد. مقایسه آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اثر طول بستر در دبی‌های کمتر محسوس‌تر است؛ به طوری‌که در دبی‌های پایین، افزایش طول موجب افزایش قابل توجه زمان ماند (RT)، کاهش غلظت پیک (C_{max}) و افزایش سهم تبادلات زیرسطحی می‌شود. در دبی‌های بالاتر، به دلیل شار بیشتر جریان و غلبه انتقال در مسیر اصلی، اثر طول بستر کاهش یافته و بخش عمده ردیاب با تأخیر کمتری از سیستم عبور می‌کند. در مجموع، نتایج شکل‌های (۸) تا (۱۲) نشان می‌دهد که در شرایط بدون پوشش گیاهی، افزایش دبی جریان باعث افزایش سرعت انتقال و افزایش مقدار پیک غلظت می‌شود، در حالی که افزایش طول بستر موجب افزایش زمان ماند، کشیدگی منحنی و تقویت فرآیندهای تبادل سطحی–زیرسطحی می‌گردد. این یافته‌ها بیانگر اهمیت نقش هندسه مسیر جریان در کنترل الگوی انتقال ردیاب در غیاب پوشش گیاهی است.



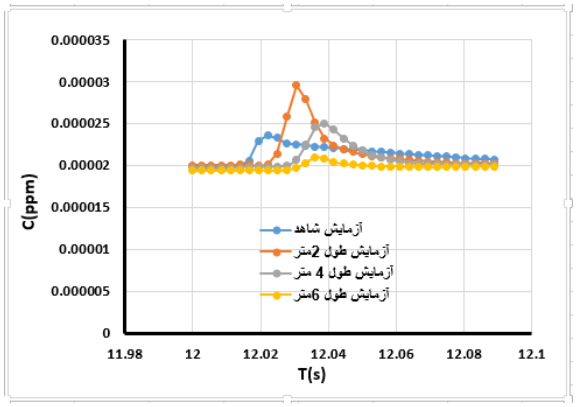
شکل۱۳- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در آزمایش‌های شاهد، آزمایش‌های طول۲،٤و ٦متر حسگر۱۲ وسط پوشش گیاهی برای دبی ٤ لیتر برثانیه برای دبی ۷ لیتر برثانیه



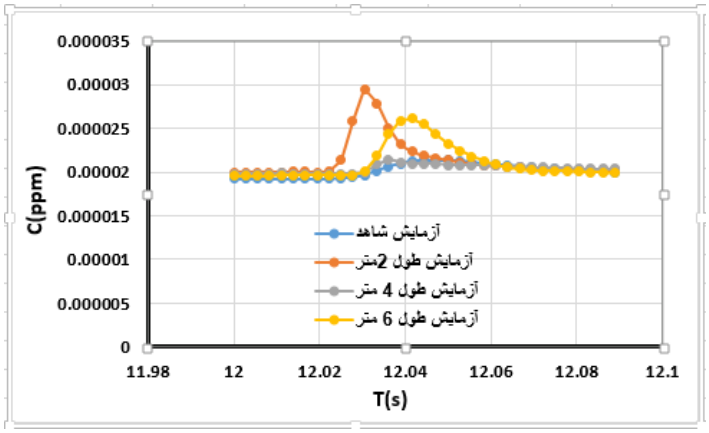
شکل۱٤- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در شاهد، طول۲،٤و ٦متر حسگر۱۲وسط پوشش گیاهی



شکل۱۵- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در آزمایش‌های شاهد، آزمایش‌های طول۲،٤و٦متر حسگر۱۲ وسط پوشش گیاهی برای دبی ۱۰ لیتر برثانیه گیاهی برای دبی ۱۳ لیتر



شکل۱٦- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در شاهد، طول۲،٤و٦متر حسگر۱۲ وسط پوشش برثانیه



شکل ۱۷- منحنی‌های رخنه برداشتی ماده‌ردیاب در آزمایش‌های شاهد، طول۲،٤و٦متر حسگر۱۲ وسط پوشش گیاهی برای دبی ۲۲/۵ لیتر برثانیه

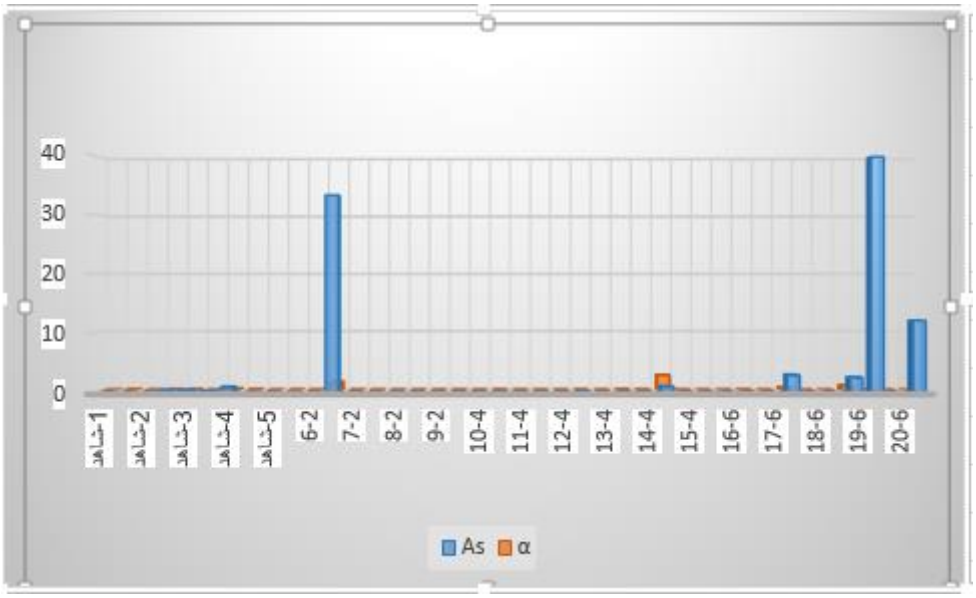
بررسی منحنی‌های رخنه‌برداشتی ماده‌ردیاب در شکل‌های (۱۳) تا (۱۷) که در محل حسگر (۱۲) و در وسط پوشش گیاهی ثبت شده‌اند، نشان می‌دهد که حضور پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی بر الگوی انتقال ردیاب دارد. با افزایش طول پوشش گیاهی از ۲ به ۴ و سپس ۶ متر، مقدار غلظت اوج (C_{max}) کاهش یافته و منحنی‌ها کشیده‌تر می‌شوند. این کشیدگی نشان‌دهنده افزایش زمان ماند ردیاب (RT) وافزایش سهم فرآیندهای تبادل سطحی–زیرسطحی است. یکی از تغییرات مهم در میان این آزمایش‌ها، افزایش حداکثر مدت ماند املاح در ناحیه اصلی جریان (T_{max}) است. حضور پوشش گیاهی با ایجاد مقاومت هیدرولیکی، کاهش سرعت جریان و افزایش آشفتگی موضعی، موجب می‌شود بخشی از ردیاب پس از ورود به جریان، مدت بیشتری در ناحیه اصلی باقی بماند و سپس با تأخیر بیشتری وارد بستر یا مجدداً به جریان اصلی بازگردد. از همین رو با افزایش طول پوشش گیاهی، مقدار حداکثر مدت ماند املاح در ناحیه اصلی جریان (T_{max}) افزایش یافته و منحنی‌ها دنباله‌دارتر می‌شوند. در دبی‌های کمتر، اثر پوشش گیاهی شدیدتر بوده و افزایش طول پوشش گیاهی منجر به افزایش قابل توجه زمان ماند (RT)، افزایش (T_{max}) و کاهش بیشتر (C_{max}) می‌شود. در دبی‌های بالاتر نیز اگرچه زمان رسیدن به پیک کوتاه‌تر است، اما افزایش طول پوشش گیاهی همچنان موجب افزایش (T_{max}) و کشیده‌تر شدن منحنی‌ها می‌شود که بیانگر افزایش حجم تبادل‌های هایپریک و ذخیره‌سازی موقت ردیاب در بستر است. در مجموع، نتایج این شکل‌ها نشان می‌دهد که حضور پوشش گیاهی در محل حسگر (۱۲) سبب کاهش مقدار پیک غلظت، افزایش زمان ماند (RT)، افزایش مدت حضور ردیاب در جریان اصلی (T_{max}) و در نهایت تقویت فرآیندهای تبادل سطحی–زیرسطحی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که منحنی‌های رخنه‌برداشتی در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی از کشیدگی و دنباله‌دار بودن بیشتری برخوردارند.

مدل نگهداشت موقت (TSM)

در این بخش از پژوهش، مدل عددی OTIS با استفاده از

غلظت‌های اندازه‌گیری شده ماده‌ردیاب (NACL) در آزمایش‌های (۸) تا (۱۷) و سایر مشخصات آزمایش‌ها از جمله دبی جریان، سرعت و عمق جریان به منظور تخمین ضریب تبادل‌نگهداشت (α) و مساحت مقطع عرضی ناحیه‌نگهداشت (A_S) انجام شد. ضریب تبادل نگهداشت (α) برخلاف (RT) یک پارامتر املاح در بستر رسوبی می‌باشد. در واقع افزایش این پارامتر بیان‌کننده آن است که همرفت املاح در ناحیه هایپریک بستر رسوبی دارای سرعت بیشتری بوده است. از سوی دیگر، مساحت مقطع عرضی ناحیه‌نگهداشت (A_S) نیز یک پارامتر تاثیرگذار در دبی‌تبادلی بین ناحیه اصلی جریان و بستر رسوبی (Q_{ex}) می‌باشد.

شکل (۱۸) تغییرات پارامترهای تخمینی (α)و (A_S) حاصل از مدل OTIS را برای آزمایش‌های مختلف در طول‌های ۲، ۴ و ۶ متر نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که مقدار ضریب تبادل (α)در برخی آزمایش‌ها، به‌ویژه آزمایش‌های (۹) و (۲)، بیشترین مقدار را داشته و مقایسه آن با مقادیر (A_S) نشان می‌دهد که بین این دو پارامتر در بسیاری از آزمایش‌ها رابطه مستقیمی مشاهده نمی‌شود. همچنین در برخی آزمایش‌ها مقادیر (A_S) نسبتاً بزرگ‌تر گزارش شده است که بیانگر افزایش سطح مؤثر تبادل بین ناحیه اصلی جریان و ناحیه ذخیره می‌باشد. به طور کلی تغییرات این دو پارامتر در آزمایش-های مختلف نشان‌دهنده تفاوت در شدت تبادلات سطحی–زیرسطحی و تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان در طول‌های مختلف مسیر آزمایش است.



شکل ۱۸- تغییرات ضرایب α و A_S برای آزمایش‌های شماره ۱ الی ۲۰

نتیجه گیری

در این پژوهش، انتقال املاح در جریان سطحی و تبادلات سطحی–زیرسطحی در شرایط بدون پوشش و با پوشش گیاهی بررسی شد. نتایج نشان داد در نبود پوشش گیاهی، پیک غلظت (C_{max}) سریع‌تر رخ داده و زمان ماند (RT) کوتاه‌تر است؛ در حالی‌که حضور پوشش گیاهی با افزایش مقاومت هیدرولیکی، موجب کاهش (C_{max})، افزایش (RT) و افزایش حداکثر مدت حضور ردیاب در ناحیه اصلی جریان (T_{max}) می‌شود. همچنین تغییرات دبی جریان (Q) و شرایط بستر بر شدت تبادلات تأثیرگذار بوده و حضور پوشش گیاهی سبب افزایش حجم تبادلات هایپریک (V_{HZ}) و تقویت تبادل بین ناحیه اصلی جریان و ناحیه ذخیره می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مدل OTIS نیز نشان داد که ضرایب تبادل (α) و مساحت ناحیه ذخیره (A_S) متناسب با شرایط هیدرولیکی و وجود پوشش گیاهی تغییر می‌کنند و این تغییرات بیانگر نقش مؤثر پوشش گیاهی در افزایش ذخیره‌سازی موقت و تأخیر در انتقال املاح است.

منابع

عزیز پور پیر سرائی، م. و ا، امیری تکلدانی. ۱۳۹۰. بررسی تجربی ضریب انتشار جانبی آلودگی در مجاری روباز (در مقیاس آزمایشگاهی). پایان نامه ارشد، دانشگاه تهران.

غلامی، ف. عمادی، ع.ر. و میرناصری، م. ۱۴۰۳. بررسی آزمایشگاهی تأثیر نواحی نگهداشت آبشکن‌های متخلخل بر شبیه‌سازی عددی

انتقال آلودگی در رودخانه‌ها. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۸(۱): ۵۵-۷۰.

نیکبخت، ز. عمادی، ع.ر. و میرناصری، م. ۱۴۰۱. بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر اصلاح سدهای گابیونی بر پارامترهای مدل نگهداشت موقت در انتقال آلودگی در رودخانه‌ها. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۲۳(۸۷):۱۴۴-۱۱۹.

Afzalimehr, H. and Dey, S. 2009. Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions. International Journal of Sediment. Research. 24 (2): 236-246

Asadi, F. Dehghani, A. A. Halaghi, M. M. and Movahedi, N. 2024. Laboratory and numerical study of hyporheic exchanges in sand mining pit. Journal of Hydraulics. 19(3): 15–36.

Bencala, K.E. and Walters, R.A. 1983. Simulation of solute transport in a mountain pool-and riffle stream: a transient storage model. Water Resources Research. 19(3): 112–124.

Choi, S. and Lee, J. I. N. H. W. I. 2012. Impact of vegetation on contaminant transport in partly-vegetated open-channel flows. Proceedings of the 9th International Symposium on Ecohydraulics, 17–21 September, Vienna.

Ebrahimi, N.G. 2008. Estimating roughness coefficient of submerged vegetation in the riverbed to calibration of mathematical models. PhD Thesis, Chamran University of Ahvaz.

Kadlec, R. H. 1997. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. Water Science and Technology. 35(5): 149-156.

Karamouz, M. Ahmadi, A. and Akhbari, M. 2011. Groundwater hydrology: engineering, planning, and management: CRC Press.

Le Guern, J. Rodrigues, S. Tassi, P. Cordier, F. Wintenberger, C. L. and Jugé, P. 2023. Migrating bars influence the formation and dynamics of their peers in a straight channel of a large sandy-gravel bed river. Earth Surface Processes and Landforms.

Lou, S. Wang, H. Liu, H. Zhong, G. Radnaeva, L. D. Nikitina, E. & Liu, S. 2021. Laboratory study of the effects of flexible vegetation on solute diffusion in unidirectional flow. Environmental Sciences.Europe. 33(1): 1-

Marion, A. Nikora, V. Puijalon, S. Bouma, T. Koll, K. Ballio, F. and Statzner, B. 2008. Aquatic interfaces: a hydrodynamic and ecological perspective. Journal of Hydraulic Research. 52(6): 744-758.

Mirnaseri, M. 2025. Numerical–experimental investigation of the effect of different steps in river restoration plans on hyporheic exchanges. Iranian Journal of Irrigation and Drainage.19 (1): 29–45

Nasiri Dehsorkhi, N. Afzalimehr, H. and J. Sui. 2010. Effects of vegetation channel banks and gravel size on flow structure. International Journal of Sediment Research. 25(2): 110-118.

Nepf, H. M. 1997. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. Water Resources research. 35(2): 479-489.

Ruei, K. Ch. Hsun-Chuan, Ch. You-Cheng. 2014. Influence of the bank vegetation on the river bed variations. Affiliation. EGU General Assembly, in Vienna, Austria.

Runkel, R. L. 1987. One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Tonina, D. and Buffington, J.M. 2007. Hyporheic exchange in gravel be rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. Water Resources Research. 43(1): 1-16.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 623-636

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۳۶-۶۲۳

Laboratory-Numerical Study of the Effect of Reed Vegetation Length on Salt Transport and Hypericum Exchange in Waterways

F. Nazdaneh[1], A. Emadi *[2], M. Mirnaseri [3]
Recived: Nov.08, 2025 Accepted: Jun.17, 2026

Abstract

Various types of vegetation cover in riverine ecosystems, streams, and wetlands constitute an important component of these environments and influence their surroundings. Vegetation can play a significant role in improving water quality by reducing contaminant concentrations through adsorption and dilution processes. Therefore, this study experimentally investigated the effects of no vegetation and reed vegetation cover on pollutant transport in a laboratory flume, as well as the variation of contaminant concentration downstream of the injection point. The experiments were conducted in a rectangular channel with a length of 12 m, a width of 0.5 m, and a depth of 0.7 m. Sodium chloride (NaCl) solution was used as a tracer in the main flow, and potassium permanganate ($KMnO_4$) solution was used as a colored tracer to examine hyporheic exchanges in the sediment bed. In the experiments, 225 g of tracer was dissolved in 6 L of water and injected into the flow as the contaminant. Reed was used to simulate channel vegetation. The results showed that increasing the flow rate (Q) from 4 to 22.5 L/s led to an increase in the maximum hyporheic exchange length (LHZ) from 0.14 to 0.32 m, corresponding to 128%, and the mean hyporheic residence time (RT) from 290 to 584 s, corresponding to 50%. The results also showed that increasing the vegetation length (L) from 2 to 6 m caused a 15–52% reduction in residence time (RT) under different flow conditions, while in some cases the maximum hyporheic exchange length (LHZ) increased by up to 56%. These findings indicate the direct influence of vegetation length (L) in regulating hyporheic exchange and altering the pattern of flow penetration into the sediment bed.

Keywords: Hyporheic Exchange, OTIS Mode, Pollutant Transport, Red vegetation, Residence Time

1-PhD student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
2-Professor of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
3-Assistant Professor of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: Emadia355@yahoo.com)