



Investigation of the effect of step penetration depth in porous medium on the hyporheic fluxes

Mahla Tajari¹, Mohammad hosein Omid^{2✉}, Amir Ahmad Dehghani³, Arezoo Nazi Ghameshlou⁴

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: mahla.tajari@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: Omid@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: a.dehghani@gau.ac.ir
4. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: a.ghameshlou@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: Jan. 31, 2022</p> <p>Revised: July. 10, 2022</p> <p>Accepted: Aug. 15, 2022</p> <p>Published online: Sep. 23, 2022</p> <p>Keywords: Hyporheic exchange, in-stream structures, Laboratory and numerical modeling.</p>	<p>From environmental aspects, the exchange of surface and subsurface flows in riverbeds due to river morphology and in stream structures is very important. The flow path structures especially control structures have a more effective role than the river morphology in the formation of these exchanges. In this study, the effect of penetration depth of such structures in the porous bed on the characteristics of exchange flows was investigated both experimentally and numerically. The experiments were performed in a flume with a length of 10 m, width of 20 cm, depth of 30 cm and a slope of 0.01, at three penetration depths of 9, 11 and 13 cm respectively. Potassium permanganate tracer was used for tracking the flow. In addition, to obtain the characteristics of the exchange flow; the mainstream and the exchange pattern were simulated by particle tracking method using Flow 3D software. The results showed that in the Reynolds range of 1020 to 3450, increasing the penetration depth of the structure from 9 to 13 cm, would increase the residence time but decreases the exchange rate. However, increasing the flow rate would decrease the exchange rate and increase the retention time. Accordingly, the use of a step with a higher penetration depth is recommended to create a longer residence time. However, a step with a smaller penetration depth may be used to produce a higher exchange rate.</p>

Cite this article: Tajari, M., Omid, M. H., Dehghani, A. A., & Nazi Ghameshlou, A. (2022). Investigation of the effect of step penetration depth in porous medium on the hyporheic fluxes. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (7), 1563-1574.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338284.669200>

بررسی اثر عمق نفوذ پلکان در محیط متخلخل بر تبادل جریان‌های سطحی و زیرسطحی

مهلا تجری^۱، محمدحسین امید^۲✉، امیراحمد دهقانی^۳، آرزو نازی قمشلو^۴۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: mahla.tajari@ut.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: momid@ut.ac.ir۳. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: a.dehghani@gu.ac.ir۴. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: a.ghameshlou@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

تبادل جریان‌های سطحی و زیرسطحی در بستر رودخانه‌ها در اثر شکل طبیعی رودخانه و سازه‌های مختلف در مسیر جریان، به دلیل توجه روز افزون به محیط زیست در سالهای اخیر، مورد توجه محققین قرار گرفته است. از آنجایی که سازه‌های مسیر جریان نقش کنترل شده و اثرگذارتری نسبت به ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در شکل‌گیری این تبادلات دارند، در این پژوهش تاثیر عمق نفوذ این سازه‌ها در بستر متخلخل بر خصوصیات جریان‌های تبادلی از طریق آزمایش و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر، عمق ۳۰ سانتی‌متر و شیب ۰/۰۱، برای سه عمق نفوذ ۹، ۱۱ و ۱۳ سانتی‌متر انجام و برای مسیریابی جریان از ردیاب پتاسیم پرمنگنات استفاده شد. همچنین برای بدست آوردن مشخصات جریان تبادلی و الگوی جریان تبادلی با روش ردیابی ذرات، توسط نرم‌افزار Flow 3D شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در دامنه رینولدز ۱۰۲۰ تا ۳۴۵۰، افزایش عمق نفوذ سازه از ۹ به ۱۳ سانتی‌متر، موجب افزایش زمان ماند و کاهش نرخ تبادل می‌شود. افزایش دبی جریان موجب کاهش نرخ تبادل و افزایش زمان ماند می‌شود. بنابراین می‌توان بکارگیری پلکان با عمق نفوذ بیشتر را برای بدست آوردن زمان ماند بیشتر و پلکان با عمق نفوذ کم‌تر را برای بوجود آوردن نرخ تبادل بیشتر توصیه کرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۷/۱

واژه‌های کلیدی:

جریان تبادلی،
سازه‌های در مسیر جریان،
مدلسازی آزمایشگاهی و عددی.

استناد: تجری، مهلا؛ امید، محمدحسین؛ دهقانی، امیراحمد؛ نازی قمشلو، آرزو (۱۴۰۱). بررسی اثر عمق نفوذ پلکان در محیط متخلخل بر تبادل جریان‌های سطحی و زیرسطحی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۷)، ۱۵۷۴-۱۵۶۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338284.669200>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

به دلیل اهمیت مسائل محیط زیستی جریان‌های سطحی و توجه بیشتر به آن‌ها در چندین دهه‌ی اخیر تبادلات جریان‌های سطحی و زیرسطحی در بستر رودخانه‌ها مورد توجه خاص قرار گرفته و مطالعات زیادی در زمینه‌ی اثر این تبادلات بر جریان‌های رودخانه‌ای انجام شده است (Orghidan, 1959; Vaux, 1968; Harvey and Bencala, 1993; Hester and Doyle, 2008; Boulton et al., 1998). Orghidan (1959) برای اولین بار تبادلات جریان سطحی و زیرسطحی را بنام جریان تبدلی^۱ و ناحیه‌ی شکل‌گیری این تبادلات را که ناحیه‌ی اشباع زیر بستر رودخانه است به نام ناحیه جریان تبدلی^۲ نام‌گذاری کرد. این ناحیه یک ناحیه فعال^۳ بوم‌شناسی^۴ است و به نام کبد رودخانه نیز شناخته می‌شود (Boulton et al., 2010). جریان تبدلی در اثر سه عامل اصلی تغییرات ارتفاع هیدرولیکی، تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل و تغییر ضخامت لایه بستر شکل می‌گیرد (Vaux, 1968; Boulton et al., 1998; Stanford et al., 2005; Stanford, 2006; Tonina and Buffington, 2007; Tonina and Buffington, 2009a,b; Cadenas and Wilson, 2007).

خصوصیات اصلی جریان تبدلی شامل مقدار جریان تبدلی (دبی)، زمان ماند جریان تبدلی در محیط متخلخل، عمق نفوذ و طول مسیر جریان تبدلی در محیط متخلخل است. مطالعات اولیه در زمینه‌ی جریان‌های تبدلی بیش‌تر متمرکز بر تبادلات شکل گرفته در اثر ریخت‌شناسی^۵ طبیعی رودخانه‌ها بوده است. (Harvey and Bencala, 1993; Tonina, 2005; ; Tonina and Buffington, 2007;) (Tonina and Buffington, 2009a,b; Cadenas and Wilson, 2007). اما در سال‌های اخیر، در کنار مطالعات مربوط به ریخت‌شناسی طبیعی، مطالعات به سمت اثر سازه‌های احداث شده در مسیر جریان یا سازه‌های سطحی بر جریان تبدلی سوق پیدا کرده است (Kasahara and Hill, 2006; Kaushal et al., 2008; Endreny et al., 2011a,b; Zhou, 2012; Zhou and Endreny, 2013; Hester and Doyle, 2008; Daniluk et al., 2013; Gordon et al., 2013; Smidt, 2014; Tuttle et al., 2014; Hester et al., 2016; Hester et al., 2018; Peter et al., 2019; Bakke et al., 2020; feng et al., 2022).

سازه‌های در مسیر جریان می‌تواند با ایجاد جریان‌های تبدلی، عکس‌العمل‌های کیفیت آب در نواحی مختلف را افزایش دهد (Hester and Gooseff, 2011; Gordon et al., 2013). واریزه^۶، پلکان^۷، صفحات عرضی^۸ و پله حوضچه^۹ ساخته‌شده، برخی از انواع سازه‌های به‌کاررفته با هدف افزایش جریان تبدلی برای احیاء جریان می‌باشد. مطالعات نشان داده است که سازه‌های ساخته شده در مسیر جریان، با تغییر ارتفاع هیدرولیکی، موجب شکل‌گیری جریان تبدلی می‌شوند و میزان تاثیر آنها بر جریان تبدلی بیش‌تر و نقش آنها کنترل‌شده‌تر از فرم‌های طبیعی بستر رودخانه است (Zhou, 2012; Smidt, 2014; Hester et al., 2018; Krause et al., 2014). تضعیف هر نوع آلاینده در جریان‌های تبدلی بستگی به دبی تبدلی، طول مسیر و زمان ماند دارد. بنابراین بهینه‌سازی این سازه‌ها برای فراهم آوردن شرایط مناسب جریان تبدلی با اهداف بوم‌شناسی ضروری است (Bakke et al, Peter et al. 2020, 2019, Smidt, 2014).

سازه‌های در مسیر جریان موجب تشدید جریان تبدلی و تضعیف آلاینده‌های موجود در جریان‌های سطحی می‌شود. تا کنون مطالعه‌ای بر بررسی اثر عمق نفوذ پلکان بر جریان تبدلی انجام نشده است و تنها مطالعه مرتبط گذشته (اندرنی و همکاران، ۲۰۱۱) به بررسی تفاوت ارتفاع بالادست و پایین دست پلکان پرداخته است. با توجه به این نکات مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر عمق نفوذ سازه بر جریان تبدلی بعنوان فاکتور اثرگذار بر مشخصات اصلی تبادل مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه ما به مدلسازی آزمایشگاهی و عددی جریان تبدلی پیرامون پلکان پرداختیم. مدلسازی عددی با مدل فلوتریدی که جریان‌های سطحی و زیرسطحی را بطور همزمان مدلسازی می‌کند، انجام شد و از روش ردیابی ذرات برای مسیریابی جریان‌های تبادل جریان سطحی و زیرسطحی استفاده شد. ارزیابی روش ردیابی ذرات مدل فلوتریدی برای شبیه‌سازی جریان تبدلی از اهداف این مطالعه است.

1 Hyporheic exchange

2 Hyporheic zone

3 Hotspot

4 Ecology

5 Morphology

6 Debris

7 Step

8 Cross vanes

9 Step-pool

مواد و روش‌ها

در این مطالعه اثر پلکان با اعماق نفوذ ۹، ۱۱ و ۱۳ سانتی‌متر در بستر متخلخل بر جریان تبدلی، از طریق مدلسازی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با نرم افزار Flow 3D 11.1 مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعه آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی بطول ۱۰ متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر، عمق ۳۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰،۰۱، در آزمایشگاه تحقیقات آب و خاک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران انجام شد. در جدول ۱ مشخصات جریان‌های ایجاد شده در کانال ارائه شده است. در این جدول از S با اندیس‌های مختلف برای نشان دادن پلکان با عمق‌های مختلف استفاده شده است. طول ۲ متر از قسمت میانی کانال بعنوان محدوده آزمایش در نظر گرفته شد و آزمایش‌ها برای سه عمق نفوذ سازه و با سه شدت جریان (دبی) انجام شد. در سه حالت عمق نفوذ، تفاوت ارتفاع بالادست و پایین‌دست پلکان ثابت و مقدار ۵ سانتی‌متر بود.

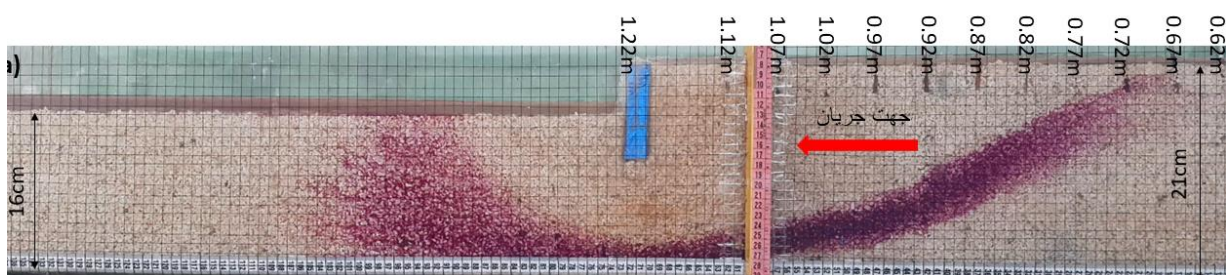
جدول ۱- مشخصات جریان در آزمایش‌های مختلف

عمق نفوذ سازه (cm)	عمق آب روی بستر (cm)	دبی جریان عبوری از کانال محاسبه شده با مدل (لیتر بر ثانیه)	دبی ورودی به کانال آزمایشگاهی (لیتر بر ثانیه)	آزمایش
$S_1=9; S_2=11; S_3=13$	۲	۰/۸۴۸	۰/۹	Q_1
$S_1=9; S_2=11; S_3=13$	۲/۵	۱/۱۴	۱/۱۴	Q_2
$S_1=9; S_2=11; S_3=13$	۳	۱/۴۷	۱/۵	Q_3

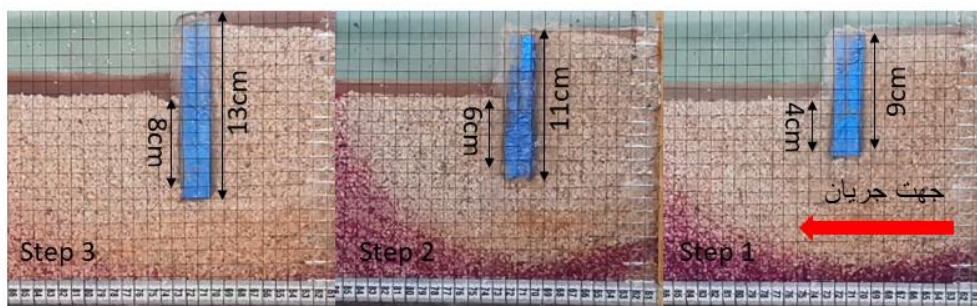
در شکل ۱ کانال آزمایشگاهی، در شکل ۲ ابعاد محدوده آزمایش پر شده از رسوبات و در شکل ۳ مشخصات سازه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. دبی جریان با یک سرریز مثلی که قبلاً با کتور حجمی با حداکثر خطای ۵ درصد واسنجی شده بود، اندازه‌گیری شدند. حداقل عمق آب روی سرریز مثلی ۸ سانتی‌متر تنظیم شده بود. در شکل ۴ نمودار دانه‌بندی رسوبات بکار رفته در آزمایش‌ها ارائه شده است. همانگونه که مشخص است قطر میانه رسوبات ۲/۸ میلی‌متر است. برای محاسبه ضریب آبگذری رسوبات از روش بار افتان استفاده شد که ضریب آبگذری عمودی رسوبات مقدار آن برابر با $5.99 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ بود.



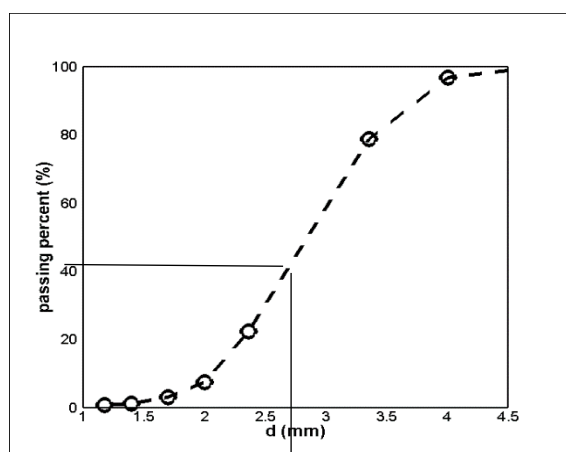
شکل ۱- نمایی از کانال آزمایشی



شکل ۲- بازه آزمایش



شکل ۳- مشخصات هندسی پلکان



شکل ۴- توزیع اندازه رسوبات

رهاسازی ماده رنگی و محاسبه مشخصات جریان تبدیلی

با توجه به حرکت رسوبات پس از برقراری جریان داخل کانال، رهاسازی ردیاب بعد از گذشت حدود ۲ ساعت از شروع هر آزمایش و پس از تثبیت نسبی حفره آبشستگی پایین دست انجام می‌شد. برای مسیریابی جریان در آزمایشگاه از ردیاب پتاسیم پرمنگنات استفاده شد. زمان ماند از زمان شروع رهاسازی ماده رنگی تا زمانی که ماده رنگی به پایین دست می‌رسید و از محیط متخلخل خارج می‌شد در نظر گرفته شد. برای محاسبه طول مسیر، از سلول‌های شبکه‌بندی دیواره شیشه‌ای کانال در مسیر جریان، با استفاده از فیلم برداری انجام شده هنگام رهاسازی ماده رنگی استفاده شد. برای این منظور چند نقطه در مسیر ماده رنگی انتخاب و مشخصات آن نقاط قرائت شد و سپس از رابطه ریاضی طول مسیر بین دو نقطه و در نهایت طول مسیر تبادل برای آزمایش انجام شده بدست آمد. در جدول شماره ۲، مشخصات نقاط رهاسازی برای دبی‌های مختلف که در تمامی آزمایش‌ها ثابت بودند ارائه شده است. نقطه شروع محدوده آزمایش $x=0$ و $x=0.62m$ نقطه اول رهاسازی ماده ردیاب است.

جدول ۲- موقعیت نقاط رهاسازی ردیاب در بالادست پلکان

شماره نقاط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
X(m)	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۹۷	۱/۰۲	۱/۰۷	۱/۱۲

شبیه‌سازی با نرم افزار Flow 3D

همانگونه که پیش از این اشاره شد، دو مشخصه طول مسیر و زمان ماند جریان تبدیلی، با انجام آزمایش در آزمایشگاه بدست آمد. ولی برای برآورد دبی تبدیلی در مراجع، راه مشخص و دقیقی وجود ندارد. به همین دلیل از مدل عددی برای برآورد این مشخصه مهم جریان تبدیلی استفاده شد. از آنجایی که توانایی نرم‌افزار Flow3D در مدل‌سازی همزمان جریان سطحی و جریان در محیط متخلخل به اثبات رسیده است (Flow-3D11.1 manual, 2012)، در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی جریان تبدیلی از این مدل استفاده شد و دبی تبدیلی و دبی جریان سطحی با تعریف بفل^۱ در این نرم افزار برآورد شد. در شکل ۵ صفحه بفل مربوط به محاسبه دبی تبدیلی نشان داده شده است.

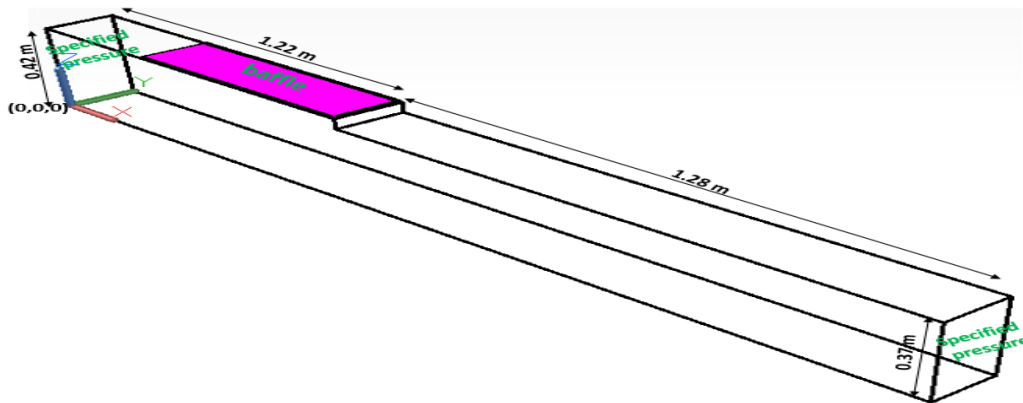
از طرفی با تعریف ۱۴۰ ذره ردیاب در واحد عرض بجای ۱۱ آزمایش رهاسازی، طول مسیر و زمان ماند نیز با برآورد شد. برای محاسبه پارامترهای طول مسیر تبادل و زمان ماند در ناحیه‌ی جریان‌های رو به پایین بالادست ($x_1 < x < 1.2m$)، بسته به شرایط جریان متفاوت است) در هر سلول محاسباتی یک ذره ردیاب تعریف شد. از میانگین مقادیر پارامترهای بدست آمده در مدل عددی مقادیر طول مسیر و زمان ماند برای هر سازه بدست آمد.

معادلات اصلی در این نرم‌افزار شامل معادله پیوستگی و مومنتوم (بسته به نوع جریان سطحی آشفته و آرام) و معادله فوشهایمر^۱ و دارسی (بسته به نوع جریان در محیط متخلخل) برای جریان در محیط متخلخل است. روش گسسته‌سازی^۲ معادلات دیفرانسیل جزئی در مدل Flow 3D، روش احجام محدود^۳ است (برای مشاهده معادلات پیوستگی، مومنتوم و معادله فوشهایمر به راهنما نرم‌افزار مراجعه شود؛ Flow-3D11.1 manual, 2012).

برای مدل‌سازی الگوهای جریان تبدلی پیرامون سازه از مش مربعی و یکنواخت در دستگاه مختصات x, y, z و با اندازه سلول $0.5/0.5$ سانتی‌متر استفاده شد. اندازه سلول محاسباتی با تغییر مش محاسباتی از درشت به ریز و بررسی ثابت بودن نتایج و استقلال مش از شبکه در نظر گرفته شد. برای شرط مرزی در سه جهت کف و دیواره‌ها شرط مرزی دیواره صلب و برای شرط مرزی بالادست و پایین دست جریان، عمق هیدرولیکی جریان تعریف شد. شرایط مرزی تعریف شده در مدل در شکل ۵ ارائه شده است.

برای انتخاب نوع جریان در نرم‌افزار، مقدار حداقل رینولدز جریان سطحی و جریان در محیط متخلخل در نظر گرفته شد. کوچک‌ترین مقدار رینولدز محیط متخلخل $9/6$ محاسبه شد. بنابراین با توجه به این که در رینولدز محیط متخلخل بزرگتر از ۹، جریان آشفته است (Endreny et al, 2011)، جریان در محیط متخلخل با مدل فوشهایمر مدل‌سازی شد. معیار انتخاب نوع جریان در مدل‌سازی جریان سطحی، رینولدز مرزی بود. اگر رینولدز مرزی بزرگتر از ۷۵ باشد، جریان کاملاً آشفته است (Chanson, 2004)، در آزمایش‌های حاضر حداقل مقدار رینولدز مرزی، ۸۷ بود. بنابراین مدل‌سازی با جریان آشفته انجام شد.

در آزمایش‌های انجام شده محدودیت عمق کانال آزمایشگاهی وجود داشت و رهاسازی‌های شماره ۱ تا ۸ تحت تاثیر کف فلوم بودند. با توجه به این محدودیت در مدل‌سازی عددی عمق زیر لایه ۲۰ سانتی‌متر بیش‌تر از عمق زیر لایه رسوبی آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.



شکل ۵- ناحیه مدل‌سازی

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی

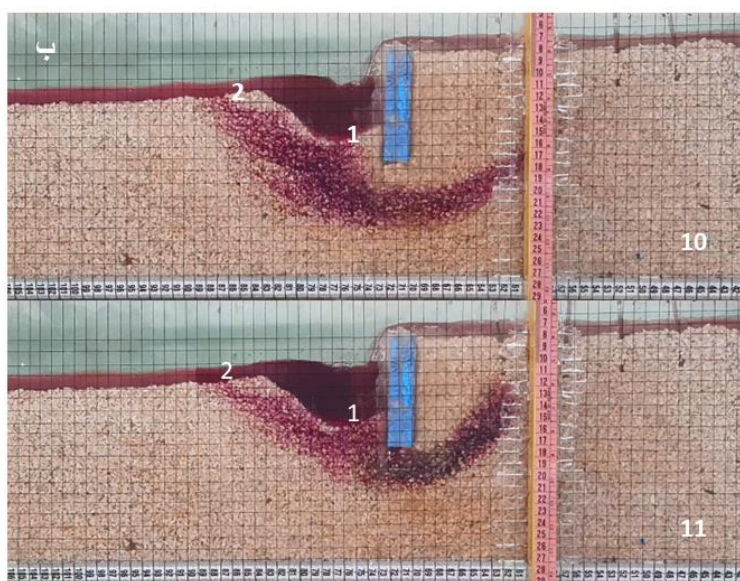
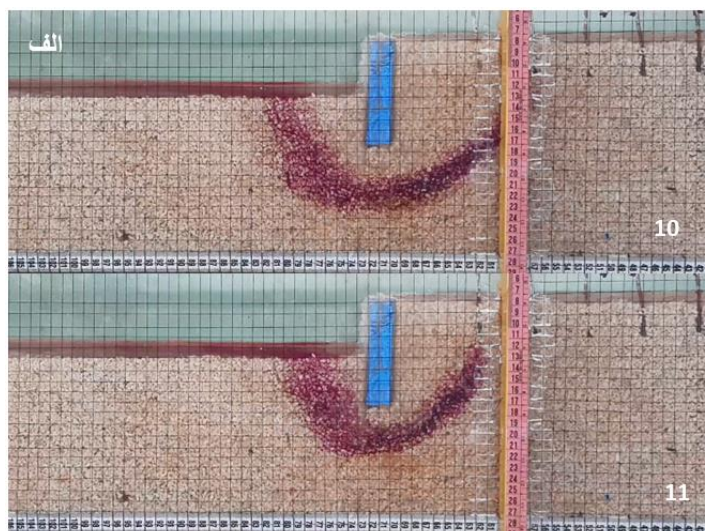
در شکل‌های ۶ تصاویر رهاسازی‌های انجام شده آزمایشگاهی برای دو حالت بدون حفره و با حفره آب‌سنگی ارائه شده است. همانطور که مشخص است جریان‌های تبدلی که از فواصل دورتر در حرکتند (رهاسازی شماره ۱۰)، طول مسیر جریان طولانی‌تر و عمق نفوذ بیشتری

۱ Forchheimer

۲ Discrete

۳ Finite volume

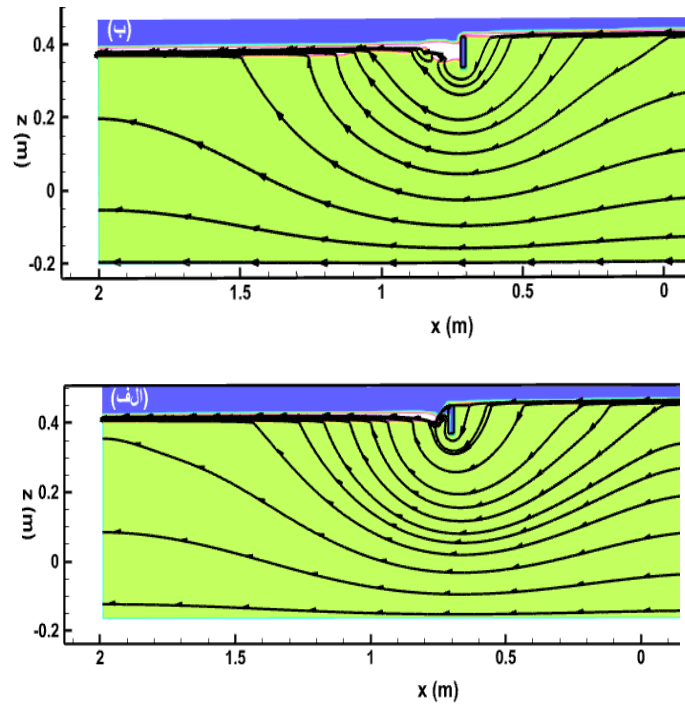
نسبت به جریان‌های تبدالی نزدیک سازه (رها سازی شماره ۱۱) دارند. جریان‌های تبدالی که از بالادست به سمت پایین دست در حرکتند با یک شاخه جریان به انتها رسیده و از محیط متخلخل خارج شدند (قسمت الف). با افزایش دبی جریان و شکل‌گیری حفره، جریان‌های تبدالی زمانی که به پایین دست می‌رسند به دو شاخه تقسیم می‌شوند و بخشی از جریان از محل حفره و بخشی از پایین دست خارج و به جریان سطحی می‌رود (قسمت ب).



شکل ۶- الگوی جریان مشاهده شده در آزمایش S₁، الف؛ Q₁، ب؛ Q₂

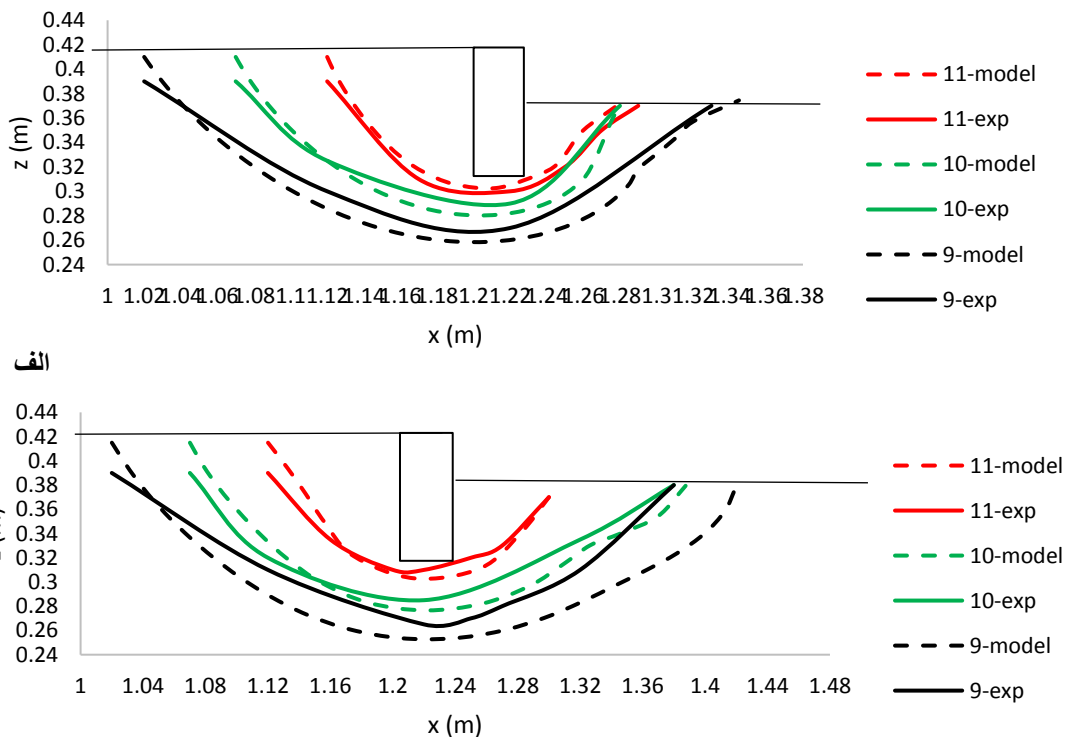
نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار Flow 3D

در شکل ۱۱ الگوی جریان تبدالی پیرامون S₁ نشان داده شده است. قسمت الف جریان تبدالی برای دبی اول شکل گرفته نشان داده شده است. همانطور که مشخص است الگوهای جریان تبدالی در اثر اختلاف تراز بالادست و پایین دست و جریان‌های تبدالی در زیر جت ریزشی که بصورت موضعی هستند، قابل مشاهده هست. در قسمت ب جریان تبدالی در حالتی که حفره آبستگی شکل گرفته است قابل مشاهده است. در این حالت تبدالات تبادل جریان سطحی و زیرسطحی پیرامون حفره قابل مشاهده است.



شکل ۷- الگوی جریان‌های تبدالی پیرامون S₁: الف؛ Q1، ب؛ Q2

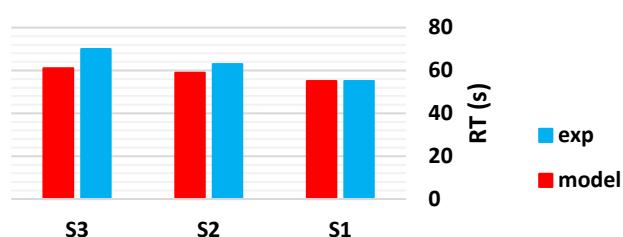
در شکل ۸ مقایسه بین طول مسیرهای جریان تبدالی آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده ارائه شده است. در این شکل سه رهاسازی ارائه شده است زیرا بدلیل محدودیت کانال آزمایشگاهی رهاسازی‌های دیگر تحت تأثیر کف فلوم بودند. برای دبی اول مسیر رهاسازی ۱۱ در دو حالت مدل‌سازی و بدست آمده از آزمایش تطابق خوبی دارد. برای رهاسازی‌های شماره ۹ و ۱۰ مسیرهای مدل‌سازی شده کمی عمقی‌تر هستند که این بدلیل محدودیت عمق کانال آزمایشگاهی است (شکل ، الف). برای دبی دوم نیز حالتی مشابه دبی اول مشاهده می‌شود و رهاسازی‌های دورتر (۹ و ۱۰) مدل‌سازی شده عمقی‌تر از رهاسازی‌های آزمایشگاهی هستند (شکل ، ب).



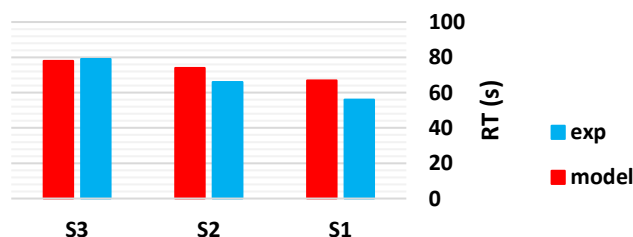
شکل ۸- نتایج طول مسیر برای S₁: الف؛ دبی اول؛ ب؛ دبی دوم

برای دبی اول، S1 زمان ماند کمتری نسبت به S2 و S3 دارد و S2 زمان ماند کمتری از S3 دارد. مقادیر زمان ماند مدلسازی شده (model) و بدست آمده از آزمایش‌ها (exp) برای S1 تقریباً یکسان و برای S2 و S3 مقدار بدست آمده از آزمایش کمی بیش‌تر است (شکل ۹، الف). برای دبی دوم، روند تغییرات زمان ماند با افزایش عمق پلکان مشابه دبی اول است. برای S1 و S2 زمان ماند بدست آمده از آزمایش کم‌تر از مقدار مدلسازی شده است و برای پلکان سوم تقریباً دو زمان ماند یکسان هستند (شکل ۹، ب). برای دبی سوم، زمان ماند S1 و S2 تقریباً مشابه است و S3 زمان ماند بیش‌تری دارد. برای S1 و S2 زمان ماند مدلسازی شده بیش‌تر از زمان ماند بدست آمده از آزمایش‌ها است و برای دبی سوم مقادیر نزدیک هستند (شکل ۹، ج). میانگین خطای مدلسازی برای زمان ماند تمامی حالات ۹ درصد است. زمان ماند S2، ۱۰ درصد بیش‌تر از زمان ماند S1 و زمان ماند S3، ۲۰ درصد بیش‌تر از زمان ماند S2 است. در مقایسه S1 و S3، زمان ماند S3، ۳۲ درصد بیش‌تر از زمان ماند S1 است.

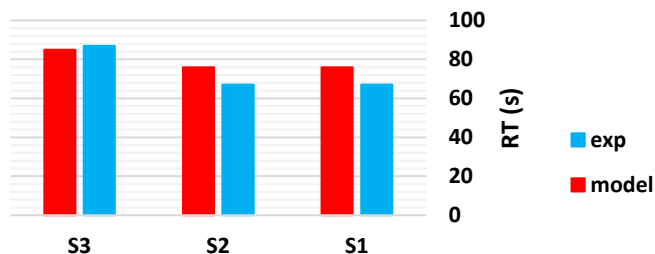
الف



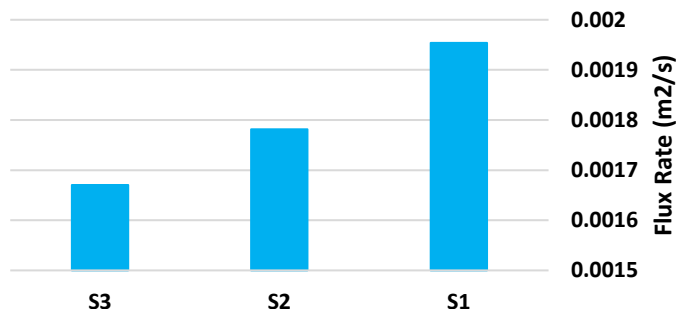
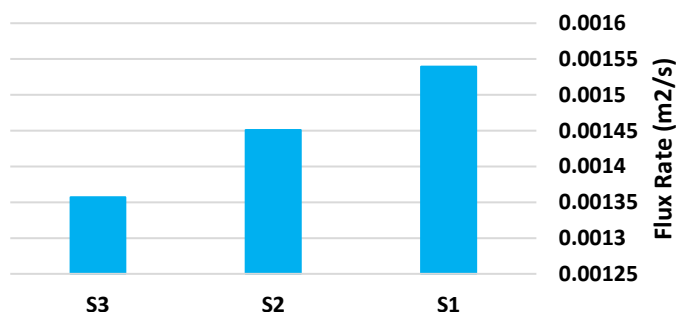
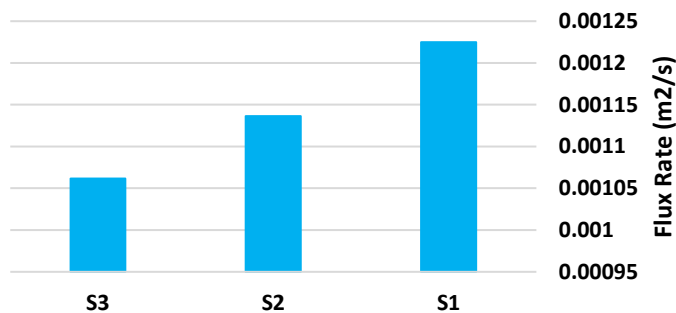
ب.



ج



شکل ۹- زمان ماند در حالات مختلف عمق نفوذ پلکان

الف

ب.

ج


شکل ۱۰- نرخ تبادل مدل سازی شده

برای دبی اول، با افزایش عمق نفوذ پلکان از S1 به S3 مقدار نرخ تبادل کاهش یافته است. با افزایش عمق نفوذ پلکان سرعت جریان طول مسیر تبادل و زمان ماند تبادل افزایش می‌یابند که این موجب کاهش نرخ تبادل می‌شود (شکل ۱۰، الف). برای دبی دوم و دبی سوم نیز روند مشابه با دبی اول را مشاهده می‌کنیم. با افزایش عمق نفوذ سازه از ۹ به ۱۱ سانتی‌متر، ۸ درصد و با افزایش عمق نفوذ سازه از ۱۱ به ۱۳ سانتی‌متر، ۷ درصد نرخ تبادل کاهش یافته است. مقدار دبی تبدالی با افزایش دبی جریان کاهش یافته است که علت آن افزایش زمان ماند و طول مسیر تبادل است. با افزایش دبی اول به دبی دوم، ۲۴ درصد و با افزایش دبی از دوم به سوم ۲۷ درصد نرخ تبادل کاهش یافته است (شکل ۱۰، ب و ج).

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی اثر عمق نفوذ سازه بر جریان تبدالی انجام شد و نتایج بدست آمده را در دو بخش زیر می‌توان خلاصه کرد:
 -افزایش عمق نفوذ سازه از ۹ به ۱۳ سانتی‌متر موجب کاهش ۱۵ درصدی نرخ تبادل و افزایش ۳۲ درصدی زمان ماند شد. در نتیجه،

می‌توانیم بکارگیری سازه با عمق نفوذ بیش‌تر را برای داشتن زمان ماند بیش‌تر و بکارگیری سازه با عمق نفوذ کم‌تر را برای داشتن نرخ تبادل بیش‌تر توصیه کرد.

-مدل فلوتریدی بخوبی توانست پدیده تبادل جریان سطحی و زیرسطحی را مدلسازی کند و خطای مدلسازی زمان ماند ۹ درصد بود. ولی نکته قابل توجه این است که این مدل زمان اجرای طولانی دارد و تعریف ذرات ردیاب در این مدل و خروجی گرفتن نتایج آن کاری فوق‌العاده زمان‌بر است. در نتیجه، توصیه می‌شود برای مدلسازی پدیده هایپریک از ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی جریان سطحی و مدل‌های آب‌های زیرزمینی استفاده شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran National Science Foundation: INSF) از پژوهش حاضر در قالب طرح با شماره ی 99023287 و عنوان "مطالعه ی اثرات بکارگیری سازه های در مسیر رودخانه همراه با اصلاح موضعی ضریب آبگذری بستر رودخانه بر مشخصات جریان هایپریک" تشکر می کنند.
"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Bakke, P.D., Hrachovec, M., Lynch, K. D. (2020). Hyporheic process restoration: design and performance of an engineered streambed. *Water*, 12(2), 425; doi.org/10.3390/w12020425.
- Boano, F., Harvey, J. W., Marion, A., Packman, A. I., Revelli, R., Ridolfi, L., Wörman, A. (2014). Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 603-679.
- Boulton, A. J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E. H., Valett, H. M. (1998). The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 59-81.
- Boulton, A. J., T. Datry, T. Kasahara, M. Mutz, and J. A. Stanford (2010), Ecology and management of the hyporheic zone: Stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 29(1), 26- 40.
- Cardenas, M. B., Wilson, J. L. (2007). Effects of current-bed form induced fluid flow on the thermal regime of sediments. *Water Resources Research*, 43, W08431, doi:10.1029/2006WR005343.
- Chanson, H., 2004. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures. Second Edition.
- Daniluk, T.L., Lautz, L.K., Gordon, R.P., Endreny, T.A. (2013). Surface water-groundwater interaction at restored streams and associated reference reaches. *Hydrol. Processes* 27(25), 3730-3746. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9501>.
- Endreny, T., Lautz, L., Siegel, D.I. (2011, a). Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: flume and hydrodynamic models. *Water Resource. Res.* 47 (2) n/a. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008631>.
- Endreny, T., Lautz, L., Siegel, D.I. (2011, b). Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: Hydrostatic model simulations, *Water Resources Research*, VOL. 47, W02518, doi:10.1029/2010WR010014.
- FLOW-3D Documentation. (2012). Flow Science, Inc.
- Gordon, R.P., Lautz, L.K., Daniluk, T.L. (2013). Spatial patterns of hyporheic exchange and biogeochemical cycling around cross-vane restoration structures: Implications for stream restoration design. *Water Resources Research*, VOL. 49, 2040-2055, doi:10.1002/wrcr.20185.
- 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.
- Hester, E. T., Doyle, M. W. (2008). In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange. *Water Resources Research*, 44, W03417, doi:10.1029/2006WR005810.
- Hester, E.T., Gooseff, M.N. (2011). Hyporheic Restoration in Streams and Rivers. In: Simon, A., Bennett, S.J., Castro, J.M. (Eds.), *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools*. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Hester, E.T., Hammond, B., Scott, D.T. (2016). Effects of inset floodplains and hyporheic exchange induced by in-stream structures on nitrate removal in a headwater stream. *Ecol. Eng.* 97, 452-464.



- Hester, E.T., Brooks, K.E., Scott, D.T. (2018). Comparing reach scale hyporheic exchange and denitrification induced by instream restoration structures and natural streambed morphology. *Ecological Engineering*, 115, 105–121.
- Kasahara, T., Hill, A.R. (2006). Effects of riffle-step restoration on hyporheic zone chemistry in N-rich lowland streams, *Can. J. Fisheries Aquat. Sci.*, 63(1), 120–133, doi: 10.1139/f05-199.
- Kaushal, S.S., Groffman, P.M., Mayer, P.M., Striz, E., Gold, A.J. (2008). Effects of stream restoration on denitrification in an urbanizing watershed. *Ecol. Appl.* 18 (3), 789–804.
- Krause, S., Klaar, M.J., Hannah, D.M., Mant, J., Bridgeman, J., Trimmer, M. and Manning-Jones, S. (2014). The potential of large woody debris to alter biogeochemical processes and ecosystem services in lowland rivers. *WIREs Water* 2014, 1:263–275. doi: 10.1002/wat2.1019.
- Lautz, L. K., & Fanelli, R. M. (2008). Seasonal biogeochemical hotspots in the streambed around restoration structures, *Biogeochemistry*, 91(1), 85-104.
- Orghidan, T. (1959). Ein neuer Lebensraum des unterirdischen Wassers: Der hyporheische Biotop, *Archiv für Hydrobiologie*. 55, 392–414.
- Peter, K.T., Herzog, S., Tian, Z., Wu, Ch., McCray, J.E., Lynch, K., Kolodziej, E.P., (2019). Evaluating emerging organic contaminant removal in an engineered hyporheic zone using high resolution mass spectrometry. *Water research*, 150, 140-152.
- Smidt, S.J., (2014). A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree in Geoscience in the Graduate College of The University of Iowa.
- Stanford, J.A., Lorang, M.S., and Hauer, F.R. (2005). The shifting habitat mosaic of river ecosystems. *Travaux association internationale de Limnologie theorique et appliquee*, 29, 123–136.
- Stanford, J.A. (2006). Landscapes and rivers capes. In *Methods in Stream Ecology*. 2nd edn. Hauer R. Lamberti GA (eds). Academic Press, Burlington, MA, USA, 3–21.
- Tonina, D. (2005). Interaction between river morphology and intra-gravel flow paths within the hyporheic zone. Unpublished Ph.D. dissertation. University of Idaho. Boise. ID, 129 pp.
- Tonina, D., & Buffington, J. M. (2007). Hyporheic exchange in gravel bed-rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling. *Water Resources Research*, 43(1), 1–16 .
- Tonina, D., and Buffington, J.M. (2009,a). A three-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66, 2157–2173.
- Tonina, D., Buffington, J.M., (2009,b). Hyporheic Exchange in Mountain Rivers I: Mechanics and Environmental Effects. *Geography Compass* 3/3, 1063–1086.
- Tuttle, A.K., McMillan, S.K., Gardner, A., Jennings, G.D., (2014). Channel complexity and nitrate concentrations drive denitrification rates in urban restored and unrestored streams. *Ecological Engineering*, 73, 770–777. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.066>.
- Vaux, W.G. (1968). Intragravel flow and interchange of water in a streambed. *United States Fish Wildl. Serv. Fishery Bull.* 66 (3), 479–489.
- Zhou, T. (2012). Characterizing hydrodynamics and hyporheic impacts of river restoration structures. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Doctor of Philosophy Degree State University of New York College of Environmental Science and Forestry Syracuse, New York.
- Zhou, T., Endreny, T. a. (2013). Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: Flume and hydrodynamic experiments. *Water Resources Research*, 49(8), 5009–5020.