

Simulation of The Effect of Dune Lee Slope on Hyporheic Flow Characteristics

Zahra Mohammadi¹, Amir Ahmad Dehghani^{2*}, Neshat Movahedi³

1- MSc Student, Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan.

2- Professor, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan.

3- PhD in Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan.

* a.dehghani@gau.ac.ir

Received: 3 March 2023
Accepted: 27 August 2023
Discussion: 22 September 2024



J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Rivers are complex systems, where different chemical, biological, and physical processes occur. When the flow moves along the river, there is an exchange between the surface flow and the subsurface flow. The hyporheic zone is a saturation zone below the riverbed, which plays an important role in many biological and chemical processes. Residence time is the most important characteristic of the hyporheic zone. Because the chemical and biological reactions that occur inside the sediments depend on the time at which flow paths remain in the bed for a while and then return back to the surface flow. Hyporheic exchange is the mixing of surface and subsurface flow just beneath the river bed. Such exchanges can be caused by the presence of different bedforms in the river. Dunes are one type of river bed that can be observed in straight, meander, and braided rivers. The pressure gradient between the upstream and downstream of a dune leads to hyporheic exchanges. The wavelength, amplitude, and slope of the lee side and stoss side can affect the rate of exchanges. In the present study, the effect of the dune lee side slope at angles of 10, 20, and 30 degrees on the characteristic of the hyporheic zone (i.e., residence time, exchange flow, and hyporheic depth) has been investigated numerically.

Methodology: The FLOW3D software is used for the numerical simulation of surface flow. The simulation domain consists of a flume with 2.7m length, 0.1m width, and 0.3m height. The model running time was 120 seconds for surface flow simulation, which, with the passing of this time, the flow in the channel becomes stable. The pressures along dunes are introduced as a Dirichlet boundary condition on top of the groundwater model, i.e., MODFLOW. Then, the effect of the dune lee side slope at angles of 10, 20, and 30 degrees on the characteristic of the hyporheic zone (i.e., residence time, exchange flow, and hyporheic depth) has been studied.

Results and Discussion: The results show that the maximum and minimum pressure respectively occurred on the stoss side and the crest of the dune. By increasing the dune lee side slope, the distance between the maximum and minimum pressure is reduced, the depth of hyporheic exchange decreases, and the exchange rate and residence time increase. Also, for all three angles, with a constant ratio of the subsurface to surface flow, the depth of

hyporheic exchange increases with the increase of the hydraulic conductivity to the dune length ratio (K/A). Increasing the velocity of the subsurface flow causes the subsurface flow to dominate the surface flow and the flow in the subsurface flow moves towards the surface flow. As a result, by increasing the ratio of subsurface flow velocity to surface flow velocity, the exchange flow increases, and the depth of hyporheic exchange decreases.

Conclusion: The results show that as the lee side slope increases, the residence time, and exchange flow increase, and hyporheic depth decreases. Also, by increasing the hydraulic conductivity, the hyporheic exchange depth increases, but by increasing the subsurface flow velocity and the porous media thickness, the hyporheic exchange depth decreases.

Keywords: Dune, Hyporheic zone, Exchange flow, Numerical Simulation, Residence time.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

شبیه‌سازی اثر شیب وجه پائین‌رونده تلماسه بر مشخصات ناحیه هایپرک


زهرا محمدی^۱، امیراحمد دهقانی^{۲*}، نشاط موحدی^۳

۱- دانشجوی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

* a.dehghani@gau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: رودخانه‌ها، سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که انواع فرایندهای شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی در آنها رخ می‌دهد. تبادل هایپرک عبارت است از اختلاط جریان سطحی و جریان زیرسطحی در محیط متخلخلی که زیر و اطراف مجاری گذر آب را احاطه کرده است. چنین تبادلاتی می‌تواند بر اثر وجود فرم‌های مختلف بستر در رودخانه ایجاد شود. تلماسه‌ها از انواع شکل بستر رودخانه هستند که در رودخانه‌های مستقیم، ماریچی و شریانی یافت می‌شود. اختلاف فشار دو طرف تلماسه به ایجاد تبادلات هایپرک منجر می‌شود که طول موج، دامنه و شیب وجه‌های پائین‌رونده و بالارونده آن می‌تواند بر میزان تبادلات هایپرک تأثیرگذار باشد. در این تحقیق به بررسی اثر شیب پائین‌دست تلماسه در زوایای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، بر روی مشخصات ناحیه هایپرک (شامل زمان ماند، دبی تبادلی و عمق نفوذپذیری هایپرک)، پرداخته شده است. همچنین تأثیر هدایت هیدرولیکی، سرعت جریان زیرسطحی و ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادلات هایپرک مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی عددی جریان سطحی از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شد، شبیه‌سازی شامل بازه‌ای از یک کانال به طول ۲/۷ متر، عرض ۰/۱ متر و ارتفاع ۰/۳ متر می‌باشد. پس از حل جریان سطحی، فشارهای روی سطح فرم بستر بعنوان شرط مرزی دریکله به مدل آب زیرزمینی MODFLOW معرفی شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شیب، زمان ماندگاری و دبی تبادلی افزایش و عمق تبادلات هایپرک کاهش یافته است. همچنین با افزایش هدایت هیدرولیکی عمق تبادلات هایپرک افزایش ولی با افزایش سرعت جریان زیرسطحی و ضخامت بستر رسوبی عمق تبادلات هایپرک کاهش پیدا می‌کند.

کلیدواژگان: تلماسه، ناحیه هایپرک، دبی تبادلی، شبیه‌سازی عددی، زمان ماند.

۱- مقدمه

رودخانه از بین رسوب‌های زیر بستر رودخانه عبور کند و دوباره به سطح باز گردد، به عنوان زمان ماند^۲، تعریف می‌شود. زمان ماند مهم‌ترین ویژگی ناحیه هایپرک است. زیرا واکنش‌های شیمیایی و زیستی (بیولوژیکی) که درون رسوب‌ها رخ می‌دهد، به زمانی بستگی دارد که جریان رودخانه در ارتباط با محیط زیر رودخانه است (Tonina & Buffington, 2009). اختلاط هایپرک به صورت متناوب از جریان‌های رو به پایین^۳ به درون بستر متخلخل و

هنگامی که جریان در مسیر رودخانه حرکت می‌کند، تبادلی بین جریان رودخانه و بستر زیر آن بوجود می‌آید. ناحیه‌ی هایپرک^۱ به ناحیه اشباع زیر بستر رودخانه گفته می‌شود، که رایج‌ترین شامل بخشی از جریان رودخانه بوده که به درون بستر نفوذ کرده و دوباره به جریان سطحی باز می‌گردد و نقش مهمی در بوم‌شناسی (اکولوژی) موجودهای زنده دارد. زمانی که طول می‌کشد تا جریان

2 Residence time
3 Downwelling

1 Hyporheic zone

همزمان با آغاز حرکت ذرات بستر در رودخانه‌ها، شکل‌های مختلف بستر تشکیل می‌شوند. از شکل‌های بستر در رودخانه‌های آبرفتی، بسترهای متحرک پوشیده از شکنج‌ها و تلماسه‌ها است (Best, 1993). Packman et al. (2004) به بررسی آزمایشگاهی تبادل مواد محلول در ناحیه هایپریک در دو شرایط بستر صاف و شکل بستر دیون پرداختند. نتایج آنان نشان داد حتی در حالت بستر صاف نیز، بدلیل تبادل آشفتگی بین جریان سطحی و زیر سطحی، نرخ تبادل بالاست و وجود شکل بستر باعث افزایش ۳ تا ۶ برابری تبادل در مقایسه با بستر صاف می‌شود. Cardenas and Wilson. (2007) تبادل‌های هایپریک را در شکل بستر تلماسه دو بعدی به‌طور عددی بررسی کردند. در تحقیق آنان، فشار به دست آمده از حل مدل جریان سطحی در سطح تماس جریان سطحی و بستر رسوبی، به‌عنوان شرط مرزی دریکله^۶، در مرز بالا برای حل مدل جریان زیرسطحی قرار گرفت. تأثیر اعداد رینولدز مختلف و هندسه‌های متفاوت شکل بستر بر مشخصه‌های ناحیه هایپریک بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد با افزایش نسبت دامنه به طول موج، عمق تبادل‌های هایپریک کاهش می‌یابد. همچنین در رینولدز ثابت با افزایش نسبت دامنه به طول موج، دبی تبادل‌های^۷ هایپریک کاهش پیدا می‌کند. Fox et al. (2014) به بررسی تأثیر شارهای تخلیه و یا تغذیه آب سطحی و آب زیرزمینی بر تبادل‌های هایپریک در حضور شکل بستر تلماسه پرداختند. در این تحقیق تغییرپذیری‌های غلظت سدیم کلرید (به‌عنوان ردیاب) نسبت به زمان به منظور تعیین نرخ تبادل‌های هایپریک استفاده شد. نتایج آنان نشان داد با افزایش این جریان (شاره) تخلیه یا تغذیه، دبی تبادل‌های هایپریک کاهش می‌یابد. Bolois et al. (2014) آزمایش‌هایی را در آبراه‌ای به طول ۴/۸ متر، عرض ۰/۳۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام دادند. آنان با استفاده از روش تصویر برداری از ذرات به بررسی میدان جریان در حضور شکل بستر پرداختند. بستر رسوبی از شش لایه کره یکنواخت با اندازه ذرات ۰/۰۳۸ متر تشکیل شده بود. در

بازگشت دوباره به جریان سطحی که رو به بالا^۱ است رُخ دهد. مقیاس زمانی و مکانی اختلاط هایپریک به گستره منطقه هایپریک بستگی دارد که ممکن است محدود یا محصور در رودخانه‌های کوچک محدود شده به دامنه‌های کوه باشد و یا وسیع و نامحدود در سیلاب‌دشت‌ها باشد. همچنین گستره این منطقه‌ها می‌تواند به طور فصلی تغییر کند (Magliozzi et al., 2017). تبادل‌های هایپریک در پیوند زمین ریخت‌شناسی (ژئومورفولوژی) رودخانه‌ای، آب‌های زیرزمینی و زیستگاه رودخانه برای موجودهای آبی و زیرزمینی دارای اهمیت بوده و در چند دهه‌ی اخیر به عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم حفاظت، مدیریت و احیاء بوم سامانه (اکوسیستم) رودخانه‌ای در نظر گرفته شده است (Edwards, 1998). عوامل مختلفی بر روی تبادل‌های هایپریک در رودخانه‌ها مؤثر هستند که از جمله آنها می‌توان به ویژگی‌های آب زمین شناختی (هیدروژئولوژیکال)، بوم‌شناسی رودخانه و ریخت‌شناسی آن اشاره کرد (Magliozzi et al., 2017). تحقیقات گذشته نشان داده است که شکل بسترها و شکل‌های ریخت‌شناسی در بستر رودخانه بیشترین تأثیر را بر تبادل‌های هایپریک دارند. چنین تبادل‌هایی می‌تواند بر اثر وجود شکل‌های مختلف بستر در رودخانه ایجاد شود. انواع شکل‌های بستری که به طور معمول شناخته شده‌اند، عبارت‌اند از تلماسه^۲، تلماسه-شکنج^۳، خیزاب‌گوداب^۴، پله-گوداب^۵، که هر یک ویژگی‌های مخصوص به خود از نظر هندسه، توزیع دانه‌بندی و شیب طولی آبراهه را دارند. تلماسه‌ها در رودخانه‌های مستقیم، مارپیچی و شاخه‌ای یافت می‌شود. اختلاف فشار دو طرف تلماسه منجر به ایجاد تبادل‌های هایپریک می‌شود که طول موج و دامنه آن می‌تواند بر میزان این تبادل‌ها تأثیرگذار باشد (Biddulph, 2015).

بررسی‌های هایپریک تحت تأثیر شکل بستر در دهه اخیر بسیار مورد توجه بوده است و تحقیقات زیادی در قالب بررسی‌های آزمایشگاهی، میدانی و عددی انجام شده است.

- 1 Upwelling
- 2 Dune
- 3 Dune- Ripples
- 4 Riffle-pool sequences
- 5 Step- Riffle

6 Dirichlet
7 Exchange flow

مستقیمی با دبی تبادل‌های هایپرریک دارد، در حالی که با عمق آب رابطه معکوس دارد. سرعت و عمق آب اثرگذاری‌های بیشتری بر روی دبی تبدالی از خود نشان دادند، در حالی که نفوذپذیری، ضریب انتشار ذرات و تخلخل ذرات بستر اثرهای متوسط و طول موج اثرهای اندکی بر روی دبی تبادل‌های هایپرریک نشان دادند. Movahedi et al. (2020) به بررسی آزمایشگاهی تبادل‌های هایپرریک در حضور شکل بستر خیزاب-گوداب دو بُعدی و سه بُعدی پرداختند. آنان گرادیان‌های فشار در پیرامون شکل بستر رودخانه‌ها را از جمله عامل‌های موثر بر تبادل‌های هایپرریک دانستند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نزدیک به ۵۰ درصدی ارتفاع شکل بستر، دبی تبادل‌های هایپرریک در حالت‌های دو بُعدی و سه بُعدی ۲۶ درصد افزایش و زمان ماند در مدل دو بُعدی ۳۶ درصد و در مدل سه بُعدی نیز ۴۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. Kwoll et al. (2016) به بررسی آزمایشگاهی تأثیرشیب وجه پائین‌رونده شکل بستر تلماسه بر ساختار جریان و مقاومت در برابر جریان پرداختند. در این تحقیق آزمایشگاهی، با تغییر شیب وجه پائین‌رونده تلماسه (در زاویه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه)، با ثابت نگه‌داشتن دیگر فراسنجه هندسی و هیدرولیکی، به بررسی تأثیرهای آشفتگی و مقاومت در برابر جریان پرداختند. نتایج بررسی آنان نشان داد که با افزایش شیب پائین‌رونده تلماسه، مقدار تنش وارد بر این شکل بستر افزایش پیدا می‌کند. در رینولدزهای متوسط تنش به طور خطی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش زاویه سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد.

همان گونه که پیشینه‌های تحقیق نشان می‌دهد بیشتر بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته در زمینه تبادل‌های هایپرریک، بر شکل بستر تلماسه متمرکز بوده ولی تأثیر شیب وجه پائین‌دست^۳ تلماسه در این ارزیابی‌ها بررسی نشده است. بنابراین، در این تحقیق به طور عددی اثر شیب پائین‌دست تلماسه، با ثابت نگه‌داشتن دیگر فراسنجه‌های هندسی و هیدرولیکی بر روی دبی تبدالی، زمان ماند و عمق نفوذپذیری هایپرریک بررسی شده است.

این تحقیق چهار حالت مختلف شامل شکل بستر نفوذناپذیر بر روی بستر نفوذناپذیر نرم، شکل بستر نفوذناپذیر بر روی بستر نفوذناپذیر نرم، شکل بستر نفوذناپذیر بر روی بستر نفوذناپذیر زبر و شکل بستر نفوذناپذیر بر روی بستر نفوذناپذیر بررسی شد. نتایج آنان نشان داد که جریان در یک شکل بستر نفوذناپذیر به کلی متفاوت از بستر نفوذناپذیر می‌باشد، به‌ویژه در وجه پائین‌رونده شکل بستر. آنان به این نتیجه رسیدند بررسی‌های شبیه‌سازی تبادل‌های هایپرریک که وابسته به توزیع فشار ناشی از شبیه‌سازی در امتداد بستر نفوذناپذیر است، ممکن است نتواند پیش‌بینی واقع بینانه‌ای از ماهیت تبادل‌های هایپرریک در شکل بسترها ارائه دهد. همچنین Chen et al. (2015) به بررسی عددی جریان‌های هایپرریک در شکل بستر تلماسه پرداخته و ویژگی‌های این ناحیه را در دو حالت دو بُعدی و سه بُعدی مقایسه کردند. آنان از مدل فلونت^۱ با مدل آشفتگی k-w برای مدلسازی جریان سطحی و از مدل آب زیرزمینی کامسول^۲ برای مدلسازی محیط متخلخل استفاده کردند. بدین صورت که در آغاز جریان سطحی را با در نظر گرفتن شرط دیوار در سطح تلماسه، با فلونت مدل کرده و فشارهای به‌دست آمده را به‌عنوان شرط مرزی دریکله بر روی مدل آب زیرزمینی قرار دادند. در تحقیق آنان میانگین دامنه شکل بستر سه بُعدی به‌عنوان دامنه شکل بستر دو بُعدی در نظر گرفته شده بود. نتایج آنان نشان داد در رینولدزهای بالا، دبی تبادل‌های هایپرریک در حالت تلماسه سه بُعدی بیشتر از دو بُعدی بوده و زمان ماندگاری تا حدودی در هر دو حالت یکسان خواهد بود. Ren et al. (2019) به تجزیه و تحلیل عامل‌های موثر بر تبادل‌های هایپرریک بر مبنای مدل‌سازی عددی پرداختند. در این تحقیق تأثیر عامل‌هایی مانند سرعت، عمق آب، ارتفاع موج تلماسه و نفوذپذیری بستر بر تبادل‌های هایپرریک بررسی شد. مدل ریاضی زیرسطحی به شکل دو بُعدی و بر مبنای معادله RANS، مدل آشفتگی K-W و حالت پایدار مدل آب زیرزمینی ارائه شد. نتایج بررسی آنان نشان داد که سرعت، زمان و نفوذپذیری رابطه

1 Fluent
2 Comsol

3 Lee side

شبکه از مانند بیشینه نسبت ابعاد شبکه^۱ در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه^۲ در راستاهای مختلف و در مجاورت یکدیگر مناسب انتخاب شده باشد. در این تحقیق اندازه مش‌بندی پس از انجام آزمون استقلال از مش، در راستای طولی و عرضی ۲ میلی‌متر انتخاب شد. شرایط مرزی مدل نیز در جدول ۱ معرفی شده است. نکته دیگری که در شبیه‌سازی‌های عددی بسیار مهم است، زمان اجرای مدل تا رسیدن به یک مقدار مناسب از لحاظ پایداری و همگرایی می‌باشد. در همه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، شرایط بالا پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه از مدلسازی برآورده شد.

۲-۲- شبیه‌سازی جریان زیرسطحی

پس از حل جریان سطحی، تراز هیدرولیکی روی سطح شکل بستر به عنوان شرایط مرز دریکله به مدل آب زیرزمینی معرفی شد و سپس تأثیر این تغییر زاویه بر روی زمان ماند، دبی تبدالی و بیشینه عمق تبادل‌های هاپریک بررسی شد. برای شبیه‌سازی جریان هاپریک، مدل‌های آب زیرزمینی به کار برده می‌شود که در این تحقیق از نرم‌افزار مدل‌سازی آب زیرزمینی MODFLOW استفاده شد. برای حل جریان محیط متخلخل زیرین، دو دسته معادله داری و پیوستگی در امتداد بستر کوپل می‌شوند. هر شبیه‌سازی شامل بازه‌ای از یک آبراهه به طول ۲/۷ متر و عرض ۰/۱ متر است. شرایط اعمال شده مدل نیز در جدول ۲ معرفی شده است.

برای ایجاد هندسه‌ی مدل، اندازه مش در راستای طولی به اندازه ۰/۰۰۲، عرضی ۰/۰۱ متر و در راستای عمق بستر رسوبی با توجه به افزایش ضخامت رسوب شمار لایه‌های انتخاب شده افزایش داده شد. برای حل معادله‌ها جریان در محیط متخلخل، به شرایط مرزی مناسب نیاز است. شرایط مرزی که باید روی هر مرز اعمال شود، در واقع معرف شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار ثابت یا داشتن یک گرادیان در آن مرز است. در این تحقیق، شرایط مرزی بالا، و همچنین مرزهای بالادست و

همچنین تأثیر هدایت هیدرولیکی، سرعت جریان زیرسطحی و ضخامت بستر رسوبی نیز بر عمق تبادل‌های هاپریک شبیه‌سازی شده است. زاویه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای شیب پائین‌رونده تلماسه در نظر گرفته شده است که مشخصه تلماسه‌هایی می‌باشند که در طبیعت یافت می‌شوند و به منظور بررسی تأثیرهای آشفتگی و مقاومت در برابر جریان آنها پرداختند. Kwoll et al. (2016). بدین منظور مدل آزمایشگاهی Kwoll et al. (2016) مبنای شبیه‌سازی عددی جریان سطحی با استفاده از مدل Flow3D قرار می‌گیرد. پس از حل جریان سطحی، فشار روی سطح شکل بستر به عنوان شرایط مرز دریکله به مدل آب زیرزمینی معرفی شده و جریان زیرسطحی شبیه‌سازی می‌شود و سپس مشخصه‌های ناحیه هاپریک محاسبه می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در پروژه‌های احیاء رودخانه استفاده شود. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان خودپالائی یک رودخانه را در جذب و کاهش آلاینده‌ها با توجه به زمان ماند آن در درون بستر تعیین کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی جریان سطحی

به منظور شبیه‌سازی عددی جریان سطحی از نرم افزار FLOW 3D استفاده شد. این نرم افزار قابلیت تحلیل دو بُعدی و سه بُعدی میدان جریان را به صورت حجم محدود دارد. مدل آشفتگی به کار رفته شده در این تحقیق مدل $k-\epsilon$ RNG می‌باشد.

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی شامل بازه‌ای از یک آبراهه به طول ۲/۷ متر، عرض ۰/۱ متر و ارتفاع ۰/۳ متر است. یکی از مهم‌ترین نکاتی که بایستی در شبیه‌سازی عددی مورد توجه قرار گیرد، شبکه‌بندی مناسب برای حل دقیق معادله‌های حاکم است. ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادله‌های، دقت محاسبه‌ها، همگرایی و زمان محاسبه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در همه مدل‌های عددی، ابعاد شبکه طوری تعیین شد که فراسنجه کنترل

1 Maximum Aspect Ratio

2 Maximum Adjacent Cell Size Ratio

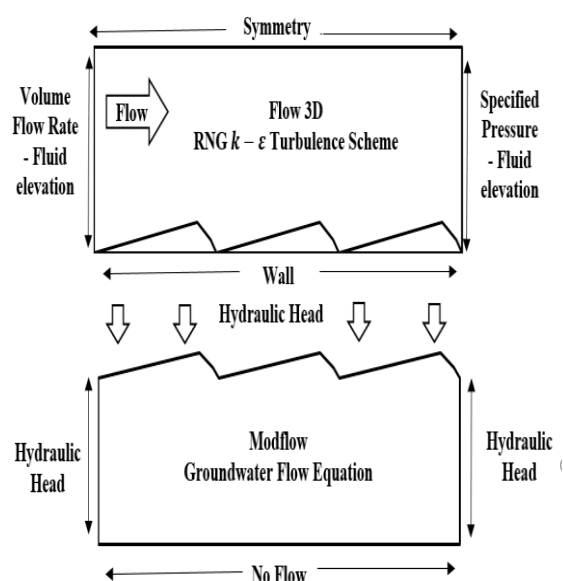


Fig. 1 Two-dimensional flume model and boundary condition.

شکل ۱ مدل دو بُعدی آبراهه و شرایط مرزی.

جریان سطحی وارد محیط متخلخل زیرین می‌شود و دوباره پس از طی مسیری در محیط متخلخل از سطح تماس مشترک آب و رسوب وارد جریان سطحی می‌شود، با استفاده از نرم‌افزار Plot digitizer محاسبه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل‌سازی جریان سطحی

همان‌طور که بیان شد، شبیه‌سازی جریان سطحی در نرم‌افزار FLOW3D صورت گرفته است. به منظور کنترل همگرایی شبیه‌سازی، مقادیر سرعت و فشار در نقطه‌ها مختلف میدان حل نسبت به زمان بررسی شد. برای مثال در شکل ۲ نتایج همگرایی سرعت و فشار، برای هر سه زاویه تلماسه در نقطه‌ای از میدان حل ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با گذشت ۱۲۰ ثانیه حل همگرا شده است.

برای واسنجی (کالیبراسیون) مدل از نتایج بررسی‌های Kwoll et al. (2016) استفاده شد که در شکل ۳ و ۴ نتایج توزیع سرعت در راستای جریان و سرعت در راستای عمق در این پژوهش و بررسی بالا مقایسه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود با زاویه وجه پایین دست دیون، منطقه جدا شدگی بزرگتر و به کف نزدیک شده است که با نتایج Kwoll et al. (2016) همخوانی دارد.

پائین‌دست دارای بار (هد) هیدرولیکی که از مدل سطحی استخراج شده و شرایط مرزی کف هم شرایط بدون جریان (no flow) می‌باشد (شکل ۱). پس از اجرای مدل جریان زیرسطحی با استفاده از مدل آب زیرزمینی MODFLOW، ماژول MODPATH به منظور استفاده از روش فنی (تکنیک) ردیابی ذرات برای تعیین مشخصه‌های ناحیه‌های پریک فعال شد.

مهم‌ترین مشخصه‌های ناحیه‌های پریک، شامل دبی تبدلی، زمان ماند جریان و بیشینه عمق هاپریک می‌باشد. زمان تبادل جریان هاپریک یا زمان ماندگاری مدت زمانی است که طول می‌کشد تا جریان رودخانه از بین رسوب‌های زیر بستر رودخانه عبور کند و دوباره به سطح باز گردد. زمان ماند مهم‌ترین مشخصه ناحیه هاپریک است. زیرا واکنش‌های شیمیایی و زیستی (بیولوژیکی) که درون رسوب‌ها رخ می‌دهد، به زمان بستگی دارد که جریان رودخانه در ارتباط با محیط زیر رودخانه است. دبی تبدلی نیز با توجه به سرعت نفوذ ذرات به درون بستر و زمان ماند آن تعیین شده است. بیشینه عمق تبادل‌های هاپریک نیز با توجه به فاصله بین نسبت تاج تلماسه و آخرین خط جریانی که از ناحیه پایین رونده و از سمت

جدول ۱ شرایط مرزی اعمال شده در مدل جریان سطحی.

Table 1 boundary condition applied in the surface flow model.

Xmin	Xmax	Ymin,max	Zmin	Zmax
Volume Flow Rate - Fluid elevation	Specified Pressure - Fluid elevation	Symmetry	Wall	Symmetry

جدول ۲ شرایط اعمال شده در مدل جریان زیرسطحی.

Table 2 boundary condition applied in the subsurface flow model.

Qsub (m ³ /s)	K (m ²)	Usub (m/s)	A (m)	H (m)
0.00005146	1E-8	0.00067	0.903009	0.4
0.0000628	1E-9	0.00089	0.905222	0.6
0.00009052	1E-10	0.0013	0.907582	0.8
0.00010044		0.0015		
0.0001178				
0.00013392				
0.0001488				

جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج مربوط به حالتی است که هدایت هیدرولیکی برابر $K=1E-8$ متر مربع، ضخامت بستر $0/8$ متر و سرعت جریان زیرسطحی $0/015$ متر بر ثانیه می‌باشد. در شکل ۶ الگوی جریان زیرسطحی برای سه زاویه 10° ، 20° و 30° درجه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به اینکه بیشینه و کمینه فشار به

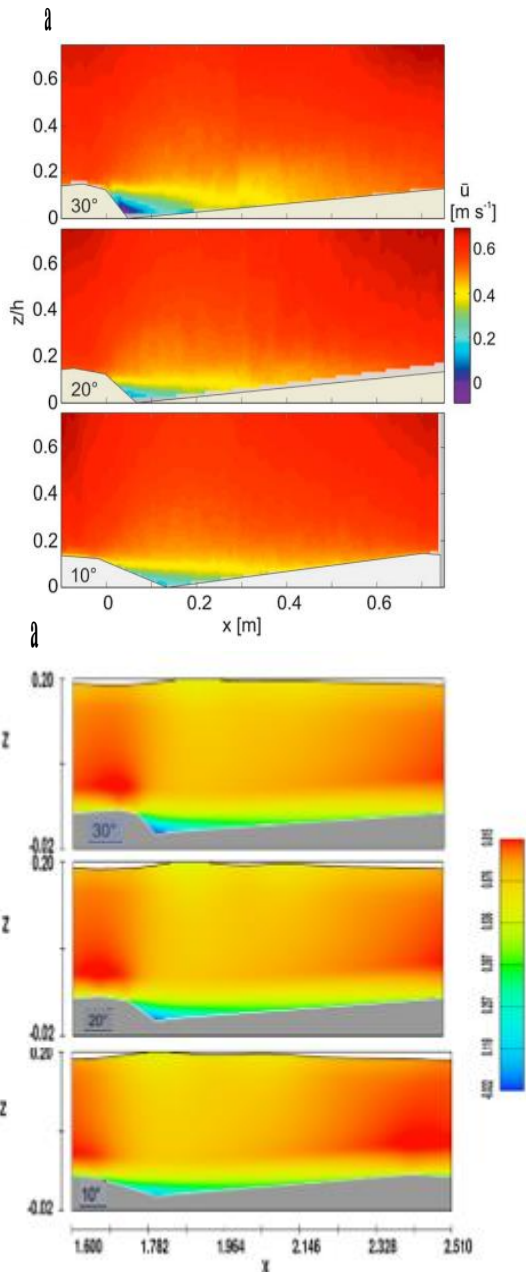


Fig. 3 The results of the instream velocity contour (u) for three angles (a) the study of Kwoil et al. (2016) (b) the results of the current research.

شکل ۳ نتایج خطوط هم سرعت در جهت جریان (U) برای سه زاویه (a) بررسی‌های Kwoil et al. (2016)، (b) نتایج این تحقیق.

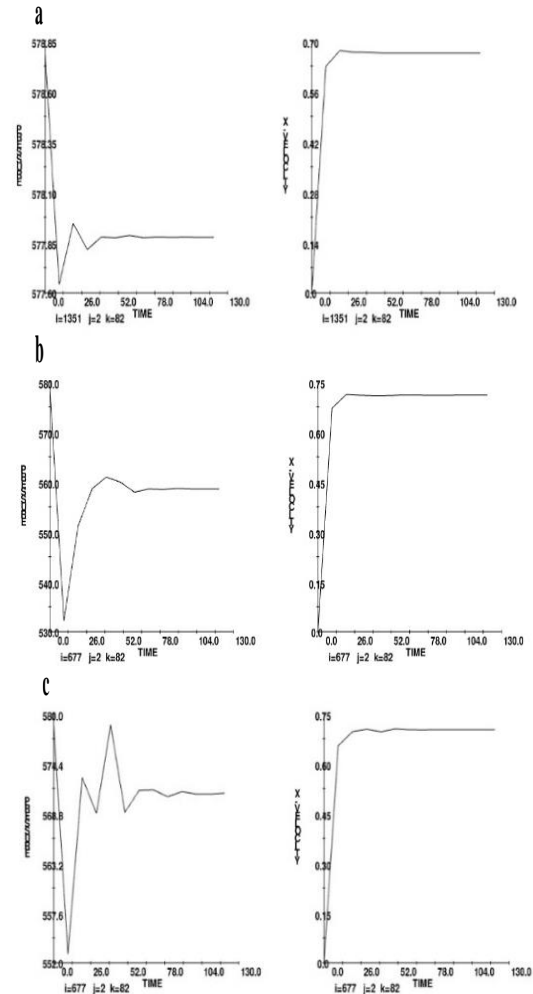


Fig. 2 The results of stability of flow parameters including velocity and pressure for three angles in numerical model (a) 10° , (b) 20° , and (c) 30° .

شکل ۲ نتایج پایداری فراسنجه جریان شامل سرعت و فشار برای سه زاویه در مدل عددی (a) 10° ، (b) 20° و (c) 30° درجه.

تغییرپذیری‌های طولی تراز^۱ هیدرولیکی برای سه زاویه 10° ، 20° و 30° درجه در شکل ۵ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در راستای طولی تراز هیدرولیکی جریان، روی تاج تلماسه حالت افتادگی پیدا می‌کند که نشان دهنده کمترین فشار روی تاج است.

۳-۲- تأثیر زاویه تلماسه بر مشخصه‌های ناحیه هایپرریک

مشخصه‌های ناحیه هایپرریک برای سه زاویه تلماسه در

Cardenas and Wilson (2007) همخوانی دارد. نتایج تحقیق آنان نشان داد که در شکل بستر تلماسه با افزایش نسبت دامنه به طول موج، عمق تبادل‌های هایپرریک کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ نمودار زمان ماندگاری جریان برای سه زاویه مختلف ارائه شده است. یکی از مشخصه‌های مهم ناحیه هایپرریک زمان ماند است، که به طور معمول برای محاسبه زمان ماندگاری، از مفهوم میانگین زمان ماند ذرات استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه، زمان ماندگاری جریان درون بستر رسوبی افزایش یافته است.

جدول ۳ نتایج مشخصه‌های ناحیه هایپرریک.

Table 3 The results of hyporheic flow characteristics.

θ (°c)	Q_{sub} (m^3/s)	RT (s)	H_p (m)
10	0.0038943	48	0.55
20	0.0041710	58	0.53
30	0.0045406	85	0.52

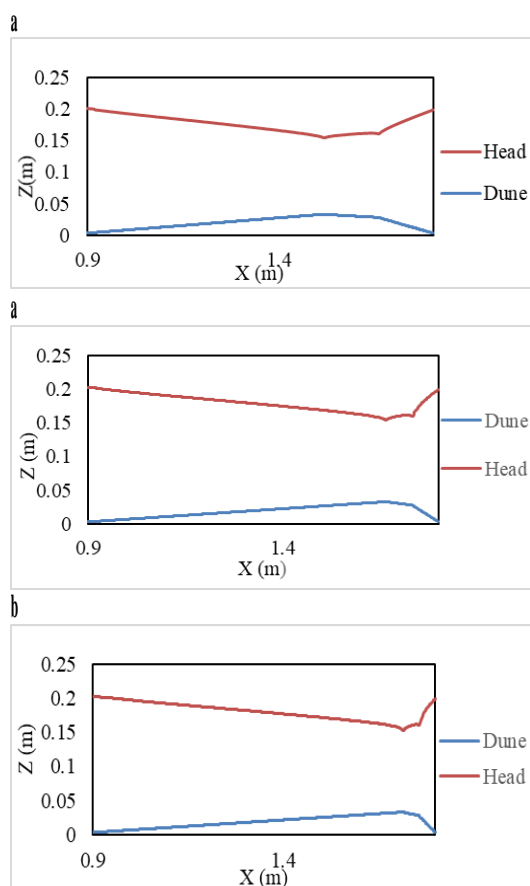


Fig. 5 View of dune bed form and hydraulic head distribution for three angles (a)10, (b) 20, and (c) 30 degrees.

شکل ۵ نمائی از شکل بستر تلماسه و توزیع تراز هیدرولیکی بر روی آن برای سه زاویه (a) ۱۰، (b) ۲۰ و (c) ۳۰ درجه.

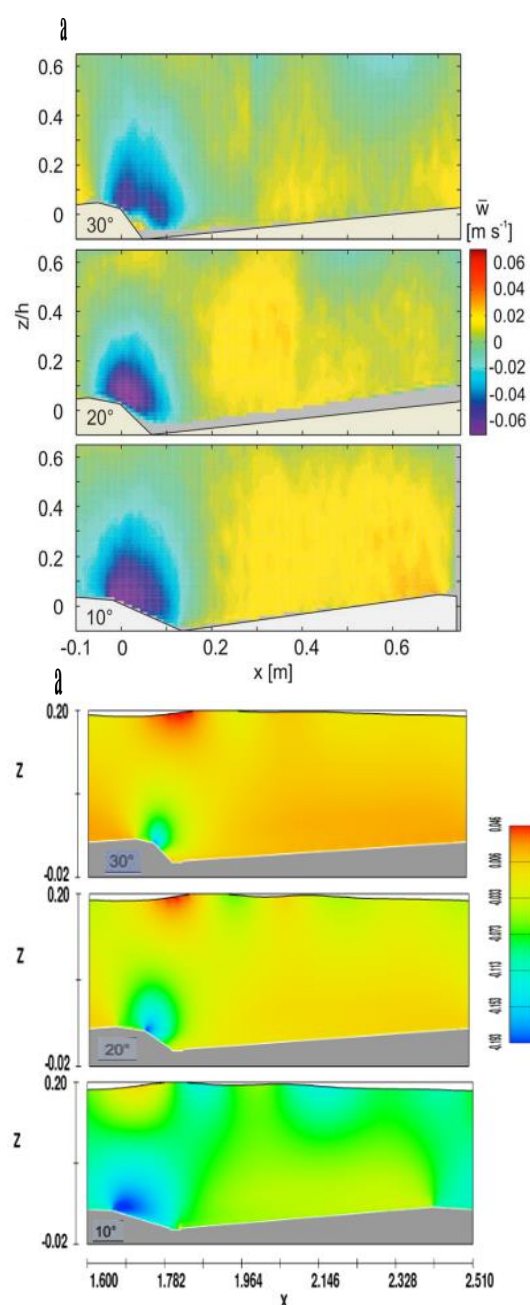


Fig. 4 The results of vertical velocity contours (w) for three angles (a) the study of Kwooll et al. (2016), (b) the results of the current research.

شکل ۴ نتایج خطوط هم سرعت عمود بر جهت جریان (w) برای سه زاویه (a) بررسی‌های (Kwooll et al. (2016)، (b) نتایج این تحقیق.

ترتیب در شیب بالا رونده و تاج تلماسه است، با افزایش زاویه وجه پایین دست تلماسه فاصله‌ی بین بیشینه و کمینه فشار کاهش یافته و این امر باعث می‌شود که با افزایش زاویه، عمق تبادل‌های هایپرریک کاهش و دبی تبدالی افزایش پیدا کند. این نتایج با نتایج بررسی‌های

بستر تلماسه پرداختند و نتایج بررسی آنان نشان داد که عمق تبادل‌های هایپرریک رابطه‌ی مستقیمی با هدایت هیدرولیکی دارد، که با افزایش هدایت هیدرولیکی عمق تبادل‌های هایپرریک نیز افزایش می‌یابد.

۳-۴- تأثیر سرعت جریان زیرسطحی بر عمق تبادل‌های هایپرریک

در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ تأثیر سرعت جریان زیرسطحی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک در هدایت هیدرولیکی ثابت ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش سرعت جریان زیرسطحی باعث می‌شود جریان زیرسطحی بر

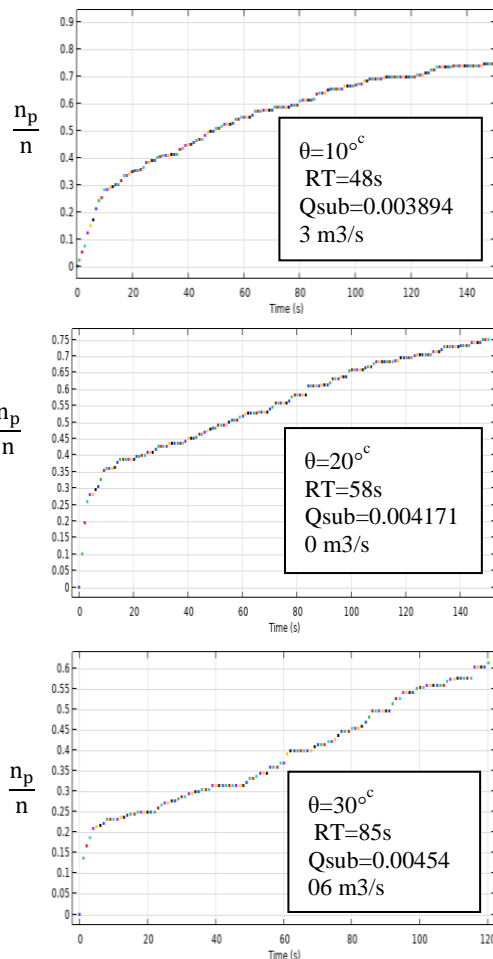


Fig. 7 Time variation of the percentage of particles that returned to the surface flow compared to the total released particles on the dune surface with different angles.

شکل ۷ نمودار تغییرپذیری‌های زمانی درصدی از ذرات که دوباره به جریان سطحی برگشتند نسبت به کل ذرات رها شده برای تلماسه با زاویه‌های مختلف.

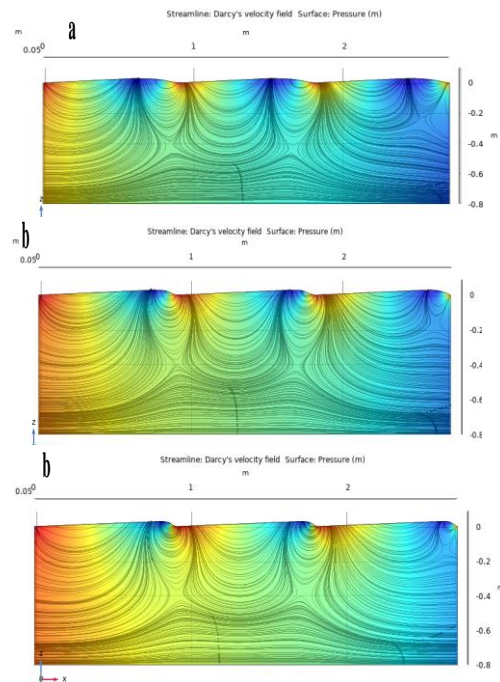


Fig. 6 Longitudinal profile of the subsurface flow for three angles (a) 10, (b) 20, and (c) 30 degrees.

شکل ۶ نمایی از جریان زیرسطحی برای سه زاویه (a) ۱۰، (b) ۲۰ و (c) ۳۰ درجه.

در ادامه تأثیر هریک از فراسنجه هدایت هیدرولیکی، ضخامت بستر رسوبی، سرعت جریان زیرسطحی و دبی جریان زیرسطحی بر روی بیشینه عمق تبادل‌های هایپرریک در زاویه‌های مختلف بررسی خواهد شد.

۳-۳- تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق تبادل‌های هایپرریک

در شکل‌های ۸ تا ۱۵ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر سه زاویه، در یک نسبت ثابت دبی جریان زیرسطحی به سطحی، با افزایش نسبت هدایت هیدرولیکی بر طول سطح تلماسه (K/A)، عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در نسبت‌های بالای K/A، بیشینه عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک در زاویه ۱۰ درجه از دو زاویه دیگر بیشتر است. این نتایج با مطالعه Ren et al. (2019) همخوانی دارد. Ren et al. (2019) بطور عددی به تجزیه و تحلیل عامل‌های موثر بر تبادل‌های هایپرریک بر شکل

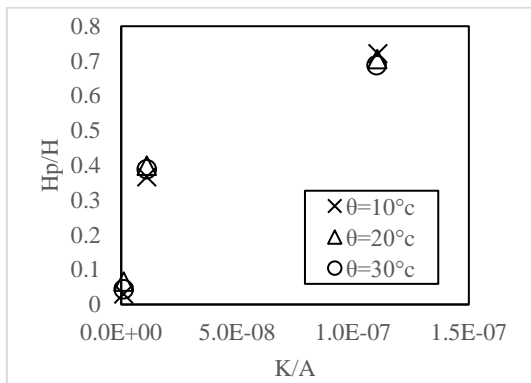


Fig. 11 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.0073$ and $U_{sub}/U=0.014$.

شکل ۱۱ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپیک برای $Q_{sub}/Q=0.0073$ و $U_{sub}/U=0.014$.

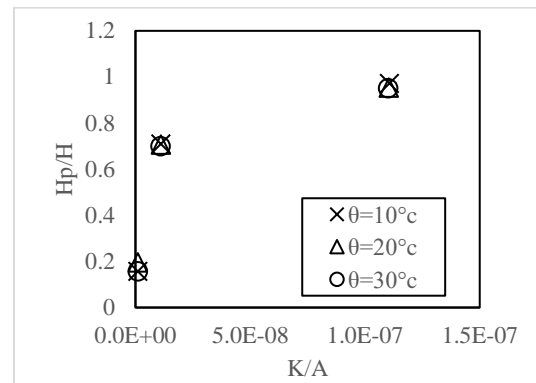


Fig. 8 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.00415$ and $U_{sub}/U=0.0108$.

شکل ۸ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپیک برای $Q_{sub}/Q=0.00415$ و $U_{sub}/U=0.0108$.

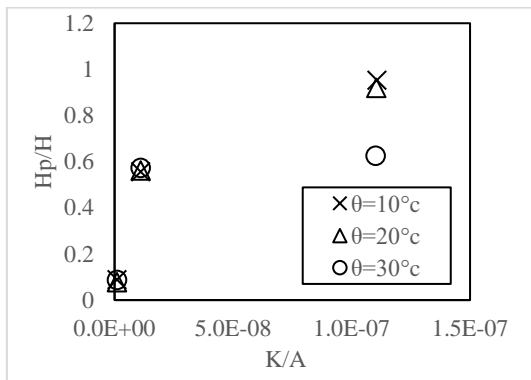


Fig. 12 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.0081$ and $U_{sub}/U=0.021$.

شکل ۱۲ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپیک برای $Q_{sub}/Q=0.0081$ و $U_{sub}/U=0.021$.

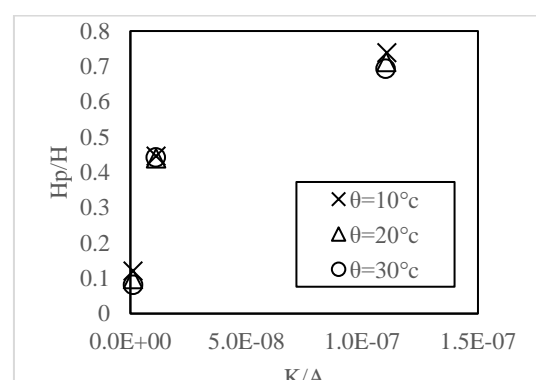


Fig. 9 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.0055$ and $U_{sub}/U=0.0108$.

شکل ۹ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپیک برای $Q_{sub}/Q=0.0055$ و $U_{sub}/U=0.0108$.

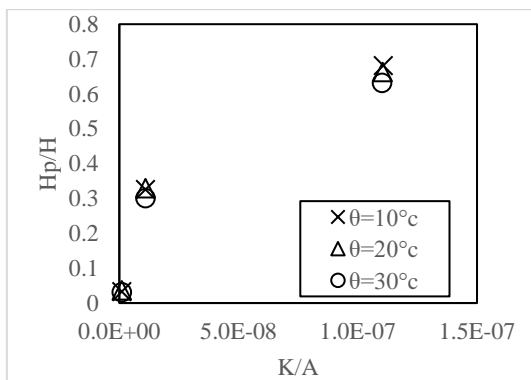


Fig. 13 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.0108$ and $U_{sub}/U=0.021$.

شکل ۱۳ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپیک برای $Q_{sub}/Q=0.0108$ و $U_{sub}/U=0.021$.

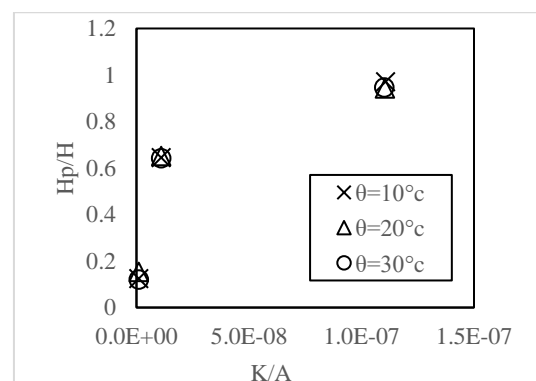


Fig.10 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.0055$ and $U_{sub}/U=0.014$.

شکل ۱۰ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپیک برای $Q_{sub}/Q=0.0055$ و $U_{sub}/U=0.014$.

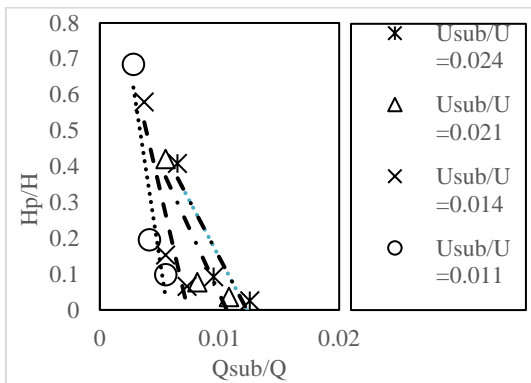


Fig. 17 The effect of the ratio of subsurface flow velocity to surface velocity on the maximum dimensionless depth for hyporheic exchanges in hydraulic conductivity $K/A=1.11-9$ an angle of 20 degrees.

شکل ۱۷ تأثیر نسبت سرعت جریان زیرسطحی به سرعت سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک در هدایت هیدرولیکی $K/A=1.11-9$ برای زاویه ۲۰ درجه.

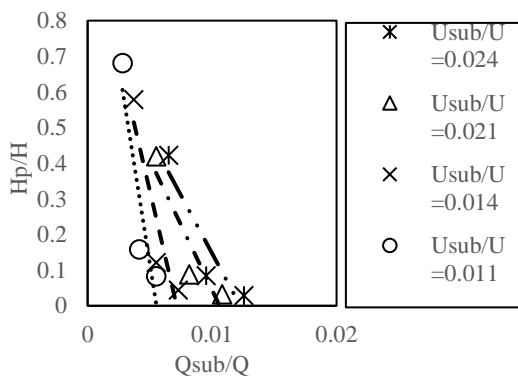


Fig.18 The effect of the ratio of subsurface flow velocity to surface velocity on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for hydraulic conductivity $K/A=1.11-9$ an angle of 30 degrees.

شکل ۱۸ تأثیر نسبت سرعت جریان زیرسطحی به سرعت سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک در هدایت هیدرولیکی $K/A=1.11-9$ برای زاویه ۳۰ درجه.

جریان سطحی غالب شده و جریان در محیط متخلخل به سمت جریان سطحی حرکت کند. در نتیجه با افزایش نسبت سرعت جریان زیرسطحی به سرعت جریان سطحی، دبی تبدلی افزایش و عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک کاهش پیدا می‌کند.

همان طور که در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ مشاهده می‌شود، برای هدایت هیدرولیکی و نسبت سرعت جریان زیر سطحی به سرعت سطحی ثابت، افزایش عمق بستر رسوبی باعث افزایش نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی می‌شود، در نتیجه با افزایش دبی جریان زیرسطحی عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک کاهش پیدا می‌کند.

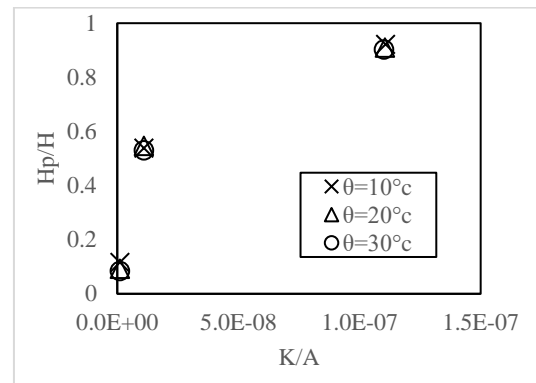


Fig. 14 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.0095$ and $U_{sub}/U=0.024$.

شکل ۱۴ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک برای $Q_{sub}/Q=0.0095$ و $U_{sub}/U=0.024$.

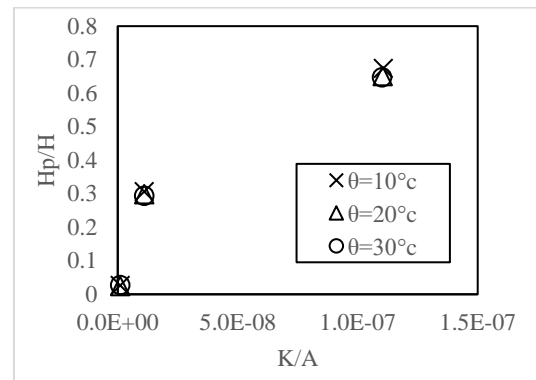


Fig. 15 The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for $Q_{sub}/Q=0.012$ and $U_{sub}/U=0.024$.

شکل ۱۵ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک برای $Q_{sub}/Q=0.012$ و $U_{sub}/U=0.024$.

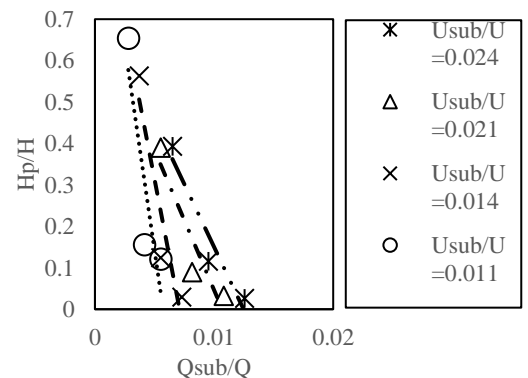


Fig. 16 The effect of the ratio of subsurface flow velocity to surface velocity on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for hydraulic conductivity $K/A=1.11-9$ an angle of 10 degrees.

شکل ۱۶ تأثیر نسبت جریان زیرسطحی به سرعت سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بُعد تبادل‌های هایپریک در هدایت هیدرولیکی $K/A=1.11-9$ برای زاویه ۱۰ درجه.

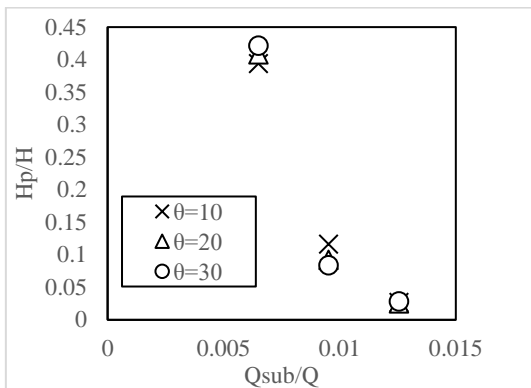


Fig. 22 The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for $U_{sub}/U=0/024$.

شکل ۲۲ تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک در $U_{sub}/U=0/024$.

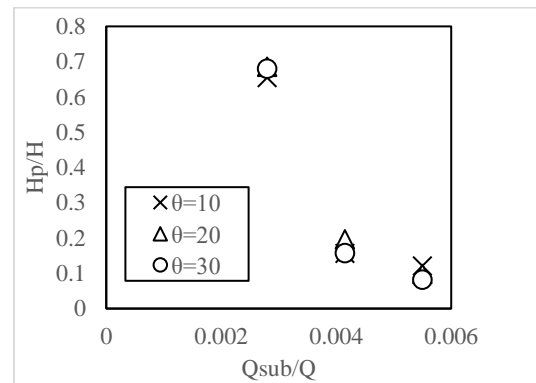


Fig. 19 The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for $U_{sub}/U=0/0108$.

شکل ۱۹ تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک در $U_{sub}/U=0/0108$.

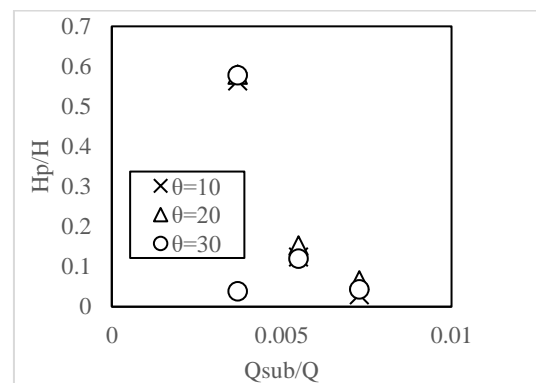


Fig. 20 The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for $U_{sub}/U=0/014$.

شکل ۲۰ تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک در $U_{sub}/U=0/014$.

۳-۵- تأثیر ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادل‌های هایپرریک

در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ تأثیر ضخامت‌های مختلف (۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ متر) در هدایت هیدرولیکی $K=1E-8$ متر مربع برای سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به اینکه بیشینه فشار در وجه بالا رونده تلماسه می‌باشد برای هر سه زاویه با افزایش عمق بستر رسوبی، میزان فشار در وجه بالا رونده و در محیط متخلخل کاهش یافته و این کاهش فشار باعث کاهش عمق تبادل‌های هایپرریک می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با مدلسازی جریان سطحی و حل جریان زیرسطحی با استفاده از تغییرپذیری‌های تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده روی سطح مشترک جریان سطحی و زیرسطحی نتایج زیر به دست آمد:

۱- با کاهش زاویه وجه پایین‌رونده تلماسه، منطقه جدا شدگی بزرگتر شده و به کف نزدیک شده که باعث افزایش عمق تبادل‌های هایپرریک می‌شود.

۲- مدل‌سازی جریان زیرسطحی نشان داد، برای یک هدایت هیدرولیکی و ضخامت رسوبی ثابت با افزایش زاویه، دبی تبدالی و زمان ماند افزایش پیدا می‌کند، اما عمق تبادل‌های هایپرریک کاهش می‌یابد.

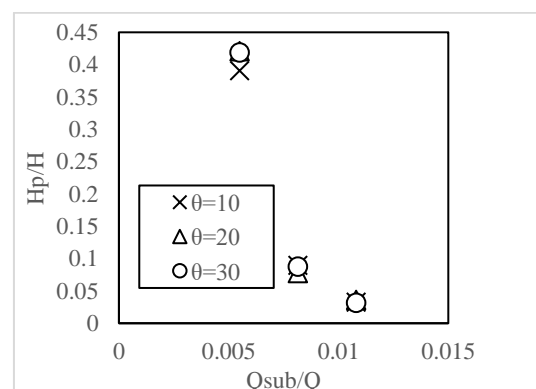


Fig. 21 The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for $U_{sub}/U=0/021$.

شکل ۲۱ تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی بیشینه عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرریک در $U_{sub}/U=0/021$.

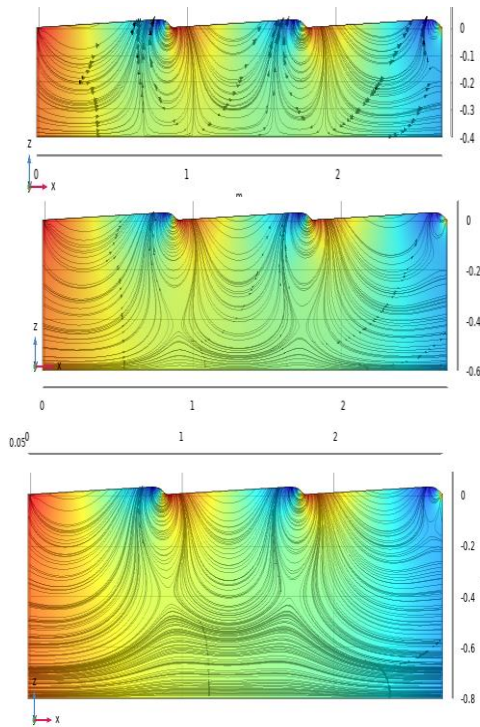


Fig. 25 The effect porous media thickness on the hyporheic exchange depth for an angle of 30 degrees.

شکل ۲۵ تأثیر ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادل‌های هایپرپریک برای زاویه ۳۰ درجه.

۳- با بررسی هدایت هیدرولیکی مختلف بر روی عمق تبادل‌های هایپرپریک در یک نسبت ثابت دبی جریان سطحی به زیرسطحی، می‌توان نتیجه گرفت با افزایش نسبت K/A عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپریک افزایش پیدا می‌کند.

۴- تأثیر سرعت جریان زیرسطحی در ضخامت رسوبی ثابت بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپریک در هدایت هیدرولیکی مختلف نشان می‌دهد، با افزایش نسبت سرعت جریان زیرسطحی به سرعت سطحی، دبی تبدالی افزایش و عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپریک کاهش پیدا می‌کند.

۵- نتایج اثر دبی جریان زیر سطحی بر عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپریک نشان داد، برای هدایت هیدرولیکی ثابت با افزایش نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی عمق بی‌بعد تبادل‌های هایپرپریک کاهش یافته است.

۶- بررسی ضخامت مختلف برای سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای هدایت هیدرولیکی ثابت نشان می‌دهد، با افزایش عمق بستر رسوبی عمق تبادل‌های هایپرپریک کاهش پیدا می‌کند. و همچنین با افزایش نسبت دبی

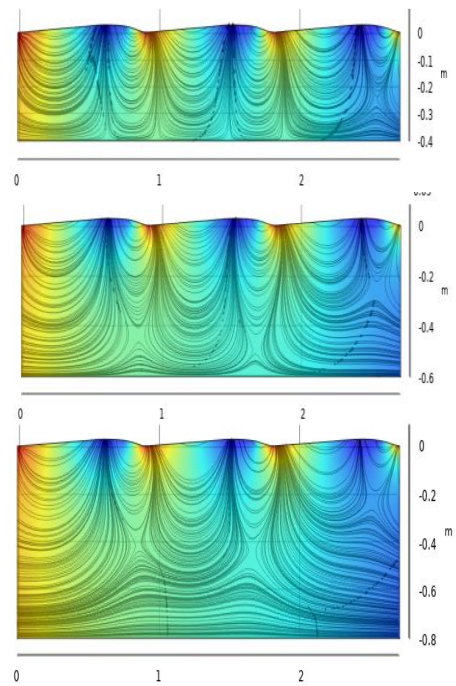


Fig. 23 The effect porous media thickness on the hyporheic exchange depth for an angle of 10 degrees.

شکل ۲۳ تأثیر ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادل‌های هایپرپریک برای زاویه ۱۰ درجه.

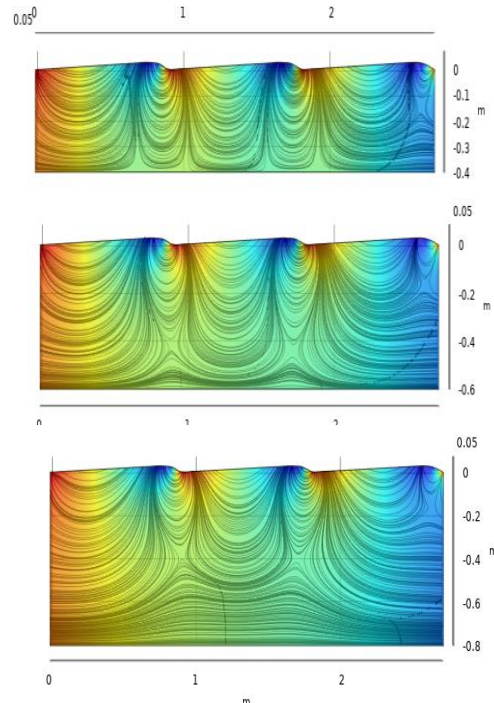


Fig. 24 The effect porous media thickness on the hyporheic exchange depth for an angle of 20 degrees.

شکل ۲۴ تأثیر ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادل‌های هایپرپریک برای زاویه ۲۰ درجه.

Kwoll, E., Venditti, J.G., Bradley, R.W. & Winter, C. (2016). Flow structure and resistance over subaqueous high and low angle dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(3), 545-564.

Magliozzi, C., Grabowski, R., Packman, A.I. & Krause, S. (2017). Scaling down hyporheic exchange flows: from catchments to reaches. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-53, doi:10.5194/hess-2016-683.

Movahedi, N., Dehghani, A.A., Schmidt, Ch., Trauth, N. & Meftah, M. (2020). Comparison of Hyporheic Exchanges in 2D and 3D Riffle-Pool bed form structures. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(8), 1-3. (In Persian)

Packman, A.I., Salehin, M. & Zaramella, M. (2004). Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(7), 647-656.

Ren, J., Wang, X., Zhou, Y., Chen, B. & Men, L. (2019). An Analysis of the Factors Affecting Hyporheic Exchange based on Numerical Modeling. *Water*, 11(4), 665, <https://doi.org/10.3390/w11040665>.

Tonina, D. & Buffington, J.M. (2009). Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects. *Geography Compass*, 3(3), 1063-1086.

زیرسطحی به دبی سطحی، عمق بی بعد تبادل‌های هایپرریک کاهش می‌یابد.

۵- فهرست نشانه‌ها

0	زاویه
H	عمق بستر رسوبی (m)
H _p	عمق جریان هایپرریک (m)
A	طول سطح تلماسه (m)
U	سرعت جریان سطحی (m/s)
U _{sub}	سرعت جریان زیرسطحی (m/s)
K	هدایت هیدرولیکی (m ²)
Q	دبی جریان سطحی (m ³ /s)
Q _{sub}	دبی جریان زیرسطحی (m ³ /s)

۶- منبع‌ها

Best, J.L. (1993). On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. In: *Turbulence: Perspectives On Flow and Sediment Transfer*, Clifford, N.J., French, J.R. & Hardisty, J. (Eds.), John Wiley & Sons, Ltd., 61-92.

Biddulph, M. (2015). Hyporheic Zone: In Situ Sampling, Geomorphological Techniques. Chapter 3, Section 11.1, Clarke, L. & Nield, J. (Eds.), British Society for Geomorphology.

Blois, G., Best, J.L., Sambrook Smith, G.H. & Hardy, R.J. (2014). Effect of bed permeability and hyporheic flow on turbulent flow over bed forms. *Geophysical Research Letters*, 41(18), 6435-6442.

Cardenas, M.B. & Wilson, J.L. (2007). Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments. *Water Resources Research*, 43(8), <https://doi.org/10.1029/2006WR005787>.

Chen, X., Cardenas, M.B. & Chen, L. (2015). Three dimensional versus two dimensional bed form-induced hyporheic exchange. *Water Resources Research*, 51(4), 2923-2936.

Edwards, R.T. (1998). The Hyporheic Zone. Chapter 16 in *River Ecology and Management—Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*.

Fox, A., Boano, F. & Arnon, S. (2014). Impact of losing and gaining streamflow conditions on hyporheic exchange fluxes induced by dune shaped bed forms. *Water Resources Research*, 50(3), 1895-1907.

