

Laboratory and Numerical Study of Hyporheic Exchanges in Sand Mining Pit

Fereshte Asadi¹, Amir Ahmad Dehghani^{2*}, Mehdi Meftah Halaghi³, Neshat Movahedi⁴

1- PhD Candidate of Water Structures, Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

2- Professor, Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

4- PhD in Water Structures, Department of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

* a.dehghani@gau.ac.ir

Received: 18 July 2023
Accepted: 6 September 2023
Discussion: 21 December 2024



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

Abstract

Introduction: River materials such as sand are widely used in the construction industry due to their accessibility, texture, and suitable particle size. It is crucial to implement sustainable mining practices and enforce regulations to mitigate these effects. When a river is diverted for sand mining, it can result in the loss of natural river features that promote hyporheic exchange. These features include meanders, riffles, and pools, which create flow patterns that allow water to infiltrate into the sediment and exchange with the groundwater. The hyporheic zone is the area just beneath a river where water and nutrients exchange between the river and groundwater. Sand mining pit can disrupt the hyporheic zone by altering the channel morphology and reducing the connectivity between the river and groundwater. As a result, the exchange rates of oxygen, nutrients, and other substances between the river and groundwater can be reduced, affecting the overall health and functionality of the river ecosystem. In the present study, the effect of different sand mining pit lengths and upstream water depths on the characteristics of the hyporheic zone is analyzed. Additionally, the numerical results of surface and subsurface models are calibrated with laboratory observations.

Methodology: Experiments were conducted in a flume with a length of 7 meters, width of 1 meter and height of 1 meter. The velocity of the water was measured using an Electromagnetic Current Velocity Meter with an accuracy of 0.5 cm/s. Sediments with an average diameter of 2.3 mm, falling within the recommended range of previous studies, were filled in the channel (Rovira et al., 2005; Wu and Wang, 2008; Mori et al., 2011). Trapezoidal-shaped sand mining pits with a height of 0.1 m were constructed in the middle of the flume, and their lengths varied. The range of dimensions for the mining pits was determined based on previous studies conducted by Lee et al. (1993), Barman et al. (2019), Jang et al. (2015), and Hagh Nazar et al. (2019). The objective of the study was to examine the impact of the length of the mining pits, the water depth, and different discharges on the hyporheic exchanges. The experiments were carried out in eight scenarios. In scenarios E1 to E4, the upstream water depth was 0.061 m, and the pit lengths were 0.25 m, 0.5 m, 0.75 m, and 1 m, respectively. In scenarios E5 to E8, the pit lengths were the same as before, but the

water depth was increased to 0.101 m. To simulate the surface flow on the sand mining pits and the subsurface flow in the sediment, Computational Fluid Dynamics software was utilized (Cardenas and Wilson, 2007a, 2007b, 2007c; Chen et al., 2015). Ansys Fluent software was used for simulating the surface flow, while Comsol software was used for simulating the subsurface flow (Bear, 1972; Cardenas and Wilson, 2007a, 2007b; Trauth et al., 2013).

Results and discussion: For the calibration of the surface model, the observed and simulated water surface elevation and the surface flow velocity were compared. RMSE for the free surface elevation in the E4 scenario was found to be 0.002 m, indicating a good agreement between the laboratory and numerical model. The comparison of vertical velocity profiles also showed a close match between the simulated and experimental velocities. It demonstrates the model's capability to simulate flow behavior and can be utilized for simulations related to similar scenarios. Additionally, injecting dye into the bed and comparing the simulated streamlines with the laboratory results were done to assess the accuracy of the subsurface model. Analysis of dye paths in the laboratory demonstrated that the simulated streamline pattern closely follows the pattern observed in the laboratory, it further indicates that the numerical model is capable of accurately representing the flow dynamics. It appears that increasing water depth has a significant impact on pressure values and the maximum pressure gradients. Additionally, the length of the pit also affects hyporheic exchange, with longer pits resulting in decreased exchange. The percent of hyporheic exchanges for the depth of 0.061 meters ranged from a maximum of 9.612% in E1 scenario to a minimum of 6.133% in E4 scenario. Also, the percentage of hyporheic exchange decreases with increasing discharge. Similarly, for the depth of 0.101 meters, the maximum percent of hyporheic exchanges was 10.003% in E5 scenario, while the minimum was 6.171% in E8 scenario. The E4 and E8 scenarios exhibited the highest dimensionless penetration depth and residence time, while E1 and E5 had the lowest values. The increase in water depth also led to an increase in the dimensionless penetration depth. It shows that at shallower depths, turbulent eddies may influence the flow field, resulting in shorter residence times and particle penetration. Regarding residence time distribution, the histogram analysis revealed a log-normal distribution for the E1 and E5 scenarios, while a Generalized Extreme Value Distribution was obtained for the other scenarios.

Conclusion: The results showed that increasing the length of the pit was found to decrease hyporheic exchange, indicating an inverse relationship between pit length and dimensionless hyporheic exchange. This suggests that longer pits may have reduced interaction between surface and subsurface flows. On the other hand, increasing the depth of water in the tested pits was seen to increase the dimensionless hyporheic exchange. This means that deeper water levels enhance the exchange between surface water and subsurface flow. The average maximum dimensionless penetration depth decreased as the pit length decreased, ranging from 1.66 to 2.66. This indicates that shorter pits may have limited penetration of particles into the subsurface. The range of hydraulic gradient values at a depth of 0.061m was observed to be between 0.10386 and 0.10644 meters, while at a depth of 0.101m, the range was between 0.10517 and 0.10645 meters.

Keywords: Hyporheic Zone, Penetration Depth, Pit Mining, 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/>)

بررسی آزمایشگاهی و عددی تبادلات هایپرک در حفره برداشت شن و ماسه

فرشته اسدی^۱، امیراحمد دهقانی^{۲*}، مهدی مفتاح هلقی^۳، نشاط موحدی^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۲- استاد، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۴- دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

* a.dehghani@gau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: مصالح رودخانه‌ای به علت دسترسی آسان و اندازه ذرات مناسب همواره نقش مهمی در صنعت ساخت‌وساز ایفا می‌کند. استخراج شن و ماسه غیراصولی می‌تواند باعث از بین رفتن محیط‌زیست آبی و اختلال در اکوسیستم رودخانه شود، لذا ضروریست که از رویکردهای پایدار برای کاهش تأثیرات منفی بر محیط‌زیست استفاده شود. یکی از تأثیرات برداشت شن و ماسه، تأثیر آن بر ناحیه هایپرک است. ناحیه هایپرک، منطقه‌ای اشباع بلافاصله زیر بستر رودخانه است که تبادل آب سطحی و زیرزمینی در آن رخ می‌دهد و تأثیر مستقیم بر اکوسیستم آبی دارد. با توجه به فرسایش بستر رودخانه در اثر برداشت غیراصولی، الگوی هیدرودینامیکی جریان درون حفره تغییر کرده و می‌تواند بر تبادلات هایپرک تأثیر داشته باشد. پژوهش‌های زیادی در زمینه تأثیر شکل بستر رودخانه بر روی الگوی جریان هایپرک و مشخصات آن انجام شده است در حالی که در خصوص تأثیر حفره برداشت بر تبادلات هایپرک مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در این تحقیق اثر طول حفره و عمق آب بر مشخصات ناحیه هایپرک شامل میزان تبادلات هایپرک، زمان ماند و حداکثر عمق نفوذ مورد مطالعه قرار گرفت. برای شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی به ترتیب از نرم‌افزارهای فلوئنت و کامسول استفاده شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که افزایش طول حفره برداشت، موجب افزایش زمان ماند، عمق نفوذ و کاهش درصد دبی تبدالی می‌گردد. هم‌چنین افزایش عمق آب باعث افزایش دبی تبدالی می‌شود و توزیع فراوانی زمان ماند از الگوی لوگ‌نرمال و مقادیر حدی تعمیم یافته پیروی می‌کند.

کلیدواژگان: حفره برداشت، زمان ماند، عمق نفوذ، ناحیه هایپرک.

۱- مقدمه

چون سواحل ناپایدار می‌شوند. توسعه صنعت ساختمان و به دنبال آن تقاضای بیشتر شن و ماسه باعث افزایش استخراج انبوه شن از بستر رودخانه برای پی‌سازی شد. برداشت شن و ماسه موجب عمیق‌تر شدن بستر رودخانه و افزایش شیب می‌شود و در نتیجه جریان در فصل و ماه‌های پردبی با افزایش شیب افزایش می‌یابد (Bindhusri and Arunachalam, 2015).

تشکیل حفره^۲ در کانال فعال، تعادل بین میزان آورد رسوب و ظرفیت انتقال را برهم می‌زند و در محل ورود

مصالح رودخانه‌ای به علت دسترسی آسان، بافت و اندازه ذرات مناسب همواره نقش مهمی در صنعت ساخت‌وساز ایفا می‌کند و شن و ماسه مواد مرغوبی برای ساخت بتن هستند (Dunne et al., 1981). برداشت از کف رودخانه به دلیل کیفیت بالا و کاهش هزینه حمل و نقل همواره مورد توجه بوده است (Kondolf et al., 2002). با حذف ماسه یا خاک آبرفتی^۱ هندسه رودخانه تغییر خواهد کرد

سمت بستر کانال تغییر جهت می دهند و منطقه جدایش دیگری شکل می گیرد. در منطقه نزدیک به ناحیه جدایی جریان پایین دست، جریان شتاب^۷ می گیرد و به دلیل انقباض ناگهانی مقطع کانال فرسایش موضعی رخ می دهد. بنابراین حفره آغاز به جابه جایی و تغییر شکل می کند. (Lee et al., 1993).

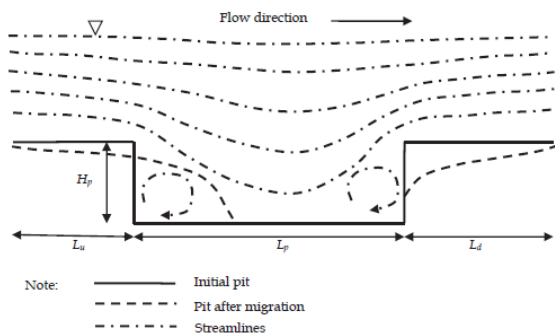


Fig. 2 Sketch of flow structure and initial pit evolution (Chen, 2011)

شکل ۲ طرحی از ساختار جریان و تکامل حفره برداشت (Chen, 2011)

Jang et al. (2015) به بررسی آزمایشگاهی و عددی فرایندهای رودخانه‌ای^۸ کانال‌های دارای برداشت شن و ماسه پرداختند. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد رسوب‌ها در حفره در شرایط پایدار^۹ به پایین دست انتقال یافتند. حفره برداشت رسوب در کانال شیب‌دار تند، با سرعت جابه‌جا می‌شود. افزون بر این، بررسی‌های عددی نشان داد که سرعت انتقال با ورودی رسوب متناسب است و با افزایش سرعت انتقال، عمق حفره کاهش می‌یابد. همچنین کانال‌هایی با برداشت رسوب تحت تأثیر شرایط رسوب ورودی بالادست هستند و با شرایط جدیدی از تعادل تنظیم می‌شوند (Jang et al., 2015). Husain et al. (2017) اثرات زیست‌محیطی برداشت ماسه در رودخانه میلار^{۱۰} در کراچی پاکستان را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش سطح آب و تخریب زمین از اثرگذاری‌های سوء برداشت شن و ماسه می‌باشد (Husain et al., 2017). Barman et al. (2019).

آزمایش‌هایی برای بررسی ویژگی‌های دینامیکی جابه‌جایی

حفره به صورت موضعی گرادیان تندی^۱ را ایجاد می‌کند. قسمت بالایی حفره با افزایش شدت جریان فرسایش می‌یابد و یک پیشانی خندق^۲ ایجاد می‌کند و حفره‌ها بار بستر زیادی را محبوس می‌کند (شکل ۱). پس از تله‌اندازی مصالح، آب بدون رسوب به پایین دست رودخانه جریان می‌یابد که باعث فرسایش بستر کانال و سواحل برای به دست آوردن کمترین بار رسوبی می‌شود. هنگامی که رودخانه هنوز ظرفیت انتقال رسوب را دارد و بار رسوبی وجود ندارد استخراج حفره به طور عمده منجر به پایین افتادگی بستر در بالادست و پایین دست حفره می‌شود (Kondolf et al., 2002).

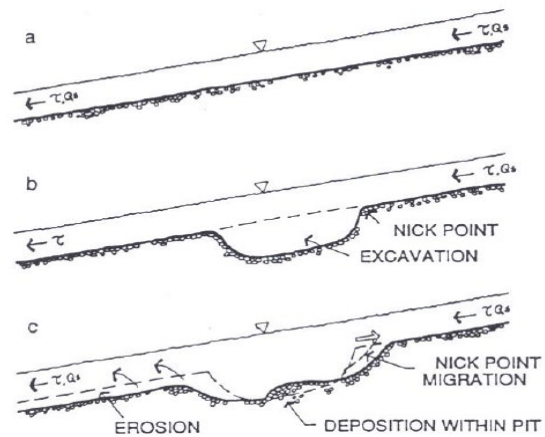


Fig. 1 Incision produced by instream gravel mining (Kondolf et al., 2002)

شکل ۱ پایین افتادگی بستر ایجاد شده به وسیله برداشت شن درون جریان (Kondolf et al., 2002)

تکامل حفره برداشت یک فرایند هیدرودینامیکی پیچیده ناشی از تعامل‌های بین خط جریان، رسوب و مرزهای متحرک است به طوری که خطوط جریان آب روی حفره جدا و در بالادست و انتهای پایین دست همگرا^۳ می‌شوند. جدایی جریان باعث گردابه‌های غلتان^۴ و برش در انتهای بالادست و همگرایی خطوط جریان^۵ باعث کف‌کنی^۶ در انتهای پایین دست حفره می‌شود (شکل ۲) (Chen, 2011). در انتهای پایین دست حفره، خطوط جریان به

1. Locally steeper gradient
2. Headcutting
3. Converge
4. Eddy rollers
5. Streamline convergence
6. Degradation

7. Accelerates
8. Fluvial processes
9. Steady
10. Milar

رو به بالا^۲ و رو به پایین^۳ در طول کانال تأثیر می‌گذارد. جایی که ضخامت شن روی سنگ بستر^۴ کم باشد، پایین افتادگی بستر می‌تواند حجم^۵ ناحیه هایپریک را کاهش دهد که در نتیجه‌ی آن باعث کاهش زیستگاه بی‌مهرگان موجود می‌شود و مسیر جریان آب زیرزمینی را تغییر می‌دهد و ماهیت تبادل آب سطحی و زیرزمینی، مواد مغذی، ارگانوسم‌ها و مواد شیمیایی را دست‌خوش دگرگونی می‌کند و این تغییرها ممکن است بر اکولوژی غذایی سیستم رودخانه اثر بگذارد. همچنین پایین افتادگی کانال^۶ با گذشت زمان، حجم پشته‌های شنی پایین‌دست را کاهش می‌دهد و بر دینامیک ناحیه هایپریک بر موجودهای آبی، دما و کیفیت آب تأثیرگذار است. عدم کنترل استخراج شن و ماسه باعث تخریب و فرسایش کانال، عمیق‌تر شدن رودخانه‌ها، گسترش دهانه رودخانه، کاهش سطح آب^۷ در منطقه‌های نزدیک سواحل، نفوذ آب شور، آسیب‌های زیربنایی مانند تضعیف پل‌ها و سازه‌های دیگر می‌شود (Kondolf and Swanson, 1993; Kondolf, 1997; Kondolf et al., 2002; Mori et al., 2011). متأسفانه و مهم‌تر از همه تخریب زیستگاه هایپریک است. به‌طوری‌که بنابر نتایج بررسی‌هایی که Reddy (2014) بر رودخانه‌های هند داشتند اجازه استخراج شن و ماسه تا عمق ۲ متری را داده‌اند که برای حیات مرتبط با هایپریک خطرناک است. چون بیشتر حیات در منطقه هایپریک به رسوب‌های یک متر و بالاتر از آن محدود می‌شود (Reddy, 2014). فعالیت‌های بشر به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر هایپریک اثر می‌گذارد به‌عنوان مثال استخراج شن روی دشت سیلابی موجب کاهش سطح آب، اختلال در مسیرهای جریان‌های ساحلی^۸ و گرفتگی^۹ (Bravard and Petts, 1996) می‌گردد. استخراج شن و ماسه در دشت سیلابی موجب تغییر الگوی طبیعی جریان آب و انتقال رسوب می‌شود. در مبحث‌های کیفیت آب و زیستگاه

حفره برداشت انجام دادند. نتایج نشان داد با افزایش نسبت طول به عرض حفره، نرخ جابه‌جایی افزایش خواهد یافت. فرمول تجربی بر مبنای هندسه حفره، متوسط سرعت جریان، تنش برشی بحرانی مواد بستر برای محاسبه نرخ جابه‌جایی توسعه دادند (Barman et al., 2019). Hagh Nazar et al. (2019) به بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی مکان‌یابی دو حفره متوالی برداشت مصالح رودخانه‌ای در قالب فاصله حفره‌ها از هم و همچنین فاصله حفره‌ها از دیواره به منظور پرشدگی و احیای آن‌ها برای مدیریت بهره‌برداری و برداشت پرداختند. نتایج نشان داد که جابه‌جایی حفره پایین‌دست بر حجم پرشدگی و انتقال حفره بالادست تأثیر محسوسی ندارد اما با نزدیک شدن حفره به سمت دیواره، حجم پرشدگی برای حفره بالادست نسبت به مرکز کانال، ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. (Abdullahi and Ahmad, 2019). Hagh Nazar et al., 2019). (2022) به تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی و عددی پارامترهای جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در مجاورت حفره پرداختند و سیر تکاملی تراز بستر در مجاورت حفره را در مرحله‌های مختلف زمانی تا به تعادل رسیدن حفره اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد توزیع سرعت طولی و عرضی در مدل با مشاهده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارد. همچنین در مدل عددی حدود ۷۵ درصد از رسوب‌گذاری در حفره در آغاز زمان محاسباتی رخ داد (Abdullahi and Ahmad, 2022). (Ahmad, 2023). (Abdullahi and Ahmad, 2023) معادله‌های موجود را برای پیش‌بینی انتقال رسوب از بالادست حفره به درون حفره ارزیابی کردند. دقت معادله‌ها با استفاده از رویکردهای آماری و گرافیکی ارزیابی شد. نتایج نشان داد معادله‌های ارائه شده توسط Lee et al. (1993) سرعت انتقال رسوب‌ها از بالادست حفره را بهتر از معادله‌های دیگر پیش‌بینی می‌کند. معادله‌های ارائه شده توسط Barman et al. (2018) بر مبنای ضریب همبستگی و دیگر شاخص‌های آماری در جایگاه دوم قرار دارد (Abdullahi and Ahmad, 2023).

ترازگاهی یا پایین افتادگی کف بستر^۱ روی الگوی جریان

2. Upwelling
3. Downwelling
4. Bedrock
5. Volume
6. Channel incision
7. Water table
8. Parafluvial
9. Clogging

1. Incision

صورت می‌گیرد که شامل رسوب‌های آبرفتی در محدوده تبادل جریان سطحی با جریان زیرسطحی است (Bencala, 2005). با وجود اهمیت قابل توجه فرایندهایی که در این ناحیه رخ می‌دهد این فرایندها کمتر شناخته شده‌اند (Buss et al., 2009). اهمیت اساسی ناحیه هایپرک در اکولوژی و هیدرولوژی رودخانه است و لذا جهت احیاء رودخانه بایستی ناحیه هایپرک در تصمیم‌گیری‌ها برای کمک به احیای سیستم‌های در معرض خطر در نظر گرفته شود (Magliozzi et al., 2019).

تحقیقات گذشته نشان داده است که توپوگرافی رودخانه یا همان فرم بسترها و شکل‌های ژئومورفیک در بستر رودخانه بیشترین تأثیر را بر تبادلات هایپرک دارند. در این مقیاس، اثر متقابل بین جریان رودخانه و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، مانند شیب، توالی‌های دیون، خیزاب-چالاب و پله‌ها سبب ایجاد اختلاف فشار خواهد شد و این اختلاف فشار منجر به تبادلات هایپرک می‌گردد (Biddulph, 2015). در رودخانه‌های طبیعی تبادلات هایپرک نه تنها عمودی بلکه به‌صورت جانبی هم در بستر رخ می‌دهد چون دارای مقطع‌های مرکب هستند (Banzhaf et al., 2011; Boulton et al., 2010; Butturini, 2002; Gerecht et al., 2011; Trauth et al., 2013; Xia et al., 2013). مقطع‌های مرکب می‌تواند گرادیان‌هایی در جهت عرضی رودخانه در محدوده دشت سیلابی ایجاد کند که موجب گسترش فضایی ناحیه هایپرک می‌شود و بر جریان هایپرک به‌شدت اثر می‌گذارد (Banzhaf et al., 2011; Chen et al., 2015).

از تحقیقات مشابه بر روی اثرات فرم بستر رودخانه بر تبادلات هایپرک می‌توان به بررسی‌های Thibodeaux and Boyle (1987) اشاره کرد. Thibodeaux and Boyle (1987) با استفاده از تزریق ماده رنگی درون بستر رسوبی ریپل و دیون در نقطه‌های مختلف در جداره کانال، خطوط جریان زیرسطحی را به‌طور مشاهده‌های بر روی کاغذ ترسیم کردند. نتایج مشاهده‌های آنان گویای این بود که در یک فرم بستر شنی، جریان از قسمت بالادست دیون به درون بستر رسوبی نفوذ کرده و از قسمت پایین‌دست آن به درون جریان باز می‌گردد. تجزیه و تحلیل ساده این بررسی

آزبان نیز موجب تغییر در ناحیه هایپرک می‌گردد (Sandercock and Ladson, 2015). وقتی سواحل طی فرایند برداشت شن و ماسه تخریب می‌شوند دشت‌های سیلابی و ناحیه‌های هایپرک باریک خواهند شد. برداشت تجاری شن و ماسه اثرات اکولوژی مختلفی از فرسایش سواحل تا کاهش آب زیرزمینی را شامل می‌شود. ارزیابی از پنج محل برداشت شن از بازه‌های وسط تا پایین رودخانه تمیرپارانی^۱ نشان داد که برداشت، به میزان زیادی به عملکرد و سازه‌های اکوسیستمی آسیب رسانده است و بر ظرفیت تصفیه رودخانه^۲، پایین آمدن تراز آب زیرزمینی، حذف منطقه ساحلی و تخریب دشت‌های سیلابی اثرگذار بوده است. از این رو برداشت شن و ماسه به مدت پنج سال متوقف شد (Bindhusri and Arunachalam, 2015).

اهمیت ناحیه هایپرک برای کاهش آلاینده‌هایی که از آب سطحی وارد آب زیرزمینی می‌شوند مورد توجه قرار گرفته است (Gandy et al., 2007). به‌طور کلی ناحیه هایپرک، منطقه‌ای اشباع زیر بستر رودخانه می‌باشد که آب سطحی وارد این ناحیه شده و پس از طی مسافتی در زیر بستر، دوباره به آب سطحی برمی‌گردد. اختلاط آب سطحی و زیرزمینی از پارامترهای بیوژئوشیمیایی این ناحیه می‌باشد که زیستگاه و پناهگاه برای گونه‌های مختلف ایجاد می‌کند (Datry and Larned, 2008; Stubbington et al., 2009). همچنین آب سطحی رو به پایین، اکسیژن محلول، مواد مغذی و کربن آلی را برای نرخ انتقال و فعالیت‌های بیوژئوشیمیایی تأمین می‌کند (Boulton et al., 1998). زمانی که طول می‌کشد تا جریان رودخانه از بین رسوبات زیر بستر رودخانه عبور کرده و دوباره به سطح بازگردد، به‌عنوان زمان ماند^۳ تعریف می‌شود. زمان ماند مهم‌ترین ویژگی ناحیه هایپرک می‌باشد، زیرا واکنش‌های شیمیایی و زیستی که درون رسوب‌ها رخ می‌دهد بستگی به زمانی دارد که جریان رودخانه در ارتباط با محیط زیر رودخانه می‌باشد (Buffington and Tonina, 2009).

برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی در منطقه هایپرک

1. Tamiarparani
2. Cleansing capacity of river
3. Residence time

اصلی و دشت سیلابی^۲ به بالاترین میزان خود می‌رسد (Wang et al., 2018).

(Ren et al., 2019) جریان آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی و با آزمایش‌های پیشین مقایسه کردند. بر این مبنا سرعت جریان، عمق آب بالادست، ارتفاع دیون و نفوذپذیری بستر بر تبادلات هاپریک بررسی و تجزیه و تحلیل حساسیت عامل‌های مختلف مؤثر انجام شد. نتایج نشان داد که سرعت جریان، ارتفاع دیون و نفوذپذیری رابطه مستقیم و عمق آب بالادست رابطه عکس با تبادلات هاپریک دارد (Ren et al., 2019). (Jamali et al., 2019) به بررسی تبادلات هاپریک در پشته رسوبی میانی پرداختند. آزمایش‌ها در دو حالت مستغرق و غیرمستغرق بررسی شد. نتایج نشان داد شاخص بی‌بعد دبی تبادلی بین جریان سطحی و زیرسطحی، با افزایش دبی جریان کاهش می‌یابد و درصد دبی تبادلی به دبی جریان سطحی در محدوده $\frac{3}{5}$ تا $\frac{7}{5}$ می‌باشد (Jamali et al., 2019). (Movahedi et al., 2019) به بررسی تأثیر توأم نوسان‌های جداره و بستر کانال بر ویژگی‌های ناحیه هاپریک پرداختند. نتایج نشان داد با دو برابر شدن طول موج خیزاب-چالاب دبی بی‌بعد تبادلات هاپریک ۵۷ درصد کاهش و زمان ماند بی‌بعد ۴۷ درصد افزایش می‌یابد. در مدل‌های جداره تنها، با کوچک‌تر شدن مقطع کمترین تنگ‌شدگی، به‌واسطه افزایش گرادیان‌های فشار، دبی بی‌بعد تبادلی افزایش و زمان ماند بی‌بعد کاهش می‌یابد (Movahedi et al., 2019). (Abshouri et al., 2021) الگوی حرکتی تبادلات هاپریک با وجود موانع صلب رودخانه‌ای را در حالت مختلف جریان ریزشی و جریان متغیر سریع تعیین کردند. برای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان زیرسطحی از مدل آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج، سازگاری مناسبی بین الگوی جریان مشاهداتی و محاسباتی در منطقه هاپریک در دو حالت ایجاد پرش و جریان ریزشی نشان داد. همچنین دبی تبادلی و زمان ماند بی‌بعد با افزایش دبی جریان، کاهش یافته است (Abshouri et al., 2021). (Yuan et al., 2021) تبادلات هاپریک را در بستر با پوشش گیاهی بررسی کردند. به منظور بررسی

نیز نشان داد که جریان‌های هاپریک، به‌وسیله‌ی گرادیان‌های فشار دینامیکی در امتداد فرم بستر ایجاد می‌شوند. (Thibodeaux and Boyle, 1987). (Sinha et al., 2017) اثرات نفوذپذیری بستر بر دینامیک جریان را به‌صورت عددی بررسی کردند. شبیه‌سازی فرم بستر دیون نفوذناپذیر روی بستر نفوذپذیر نشان داد که گردابه‌های نعل اسبی در وجه پایینی دیون شکل می‌گیرد و جدایش جریان رخ می‌دهد. در شبیه‌سازی دیون نفوذپذیر روی بستر نفوذپذیر اندازه سرعت کمتر از دیون نفوذناپذیر است. برای بستر نفوذپذیر جریان رو به بالا، باعث بالا رفتن جریان جداشده از بستر می‌شود و با ایجاد گردابه‌ها موجب تغییر لایه برشی می‌گردد (Sinha et al., 2017). (Huang and Chui, 2018) معادله‌های تجربی را برای پیش‌بینی مقیاس، زمان ماند، و شار تبادل هاپریک در یک توالی خیزاب-چالاب به‌وسیله دبی جریان، هندسه فرم بستر، هدایت هیدرولیکی و جریان آب زیرزمینی به‌دست آوردند. ایشان از ترکیب روش‌ها و نتایج (Trauth et al., 2013) و (Tonina and Buffington, 2011) برای پیش‌بینی سه پارامتر مهم تبادل هاپریک شامل عمق میانگین، زمان ماند متوسط و شار با در نظر گرفتن جریان آب زیرزمینی استفاده کردند. به‌طور کلی برای معادله‌های حاصل، از ۸۰ درصد مجموعه داده‌های (Trauth et al., 2013) استفاده گردید و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای اعتبارسنجی^۱ در نظر گرفته شد. داده‌های (Tonina, 2005) و (Tonina and Buffington, 2011) و (Storey et al., 2003) نیز برای اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که معادله‌های به‌دست آمده می‌تواند برای پیش‌بینی کیفیت آب و احیای تبادلات هاپریک استفاده شود (Huang and Chui, 2018). (Wang et al., 2018) به شبیه‌سازی عددی جریان هاپریک عرضی در رودخانه مرکب پرداختند. بررسی مدل‌سازی عددی نشان داد که مقطع‌های مرکب می‌تواند جریان عرضی قابل‌ملاحظه‌ای در مقطع ایجاد کند و مقطع مرکب در جریان هاپریک عرضی نسبت به فرم بستر دیون طولی مؤثرتر است و نرخ تبادلات هاپریک در نزدیک مرز تماس شیب‌دار مقطع

2. Bank

1. Validation

صورت نگرفته است، لذا تأثیر برداشت شن و ماسه بر جریان هاپیریک می‌تواند بااهمیت باشد. در این تحقیق اثر طول‌های مختلف حفره، عمق آب بالادست و دبی مختلف جریان بر مشخصات ناحیه هاپیریک بررسی و نتایج عددی مدل سطحی و زیرسطحی با مشاهده‌های آزمایشگاهی کالیبره شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در کانالی به طول ۷ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر با شیب ثابت ۰/۵ درصد انجام شد (شکل ۳). برای آرام کردن جریان ورودی از آرام‌کننده در ابتدای کانال و از دريچه در انتهای کانال به‌منظور تنظیم عمق جریان استفاده شد. شکل ۴ نمای جانبی از حفره برداشت را در کانال نشان می‌دهد.



Fig. 3 View of the laboratory flume
شکل ۳ نمای از کانال آزمایشگاهی

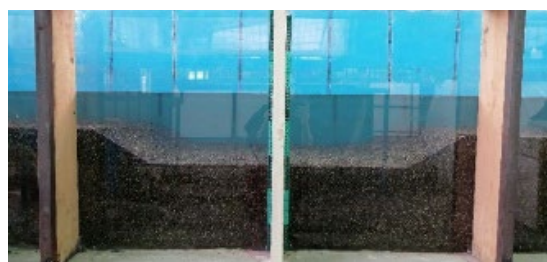


Fig. 4 View of the pit mining
شکل ۴ نمای از حفره برداشت شن و ماسه

برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت‌سنج الکترومغناطیس^۱ با دقت ± 0.5 سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد. سرعت طولی جریان در مقطع‌های مختلف در طول کانال و در عمق‌های مختلف از آب اندازه‌گیری شد. مبنای عملکرد سنسور الکترومغناطیس سرعت‌سنج بر مبنای قانون فارادی می‌باشد که طبق این قانون، تغییر در شار مغناطیسی،

تبادلات هاپیریک مجموعه‌ای از مدل‌های عددی سطحی و زیرسطحی کوپل شدند. نتایج نشان داد جریان هاپیریک در همه‌ی شرایط با وجود پوشش گیاهی رخ داد و دبی تبادلی با افزایش فاصله گیاهان افزایش یافت. همچنین پوشش گیاهی می‌تواند دبی تبادلی بزرگ‌تری را از طریق ناحیه‌های تبادلی کم‌عمق ایجاد کند (Yuan et al., 2021).

(Pourhosein ghadi et al., 2022) تأثیر شرایط مختلف هیدرولیکی بر جریان هاپیریک در پیرامون سرریز گابیونی را بررسی کردند. مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل با استفاده از مدل شبیه‌سازی زیرسطحی مدل میوس انجام شد. نتایج نشان داد در محیط‌های متخلخل مانند سرریز گابیونی، تغییرات دبی تبادلی هاپیریک بیشتر ناشی از اختلاف تراز سطح آب در دو طرف سازه و بالادست و پایین‌دست است که این اختلاف با افزایش دبی کاهش می‌یابد و دبی تبادلی نیز روند کاهشی را دنبال می‌کند (Pourhosein ghadi et al., 2022).

(Xiao et al., 2022) به بررسی جریان هاپیریک عرضی و واکنش‌های بیوژئوشیمیایی در کانال مرکب پرداختند. در بررسی‌های آنان مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی با مدل دو بعدی آب زیرزمینی و مدل بیوژئوشیمیایی کوپل شد. اثرات زاویه شیب بین دشت سیلابی و مقطع اصلی و غلظت املاح آب زیرزمینی روی فرایندهای بیوژئوشیمیایی بررسی شد. نتایج نشان هر چه زاویه بین بین مرز تماس دشت سیلابی و مقطع اصلی کوچک‌تر باشد به حذف بیشتر آلاینده‌ها کمک می‌کند (Xiao et al., 2022). Jung and Kim (2023) به بررسی عددی تأثیر تبادلات هاپیریک روی زمان ماند املاح در سیستم جریان آب سطحی در کانال باز و ناحیه هاپیریک پرداختند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که جریان هاپیریک به صورت یک محرک در جریان آب سطحی عمل می‌کند و تبادل جریان سطحی و زیرسطحی، انتقال املاح را درون بستر به تأخیر می‌اندازد. افزون بر این، افزایش سرعت جریان سطحی، جریان هاپیریک را تشدید می‌کند (Jung and Kim, 2023).

با توجه به اینکه در زمینه تأثیر برداشت شن و ماسه بر مشخصات ناحیه هاپیریک بررسی آزمایشگاهی و عددی

1. Electromagnetic Current Velocity Meter

متوسط ۲/۳ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ۲/۸۹ و به عمق ۰/۴ متر برای شکل‌گیری تبادلات هاپریک، پر شد. در شکل ۶ منحنی دانه‌بندی رسوب‌ها ارائه شده است. حفره‌های دوزنقه‌ای شکل با زاویه‌قرارگیری مصالح (۳۰ درجه) و ارتفاع ۰/۱ متر با طول‌های مختلف L در وسط کانال حفر شد (شکل ۷). دبی ۲۳/۸ لیتر بر ثانیه و دریاچه به‌گونه‌ای تنظیم شد که هیچ‌گونه حرکت رسوبی ملاحظه نگردد. پس از اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان، برداشت داده‌های موردنیاز برای تعیین مشخصات ناحیه هاپریک آغاز شد تا اثر طول حفره برداشت و عمق آب بالادست بر تبادلات هاپریک بررسی و ارزیابی شود. برای تعیین مسیرهای خطوط هاپریک تزریق ماده رنگی درون بستر رسوبی انجام شد. همچنین آزمایش‌ها در محدوده جریان آشفته (به‌گونه‌ای که رسوب‌ها حرکتی نداشته باشند) با رینولدز ۱۹۸۳۳/۳۳ و ۲۱۲۱۲/۱۲ انجام شد.



Fig. 7 Longitudinal and top view of the pit
شکل ۷ نمای طولی و نما از بالای حفره

محدوده تغییرات ابعاد حفره برداشت بنابر نتایج بررسی‌های (Lee et al., 1993), Barman et al. (2019), و Jang et al. (2015) و Haghazari et al. (2019) و با توجه به دانه‌بندی مصالح تعیین گردید. در این تحقیق محدوده تغییرات طول حفره به عمق آب بالادست برابر بررسی‌های

جریانی را در ماده رسانا ایجاد می‌کند. آب نقش رسانا را ایفا می‌کند و هنگامی که از میدان مغناطیسی عبور می‌کند ولتاژ متناسب با آن در سیال القا می‌شود و ولتاژ القایی با سرعت جریان رابطه خطی دارد. خروجی دیجیتال آن از طریق رابطی که به سنسور متصل است در لپ‌تاپ قابل استخراج است (شکل ۵). با قرار دادن سنسور در هر نقطه از عمق آب در کانال ۱۵۰۰ داده از سرعت برای آن نقطه استخراج می‌شود که میانگین ۱۵۰۰ داده به‌عنوان سرعت میانگین در هر نقطه استفاده شد.

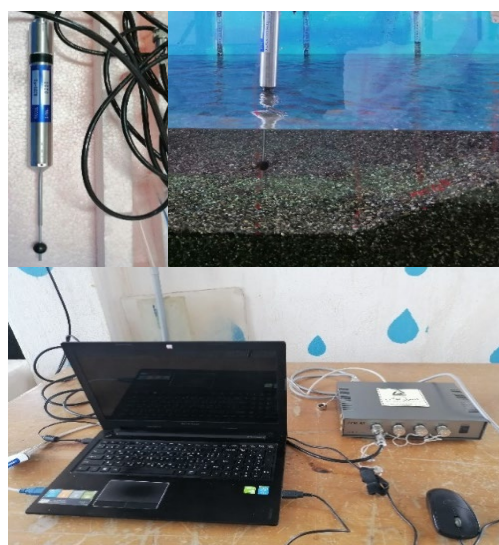


Fig. 5 Electromagnetic Current Velocity Meter
شکل ۵ سرعت‌سنج الکترومغناطیس

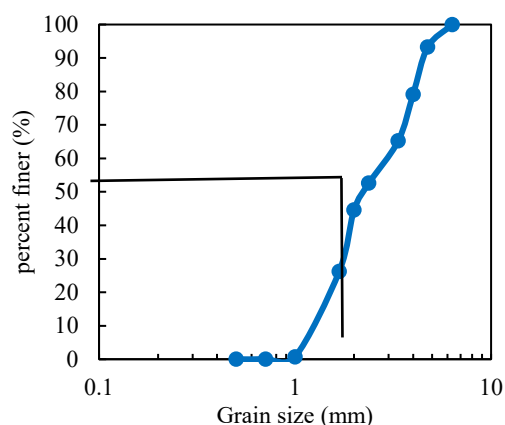


Fig. 6 Granulation curve
شکل ۶ منحنی دانه‌بندی

کانال با استفاده از رسوب‌هایی با دانه‌بندی در محدوده بررسی‌های برداشت شن و ماسه (Rovira et al., 2005; Wu and Wang, 2008; Mori et al., 2011)

پارامترهای مؤثر در تبدلات هایپریک بررسی شد (Marzadri et al., 2010).

$$q^* = \frac{Q_{ex}}{KA} \quad (1)$$

$$t^* = \frac{K \times RT}{H} \quad (2)$$

$$d^* = \frac{d_H}{H} \quad (3)$$

و زمان ماند و عمق نفوذ بی بعد برای آزمایش‌هایی با عمق آب متفاوت، به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ ارائه می‌شود. همچنین درصد دبی تبدلی (Q_p) از رابطه ۶ به دست می‌آید.

یادشده بین ۲/۴۷۵ تا ۱۶/۳۹۳ می‌باشد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در بسترهای E1 تا E4 عمق آب بالادست ۰/۰۶۱ متر و طول حفره به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر می‌باشد. بسترهای E5 تا E8 نیز طول حفره به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر با عمق آب ۰/۱۰۱ متر ایجاد شد. ارتفاع حفره و دبی جریان به ترتیب ۰/۱ متر و ۲۳/۸ لیتر بر ثانیه و در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت می‌باشد. پارامترهای بی بعد ناحیه هایپریک شامل دبی تبدلی، زمان ماند و عمق نفوذ برای آزمایش‌هایی با تغییر طول حفره، به ترتیب به صورت رابطه‌های ۱ تا ۳ تعریف می‌شود. در بررسی‌های پیشین نیز دبی تبدلی و زمان ماند به‌عنوان

جدول ۱ مشخصات هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 1 Geometrical and hydraulic characteristics of the experiments

Experiments	Discharge (L/s)	Upstream water depth (m)	Pit lengths (m)	Pit heights (m)
E1	23.8	0.061	0.25	0.1
E2			0.5	0.1
E3			0.75	0.1
E4			1	0.1
E5	0.101	0.101	0.25	0.1
E6			0.5	0.1
E7			0.75	0.1
E8			1	0.1

۲-۲- مدل عددی فلوننت و کامسول

برای شبیه‌سازی جریان سطحی روی حفره و جریان زیرسطحی هایپریک در رسوب‌ها از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) استفاده شده است (Cardenas and Wilson 2007a, 2007b, 2007c; Chen et al., 2015). این مدل‌سازی با کوپل کردن جریان سطحی و زیرسطحی انجام می‌شود به طوری که هد هیدرولیکی محاسبه شده در سطح تماس آب سطحی و زیرسطحی در امتداد بستر به عنوان شرط مرزی در پشت^۲ در بالای دامنه مدل آب زیرزمینی اعمال می‌شود. وجه پایینی مدل آب سطحی به‌عنوان مرز بدون جریان^۳ تنظیم شده است (Chen et al., 2015).

$$t^* = \frac{K \times RT}{L} \quad (4)$$

$$d^* = \frac{d_H}{L} \quad (5)$$

$$Q_p = \frac{Q_{ex}}{Q} \times 100 \quad (6)$$

که در آن RT میانگین زمان ماند، Q_{ex} دبی تبدلی، Q دبی جریان، H عمق جریان بالادست، K هدایت هیدرولیکی، d_H میانگین بیشینه عمق نفوذ ذرات، L طول حفره و A سطح تماس جریان سطحی و زیرسطحی می‌باشد. همچنین توزیع فشار به‌دست‌آمده برای هر آزمایش با استفاده از رابطه ارائه‌شده توسط Chen et al. (2015) بی‌بعد گردید (رابطه ۷). p^* فشار بی‌بعد، p_{min} کمترین فشار و p_{max} بیشترین فشار تعریف شده است.

$$p^* = \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} \quad (7)$$

1. Computational Fluid Dynamics
2. Drihlet boundary
3. No flow

$$\nabla \left(\frac{\kappa}{\mu} \nabla \times P \right) = 0 \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، κ نفوذپذیری ذاتی و عبارت درون پرانتز سرعت داری می‌باشد.

شرط مرزی برای دامنه جریان سطحی و دامنه محیط متخلخل (جریان زیرسطحی) در شکل ۸ نشان داده شده است. برای مدل محاسباتی زیرسطحی، تخلخل با توجه به اندازه ذرات و هدایت هیدرولیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی محیط متخلخل برابر رابطه ۱۳ محاسبه شد (Carman, 1937; Urumovic, 2016). تخلخل و هدایت هیدرولیکی به ترتیب ۳۴ درصد و ۰/۰۲۵۹۳ متر بر ثانیه به دست آمد.

$$k = \frac{\rho g}{\mu} \frac{\varphi^3}{180(1-\varphi)^2} d_m^2 \quad (13)$$

k ، ρ ، μ و φ به ترتیب هدایت هیدرولیکی، چگالی، لزجت دینامیکی، تخلخل و قطر متوسط ذرات می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی مدل

برای کالیبراسیون مدل سطحی فلونت، نیمرخ سطح آب و سرعت جریان سطحی در آزمایشگاه و مدل مقایسه شد. نیمرخ سطح آب با استفاده از دستگاه ترازسنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر در محدوده حدود ۲ متر از وسط کانال اندازه‌گیری شد و با نیمرخ سطح آب حاصل از شبیه‌سازی فلونت مقایسه گردید. شکل ۹ نیمرخ سطح آب در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ مقایسه نیمرخ سطح آب شبیه‌سازی و مشاهداتی برای بستر با طول حفره ۱ متر را نشان می‌دهد. در محل حفره با توجه به پایین افتادگی سطح بستر رسوب‌ها، به دلیل زیر بحرانی بودن جریان، کمی سطح آب بالا می‌آید که نتیجه شبیه‌سازی در فلونت نیز بیانگر همین موضوع می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطا^۶ برای نیمرخ سطح آب برای بستر یادشده ۰/۰۰۲ متر و میزان درصد خطای نیمرخ سطح آب محاسباتی به مشاهداتی در محدوده ± 2 درصد محاسبه گردید.

در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان سطحی درون حفره از نرم‌افزار حجم محدود انسیس فلونت^۱ استفاده شد. این نرم‌افزار با استفاده از روش حجم محدود به حل معادله‌های دیفرانسیلی و انتگرالی می‌پردازد. با استفاده از روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات عددی می‌توان جریان سیال را به‌طور دقیق بررسی کرد. در نرم‌افزار فلونت برای شبیه‌سازی جریان آشفته، معادله‌های میانگین ناویر استوکس^۲ (RANS) با مدل اشفتگی κ - ω حل شد. برای سیال تراکم ناپذیر، معادله‌های پیوستگی و ناویر استوکس متوسط رینولدزی به ترتیب به صورت رابطه‌های ۸ و ۹ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (9)$$

که در آن چگالی آب، μ لزجت دینامیکی، U_j و U_i سرعت متوسط، u'_j و u'_i سرعت لحظه‌ای، P فشار متوسط و x_j و x_i جهت می‌باشد. رابطه ۱۰ تانسور نرخ کرنش^۳ (S_{ij}) را نشان می‌دهد:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

تنش رینولدزی τ_{ij} برابر رابطه ۱۱ وابسته به میانگین نرخ کرنش است (Ren et al., 2019).

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_j u'_i} = \nu_t (2S_{ij}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (11)$$

برای شبیه‌سازی جریان زیرسطحی از نرم‌افزار المان محدود کامسول^۴ استفاده شد. این نرم‌افزار بر مبنای معادله‌های دیفرانسیل جزئی^۱ می‌باشد که مدل‌ها با پارامترهای فیزیکی و ویژگی‌های مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهد. از نرم‌افزار کامسول برای حل معادله‌های آب زیرزمینی استفاده می‌شود و برای جریان در رسوب‌ها قانون داری و معادله پیوستگی برای سیال تراکم‌ناپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Cardenas and Bear, 1972; Wilson, 2007a, 2007b; Trauth et al., 2013).

1. Finite Volume Ansys Fluent 18.2.2
2. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations
3. Strain rate tensor
4. Finite Element Comsol 6.1

5. Partial difference equation

6. Root Mean Square Error

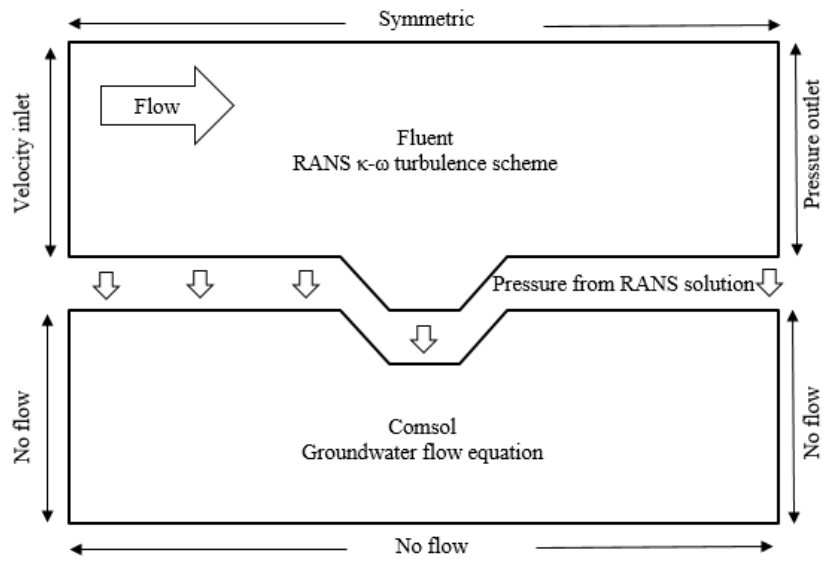


Fig. 8 Conceptual model and boundary conditions

شکل ۸ مدل مفهومی و شرایط مرزی مدل



Fig. 9 Free surface elevation in the laboratory

شکل ۹ نیمرخ سطح آب در آزمایشگاه

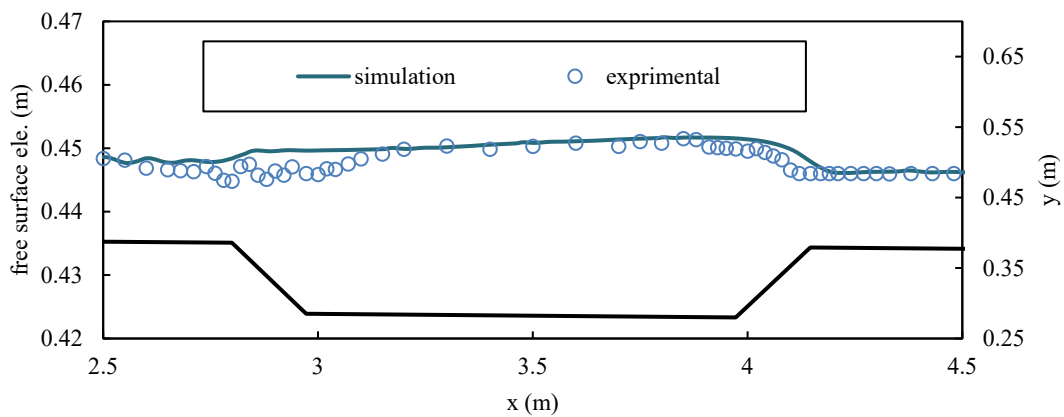


Fig. 10 experimental and simulation free surface elevation in E4 experiment

شکل ۱۰ نیمرخ سطح آب آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در آزمایش E4

حفره در مقطع‌های b و f سرعت در نزدیکی کف کانال منفی و پس از آن با افزایش عمق، مثبت می‌گردد. در وسط حفره در مقطع‌های c، d و e نیز مقادیر سرعت در نزدیکی کف کانال منفی می‌باشد سپس روند افزایشی و در نهایت ثابت می‌شود. مقادیر سرعت منفی در وسط حفره در نزدیکی کف کانال در مقطع‌های a، b، c، d، e و f نشان‌دهنده وجود جریان چرخشی می‌باشد. روند نیمرخ توزیع قائم سرعت شبیه‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی همخوانی داشته و RMSE به‌دست آمده از مقایسه سرعت ۰/۰۴۸ می‌باشد.

شکل ۱۱ مقایسه سرعت اندازه‌گیری در آزمایشگاه و سرعت شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. نیمرخ توزیع سرعت قائم با استفاده از سرعت‌سنج الکترومغناطیس در ۷ مقطع در عمق‌های مختلف برای بستر E1 اندازه‌گیری شد. سپس با نیمرخ سرعت قائم حاصل از خروجی نرم‌افزار فلونت در مقطع‌های یادشده مقایسه گردید. محور افقی سرعت طولی و محور قائم عمق را نشان می‌دهد. برابر شکل ۱۱، مقادیر سرعت در نزدیکی کف در مقطع‌های a و g مثبت و با افزایش عمق آب در هر مقطع در آغاز روند افزایشی داشته و پس از آن ثابت می‌شود. روی شیب‌های داخلی

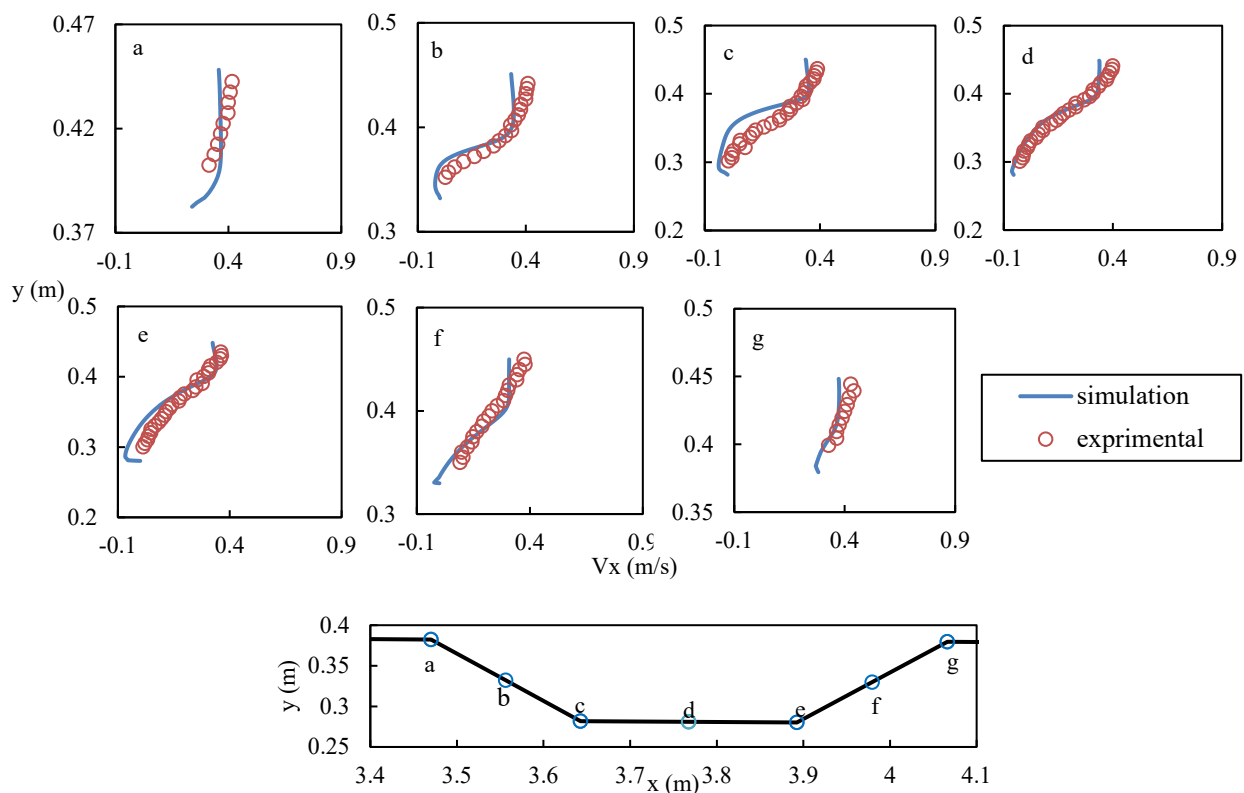


Fig. 11 Comparison of experimental and simulation velocity at different points of the pit in the E1 experiment
 شکل ۱۱ مقایسه سرعت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در نقطه‌های مختلف حفره در آزمایش E1

حفره به سمت بالادست و پایین دست کانال حرکت می‌کند و پس از آن به صورت جریان رو به بالا از محیط متخلخل در بالادست و پایین دست خارج می‌شود و به جریان سطحی می‌پیوندد. بررسی نقطه‌های تزریق در آزمایشگاه نشان می‌دهد که الگوی جریان در مدل زیرسطحی شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار کامسول با الگوی جریان در آزمایشگاه همخوانی دارد.

برای ارزیابی مدل زیرسطحی کامسول از روش ردیابی خطوط جریان با استفاده از تزریق ماده رنگی در آزمایشگاه استفاده شد. الگوی جریان هاپیریک با تزریق ماده رنگی در نقطه‌های مختلف a، b، c و d داخل بستر رسوبی مشخص شد. شکل ۱۲ مسیر جریان هاپیریک آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول را نشان می‌دهد. جریان رو به پایین به سمت کف کانال از وسط

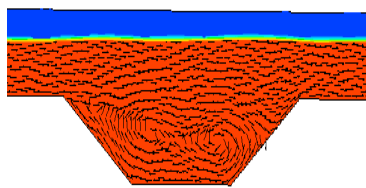


Fig. 14 Simulation eddy current (E1 test)

شکل ۱۴ جریان چرخشی شبیه‌سازی شده (آزمایش E1)

۳-۲- اثر طول حفره و عمق آب بر توزیع فشار

شکل ۱۵ توزیع فشار بی‌بعد را در بسترهای مختلف نشان می‌دهد. ناحیه‌های بیشینه فشار با رنگ قرمز در وسط حفره و کمینه فشار در بالادست و پایین‌دست حفره با رنگی آبی مشخص شده است. برای حرکت ذرات داخل بستر رسوبی برابر با گرادیان فشار ایجاد شده در حفره می‌باشد به طوری که ذرات از ناحیه‌های بیشینه فشار وسط حفره که عمق آب در آن نسبت به دیگر قسمت‌ها بیشتر است به سمت ناحیه‌های کمینه فشار آبی رنگ در بالادست و پایین‌دست کانال حرکت می‌کنند. همچنین با افزایش طول حفره وسعت ناحیه کمینه فشار در مقایسه با کمترین طول حفره، کاهش می‌یابد ولی افزایش طول حفره، تأثیری بر محل بیشینه و کمینه فشار نداشته است. برابر شکل ۱۵ افزایش عمق آب نیز تأثیری بر وسعت و محل ناحیه بیشینه فشار و کمینه فشار نداشته است. بنابراین بسترهای E1 و E5 با طول حفره ۰/۲۵ متر کمترین وسعت بیشینه فشار و E4 و E8 با طول حفره ۱ متر بیشترین وسعت بیشینه فشار را داراست. از طرفی، ردیابی ذرات داخل بستر رسوبی و خطوط هایدریک وابسته به اثر گرادیان فشار و تغییرات هد هیدرولیکی می‌باشد. افزایش عمق آب باعث افزایش هد هیدرولیکی در بسترها می‌شود و بیشترین تغییرات هد هیدرولیکی در بیشینه طول حفره مورد آزمایش در هر دو عمق آب در بسترهای E4 و E8 با طول حفره ۱ متر رخ می‌دهد و مقادیر آن به ترتیب برای عمق ۰/۰۶۱ و ۰/۱۰۱ متر، ۰/۱۰۶۴۴۲ و ۰/۱۰۶۴۵۱ متر می‌باشد و کمترین تغییرات هد هیدرولیکی در بسترهای E1 و E5 با کمترین طول حفره ۰/۲۵ متر در عمق آب ۰/۰۶۱ و ۰/۱۰۱ متر رخ می‌دهد که به ترتیب ۰/۱۰۳۸۶۵ و ۰/۱۰۵۱۷۴ متر محاسبه گردید.

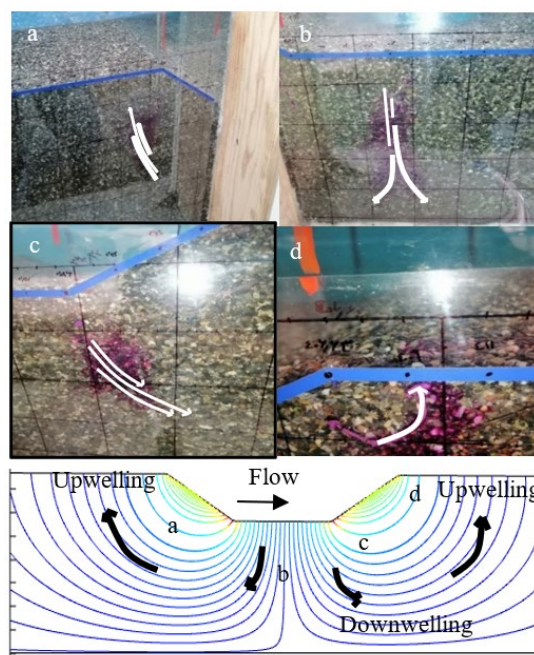


Fig. 12 Comparison of experimental and simulation path lines at different points of the pit in the E5 experiment

شکل ۱۲ مقایسه مسیرهای جریان آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در ن نقطه‌های مختلف حفره برای آزمایش E5

شکل ۱۳ جریان چرخشی ایجاد شده با قرار دادن نخ متصل به میله فلزی در حفره را نشان می‌دهد. با وصل کردن نخ به انتهای میله فلزی و قرار دادن آن به داخل حفره پر از آب در کانال، در داخل حفره بر خلاف قسمت‌های دیگر کانال، مسیر نخ به صورت چرخشی درآمده که نشان‌دهنده وجود گردابه‌هایی در این نقطه‌ها می‌باشد. در شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلونت برابر شکل ۱۴ وجود گردابه‌ها را داخل حفره اثبات می‌کند که نشان‌دهنده جریان گردابی در دو طرف داخلی حفره‌ها است.

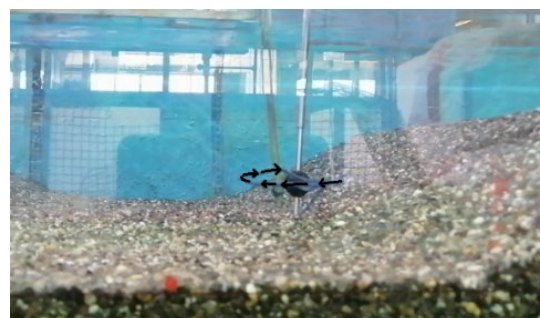


Fig. 13 Eddy current in experiment (E1 test)

شکل ۱۳ جریان چرخشی ایجاد شده در آزمایشگاه (آزمایش E1)

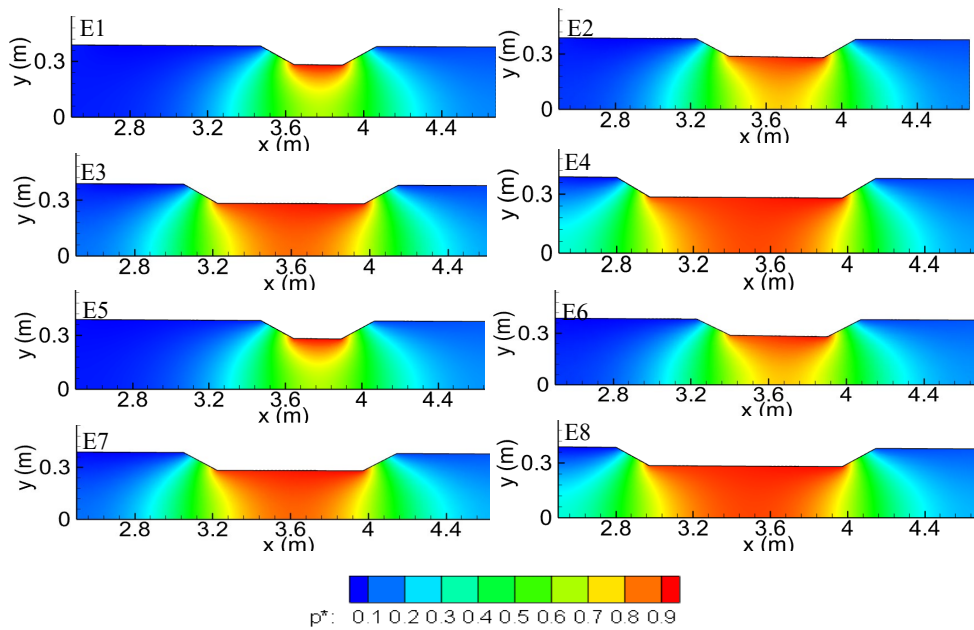


Fig. 15 Dimensionless pressure distribution in the studied experiments

شکل ۱۵ توزیع فشار بی بعد در آزمایش های مورد مطالعه

۰/۱۰۱ متر به ترتیب ۱۰/۰۰۳ و ۶/۱۷۱ درصد برای آزمایش های E5 و E8 می باشد. مقایسه بسترهای E1 و E5 نشان می دهد افزایش عمق آب در آزمایش هایی با طول حفره ۰/۲۵ متر باعث افزایش درصد دبی تبدالی از ۹/۶۱۲ به ۱۰/۰۰۳ گردیده است. همچنین افزایش عمق آب در بسترهای E2 و E6 که طول حفره در آنها ۰/۵ متر می باشد موجب افزایش درصد دبی تبدالی از ۸/۰۵۲ به ۸/۱۷۲ شده و درصد دبی تبدالی در بسترهای E4 و E8 با طول حفره ۱ متر از ۶/۱۳۳ به ۶/۱۷۱ افزایش داشته است. در بسترهای E3 و E7 با طول حفره ۰/۷۵ متر، افزایش عمق آب تفاوت چندانی روی درصد دبی تبدالی ندارد و از ۶/۹۸۵ به ۶/۹۸۹ افزایش یافته است.

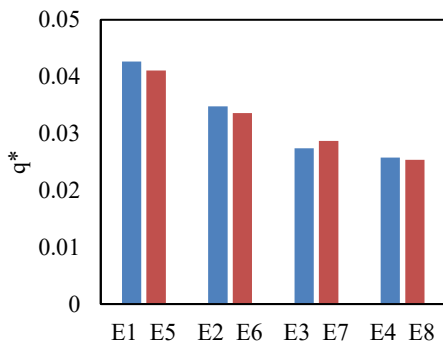


Fig. 16 Comparison of dimensionless hyporheic exchange in experiments

شکل ۱۶ مقایسه دبی تبدالی بی بعد در آزمایش ها

۳-۳- مقایسه دبی تبدالی

شکل ۱۶ مقایسه دبی تبدالی بی بعد برای بسترهای مورد آزمایش را نشان می دهد. افزایش طول حفره در بستر E4 نسبت به E1 و در بستر E8 نسبت به E5، نشان دهنده کاهش دبی تبدالی بی بعد است. بنابراین رابطه معکوسی بین طول حفره و دبی تبدالی بی بعد برقرار می باشد که نشان می دهد با افزایش طول حفره، دبی تبدالی کاهش می یابد و کاهش دبی تبدالی بی بعد باعث کاهش سهم دبی عبوری به داخل بستر رسوبی می شود. در مطالعات (Cardenas and Wilson (2007a) با افزایش نسبت طول دیون، دبی تبدالی کاهش می یابد که با مطالعات حاضر همخوانی دارد. با افزایش طول حفره، گردابه های ایجاد شده داخل حفره بزرگ تر و ذرات بیشتری از جریان سطحی وارد محیط متخلخل رسوبی می شوند و در تبادل هایپرپیک شرکت می کنند. نتایج بررسی طول های مختلف نشان داد با افزایش طول حفره، ذرات با زمان ماند طولانی تر و سرعت کمتر داخل بستر رسوبی حرکت می کنند که باعث تبادل کمتری با جریان سطحی می شوند.

بیشینه و کمینه درصد دبی تبدالی برای عمق ۰/۰۶۱ متر ۹/۶۱۲ و ۶/۱۳۳ برای آزمایش E1 و E4 و برای عمق

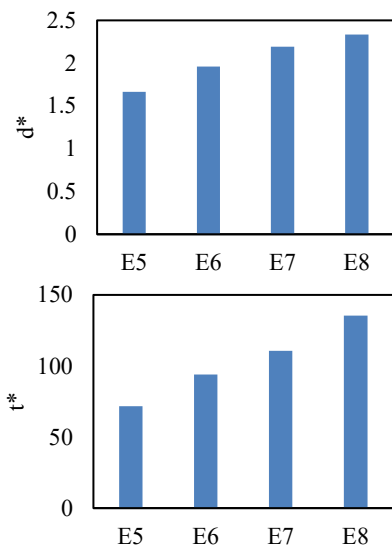


Fig. 18 Comparison of dimensionless residence time and penetration depth in different pit lengths in the depth of 0.101 meters

شکل ۱۸ مقایسه زمان ماند و عمق نفوذ بی بعد در طول های مختلف حفره در عمق ۰/۱۰۱

۳-۵- اثر عمق آب بر عمق نفوذ و زمان ماند

بی بعد

شکل ۱۹ مقایسه زمان ماند و بیشینه عمق نفوذ بی بعد را برای دو عمق آب ۰/۰۶۱ و ۰/۱۰۱ متر نشان می دهد. مقایسه بسترهای مورد آزمایش بیانگر آن است که بیشینه افزایش عمق نفوذ بی بعد مربوط به بسترهای E1 و E5 با طول حفره ۰/۲۵ متر از ۰/۶۴۹ به ۰/۶۷۲ می باشد و کمینه افزایش عمق نفوذ برای بسترهای E3 و E7 با طول حفره ۰/۷۵ متر از ۰/۲۹۵۱ در عمق آب ۰/۰۶۱ متر به ۰/۲۹۵۳ در عمق آب ۰/۱۰۱ متر می باشد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش عمق آب از ۰/۰۶۱ به ۰/۱۰۱، افزایش عمق نفوذ بی بعد را به دنبال دارد. برابر شکل ۱۹ محدوده تغییرات زمان ماند بی بعد در آزمایش ها از ۱۳/۵۴۵ تا ۲۹/۰۰۱ می باشد که بیشینه افزایش زمان ماند بی بعد مربوط به بسترهای E1 و E5 از ۲۸/۱۵۰ به ۲۹/۰۰۱ و کمترین افزایش زمان ماند بی بعد برای بسترهای E4 و E8 از ۱۳/۵۴۵ به ۱۳/۶۸۱ محاسبه شد. به نظر می رسد در عمق کمتر، میدان جریان تحت تأثیر گردابه آشفتگی است که موجب زمان ماند و عمق نفوذ کوتاه تر ذرات گردیده است.

۳-۴- اثر طول حفره بر عمق نفوذ و زمان ماند

شکل ۱۷ و ۱۸ مقایسه زمان ماند میانگین بی بعد و عمق نفوذ بی بعد را در بسترهایی با طول های مختلف حفره ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر در دو عمق آب نشان می دهد. نتایج بیانگر این است که بسترهای E4 و E8 بیشترین میزان عمق نفوذ و زمان ماند بی بعد را دارد و E1 و E5 کمترین مقدار بی بعد از پارامترهای بالا را نشان می دهد. حداکثر عمق نفوذ بی بعد در بسترهای E4 و E8 با طول حفره ۱ متر به ترتیب ۳/۸۲ و ۲/۳۳ می باشد و بیشینه زمان ماند بی بعد نیز مربوط بسترهای E4 و E8 با مقادیر ۲۲۲/۰۵ و ۱۳۵/۴۵ ارائه شده است. افزایش طول حفره موجب افزایش عمق نفوذ بی بعد و زمان ماند بی بعد می شود بنابراین رابطه مستقیم بین طول حفره و این شاخص های بی بعد برقرار است. به عبارتی هنگامی که طول حفره افزایش می یابد ذرات باید مسیر طولانی تری را طی کنند تا به دلیل گرادیان فشار به سطح آب برسند و به تبع زمان نیز افزایش می یابد. طولانی تر شدن مسیر ذرات نیز باعث کاهش سرعت عبوری ذرات در محیط متخلخل می شود در نتیجه عمق نفوذ افزایش می یابد.

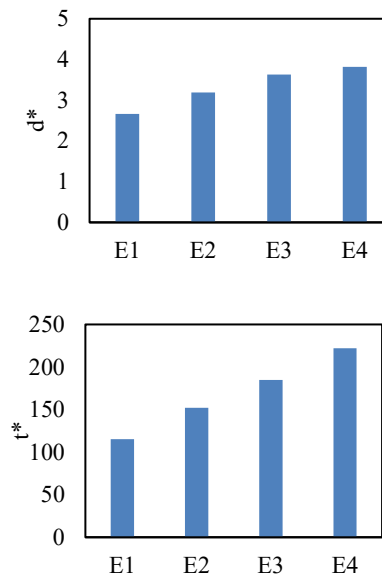


Fig. 17 Comparison of dimensionless residence time and penetration depth in different pit lengths in the depth of 0.061 meters

شکل ۱۷ مقایسه زمان ماند و عمق نفوذ بی بعد در طول های مختلف حفره در عمق ۰/۰۶۱ متر

خیزاب و چالاب توزیع مقدار حدی تعمیم یافته را پیشنهاد دادند.

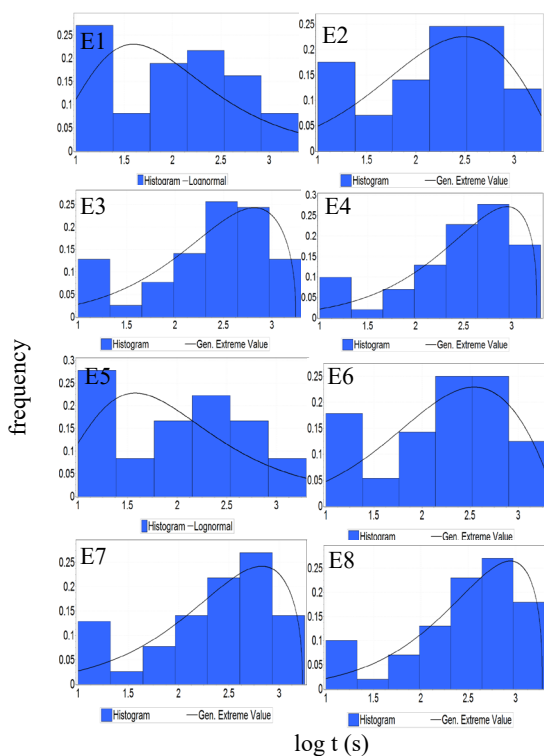


Fig. 20 Histogram of residence time distribution in experiment

شکل ۲۰ هیستوگرام توزیع زمان ماند در آزمایش‌ها

۷-۳- اثر دبی‌های مختلف جریان بر مشخصات بی‌بعد ناحیه‌های پیریک

از جمله عامل‌های مؤثر بر مشخصات ناحیه‌های پیریک، دبی جریان است. در این تحقیق پارامترهای بی‌بعد ناحیه‌های پیریک برای سه دبی ۱۰، ۲۳/۸ و ۴۰ لیتر بر ثانیه با استفاده از نرم‌افزارهای فلونت و کامسول شبیه‌سازی و مقایسه شد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های شبیه‌سازی

Table 2 Geometrical and hydraulic characteristics of the simulation models

Models	Discharge (L/s)	Upstream water depth (m)	Pit length (m)	Pit height (m)
EQ1	10			
E2	23.8	0.061	0.5	0.1
EQ2	40			

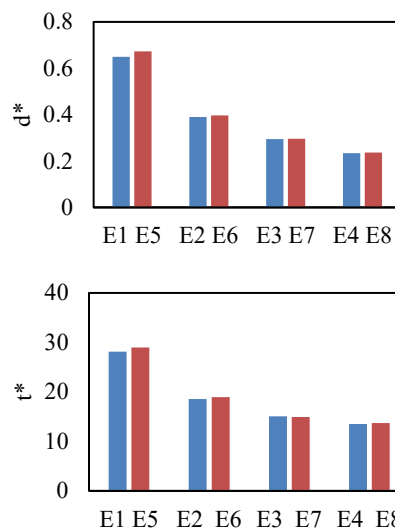


Fig. 19 Comparison of dimensionless residence time and penetration depth in different depths

شکل ۱۹ مقایسه زمان ماند و عمق نفوذ بی‌بعد در عمق‌های مختلف

۳-۶- هیستوگرام توزیع زمان ماند

شکل ۲۰ هیستوگرام توزیع زمان ماند میانگین را برای همه‌ی آزمایش‌ها نشان می‌دهد. هیستوگرام توزیع زمان ماند برای آزمایش E1 و E5 که طول حفره کمتری نسبت به دیگر حفره‌ها دارد توزیع لوگ نرمال^۱ می‌باشد که نشان می‌دهد تعداد ذرات بیشتری با زمان ماند کوتاه‌تر داخل بستر رسوبی E1 و E5 وارد و سپس به جریان سطحی برمی‌گردد. در بسترهای E4 و E8 که بیشترین طول حفره را دارد طبق آزمون کلموگوروف اسمیرنوف^۲ مقادیر حدی تعمیم یافته^۳ توزیع مناسب‌تری است. هیستوگرام در بسترهای E4 و E8 نشان‌دهنده این است که ذرات زمان بیشتری را داخل بستر رسوبی طی می‌کنند. برای بسترهای E2، E3، E6 و E7 با افزایش طول حفره میزان مشارکت ذرات با زمان ماند بالا افزایش می‌یابد. هیستوگرام توزیع زمان ماند با تغییر عمق تغییری نداشته است. هیستوگرام توزیع زمان ماند در مطالعات et al. (2013) Trauth روی خیزاب و چالاب و et al. (2019) بر پشته میانی از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند. همچنین Movahedi et al. (2019) بر روی فرم بستر

1. Lognormal
2. Kolmogorov Smirnov
3. Generalized Extreme Value Distribution

در ناحیه‌های پرفشار وارد محیط متخلخل زیرین می‌شوند به دلیل سرعت بالای جریان سطحی در زمان کمتری از محیط متخلخل خارج و به سمت ناحیه‌های کم‌فشار می‌روند به عبارتی مدت زمان کمتری را در زیر بستر رسوبی سپری می‌کنند و به علت خروج زودتر ذرات در مقایسه با بستر EQ1 با دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه، عمق نفوذ کمتری دارند. محاسبه میانگین بیشینه عمق نفوذ در شکل ۲۲ بیانگر کاهش عمق نفوذ در دبی بالا می‌باشد. برخلاف دبی‌های پایین که کاهش دبی و سرعت کم جریان، موجب ماندگاری بیشتر ذرات در بستر رسوبی می‌شود و با طی کردن مسیر طولانی بیشتر، به عمق نفوذ بالاتر کمک می‌کنند. بیشینه زمان ماند و عمق نفوذ بی‌بعد برای بستر EQ1 با دبی کمینه ۱۰ لیتر بر ثانیه، $4/3860$ و $212/643$ و کمینه مقادیر این دو معیار بی‌بعد برای بستر EQ2 با دبی بیشینه ۴۰ لیتر بر ثانیه، $2/416$ و $114/116$ محاسبه شد. مطالعات (Trauth, Marzdari et al. (2010), (2013) et al., (2019) Movahedi et al. و (2021) al. نیز نشان داد با افزایش دبی و به دنبال آن افزایش عدد رینولدز زمان ماند بی‌بعد کاهش می‌یابد. بنابراین وقتی که دبی جریان کاهش می‌یابد باعث طولانی‌تر شدن زمان ماند ذراتی می‌شود که وارد بستر رسوبی شده است در نتیجه پتانسیل بالاتری را برای وقوع واکنش‌های زیستی و کاهش آلاینده‌ها ایفا می‌کند.

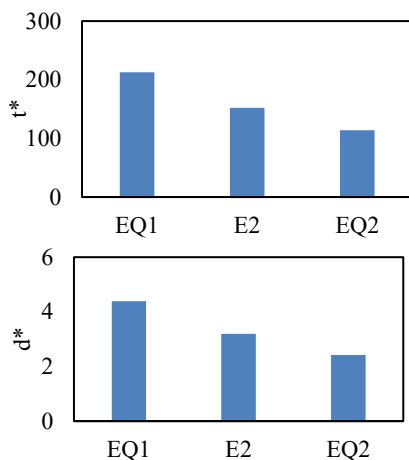


Fig. 22 Comparison of dimensionless residence time and penetration depth in EQ1, E2, and EQ2 models

شکل ۲۲ مقایسه زمان ماند و عمق نفوذ بی‌بعد در مدل‌های EQ1، E2، و EQ2

شکل ۲۱ معیار بی‌بعد دبی تبادلی در سه دبی مختلف ۱۰، ۲۳/۸ و ۴۰ لیتر بر ثانیه برای بسترهای EQ1، E2، و EQ2 را نشان می‌دهد. برابر شکل ۲۱ معیار بی‌بعد دبی تبادلی در بستر EQ1 با دبی جریان ۱۰ لیتر بر ثانیه $0/03310$ به دست آمد. در بستر E2 با دبی ۲۳/۸ لیتر بر ثانیه و در بستر EQ2 با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب $0/03312$ و $0/03228$ محاسبه شد. بررسی درصد نسبت دبی تبادلی از سطح به دبی کل جریان در سه مدل EQ1، E1، و EQ2 نشان می‌دهد که بیشترین درصد دبی تبادلی مربوط به بستر EQ1 با دبی کمینه ۱۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد و کمترین درصد تبادل از سطح برای بستر EQ2 با دبی بیشینه ۴۰ لیتر بر ثانیه به دست آمد. درصد دبی تبادلی از سطح برای بسترهای EQ1، E2، و EQ2 به ترتیب $19/158$ ، $8/052$ و $4/670$ درصد محاسبه شد. بنابراین افزایش دبی جریان سطحی موجب می‌شود که ذرات زمان کمتری داشته باشند تا داخل بستر رسوبی حرکت کنند و میزان درصد دبی تبادلی از سطح را کاهش می‌دهد. با افزایش دبی جریان به دلیل کاهش تغییرات هد هیدرولیکی از $0/1076$ به $0/1034$ متر، دبی تبادلی بی‌بعد کاهش می‌یابد که با نتایج (Trauth et al. (2015)، (2019) Jamali et al.، (2021) Abshouri et al. و (2022) Pourhosein ghadi et al. هم‌خوانی دارد.

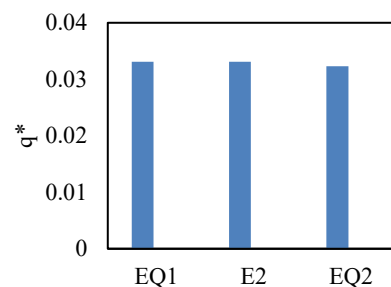


Fig. 21 Comparison of dimensionless hyporheic exchange in EQ1, E2, and EQ2 models

شکل ۲۱ مقایسه دبی تبادلی بی‌بعد در مدل‌های EQ1، E2، و EQ2

شکل ۲۲ زمان ماند بی‌بعد و میانگین بیشترین عمق نفوذ بی‌بعد را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش دبی جریان، معیار بی‌بعد زمان ماند و عمق نفوذ کاهش می‌یابد. در بستر EQ2 با افزایش دبی و سرعت جریان، عمق آب روی بستر نیز افزایش می‌یابد و ذراتی که از سطح حفره

و محدوده تغییرات هد هیدرولیکی در عمق ۰/۰۶۱ تا ۰/۱۰۳۸۶ تا ۰/۱۰۶۴۴ متر و در عمق ۰/۱۰۱ تا ۰/۱۰۵۱۷ تا ۰/۱۰۶۴۵ متر می‌باشد. پارامتر بی‌بعد زمان ماند با افزایش طول حفره روند افزایشی داشته است و کشیدگی هیستوگرام توزیع زمان ماند با افزایش طول حفره، از چپ به راست تغییر می‌کند که نشان می‌دهد ذراتی که زمان ماند طولانی‌تری دارند نقش بیشتری در حفره با طول ۱ متر دارند و ذرات با زمان ماند کوتاه‌تر سهم بیشتری در حفره با طول ۰/۲۵ متر ایفا می‌کند.

نتایج تأثیر دبی‌های مختلف روی حفره نشان دهنده آن است که با افزایش دبی، کمینه و بیشینه هد هیدرولیکی افزایش می‌یابد اما تغییرات هد هیدرولیکی کاهش می‌یابد. مقایسه بسترهای EQ1، E2 و EQ2 با سه دبی مختلف ۱۰، ۲۳/۸ و ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان داد که با افزایش دبی و سرعت جریان سطحی، میزان درصد دبی تبادلی، عمق نفوذ و زمان ماند ذرات کاهش می‌یابد که با نتایج بررسی‌های (Marzdari et al., 2010)، (Trauth et al., 2013) و (Trauth et al., 2015) همخوانی دارد.

با توجه به اینکه برداشت مصالح در بستر رودخانه می‌تواند آثار منفی در بهم خوردن تعادل طبیعی، مورفولوژی و اکوسیستم رودخانه داشته باشد بررسی و ارزیابی بر منطقه هایپریک در مناطق برداشت شن و ماسه می‌تواند از اجزا مهم پژوهش بر زیست‌بوم، احیای رودخانه‌ها و مدیریت برداشت باشد. همچنین می‌تواند در پیش‌بینی و مدیریت جریان‌های هایپریک در مناطقی که برداشت شن و ماسه در بستر رودخانه وجود دارد استفاده شود.

۴- فهرست نشانه‌ها

L	طول حفره (m)
Q_{ex}	دبی تبادلی (m^3s^{-1})
Q	دبی (m^3s^{-1})
RT	میانگین زمان ماند (s)
H	عمق آب بالادست (m)
K	هدایت هیدرولیکی (ms^{-1})
d_H	میانگین بیشینه عمق نفوذ (m)
A	سطح تماس جریان سطحی و زیرسطحی (m^2)
q^*	دبی تبادلی بی‌بعد

همچنین نتایج عمق نفوذ نیز با نتایج بررسی‌های Tonina and Beffington (2011) همخوانی دارد که در بررسی‌های آنان، افزایش دبی موجب کاهش عمق نفوذ می‌شود زیرا در دبی‌های بالا اختلاف فشار کاهش می‌یابد که موجب کاهش عمق نفوذ می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر طول‌های مختلف حفره برداشت و عمق مختلف آب با تجزیه و تحلیل روی جریان سطحی و تبادل آن با جریان زیرسطحی ارزیابی شد. برای شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی به ترتیب از نرم‌افزارهای فلوئنت و کامسول استفاده شد. برای ارزیابی مدل سطحی نیمرخ سطح آب و نیمرخ توزیع سرعت قائم با مدل آزمایشگاهی مقایسه شد که نتایج نشان داد مدل عددی به خوبی توانسته نیمرخ سطح آب و نیمرخ توزیع سرعت قائم را شبیه‌سازی کند. همچنین برای ارزیابی مدل زیرسطحی الگوی خطوط هایپریک شبیه‌سازی با الگوی خطوط هایپریک در آزمایشگاه مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج گویای همخوانی بین مسیرهای جریان هایپریک می‌باشد.

بررسی توزیع فشار در بسترها نشان داد ناحیه‌های پرفشار در وسط حفره و ناحیه‌های کم‌فشار در بالادست و پایین‌دست کانال و خارج از حفره است که حرکت ذرات داخل رسوبات به دلیل گرادیان فشار، از ناحیه‌های پرفشار به کم‌فشار می‌باشد.

همچنین نتایج نشان داد افزایش طول حفره برداشت، موجب افزایش بیشینه عمق نفوذ بی‌بعد و کاهش دبی تبادلی بی‌بعد می‌شود به طوری که محدوده تغییرات عمق نفوذ ۱/۶۶ تا ۲/۶۶ می‌باشد و درصد دبی تبادلی در عمق ۰/۰۶۱ و ۰/۱۰۱ متر به ترتیب از ۹/۶۱ به ۶/۱۳ و از ۱۰ به ۶/۱۷ کاهش یافته است که نشان‌دهنده رابطه معکوس بین طول حفره و دبی تبادلی بی‌بعد می‌باشد. همچنین افزایش عمق آب در هر یک از طول‌های برابر از حفره مورد آزمایش، باعث افزایش دبی تبادلی بی‌بعد، افزایش زمان ماند و عمق نفوذ می‌شود. میزان بیشینه و کمینه هد هیدرولیکی با افزایش عمق آب در بسترها افزایش می‌یابد

Journal of Sediment Research, 34(2), 155-165.

Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. New York and Amsterdam: American Elsevier, 764p.

Bencala, K.E. (2005). Hyporheic exchange flows. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 10, 1773-1740.

Biddulph, M. (2015). Hyporheic zone: in situ sampling. In: Geomorphological Techniques; British Society for Geomorphology. London, UK, 5859.

Bindhusri, A. & Arunachalam, M. (2015). Environmental impact of sand mining in Tamiraparani River, South Tamilnadu. International Conference on Engineering Trends and Science and Humanities. 123-132.

Boulton, A.J., Datry, T., Kasahara, T., Mutz, M. & Stanford, J.A. (2010). Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1), 26-40.

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(1), 59-81.

Brestolani, F., Solari, L., Rinaldi, M. & Lollino, G. (2015). On the morphological impacts of gravel mining: the case of the Orco River. In: Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3: River Basins, Reservoir Sedimentation and Water. Springer International Publishing, 319-322.

Bravard, J.P. & Petts, G.E. (1996). Human impacts on fluvial hydrosystems. In: The Fluvial Hydrosystems, Springer, Dordrecht, 242-262.

Buffington, J.M. & Tonina, D. (2009). Hyporheic exchange in mountain rivers II: effects of channel morphology on mechanics, scales, and rates of exchange. *Geography Compass*, 3(3), 1038-1062.

Buss, S., Cai, Z., Cardenas, B., Fleckenstein, J., Hannah, D. & Heppell, K. et al. (2009). The Hyporheic Handbook: a handbook on the groundwater-surface water interface and hyporheic zone for environment managers, Bristol: Environment Agency.

Butturini, A., Bernal, S., Sabater, S. & Sabater, F. (2002). The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(3), 515-526.

Cardenas, M.B. & Wilson, J.L. (2007a). Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bedforms.

t^*	زمان ماند بی‌بعد
d^*	عمق نفوذ بی‌بعد
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی (pas^{-1})
U_i	سرعت متوسط در جهت i (ms^{-1})
U_j	سرعت متوسط در جهت j (ms^{-1})
u'_i	سرعت لحظه‌ای در جهت i (ms^{-1})
u'_j	سرعت لحظه‌ای در جهت j (ms^{-1})
P	فشار متوسط (pa)
x_i	جهت i (m)
x_j	جهت j (m)
S_{ij}	تانسور نرخ کرنش
τ_{ij}	تنش رینولدزی (Nm^{-2})
κ	نفوذپذیری ذاتی (m^2)
p^*	فشار بی‌بعد
p_{min}	کمینه فشار
p_{max}	بیشینه فشار
φ	تخلخل
d_m	قطر متوسط ذرات (m)

۵- منبع‌ها

Abdullahi, N.H. & Ahmad, Z. (2022). River Aggradation-Degradation Under Sand Mining: Experimental and Numerical Studies. *9th International Symposium on Hydraulic Structures*. Roorkee, India.

Abdullahi, N.H. & Ahmad, Z. (2023). Evaluation of migration speed equations of the upstream nick of the sediment mining pit. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(3), 289-296.

Abshouri, A., Dehghani, A.A. & Zahiri, A. (2021). Study of Hyporheic flow pattern downstream of river steps. *Iranian journal of Ecohydrology*, 8(4), 1127-1145. (In Persian)

Banzhaf, S., Krein, A. & Scheytt, T. (2011). Investigative approaches to determine exchange processes in the hyporheic zone of a low permeability riverbank. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 591-601.

Barman, B., Sarma, A.K. & Kumar, B. (2018). Mining pit migration of an alluvial channel: experimental and numerical investigations. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26(4), 448-456.

Barman, B., Kumar, B. & Sarma, A.K. (2019). Dynamic characterization of the migration of a mining pit in an alluvial channel. International

- Jang, C.L., Shimizu, Y. & Lee, G.H. (2015). Numerical Simulation of the Fluvial Processes in the Channels by Sediment Mining. *Journal of Civil Engineering*, 19(3), 771-778.
- Jung, S.H. & Kim, J.S. (2023). Modeling the Effect of Hyporheic Flow on Solute Residence Time Distributions in Surface Water. *Water*, 15(11), 2038, <https://doi.org/10.3390/w15112038>.
- Kondolf, G.M. & Swanson, M.L. (1993). Channel adjustments to reservoir construction and gravel extraction along Stony Creek, California. *Environmental Geology*, 21(4), 256-269.
- Kondolf, G.M. (1997). hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental management*, 21(4), 533-551.
- Kondolf, G.M., Smeltzer, M. & Kimball, L. (2002). Freshwater gravel mining and dredging issues, Center for Environmental Design Research: University of California.
- Lee, H.Y., Fu, D.T. & Song, M.H. (1993). Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(1), 64-80.
- Magliozzi, C., Coro, G., Grabowski, R.C., Packman, A.I. & Krause, S. (2019). A multiscale statistical method to identify potential areas of hyporheic exchange for river restoration planning. *Environmental modelling and software*, 111, 311-323.
- Marzadri, A., Tonina, A., Bellin, A. & Tubino, M. (2010). Semianalytical analysis of hyporheic flow induced by alternate bars. *Water Resources Research*, 46(7), <https://doi.org/10.1029/2009WR008285>.
- Mori, N., Simčič, T., Lukančič, S. & Brancelj, A. (2011). The effect of in-stream gravel extraction in a pre-alpine gravel-bed river on hyporheic invertebrate community. *Hydrobiologia*, 667, 15-30.
- Movahedi, N., Dehghni, A.A., Trauth, N. & Meftah Halaghi, M. (2019). Laboratory and Numerical Investigation of Hyporheic Exchange in Riffle-pool Bed Form. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 6(1), 191-204. (In Persian)
- Pourhosein ghadi, M., dehghani, A.A. & Meftah Halghi, M. (2022). Effect of different hydraulic conditions on the hyporheic flow characteristics around gabion weir structures. *Iranian journal of Ecohydrology*, 9(1), 15-33. (In Persian)
- Radecki-Pawlik, A., Kidova, A., Lehotsky, M., Rusnak, M., Manson, R. & Radecki-Pawlik, B. (2019). Gravel and boulders mining from mountain stream beds. 5th International Scientific Conference on Civil Engineering-Infrastructure-Mining, In E3S *Advances in Water Resources*, 30(3), 301-313.
- Cardenas, M.B. & Wilson, J.L. (2007b). Effects of current-bed form induced fluid flow on the thermal regime of sediments. *Water Resources Research*, 43(8), <https://doi.org/10.1029/2006WR005343>.
- Cardenas, M.B. & Wilson, J.L. (2007c). Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments. *Water Resources Research*, 43(8), <https://doi.org/10.1029/2006WR005787>.
- Carman, P.C. (1937). Fluid flow through a granular bed, Trans. Inst. Chem. Eng. London, 15, 150-156.
- Chen, D. (2011). Modeling Channel Response to Instream Gravel Mining, Desert Research Institute, Las Vegas USA, 125-140.
- 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.
- Datry, T. & Larned, S.T. (2008). River flow controls ecological processes and invertebrate assemblages in subsurface flowpaths of an ephemeral river reach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(8), 1532-1544.
- Dunne, T., Dietrich, W.E., Humphrey, N.F. & Tubbs, D.W. (1981). Geologic and geomorphic implications for gravel supply. Proceedings from the Conference on Salmon-Spawning Gravel, A Renewable Resource in the Pacific Northwest, 75-100.
- Gandy, C.J., Smith, J.W.N. & Jarvis, A.P. (2007). Attenuation of mining-derived pollutants in the hyporheic zone: a review. *Science of the Total Environment*, 373(2-3), 435-446.
- Gerecht, K.E., Cardenas, M.B., Guswa, A.J., Sawyer, A.H., Nowinski, J.D. & Swanson, T.E. (2011). Dynamics of hyporheic flow and heat transport across a bed-to-bank continuum in a large regulated river. *Water Resources Research*, 47(3), W03524, [doi:10.1029/2010WR009794](https://doi.org/10.1029/2010WR009794).
- Haghnazar, H., Hashemzadeh Ansar, B., Amini, R. & Saneie, M. (2019). Experimental study on appropriate location of river material mining pits regarding extraction and utilization. *Journal of Mining and Environment*, 10(1), 163-175.
- Huang, P. & Chui, T.F.M. (2018). Empirical Equations to Predict the Characteristics of Hyporheic Exchange in a Pool-Riffle Sequence. *Groundwater*, 56(6), 947-958.
- Jamali, S., Dehghni, A.A., Trauth, N. & Zahiri, A. (2019). Experimental Investigation of Surface and sub-Surface Flow interaction in a Middle Bar. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 6(2), 323-339. (In Persian)

- and ambient groundwater flow conditions in a pool-riffle system. *Water Resources Research*, 49(9), 5834-5850.
- Trauth, N., Schmidt, C., Vieweg, M., Oswald, S.E. & Fleckenstein, J.H. (2015). Hydraulic controls of in-stream gravel bar hyporheic exchange and reactions. *Water Resources Research*, 51(4), 2243-2263.
- Urumović, K. & Urumović Sr, K. (2016). The referential grain size and effective porosity in the Kozeny–Carman model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(5), 1669-1680.
- Wang, N., Zhang, C., Xiao, Y., Jin, G. & Li, L. (2018). Transverse hyporheic flow in the cross-section of a compound river system. *Advances in Water Resources*, 122, 263-277.
- Wu, W. & Wang, S.S. (2008). Simulation of morphological evolution near sediment mining pits using a 1-D mixed-regime flow and sediment transport model. In: World Environmental and Water Resources Congress. Ahupua'A. 1-10.
- Xia, J.H., Chen, Y.M., Wang, W.M., Han, Y.L., Liu, H.Y. & Hu, L. (2013). Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone. *Advances in Water Science*, 24(4), 589-597.
- Xiao, Y., Liu, J., Wang, N., Gualtieri, C., Zhang, T., Liu, J. & Zhou, J. (2022). Numerical simulation of overbank hyporheic transport and biogeochemical reactions in a compound channel. *Hydrological Processes*, 36(8), e14670, <https://doi.org/10.1002/hyp.14670>.
- Yuan, Y., Chen, X., Cardenas, M.B., Liu, X. & Chen, L. (2021). Hyporheic exchange driven by submerged rigid vegetation: A modeling study. *Water Resources Research*, 57(6), e2019WR026675, <https://doi.org/10.1029/2019WR026675>.
- Zawiejska, J., Wyżga, B. & Radecki-Pawlik, A. (2015). Variation in surface bed material along a mountain river modified by gravel extraction and channelization, the Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Geomorphology*, 231, 353-366.
- Web of Conferences. Vol 106, p. 01005. EDP Sciences.
- Reddy, Y.R. (2014). On the little-known hyporheic biodiversity of India, with annotated checklist of copepods and bathynellaceans (Crustacea) and a note on the disastrous implications of indiscriminate sand mining. *Journal of threatened Taxa*, 6(1), 5315-5326.
- 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.
- Rinaldi, M., Wyżga, B. & Surian, N. (2005). Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River research and applications*, 21(7), 805-828.
- Rovira, A., Batalla, R.J. & Sala, M. (2005). Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the lower Tordera, NE Spain). *River Research and Applications*, 21(7), 829-847.
- Sandercock, P. & Ladson, T. (2015). Risk assessment of floodplain mining pits in the mid-Goulburn Valley, Department of Environmental, Land, Water and Planning.
- Sinha, S., Hardy, R.J., Blois, G., Best, J.L. & Sambrook Smith, G.H. (2017). A numerical investigation into the importance of bed permeability on determining flow structures over river dunes. *Water Resources Research*, 53(4), 3067-3086.
- Stubbington, R., Wood, P.J. & Boulton, A.J. (2009). Low flow controls on benthic and hyporheic macroinvertebrate assemblages during supra-seasonal drought. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(15), 2252-2263.
- Thibodeaux, L.J. & Boyle, J.D. (1987). Bedform-generated convective transport in bottom sediment. *Nature*, 325(6102), 341-343.
- Tonina, D. (2005). Interaction between river morphology and intra-gravel flow paths within the hyporheic zone, PhD Thesis, University of Idaho, 114 p.
- Tonina, D. & Buffington, J.M. (2009). Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects. *Geography Compass*, 3(3), 1063-1086.
- Tonina, D. & Buffington, J.M. (2011). Effects of stream discharge, alluvial depth and bar amplitude on hyporheic flow in pool-riffle channels. *Water resources research*, 47(8), <https://doi.org/10.1029/2010WR009140>.
- Trauth, N., Schmidt, C., Maier, U., Vieweg, M. & Fleckenstein, J.H. (2013). Coupled 3-D stream flow and hyporheic flow model under varying stream