

Research Article

# Simulation of the effect of dune lee slope on hyporheic flow characteristics

## Zahra Mohammadi<sup>1</sup>, Amir Ahmad Dehghani<sup>2\*</sup>, Neshat Movahedi<sup>3</sup>

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

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

### Abstract

**Introduction:** Rivers are complex systems in which different chemical, biological, and physical processes occur in it. 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 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. 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 investigated.

**Results and Discussion:** The results show that the maximum and minimum pressure occurred on the stoss side and the crest of the dune, respectively. 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.

#### Simulation of the effect of dune lee slope ...

**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.



# شبیهسازی اثر شیب وجه پائینرونده تلماسه بر مشخصات ناحیه هایپریک

زهرا محمدی، امیراحمد دهقانی \*، نشاط موحدی "

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

چكیده: رودخانهها، سیستمهای پیچیدهای هستند كه انواع فرایندهای شیمیایی، بیولوژیكی و فیزیكی در آنها رخ میدهد. تبادل هایپریک عبارت است از اختلاط جریان سطحی و جریان زیرسطحی در محیط متخلخلی كه زیر و اطراف مجاری گذر آب را احاطه كرده است. چنین تبادلاتی میتواند بر اثر وجود فرمهای مختلف بستر در رودخانه ایجاد شود. تلماسهها از انواع شكل بستر رودخانه هستند كه در رودخانههای مستقیم، مارپیچی و شریانی یافت میشود. اختلاف فشار دو طرف تلماسه به ایجاد تبادلات هایپریک منجر میشود كه طول موج، دامنه و شیب وجههای پائینرونده و بالارونده آن میتواند بر میزان تبادلات هایپریک تأثیرگذار باشد. در این تحقیق به بررسی اثر شیب پائیندست تلماسه در زوایای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه، بر روی مشخصات ناحیه هایپریک (شامل زمان ماند، دبی تبادلی و عمق نفوذپذیری هایپریک)، پرداخته شده است. همچنین تأثیر هدایت هیدرولیکی، سرعت جریان زیرسطحی و ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادلات هایپریک)، بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی عددی جریان سطحی از نرمافزار TLOW3D استفاده شد، شبیهسازی شامل بازهای از یک کانال دردیكله به مدل آب زیرزمینی MODFLOW معرفی شد. نتایچ نشان می دهد با افزایش شیب، زمان ماندگاری و دبی تبادلی افزایش و میق تبادلات هایپریک کاهش یافته است. برای شای مان از افزایش هدایت هد. پس از حل جریان سطحی، فشارهای روی سطح فرم بستر بعنوان شرط مرزی دریكله به مدل آب زیرزمینی MODFLLOW معرفی شد. نتایچ نشان می دهد با افزایش شیب، زمان ماندگاری و دبی تبادلی افزایش و میق تبادلات هایپریک کاهش یافته است. همچنین با افزایش هدایت هیدرولیکی عمق تبادلات هایپریک افزایش و می تبادلی افزایش سرعی جریان زیرسطحی و ضخامت بستر رسوبی عمق تبادلات هایپریک کاهش پیدا می کند.

**کلیدواژگان:** تلماسه، ناحیه هایپریک، دبی تبادلی، شبیهسازی عددی ، زمان ماند

### ۱– مقدمه

هنگامی که جریان در مسیر رودخانه حرکت می کند، تبادلی بین جریان رودخانه و بستر زیر رودخانه بوجود می آید. ناحیه ی هایپریک<sup>۱</sup> به ناحیه اشباع زیر بستر رودخانه گفته می شود، که رایجترین شامل بخشی از جریان رودخانه بوده که بداخل بستر نفوذ کرده و دوباره به جریان سطحی باز می گردد و نقش مهمی دراکولوژی موجودات زنده دارد. زمانی که طول می کشد جریان رودخانه از بین رسوبات زیر بستر رودخانه عبور کند و دوباره به سطح باز گردد، به عنوان زمان ماند<sup>۲</sup>، تعریف می شود. زمان ماند مهم ترین خصوصیات ناحیه هایپریک است. زیرا واکنش های شیمیایی و بیولوژیکی که داخل رسوبات رخ می دهد، به زمانی بستگی دارد که جریان رودخانه در ارتباط با محیط زیر رودخانه است(2009). Tonina and Buffington (2009)

صورت متناوب از جریان های رو به پایین<sup>۳</sup> به داخل بستر متخلخل و بازگشت دوباره به جریان سطحی که رو به بالا<sup>۴</sup> است اتفاق می افتد، مقیاس زمانی و مکانی اختلاط هایپریک به وسعت منطقه هایپریک بستگی دارد که ممکن است محدود یا محصور در رودخانه های کوچک محدود شده به دامنه های کوه باشد و یا وسیع و نامحدود درسیلاب دشتها باشد. همچنین وسعت این مناطق می تواند به طور فصلی تغییر کند .Magliozzi et al (2017). تبادلات هایپریک در پیوند ژئومور فولوژی رودخانه ای، آب های زیرزمینی و زیستگاه رودخانه برای موجودات آبزی و زیرزمینی دارای اهمیت بوده و در چند دهه ی اخیر به عنوان یکی از مؤلفه های مهم حفاظت، مدیریت و احیاء اکوسیستمهای رودخانه ی در نظر گرفته شده است (1998). کولوژی میتند که مختلفی بر روی تبادلات هایپریک در رودخانه ها مؤثر هستند که از جمله آنها می توان به ویژگی های هیدروژئولوژیکالی، اکولوژی

<sup>3</sup> Downwelling <sup>4</sup> Upwelling

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> hyporheic zone <sup>2</sup> Residence time

تخلیه یا تغذیه، دبی تبادلات هایپریک کاهش می یابد. Bolois

et al. (2014) آزمایشاتی را در کانالی 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 فرم

بستر پرداختند. بستر رسوبی از شش لایه کره یکنواخت با اندازه

ذرات ۰/۰۳۸ متر تشکیل شده بود. در این تحقیق چهار حالت

مختلف شامل فرم بستر نفوذناپذیر بر روی بستر نفوذناپذیر نرم، فرم بستر نفوذپذیر بر روی بستر نفوذناپذیرنرم، فرم بستر

نفوذپذیر بر روی نفوذناپذیر زبر و فرم بستر نفوذپذیر بر روی بستر

نفوذپذیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد که جریان

در یک فرم بستر نفوذپذیر کاملاً متفاوت از بستر نفوذناپذیر

میباشد، خصوصاً در وجه پائین رونده فرم بستر. آنان به این

نتيجه رسيدند مطالعات شبيهسازي تبادلات هايپريک که وابسته

به توزیع فشار ناشی از شبیهسازی در امتداد بستر نفوذناپذیر

است، ممكن است نتواند پيشبيني واقع بينانهاي از ماهيت

تبادلات هایپریک در فرم بسترها ارائه نماید. همچنین Chen et

al. (2015) مه بررسی عددی جریانهای هایپریک در فرم بستر

تلماسه پرداخته و خصوصیات این ناحیه را در دوحالت دوبعدی

و سهبعدی مورد مقایسه قرار دادند. آنان از مدل فلوئنت" با مدل

آشفتگی k-w برای مدلسازی جریان سطحی و از مدل آب زیر-

زميني كامسول" براى مدلسازى محيط متخلخل استفاده نمودند

. بدین صورت که ابتدا جریان سطحی را با در نظر گرفتن شرط

دیوار در سطح تلماسه، با فلوئنت مدل کرده و فشارهای بدست

آمده را بعنوان شرط مرزی دریکله بر روی مدل آب زیرزمینی قرار دادند. در تحقیق آنان میانگین دامنه فرم بستر سه بعدی

بعنوان دامنه فرم بستر دوبعدی در نظر گرفته شده بود. نتایج

آنان نشان داد در رینولدزهای بالا، دبی تبادلات هایپریک درحالت

تلماسه سه بعدی بیشتر از دو بعدی بوده و زمان ماندگاری تقریباً

در هر دو حالت یکسان خواهد بود. (2019) Jie Ren et al. به

تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر تبادلات هایپریک بر اساس

مدلسازی عددی پرداختند. در این تحقیق اثر عواملی نظیر

سرعت، عمق آب، ارتفاع موج تلماسه و نفوذپزیری بستر بر

تبادلات هايپريک مورد بررسی قرار گرفت. مدل رياضی

زیرسطحی به شکل دوبعدی و بر اساس معادله RANS، مدل

آشفتگی K-W و حالت پایدار مدل آب زیرزمینی ارائه شد. نتایج

آنان نشان داد که سرعت، زمان و نفوذپذیری رابطه مستقیمی با

دبی تبادلات هایپریک دارد، در حالی که با عمق آب رابطه

معکوس دارد. سرعت و عمق آب اثرات بیشتری بر روی دبی

تبادلی از خود نشان دادند، در حالی که نفوذپذیری، ضریب انتشار

Magliozzi et al. کرد اشاره کرد Magliozzi et al. کرد Magliozzi et al. (2017). تحقیقات گذشته نشان داده است که فرم بسترها و اشکال ژئومورفیک در بستر رودخانه بیشترین تأثیر را بر تبادلات هایپریک دارند. چنین تبادلاتی میتواند بر اثر وجود فرمهای مختلف بستر در رودخانه ایجاد شود. انواع فرمهای بستری که به طور معمول شناخته شدهاند، عبارتاند از تلماسه<sup>4</sup>، تلماسه-شکنج<sup>2</sup>، خیزاب-گوداب<sup>4</sup>، پله- گوداب<sup>4</sup>، که هر یک خصوصیات 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 تبادلات هایپریک میشود که طول موج و دامنه آن میتواند بر میزان این تبادلات تأثیرگذار باشد (2015).

مطالعات هایپریک تحت تاثیر فرم بستر در دهه اخیر بسیار مورد توجه بوده است و تحقیقات زیادی در قالب مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و عددی انجام شده است. همزمان با شروع حرکت ذرات بستر در رودخانهها، شکلهای مختلف بستر تشکیل می شوند. از شکلهای بستر در رودخانههای آبرفتی، بسترهای متحرک پوشيده از شكنجها و تلماسهها است (Best. J. L. (1993). Packman et al. (2004) به بررسی آزمایشگاهی تبادل مواد محلول در ناحیه هایپریک در دو شرایط بستر صاف و فرم 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 فرم بستر باعث افزایش ۳ تا ۶ برابری تبادل در مقایسه با بستر صاف می شود. .Cardenas and Wilson (2007) تبادلات هایپریک را در فرم بستر تلماسه دو بعدی بطور عددی مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ایشان، فشار بدست آمده از حل مدل جریان سطحی در سطح تماس جریان سطحی و بستر رسوبی، به عنوان شرط مرزی دریکله ، در مرز بالا برای حل مدل جریان زیرسطحی قرارگرفت. تأثیر اعداد رینولدز مختلف و هندسههای متفاوت فرم بستر بر مشخصات ناحیه هایپریک مورد بررسی قرارگرفت. نتایج تحقیق ایشان نشان داد با افزایش نسبت دامنه به طول موج، عمق تبادلات هایپریک کاهش می یابد. همچنین در رینولدز ثابت با افزایش نسبت دامنه به طول موج، دبی تبادلات<sup>۱۰</sup> هایپریک کاهش پیدا می کند. Fox et al. (2014) به بررسی تأثیر شارهای تخلیه و یا تغذیه آب سطحی و آب زیرزمینی بر تبادلات هایپریک در حضور فرم بستر تلماسه پرداختند. در این تحقیق تغییرات غلظت سدیم کلرید (بعنوان ردیاب) نسبت به زمان به منظور تعیین نرخ تبادلات هایپریک استفاده شد. نتایج آنان نشان داد با افزایش این شارهای

<sup>10</sup> Exchange flow

12 Comsol

- <sup>5</sup> Dune
- <sup>6</sup> Dune- Ripples
- <sup>7</sup> Riffle-pool sequences

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Dirichlet

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Fluent

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Step- Riffle

ذرات و تخلخل ذرات بستر اثرات متوسط و طول موج اثرات اندکی بر روی دبی تبادلات هایپریک نشان دادند. Movahedi et al. (2020) به بررسی آزمایشگاهی تبادلات هایپریک در حضور شکل بستر خیزاب-گوداب دو بعدی و سه بعدی پرداختند. hdahk گرادیانهای فشار در پیرامون شکل بستر رودخانهها را یکی از عوامل موثر بر تبادلات هایپریک دانستند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نزدیک به ۵۰ درصدی ارتفاع شکل بستر، دبی تبادلات هایپریک در حالتهای دو بعدی و سه بعدی ۲۶ درصد افزایش و زمان ماند در مدل دو بعدی ۳۶ درصد و در مدل سه بعدی نیز ۴۱ درصد کاهش پیدا میکند. Kwoll et al. (2016) به بررسی آزمایشگاهی تأثیرشیب وجه پائینرونده فرم بستر تلماسه بر ساختار جریان و مقاومت در برابر جریان پرداختند. در این تحقیق آزمایشگاهی، با تغییر شیب وجه پائینرونده تلماسه (در زاویههای ۲۰،۱۰ و۳۰ درجه)، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی، به بررسی تأثیرات آشفتگی و مقاومت در برابر جریان پرداختند. نتایج آنان نشان داد که با افزایش شیب پائینرونده تلماسه، مقدار تنش وارد بر این فرم بستر افزایش پیدا می کند. در رینولدزهای متوسط تنش به طور خطى افزايش پيدا مىكند. همچنين با افزايش زاويه سرعت جريان نيز افزايش مييابد.

همان گونه که سوابق تحقیق نشان میدهد بیشتر مطالعات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته در زمینه تبادلات هایپریک، بر فرم بستر تلماسه متمركز بوده ولى تأثير شيب وجه پائیندست<sup>۱۳</sup> تلماسه در این مطالعات مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، در تحقیق حاضر بطور عددی اثر شیب یائین دست تلماسه، با ثابت نگهداشتن سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر روی دبی تبادلی، زمان ماند و عمق نفوذپذیری هایپریک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر هدایت هیدرولیکی، سرعت جریان زیرسطحی و ضخامت بستر رسوبی نیز بر عمق تبادلات هایپریک مورد شبیهسازی قرار گرفته است. زوایای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه برای شیب پائین ونده تلماسه در نظر گرفته شده است که مشخصه تلماسههائی میباشند که در طبیعت یافت میشوند و به منظور بررسی تأثیرات آشفتگی و مقاومت در برابر جريان آنها پرداختند.(Kwoll et al. (2016). بدين منظور مدل آزمایشگاهی (Kwoll et al. (2016 مبنای شبیهسازی عددی جریان سطحی با استفاده از مدل Flow3D قرار می گیرد. پس از حل جريان سطحي، فشار روى سطح فرم بستر بعنوان شرايط مرز دریکله به مدل آب زیرزمینی معرفی شده و جریان زیرسطحی شبیهسازی می شود و سپس مشخصات ناحیه هایپریک محاسبه می شود. نتایج این تحقیق می تواند در پروژههای احیاء رودخانه

# ۲- مواد و روشها

## ۲-۱- شبیهسازی جریان سطحی

FLOW به منظور شبیه سازی عددی جریان سطحی از نرم افزار SD ( منظور شبیه سازی عددی جریان سطحی از نرم افزار SD میدان مدل دارا است. مدل میدان جریان را به صورت حجم محدود را دارا است. مدل RNG  $\mathbf{k} - \mathbf{\epsilon}$  میدان مدل میباشد.

در این تحقیق شبیهسازی عددی شامل بازهای از یک کانال به طول ۲/۷ متر، عرض ۰/۱ متر و ارتفاع ۲/۳ متر است. یکی از مهمترین نکاتی که بایستی در شبیهسازی عددی مورد توجه قرار گیرد، شبکهبندی مناسب برای حل دقیق معادلات حاکم است. ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار میدهد. در کلیه مدل های عددی، ابعاد شبکه طوری تعیین شد که پارامترهای کنترل شبکه از قبیل حداکثر نسبت ابعاد شبکه<sup>۱۴</sup> در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه<sup>۱۵</sup> در راستاهای مختلف و در مجاورت یکدیگر مناسب انتخاب شده باشد. در تحقیق حاضر 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 همگرائی میباشد. در کلیه شبیه سازی های صورت گرفته، شرایط فوق پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه از مدلسازی برآورده شد.

# ۲-۲- شیبهسازی جریان زیرسطحی

پس از حل جرپان سطحی، تراز هیدرولیکی روی سطح فرم بستر بعنوان شرایط مرز دریکله به مدل آب زیرزمینی معرفی شد و سپس تأثیر این تغییر زاویه بر روی زمان ماند، دبی تبادلی و حداکثر عمق تبادلات هایپریک مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه سازی جریان هایپریک، مدلهای آب زیرزمینی به کار برده میشود که در تحقیق حاضر از نرمافزار مدلسازی آب زیرزمینی MODFLOW استفاده شد. برای حل جریان محیط متخلخل زیرین، دو دسته معادله دارسی و پیوستگی در امتداد بستر کوپل کرین، دو دسته معادله دارسی و پیوستگی در امتداد بستر کوپل میشوند. هر شبیه سازی شامل بازهای از یک کانال به طول ۲/۲ متر و عرض ۰/۱ متر است. شرایط اعمال شده مدل نیز در

مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به نتایج حاصله می توان توان خودپالائی یک رودخانه را در جذب و کاهش آلایندهها با توجه به زمان ماند آن در داخل بستر تعیین نمود.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Maximum Adjacent Cell Size Ratio

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Lee side
<sup>14</sup> Maximum Aspect Ratio

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				



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

**شکل ۱** مدل دو بعدی کانال و شرایط مرزی.

۳ – نتایج و بحث

۳–۱– مدلسازی جریان سطحی

همان طور که بیان شد، شبیه سازی جریان سطحی در نرمافزار FLOW3D صورت گرفته است. به منظور کنترل همگرائی شبیه سازی، مقادیر سرعت و فشار در نقاط مختلف میدان حل نسبت به زمان مورد بررسی قرار گرفت. برای مثال در شکل ۲ نتایج همگرایی سرعت و فشار، برای هر سه زاویه تلماسه در نقطه ای از میدان حل ارائه شده است. نتایج نشان می دهد با گذشت ۱۲۰ ثانیه حل همگرا شده است. جدول۲ معرفی شده است.

برای ایجاد هندسه ی مدل، اندازه مش در راستای طولی به اندازه ۰٬۰۰۲، عرضی (۰٬۰ متر و در راستای عمق بستر رسوبی با توجه به افزایش ضخامت رسوب تعداد لایههای انتخاب شده افزایش داده شد. برای حل معادلات 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 شود، در واقع معرف شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار شود، در واقع معرف شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار شود، در واقع معرف شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار شود، در واقع معرف شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار مرزی مناسب نیاز است. شرایط آن متغیر از لحاظ داشتن یک مقدار مرزی کف هم شرایط بدون جریان (molf on) میباشد شکل ۱. پس از اجرای مدل جریان زیرسطحی با استفاده از مدل آب زیرزمینی MODPATH، ماژول MODPATH به منظور استفاده از تکنیک ردیابی ذرات برای تعیین مشخصات ناحیه هایب یک فعال شد.

مهمترین مشخصات ناحیه ی هایپریک، شامل دبی تبادلی، زمان ماند جریان و حداکثر عمق هایپریک می باشد. زمان تبادل جریان هایپریک یا زمان ماندگاری مدت زمانی است که طول می کشد تا جریان رودخانه از بین رسوبات زیر بستر رودخانه عبور کند و دوباره به سطح باز گردد. زمان ماند مهمترین خصوصیت ناحیه هایپریک است. زیرا واکنش های شیمیایی و بیولوژیکی که داخل رسوبات رخ می دهد، به زمان بستگی دارد که جریان رودخانه در ارتباط با محیط زیر رودخانه است. دبی تبادلی نیز با توجه به سرعت نفوذ ذرات به داخل بستر و زمان ماند آن تعیین شده است. حداکثر عمق تبادلات هایپریک نیز با توجه به فاصله رونده و از سمت جریان سطحی وارد محیط متخلخل زیرین میشود و دوباره پس از طی مسیری در محیط متخلخل از سطح میشود و دوباره پس از طی مسیری در محیط متخلخل از سطح سی تماس مشترک آب و رسوب وارد جریان سطحی می شود، با

<b>جدول ۱</b> شرایط مرزی اعمال شده در مدل جریان سطحی.
Table 1 boundary condition applied in the surface flow
model

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 houndary condition applied in the subsurface

flow model.				
Qsub	Κ	Usub	А	Н
(m^3/s)	(m^2)	(m/s)	(m)	(m)





زاويه (a) مطالعه (Kwoll et al. (2016)، (d) نتايج تحقيق





**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 degrees. شکل۲ نتایج پایداری پارامترهای جریان شامل سرعت و فشار برای سه زاویه در مدل عددی (a). ۱۰، (b) ۲۰ و (c) ۳۰ و (c).

برای کالیبراسیون مدل از نتایج مطالعه (2016) Kwoll et al. (2016) استفاده شد که در شکل ۳ و ۴ نتایج توزیع سرعت در راستای جریان و سرعت در راستای عمق در مطالعه حاضر و مطالعه فوق مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طوری که مشاهده می گردد با کاهش زاویه وجه پایین دست دیون، منطقه جدا شدگی بزرگتر و به کف نزدیک شده است که با نتایج (2016) Kwoll et al. (2016) همخوانی دارد.





# ۲-۳ تأثیر زاویه تلماسه بر مشخصات ناحیه هایپریک

مشخصات ناحیه هایپریک برای سه زاویه تلماسه در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج مربوط به حالتی است که هدایت هیدرولیکی برابر K=1E-8 متر مربع، ضخامت بستر ۸/۰ متر و سرعت جریان زیرسطحی ۵(۰۰/۰ متر برثانیه میباشد. در شکل ۶ الگوی جریان زیرسطحی برای سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه ارائه شده است. نتایج نشان میدهد که با توجه به اینکه حداکثر و حداقل فشار به ترتیب در شیب بالا رونده و تاج تلماسه است، با افزایش زاویه وجه پایین دست تلماسه فاصلهی بین حداکثر و حداقل فشار کاهش یافته و این امر باعث میشود که با افزایش زاویه، عمق تبادلات هایپریک کاهش و دبی تبادلی افزایش پیدا کند. این نتایج با مطالعات(2007) Cardenas and Wilson مطابق دارد. نتایج تحقیق آنان نشان داد که در فرم بستر تلماسه با افزایش نسبت دامنه به طول موج، عمق تبادلات هایپریک کاهش مییابد.



**Fig. 4** The results of vertical velocity contours (w) for three angles (a) the study of Kwoll 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) مطالعه (kwoll et al. (2016، (d) نتایج
 تحقیق حاضر.

تغییرات طولی تراز<sup>۱۶</sup> هیدرولیکی برای سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه در شکل۵ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده میشود، در راستای طولی تراز هیدرولیکی جریان، روی تاج تلماسه حالت افتادگی پیدا می کند که نشان دهنده کمترین فشار روی تاج است.

16 head





شکل۷ نمودار تغییرات زمانی درصدی از ذرات که مجددا به جریان سطحی برگشتند نسبت به کل ذرات رها شده برای تلماسه با زاویههای مختلف. در ادامه تأثیر هریک از پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضخامت بستر رسوبی، سرعت جریان زیرسطحی و دبی جریان زیرسطحی بر روی حداکثر عمق تبادلات هایپریک در زوایای مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

# ۳-۳- تاثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق تبادلات هایپریک

در شکل ۸ تا شکل ۱۵ تاثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات هایپریک ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می گردد 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 بی بعد تبادلات هایپریک افزایش مییابد. همچنین نتایج نشان میدهد در نسبتهای بالای K/A، حداکثر عمق بیبعد تبادلات هایپریک در زاویه ۱۰ درجه از دو زاویه دیگر



**Fig. 6** Longitudinal profile of the subsurface flow for three angles (a)10, (b) 20, and (c) 30 degrees. (۱۰ (a) نشكل ۶ نمائى از جريان زيرسطحى براى سه زاويه (۱۰

(b) ۲۰ و (c) ۳۰ درجه.

 Table 3 The results of hyporheic flow charchteristics.

θ	Qsub	RT	Нр
(°c)	(m <sup>3</sup> /s)	(s)	(m)
10	0.0038943	48	0.55
20	0.0041710	58	0.53
30	0.0045406	85	0.52

در شکل۷ نمودار زمان ماندگاری جریان برای سه زاویه مختلف ارائه شده است. یکی از مشخصات مهم ناحیه هایپریک زمان ماند است، که معمولاً برای محاسبه زمان ماندگاری، از مفهوم متوسط زمان ماند ذرات استفاده می شود. نتایج نشان میدهد با افزایش زاویه، زمان ماندگاری جریان درون بستر رسوبی افزایش یافته است. پرداختند و نتایج آنان نشان داد که عمق تبادلات هایپریک رابطهی مستقیمی با هدایت هیدرولیکی دارد، که با افزایش هدایت هیدرولیکی عمق تبادلات هایپریک نیز افزایش مییابد.



**Fig.11** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.0073 and Usub/U=0.014.

**شکل۱۱** تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات

هايپريک برای Qsub/Q=0.0073 و Usub/U=0.014.



**Fig.12** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.0081 and Usub/U=0.021.

شکل ۱۲ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات هایپریک برای Qsub/Q=0.0081 و Usub/U=0.021.



**Fig.13** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.0108 and Usub/U=0.021.

شکل۱۳ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات

بیشتر است. این نتایج با مطالعه (2019) بیشتر است. این نتایج با مطالعه (2019) مطابقت دارد. (2019) Jie Ren et al. (2019) بطور عددی به تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر تبادلات هایپریک بر فرم بستر تلماسه



**Fig.8** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.00415 and Usub/U=0.0108.

**شکل∧** تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات هایپریک برای Qsub/Q= 0.00415 و Usub/U=0.0108



**Fig.9** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.0055 and Usub/U=0.0108.

**شکل ۹** تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات هایپریک برای Sub/Q=0.0055 و Usub/U=0.0108.



**Fig.10** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.0055 and Usub/U=0.014.

شکل۱۰ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات هاییریک برای Sub/Q=0.005 و Usub/U=0.014.

هایپریک برای Qsub/Q=0.0108 و Usub/U=0.021.



**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 حداکثر عمق بیبعد تبادلات هایپریک در هدایت هیدرولیکی 9-1.11-K/A برای زاویه ۱۰درجه.



**Fig.15** The effect of hydraulic conductivity on the dimensionless depth of hyporheic exchanges for Qsub/Q=0.012 and Usub/U=0.024. شکل 1۵ تأثیر هدایت هیدرولیکی بر عمق بیبعد تبادلات. Usub/U=0.024 و Qsub/Q=0.012 هاییریک برای Qsub/Q=0.012

می شود جریان زیرسطحی بر 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 تبادلی افزایش و عمق بی بعد تبادلات هایپریک کاهش پیدا می کند.



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



**Fig.20** The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for Usub/U=0/014.

شکل۲۰ تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی

حداکثر عمق بی بعد تبادلات هایپریک در Usub/U=0/014.



**Fig.21** The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for Usub/U=0/021.

شکل۲۱ تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی حداکثر عمق بیبعد تبادلات هایپریک در Usub/U=0/021.



**Fig.22** The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for Usub/U=0/024. شكل۲۲ تأثير نسبت دبي زيرسطحي به دبي سطحي بر روي

حداکثر عمق بی بعد تبادلات هایپریک در Usub/U=0/024.

۳-۵- تأثیر ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادلات



**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.

شکل۱۸ تأثیر نسبت سرعت جریان زیرسطحی به سرعت سطحی بر روی حداکثر عمق بی بعد تبادلات هایپریک در هدایت هیدرولیکی ۲۰-۲.11 برای زاویه ۳۰درجه.

همانطور که در شکل۱۹ تا شکل۲۲ 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 بیبعد تبادلات هایپریک کاهش پیدا میکند.



**Fig.19** The effect of the ratio of subsurface flow to surface flow on the maximum dimensionless depth of hyporheic exchanges for Usub/U=0/0108.

**شکل۱۹** تأثیر نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی بر روی حداکثر عمق بیبعد تبادلات هایپریک در Usub/U=0/0108.



Fig.24 The effect porous media thickness on the hyporheic exchange depth for an angle of 20 degrees. شكل۲۴ تأثير ضخامت بستر رسوبي بر عمق تبادلات هايپريک



**Fig.25** The effect porous media thickness on the hyporheic exchange depth for an angle of 30 degrees. شکل۲۵ تأثیر ضخامت بستر رسوبی بر عمق تبادلات هایپریک برای زاویه ۳۰ درجه.



در شکل۲۳ تا ۲۵ تأثیر ضخامتهای مختلف (۰/۴، ۶/۴ و ۸/۸ متر) در هدایت هیدرولیکی K=1E-8 متر مربع برای سه زاویه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه ارائه گردیده است. نتایج نشان میدهد با توجه به اینکه حداکثر 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 تبادلات هایپریک میشود.



**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 تبادلات هایپریک برای زاویه ۱۰ درجه.



**(θ)** 

با مدلسازی جریان سطحی و حل جریان زیرسطحی با استفاده از تغییرات تراز هیدرولیکی شبیه سازی شده رو سطح مشترک جریان سطحی و زیرسطحی نتایج زیر بدست آمد:

 ۱- با کاهش زاویه وجه پایینرونده تلماسه، منطقه جدا شدگی بزرگتر شده و به کف نزدیک شده که باعث افزایش عمق تبادلات هایپریک می شود.

۲- مدلسازی جریان زیرسطحی نشان داد، برای یک هدایت هیدرولیکی و ضخامت رسوبی ثابت با افزایش زاویه، دبی تبادلی و زمانماند افزایش پیدا میکند، اما عمق تبادلات هایپریک کاهش مییابد.

۳- با بررسی هدایت هیدرولیکی مختلف بر روی عمق تبادلات هایپریک در یک نسبت ثابت دبی جریان سطحی به زیرسطحی، می توان نتیجه گرفت با افزایش نسبت K/A عمق بی بعد تبادلات هایپریک افزایش پیدا می کند.

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

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

۶- بررسی ضخامت مختلف برای سه زاویه ۲۰، ۲۰ و ۳۰ درجه
 Geophysical Research Letters, 41(18), pp.6435-6442.

Cardenas, M. B., and Wilson, J. L. 2007. Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments. Water Resources Research, 43(8).

Chen, X., Cardenas, M. B., and Chen, L. 2015. Three dimensional versus two dimensional bed forminduced 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., and 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.

برای هدایت هیدرولیکی ثابث نشان میدهد، با افزایش عمق بستر رسوبی عمق تبادلات هایپریک کاهش پیدا میکند. و همچنین با افزایش نسبت دبی زیرسطحی به دبی سطحی، عمق بی بعد تبادلات هایپریک کاهش میابد.

- زاويه
- (H) (m) عمق بستر رسوبی
- (Hp)
   (m) عمق جریان هایپریک(A)

   (A)
   (m) ماها سطح تاماسه(m)
- (A) (m) طول سطح تلماسه (m)
   (U) سرعت جريان سطحی (m/s) (U)
- (Usub) (m/s) سرعت جریان زیر سطحی (m/s) (K) (m^2)
- هدایت هیدرولیکی(m^2) (K)
- (Q) (m^3/s) دبی جریان سطحی
- (Qsub) (m^3/s)دبی جریان زیرسطحی (dsub)

# ۵- منابع

Best, J. L. (1993). On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. Unknown Journal, 61-92.

Biddulph, M. 2015. Hyporheic Zone: In Situ Sampling, Geomorphological Techniques. Chapter 3, Section 11.1.

Blois, G., Best, J.L., Sambrook Smith, G.H. and Hardy, R.J., 2014. Effect of bed permeability and hyporheic flow on turbulent flow over bed forms.

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

Movahedi, N., Dehghani, A.A., Schmidt, Ch., Trauth, N. and 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. and Zaramella, M. 2004. Hyporheic exchange with gravel beds: basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows. Journal of Hydraulic Engineering, 130(7), pp.647-656.

Ren, J., Wang, X., Zhou, Y., Chen, B. and Men, L. 2019. An Analysis of the Factors Affecting Hyporheic Exchange based on Numerical Modeling. Water, 11(4), p.665.

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