



## Estimation of vertical exchange velocity through the sediment-water interface (Case study: Ziarat River in Golestan province)

J. Khandoozi, A. A. Dehghani\*, M. Meftah Halaghi, A. Zahiri, Kh. Ghorban

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

**ABSTRACT:** Precise estimation of water exchange between surface and subsurface flow in the hyporheic zone which is the habitat of microorganisms, is vital. The temperature can be used as a tracer for the estimation of water exchange through sediment-water interphase. In this study, an instrument was designed and constructed to make the measurement and recording of sediment temperature in the depth of the hyporheic zone possible. In this regard, measurements were made in the Ziarat River of Golestan Province by the aforementioned instrument, and vertical exchange velocity through the sediment-water interface was calculated using an extended conceptual model of heat transfer. For this purpose, in a 40 m interval of the river, 10 cross-sections were selected at 4 m intervals, and at each cross-section, the temperature of four different depths of the riverbed (just below the bed, 0.25, 0.50, 0.75 m) was recorded during July and December 2018. The results showed that in all seasons, there is a continuous vertical exchange through the sediment-water interface, which can be obtained from the difference of thermal potential between the surface and subsurface of the river flow. The average of vertical exchange velocity for July and December was 59.3 mm/day and 284.3 mm/day, respectively.

### Review History:

Received: Dec. 07, 2019

Revised: Dec. 07, 2019

Accepted: Jan. 26, 2020

Available Online: Mar. 02, 2020

### Keywords:

Groundwater

Surface Flow

Water Exchange

Temperature Gradient

Hyporheic Region.

### 1- Introduction

The hyporheic zone is an active ecotone that connects surface water and groundwater. The characteristics of this zone are determined by the hydrological [3], chemical and biological [1,2] processes. This area of the river can be considered as a shelter for microorganisms that have played an important role in purifying river surface water. In this zone, a part of the surface water enters the underneath part of the riverbed and reenters the surface water by passing the interference path [4]. The exact measurement of the interaction between surface and subsurface water can be effective for surface water quality management. There are many different methods to measure such an interaction through which the way based on the concentration of tracer injected to flow or bed sediment. Regarding the fact that the surface water temperature is less than under bed river water in cold seasons, by the interaction between surface and subsurface water in the hyporheic zone, the colder water enters the bed and after transferring the heat, the water temperature is balanced; thus, there will be the suitable condition for river creatures especially fishes. While in summer, there is a vice-versa process. Based on the studies, by measuring the temperature of the river bed at different depths and by using the temperature as the tracer, the interaction between surface and subsurface can be estimated.

The dynamic recognition of the water phenomenon in the hyporheic area regarding hydrological, chemical and biological processes are of importance [4,6]. Normally, this phenomenon is accompanied by heat transfer, solution, and suspended materials in the form of physical and chemical processes [5,7]. This is a basic fact that water movement can redistribute the distribution of temperature under the bed surface [8,9]. The current interaction patterns can be derived from the number of temperature changes between surface and subsurface water [10]. The temperature can be easily measured by precise and cheap sensors which are accessible [8,11].

### 2- Material and Methods

In this study, an instrument has been designed and made in order to measure the temperature of the river bed at different depths in the Ziarat River. This instrument involves a metal pipe in which the end is sharp and two round metal boards. One board is used as the base to exit the water, and the other board to determine a place in the pipe tangent with river bed. The sharp end allows the pipe to enter the bed sediment very easily. There are four heat sensors that pass through the pipe and are connected to a temperature monitor. The measurement process was done in July and December 2018. For this purpose, in a 40 m interval of the river, 10 cross-sections

\*Corresponding author's email: amirahmad.dehghani@yahoo.com



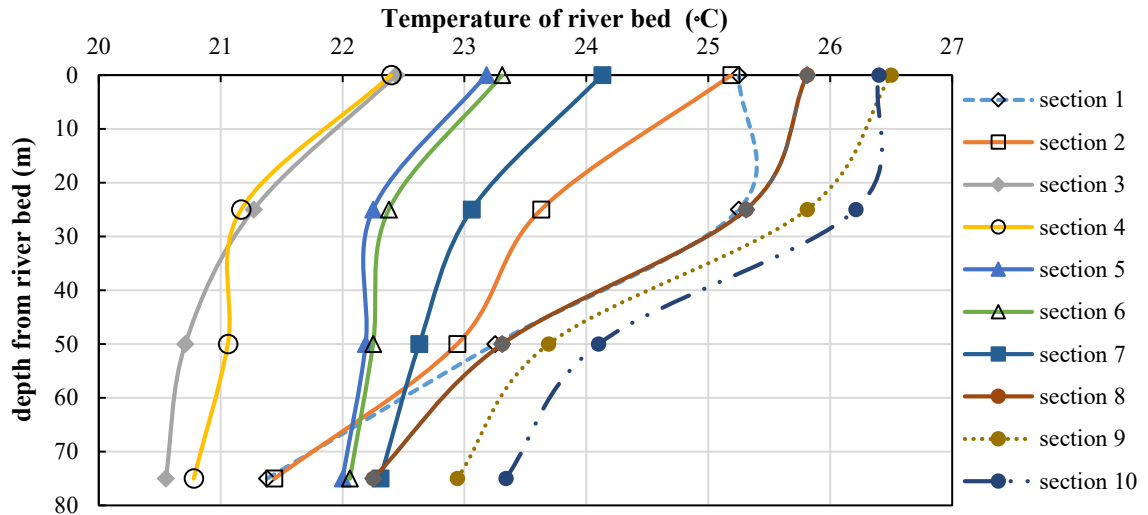


Fig. 1. Variation of temperature against depth from the river bed ( July 2018)

were selected at 4 m intervals, and at each cross-section, the temperature of four different depths of the riverbed (just below the bed, 0.25, 0.50, 0.75 m) were recorded. During the measurement, the average depth of the water in July and December was 11.7 and 18.1 cm, respectively. The average flow velocity in July and December were also 0.2 and 0.35 m/s, respectively.

For assessing the exchange water between surface and subsurface flow across the river bed, the following heat transfer equation [12].

$$\frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} - \frac{v \rho_0 c_0}{\rho c} \frac{dT(z)}{dz} = \frac{\partial T(z)}{\partial t} \quad (1)$$

Where  $v$  is the vertical exchange of flow,  $T(z)$  is temperature,  $c$  is heat capacity of saturated sediment and  $k$  is thermal conductivity of the solid-fluid system ( $J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$ ) [13].

Assuming that for water is 42240 ) and  $k$  equals 1.756), the vertical exchange is obtained based on temperature-measured data.

$$\frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} - \frac{v \rho_0 c_0}{k} \frac{dT(z)}{dz} = 0 \quad (2)$$

In equation (2), the amount of for water is 42240 ) and  $k$  equals 756/1). Then, by using equation (3), the rate of vertical exchange was calculated.

$$v = \left| \frac{k}{\rho_0 c_0 z} \ln \frac{T(z) - T_L}{T_0 - T_L} \right| \quad (3)$$

### 3- Results and Discussion

Figures 1 and 2 show variations of temperature in the depth of river bed sediment. It was found that in July, the temperature is decreased by increasing the depth. The results also showed that in December, the temperature is increased by increasing the depth. The average of vertical exchange velocity for July and December was 59.3 mm/day and 284.3 mm/day, respectively. By looking at the distribution of temperature, it was found that there is an inflection point that can be account as a measuring point of mixing the warmer and colder water.

The penetration of surface water into the porous media can be estimated if the position of this point is obtained. The position of this point from the river bed is obtained by regression analysis and presented as follows for December (Eq.4) and July (Eq.5):

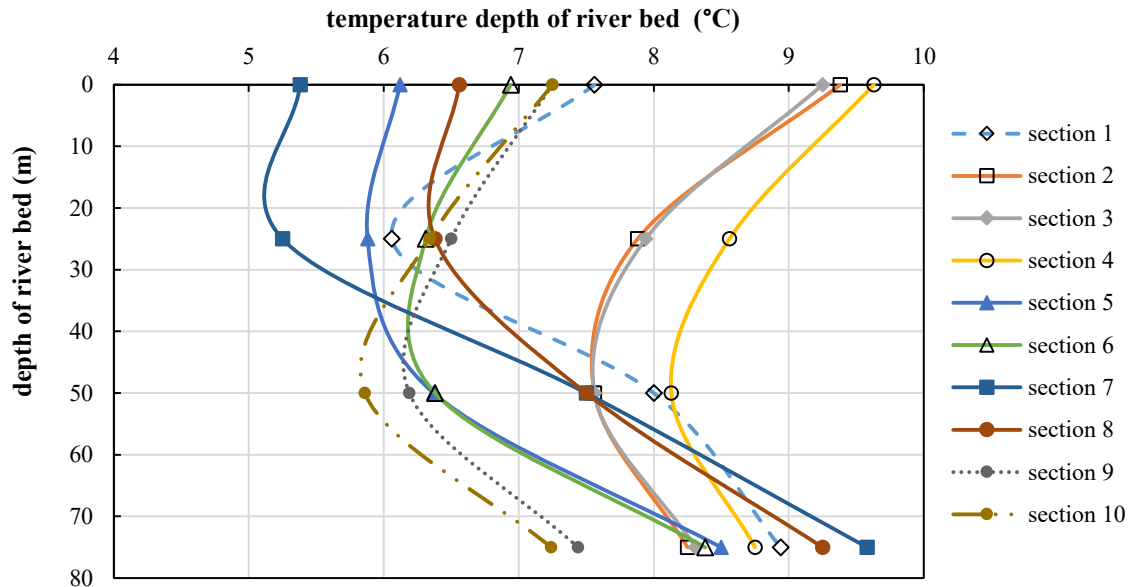
$$Depth = 0.946H + 12.82WT + 48.3V + 12.54295T0 - 1.9TW - 140.07 \quad (4)$$

$$Depth = -0.55H + 7.8WT + 68V - 61.38156T0 + 58.8TW + 30.87698 \quad (5)$$

Where Depth= the inflection point, H= depth of water, WT= flow width, V= flow velocity, TW= surface water temperature.

### 4. CONCLUSION

In this study, vertical exchange velocity through the sediment-water interface is estimated based on measuring the temperature profile below the river bed. The measurements were done during July and December 2018. The results show that the average of vertical exchange velocity for July and December was 59.3 mm/day and 284.3 mm/day, respectively.



**Fig. 2. Variation of temperature against of depth from the river bed ( December 2018)**

The results also show that the penetration depth of surface water into the porous media under the river bed can be estimated by correlating to readily available properties such as flow velocity, water depth, and surface water temperature.

### References

- [1] J. Stanford, J. Ward, The hyporheic habitat of river ecosystems, *Nature*, 335(6185) (1988) 64.
- [2] P.J. Hancock, A.J. Boulton, W.F. Humphreys, Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater, *Hydrogeology Journal*, 13(1) (2005) 98-111.
- [3] T.C. Bjornn, D.W. Reiser, Habitat requirements of salmonids in streams, *American Fisheries Society Special Publication*, 19(837) (1991) 138.
- [4] A. Argerich, E. Martí, F. Sabater, M. Ribot, Temporal variation of hydrological exchange and hyporheic biogeochemistry in a headwater stream during autumn, *Journal of the North American Benthological Society*, 30(3) (2011) 635-652.
- [5] M. Brunke, T. Gonser, The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater biology*, 37(1) (1997) 1-33.
- [6] A.J. Boulton, S. Findlay, P. Marmonier, E.H. Stanley, H.M. Valett, The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1) (1998) 59-81.
- [7] M. Mutz, A. Rohde, Processes of Surface-Subsurface Water Exchange in a Low Energy Sand-Bed Stream, *International Review of Hydrobiology*, 88(3-4) (2003) 290-303.
- [8] D.A. Stonestrom, K.W. Blasch, determining temperature and thermal properties for heat based studies of surface water groundwater interactions, (Cir1260) PY ( 2003).
- [9] D.A. Stonestrom, J. Constantz, Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams, *US Dept. of the Interior, US Geological Survey*, 2003.
- [10] C.S. Lowry, J.F. Walker, R.J. Hunt, M.P. Anderson, Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor, *Water Resources Research*, 43(10) (2007).
- [11] M.P. Anderson, Heat as a ground water tracer, *Groundwater*, 43(6) (2005) 951-968.
- [12] M.L. Sorey, Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells, *Water Resources Research*, 7(4) (1971) 963-970.
- [13] D. Cheng, J. Song, W. Wang, G. Zhang, Influences of riverbed morphology on patterns and magnitudes of hyporheic water exchange within a natural river confluence, *Journal of hydrology*, 574 (2019) 75-84.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

*J. Khandoozi, A. A. Dehghani, M. Meftah Halaghi, A. Zahiri, Kh. Ghorbani, Estimation of vertical exchange velocity through the sediment-water interface (Case study: Ziarat River in Golestan province). Amirkabir J. Civil Eng., 53 (6) (2021) 587-590*

DOI: [10.22060/ceej.2020.17495.6579](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17495.6579)







## تعیین سرعت تبدالی جریان عمودی در سطح تماس بستر رودخانه زیارت و محیط متخلخل زیر آن

جعفر خاندوزی، امیر احمد دهقانی\*، مهدی مفتاح هلقی، عبدالرضا ظهیری، خلیل قربانی

گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

### کلمات کلیدی:

آب های زیرزمینی

آب های سطحی

تبادل آب

گرادیان حرارتی

منطقه هایپرریک

**خلاصه:** تخمین میزان دقیق تبادل آب های سطحی و زیرسطحی در منطقه هایپرریک که به عنوان محلی برای زندگی جانداران و میکروارگانیسم ها محسوب می شود، امری ضروری است. با توجه به اختلاف دما بین آب سطحی در رودخانه و آب زیرسطحی در محیط متخلخل واقع در منطقه هایپرریک و تبادل آب بین دو محیط، می توان از دما به عنوان ردیاب جهت تخمین این تبدالات استفاده کرد. در این تحقیق برای اولین بار در ایران دستگاهی طراحی و ساخته شد تا به واسطه آن امکان اندازه گیری و ثبت دمای رسوبات در عمق منطقه هایپرریک زیر بستر رودخانه ایجاد گردد. در همین راستا اندازه گیری در رودخانه زیارت استان گلستان توسط دستگاه مذکور صورت پذیرفت و با استفاده از مدل مفهومی توسعه یافته انتقال حرارت، میزان تبادل جریان آب سطحی و زیرسطحی محاسبه گردید. بدین منظور در یک بازه به طول ۴۰ متر از رودخانه، تعداد ۱۰ مقطع عرضی به فواصل ۴ متر انتخاب و در هر مقطع دمای چهار عمق مختلف از بستر رودخانه (بلافاصله زیر بستر، ۰/۲۵ متر، ۰/۵ متر، ۰/۷۵ متر) و در ماه های تیر و دی سال ۱۳۹۷، برداشت گردید. نتایج نشان داد که در کلیه فصول سال جریانی دائمی به واسطه اختلاف پتانسیل حرارتی بین جریان آب سطحی و زیر سطحی رودخانه وجود دارد که این امر موجود انتقال مواد مغذی به ریز ارگانیسم ها و در پی آن خودپالایی دائمی رودخانه می گردد. همچنین به طور متوسط میزان سرعت عمودی تبدالی در تیرماه و دی ماه به ترتیب برابر ۵۹/۳ میلی متر در روز و ۲۸۴/۳ میلی متر در روز به دست آمد.

### ۱- مقدمه

در این منطقه قسمتی از آب سطحی رودخانه به محیط متخلخل زیر بستر رودخانه وارد شده و قسمتی از آن با طی کردن مسیری در محیط متخلخل مجدداً به آب سطحی رودخانه باز می گردد؛ در نتیجه، انتقال انرژی در این منطقه صورت می پذیرد [۴].

منطقه هایپرریک اکوتونی فعال واقع در زیر بستر رودخانه است که آب های سطحی و زیرزمینی را به یکدیگر متصل می کند (شکل ۱). به عبارتی در این منطقه، تبادل جریان بین آب سطحی و زیرسطحی اتفاق می افتد و ویژگی های این منطقه توسط فرآیندهای هیدرولوژیکی، شیمیایی، بیولوژیکی [۲ و ۱] و هیدروژئولوژیکی [۳] مشخص می شوند. منطقه هایپرریک در رودخانه ها می تواند به عنوان پناهگاهی برای جانداران و میکروارگانیسم ها محسوب شود و در تصفیه آب سطحی رودخانه نیز نقش مهمی ایفا نماید. تحقیقات در این زمینه در سال های اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

تخمین میزان دقیق تبادل آب سطحی و زیرسطحی می تواند برای مدیریت کیفی آب سطحی موثر باشد. روش های مختلفی برای اندازه گیری این تبادل وجود دارد که در این بین روش های مبتنی بر ردیابی ذرات تزریق شده در بستر و یا جریان آب سطحی و اندازه گیری میرایی غلظت ماده ردیاب بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به اینکه در فصل های سرد سال، معمولاً دمای جریان آب

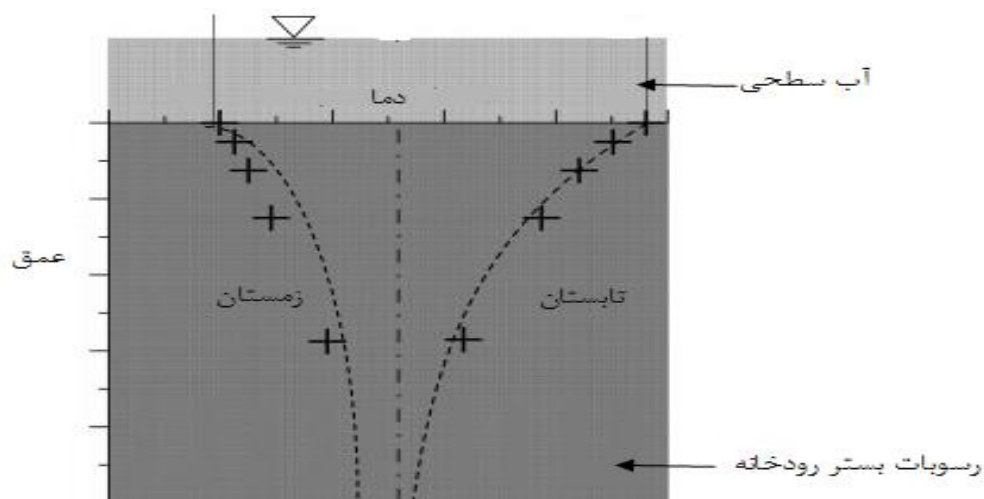
\* نویسنده عهده دار مکاتبات: amirahmad.dehghani@yahoo.com





شکل ۱. تبادل جریان بین آب سطحی و زیرسطحی منطقه هایپریک [۱]

Fig. 1. Flow exchange between surface and subsurface water of the Hyporheic region [1]



شکل ۲. تغییرات دمای آب سطحی و زیرسطحی رودخانه در منطقه هایپریک [۵]

Fig. 2. Surface and subsurface water temperature changes in the Hyporheic region [5]

هایپریک از نظر هیدرولوژیکی، شیمیایی، بیولوژیکی مورد توجه است [۴] معمولاً این پدیده با انتقال گرما، محلول، مواد معلق در قالب فرایندهای فیزیکی و شیمیایی همراه است [۸-۶]. سفوکولئوس [۹] بیان کرد که روش حرارتی یک روش غیرمستقیم جهت تخمین اندرکنش آب های زیر سطحی و سطحی است. گاهی به روش جریان حرارتی، روش جریان دما نیز گفته می شود [۱۰]. این یک واقعیت اساسی است که توزیع درجه حرارت در آب های زیرسطحی فقط نتیجه ای از هدایت گرما نیست، بلکه انتقال به وسیله حرکت آب از میان محیط متخلخل هم می باشد [۱۲ و ۱۱]. الگوهای تبدیلی جریان می تواند از مقدار تغییرات درجه حرارت بین آب های سطحی و زیرسطحی به دست آید [۱۳]. با حل معکوس معادله توزیع درجه

سطحی رودخانه از دمای آب در محیط متخلخل زیر بستر رودخانه کمتر است، با تبادل جریان آب سطحی و زیرسطحی در منطقه هایپریک، آب سردتر به داخل بستر وارد شده و پس از انتقال حرارت و دمای آب برگشتی به جریان آب سطحی متعادل می شود و شرایط دمایی نسبتاً مناسبی را برای جانداران رودخانه به خصوص ماهی ها فراهم می نماید. در فصل تابستان عکس این فرآیند اتفاق می افتد؛ به این صورت که دمای آب سطحی رودخانه از دمای آب در محیط بنابر مطالعات صورت گرفته، با اندازه گیری دمای بستر رودخانه در اعماق مختلف و با استفاده از دما به عنوان ردیاب می توان میزان تبادل قائم بین دو جریان را محاسبه نمود؛ لذا، از روش حرارتی به صورت گسترده برای درک الگوهای تبادل آب در منطقه هایپریک استفاده می شود. شناخت دینامیکی پدیده تبادل آب در منطقه

گیری کردند که در دوره هایی از سال می توان توزیع درجه حرارت را شبه ماندگار در نظر گرفت و مقدار جریان تبادل شده را از حل معکوس معادله انتقال حرارت در راستای قائم تخمین زد.

دندونگ چینگا و همکاران<sup>۱۱</sup> [۲۶] در محل برخورد دو رودخانه، با استفاده از یک میله حاوی سنسور، دمای عمق های متفاوت در کف بستر رودخانه اندازه گیری نمودند و با برداشت ارتفاع نقاط کف بستر رسوب و توزیع ذرات رسوب در محل برخورد رودخانه چگونگی تبادل جریان هایپریک را مورد بررسی قرار داده اند.

نگاهی به سوابق تحقیق نشان می دهد که مطالعه چندانی در خصوص تغییرات دما در یک بازه از رودخانه و در طی ماه های متفاوت (فصل گرم و سرد) سال صورت نگرفته است و لذا در این تحقیق سعی شده است تا با طراحی و ساخت یک دستگاه، تغییرات زمانی و مکانی دما در زیر بستر رودخانه و نرخ تبادل عمودی جریان در رودخانه زیارت در استان گلستان مورد مطالعه قرارگیرد. از طرفی مدل سازی چند متغیره بین پارامترهای هیدرولیکی و دمای جریان سطحی و عمق جریان صفر دمایی با استفاده از نرم افزارهای آماری (مینی تب و اکسل) برای این پارامترها، مدل سازی انجام گرفت.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه زیارت گرگان از منطقه کوه البرز سرچشمه گرفته و در منطقه شمال شرقی ایران واقع شده است و سمت جریان آن از جنوب به سمت شمال می باشد. رودخانه زیارت، که از سرشاخه های رودخانه قره سو محسوب می گردد، در مسیر خود از روستای تاریخی زیارت عبور کرده و با گذر از منطقه ناهارخوران، وارد منطقه شهری گرگان می شود. در طول این مسیر پل ها و خیابان های متعددی رودخانه را قطع می کنند. رودخانه بعد از پل جاده کمربندی از شهر خارج شده و بعد از پل امیرآباد سرخنکلاته و عبور از روستای قربان آباد در موازات جاده آق قلا به رودخانه قره سو متصل می گردد. منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۵۱° ۲۳' ۴۸" تا ۳۴° ۳۰' ۴۸" و عرض جغرافیایی ۳۷° ۳۶' ۳۶" تا ۲۰° ۵۷' ۳۶" واقع است. در حوزه آبریز رودخانه زیارت، متوسط سالانه بارش ۶۰۱ میلی متر و میانگین دمای آن، ۱۳/۴ درجه است. وسعت حوضه آبریز

حرارت در عمق بستر رودخانه، می توان مقدار تبدالی جریان را به دست آورد [۱۴ و ۱۳]. درجه حرارت را به آسانی و راحتی، به ویژه با وجود سنسورهای قوی ارزان قیمت و حافظه های پیشرفته که قابل دسترس است، می توان اندازه گیری کرد [۱۱ و ۱۰].

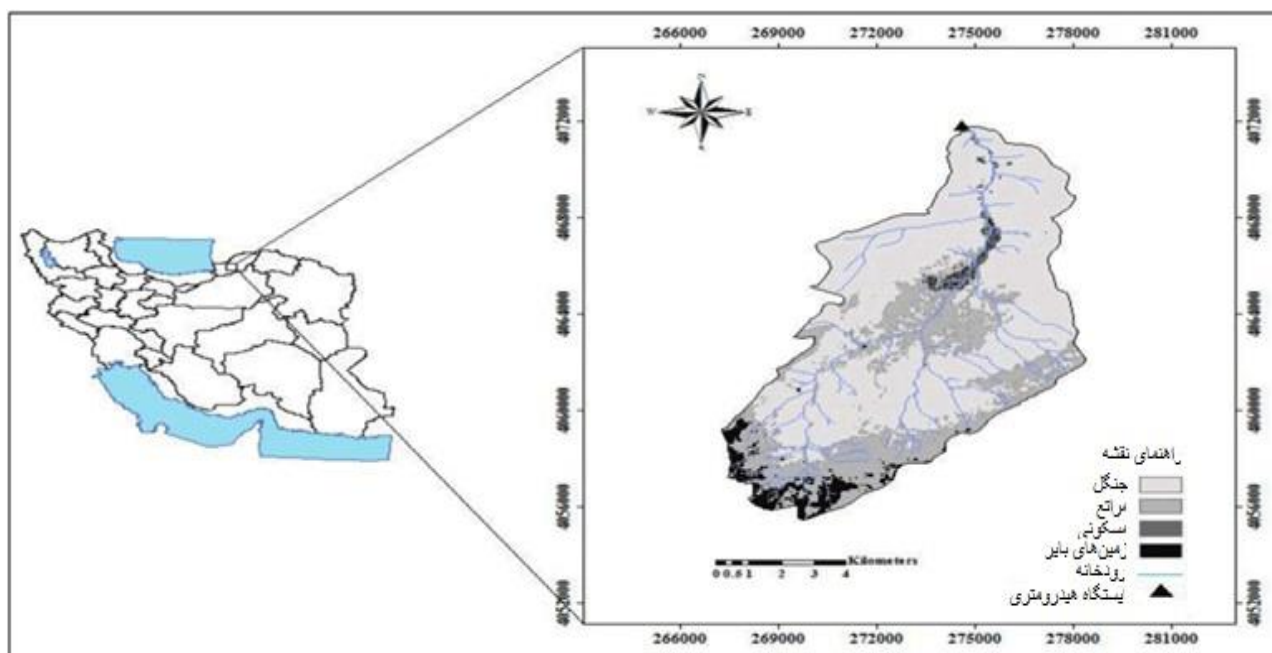
فن ارسترند<sup>۱</sup> [۱۵] اولین شخصی است که تئوری انتقال حرارت را برای مقدار نفوذ آب سطحی ارائه نمود. برادهوف و همکاران<sup>۲</sup> [۱۷] و [۱۶] معادله اساسی و حل تحلیلی را برای این روش استفاده کردند. کارت رایت و همکاران<sup>۳</sup> [۱۹ و ۱۸] آزمایش مرتبط به تبادل آب های سطحی و زیر سطحی را در محیط آزمایشگاه انجام دادند. کارت رایت و سوری<sup>۴</sup> [۲۱ و ۲۰] موفق شدند موضوع تبادل آب های سطحی و زیرسطحی را به صورت کاربردی بیان نمایند. برادهوف و همکاران [۱۶] حل تحلیلی برای جریان حرارتی با شرایط مرزی ماندگار را انجام دادند.

استالمن و سوزوکی<sup>۵</sup> [۲۲ و ۱۷] با حل تحلیلی معادله انتقال حرارتی در شرایط غیرماندگار، میزان سرعت نفوذ آب های سطحی به آب زیر زمینی را به دست آوردند. در تحقیق ایشان، تغییرات روزانه دما به صورت شکل موج سینوسی برای شرایط مرزی بالا استفاده شد. لافام<sup>۶</sup> [۲۳] از پروفیل حرارتی عمودی به منظور تخمین مبادله جریان آب های زیرزمینی استفاده نمود. وی روش محاسبه جریان آب های زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی رسوب را توسعه داد.

سیلیمان و همکاران<sup>۷</sup> [۲۳] از سری زمانی به عنوان شرایط مرزی بالایی برای مدل انتقال حرارت یک بعدی و محاسبه دبی عبوری از میان رسوب رودخانه ها استفاده کرده اند. آن ها نتیجه گرفتند که مدل مذکور برای اندازه گیری سری زمانی درجه حرارت در رودخانه های کم عمق، مناسب است.

اشمیت و همکاران<sup>۸</sup> [۲۴] با استفاده از یک میله دماسنج که در بستر رودخانه وارد شده و توزیع درجه حرارت عمودی در لحظه را ثبت می نماید، تغییرات دما در نقاط مختلف زیر بستر رودخانه را اندازه گیری کردند. کریستین و همکاران<sup>۹</sup> [۲۵ و ۵] نیز نتیجه

- 1 VanOrstrand
- 2 Bredehoeft
- 3 Cartwright K
- 4 Cartwright & Sorey
- 5 Stallman & Suzuki
- 6 Lapham
- 7 Silliman, Ramirez, & McCabe
- 8-Schmidt, Bayer-Raich, & Schirmer
- 9-Christian Anibas



شکل ۳. نقشه حوزه آبریز زیارت و رودخانه مورد مطالعه

Fig. 3. Ziarat and river basin map

ساخته شده است که با حرکت قائم موجب ارسال پرآب به طور قائم داخل بستر رودخانه می‌شود. داخل لوله چهار سنسور حرارتی ضد آب به فاصله ۲۵ سانتی متر که در عمق‌های مختلف با خاک اشباع در تماس می‌باشند، تعبیه شده است. سنسور دمای دیجیتال از نوع DS18B20 ارزان قیمت و با کیفیت بالاست، می‌تواند دمای ۵۵- تا ۱۲۵+ درجه سانتی گراد عملیات اندازه‌گیری دما را به خوبی انجام دهد اما بیشینه دقت آن (دقت بیشتر از ۰/۵ درجه سانتی گراد) در رنج دمایی ۱۰- الی ۸۵+ درجه سانتی گراد است. سنسورها متصل به چهار رشته سیم رابط هستند که از داخل لوله عبور داده شده‌اند و از ابتدای لوله بیرون آمده و به یک نمایشگر دما متصل شده است. نمایشگر یک جعبه مکعبی به ابعاد ۱۳×۹×۵ سانتی متر مکعب می‌باشد که حاوی صفحه نمایش و دو کلید، یکی برای روشن کردن دستگاه و دیگری دستور دهنده ثبت داده‌ها است. اجزای نمایشگر دارای یک برد الکترونیکی، تغذیه‌کننده و حافظه جهت ثبت داده‌ها می‌باشد. برد الکترونیکی شامل یک سری پایه‌ها، USB، تغذیه‌کننده (پاور) و میکروکنترلر است که در محیط میکروکنترلر آردوینو برنامه‌نویسی شده است.

در بالادست نیز ۱۰۰ کیلومتر مربع با ابعاد ۱۹/۶۴ کیلومتر در طول و عرض پنج کیلومتر می‌باشد. میانگین آبدهی سالانه رودخانه زیارت حدود ۱۰/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. رسوبات بستر رودخانه شامل رسوبات درشت آبرفتی، رسوبات شن و ماسه، در طول رودخانه و در پائین دست غالباً به شکل لای و رس می‌باشند. طول رودخانه ۳۶ کیلومتر و میانگین شیب آن ۴/۶ درصد می‌باشد (شکل ۳).

در این تحقیق دستگاهی جهت اندازه‌گیری میزان دما در عمق‌های مختلف زیر بستر رودخانه طراحی و ساخته شد. تصاویر این دستگاه در (شکل ۴) نمایش داده شده است. این دستگاه دارای یک لوله فلزی (پرآب) به قطر داخلی شش سانتی متر و به طول ۱۴۲ سانتی متر است که انتهای آن به صورت تیزگوه‌ای طراحی شده است و دو صفحه مدور فلزی یکی به قطر ۲۰ سانتی متر که به منظور تکیه‌گاه جهت بیرون راندن پرآب پس از اتمام اندازه‌گیری از بستر رودخانه و دیگری به قطر ۱۰ سانتی متر جهت مشخص کردن مکانی از لوله که مماس با کف بستر رودخانه قرار می‌گیرد (نقطه ۰)، تشکیل شده است. نوک گوه لوله اجازه می‌دهد تا میله به راحتی به رسوبات کف بستر رودخانه وارد شود. البته، یک میله هدایت گر چکش لغزان و یک وزنه (چکش لغزان) ۱۳/۵ کیلوگرمی جهت کوبیدن لوله





شکل ۴. دستگاه ساخته شده برای اندازه گیری دما در اعماق مختلف بستر رودخانه

Fig. 4. Built-in device for measuring temperature at various depths in the riverbed

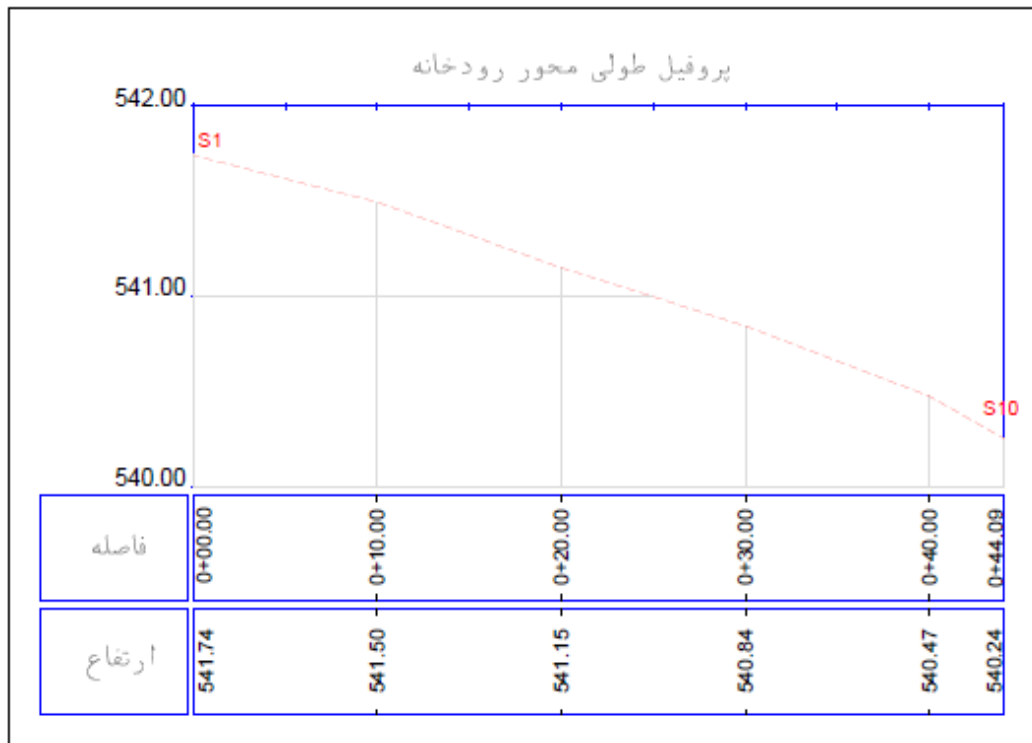
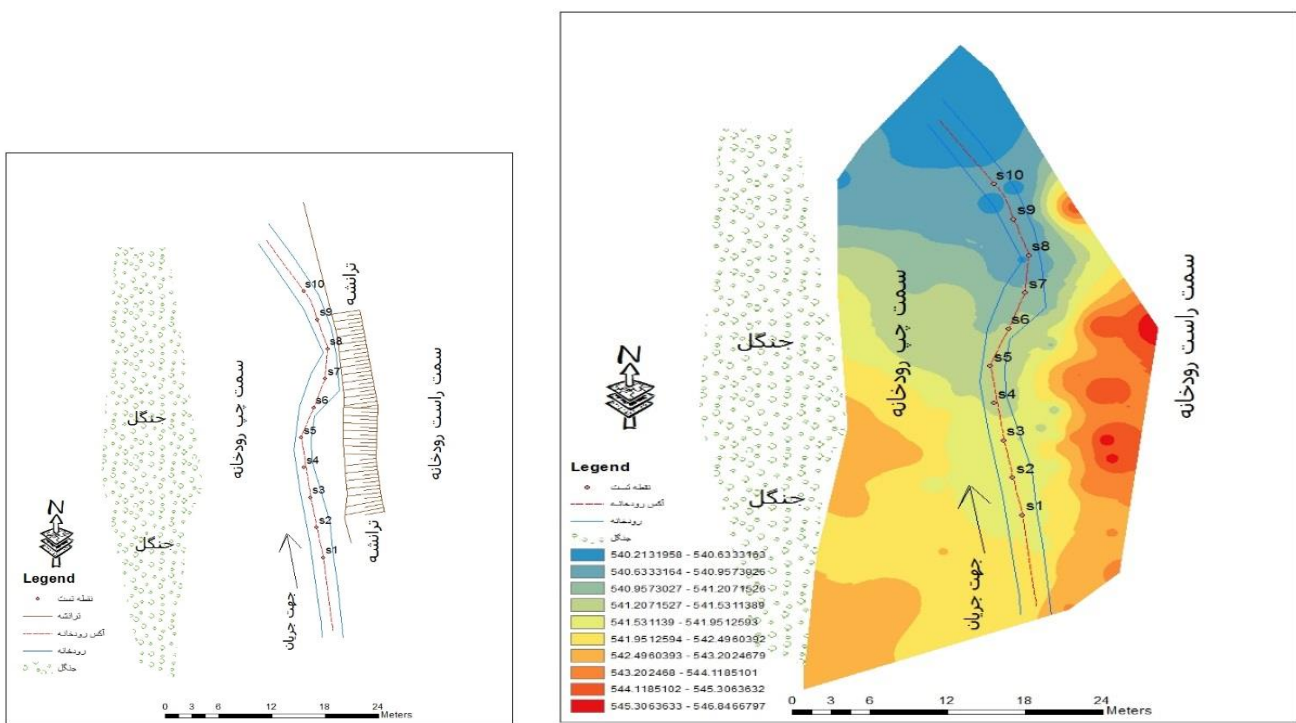
### ۳- روش اندازه گیری دما

نقطه ارتفاعی به فاصله ۲۵ سانتی متر از کف بستر رسوب رودخانه، اندازه گیری دما توسط دستگاه انجام شد. اندازه گیری های دمای رسوب در امتداد خط مرکزی جریان آب رودخانه به عرض متوسط دو متر در ۱۰ مقطع به فاصله چهار متر انجام شد. عمق متوسط جریان در تیرماه و دی ماه به ترتیب ۱۱/۷ سانتی متر و ۱۸/۱ سانتی متر و سرعت متوسط جریان در تیرماه و دی ماه به ترتیب ۰/۲ متر بر ثانیه و ۰/۳۵ متر بر ثانیه اندازه گیری شد. پلان و پروفیل نقشه برداری شده بازه ۴۰ متری در شکل ۵ نشان داده شده است.

### ۴- مدل انتقال حرارت

با توجه به اینکه جریان آب سطحی و زیر سطحی از دو دمای مختلف برخوردار هستند، انتقال انرژی حرارتی به واسطه پدیده انتقال و پخشیدگی در ناحیه هایپریک صورت می پذیرد [۲۵] با فرض اینکه مبادلات آب تنها در یک جهت عمودی (به سمت بالا یا پایین) صورت

اندازه گیری در تیرماه و دی ماه سال ۱۳۹۷ در رودخانه زیارت، انجام شد. اندازه گیری های دمای رودخانه در عمق های مختلف زیر بستر رودخانه به نحوی انجام شد که در هر مقطع از محل مورد مطالعه و در عمق های بلافاصله زیر بستر رودخانه، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی متر از تراز کف رودخانه اندازه گیری شد. سری زمانی داده ها برای هر نقطه جمع آوری و پس از رسیدن به حالت پایدار، مقطع بعدی اندازه گیری می شد. برای فرو بردن لوله در بستر رودخانه به طور متوسط ۲۰۹ ضربه به وسیله چکش لغزان ۱۳/۵ کیلوگرمی به ارتفاع حدود ۶۰ سانتی متر توسط میله هدایت گر چکش لغزان وارد شد. نحوه کار نیز بدین صورت بود که ابتدا عرض متوسط تر شده رودخانه در طول بازه مورد نظر محاسبه و ۱۹ برابر عرض متوسط بازه به عنوان طول بازه مورد نظر انتخاب شد. فاصله بین مقاطع عرضی نیز دو برابر عرض تر شده در نظر گرفته شد و در هر مقطع چهار



شکل ۵. پلان و پروفیل طولی برداشت دمای رسوب بستر رودخانه زیارت  
 Fig. 5. Longitudinal plan and measured of sediment bed temperature in the Ziarat River

و حداقل درجه حرارت رسوب در ماه دی، به ترتیب ۹/۶۳ درجه سانتیگراد و ۵/۲۵ درجه سانتیگراد و در ماه تیر، به ترتیب ۲۶/۵۰ درجه سانتیگراد و ۲۰/۵۵ درجه سانتیگراد بود. تفاوت بین بالاترین و پایین ترین درجه دما در ماه دی و تیر به ترتیب ۴/۳۸ درجه و ۵/۹۵ درجه بود. شکل های ۸ و ۹ نیز تغییرات دما در عمق رسوبات بستر رودخانه را نشان می دهد. نگاهی به تغییرات دما در عمق بستر رودخانه نشان می دهد که در ماه تیر هر چه از بستر به سمت پایین حرکت شود، دما کاهش می یابد که نشان می دهد دمای آب در رودخانه از دمای آب در محیط متخلخل زیر بستر رودخانه گرم تر است. نتایج همچنین نشان می دهد که در دی ماه، تغییرات برعکس است و هر چه به سمت پایین حرکت شود، دمای آب افزایش می یابد. هر چند تغییرات در مقاطع مختلف عرضی در طول بازه مورد مطالعه اختلافاتی با هم دارند. به عنوان مثال در ماه تیر مقاطع ۱۰، ۹، ۸ و ۲ دارای تغییرات شدید، مقاطع ۶، ۵ و ۴ تغییرات متوسط و مقاطع ۷ و ۳ دارای پروفیل مناسبی هستند. در ماه دی نیز مقطع ۱ رودخانه دارای تغییرات شدید، مقاطع ۱۰، ۹، ۶ و ۵ تغییرات متوسط و مقاطع ۴، ۳ و ۲ دارای پروفیل مناسبی هستند. این نوع تغییرات می تواند در اثر وجود شکل بستر و همچنین جریان های پایین رونده و بالارونده در طول رودخانه باشد. چنانچه نتایج نشان می دهد، کلیه پروفیل ها دارای نقطه عطفی می باشند. این نقطه عطف محلی است که آب سطحی و زیر سطحی در آن به تعادل می رسند، در واقع اختلاف پتانسیل حرارتی موجود بین این دو جریان در جهت رسیدن به تعادل چنین نقطه ای ایجاد می نماید.

شکل های ۱۱ و ۱۰ نیز خطوط هم میزان دما در محیط متخلخل زیر بستر رودخانه در طول بازه را برای ماه های تیر و دی نشان می دهد. نگاهی به نتایج نشان می دهد که در انتهای مسیر رودخانه، جریان گرم رودخانه در تابستان و جریان سرد رودخانه در زمستان به داخل محیط متخلخل بستر وارد شده و در این منطقه جریان های رو به پایین در بستر رودخانه وجود دارد. همچنین، نقاطی که در فصل گرما دارای دمای کمتری بوده اند، در فصل سرد دارای دمای بیشتری می باشند، و بالعکس نقاطی که دارای دمای بیشتری بوده اند دارای دمای کمتری می باشند. با استفاده از نتایج اندازه گیری دما در عمق های مختلف و بازه های مختلف رودخانه و همچنین استفاده از رابطه (۳)، به طور متوسط میزان سرعت عمودی تبدالی در تیرماه

می پذیرد، معادله حرارتی یک بعدی را می توان برای محاسبه انتقال آب به صورت رابطه (۱) مورد استفاده قرار داد [۲۱]

$$\frac{k}{\tilde{n}c} \frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} - \frac{i \tilde{n}_0 c_0}{\tilde{n}c} \frac{dT(z)}{dz} = \frac{\partial T(z)}{\partial t} \quad (1)$$

که در این رابطه، پارامتر  $v$  سرعت تبادل عمودی آب در عمق بر حسب (mm/d) است. همچنین  $T(z)$  درجه حرارت (درجه سلسیوس) رسوبات بستر رودخانه در عمق  $z$ ،  $\tilde{n}c$  ظرفیت گرمایی حجمی رسوبات اشباع ( $Jm^{-3}k^{-1}$ ) و  $\tilde{n}_0 c_0$  ظرفیت گرمایی حجمی سیال (آب) ( $Jm^{-3}k^{-1}$ ) می باشد. علاوه بر این،  $k$  ضریب هدایت هیدرولیکی حرارتی بر حسب ( $Js^{-1} m^{-1} k^{-1}$ ) می باشد.

با فرض ثابت بودن تغییرات درجه حرارت رسوبات بستر رودخانه در عمق  $Z$  ( $T(Z)$ ) در مقیاس زمان  $t$ ، سمت راست معادله حرارت (۱) حذف می شود و رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) ساده می شود [۲۶]

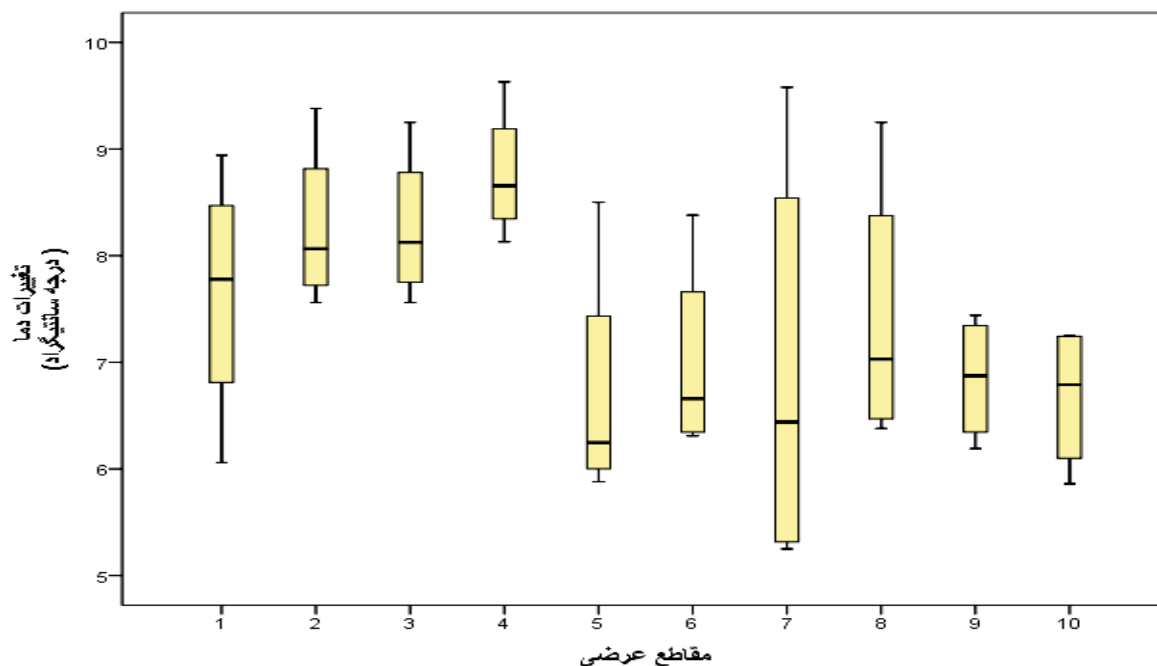
$$\frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} - \frac{v \rho_0 c_0}{k} \frac{dT(z)}{dz} = 0 \quad (2)$$

با فرض اینکه دمای آب زیرزمینی در عمق، شبه پایدار باشد و با در نظر گرفتن شرایط مرزی  $T = T_0$  برای  $z = 0$  و دمای ثابت  $TL$  برای  $z = L$ ، پروفیل حرارت را می توان با حل تحلیلی رابطه (۲) به دست آورد. با انجام عملیات بهینه سازی پارامتر  $k$  به نحوی محاسبه شد که حداقل خطا بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دما در اعماق مختلف به دست آید. در رابطه (۲)، مقدار  $\tilde{n}_0 c_0$  برای آب،  $42240$  ( $Jm^{-3}k^{-1}$ ) و  $k$  برابر  $11756$  ( $Js^{-1} m^{-1} k^{-1}$ ) فرض شده است. سپس با استفاده از رابطه (۳) میزان تبدالات عمودی جریان محاسبه شد.

$$v = \left| \frac{k}{\rho_0 c_0 z} \ln \frac{T(z) - T_L}{T_0 - T_L} \right| \quad (3)$$

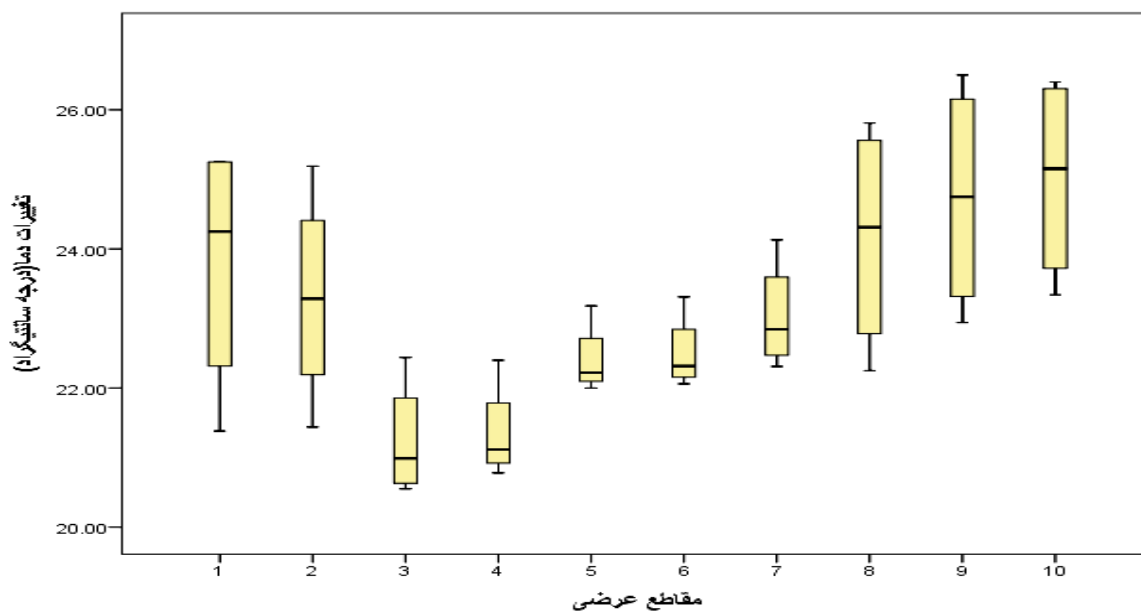
## ۵- نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آماری از دما در مقاطع مختلف رودخانه در شکل های ۶ و ۷ و جدول های ۱ و ۲ شاخص های آماری دمای رسوبات بستر رودخانه زیارت در مقاطع مختلف رودخانه (دی و تیر ماه ۱۳۹۷)، را نشان می دهد. برای ده مقطع مورد بررسی حداکثر



شکل ۶. نمودار جعبه دمای رسوبات درمقاطع مختلف رودخانه (دی ماه ۱۳۹۷)

Fig. 6. Box plot of temperature of sediments in different sections of river (December, 2018)



شکل ۷. نمودار جعبه دمای رسوبات درمقاطع مختلف رودخانه (تیرماه ۱۳۹۷)

Fig. 7. Box plot of temperature of sediments in different sections of river (July, 2018)

نتایج نشان می دهد که روی پروفیل دما، نقاطی وجود دارد که گرادیان دمایی در آن‌ها صفر است، در این نقاط، تقابل جریان‌ها رو به بالا و پایین مشاهده می‌گردد، به دلیل اینکه گرادیان دمایی در بالا و پایین این نقاط متفاوت است. این نقاط کلیدی و حساس هستند که

و دی ماه به ترتیب برابر  $59/3$  میلی‌متر در روز و  $284/3$  میلی‌متر در روز به دست آمد که موید این نکته است که سرعت عمودی تبادل جریان در دی ماه از تیر ماه بیشتر است که یکی از دلایل آن وجود دبی جریان بیشتر در رودخانه است.

جدول ۱. شاخص های متمرکز آماری دمای رسوبات بستر رودخانه زیارت درمقاطع مختلف رودخانه (دی ماه ۱۳۹۷)

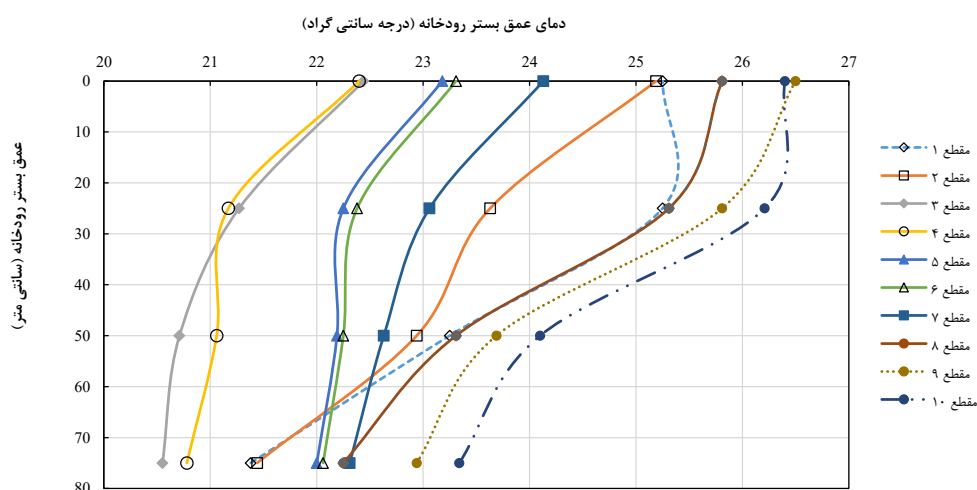
Table 1. Statistical descriptive indices of sediments of the Ziarat river bed at different sections of the river (December, 2018)

انحراف معیار	واریانس	میانه	میانگین	حداکثر	حداقل
۱/۲۰	۱/۴۵	۷/۵۰	۷/۴۵	۹/۶۳	۵/۲۵

جدول ۲. شاخص های متمرکز آماری دمای رسوبات بستر رودخانه زیارت درمقاطع مختلف رودخانه (تیر ماه ۱۳۹۷)

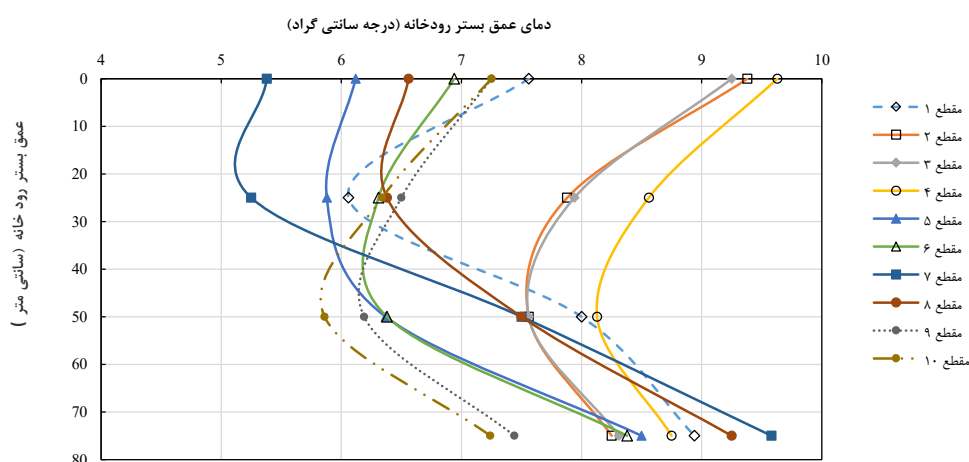
(Table 2. Statistical descriptive indices of sediments in Ziarat River beds at different sections of the river (July 2018)

انحراف معیار	واریانس	میانه	میانگین	حداکثر	حداقل
۱/۶۸	۲/۸۲	۲۲/۹۴	۲۳/۱۵	۲۶/۵	۲۰/۵۵



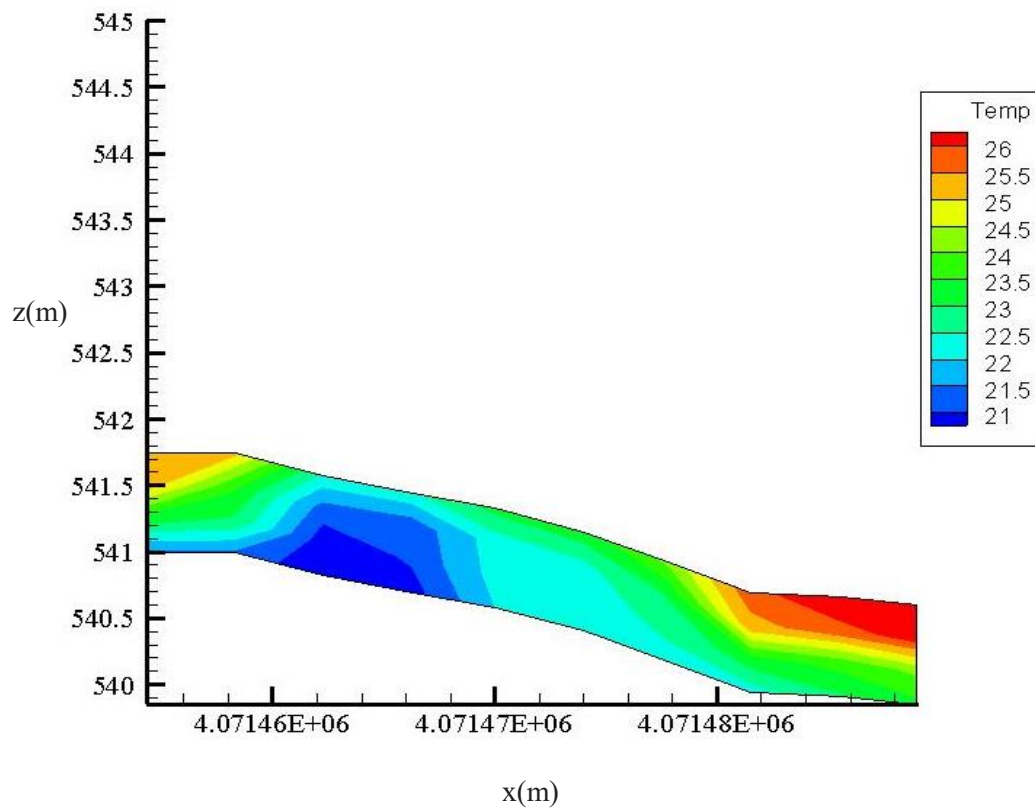
شکل ۸. نمودار تغییرات دما در عمق بستر رودخانه برای مقاطع مختلف (تیرماه ۱۳۹۷)

Fig. 8. Variation of temperature against of depth from the river bed (July 2018)

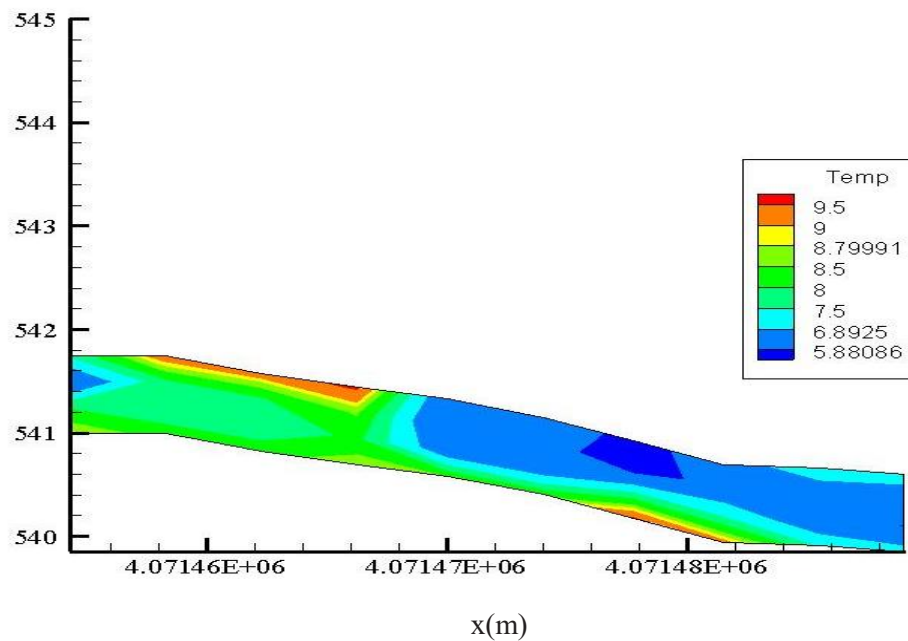


شکل ۹. نمودار تغییرات دما در عمق بستر رودخانه برای مقاطع مختلف (دی ماه ۱۳۹۷)

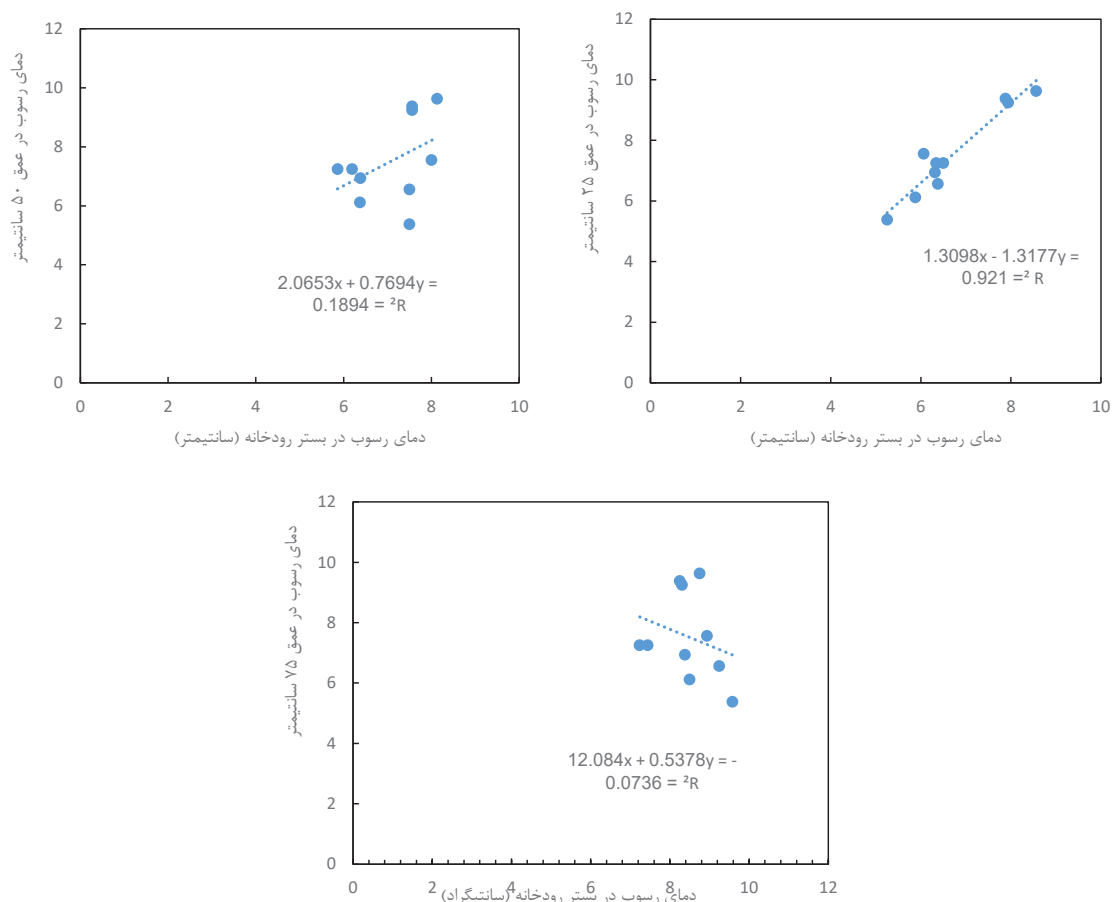
Fig. 9. Variation of temperature against of depth from the river bed (December 2018)



شکل ۱۰. منحنی های هم میزان دما در محیط متخلخل زیر بستر رودخانه (تیرماه ۱۳۹۷)  
Fig. 10. Isothermal contour of temperature in Porous Media Under the River Bed (July 2018)



شکل ۱۱. منحنی های هم میزان دما در محیط متخلخل زیر بستر رودخانه (دی ماه ۱۳۹۷)  
Fig. 11. Isothermal contour of temperature in Porous Media Under the River Bed (December, 2018)



شکل ۱۲. تغییرات دمای رسوب در اعماق مختلف بر حسب دمای رسوب بلافاصله زیر بستر رودخانه (دی ماه ۱۳۹۷)

Fig. 12. Variation of bed temperature in different distance from the bed against temperature of (sediment just below the bed (December, 2018

منظور همبستگی بین دمای رسوب بلافاصله زیر بستر و دمای آب در اعماق ۷۵ و ۵۰ و ۲۵ سانتی متری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دمای آب در عمق ۲۵ سانتی متری همبستگی خوبی با دمای رسوب در عمق صفر نشان داده است (شکل ۱۲). لذا با استفاده از رابط برآزش داده بین این دو متغیر می توان دمای عمق ۲۵ سانتی متری را بر اساس عمق صفر تخمین زد. اما سایر اعماق همبستگی خوبی نشان نداده است. با توجه به مشکل بودن اندازه گیری دما در اعماق بیشتر دو متغیر مربوط به دمای ۷۵ و ۲۵ نیز حذف شده است در واقع عمق متناظر با گرادیان حرارتی صفر بر اساس متغیرهای سهل الوصول جریان سطحی بر آورد شده است.

رابطه برآزش داده شده از متغیرهای جریان سطحی شامل عمق، سرعت جریان، عرض جریان و دمای آب

می تواند پیش بینی کننده برخورد جریان های روبه پایین سطحی و رو به بالای زیر سطحی باشد. لذا تخمین این نقاط می تواند در مسائل مربوط به احیاء رودخانه ها و مسائل زیست محیطی بسیار کمک کننده و اثرگذار باشد. با توجه به پارامترهای هیدرولیکی و ترمو دینامیکی جریان سطحی با استفاده از نرم افزارهای آماری (مینی تب و اکسل) برای این پارامترها، مدل سازی انجام گرفت. نتایج انجام رگرسیون نشان داد که بیشترین همبستگی مربوط به مشارکت همه متغیرهای مستقل می باشد. اما از دیدگاه کاربردی کاهش متغیرها و همچنین حذف متغیرهای صعب الوصول در رابطه استفاده از آن را راحت تر و کاربردی تر می نماید. اندازه گیری دمای رسوب در اعماق ۷۵ و ۵۰ و ۲۵ برای کاربر، آسان نیست، لذا در مراحل بعدی سعی شده است که دمای اندازه گیری شده در این اعماق از رابطه حذف شود. به این

و دمای آب در بستر جریان به شرح زیر می باشد:

که  $Depth$ ، عمق متناظر با گرادیان حرارتی،  $H$  عمق جریان،  $WT$  عرض جریان،  $V$  سرعت متوسط جریان،  $T$  دمای آب در سطح رسوب بستر جریان و  $Tw$  دمای آب می باشد. شکل (۱۵) نیز تغییرات عمق  $Depth$  (محاسبه شده) بر حسب مقادیر مشاهده شده در تیر ماه را نشان می دهد.

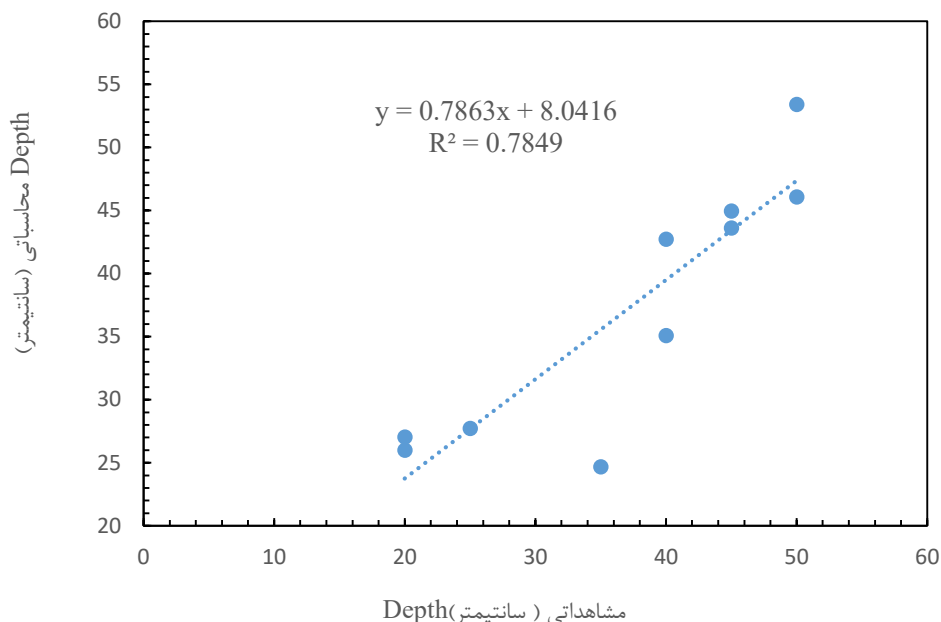
#### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق با طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری دما، میزان سرعت عمودی تبدالی در عمق های مختلف بستر رودخانه در دو ماه تیر و دی سال ۱۳۹۷ برای بازه ای از رودخانه زیارت در بالادست شهر گرگان با استفاده از حل معادله تبادل حرارتی، محاسبه شد. نتایج نشان داد که در ابتدای این بازه جریان های رو به بالا وجود داشته و در انتهای آن جریان رو به پایین وجود دارد که باعث متعادل شدن دمای آب سطحی و آب زیرسطحی می شود. نتایج تحقیق حاضر نشان

$$Depth = 0.946H + 12.82WT + 48.3V + 12.54295T - 1.9Tw - 140.07 \quad (۴)$$

در دی ماه را نشان می دهد. نتایج محاسبات برای تیرماه نیز با توجه به رگرسیون گام به گام بین متغیرها و انتخاب پارامترهای زود یافت منجر به نتایج ارائه شده در شکل (۱۴) و رابطه (۵) شد.

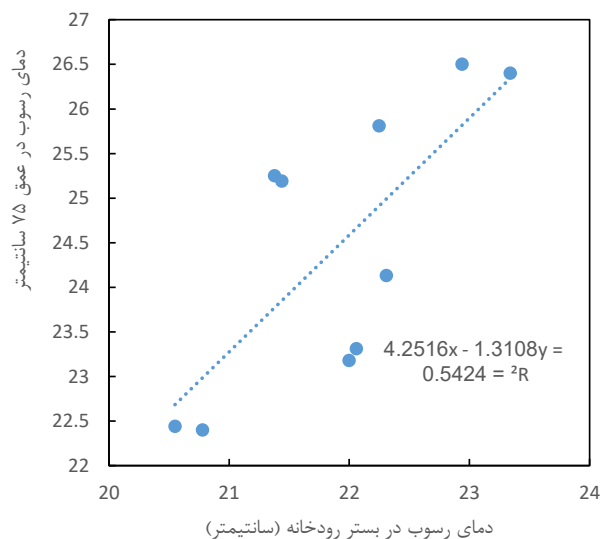
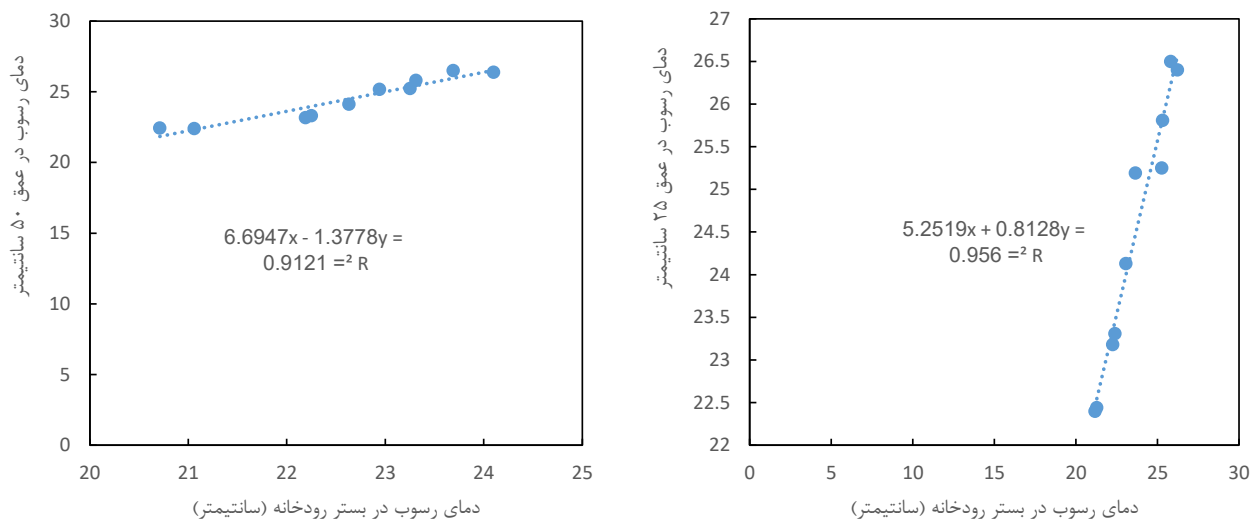
$$Depth = -0.55H + 7.8WT + 68V - 61.38156T + 58.8Tw + 30.87698 \quad (۵)$$



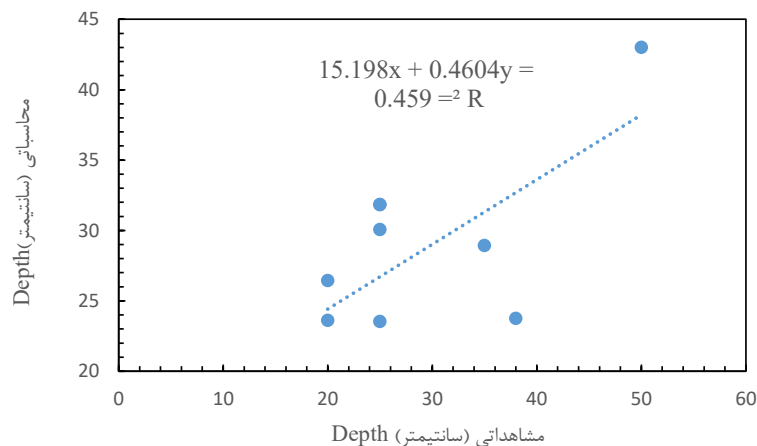
شکل ۱۳. تغییرات مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق متناظر گرادیان حرارتی صفر (دی ماه ۱۳۹۷)

Fig. 13. Variation of computed and observed values of corresponding zero thermal gradient depth (December, 2018)





شکل ۱۴. تغییرات دمای رسوب در اعماق مختلف بر حسب دمای رسوب بلافاصله زیر بستر رودخانه (تیرماه ۱۳۹۷)  
**Fig. 14. Variation of bed temperature in different distance from the bed against temperature of sediment just below the bed (July 2018)**



شکل ۱۵. تغییرات مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق متناظر گرادیان حرارتی صفر (تیرماه ۱۳۹۷)  
**(Fig. 15. Variation of computed and observed values of corresponding zero thermal gradient depth (July 2018)**

- Processes, 23(15) (2009) 2165-2177.
- [6] M. Brunke, T. Gonser, The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater biology*, 37(1) (1997) 1-33.
- [7] A.J. Boulton, S. Findlay, P. Marmonier, E.H. Stanley, H.M. Valett, The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1) (1998) 59-81.
- [8] M. Mutz, A. Rohde, Processes of Surface-Subsurface Water Exchange in a Low Energy Sand-Bed Stream, *International Review of Hydrobiology*, 88(3-4) (2003) 290-303.
- [9] M. Sophocleous, Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeology journal*, 10(1) (2002) 52-67.
- [10] M.P. Anderson, Heat as a ground water tracer, *Groundwater*, 43(6) (2005) 951-968.
- [11] D.A. Stonestrom, K.W. Blasch, APPENDIX E: DETERMINING TEMPERATURE AND THERMAL PROPERTIES FOR HEAT-BASED STUDIES OF SURFACE-WATER GROUND-WATER INTERACTIONS, STATEMENT BY AUTHOR, (2003) 169.
- [12] D.A. Stonestrom, J. Constantz, Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams, US Dept. of the Interior, US Geological Survey, 2003.
- [13] C.S. Lowry, J.F. Walker, R.J. Hunt, M.P. Anderson, Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor, *Water Resources Research*, 43(10) (2007).
- [14] R.G. Storey, K.W. Howard, D.D. Williams, Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: A three-dimensional groundwater flow model, *Water Resources Research*, 39(2) (2003).
- [15] C. Van Orstrand, Temperature gradients, *Problems of petroleum geology*, 989 (1934) 1021.
- [16] J. Bredehoeft, I. Papaopulos, Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile, *Water Resources Research*, 1(2) (1965) 325-328.
- [17] R. Stallman, Steady one-dimensional fluid flow in a

داد که می توان از تغییرات دما به عنوان شاخصی جهت تعیین تبادل قائم جریان در ناحیه هایپریک استفاده نمود. نتایج نشان می دهد که به دلیل وجود اختلاف پتانسیل حرارتی در کلیه فصول سال همیشه تبادل قائم میان جریان سطحی و زیر سطحی رودخانه وجود دارد که موجب ایجاد یک جریان دائمی به واسطه این اختلاف پتانسیل در منطقه هایپریک می شود که نتیجه آن انتقال مواد مغذی به ریز ارگانیسم ها موجود در منطقه و از قبل آن خودپالایی دائمی رودخانه می باشد. با استفاده از نتایج اندازه گیری دما در عمق های مختلف و بازه های مختلف رودخانه به طور متوسط میزان سرعت عمودی تبدالی در تیرماه و دی ماه به ترتیب برابر ۵۹/۳ میلی متر در روز و ۲۸۴/۳ میلی متر در روز به دست آمد که موبد این نکته است که سرعت عمودی تبادل جریان در دی ماه از تیر ماه بیشتر است که یکی از دلایل آن وجود دبی جریان بیشتر در رودخانه است. از طرفی مدل سازی چند متغیره بین عمق جریان متناظر با گرادیان صفردمایی با پارامترهای هیدرولیکی و دمای جریان سطحی با استفاده از نرم افزارهای آماری انجام گرفت. نتایج نشان داد که می توان عمقی از محیط متخلخل که تبدالات آب سطحی و زیرسطحی اتفاق می افتد را به صورت تابعی از پارامترهای زودیافت به دست آورد.

## مراجع

- [1] J. Stanford, J. Ward, The hyporheic habitat of river ecosystems, *Nature*, 335(6185) (1988) 64.
- [2] P.J. Hancock, A.J. Boulton, W.F. Humphreys, Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater, *Hydrogeology Journal*, 13(1) (2005) 98-111.
- [3] T.C. Bjornn, D.W. Reiser, Habitat requirements of salmonids in streams, *American Fisheries Society Special Publication*, 19(837) (1991) 138.
- [4] A. Argerich, E. Martí, F. Sabater, M. Ribot, Temporal variation of hydrological exchange and hyporheic biogeochemistry in a headwater stream during autumn, *Journal of the North American Benthological Society*, 30(3) (2011) 635-652.
- [5] C. Anibas, J.H. Fleckenstein, N. Volze, K. Buis, R. Verhoeven, P. Meire, O. Batelaan, Transient or steady-state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange, *Hydrological*

- [23] S.E. Silliman, J. Ramirez, R.L. McCabe, Quantifying downflow through creek sediments using temperature time series: one-dimensional solution incorporating measured surface temperature, *Journal of Hydrology*, 167(1-4) (1995) 99-119.
- [24] C. Schmidt, M. Bayer-Raich, M. Schirmer, Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4) (2006) 1419-1446.
- [25] C. Anibas, K. Buis, R. Verhoeven, P. Meire, O. Batelaan, A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction, *Journal of Hydrology*, 397(1-2) (2011) 93-104.
- [26] D. Cheng, J. Song, W. Wang, G. Zhang, Influences of riverbed morphology on patterns and magnitudes of hyporheic water exchange within a natural river confluence, *Journal of hydrology*, 574 (2019) 75-84.
- semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature, *Journal of geophysical Research*, 70(12) (1965) 2821-2827.
- [18] D. Kunii, J. Smith, Heat transfer characteristics of porous rocks: II. Thermal conductivities of unconsolidated particles with flowing fluids, *AIChE Journal*, 7(1) (1961) 29-34.
- [19] K. Cartwright, Measurement of fluid velocity using temperature profiles: experimental verification, *Journal of Hydrology*, 43(1-4) (1979) 185-194.
- [20] K. Cartwright, Groundwater discharge in the Illinois Basin as suggested by temperature anomalies, *Water Resources Research*, 6(3) (1970) 912-918.
- [21] M.L. Sorey, Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells, *Water Resources Research*, 7(4) (1971) 963-970.
- [22] S. Suzuki, Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *Journal of Geophysical Research*, 65(9) (1960) 2883-2885.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Khandoozi, A. A. Dehghani, M. Meftah Halaghi, A. Zahiri, Kh. Ghorbani, Estimation of vertical exchange velocity through the sediment-water interface (Case study: Ziarat River in Golestan province). *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2679-2694

DOI: [10.22060/ceej.2020.17495.6579](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17495.6579)



