

## Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution\*

Research Article

Maryam Jamali Dizaji<sup>1</sup>

Morteza Mozafari<sup>2</sup>

Elham Fijani<sup>3</sup>

Roya Eskandari<sup>4</sup>

### 1- Introduction

Hydraulic conductivity is the ability of a porous medium to pass fluid. As one of the most important characters of the aquifer, it is useful in estimating groundwater flow velocity, determining contaminant transport, and solving geotechnical problems (Saha et al., 2016). Hydraulic conductivity measurement methods are divided into two main groups, based on Darcy's law and based on empirical relationships using the pore or particle size or distribution results. Darcy-based methods can be grouped into two categories: laboratory and field. In laboratory methods, hydraulic conductivity could be estimated by water flows through a small sample of the desired material. Field methods are divided into small-scale and large-scale categories. In small-scale methods, the amount of hydraulic conductivity in the saturated and unsaturated parts of the soil is calculated with the help of various tools. The most important large-scale methods include pumping testing and tracing test. Pumping test is the most common method for calculating the hydraulic conductivity of the aquifer from the group of large-scale methods in which the values of hydraulic conductivity and aquifer storage coefficient can be obtained by observing the behavior of the water surface around the pumping well. In some plains, it is not possible to perform pumping and tracing tests since they are expensive and time consuming. In these stations, the method of experimental relations can be used to calculate the hydraulic conductivity. Many researchers have worked to determine the relationship between soil particle size distribution and hydraulic conductivity (Hazen, 1892; Slichtcher, 1899; Kazni, 1927; Carmen, 1937, 1956; Crombin and Monk, 1942; Breyer, 1964; Terzaghi and Pack, 1964; Musch and Danny, 1966). Vanke et al. In 2000 and seventeen studied 431 samples collected from different sedimentary environments and proposed new equations for calculating hydraulic conductivity. Razaz et al. (2014) concluded that the hydraulic conductivity is strongly influenced by the effective particle diameter in the grading curves, by studying the samples with effective diameter of

0.05 to 0.83 mm and uniformity coefficient of 1.3 to 18.3. Arfin and Ali Khan (2020) determined the hydraulic conductivity of 25 soil samples using laboratory methods and Hazen, Slaughter, Breyer, and Kazney-Carmen equations. The results of this study showed that experimental formulas are suitable for calculating the hydraulic conductivity of soil with a wide range of particle sizes. Tai Huang et al. (2017) obtained hydraulic conductivity values for coarse, medium and fine-grained sandy soils from experimental formulas, partial effective porosity modeling and tracing experiments. The results of this study showed that the values of hydraulic conductivity obtained from the Kozney-Carmen relationship are 1.5 to 1.7 times the values obtained from the Hazen method. Also, the difference between the values of hydraulic conductivity obtained in the tracing method and the experimental formulas was greater than the results obtained from the model. The final result confirmed that the closer proximity of the hydraulic conductivity of the model to the real conditions. Saho and Saha (2016) compared the hydraulic conductivity values obtained from the experimental formulas (Hazen-Breyer relations) and the pumping test. The results showed obvious differences in the values of hydraulic conductivity from the experimental equations and the pumping test.

### 2- Methodology

In the present study, an attempt has been made to calculate the hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using the experimental relationships based on the results of alluvial grain size curve. The samples was obtained by drilling of 20 boreholes in Asaluyeh plain (Fig. 1). The plain is located in a narrow zone formed between the Asaluyeh Anticline in the north and the Persian Gulf in the south. The Asaluyeh aquifer is composed of Quaternary sediments, where the water table is located at a depth of 10 to 15 m and the general direction of groundwater flow is from the north toward the sea. The Asaluyeh Plain has been selected as a suitable coastal area for construction of refineries of the South Pars Gas Field. Therefore, understanding the hydraulic conductivity of the aquifer is important for simulating the groundwater flow and probable contaminant transport. To do the research, in the laboratory, particle size distribution test (by sieving for soils with particles larger than 0.07 mm and hydrometers for smaller particles) was performed on the samples. To do this, the soil sample was first washed to remove clay and silt and then placed at a temperature of about 105 °C for 24 hours to dry completely.

\*Manuscript received: 09 March 2022; Revised, 08 May 2022, Accepted, 15 June 2022.

<sup>1</sup>. Master Student of Hydrogeology, School of Geology, College of Science, University of Tehran.

<sup>2</sup>. Corresponding Author. Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: [mmozafari@ut.ac.ir](mailto:mmozafari@ut.ac.ir)

<sup>3</sup>. Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

<sup>4</sup>. MSc of Environmental Geology.



Fig. 1. An aerial view of the Study area

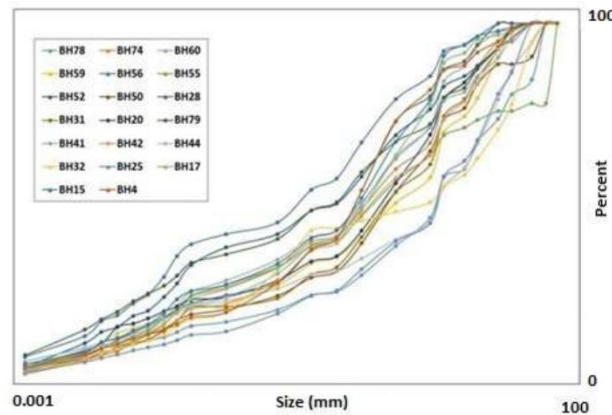


Fig. 2. Particle size distribution

In the next step, the soil lumps were eaten and the mass of the sample was determined and then the soil sample was passed through sieves. At the end of the sieving step, the mass of residual soil on each sieve was measured. Also, the silt and clay values of the samples were determined using hydrometric testing. After determining the particle size of the samples, Folk diagrams were used to determine their type. Finally, the results of the granulation experiment were displayed in a semi-logarithmic aggregation diagram in which the figures for the cumulative percentage of particle mass on the vertical axis and the particle size on the horizontal axis were displayed. After plotting the particle size distribution diagram, the required parameters for calculating hydraulic conductivity were obtained using experimental equations. In the next step, using the experimental relationships, the values of hydraulic conductivity were determined.

### 3- Result and discussion

The particle size distribution curve for the studied samples is plotted in Fig. 2. Based on the Folk diagram, among the samples, 10, 9 and 1 were classified respectively as sand-mud gravel, gravel-mud sand and mud gravel types. Due to the fact that the sediments tested are alluvial, so the variety of particle sizes in them is high. The values of the uniformity coefficient in most of the samples were a large number, indicating the wide range of soil particle size changes. According to Breyer method, the amount of hydraulic

conductivity of the samples was between -0.019 to 2.2 cm per day. The values of hydraulic conductivity by Gustafson, Kozney-Carmen, Terzaghi and Slichter methods are between 0.1 to 1.4, 0.38 to 4.3, 0.2 to 2.8, 0.17 to 1.9 cm, respectively. The wide range of changes in hydraulic conductivity can be due to the range of particle size variability of samples from gravel to silt. Larger values of hydraulic conductivity are associated with samples with higher gravel and sand content, and lower values are associated with samples with high clay content. In a heterogeneous porous environment, such conditions can cause the fine particles to fill the space between the large particles and reduce the hydraulic conductivity.

### 4- Conclusion

The values of hydraulic conductivity obtained from the experimental method for 20 studied samples vary between 0.1 to 4.3 cm per day, which is in the range of common values of hydraulic conductivity of silt and clay. It seems that the calculated hydraulic conductivities for the studied samples were less than its actual value, since gravel and sand was observed in all samples. It could be concluded that the use of different experimental relationships to calculate the hydraulic conductivity of aquifers shows different results. Therefore, to validate the computational hydraulic conductivity values, it is recommended to perform a pumping test or slug test in the aquifer.

**برآورد هدایت هیدرولیکی آبخوان عسلویه با استفاده از روابط تجربی مبتنی بر دانه‌بندی آبرفت\***

مقاله پژوهشی

مریم جمالی دیزجی<sup>(۱)</sup> مرتضی مظفری<sup>(۲)</sup> الهام فیجانی<sup>(۳)</sup> رویا اسکندری<sup>(۴)</sup>

**چکیده** هدایت هیدرولیکی مهم‌ترین متغیر در معادله‌های جریان آب زیرزمینی است که در برآورد سرعت جریان آب، پیش‌بینی چگونگی انتقال آلاینده، حل مشکلات ژئوتکنیکی و تعیین برنامه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش دارد. در این پژوهش کوشش شده تا با استفاده از روش رابطه‌های تجربی، میزان هدایت هیدرولیکی در بخشی از آبخوان عسلویه برآورد گردد. به این منظور، از دستاوردهای ۲۰ آزمایش دانه‌بندی آبرفت و ترسیم منحنی توزیع اندازه ذرات خاک، برای تهیه داده‌های مورد نیاز استفاده شده است. مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده از روش تجربی بین ۰/۱ تا ۴/۳ سانتی متر بر روز متغیر است که در محدوده مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج مواد ریزدانه می‌باشد. با توجه به میزان گراول و ماسه قابل توجه در نمونه‌ها، به نظر می‌رسد که مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده تا حدی کمتر از مقدار واقعی آن باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود برای استفاده از روابط تجربی، مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده دامنه گسترده‌ای از تغییرات را در بر می‌گیرد. بنابراین انجام آزمایش پمپاژ برای صحت‌سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسباتی پیشنهاد می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی** آبخوان دشت عسلویه، هدایت هیدرولیکی، روابط تجربی، منحنی دانه‌بندی.

**مقدمه**

است، دبی عبوری از نمونه خاک در گذر زمان اندازه‌گیری می‌شود و مقدار هدایت هیدرولیکی با استفاده از قانون داریسی از محاسبه می‌گردد. در روش بار افتان، با اندازه‌گیری سرعت افت بار آبی و دانستن مقدار سرعت جریان گذرکننده از نمونه خاک، میزان هدایت هیدرولیکی بر اساس رابطه داریسی تعیین می‌گردد [2,3]. روش‌های صحرائی به دو دسته کلی روش‌های کوچک مقیاس و روش‌های بزرگ مقیاس تقسیم می‌شوند. در روش‌های کوچک مقیاس، مقدار هدایت هیدرولیکی در بخش اشباع و غیر اشباع خاک با کمک ابزارهای گوناگون محاسبه می‌گردد. مهم‌ترین روش‌های بزرگ مقیاس شامل آزمایش پمپاژ و ردیابی است [2]. آزمون پمپاژ رایج‌ترین روش برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان از گروه روش‌های بزرگ مقیاس است که در آن براساس مشاهده رفتار سطح آب در اطراف چاه پمپاژ می‌توان مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان را به دست آورد [3]. در برخی از دشت‌ها امکان انجام آزمایش پمپاژ و ردیابی (به دلیل فراهم نبودن شرایط انجام) وجود ندارد و تنها داده‌های حاصل از حفاری در دسترس است. در این جایگاه‌ها،

هدایت هیدرولیکی به معنای توانایی یک محیط متخلخل برای عبور سیال است. این ویژگی بیانگر مقدار جریان عبوری تحت شیب هیدرولیکی معین از سطح مقطع خاک می‌باشد و مهم‌ترین متغیر در کاربرد قانون‌های جریان آب زیرزمینی است [1]. هدایت هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آبخوان است که در تخمین سرعت جریان آب زیرزمینی، تعیین نحوه انتشار ابر آلودگی، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، حل مشکلات ژئوتکنیکی و تعیین برنامه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش دارد (ساحا و همکاران، ۲۰۱۶). روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی به دو گروه مبتنی بر قانون داریسی و مبتنی بر روابط تجربی (بر اساس توزیع اندازه منافذ، توزیع اندازه ذرات و بافت خاک) تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر رابطه داریسی به دو دسته آزمایشگاهی و صحرائی قابل گروه‌بندی هستند. در روش‌های آزمایشگاهی، جریان آب در طول یک نمونه کوچک از مواد مورد نظر برقرار شده و افت بار و سرعت جریان از این طریق مشخص می‌گردد. در روش بار ثابت، بار آبی ثابت

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.

(۳) استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.

(۴) کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی.

و ساها (۲۰۱۶) مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده از فرمول‌های تجربی (روابط هازن و بریر) و آزمون پمپاژ را با یکدیگر مقایسه کردند. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های حاصل از حفاری چهار گمانه به عمق ۳۰ متر به روش تجربی مبتنی بر توزیع اندازه ذرات صورت گرفت. نتایج نشانگر تفاوت آشکار مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط تجربی و آزمایش پمپاژ بود [4].

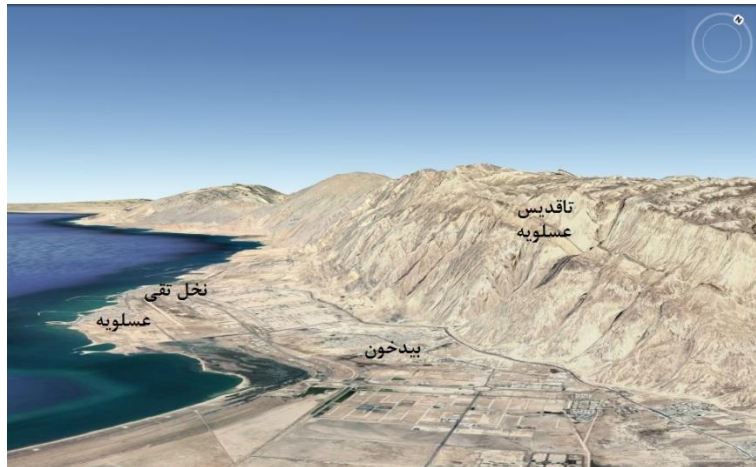
دشت عسلویه در حاشیه خلیج فارس و در فاصله ۳۰۰ کیلومتری شرق شهر بوشهر قرار دارد و به عنوان منطقه ساحلی مناسب برای ایجاد واحدهای خشکی و توسعه مرحله‌ای میدان گازی پارس جنوبی (شامل پالایشگاه‌ها و خطوط انتقال) انتخاب شده است (شکل ۱). با توجه به بالا بودن تراز آب زیرزمینی، آلودگی نشت کرده از خطوط انتقال و مخازن پالایشگاه‌ها می‌تواند سبب آلودگی آب زیرزمینی دشت بشود. بنابراین شناخت ویژگی آبخوان آزاد دشت (از جمله هدایت هیدرولیکی) دارای اهمیت است و می‌تواند به مطالعه آبخوان، شبیه‌سازی شرایط حاکم بر جریان آب زیرزمینی و همچنین ارائه برنامه‌های مدیریتی منابع آب آن کمک نماید. در پژوهش پیش رو کوشش شده تا با استفاده از رابطه‌های تجربی مبتنی بر نتایج منحنی دانه‌بندی آبرفت، هدایت هیدرولیکی در بخشی از آبخوان عسلویه محاسبه گردد.

### منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش

از نظر زمین‌شناسی، دشت عسلویه در پهنه ساختاری زاگرس قرار دارد و تاقدیس عسلویه مهم‌ترین ساختار زمین‌ساختی آن است. مهم‌ترین واحدهای سنگ‌چینه‌ای سازنده تاقدیس عسلویه از قدیم به جدید عبارتند از: گروه خامی (شامل سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان)، گروه بنگستان (شامل سازندهای کژدمی، سروک و ایلام)، سازندهای گورپی، پایده، و جهرم-آسماری، گروه فارس (متشکل از سازندهای گچساران، میشان و آغاچاری) و کنگلومرای بختیاری [9]. دشت عسلویه به صورت نوار باریکی در بین تاقدیس عسلویه در شمال و خلیج فارس در جنوب قرار دارد و از رسوبات کواترنری تشکیل شده است. سطح ایستابی در دشت عسلویه در عمق ۱۰ تا ۱۵ متری قرار دارد و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شمال دشت به سوی دریا است.

برای محاسبه هدایت هیدرولیکی می‌توان از روش روابط تجربی استفاده کرد.

پژوهشگرهای زیادی برای تعیین رابطه بین توزیع اندازه ذرات خاک و هدایت هیدرولیکی آن کار کرده‌اند (هازن، ۱۸۹۲؛ اسلیتچر، ۱۸۹۹؛ کزنی، ۱۹۲۷؛ کارمن، ۱۹۳۷، ۱۹۵۶؛ کرومبین و مونک، ۱۹۴۲؛ بریر، ۱۹۶۴؛ ترزاقی و پک، ۱۹۶۴؛ ماسچ و دنی، ۱۹۶۶). وانکه و همکاران در سال ۲۰۰۰ و هیفده بر روی ۴۳۱ نمونه که از محیط‌های رسوبی مختلف جمع‌آوری شده بود مطالعه کردند و معادلات جدیدی برای محاسبه هدایت هیدرولیکی ارائه نمودند [4]. رزاز و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه بر روی نمونه‌هایی با قطر مؤثر ۰/۰۵ تا ۰/۸۳ میلی‌متر و ضریب یک‌نواختی ۱/۳ تا ۱۸/۳ به این نتیجه رسیدند که مقادیر هدایت هیدرولیکی بسیار تحت تأثیر قطر مؤثر ذرات در منحنی‌های دانه‌بندی می‌باشد [5]. آرفین و علی خان (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی (مبتنی بر منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات) هدایت هیدرولیکی ۲۵ نمونه خاک را تعیین نمودند. روابط تجربی به کار رفته شامل روش های هازن، اسلیتچر، بریر و کزنی-کارمن بود. هم‌چنین از رابطه و کوویچ و سورو (۱۹۹۲) برای محاسبه‌ی تخلخل و چگالی توده (Bulk density) استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فرمول‌های تجربی برای محاسبه هدایت هیدرولیکی نمونه‌های با طیف گسترده‌ای از اندازه‌ی ذرات مناسب است [6]. ایشاکو و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه‌ی جیمتا-یولا واقع در کشور نیجریه مقادیر هدایت هیدرولیکی نمونه‌های حاصل از حفاری را از طریق فرمول‌های تجربی محاسبه نمودند و به این نتیجه رسیدند که روابط ترزاقی، کزنی و اسلیتچر بهترین مقادیر را برای هدایت هیدرولیکی آبخوان ماسه‌سنگی این منطقه ارائه می‌دهد [7]. تایی هوانگ و همکاران (۲۰۱۷) مقادیر هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های ماسه‌ای درشت‌دانه، متوسط و ریزدانه را از فرمول‌های تجربی، تهیه مدل تخلخل مؤثر نسبی و آزمایش ردیابی به دست آوردند و نتایج حاصل را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌داد که مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده از رابطه کزنی-کارمن ۱/۵ تا ۱/۷ برابر مقادیر حاصل از روش هازن می‌باشد. هم‌چنین اختلاف بین مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده در روش ردیابی و فرمول‌های تجربی بیشتر از نتایج حاصل از مدل است. نتیجه نهایی تأییدکننده نزدیکی بیشتر هدایت هیدرولیکی حاصل از مدل به شرایط واقعی بود [8]. ساهو



شکل ۱ نمایی از تاق‌دیس عسلویه و دشت عسلویه. جهت نگاه به شمال باختر.

که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند به‌عنوان قطر مؤثر انتخاب شده‌است ( $d_{10}$ )، ضریب یک‌نواختی ( $C_u$ )، قطری که ۳۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند ( $d_{30}$ ) و قطری که ۶۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر باشند ( $d_{60}$ ).

در مرحله بعد، با استفاده از روابط تجربی ارائه شده در جدول (۱) مقادیر هدایت هیدرولیکی مشخص گردید. شایان ذکر است که این فرمول‌ها براساس کارهای تحلیلی و تجربی برای محاسبه مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده‌اند و هر کدام دارای شرایط و محدودیت‌های ویژه خود می‌باشند [12,13,14]. همانطور که در رابطه‌های جدول (۱) دیده می‌شود، محاسبه تراوایی با استفاده از برخی روابط (مانند رابطه کزنی-کارمن) نیازمند دانستن تخلخل نمونه‌های خاک است. تخلخل نمونه‌های خاک از رابطه شماره (۱) محاسبه گردید که در آن  $\rho_d$  و  $\rho_m$  به‌ترتیب تخلخل، چگالی ذرات و چگالی توده می‌باشد.

$$n = (\rho_m - \rho_d) / \rho_m \quad (1)$$

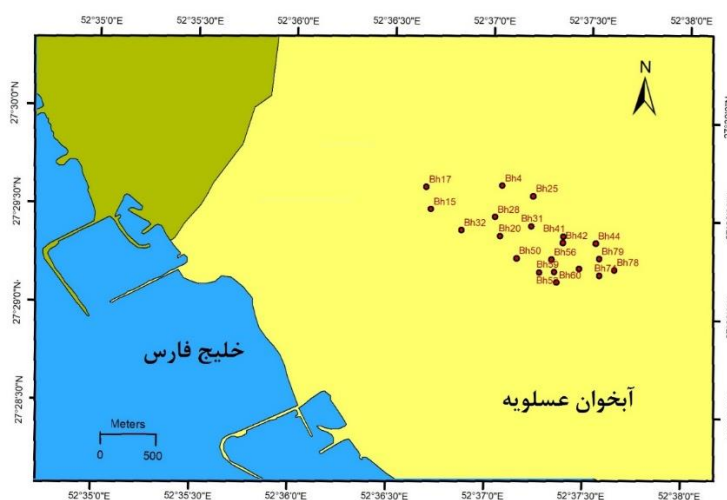
چگالی ذرات خاک برای نمونه‌های این مطالعه برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده‌است. هم‌چنین برای محاسبه چگالی توده (جرم واحد حجم توده، شامل حجم دانه‌ها و فضای خالی بین آن‌ها) به‌ترتیب یاد شده عمل شد و سپس با جای‌گذاری آن در رابطه شماره (۱) مقدار تخلخل نمونه‌های انتخابی به‌دست آمد: (۱) از بین نمونه‌های حاصل از حفاری تعداد ۱۷ نمونه از توده خاک (که تقریباً دست‌نخورده بود) برداشت شد و جرم هر یک اندازه‌گیری شد، (۲) نمونه‌ها توسط پارافین پوشیده شد، (۳) جرم نمونه‌های پوشیده‌شده از پارافین اندازه‌گیری گردید

در این پژوهش کوشش شده تا با استفاده از آزمایش بر روی نمونه‌های خاک حاصل از حفاری ۲۰ گمانه در دشت عسلویه (شکل ۲)، تخمین مناسبی از هدایت هیدرولیکی آن به‌دست آید. برای این منظور، ابتدا نمونه خاک از عمیق‌ترین بخش گمانه‌های حفر شده برداشته شد و برای آنالیز دانه‌بندی به آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه تهران ارسال گردید. در آزمایشگاه، آزمایش توزیع اندازه ذرات (با کمک الک کردن برای خاک‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۰/۰۷ میلی‌متر و هیدرومتری برای ذرات ریزتر) بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای این کار، ابتدا نمونه خاک شسته شد تا رس و سیلت از آن جدا شود و سپس برای مدت ۲۴ ساعت در کوره با درجه حرارت حدود ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا به‌صورت کامل خشک گردد. در مرحله بعد کلوخه‌های خاک خورد شده و جرم نمونه مشخص گردید و سپس نمونه خاک از الک‌ها عبور داده شد. بعد از اتمام مرحله الک کردن، جرم خاک باقی‌مانده بر روی هر الک اندازه‌گیری شد (شکل ۳). هم‌چنین مقادیر سیلت و رس نمونه‌ها با استفاده از آزمایش هیدرومتری مشخص گردید. پس از تعیین اندازه ذرات نمونه‌ها، از نمودار فولک [10,11] برای تعیین نوع آن‌ها استفاده شد. در نهایت نتیجه به‌دست‌آمده از آزمایش دانه‌بندی در یک نمودار تجمعی نیمه لگاریتمی نمایش داده شد که در آن ارقام مربوط به درصد تجمعی جرم ذرات بر روی محور عمودی و اندازه ذرات بر روی محور افقی نمایش داده می‌شود. پس از رسم نمودار توزیع اندازه ذرات، پارامترهای مورد نیاز محاسبه هدایت هیدرولیکی با استفاده از روابط تجربی به‌دست آمد. مهم‌ترین این پارامترها عبارتند از: قطر مؤثر ذرات که در اغلب فرمول‌ها قطری



خاک مشخص گردید، و ۵) جرم توده خاک بر حجم آن تقسیم شد.

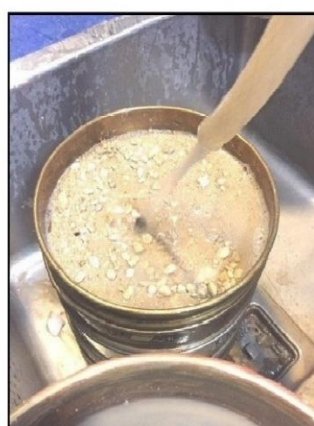
و حجم آن‌ها نیز با فرو بردن در ظروف مدرج پر از آب مشخص شد، ۴) با کم کردن حجم پارافین از حجم نمونه‌ها، حجم توده



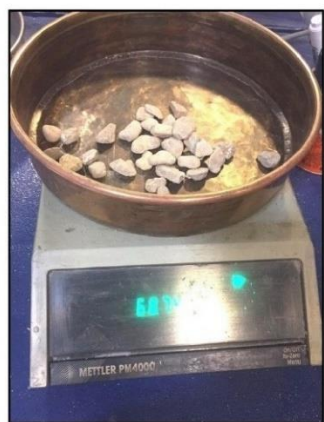
شکل ۲ موقعیت گمانه‌های مورد مطالعه در گستره دشت عسلویه



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳ آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش دانه‌بندی: الف) شستشوی نمونه‌ها، ب) خورد کردن کلوخه‌ها پس از خروج از کوره، ج) الک کردن و د) اندازه گیری جرم باقیمانده بر روی هر الک

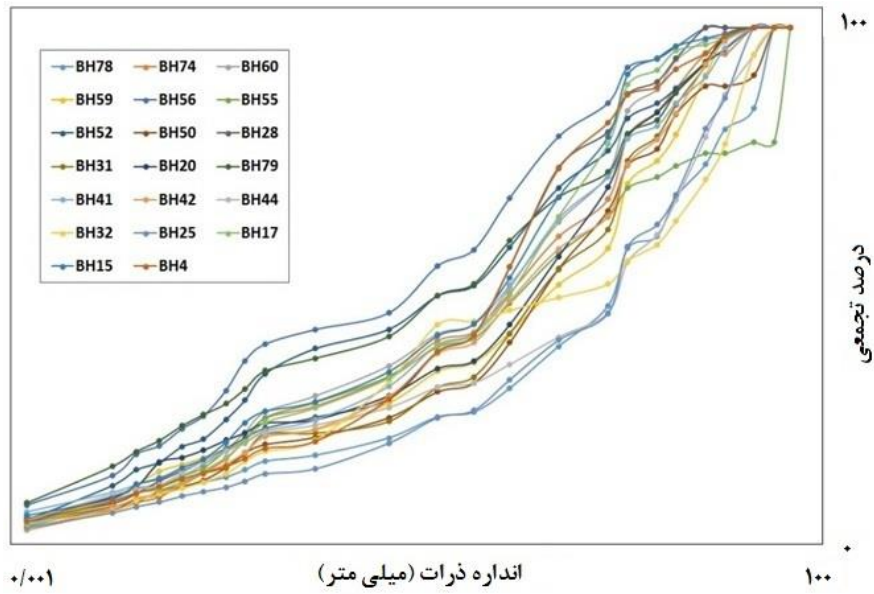
جدول ۱. روابط تجربی مورد استفاده برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی

فرمول تجربی	نام رابطه
$K = \left(\frac{g}{v}\right) \times (8.3 \times 10^{-3}) \times \left[\frac{n^3}{(1-n)^2}\right] \times d_{10}^2, \quad n = 0.225(1+0.83C_u)$ <p>K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n = porosity from empirical formula; d<sub>10</sub> = Diameter that 10% of the grains are smaller than.</p>	کزنلی-کارمن (Kozeny_Carman)
$K = \left(\frac{g}{v}\right) \times (6 \times 10^{-4}) \times \left[\log\left(\frac{500}{C_u}\right)\right] \times d_{10}^2, \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ <p>K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; C<sub>u</sub> = Uniformity coefficient; d<sub>10</sub> = Diameter that 10% of the grains are smaller than. d<sub>60</sub> = Diameter that 60% of the grains are smaller than.</p>	بریر (Breyer)
$K = E(C_u) \left(\frac{d_{10}}{1000}\right)^2, \quad E(C_u) = (10.2 \times 10^6) \left(\frac{E^3}{1+E}\right) \left(\frac{1}{g(C_u)^2}\right), \quad E = 0.8 \left(\frac{1}{2\ln(C_u)} - \frac{1}{(C_u)^2 - 1}\right)$ <p><math>g(C_u) = \left(\frac{1.3}{\log C_u}\right) \left(\frac{C_u^2 - 1}{C_u^{1.8}}\right), \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}</math></p> <p>C<sub>u</sub> = Uniformity coefficient; d<sub>10</sub> = Diameter that 10% of the grains are smaller than.</p>	گوستافسون (Gustafson)
$K = \frac{g}{v} \cdot 1 \times 10^{-2} \cdot n^{3.287} \cdot d_{10}^2, \quad n = 0.255(1+0.83C_u), \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ <p>K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n = porosity from empirical formula; d<sub>10</sub> = Diameter that 10% of the grains are smaller than. C<sub>u</sub> = Uniformity coefficient; d<sub>60</sub> = Diameter that 60% of the grains are smaller than.</p>	اسلیتچر (Slitcher)
$K = \frac{g}{v} \cdot C_t \cdot \left(\frac{n-0.13}{\sqrt{1-n}}\right)^2 \cdot d_{10}^2$ <p>K = hydraulic conductivity; g = acceleration due to gravity; v = kinematic viscosity; n = porosity from empirical formula; d<sub>10</sub> = Diameter that 10% of the grains are smaller than. C<sub>t</sub> = the sorting coefficient between 6.1×10<sup>-3</sup> and 10.7×10<sup>-3</sup>, and the average value of C<sub>t</sub>, 8.4×10<sup>-3</sup></p>	ترزاقی (Terzaghi)

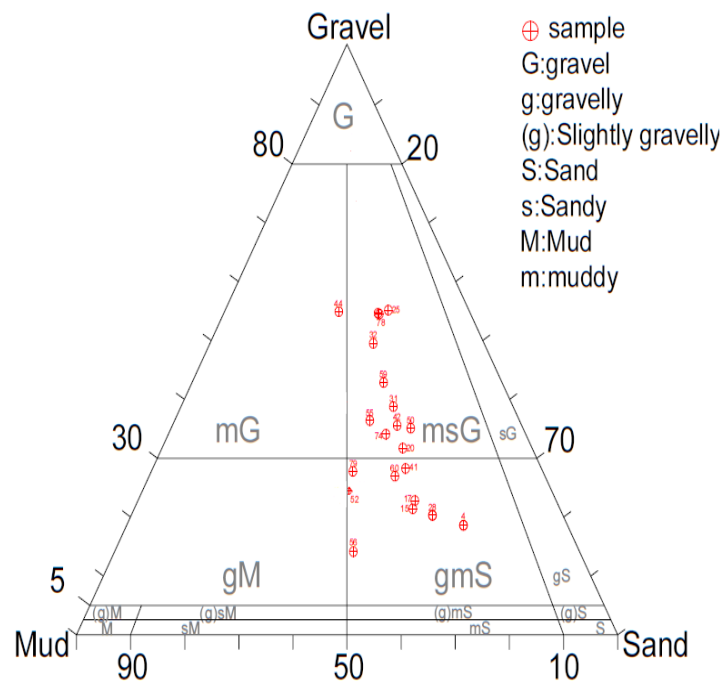
## واکاوی دستاوردها

رسوب‌های سازنده دشت عسلویه (نهشته‌های کواترنری) بیشتر حاصل فرسایش سازندهای رخنمون یافته در تاقدیس عسلویه می‌باشد. شرایط زمین‌شناسی همراه با اقلیم و هیدرولوژی منطقه سبب هوازگی شدید سنگ‌ها در تاقدیس عسلویه شده‌است. از سوی دیگر، دامنه پرتیب تاقدیس و اختلاف ارتفاع شدید در مسافتی کوتاه سبب می‌شود که رواناب حاصل از بارندگی دارای دبی زیاد و زمان تمرکز کوتاه باشد. بنابراین پتانسیل فرسایش و رسوب‌زایی منطقه به‌طور طبیعی زیاد است. با توجه به عرض کم دشت، به‌نظر می‌رسد که رسوب‌های شکل‌گرفته از فرسایش فرصت چندانی برای جدایش و دانه‌بندی بر اساس کاهش انرژی رواناب‌ها نداشته‌اند. با این وجود و به‌صورت طبیعی با حرکت به‌سمت نواحی پایین‌دست دشت از مقدار و اندازه قلوها و بولدرهای سنگی کاسته می‌شود.

**دانه‌بندی ذرات.** منحنی دانه‌بندی اندازه ذرات برای نمونه‌های مورد مطالعه در شکل (۴) ترسیم گردیده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌های مورد مطالعه دامنه گستره‌ایی از توزیع اندازه ذرات (از سیلت و رس تا گراول) را شامل می‌گردد؛ به عبارت دیگر، شیب منحنی دانه‌بندی ذرات از حالت عمودی بسیار فاصله دارد. شکل (۵) و جدول (۲) نتایج برازش تعیین اندازه ذرات نمونه‌ها در نمودار فولک را نشان می‌دهد. از ۲۰ نمونه مورد مطالعه، ۱۰ عدد از نوع گراول ماسه‌ای - گلی، ۹ عدد از نوع ماسه گلی - گراولی و یک نمونه از نوع گراول - گلی است. با توجه به این‌که رسوبات مورد آزمایش از نوع آبرفتی می‌باشند، بنابراین تنوع اندازه ذرات در آن‌ها زیاد است. مقادیر ضریب یک‌نواختی در اغلب نمونه‌ها عدد بزرگی بود که نشانگر دامنه گسترده تغییر اندازه ذرات خاک است.



شکل ۴ منحنی توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها

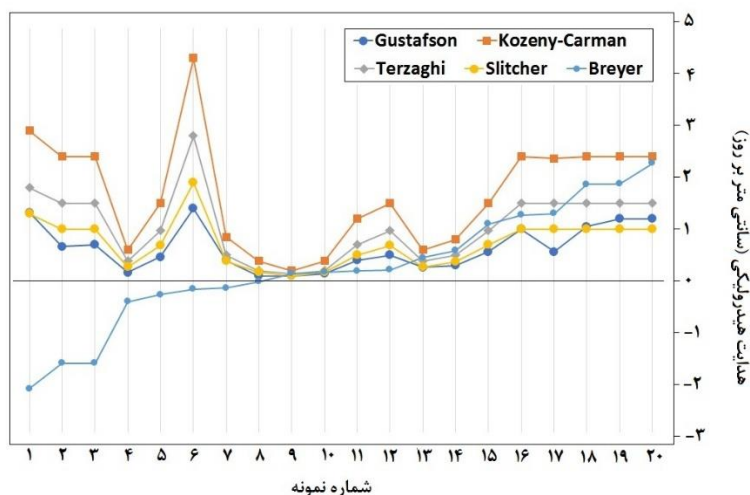


شکل ۵ طبقه بندی نمونه‌ها بر اساس مثلث فولک



جدول ۲ نام گمانه، عمق نمونه برداری و نوع نمونه‌ها

نام گمانه	عمق (m)	ضریب یکنواختی	نوع نمونه
BH۴	۱۲	۳/۰	ماسه گلی گراولی
BH۱۵	۱۰	۲/۰	ماسه گلی گراولی
BH۱۷	۱۳/۸	۲/۳	ماسه گلی گراولی
BH۲۰	۱۵	۴/۲	گراول ماسه‌ای گلی
BH۲۵	۲۱	۵/۲	گراول ماسه‌ای گلی
BH۲۸	۹	۲/۵	ماسه گلی گراولی
BH۳۱	۱۴/۵	۵/۹	گراول ماسه‌ای گلی
BH۳۲	۱۵	۱۰/۰	گراول ماسه‌ای گلی
BH۴۱	۱۱	۲/۵	ماسه گلی گراولی
BH۴۲	۱۱	۳/۰	گراول ماسه‌ای گلی
BH۴۴	۱۶/۵	۹/۵	گراول گلی
BH۵۰	۱۲/۵	۴/۴	گراول ماسه‌ای گلی
BH۵۲	۱۲/۵	۳/۲	ماسه گلی گراولی
BH۵۵	۱۴	۵/۸	گراول ماسه‌ای گلی
BH۵۶	۱۳	۲/۷	ماسه گلی گراولی
BH۵۹	۸/۵	۹/۶	گراول ماسه‌ای گلی
BH۶۰	۱۲	۵/۲	ماسه گلی گراولی
BH۷۴	۱۵	۲/۷	گراول ماسه‌ای گلی
BH۷۸	۱۵	۹/۵	گراول ماسه‌ای گلی
BH۷۹	۱۴	۲/۴	ماسه گلی گراولی



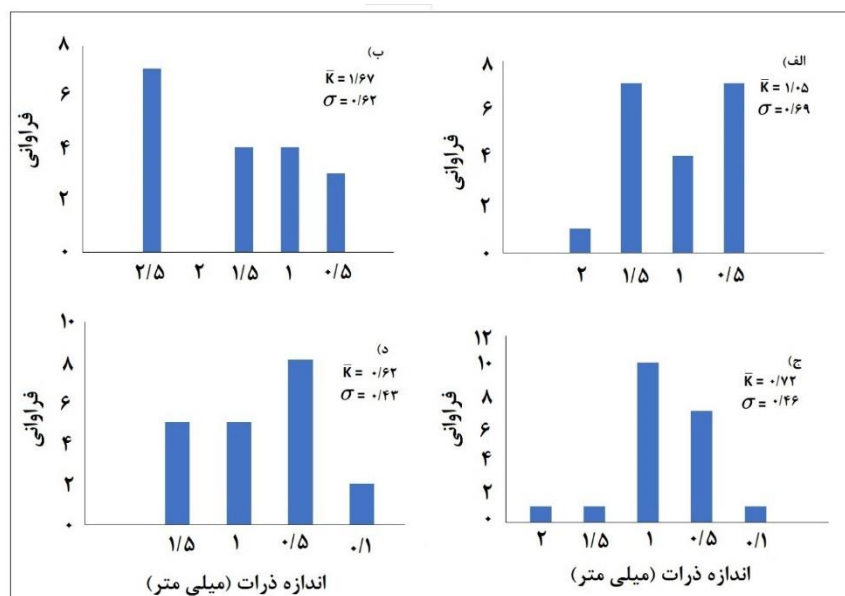
شکل ۶ مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش‌های تجربی مختلف

هیدرولیکی نمونه‌ها بین ۰/۱۹- تا ۲/۲ سانتی متر بر روز به دست آمد. رابطه بریر برای نمونه‌هایی با توزیع ناهمگن و دانه‌بندی ضعیف با ضریب یکنواختی بین ۱ تا ۲۰ و اندازه مؤثر ۰/۶ تا

محاسبه هدایت هیدرولیکی. نتایج حاصل از محاسبه هدایت هیدرولیکی براساس روش‌های تجربی مختلف در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌است. براساس روش بریر، مقدار هدایت

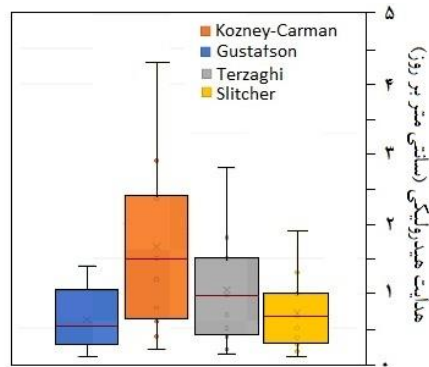
محاسبه شده مربوط به رابطه کزنی- کارمن می باشد و رابطه ترزاقی نیز مقادیر هدایت هیدرولیکی حد واسطی را نشان می دهد. دلیل تفاوت هدایت هیدرولیکی محاسبه شده بر اساس این رابطه ها، می تواند به تفاوت سهم پارامترهای مؤثر در هر رابطه و محدودیت های مربوط به ضریب یک نواختی و قطر مؤثر ذرات برگردد. برای نمونه، استفاده از رابطه کزنی- کارمن برای ذرات با قطر مؤثر کمتر از ۳ میلی متر کاربرد دارد و برای خاک های رسی توصیه نمی شود [12]. در تمام ۲۰ نمونه مورد بررسی، مقدار قطر مؤثر دانه ها، کمتر از ۳ میلی متر است و ذرات تشکیل دهنده آنها علاوه بر رس، مقداری گراول و ماسه دارند. بنابراین از این رابطه می توان برای نمونه های با مقدار گراول کم استفاده کرد. رابطه اسلیتچر برای رسوبات با قطر مؤثر بین ۰/۱ تا ۵ میلی متر مناسب است [12,13] و در نتیجه این رابطه برای محاسبه هدایت هیدرولیکی ۹ عدد از نمونه ها (که این شرط در آنها رعایت شده) کاربرد دارد. رابطه گوستافسون برای رسوبات با ضریب یک نواختی بزرگتر از ۱۵ کاربرد دارد [14] که به دلیل دارا بودن این شرط، از این فرمول می توان برای محاسبه هدایت هیدرولیکی همه نمونه ها استفاده کرد. رابطه ترزاقی برای ماسه های درشت دانه کاربرد دارد [12]. نمونه های موجود اغلب حاوی ماسه در اندازه های مختلف هستند و در نتیجه رابطه ترزاقی برای آنها قابل استفاده است.

۰/۰۶ میلی متر بسیار مفید است [12]. در نمونه های مورد مطالعه این پژوهش، از یک سو مقادیر ضریب یک نواختی همه نمونه ها بزرگ است و از سوی دیگر قطر مؤثر نمونه ها نیز کوچکتر از ۰/۰۶ میلی متر است، بنابراین رابطه بریر برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آنها مناسب نیست. مقادیر هدایت هیدرولیکی به روش گوستافسون، کزنی- کارمن، ترزاقی و اسلیتچر به ترتیب بین ۰/۱ تا ۱/۴، ۰/۳۸ تا ۴/۳، ۰/۲ تا ۲/۸، ۰/۱۷ تا ۱/۹ سانتی متر بر روز به دست آمد. دامنه گسترده تغییرات هدایت هیدرولیکی می تواند ناشی از گستره تنوع اندازه ذرات نمونه ها از گراول تا سیلت باشد. مقادیر بزرگتر هدایت هیدرولیکی مربوط به نمونه های با درصد گراول و ماسه بیشتر است و مقادیر کم نیز به نمونه هایی با درصد رس بیشتر تعلق دارد. در محیط متخلخل ناهم گن، چنین شرایطی می تواند موجب گردد که ذرات ریزدانه فضای خالی بین ذرات درشت دانه را پر کند و هدایت هیدرولیکی را کاهش دهد. مقادیر هدایت هیدرولیکی به روش گوستافسون، کزنی- کارمن، ترزاقی و اسلیتچر در نمودار جعبه ایی ترسیم شده است (شکل ۸). به دلیل معنی دار نبودن مقادیر منفی هدایت هیدرولیکی، در این شکل مقادیر محاسبه شده بر اساس رابطه بریر آورده نشده است. هدایت هیدرولیکی محاسبه شده بر اساس رابطه های گوستافسون و اسلیتچر مقادیر کم و بیش مشابهی را حاصل نموده است. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی



شکل ۷ فراوانی، میانگین و انحراف از معیار مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش های: الف) ترزاقی؛

ب) کوزنی-کارمن؛ ج) اسلیتچر؛ و د) گوستافسون



شکل ۸ نمودار جعبه ای مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از روش های تجربی مختلف

### نتیجه گیری

بیشتر نزدیک به واقعیت باشد. از سوی دیگر باید به این نکته توجه داشت که با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت استفاده از روابط تجربی، تنها رابطه گستافسون قابل کاربرد برای تخمین هدایت هیدرولیکی همه ۲۰ نمونه مورد مطالعه است. مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از این رابطه بین ۰/۱ تا ۱/۴ سانتی متر بر روز می باشد که با توجه به وجود گراول قابل توجه در نمونه ها، این مقدار هدایت هیدرولیکی کمتر از مقدار واقعی آن به نظر می رسد. با توجه به موارد اشاره شده، می توان نتیجه گرفت که استفاده از روابط تجربی مختلف برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان ها نتایج متفاوتی را نشان می دهد و دامنه گسترده تغییرات هدایت هیدرولیکی محاسبه شده به محدودیت های موجود برای هر یک از روابط برمی گردد. بنابراین برای صحت سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسباتی، انجام آزمایش پمپاژ و یا اسلگ تست در منطقه پیشنهاد می شود.

مقادیر هدایت هیدرولیکی به دست آمده از روش تجربی برای ۲۰ نمونه مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۴/۳ سانتی متر بر روز متغیر است که در محدوده مقادیر هدایت هیدرولیکی رایج مواد ریزدانه می باشد. به نقل از تاد و میز (۲۰۰۵) مقادیر هدایت هیدرولیکی برای گراول بین ۱۵۰ تا ۴۵۰ متر بر روز، برای ماسه بین ۲/۵ تا ۴۵ متر بر روز و برای سیلت و رس بین ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۸ متر بر روز است. به نظر می رسد که مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده برای نمونه های مورد مطالعه تا حد زیادی کمتر از مقدار واقعی آن باشد، چرا که از ۲۰ نمونه حاصل از حفاری، ۵۰ درصد در گروه گراول ماسه ای - گلی، ۴۵ درصد در گروه ماسه گلی - گراولی و ۵ درصد در گروه گراول گلی می گنجد. از بین روابط تجربی استفاده شده، بیشترین مقادیر هدایت هیدرولیکی محاسبه شده مربوط به رابطه کزنی - کارمن (بین ۰/۳۸ تا ۴/۳ سانتی متر بر روز) و ترزاقی (۰/۲ تا ۲/۸ سانتی متر بر روز) بود، بنابراین به نظر می رسد که مقادیر به دست آمده از این دو رابطه

### مراجع

1. Todd, D.K., and Mays, L.W., "Groundwater hydrology", John Wiley and Sons, (2004).
2. Ritzema, H.P., "Drainage principles and applications", Wageningen: ILRI publication. 16 (2006).
3. Fetter, C.W., "Applied hydrogeology", Waveland Press, (2018).
4. Sahu, S., and Saha, D., "Empirical methods and estimation of hydraulic conductivity of fluvial aquifers", *Journal of Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 22, No. 4, pp. 319-340, (2016).
5. Wang, J.P., François, B., and Lambert, P., "Equations for hydraulic conductivity estimation from particle size distribution: A dimensional analysis", *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 9, pp. 8127-8134, (2017).

6. Arfeen, N., and Ali khan, T., "Evaluation of PSD Models for the Estimation of Hydraulic Conductivity for Different Soil Textural Classes", *International Journal of Engineering Works*, Vol. 7, No. 10, pp. 338-341, (2020).
7. Ishaku, J.M., Gadzama, E.W., and Kaigama, U., "Evaluation of empirical formulae for the determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis", *Journal of geology and mining research*, Vol. 3, No. 4, pp. 105-113. (2011).
8. Hwang, H.T., Jeon, S.W., Suleiman, A.A., and Lee, K.K., "Comparison of saturated hydraulic conductivity estimated by three different methods", *Water*, Vol. 9, No. 12, p. 942. (2017).
9. Aghanabati, A., "Geology of Iran", Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. In Persian (2004).
10. Valentine, P.C., "Sediment classification and the characterization, identification, and mapping of geologic substrates for the glaciated Gulf of Maine seabed and other terrains", *Providing a physical framework for ecological research and seabed management*, (No. 2019-5073), US Geological Survey, (2019).
11. Folk, R.L., "Practical Petrographic Classification of Limestones", *AAPG Bulletin*, Vol. 43, No.1, pp. 1-38, (1959).
12. Odong, J., "Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis", *Journal of American Science*, Vol. 3, No. 3, pp. 54-60, (2007).
13. Zhang, S., "Relationship between particle size distribution and porosity in dump leaching (Doctoral dissertation)", *University of British Columbia*, (2017).
14. Svensson, A., "Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analyses A comparative study of different sampling and calculation methods focusing on Västlänken, Master's thesis, (2014).