

Field Evaluation of Some of the Grain-size Analysis Methods for Determining Hydraulic Conductivity of Streambed

HOJJAT KASIR¹, AMIR NASERIN^{1*}, AHMAD JAFARI¹, MAHMOOD SHAFAI BEJESTAN²

1. Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran.

2. Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water & Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received: Apr. 6, 2020- Revised: June. 1, 2020- Accepted: June. 9, 2020)

ABSTRACT

To determine the water exchanges between surface and ground waters through river bed, it is necessary to have an accurate estimation of hydraulic conductivity of the river bed. But, the measurement of river bed hydraulic conductivity is difficult, time-consuming and costly. The grain size analysis methods estimate the hydraulic conductivity using the data obtained from the grain size distribution curve and the porosity of the soil, without any field measurements. The purpose of this study is to compare the estimated hydraulic conductivities, using some grain-size analysis equations (K_g), with the values measured by permeameter (K_v) method in Karkheh, Dez and, Shavoor river beds in Shush County, Khuzestan Province. In this study, the accuracy of seven empirical equations were investigated using 18 samples obtained from the measuring stations. The K_v values at Karkheh, Dez, and Shavoor river bed were measured to be 2.15, 2.94 and 0.03 m/day, respectively. In Shavoor River bed with clay texture, all the equations overestimate the K_g up to 84.6 times more than the K_v . While, in the other rivers with coarse grains, the estimated K_g by Alyamani-sen was less than the K_v , and the K_g estimated by Terzaghi, Hazen, Beyer and USBR was more than the K_v and the K_g estimated by Slichter and Kozney equations resulted a K_g close to the K_v . Moreover, the ratio of the new proposed C coefficient to the original C coefficient of equations were calculated between "0.15 to 2.1". Based on the results, it is necessary to use the modified coefficient of C for utilization of grain size methods.

Keywords: Dez, Karkheh, Shavoor, Vertical Hydraulic Conductivity, Water Exchanges.

* Corresponding Author's Email: a.naserin@asnrukh.ac.ir

ارزیابی صحرائی چند رابطه تحلیل اندازه ذرات برای تخمین هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه

حجت کثیر^۱، امیر ناصرین^{۱*}، احمد جعفری^۱، محمود شفاعی بجمستان^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران.

۲. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۲۰)

چکیده

برای تعیین میزان تبادلات آبی بین آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق بستر رودخانه، تعیین دقیق هدایت هیدرولیکی آن‌ها ضروری است. اما اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه دشوار، وقت‌گیر و هزینه‌بر است. روش‌های تحلیل اندازه ذرات با استفاده از داده‌های حاصل از منحنی توزیع ذرات و تخلخل، میزان هدایت هیدرولیکی را بدون اندازه‌گیری صحرائی تخمین می‌زنند. هدف از انجام این تحقیق مقایسه هدایت هیدرولیکی برآورد شده با استفاده از چند رابطه تجربی اندازه ذرات (K_g) با هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده به روش نفوذسنج (K_v) در بستر رودخانه‌های کرخه، دز و شاوور در محدوده شهرستان شوش استان خوزستان می‌باشد. در این تحقیق، دقت هفت رابطه تجربی، با استفاده از ۱۸ نمونه حاصل از نقاط اندازه‌گیری، بررسی شد. هدایت هیدرولیکی در رودخانه‌های کرخه، دز و شاوور به ترتیب ۲/۱۵، ۲/۹۴ و ۰/۰۳ متر بر روز اندازه‌گیری شد. در بستر رودخانه شاوور با بافت رسی، همه روابط K_g را تا ۸۴/۶ برابر بیش از K_v برآورد کردند. اما در بستر دو رودخانه دیگر که خاک درشت دانه داشتند، مقدار K_g رابطه الیمانی و سن کمتر و روابط ترزاقی، هیزن، بیر و USBR بیش‌تر و دو رابطه اسلیشتر و کوزنی نزدیک به مقدار K_v بود. همچنین، ضرایب پیشنهادی C روابط مختلف اندازه ذرات نسبت به ضرایب اصلی در آن روابط، در بازه ۰/۱۵ تا ۲/۱ محاسبه شد. با توجه به نتایج این پژوهش، برای استفاده از روابط تجربی یادشده در تعیین K_v ، استفاده از ضرایب اصلاحی C ضروری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبادلات آبی، دز، شاوور، کرخه، هدایت هیدرولیکی عمودی.

مقدمه

در گذشته آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌عنوان دو منبع جداگانه مورد بررسی قرار می‌گرفت. اما مدیریت یکپارچه منابع آبی نیازمند نگاه جامع به همه منابع می‌باشد. آگاهی از میزان تبادلات آبی، برای حفظ بهتر ذخایر آبی، کمک شایانی به این موضوع می‌کند. اگرچه، به‌دلیل وجود ناهمگنی‌ها و دشواری اندازه‌گیری پارامترها، این موضوع یک چالش اساسی به شمار می‌رود (Sophocleous, 2002). نشت از بستر رودخانه‌ها راه تبادل آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. بسته به مقدار بار آبی در هر یک از دو منبع، میزان تبادل جریان آب (از نظر جهت یا مقدار) بین آن دو تغییر می‌کند. تغییر بار آبی در رودخانه و آبخوان عمدتاً تحت تاثیر عواملی مانند بارش (در رودخانه) و یا برداشت آب از چاه‌ها (در آبخوان) می‌باشد. البته، در برخی شرایط، عامل اساسی در انجام تبادلات آبی هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه است. هدایت هیدرولیکی بر سرعت نشت آب از رودخانه به آبخوان و یا تغذیه رودخانه توسط آبخوان تاثیر عمده‌ای دارد. این خصوصیت بستر، نه‌تنها به‌صورت محلی و موضعی، بلکه حتی در سطح یک

حوضه آبریز هم می‌تواند در تعیین میزان تبادلات حائز اهمیت باشد. در واقع، گام نخست در تعیین میزان تبادلات هیدرولیکی بین این دو منبع آبی تعیین میزان هدایت هیدرولیکی است. مطالعات گذشته نشان داده است که خصوصیات مختلفی از بستر رودخانه همچون جنس مواد بستر، ضخامت آن، توپوگرافی و انحنای آن بر هدایت هیدرولیکی و در نتیجه تبادلات آبی تاثیر گذار است (Packman et al., 2004) همچنین، این خصوصیت نقش به‌سزایی در انتقال آلودگی در رودخانه، نفوذ آب در خاک، کنترل رواناب‌های سطحی، آبشویی اراضی مجاور رودخانه و انتقال آلودگی‌های سطحی به آب زیرزمینی و بالعکس را دارد. در سال ۱۸۵۶ هنری داری فرانسوی با ارائه یک رابطه ریاضی، تحولی در قانون حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی داد. در این رابطه هدایت هیدرولیکی مهم‌ترین پارامتر موثر در تعیین میزان تبادلات هیدرولیکی می‌باشد. به‌دنبال آن، به‌ویژه در سالیان اخیر، محققین در پی یافتن روشی مناسب برای تعیین هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه روش‌های مختلفی را آزمودند. در این راستا، روش‌های مختلفی از جمله بار افتان (Chen et al., 2009) و

روش اندازه ذرات بر مبنای استفاده از توزیع اندازه ذرات محیط متخلخل است. لذا منحنی دانه بندی خاک و تخلخل دو ابزار اصلی مورد استفاده در این روش می‌باشند. محققان متعددی معادلات تجربی مختلف اندازه ذرات را با استفاده از مقادیر اندازه-گیری شده ارزیابی کردند و بعضا پس از واسنجی ضرایب اصلاحی بر اساس اندازه‌گیری‌هایشان ارائه کردند. Landon et al., 2001, در رودخانه پلاته، روش‌های مختلف اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در بستر شنی رودخانه را مقایسه کردند. بنا بر نتایج این پژوهش، در قسمت ۰/۲۵ متر بالایی بستر رودخانه، هدایت هیدرولیکی تعیین شده به روش نفوذسنج بیش از مقادیر مشابه در روش اندازه ذرات بود. همچنین، تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی حاصل از روش‌های اندازه ذرات بیش تغییرات مقادیر حاصل از اندازه‌گیری بود. McKenzie, 2008 از مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده به روش اسلاگ در بستر دو رودخانه در شمال غربی ایالات متحده برای تحلیلی روابط تجربی استفاده-کردند. آن‌ها دریافتند اگر هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه دارای تغییرات زیادی باشد روش‌های تجربی اندازه ذرات یک راه‌حل با هزینه کمتر و موثرتر خواهند بود. هدایت هیدرولیکی رودخانه‌های خورن در تحقیقات مختلف و به روش‌های متفاوتی اندازه‌گیری شده‌است. در یکی از این تحقیقات که به تجزیه و تحلیل روش اندازه ذره برای تعیین هدایت هیدرولیکی عمودی بستر رودخانه پرداخته‌شد، Song et al., 2009 ضریب C به‌عنوان ضریب اصلاحی روش‌های مختلف اندازه ذرات معرفی و محاسبه‌شد. در این مقاله مقدار ضریب C محاسباتی به‌طور متوسط بین ۱/۳ تا ۵/۹ بود. Cheng et al., 2011 یک توزیع آماری در مورد هدایت هیدرولیکی عمودی بستر رودخانه در طول رودخانه پلات نبراسکا بسط دادند. آنان در این پژوهش، ضمن بررسی روش نفوذسنج درجا، با استفاده از روش بار افتان مقدار K_v بستر را محاسبه کردند و توزیع آماری برای آن ارائه کردند. در این تحقیق تغییرات مکانی K_v بستر رودخانه در ۱۸ منطقه آزمون در طول ۳۰۰ کیلومتری از رودخانه بررسی‌شد. طبق نتایج به‌دست آمده مقدار K_v بستر بر اساس اندازه ذرات در سه گروه مقدار قابل طبقه‌بندی بود. در گروه اول، مقدار K_v بستر ۴۱ متر بر روز، در گروه دوم مقدار K_v بستر ۲۸/۳ متر بر روز بود و در رودخانه‌های خورن مقادیر K_v کمتری برای رسوبات بستر رودخانه ثبت‌شد. در گروه سوم و نهایی مقدار متوسط K_v بستر ۱۹/۸ متر بر روز بود. استفاده از روش اندازه ذرات فقط منحصر به بستر رودخانه نبوده و در سایر محیط‌های متخلخل هم مورد استفاده می‌باشد. Lopez et al., 2015 روش توزیع اندازه ذره مربوط به هدایت هیدرولیکی در تپه‌های شنی غرب عربستان سعودی را ارائه کردند. آنان ۵۰ نمونه را

(Cey et al., 1998)، آزمون نفوذسنج (Rosenberry, 2008) و (McKenzie, 2008)، آزمون نشت سنج (Lee and Cherry, 1978) و آزمون توام مینی‌پیزومتر و نشت‌سنج (Rosenberry, 2005) و آزمون توام مینی‌پیزومتر و نشت‌سنج (Rosenberry, 2008) و (Genereux et al., 2008) مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته‌اند. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی بوده و برای انجام در نقاط مختلف دارای مشکلات و محدودیت‌هایی می‌باشند.

فارغ از روش اندازه‌گیری، تعیین هدایت هیدرولیکی در بستر رودخانه‌ها دشوار است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که روش‌هایی با ابزارهای سنگین و گران قیمت از لحاظ اقتصادی، زمان و همچنین با توجه به شرایط توپوگرافی و تغییرپذیری ریخت‌شناسی رودخانه‌ها قابل انجام نیستند. بنابراین، استفاده از روش مناسب که این مشکلات را رفع کند، ضروری می‌باشد. روش نفوذسنج با بار افتان از جمله روش‌های کم‌هزینه و موثر در تعیین هدایت هیدرولیکی است که در بسیاری از رودخانه‌ها و مسیل‌ها با شرایط مختلف استفاده شده‌است. در تحقیقی با ترکیب نفوذسنج با روش بار افتان، هدایت هیدرولیکی رودخانه‌های خورن اندازه‌گیری شد که نتایج رضایت بخشی حاصل گردید (Chen et al., 2009). گرچه، برخی پژوهشگران معتقدند ممکن است نتایج حاصل از انجام روش‌های تعیین جریان در لایه‌های سطحی بستر، مانند نشت‌سنج یا پیزومترهای نصب‌شده در عمق کم، نشان دهنده تبادلات بین آب‌های سطحی و زیرزمینی نباشد (Kalbus et al, 2006).

در چند دهه اخیر، استفاده از روش اندازه ذرات توانسته جایگزین مناسبی برای تعیین هدایت هیدرولیکی باشد؛ چرا که از نظر بعد زمانی و اقتصادی مقرون به صرفه و همچنین از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. در این روش، عمدتاً از خصوصیات مربوط به توزیع اندازه ذرات خاک برای تخمین هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود. توزیع اندازه ذرات خاک از جمله خصوصیات مکانیکی است که بر هدایت هیدرولیکی تأثیر زیادی دارد. یک خاک همگن با اندازه بزرگ‌تر ذرات، هدایت هیدرولیکی بزرگ‌تری دارد. اما اگر خاک شامل ذرات با اندازه‌های متفاوت باشد به دلیل پر شدن منافذ با ذرات ریزتر، تخلخل و در نتیجه هدایت هیدرولیکی آن کاهش می‌یابد (Fetter, 2001). البته، از سایر مشخصات خاک مانند تخلخل، درجه تراکم خاک و شکل ذرات آن نیز به‌عنوان عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی نام برده شده‌است (Svensson, 2014). علاوه بر روش اندازه ذرات، استفاده از روش‌های عددی (Cheong et al., 2008) و مواد شیمیایی به عنوان ردیاب (Hatch et al., 2010) نیز، به‌عنوان روش‌هایی که نیاز به اندازه‌گیری صحرائی ندارند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تجزیه و تحلیل کرده و از ۲۰ معادله تجربی برای ارزیابی آنان استفاده کردند، نتایج نشان داد مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه-گیری شده، به دلیل وجود مقداری ذرات ریزدانه، دارای درجه بالایی از خطا در مقایسه با مقادیر تخمینی بود.

در مطالعه‌ای دیگر، Odong, 2007 دقت هفت رابطه اندازه ذرات مختلف، با استفاده از چهار نمونه مختلف را اندازه‌گیری کرد. بر این اساس، مقادیر هدایت هیدرولیکی در بازه گسترده‌ای تعیین شدند. اما، تطابق زیادی با روش‌های پمپاژ و اسلاگ نداشتند (Odong, 2007). در تحقیقی دیگر در ایران، Moazami et al., 2017، رابطه تجربی تخمین هدایت هیدرولیکی بر مبنای اندازه ذرات در منطقه جارمه اندیمشک مقایسه شدند. مبنای سنجش دقت روابط داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صحرایی با استفاده از استوانه‌های مضاعف بود. از میان روابط مورد بررسی، در ۹ روش بیش برآورد یا کم برآورد مشاهده شد و سه روش دیگر نتایج نزدیک‌تری به اندازه‌گیری‌ها نشان دادند. همچنین، طبق نتایج این تحقیق، رابطه هیزن بیشترین مقادیر و رابطه اسلیشتر کمترین مقادیر را برآورد کرده بودند.

با توجه به اینکه تاکنون روابط تخمین هدایت هیدرولیکی با استفاده از منحنی توزیع اندازه ذرات در بستر رودخانه‌های ایران مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. ارزیابی این روابط جهت استفاده در برآوردهای اولیه از هدایت هیدرولیکی ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از انجام این تحقیق مقایسه چند رابطه رایج در تحلیل اندازه ذرات و روش نفوذسنج در تعیین هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه‌های کرخه، دز و شاوور در محدوده شهرستان شوش، استان خوزستان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

با وجود اینکه بیش‌تر بودن تعداد گمانه‌ها و نمونه‌های حاصل نتایج دقیق‌تری را به دنبال دارد. اما، به دلیل دشواری انجام آزمایش در رودخانه‌های عظیمی همچون کرخه و دز امکان احداث ایستگاه‌های بیشتر و در نتیجه برداشت‌های بیشتر میسر نبود. از طرفی، رودخانه‌های مورد آزمایش دارای گستره جغرافیایی وسیعی هستند. با توجه به تأثیرات مورفولوژی بر رسوبات در هر محدوده از آن‌ها هدایت هیدرولیکی متفاوت خواهند بود. بنابراین برای بررسی میزان تبادلات هیدرولیکی ۱۸ گمانه از سه رودخانه کرخه، دز و شاوور مورد بررسی قرار گرفت و بازه‌ای از هر سه رودخانه‌ها در استان خوزستان، نزدیکی شهرستان شوش انتخاب شد (شکل ۱). در نتیجه با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته از هر رودخانه شش ایستگاه در بستر هر رودخانه در نظر گرفته شد.

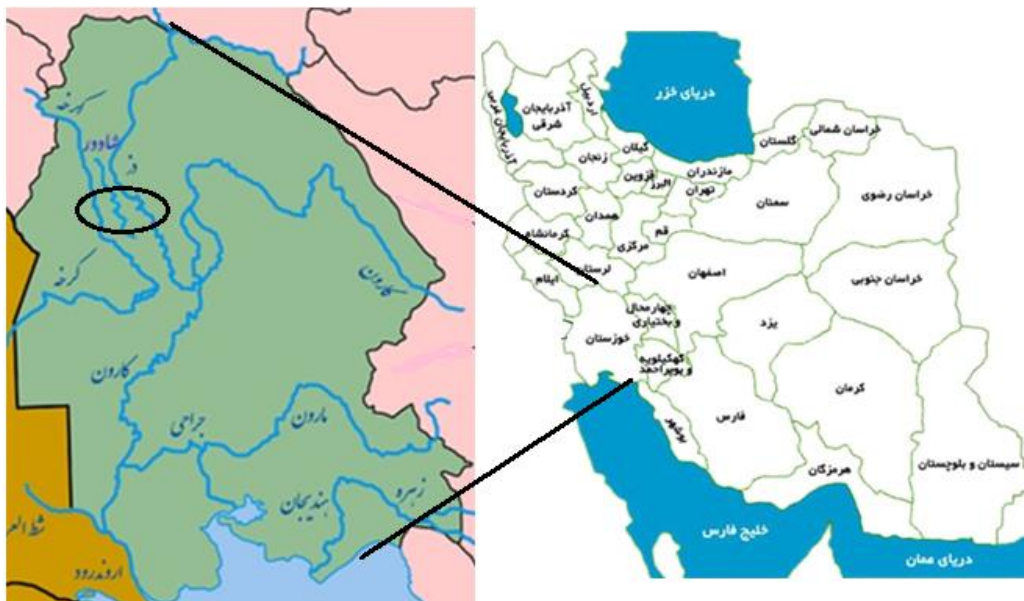
گرچه در برخی تحقیقات (Song et al., و Landon et al., 2001) بر این مبنای تعداد ایستگاه‌ها در مقاطع مختلف و رودخانه‌های مختلف مورد تحقیق متفاوت در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است تحقیقات مشابه زیادی با تعداد نمونه‌های کم‌تر یا هم‌اندازه با تعداد نمونه‌های آزمایش حاضر انجام شده‌است (برای مثال Odong, 2007 (۴ نمونه)، Moazami et al., 2017 (۱۶ ایستگاه)، Wang et al., 2014 (۱۲ ایستگاه)، McKenzie, 2008 (۱۳ ایستگاه)). در واقع، با توجه به هدف این‌گونه مطالعات، لزوماً توزیع ایستگاه‌ها در سراسر محدوده رودخانه‌ها نبوده و فقط محدوده خاصی از آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برای فراهم آمدن امکان انجام آزمون‌های نفوذسنج در بستر رودخانه‌ها، اندازه‌گیری‌ها در فصل تابستان ۱۳۹۵ انجام شد. در واقع در این فصل سطح آب در این رودخانه‌ها فروکش کرده و خطر غرق شدن در فرآیند اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. ثانیاً، امکان استقرار کم‌خطر ادوات اندازه‌گیری بیشتر است.

رودخانه کرخه از نظر مختصات جغرافیایی بین ۶' ۴۶° تا ۱۰' ۴۹° طول شرقی و بین ۵۲' ۳۰° تا ۵۶' ۳۴° عرض شمالی و رودخانه دز از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۹' ۴۸° تا ۱۸' ۵۰° طول شرقی و ۳۱' ۳۵° تا ۵' ۳۴° عرض شمالی محدود شده‌اند. همچنین، رودخانه شاوور در محدوده طول جغرافیایی ۳۱' ۴۷° تا ۱۹' ۳۲° شرقی و عرض جغرافیایی ۱۰' ۴۸° تا ۲۵' ۴۸° شمالی واقع شده‌است.

رودخانه کرخه از جمله رودخانه‌های کشور است که بار معلق آن بیشتر از بار بسترش می‌باشد و دلیل این موضوع عمق زیاد رودخانه در مناطق بالادست می‌باشد (Azarang et al., 2016). طبق مشاهدات انجام شده در محدوده انجام آزمایش، رسوبات تشکیل‌دهنده رودخانه کرخه شن و ماسه و گل و لای می‌باشند که در مکان‌های مورد مطالعه رسوب در هر سه اندازه در هر مکان مشاهده شد. در طبقه‌بندی رودخانه‌ها از نظر شکل پلان و راستا رودخانه‌ها در مورد رودخانه دز همانند رودخانه کرخه دو حالت شریانی و پیچان‌رودی بیشتر دیده می‌شود. به علت کاهش مقدار بارندگی‌ها در سال‌های انجام تحقیق، جریان آب آن کاهش زیادی داشته است. از طرفی، کم‌عمقی رودخانه باعث شده تا رسوبات درشت دانه بیشتر دیده شوند. همچنین، رسوبات رودخانه دز در محدوده مورد آزمایش عمدتاً از شن و ماسه و در برخی نقاط قله سنگ‌ها تشکیل یافته‌اند. حوضه آبریز رودخانه شاوور وسعت کمتری نسبت به دو رودخانه دیگر مورد مطالعه دارد و بیش‌تر طول آن درون شهر یا روستاها جریان پیدا کرده است. همچنین، رسوبات شاوور رودخانه در محدوده مورد مطالعه غالباً از جنس گل ولای بوده و با کم‌ترین جریان، ناشی از

بررسی شده و در محدوده‌هایی که با توجه به جریان رودخانه امکان انجام عملیات اندازه‌گیری وجود داشت ایستگاه‌ها تعیین محل شدند. همچنین سعی شد مقاطع اندازه‌گیری در هر رودخانه نزدیک به هم باشند تا محدوده اندازه رسوبات بستر یکنواخت‌تر باشند.

بارش، به سرعت گل‌آلود می‌شود. برای انجام برآورد بهتر از شرایط موجود در رودخانه‌ها، سعی شد جانمایی ایستگاه‌ها به نحوی انجام شود که در مجموع شرایط عمومی رودخانه از نظر رسوبات موجود در محل و ریخت‌شناسی رودخانه دارای شرایط یکنواختی باشند. برای این کار پیش از حضور در محل، با استفاده از نقشه‌های هوایی مسیر رودخانه‌ها



شکل ۱- موقعیت رودخانه‌های مورد اندازه‌گیری در ایران و استان خوزستان

را با استفاده از معادله Hvorslev محاسبه شد (Hvorslev, 1951):

$$K_V = \frac{\pi D}{4(L_V + L_V)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه K_V هدایت هیدرولیکی عمودی (m/day)، D قطر لوله (mm)، L_V طول ستون رسوبات بستر در لوله (mm)، t_1 و t_2 زمان اولیه و نهایی اندازه‌گیری (sec)، h_1 و h_2 هدایت هیدرولیکی مشاهده شده در زمان‌های t_1 و t_2 (cm) و m ضریب ناهمسانی که از رابطه زیر به دست می‌آید.

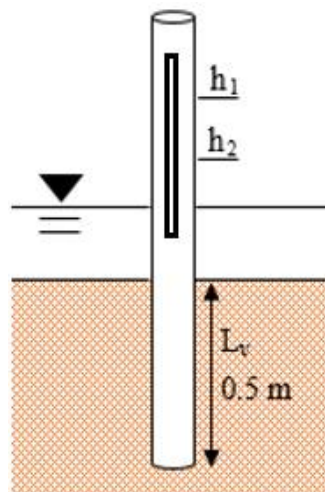
$$m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، K_h هدایت هیدرولیکی افقی رسوبات بستر رودخانه در محل اندازه‌گیری است. Chen, 2000 در شرایط مشابه با شرایط آزمایش‌های تحقیق حاضر، دریافت اگر طول ستون رسوب چندین برابر (حداقل هشت برابر)، بیش از قطر ستون باشد $m=1$ در نظر گرفته می‌شود، با توجه به اینکه در این پژوهش قطر لوله ۵ سانتی‌متر و طول ستون رسوبات بستر در لوله حدود ۵۰ سانتی‌متر بود، رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$K_V = \frac{L_V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

روش نفوذسنج

پیش از شروع آزمایش‌های نفوذسنج در محل کلیه ایستگاه‌ها گمانه‌هایی به طولی معادل طول ستون رسوبات مورد مطالعه حفر شده و خاک محل بررسی شد. در همه ایستگاه‌ها رسوبات تقریباً تا عمق ۶۰ سانتی‌متری فاقد لایه متفاوت بوده و دارای بافت و ساختار همگنی بودند. به دلیل سختی جنس بستر در برخی محل‌های انجام آزمایش، کلیه آزمون‌ها به جای استفاده از لوله پلکسی گلاس (که شکننده است) از لوله فلزی استفاده شد. این لوله طول ۱۵۰ سانتی‌متر، قطر داخلی ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر داشت. همچنین، برای مشاهده سطح آب موجود در لوله و اندازه‌گیری ارتفاع آب در آن، ابتدا در لوله به صورت طولی شکاف ایجاد کرده و سپس با استفاده از ورق شفاف با چسب پوشانده شد. لوله به صورت عمودی و با استفاده از چکش به بستر رودخانه وارد شد. به این ترتیب یک ستون از مواد متخلخل (به طول تقریبی ۵۰ سانتی‌متر برای همه ایستگاه‌ها) درون لوله تشکیل شد. متناسب با نوع مواد بستر، در مقادیر مختلف، از بالا آب درون لوله ریخته شد. سپس، افت آب درون لوله در مقاطع مختلف زمانی اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل ۲). در نهایت، مقدار هدایت هیدرولیکی



شکل ۲- شکل شماتیک و نمای واقعی از روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی عمودی (K_v) در بستر رودخانه

$$k_g = \frac{g}{v} \cdot c \cdot f(n) \cdot d_e^2 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه K هدایت هیدرولیکی، g شتاب گرانش، v لزجت سینماتیکی، که در دمای حدود 20°C آب در رودخانه‌های محل اندازه‌گیری معادل $10^{-6} \times 1.004 \text{ m}^2/\text{s}$ در نظر گرفته شد (Kasnow, 2002). همچنین، C ضریب بی‌بعد، $f(n)$ تابع تخلخل n و d_e قطر موثر ذرات (mm) می‌باشند. به‌طور کلی، تخلخل بر اساس رابطه زیر قابل تعیین است (Vukovic and Soro, 1992) و (Kasnow, 2002):

$$n = 0.255(1 + 0.83^u) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه، u ضریب یکنواختی توزیع ذرات است و از تقسیم مقدار d_{60} بر d_{10} که به ترتیب نشان‌دهنده اندازه ذراتی هستند که ۱۰ و ۶۰ درصد ذرات از آن‌ها بزرگ‌تر هستند، به‌دست می‌آید. در جدول (۱) تابع تخلخل، ضریب ثابت C و محدوده کاربرد هر یک از روابط مورد استفاده در تحقیق ارائه شده‌اند. لازم به‌ذکر است هر یک از روابط در ابتدا از محیط‌های متخلخل با ویژگی‌ها و بافت و ساختار خاصی استخراج شده‌اند.

به جز روابط ارائه شده در این جدول، رابطه Alyamani and Şen, 1993 نیز به‌طور جداگانه، مورد بررسی قرار گرفت. در این رابطه از d_{50} و d_{10} برای تخمین هدایت هیدرولیکی استفاده شده است. این رابطه، که از نظر ساختاری با روابط قبلی ارائه شده در قالب معادله (۱) تفاوت دارد، به‌صورت زیر ارائه شده است (Alyamani and Şen, 1993):

$$K = 1300[I_0 + 0.025(d_{50} - d_{10})]^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه، K هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، I_0 (میلی‌متر) محل تقاطع خط مماس گذرا از d_{50} و d_{10} با محور افقی (اندازه ذرات) و d_{50} میانگین اندازه قطر ذرات (میلی‌متر) است.

روش اندازه ذرات

هدایت هیدرولیکی (K) رسوبات بستر را می‌توان با تجزیه و تحلیل اندازه ذرات رسوب مورد نظر و سایر پارامترهای فیزیکی برآورد کرد. برای این کار نمونه‌هایی از بستر رودخانه‌های محل آزمایش تهیه شد و به روش مکانیکی تجزیه شدند. برای انجام این کار، از ستون خاک تشکیل شده در لوله‌های پیژومتر مورد استفاده در آزمایش‌های نفوذسنج استفاده شد. پس از انجام آزمون هدایت هیدرولیکی در رودخانه نمونه‌ها از لوله تخلیه شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس، به مدت ۲۴ ساعت در آن در دمای 110°C درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس، با استفاده از روش سری الک‌ها (ASTM D6913) ذرات درشت و با استفاده از روش هیدرومتر (ASTM D7928) ذرات ریز نمونه‌ها تعیین اندازه شدند. در نهایت، منحنی توزیع اندازه ذرات رسوبات برای تخمین هدایت هیدرولیکی به روش اندازه ذرات تهیه شد.

معادلات اندازه ذرات

از سالیان دور معادلات تجربی مختلفی برای تخمین مقدار هدایت هیدرولیکی ارائه شده‌اند. هر یک از این معادلات در شرایط خاص و با توجه به توزیع اندازه ذرات خاصی ارائه شده‌اند. بنابراین، برای استفاده در سایر نقاط باید پیش از استفاده بررسی و معادلات برتر تعیین شوند. در این تحقیق، هفت معادله مورد استفاده در تخمین هدایت هیدرولیکی با استفاده از دانه‌بندی خاک، که از عمومیت و مقبولیت بیشتری در بین متخصصان برخوردارند، با مقادیر حاصل از روش نفوذسنج مورد ارزیابی قرار گرفتند. این معادلات در قالب یک رابطه عمومی به‌صورت زیر ارائه شده‌اند (Vukovic and Soro, 1992 و Kasnow, 2002):

جدول ۱- روابط مورد استفاده در تخمین هدایت هیدرولیکی و ضرایب اصلاحی در بستر رودخانه‌های مورد تحقیق (Kasenow, و Vukovic and Soro, 1992) (2002)

رابطه	بی‌یر	اسلیشتر	USBR	کوزنی-کارمن	ترزاقی	هیزن
تابع تخلخل f(n)	۱	$n^{3/278}$	۱	$\frac{n^3}{(1-n)^2}$	$\left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2$	$1 + 10(n - 0.26)$
اندازه موثر ذرات d_e (mm)	d_{10}	d_{10}	d_{20}	d_{10}	d_{10}	d_{10}
ضریب ثابت C	$6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{u}$	1×10^{-2}	$4/8 \times 10^{-4} d_{20}$	$1/3 \times 10^{-1}$	$1/4 \times 10^{-1}$	6×10^{-4}
محدوده کاربرد توصیه شده	$0.06 \text{ mm} < d_e < 0.6 \text{ mm}$ $1 < u < 20$	$d_e > 0.01 \text{ mm}$ $d_e < 5 \text{ mm}$	Medium-grain sand $u < 5$	Large-grain sands	Large-grain sands	$0.1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$

واسنجی ضرایب C در روابط اندازه ذرات

آزمون‌های بسیاری نشان داده‌اند که مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط تجربی مبتنی بر اندازه ذرات با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری با نفوذسنج مطابقت ندارد (Song et al., 2009). برای تخمین مقادیر هدایت هیدرولیکی با استفاده از اندازه ذرات، ضرایب C ارائه شده در روابط نیاز به اصلاح دارد (جدول ۱). برای این منظور، از مقدار هدایت هیدرولیکی حاصل از اندازه‌گیری با نفوذسنج به‌عنوان مبنا برای واسنجی ضرایب C در همه روابط ارائه شده، به جز رابطه الیمانی و شن (Alyamani and Şen, 1993)، استفاده می‌شود. بنابراین، برای هر رودخانه مقادیر C با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (Song et al., 2009):

$$C = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p K_{v,i} / \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left[\frac{g}{\nu} \times \varphi(n_i) \times d_{e,i}^2 \right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن $K_{v,i}$ مقدار هدایت هیدرولیکی تعیین شده به وسیله نفوذسنج در نقطه i از هر رودخانه، p مجموع تعداد نمونه‌های انجام شده در هر رودخانه می‌باشند.

تحلیل‌های آماری

مانند بسیاری از تحقیقات مشابه مثل song et al, 2009 و Landon et al., 2001، برای بررسی وجود اختلاف معنی‌دار بین K_g (هدایت هیدرولیکی حاصل از روش اندازه ذرات) و K_v از آزمون علامت^۱ و نمودار باکس-پلات^۲ استفاده شد. آزمون علامت یک آزمون ناپارامتریک است که برای تعیین تفاوت بین دو گروه از یکدیگر استفاده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از این آزمون، اگر سطح معنی‌داری از سطح معنی‌دار مدنظر کمتر باشد تفاوت بین دو گروه معنی‌داری خواهد بود. در غیر این صورت دو گروه تفاوت معنی‌داری ندارند. به علاوه، نمودار باکس-پلات ابزار مناسب یافتن و توضیح تفاوت‌های بین گروه‌های مختلف از نتایج حاصل است (Kvam and Vidakovic, 2007). در تحقیق حاضر، از این ابزار برای نشان دادن تفاوت بین مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده از دو روش اندازه ذرات و نفوذسنج استفاده شده‌است.

نتایج و بحث

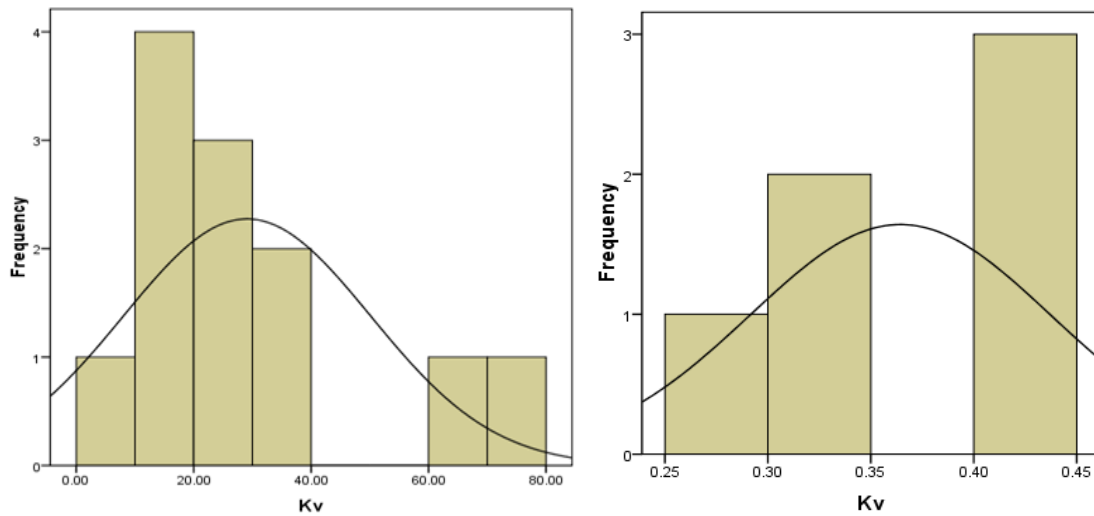
در مجموع ۱۸ آزمون نفوذسنج برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در سه رودخانه کرخه، دز و شاوور انجام شد. میانگین ضخامت ستون خاک تشکیل شده در لوله نفوذسنج حدود ۵۰ سانتی‌متر (50 ± 1 سانتی‌متر) بود. مقادیر حاصل از این آزمون‌ها به‌عنوان مبنایی برای مقایسه مقادیر هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده استفاده شد. میانگین هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده بستر رودخانه‌های کرخه، دز و شاوور به ترتیب ۲۹/۴، ۲۸/۷، ۰/۳۶ متر بر روز به‌دست آمد. همچنین، هیستوگرام نتایج آزمون نفوذسنج در شکل (۳) ارائه شده‌است. با توجه به اینکه مقادیر K_v در رودخانه شاوور با دو رودخانه دیگر تفاوت زیادی دارند و همچنین، به‌منظور نمایش بهتر، نتایج در دو هیستوگرام جداگانه نشان داده شده‌است. چنان‌که در این شکل مشخص است مقادیر حاصل از اندازه‌گیری شده از نمودار نرمال تبعیت نمی‌کند.

صحت نتایج حاصله پس از تجزیه نمونه‌های بستر حاصل از نقاط اندازه‌گیری مورد تایید قرار گرفت. بر این اساس، دلیل تفاوت مقادیر مذکور تفاوت در جنس بستر رودخانه‌ها بود. گرچه پیش از این مشاهدات صورت گرفته حین انجام آزمایش‌ها تایید کننده این موضوع بود. در هیستوگرام ارائه شده در شکل (۳) فراوانی مقادیر حاصله در بستر رودخانه‌های دز و کرخه بیش‌تر در بازه ۱۰ تا ۴۰ متر بر روز مشاهده شد. همچنین، هدایت هیدرولیکی در بستر رودخانه شاوور بین ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ متر بر روز بود که در سه نقطه این مقدار بین ۰/۴۰ تا ۰/۴۵ اندازه‌گیری شد.

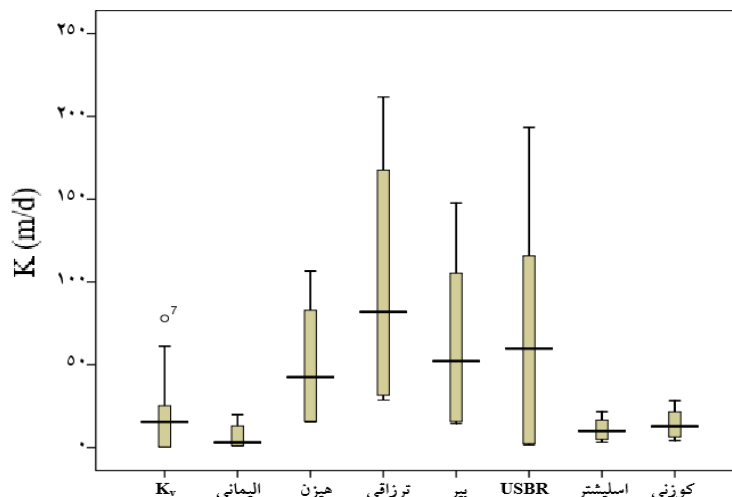
به‌طور کلی، نتایج حاصل از اندازه‌گیری به روش نفوذسنج در بستر رودخانه‌های مورد پژوهش، در بازه مقادیر حاصل از تحقیقات مشابه قبلی قرار می‌گیرند. گرچه به‌دلیل اینکه تحقیق حاضر در بستر با اندازه ذرات متفاوت انجام شده و سایر تحقیقات غالباً بر روی بستر یک رودخانه انجام شده، این نتایج به‌طور کامل با نتایج پژوهش‌های یاد شده منطبق نیستند. به‌طور مثال، مشابه با نتایج بستر شاوور، نتایج Sebok et al., 2015 و Chen, 2004 در خاک رسی، به‌ترتیب، در بازه ۱/۳۷-۸/۰ و ۲/۵-۰/۶ متر بر روز قرار گرفت. در حالی که در

۱۸/۸ و ۱۷-۴۵ متر بر روز بود گزارش شد.

دو رودخانه دیگر، نتایج مشابه نتایج تحقیقات Cheng و Chen, 2000 et al, 2011، که در خاک شنی انجام شد، و به ترتیب در بازه ۴۳-



شکل ۳- هیستوگرام K_v حاصل از آزمایش‌های نفوذسنج بستر رودخانه‌های کرخه و دز (راست) و بستر رودخانه شاوور (چپ)



شکل ۴- نمودار باکس پلات مقادیر K_v حاصل از آزمایش نفوذسنج و K_p حاصل از روابط تجربی

یکنواختی بیش از ۱۴ بود. همچنین بر این اساس، میانگین اندازه ذرات در بستر دز ۱/۰۱ میلی‌متر و در بستر کرخه ۰/۶۸ میلی‌متر بود. بنابراین، علیرغم اینکه بستر هر دو رودخانه دارای درصد ذرات ریزدانه برابری بودند، اما، به دلیل اینکه ذرات درشت دانه بیشتری در بستر دز وجود داشت ناهمگنی در این بستر بیشتر مشاهده شد. چنین موضوعی موجب تخمین بیش‌تر هدایت هیدرولیکی در بستر دز شد.

در رودخانه شاوور، با توجه به اینکه منبع عمده تامین آب چشمه‌های محدودی در شمال شهر شوش و نیز زه‌آب حاصل از شبکه آبیاری و زهکشی دز می باشد بروز سیلاب‌های بزرگ و در نتیجه حمل و ترسیب رسوبات درشت‌دانه امکان‌پذیر نیست. لذا، رسوبات غالباً ریزدانه بوده و دامنه تغییرات اندازه ذرات کوچک‌تر

هدایت هیدرولیکی تعیین شده به روش تحلیل اندازه ذرات پس از اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با استفاده از نفوذسنج، نمونه‌های تهیه شده از بستر سه رودخانه به آزمایشگاه منتقل شده و تجزیه مکانیکی شدند. سپس، با استفاده از مقادیر به‌دست آمده منحنی‌های دانه‌بندی ترسیم شد. اندازه‌های مرتبط با روابط تجربی استخراج شده از این منحنی‌ها در جدول (۲) ارائه شده- است. بر طبق مشاهدات صحرائی، بستر رودخانه‌های کرخه و دز شنی همراه با مقداری سنگ‌ریزه بود. به جز نقطه D-2 در بستر دز، سایر نقاط میانگین اندازه ذراتی کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر داشتند. همچنین، مقدار رس در این نمونه‌ها کم‌تر از ۵ درصد بود. با توجه به ضرایب یکنواختی حاصله، دانه‌بندی بستر آن‌ها بسیار ناهمگن بود به نحوی که به جز دو نقطه در بقیه نقاط ضریب

متر بر روز، هدایت هیدرولیکی را بیش از سایر روابط برآورد کرد. در حالی که رابطه الیمانی و شن این خصوصیت را به طور میانگین ۶/۲ متر بر روز و کمتر از سایر روابط برآورد کرد. همچنین، نمودار باکس پلات به دست آمده از روابط مختلف اندازه ذرات و آزمون نفوذسنج در شکل (۴) نشان داده شده است. مقادیر میانگین K_g روش ترزاقی از سایر روش‌ها بیش تر و الیمانی از همه کم تر بود. به علاوه، بازه پراکندگی نتایج روابط الیمانی، کوزنی و اسلیشتر کوچکتر از نتایج دیگر روابط بود. با این حال سه رابطه ترزاقی، بیر و USBR دارای پراکنش در نتایج حاصل بودند.

است. در نتیجه، ضریب یکنواختی نمونه‌های برداشتی این رودخانه با میانگین کم تر از ۳/۵، نسبت به نمونه‌های برداشتی از دو رودخانه دیگر کوچکتر می‌باشد. به طور کلی، میانگین اندازه ذرات در بستر شاوور کوچکتر از ۰/۱ میلی‌متر بوده و ذرات تشکیل دهنده آن غالباً رس و سیلت بوده و تقریباً در بستر هیچگونه سنگریزه‌ای مشاهده نشد.

در جدول (۳) میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط مختلف اندازه ذرات، در سه رودخانه مورد آزمایش، ارائه شده است. با توجه به این جدول، روش ترزاقی با میانگین ۹۶/۸

جدول ۲- توزیع اندازه ذرات خاک بدست آمده از منحنی توزیع دانه بندی خاک

مکان	d_{10} (mm)	d_{20} (mm)	d_{30} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60} (mm)	U_c	I_0
k-1	۰/۱	۰/۲۱	۰/۳۵	۰/۹۸	۱/۵	۱۵	۰/۰۸۵
k-2	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۵	۰/۷۸	۱۵/۶	۰/۰۲
k-3	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۳	۰/۴	۶/۱۵	۰/۰۲
k-4	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۷	۱/۲	۱۵	۰/۰۵
k-5	۰/۱	۰/۲۳	۰/۵۵	۱/۰۵	۱/۰۸	۲۰	۰/۰۸
k-6	۰/۱	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۵۷	۰/۸	۸/۹	۰/۰۹
D-1	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۵	۰/۷	۱۵	۰/۰۸
D-2	۰/۱۲	۰/۱۵	۱/۱	۱/۲	۲/۸	۲۳/۳	۰/۱
D-3	۰/۰۶	۰/۲	۰/۴	۱/۱۱	۱/۶	۲۶/۶	۰/۰۱
D-4	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۵	۱/۲	۱/۷	۱۴	۰/۰۵
D-5	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۷۳	۱/۸	۱۵	۰/۰۸۵
D-6	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۹۵	۲/۱	۱۶/۱۵	۰/۰۸
SH-1	۰/۰۳۵	۰/۰۳۷	۰/۰۳۹	۰/۰۵۳	۰/۱۱	۳/۱	۰/۰۳۱
SH-2	۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۳۹	۰/۰۴۵	۰/۱۱	۳/۲	۰/۰۳۱
SH-3	۰/۰۳۱	۰/۰۳۵	۰/۰۴۱	۰/۰۴۳	۰/۱۱	۳/۱	۰/۰۳۱
SH-4	۰/۰۳۵	۰/۰۳۷	۰/۰۴۰	۰/۰۸	۰/۱۴	۴	۰/۰۳۰
SH-5	۰/۰۳۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۷	۰/۰۶۳	۰/۱۲	۳/۵	۰/۰۳۰
SH-6	۰/۰۳۵	۰/۰۳۸	۰/۰۴۱	۰/۱	۰/۱۴	۴	۰/۰۲۷

جدول ۳- میانگین هدایت هیدرولیکی حاصل از تخمین به روش اندازه ذرات در بستر سه رودخانه کرخه، دز و شاوور (متر بر روز)

روش	کرخه	دز	شاوور	میانگین	سطح معنی داری (P-Value)
الیمانی و شن	۸/۸	۸/۵	۱/۲	۶/۲	۰/۸۱
هیزن	۵۵/۱	۷۷/۳	۱۶/۱	۴۹/۵	۰/۰۰۱
ترزاقی	۱۰۶/۶	۱۵۳/۶	۳۰/۰	۹۶/۸	۰/۰۰
بیر	۶۹/۸	۱۰۵/۹	۱۵/۲	۶۳/۶	۰/۰۰
USBR	۸۴/۱	۱۰۴	۲/۳	۶۳/۵	۰/۰۰۱
اسلیشتر	۱۲/۴	۱۵/۷	۵/۲	۱۱/۱	۱/۰۰
کوزنی	۱۶/۰	۲۰/۵	۶/۷	۱۴/۴	۰/۴۸
K_v	۲۸/۷	۲۹/۴	۰/۳۶	۱۹/۵	

P-Value براساس مقادیر K_v حاصل از آزمون پرمامتر و K_g حاصل از هر یک از هفت رابطه تجربی اندازه ذرات بر اساس رابطه اصلی محاسبه شده است.

مقایسه روابط تجربی

مقایسه، در این بخش ارائه شده است. بر این مینا، مقادیر حاصل از روابط مختلف به صورت نمودار پراکنش در مقابل هم نشان داده

مقادیر $\ln(K_g)$ محاسبه شده بر حسب تحلیل اندازه ذرات جهت

همچنین، برای درک بهتر تفاوت بین روابط ارائه شده، علاوه بر خط رگرسیون ساده، برای مقایسه بهتر روابط اندازه ذرات، خط برابری نتایج (۱:۱) هم ترسیم شد (شکل ۵). از بین روابط مورد بحث، رابطه USBR بیشترین اختلاف شیب بین خط برابری و خط رگرسیونی با دیگر روابط را داشت. در مقابل، در مورد روابط اسلیشتر، بیر و ترزاقی، مطابقت بیشتری بین خط رگرسیونی با دیگر روابط و خط برابری نتایج مشاهده شد.

مقایسه هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط مختلف اندازه ذرات با هدایت هیدرولیکی حاصل از اندازه گیری

مقادیر مختلف نسبت های K_g/K_v بستر رودخانه های کرخه، دز و شاوور و نیز میانگین آن ها برای روابط مختلف در جدول (۶) ارائه شده است. به طور کلی، در هر سه رودخانه، مقادیر K_g حاصل از روابط هیزن، بیر، ترزاقی و USBR بسیار بیش از نتایج حاصل از آزمون نفوذسنج بود. این نتیجه با نتایج برخی تحقیقات مانند Song et al, 2009 مطابقت داشت. اما، رابطه الیمانی و شن هدایت هیدرولیکی را، در کرخه و دز، کمتر از نصف مقدار صحرایی و در مجموع فقط ۱/۵ برابر آن برآورد می کرد. همچنین، Song et al., 2009 دریافتند که رابطه اسلیشتر مقدار K_g را کم تر از مقدار K_v تخمین می زند که در این تحقیق این موضوع در دو رودخانه کرخه و دز مشاهده شد. به نحوی که به ترتیب در این دو رودخانه K_g/K_v به ترتیب ۰/۵۰ و ۰/۹۸ ثبت شد. رابطه کوزنی هم گرچه، برآورد کاملاً نزدیکی به مقدار اندازه گیری شده نشان نداد. اما، با حصول نسبت ۰/۷ و ۱/۳ به ترتیب در دو رودخانه مذکور نشان داد که قابلیت خوبی در برآورد نسبت واقعی دارد.

عدم قطعیت و دقت کافی در برآورد هدایت هیدرولیکی جزء ذاتی روابط برآورد هدایت هیدرولیکی بر مبنای اندازه ذرات به شمار می رود (Song et al, 2009). Vukovic and Soro, 1992 طی مطالعه خود دریافتند که روابط مختلف اندازه ذرات می توانند نتایج کاملاً متفاوتی داشته باشند و مقادیر K_g برآورد شده تا ۲۰ برابر هم می رسد. البته برخی محققان خطای وارده بر تخمین را تا بیش از ۵۰۰ درصد هم بیان کرده اند (Rosas et al, 2014).

هریک از این روابط ممکن است در برخی نقاط برآورد خوبی از هدایت هیدرولیکی داشته باشد. اما در جاهای دیگر برآورد ضعیفی از آن داشته باشد (Lu et al., 2012) و Vukovic and Soro, 1992). در تحقیق Lu et al., 2012 که ۱۲ رابطه تخمین هدایت هیدرولیکی را مورد آزمون قرار گرفت فقط دو رابطه شفرد و ترزاقی برآوردی برابر مقادیر اندازه گیری شده داشتند. سایر روش ها فقط در برخی نقاط برآورد مناسبی داشتند. اما به طور کلی، روابط مورد مطالعه برآورد مناسبی نداشتند.

شده اند (شکل ۵). ارائه نتایج به این نحو، مقایسه دیداری سریع روابط خطی بین روش های مختلف را امکان پذیر می کند (Vienken and Dietrich, 2011). همچنین، در این شکل خط برابری و رگرسیون خطی ساده، بین روابط مورد اشاره، ارائه شده است. به علاوه، هیستوگرام توزیع نسبی $\ln K$ هر یک از روابط در بالای هر یک از ستون ها نشان داده شده است. هیستوگرام روابط بیر، ترزاقی و هیزن توزیع مشابهی دارند. اما روش های دیگر دارای هیستوگرام متفاوتی می باشند. نتایج رابطه الیمانی برای بستر رودخانه شاوور مقادیر کوچکتری از $\ln K$ را حاصل کرد. این رابطه، بر خلاف سایر روابط، ساختاری متفاوت داشته که این موضوع بر نتایج به دست آمده هم تاثیر قابل توجهی داشته است. به علاوه، رابطه USBR به دلیل تاثیر مضاعف d_{20} بر مقادیر هدایت هیدرولیکی، کوچک و بزرگ بودن مقادیر $\ln K$ را شدت می بخشد. Vienken and Dietrich, 2011 مشابهت هیستوگرام $\ln K_g$ روابط هیزن، بیر، ترزاقی و USBR را گزارش کردند.

با توجه به شکل (۵) نمودار ماتریسی حاصل از تجزیه نمونه های برداشتی همبستگی بالایی بین روابط اعمال شده در مورد همه اندازه ذرات نشان می دهد. ضرایب تبیین به دست آمده بین روابط مختلف در جدول (۵) ارائه شده است. ضریب تبیین به عنوان شاخصی برای ارزیابی متغیرها با استفاده از یکدیگر به شمار می رود. به عبارت بهتر ضریب تبیین بالاتر بیانگر استحکام بیشتر رابطه رگرسیونی ارائه شده بین دو متغیر است. البته لزوماً همبستگی بهتر بین روابط، بیانگر نزدیکی بیشتر خط رگرسیونی به خط برابری نتایج نیست. از بین روابط ارائه شده، رابطه USBR همبستگی کمتری با بقیه روابط ارائه شده داشت. این موضوع در مورد رابطه الیمانی هم صدق می کند. بالعکس، روابط ترزاقی و هیزن دارای همبستگی خوبی با سایر روابط ارائه شده بودند. به نحوی که ضریب همبستگی در مورد روابط هیزن و ترزاقی ۰/۹۹۹ بود. این مقدار از همبستگی بین رابطه اسلیشتر و کوزنی هم مشاهده شد.

گرچه مطابقت و عدم مطابقت نتایج حاصل از روابط مختلف ارائه شده در تحقیق حاضر در تحقیقات قبلی به طور کامل بررسی نشده است. اما، برخی روابط به صورت دو به دو مورد بررسی قرار گرفته اند. مطابق با نتایج تحقیق حاضر، برخی تحقیقات گزارش دادند که K_g حاصل از روابط بیر و هیزن مطابقت خوبی باهم دارند (Chua et al., 2007). گرچه، نتایج حاصل از برخی تحقیقات با این نتیجه تفاوت داشت (Song et al, 2009). در تحقیق حاضر، با وجود اینکه رابطه هیزن بیشترین اختلاف را با نتایج روش نفوذسنج نداشت. اما برخی تحقیقات ضرایب اصلاحی بین یک تا ۱۰۰۰ را برای آن در نظر گرفته اند (Song et al, 2009).

فرسایش و رسوبگذاری می‌شود مرتبط می‌شود. به‌طور کلی، در معادلات مورد بحث دو عامل تخلخل و اندازه ذرات موثر می‌توانند بر نسبت K_g/K_v موثر باشند. با توجه به رابطه (۵) می‌توان به جای تخلخل ضریب یکنواختی را بررسی کرد. با توجه به نتایج حاصل از تجزیه مکانیکی (جدول ۲) و نتایج جدول (۳)، از دو عامل یاد شده، اندازه ذرات موثر (d_{10}) تاثیر بیشتری بر این نسبت داشته است. چنانکه در منابع مختلف (مانند Bagarello et al, 2016 و Verbist et al, 2012) ذکر شده، همگنی بیش‌تر (یکنواختی کمتر) ذرات موجب افزایش هدایت هیدرولیکی می‌شود. در نتیجه انتظار می‌رود بستر شاور که دارای میانگین ضریب یکنواختی به مراتب کم‌تری است، هدایت هیدرولیکی بیشتری داشته‌باشد. اما برعکس، بستر دو رودخانه دیگر با وجود ناهمگنی بیشتر، هدایت هیدرولیکی برآوردی بیشتری نسبت مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که نسبت K_g/K_v بیش از آنکه تحت تاثیر شرایط همگنی خاک باشد تحت تاثیر اندازه موثر ذرات قرار دارد.

به‌علاوه، تراکم از جمله عواملی است که ممکن است خاک بستر را تحت تاثیر قرار داده و هدایت هیدرولیکی آن را کاهش دهد (Zhang et al., 2006). در این پدیده، تراکم با با تخریب و تغییر شکل و ساختار منافذ موجب کاهش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود (Alaoui et al., 2011). با توجه به نوع خاک بسترهای دز و کرخه درشت و بستر شاور ریز بافت و رسی هستند، امکان ایجاد تراکم در خاک بستر شاور بیشتر است.

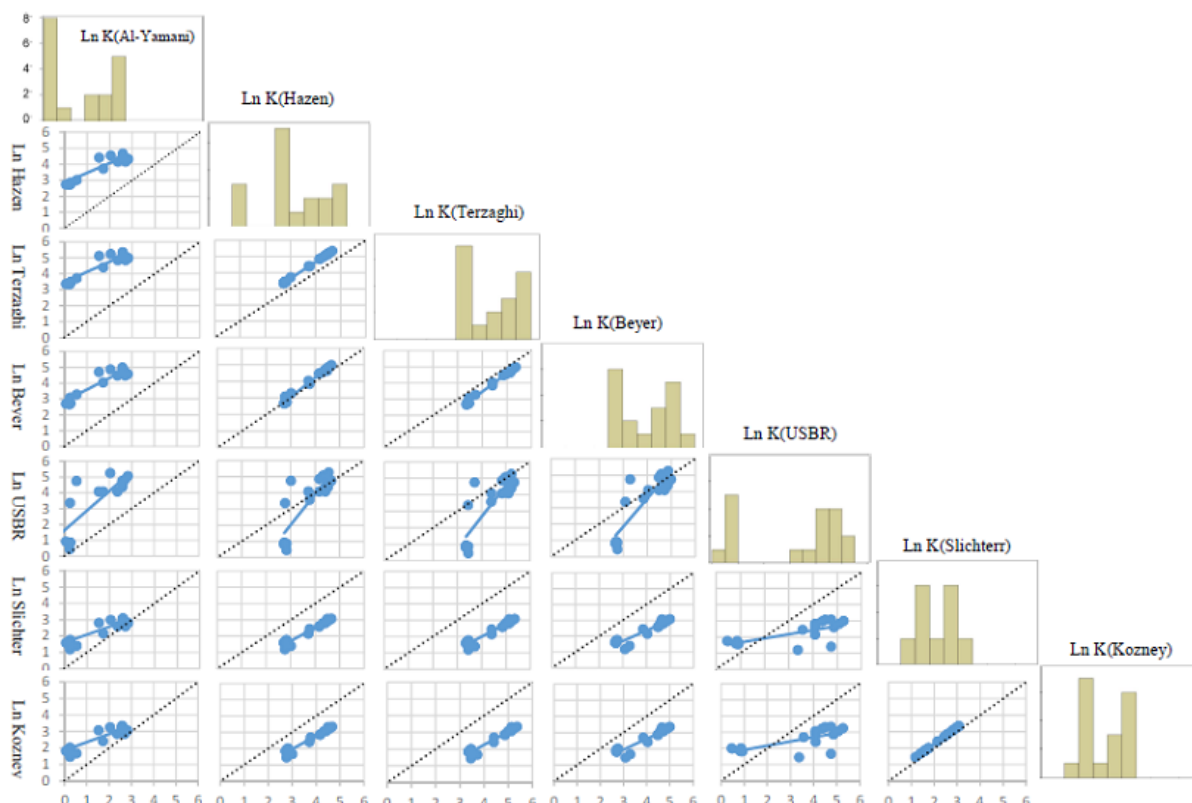
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) نسبت K_g/K_v در بستر کرخه و دز به مراتب کم‌تر از مقدار آن در بستر شاور بود. بیش‌ترین تفاوت در بین روابط مربوط به روابط اسلیشتر و کوزنی است که به‌ترتیب، در شاور تا بیش از ۱۵ و ۱۹ برابر نسبت‌های حاصل در دو رودخانه دیگر بود. بر خلاف دو رابطه مذکور، این نسبت برای رابطه USBR در رودخانه شاور نسبت به رودخانه دز حدوداً ۱۴ درصد کمتر بود. در واقع کم‌تر از سایر روابط تحت تاثیر شرایط بستر رودخانه قرار گرفته‌بود. چنان‌که در جدول (۶) مشاهده می‌شود بستر رودخانه شاور همه روابط دارای بیش برآوردی هستند. به نحوی که در رابطه ترزاقی هدایت هیدرولیکی تا $۸۴/۶$ برابر مقدار اندازه‌گیری شده تخمین زده شده‌است. گرچه، نسبت K_g/K_v برای رابطه الیمانی و شن فقط $۳/۵$ بود.

اندازه ذرات ریزتر بستر رودخانه شاور موجب کاهش دامنه اندازه ذرات و در نتیجه کاهش ضریب یکنواختی شده‌است. Sebok et al., 2015 دریافتند همه روابط مورد استفاده در تحقیقشان در لایه بالایی بستر رودخانه که دارای ذرات درشت-تری بود برآورد بیشتری از K_g دارند. همچنین، تغییرات در نتایج روابط مختلف در لایه بالایی بسیار بیشتر از لایه پایینی با بافت ریزتر بود. در تحقیقات دیگر هم معلوم شد که با ریزدانه‌تر شدن خاک مقدار K_g و K_v بستر رودخانه به هم نزدیک‌تر می‌شوند (Landon et al., 2001). Genereux et al., 2008 نتیجه گرفتند که تغییرات هدایت هیدرولیکی در مجراهای آبی به تغییرات اندازه ذرات بستر بستگی دارد. بنابراین این تغییرات، به‌صورت غیرمستقیم، به عاملی مانند سرعت جریان که موجب ایجاد

جدول ۵- ماتریس همبستگی مقادیر $\ln(K_g)$ محاسبه شده روابط مختلف اندازه ذرات به همراه معادلات رگرسیون خطی ساده بین روابط

$\ln K$ (Slichter)	$\ln K$ (USBR)	$\ln K$ (Beyer)	$\ln K$ (Terzaghi)	$\ln K$ (Hazen)	$\ln K$ (Alyamani)	
					۰/۷۹	$\ln K$ (Hazen)
					$۲/۸۴x^*+۰/۶۲$	
				۰/۹۹۹	۰/۷۹	$\ln K$ (Terzaghi)
				$۱/۰۲x+۰/۵۸$	$۰/۶۴x+۳/۴۹$	
			۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸۰	$\ln K$ (Beyer)
			$۱/۱۴x-۱/۰۸$	$۱/۱۶x-۰/۴۱$	$۰/۷۳x+۲/۸۶$	
		۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۰	$\ln K$ (USBR)
		$۱/۷۳x-۳/۳۵$	$۱/۸۹x-۴/۸۹$	$۱/۹۰x-۳/۷۰$	$۱/۲۳x+۱/۶۴$	
	۰/۴۹	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۷۲	$\ln K$ (Slichter)
	$۰/۲۵x+۱/۴۱$	$۰/۶۶x-۰/۲۸$	$۰/۷۸x-۱/۱۴$	$۰/۸۰x-۰/۶۹$	$۰/۴۹x+۱/۶۰$	
۰/۹۹۹	۰/۵۰	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۷۲	$\ln K$ (Kozney)
$۱/۰۰x+۰/۲۵$	$۰/۲۶x+۱/۶۵$	$۰/۶۷x-۰/۰۵$	$۰/۷۸x-۰/۸۸$	$۰/۸۱x-۰/۴۵$	$۰/۴۹x+۱/۸۶$	

* مقدار x در هر معادله بیانگر $\ln(K_g)$ حاصل از رابطه اندازه ذرات در بالای آن ستون می‌باشد.



شکل ۵- نمودار ماتریسی $\ln(K_p)$ روابط مختلف تحلیل اندازه ذرات و هیستوگرام آن‌ها (در هیستوگرام محور افقی مقدار $\ln(K_p)$ و محور عمودی فراوانی) و در نمودارها هر دو محور $\ln(K_p)$ است)

(Alyamani and Şen, 1993). بر این اساس، گرچه بزرگی حجم خاک دخیل در روش نفوذسنج به اندازه روش‌هایی مثل پمپاژ بزرگ نیست. اما از حجم خاک مورد استفاده در روش اندازه ذرات بزرگ‌تر می‌باشد.

بخشی از تفاوت در مقادیر هدایت هیدرولیکی حاصل از روش اندازه ذرات و روش‌های صحرایی مربوط به تاثیر مقیاس بر هدایت هیدرولیکی است. در روش‌های صحرایی مثل پمپاژ هدایت هیدرولیکی تعیین شده مربوط به حجم بزرگی از خاک است. در حالی که، در روش اندازه ذرات، این حجم بسیار کوچک‌تر است

جدول ۶- میانگین نسبت هدایت هیدرولیکی حاصل از تحلیل اندازه ذرات بر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده (K_g/K_v)

میانگین	شاوور	دز	کرخه	رودخانه	
				رابطه	
۱/۵	۳/۵	۰/۵۰	۰/۴۰	البمانی و شن	
۱۷/۵	۴۵/۳	۴/۷	۲/۴	هیزن	
۳۲/۸	۸۴/۶	۹/۴	۴/۵	ترزاقی	
۱۷/۵	۴۳/۰	۶/۵	۳/۰	بیر	
۵/۹	۶/۵	۷/۴	۳/۸	USBR	
۵/۴	۱۴/۷	۰/۹۸	۰/۵	اسلیشتر	
۶/۹	۱۸/۸	۱/۳	۰/۷	کوزنی	

محدوده مورد مطالعه است. هر چند تفاوت بین دو ضریب اصلاحی C بستر دز و کرخه نسبتاً کم است. اما این ضرایب در رودخانه شاوور بسیار کوچک‌تر از دو رودخانه دیگر بود. دلیل بروز چنین تفاوتی وجود اندازه متفاوت ذرات در رودخانه شاوور است. کوچک بودن اندازه ذرات در این رودخانه موجب کوچک بودن قابلیت آبدگزی بستر و افزایش نسبت K_g/K_v می‌شود (جدول ۶). بنابراین

ضرایب اصلاح شده C

میانگین و خطای استاندارد ضرایب اصلاح شده، C، هفت رابطه مورد استفاده محاسبه و نتایج در جدول (۷) ارائه شده است. مقادیر جدید C در بستر رودخانه‌های مختلف با هم تفاوت دارند. نزدیکی مقادیر اصلاحی به مقادیر اولیه معرفی شده در هر رابطه نشان-دهنده نیاز به انجام اصلاحات در موقع استفاده از آن رابطه در

بررسی مقادیر خطای استاندارد ضریب اصلاحی C روابط اندازه ذرات مختلف نشان داد که مقادیر این شاخص در دو رودخانه کرخه و دز نزدیک به هم و در رودخانه شاورر بسیار کم تر از این دو رودخانه بود. بروز مقادیر خطا به این صورت وجود پراکنش بیشتر در مقادیر ضرایب C اصلاحی در دو رودخانه یادشده نسبت به رودخانه شاورر بود. همچنین از بین این روابط دو رابطه بی‌یر و اسلیشتر دارای بیشترین مقدار خطا نسبت به میانگین مقادیر C اصلاحی و رابطه کوزنی دارای کم‌ترین مقدار آن بود.

در مطالعات Song et al., 2009 در رودخانه الخورن و Moazami et al., 2017 در منطقه پخش سیلاب جارمه خوزستان ضرایب اصلاحی متفاوتی برای روابط مختلف مورد بررسی گزارش شد. برخی از این ضرایب اصلاحی بیشتر و برخی کمتر از ضرایب C اصلی آن روابط بود. طبق نتایج این دو تحقیق، نه تنها در استفاده از روابط مختلف بیش یا کم برآوردی ضریب C مشاهده شد. بلکه این ضرایب در نقاط مختلف هم نتایج کاملاً متفاوتی به دنبال داشت. به نحوی که بر این اساس، ضریب اصلاحی حاصله می‌تواند در برخی نقاط یک رودخانه بزرگ‌تر و در جای دیگر کوچک‌تر از ضریب اصلی آن باشد. با این وجود، به‌عنوان یک فرضیه، آن‌ها توصیه کردند که در بستر رودخانه ضرایب C کوچکتری برای برآورد K_v باید مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه دو تحقیق مذکور و تحقیق حاضر در محیط‌های متخلخل متفاوتی انجام شده‌اند، به نظر می‌رسد ضرایب C حاصل از هر تحقیق، حتی در محدوده‌های کوچک از بستر رودخانه هم بدون در نظر گرفتن شرایط محلی قابل تعمیم نباشد. به‌طور کلی، به نظر می‌رسد اظهارنظر دقیق راجع به این موضوع نیاز به انجام تحقیقی جامع داشته باشد.

برای اصلاح معادلات مختلف مورد بحث در این رودخانه ضرایب بیش‌تری باید اعمال کرد.

به‌طور میانگین، روابط کوزنی و اسلیشتر نسبت به سایر روابط نیاز به انجام اصلاح کمتری برای استفاده در منطقه مورد مطالعه داشتند. به‌نحوی که رابطه کوزنی با کمتر از ۱۰ درصد اصلاح برای این محدوده قابل استفاده است. همچنین، سه رابطه هیزن، ترزاقی و بی‌یر، به‌طور میانگین، دارای ضرایب اصلاحی C کوچک‌تری نسبت به ضریب اصلی بودند. در رابطه ترزاقی نسبت ضرایب اصلاح شده و اصلی C ۰/۱۵ بود. دلیل بروز این وضعیت، ساختار معادله ترزاقی ارتباط دارد. وجود ریشه سوم تخلخل در مخرج تابع تخلخل موجب افزایش قابل ملاحظه در مقدار آن شده و در نتیجه تاثیر نسبی ضریب ثابت در رابطه اندازه ذرات کمتر شده است. از بین شش رابطه مورد بحث، فقط در رابطه USBR اندازه موثر ذرات معادل d_{20} در نظر گرفته شده است و در این رابطه نتایج ارائه شده در جدول (۷) نشان‌دهنده این است که تنها میانگین ضریب اصلاحی C در این رابطه بیش از دو برابر ضریب اصلی رابطه است.

همچنین، طبق مقادیر اندازه ذرات نمونه‌های مختلف (جدول ۲)، مقادیر d_{10} و d_{20} در بستر رودخانه شاورر برخلاف دو رودخانه دیگر نزدیک بوده است. بر طبق رابطه (۵) تخلخل بر مبنای ضریب یکنواختی تعیین می‌شود و یکنواختی اندازه ذرات در رودخانه شاورر کم‌تر و در نتیجه تخلخل بیشتر از دو رودخانه دز و کرخه برآورد شده است. بنابراین، در رودخانه کرخه که تخلخل بستر بیش از دو رودخانه دیگر تخمین‌زده شده‌است مقادیر C اصلاحی بسیار کمتر از ضرایب اصلی آن به‌دست آمد. این مقادیر، در دو رودخانه دیگر به‌طور میانگین بسیار بیش از رودخانه شاورر به‌دست آمد.

جدول ۷- ضرایب ثابت C معرفی شده و ضرایب ثابت C اصلاحی روابط اندازه ذرات

رابطه	بی‌یر	اسلیشتر	USBR	کوزنی-کارمن	ترزاقی	هیزن
ضریب C اصلی	$6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{u}$	1×10^{-1}	$4/8 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$8/3 \times 10^{-1}$	$8/4 \times 10^{-1}$	6×10^{-1}
میانگین	$2/5 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$2/3 \times 10^{-1}$	$16 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	15×10^{-1}	$2/2 \times 10^{-1}$	$3/1 \times 10^{-1}$
خطای استاندارد	$0/8 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$0/9 \times 10^{-1}$	$0/6 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$0/6 \times 10^{-1}$	$0/8 \times 10^{-1}$	1×10^{-1}
میانگین	$1/7 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$1/8 \times 10^{-1}$	$13/6 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	12×10^{-1}	$1/6 \times 10^{-1}$	$2/3 \times 10^{-1}$
خطای استاندارد	$0/7 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$0/8 \times 10^{-1}$	$0/9 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$0/5 \times 10^{-1}$	$0/7 \times 10^{-1}$	1×10^{-1}
میانگین	$0/14 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$0/07 \times 10^{-1}$	$0/8 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$0/4 \times 10^{-1}$	$0/1 \times 10^{-1}$	$0/14 \times 10^{-1}$
خطای استاندارد	$0/01 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$0/04 \times 10^{-1}$	$0/1 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$0/02 \times 10^{-1}$	$0/01 \times 10^{-1}$	$0/01 \times 10^{-1}$
میانگین	$1/4 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$1/4 \times 10^{-1}$	$10/1 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$9/1 \times 10^{-1}$	$1/3 \times 10^{-1}$	$1/8 \times 10^{-1}$
خطای استاندارد	$0/5 \times 10^{-1} \log \frac{500}{u}$	$0/5 \times 10^{-1}$	$0/4 \times 10^{-1} d_{20}^{0.3}$	$0/3 \times 10^{-1}$	$0/4 \times 10^{-1}$	$0/6 \times 10^{-1}$

نتیجه گیری

به طور کلی ۱۸ آزمون هدایت هیدرولیکی عمودی اشباع با استفاده از نفوذسنج بر اساس روش اصلاحی Chen, 2000 در سه رودخانه کرخه، دز و شاوور انجام شد. همچنین، برای برآورد دقت روش های تحلیل اندازه ذرات هفت رابطه هیزن، ترزاقی، اسلیشتر، کوزنی، USBR، الیمانی و شن و بیر با استفاده نمونه های تهیه شده از بستر این رودخانه ها بررسی شدند. نتایج آزمون های حاصل از آزمون نفوذسنج نشان داد میانگین هدایت هیدرولیکی اندازه-گیری شده بستر رودخانه های کرخه، دز و شاوور به ترتیب ۲/۱۵، ۲/۹۴ و ۰/۰۳ متر بر روز به دست آمد. با وجود اینکه در رودخانه شاوور، که دارای ذرات ریزتری نسبت به دو رودخانه دیگر بود، همه روابط اندازه ذرات هدایت هیدرولیکی را بیش از K_v برآورد می کردند. اما، در مقایسه با هدایت هیدرولیکی اندازه گیری شده به وسیله نفوذسنج، هدایت هیدرولیکی حاصل از روابط هیزن، ترزاقی بیر و USBR، به طور قابل توجهی، در هر سه رودخانه بیشتر شد. همچنین، در دو رودخانه دز و کرخه روابط الیمانی و شن و اسلیشتر دارای کم برآوردی بودند و رابطه کوزنی تقریباً هدایت هیدرولیکی را معادل مقدار اندازه گیری شده برآورد می کرد. به طور کلی، رابطه ترزاقی بیشترین بیش برآورد هدایت هیدرولیکی را داشته و سپس بیشترین نسبت K_g/K_v از روابط بیر

و هیزن به دست آمد.

برای برآورد بهتر مقادیر میانگین K_v با استفاده از اندازه ذرات، ضرایب C موجود در روابط مورد بررسی نیاز به تغییر در بازه ۰/۱۵ تا ۲/۱۱ برابری داشتند. گرچه، ضرایب C اصلاحی در روابط بیر، ترزاقی و هیزن کاهش زیادی نسبت به ضرایب اصلی خود داشتند. در رابطه USBR این افزایش زیاد و در دو رابطه کوزنی و اسلیشتر افزایش اندک بود. به علاوه، نتایج نشان داد که روابط الیمانی و شن و USBR در برآورد هدایت هیدرولیکی سازگاری کمتری با دیگر روابط اندازه ذرات دارند.

از آنجایی که میزان تخلخل تاثیر زیادی بر مقدار هدایت هیدرولیکی تخمینی به وسیله روابط اندازه ذرات دارد. به نظر می رسد روش تخمین تخلخل (Vukovic and Soro, 1992) در روابط اندازه ذرات بر مقدار K_g تاثیر زیادی داشته باشد. از آنجایی که برآورد دقیق تخلخل در بستر رودخانه، با توجه به شرایط موجود که ساختمان خاک را تغییر می دهد، غیر ممکن است. هدایت هیدرولیکی تخمینی حاصل از روابط مختلف اندازه ذرات در بستر رودخانه نسبت به سایر محیط های متخلخل، مثل آبخوان، عدم قطعیت بیشتری دارند.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alaoui, A., Lipiec, J., and Gerke, H. H. (2011). A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 115, 1-5.
- Alyamani, M. S., and Şen. Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution. *Groundwater*, 31 (4), 551-555.
- Azarang, F., Telvari, A., Sedghi, H., and Shafai-Bejestan, M. (2016). Evaluating of Erosion and Sedimentation of Karkheh River at Downstream of Reservoir Dam. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 10(34), 15-27. (In Farsi)
- ASTM D7928. Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis.
- ASTM D 6913. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.
- Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media, first ed. New York, American Elsevier.
- Bagarello, V., Iovino, M., and Lai. J. (2016). Testing steady-state analysis of single-ring and square pressure infiltrometer data. *Geoderma*, 261, 101-109.
- Cey, E.E., Rudolph, D. L., Parkin, G. W., and Aravena. R. (1998). Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology*, 210 (1-4), 31-37.
- Chen, X. (2000). Measurement of streambed hydraulic conductivity and its anisotropy. *Environmental Geology*, 39 (12), 1317-1324.
- Chen, X.H., 2004 Streambed hydraulic conductivity for rivers in South-Central Nebraska. *Journal of the American Resources Association*, 561-573.
- Chen, X. H., Song, J., Cheng, C., Wang, D., and Lackey, S. O. (2009). A new method for mapping variability in vertical seepage flux in streambeds. *Hydrogeology Journal*, 17(3):519-525.
- Cheng, C., Song, J., Chen, X., and Wang, D., (2011). Statistical distribution of streambed vertical hydraulic conductivity along the Platte River, Nebraska. *Water resources management*, 25 (1), 265-285.
- Cheong, J. Y., Hamm, S. Y., Kim, H. S., Ko, E. J., Yang, K., and Lee, J. H. (2008). Estimating hydraulic conductivity using grain-size analyses, aquifer tests, and numerical modeling in a riverside alluvial system in South Korea. *Hydrogeology Journal*, 16, 1129-1143.
- Chua, L. H. C., Lo, E. Y. M., Freybery, D. L., Shuy, E. B., Lim, T. T., Tan, S. K., and Ngonidzashe, M. (2007). Hydrostratigraphy and geochemistry at a coastal sandhill in Singapore. *Hydrogeology Journal*, 15 (8), 1591-1604.
- Fetter, C.W., 2001. Applied hydrogeology., 4th edn. (Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall).
- Genereux, D. P., Leahy, S., Mitasova, H., Kennedy, C. D., and Corbett, D. R. (2008). Spatial and temporal

- variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA. *Journal of Hydrology*, 358, 332–353.
- Hatch, C. E., Fisher, A. T., Ruehl, C. R., and Stemler, G. (2010). Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time series thermal methods. *Journal of Hydrology*, 389, 276–288.
- Hvorslev, M. J. (1951). Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations. US Army Bulletin 36, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Kalbus, E., Reinstorf, F., and Schirmer, M. (2006). Measuring methods for groundwater, surface water and their interactions: a review. *Hydrology Earth System and Sciences*, 10, 873–887.
- Kasnow, M. (2002). Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis. Littleton, Colorado: Water Resources Publications LLC.
- Kvam, P. H., and Vidakovic, B. (2007). Nonparametric Statistics with Applications to Science and Engineering. Jhon Wiley & Sons. Inc.
- Landon, M. K., Rus, D. L., and Harvey, F. E., (2001) Comparison of in stream methods for measuring hydraulic conductivity in sand streambeds. *Groundwater*, 39(6), 870-885.
- Lee, D. R., and Cherry, J. A. (1978). A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers. *Journal of Geological Education*. 27, 6-10.
- Lopez, O.M., Jadoon K. Z., and Missimer. T. M. (2015). Method of Relating Grain Size Distribution to Hydraulic Conductivity in Dune Sands to Assist in Assessing Managed Aquifer Recharge Projects: Wadi Khulays Dune Field, Western Saudi Arabia. *Water*, 7, 6411-6426.
- Lu, C., Chen, X., Cheng, C., Ou, G., and Shu, L., (2012). Horizontal hydraulic conductivity of shallow streambed sediments and comparison with the grain-size analysis results. *Hydrological Processes*, 26(3), 454-466.
- McKenzie, C. (2008). Measurements of Hydraulic Conductivity Using Slug Tests in Comparison to Empirical Calculations for Two Streams in the Pacific Northwest, USA. M.S. Thesis, Washington State University, Pullman, Washington.
- Moazami, M., Feiznia, S., Khayyat Kholghi, M. and Malekian, A. (2017). Evaluating of Efficiency of Empirical Formulae Based on Grain-Size and Infiltration Equations for Estimating Sediment Hydraulic Conductivity (Case Study: Jarmeh Flood Spreading System, Khuzestan Province). *journal of Range and Watershed Managment*, 70(1), 235-246. (In Farsi)
- Odong, J. (2007). Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *Journal of American Science*, 3(3), 54–60.
- Packman, A. I., Salehin, M., and Zaramella, M. (2004). Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bed form- induced advective flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, 647–656.
- Rosas, J., Lopez, O., Missimer, T. M., Coulibaly, K. M., Dehwah, A. H., Sesler, K., Lujan, L. R. and Mantilla, D. (2014). Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution for different depositional environments. *Groundwater*, 52 (3), 399-413.
- Rosenberry, D. O., (2005). Integrating seepage heterogeneity with the use of ganged seepage meters. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3(2), 131-142.
- Rosenberry, D. O. (2008). A seepage meter designed for use in flowing water. *Journal of Hydrology*, 359, 118–130.
- Sebok, E., Duque, C., Engesgaard, P. and Boegh, E., (2015). Spatial variability in streambed hydraulic conductivity of contrasting stream morphologies: channel bend and straight channel. *Hydrological Processes*, 29(3), 458-472.
- Song, J., Chen, X., Cheng, C., Wang, D., Lackey, S., and Xu, Z. (2009). Feasibility of grain-size analysis methods for determination of vertical hydraulic conductivity of streambeds. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 428-437.
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeology journal*, 10, 52–67.
- Svensson, A., (2014). Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analyses, a comparative study of different sampling and calculation methods focusing on Västlänken. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Göteborg, Sweden, Master's Thesis, 2014:1. 96 pp.
- Verbist, K. M. J., Cornelis, W. M., Torfs, S., and Gabriels, D. (2012). Comparing Methods to Determine Hydraulic Conductivities on Stony Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 77 (1), 25-42.
- Vienken, T., and Dietrich, P. (2011). Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data. *Journal of Hydrology*, 400, 58–71.
- Vukovic, M., and Soro, A. (1992). Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Wang, W., Li, J., Wang, W., Chen, X., Cheng, D. and Jia, J., 2014. Estimating streambed parameters for a disconnected river. *Hydrological processes*, 28(10), pp.3627-3641.
- Zhang, S., Grip, H., and Lövdahl, L. (2006). Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil and Tillage Research*, 90(1-2), 117-125.