

بررسی آزمایشگاهی نفوذپذیری ناهمسانگرد خاک‌های درشت دانه یکنواخت

فاطمه پیشرو^۱ - مرتضی بختیاری^{۲*} - نیما شهنی کرمزاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۳۱

چکیده:

بررسی آب عبوری از خاک یکی از مسائل بنیادی در مکانیک خاک و مهندسی محیط زیست است. هدایت هیدرولیکی اثر مهمی بر مشکلات تراوش، تحکیم و پایداری دارد که جزء مهمی از طراحی و تحلیل مهندسی خاک و سنگ را شکل می‌دهد. به منظور انجام تحقیق حاضر، اقدام به طراحی و آزمایش دستگاهی برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی افقی و قائم در نمونه ذرات درشت‌دانه یکنواخت شده است. در تحقیق حاضر چهار نمونه خاک با قطر ۰/۸۵، ۲، ۶/۳۵ و ۹/۵ میلی متر برای آزمایش انتخاب گردیده است. اثر تغییرات تخلخل و بار آبی بر میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی بررسی شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد میزان ناهمسانی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش هدایت هیدرولیکی جریان از حالت لایه‌ای خارج می‌گردد. هدایت هیدرولیکی در جهت افقی اغلب بیشتر از هدایت هیدرولیکی در جهت قائم است. میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی محدوده بین ۰/۸۵ تا ۱/۳۵ را دربر می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی، خاک درشت دانه، ناهمسانگردی، تخلخل

مقدمه

خاک‌های غیرچسبنده وجود دارد. گزارشات حاکی از آن است که ناهمسانی هدایت هیدرولیکی خاک‌های غیرچسبنده به علت فقدان روش‌های اندازه‌گیری مناسب، اندک می‌باشد (۱۱). دستگاه‌های اندکی برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی افقی وجود دارند. یک دستگاه نفوذپذیری افقی با ابعاد ۱۵×۱۵×۳۰ سانتی‌متر بوسیله چاپوس و همکاران (۹) طراحی شد که می‌توان هدایت هیدرولیکی افقی خاک‌های ماسه‌ای و سنی را با استفاده از آن اندازه‌گیری کرد. این دستگاه مجهز به غشای منعطف، صفحات متخلخل، پیژومترهای جانبی و مخازن هد ثابت می‌باشد. دستگاه‌های دیگری برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی افقی توسط سایر پژوهشگران طراحی شده است (۱۰، ۱۶، ۱۷ و ۲۱). این دستگاه‌ها شامل محدودیت‌هایی مثل تراوش جانبی، نمونه‌هایی با اندازه ذرات ریز و یا عدم اطمینان از اشباع کامل نمونه می‌باشند. همچنین اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی در دو دستگاه جداگانه شرایط اندازه‌گیری را دستخوش تغییرات می‌کند. بنابراین اندازه‌گیری ناهمسانی ممکن است به شرایط آزمایش و اندازه ذرات بستگی داشته باشد. جو و همکاران (۱۸) یک دستگاه اندازه‌گیری برای بدست آوردن ضریب هدایت هیدرولیکی خاک‌های دانه‌ای در جهات مختلف (۰-۹۰ درجه) طراحی کردند. وانگ و همکاران (۱۵) دستگاه اصلاح شده‌ای برای اندازه‌گیری ناهمسانی هدایت هیدرولیکی خاک‌های درشت‌دانه طراحی کردند.

در پروژه‌های مهندسی نوار ساحلی، بررسی مشخصات مصالح موجود به عنوان یک فاکتور اصلی ضروری است. ضریب هدایت هیدرولیکی (k) یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی در تراوش آب‌های زیرزمینی و دستیابی به سازه‌های ایمن مهندسی می‌باشد. معمولاً هدایت هیدرولیکی در راستای افقی بیشتر از هدایت هیدرولیکی در راستای قائم است (۱۲). به عبارت دیگر هدایت هیدرولیکی در نمونه‌های خاک ناهمسان می‌باشد. میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی را معمولاً با پارامتر بدون بعد I_k نشان می‌دهند که برابر نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به هدایت هیدرولیکی عمودی است. ناهمسانی هدایت هیدرولیکی اثر زیادی بر جریان آب و انتقال آن در مهندسی ژئوتکنیک دارد. برای خاک‌های چسبنده و سنگ‌ها می‌توان به آسانی نمونه‌های خاک را در جهات مختلف برش داد، بنابراین نتایج آزمایشگاهی زیادی برای میزان ناهمسانی k_H/k_V وجود دارد. نتایج آزمایشگاهی اندکی برای ناهمسانی هدایت هیدرولیکی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناس ارشد مهندسی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی و استادیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

*- نویسنده مسئول: (Email: ortezabakhtiar@yahoo.com)

اعتبار قانون داری برای برابر ۱۰ در نظر گرفته می‌شود(۶).

جدول ۱- توزیع ذرات با توجه به نتایج آزمایش الک

Table1- Grain Size Distribution by Sieve Analysis

نمونه Sample	D50(mm)	Cu	Cc
1	0.85	1.63	0.74
2	2	1.81	0.95
3	6.35	1.2	0.95
4	9	1.1	1.007

D50: قطر متوسط ذرات خاک بر حسب میلی‌متر. $Cu=D60/D10$: ضریب یکنواختی(نسبت قطری که ۶۰ درصد ذرات خاک از آن کوچکتر به قطری که ۱۰ درصد ذرات خاک از آن کوچکتر هستند). $Cc=(D30)^2/(D60 \times D10)$: ضریب خمیدگی

مواد و روش‌ها

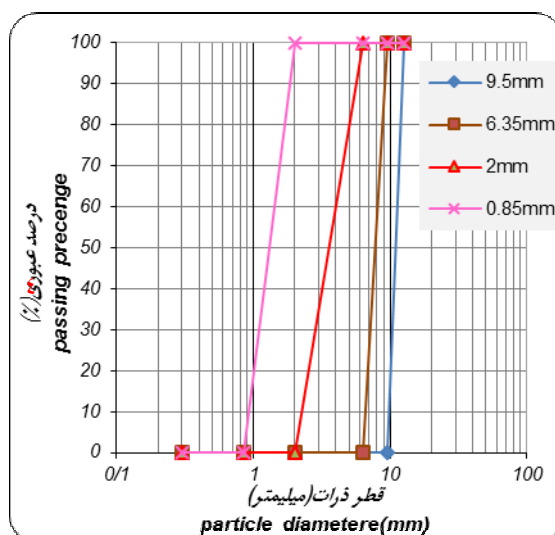
در این تحقیق، دستگاهی برای اندازه‌گیری ناهمسانی هدایت هیدرولیکی ذرات درشت دانه خاک طراحی شده است، بطوری که هم هدایت هیدرولیکی افقی و هدایت هیدرولیکی عمودی در این دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. در مطالعه حاضر، نمونه‌های خاک با استفاده از نمونه‌برداری شن و ماسه موجود در منطقه ساحلی جزیره شادمانی آبادان به دست آمده‌اند. شن و ماسه موجود در محل در این تحقیق برای شبیه سازی سواحل با قطر ذرات یکنواخت، الک شده و ۴ نمونه خاک با قطر ۰/۸۵، ۲، ۶/۳۵ و ۹/۵ میلی متر به دست آمده است. مصالح مورد آزمایش در جدول (۱)، مشخصات نمونه‌های یکنواخت و در شکل (۱) نمودار دانه‌بندی مصالح یکنواخت نشان داده شده است.

میزان ناهمسانی نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در این دستگاه‌ها تحت تاثیر عوامل مختلفی مثل اندازه ذرات، آرایش آنها، نحوه آماده‌سازی نمونه و میزان تخلخل و همچنین بار آبی هیدرولیکی بوده است. میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی رس‌های همگن، سنگها و خاک‌های دانه‌ای بسیار شبیه به هم می باشد. به نظر می رسد که میزان آن کمتر از ۴ باشد. مطالعات چاپوس و جیل(۱۰) نشان می‌دهند که میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی ماسه‌ها و شن‌ها در محدوده ۰/۷۵ تا ۴/۱ قرار دارد. نتایج آزمایش همچنین نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته نمونه خاک، میزان I_k افزایش، و با افزایش درجه تخلخل کاهش می‌یابد. جو و همکاران (۱۸) میزان حداکثر ناهمسانی هدایت هیدرولیکی برای مصالح دانه‌ای همگن را برابر ۲/۵ بدست آوردند. نتایج آزمایش‌های وانگ و همکاران (۱۵) روی مصالح درشت دانه نشان می‌دهند که میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی ۱/۲ تا ۲/۲۸ برابر ضریب هدایت هیدرولیکی قائم می‌باشد.

بر اساس تعداد زیادی از نتایج آزمایشگاهی، در مقادیر پایین اعداد رینولدز، گرادیان هیدرولیکی با سرعت تخلیه رابطه خطی دارد و قانون داری معتبر است و اصطلاحاً جریان لایه‌ای(آرام) است، درحالی که در مقادیر بالای اعداد رینولدز بار آبی هیدرولیکی رابطه غیرخطی دارد و قانون داری معتبر نیست (۶). اعداد رینولدز معمولاً بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (1)$$

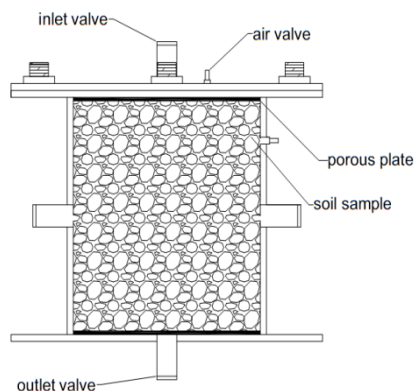
ρ و μ دانسیته و ویسکوزیته دینامیکی سیال، V سرعت تخلیه و d قطر متوسط ذرات خاک می باشد. معمولاً عدد رینولدز بحرانی برای



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ذرات یکنواخت

Figure 1- Grain size distribution curves of tested materials

متخلخل قرار داده شود که اگر در این شرایط هدایت هیدرولیکی افقی نیز انجام شود این صفحات در نتایج تأثیر خواهند گذاشت. در دو قسمت علاوه بر شیر ورودی آب، شیر هواگیری نیز تعبیه گردید.



شکل ۲- دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی
Figure 2- Hydraulic conductivity measurement instrument

آزمایش اندازه‌گیری نفوذپذیری قائم

برای اندازه‌گیری ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی به دلیل داشتن نمونه‌هایی با دانه‌بندی درشت طبق استاندارد (ASTM D2434) از روش آزمایش با بار ثابت استفاده شده است. ابتدا صفحه متخلخل را در کف دستگاه اندازه‌گیری قرار داده شده تا خاک ورودی و خروجی نفوذ آب را مسدود نکند. خاک را از ارتفاع ثابتی که ممکن است به دانسیته وابسته باشد، به درون دستگاه ریخته و صفحه متخلخل روی نمونه قرار داده می‌شود. صفحه بالای دستگاه را قرار داده و پیچ‌ها بسته می‌شود بطوری که هیچ آبی نشست نکند. وزن خاک درون دستگاه را اندازه‌گیری نموده و سیستم به آب متصل می‌شود. با باز شدن شیر آب نمونه را اشباع نموده برای اطمینان از اشباع شدن نمونه شیر هواگیری را باز کرده و با خروج آب از آن شیر هواگیری باید بسته شود. در انجام آزمایش مخزن را در ارتفاع ثابتی قرار داده، شیر پایینی بایستی به مخزن نزدیک باشد تا با جمع آوری آب خروجی در یک ظرف، حجم آب خروجی قابل اندازه‌گیری باشد. شیر خروجی پایین را باز و آب از درون نمونه خاک عبور داده می‌شود تا زمانی که نمونه کاملاً اشباع شود و هیچ حباب هوایی از لوله خروجی بیرون نیاید (جریان پایدار) و سطح آب درون مخزن ثابت بماند. هد آب فاصله بین سطح آب در قیف و خروجی پایین دستگاه را اندازه نموده و بشر خالی را وزن کرده، کرنومتر را به کار انداخته و مدت زمان خروج آب برای حجم مشخص آب (مثلاً ۸۰۰ میلی‌لیتر) اندازه‌گیری می‌شود. پس از انجام آزمایش در یک بار آبی معین، آب

مطابق USCS (۱۴) ماسه خوب دانه‌بندی شده دارای ضریب یکنواختی بزرگتر از ۴ و CC بین یک تا سه و شن خوب دانه‌بندی دارای ضریب یکنواختی بزرگتر از ۶ و CC بین یک تا سه می‌باشد. همانطور که از نمودار دانه‌بندی مشخص است نمونه‌های ۳ و ۴ یکنواخت و ذرات درشت‌دانه می‌باشند. نمونه ۳ و ۴ در طبقه‌بندی یونیفاید بصورت GP یعنی شن بد دانه‌بندی شده و نمونه‌های ۱ و ۲ در طبقه بندی SP به معنی ماسه بد دانه‌بندی شده قرار می‌گیرند. متغیرهای مورد بررسی در این آزمایش‌ها ضریب تخلخل و میزان آبگیری از نمونه‌ها می‌باشد. در جدول (۲) دامنه قرائت‌های صورت گرفته برای پارامترهای اندازه‌گیری شده ارائه شده است.

جدول ۲- دامنه قرائت‌های صورت گرفته برای پارامترهای اندازه-گیری شده در آزمایش‌های نمونه‌های یکنواخت

Table 3- The readings taken samples for testing parameters in uniform material tested

پارامتر (parameter)	حداکثر (maximum)	حداقل (minimum)
هد $\Delta H(\text{cm})$	83	21
تخلخل e	0.98	0.46
قطر $D(\text{mm})$	9.5	0.85
سرعت $V(\text{m/s})$	0.005	0.001

روش تحقیق

به منظور انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر اقدام به طراحی و ساخت دستگاهی گردید که بتواند هم هدایت هیدرولیکی افقی و هم هدایت هیدرولیکی قائم را اندازه‌گیری نماید. این دستگاه مطابق با استانداردهای لازم (ASTM D5856) برای دستگاه آزمون هدایت هیدرولیکی می‌باشد و شامل: شیرهای هواگیری، شیرهای ورودی و خروجی و هواگیری، صفحات متخلخل هم اندازه با نمونه می‌باشد. در شکل (۲) دستگاه طراحی و ساخته شده برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی نشان داده شده است.

ابعاد دستگاه اندازه‌گیری نباید کمتر از ۴-۶ برابر بزرگترین قطر موثر (d85) ذرات خاک مورد استفاده در آزمایش باشد (۱۵)، لذا در این تحقیق، بزرگترین اندازه دانه‌ها ۹/۵ میلی‌متر و ابعاد درونی دستگاه اندازه‌گیری ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و طول آن ۱۷۳ میلی‌متر تعیین گردید. به دلیل تأثیر شرایط مرزی، وانگ و همکاران (۱۵) پیشنهاد می‌کنند آزمایشات هدایت هیدرولیکی افقی و قائم به صورت مجزا انجام شود که در تحقیق حاضر این موضوع رعایت شده است، زیرا در صورت انجام آزمایش هدایت هیدرولیکی قائم، باید در بالا و پایین صفحات

آزمایش تراکم

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش تراکم، ابتدا نمونه را در کوره خشک نموده سپس نمونه برای هر دو آزمایش دانسیته ماکزیمم و مینیمم استفاده می‌شود. بعد از خشک کردن نمونه را از کوره خارج و اجازه داده می‌شود تا در دمای آزمایشگاه سرد شود. در صورت استفاده از مصالح دانه‌ای باید تراکم به صورت ریزشی انجام پذیرد و دانسیته ماکزیمم و مینیمم با استفاده از استاندارد ASTM(D4253-2000) و ASTM(D4252-2000) تعیین گردد. این روش بازسازی بهترین روش در فرایند شبیه‌سازی رسوبگذاری طبیعی خاک(ماسه های سیلتی) با حداقل انرژی(ارتفاع سقوط صفر) می‌باشد، به این ترتیب می‌توان از جداشدگی دانه‌ها تا حد امکان جلوگیری نمود. در این روش، انتهای قیف لوله‌دار در پایین قالب نمونه‌ساز قرار می‌گیرد. شن و ماسه به آرامی در امتداد محور تقارن دستگاه ریخته شده این روش شل‌ترین حالت را بدست می‌دهد. به طور کلی میزان تخلخل حداکثر (emax) برای مصالح دانه‌ای بیشتر از ۰/۹۲ می‌باشد. نمونه‌های متراکم‌تر از ریختن سریع نمونه‌های خاک درون قیف و ارتفاع بیشتر بدست می‌آیند.

مراحل انجام آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

الف) اندازه‌گیری وزن نمونه شکل (ب) با استفاده از قیف، قالب با مصالح پر می‌شود. لازم به ذکر است با حرکتی گردشی این فرآیند ادامه می‌یابد. ج) قالب در حدود ۱۳ تا ۲۵ میلی‌متر بالای لبه قالب پر می‌شود. در شکل (۳) آماده‌سازی نمونه‌ها به روش ریزشی نشان داده شده است.



شکل ۳- آماده سازی نمونه به روش ریزشی

Figure 3- make sample with falling method

د) سطح ماسه را هم‌تراز با لبه قالب تنظیم نموده و باید توجه نمود که که نمونه متراکم نشود(برای نمونه‌های شل‌تر). ه) مقدار نمونه باقیمانده را اندازه گرفته و به این ترتیب مقدار خاک ریخته شده در دستگاه بدست می‌آید (Ms). و) با داشتن ابعاد درونی دستگاه حجم آن را محاسبه نموده و طبق رابطه (۲) دانسیته خشک نمونه

را با تنظیم مخزن تغییر داده و ضریب هدایت هیدرولیکی در سایر بارها اندازه‌گیری می‌شود.

آزمایش اندازه‌گیری نفوذپذیری افقی

به منظور اندازه‌گیری نفوذپذیری افقی، ابتدا صفحات متخلخل را در دو طرف دستگاه قرار داده می‌شود و مشابه حالت قبل نمونه خاک به روش ریزشی و از ارتفاع معین به درون دستگاه ریخته می‌شود. با توجه به اینکه ممکن است در سطح بالایی خاک، نشت وجود داشته باشد لذا روی خاک یک غشای لاستیکی و صفحه‌ی فلزی قرار داده و پیچ‌ها به دقت محکم می‌شود. در مرحله بعد وزن خاک درون دستگاه اندازه‌گیری و سیستم به آب متصل می‌شود سپس شیرهای هواگیری باز شده و هوای محبوس درون محفظه خارج می‌شود. بعد از آن شیرهای هواگیری بسته و شیرهای اندازه‌گیری باز می‌شوند. در این مرحله نیز باید مطمئن گردید که شیر خروجی کناری به مخزن نزدیک است و با باز کردن شیر آب نمونه اشباع می‌شود. در واقع آنقدر باید صبر نمود تا آب خروجی زلال شود. در انجام آزمایش مخزن را در ارتفاع ثابتی قرار داده، شیر پایینی بایستی به مخزن نزدیک باشد تا با جمع آوری آب خروجی در یک ظرف، حجم آب خروجی قابل اندازه‌گیری باشد. شیر خروجی پایینی را باز و آب از درون نمونه خاک عبور داده می‌شود تا زمانی که نمونه کاملاً اشباع شود و هیچ حباب هوایی از لوله خروجی بیرون نیاید(جریان پایدار) و سطح آب درون مخزن ثابت بماند. شیر خروجی پایینی را باز و آب از درون نمونه خاک عبور داده می‌شود تا زمانی که نمونه کاملاً اشباع شود و هیچ حباب هوایی از لوله خروجی بیرون نیاید(جریان پایدار) و سطح آب درون مخزن ثابت بماند. هد آب فاصله بین سطح آب در قیف و خروجی پایینی دستگاه را اندازه نموده و بشر خالی را وزن کرده، کرنومتر را به کار انداخته و مدت زمان خروج آب برای حجم مشخص آب (مثلاً ۸۰۰ میلی لیتر) اندازه می‌شود.

الگوی انجام آزمایش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، الگوی آزمایش‌ها در حالت دانه‌بندی یکنواخت مطابق جدول (۳) تعیین گردید.

جدول ۳- الگوی کلی آزمایش‌های تحقیق در شرایط دانه‌بندی

یکنواخت

Table 2- The general pattern research experiments in uniform grain size

پارامتر parameter	قطر ذرات Diameter particle	تخلخل Void ratio	هد آب Water head
تعداد حالات آزمایش The number of test cases	4	3	3

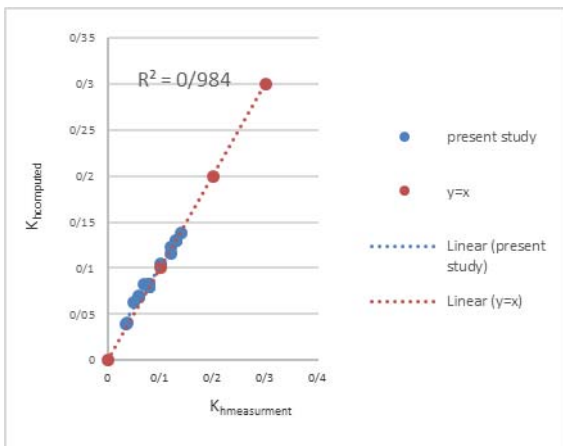
منظور صحت سنجی نتایج در قالب روابط استخراج شده، ابتدا اقدام به استخراج معادله با ۳۰ درصد داده‌ها سپس رابطه استخراج شده برای ۷۰ درصد باقیمانده داده‌ها بکار گرفته و ضریب همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با استفاده از فرمول استخراج گردید.

ضریب هدایت هیدرولیکی افقی

$$K_h = \frac{0.664 L^{-1}}{R^{0.474}} \quad R = 0.84 \quad (5)$$

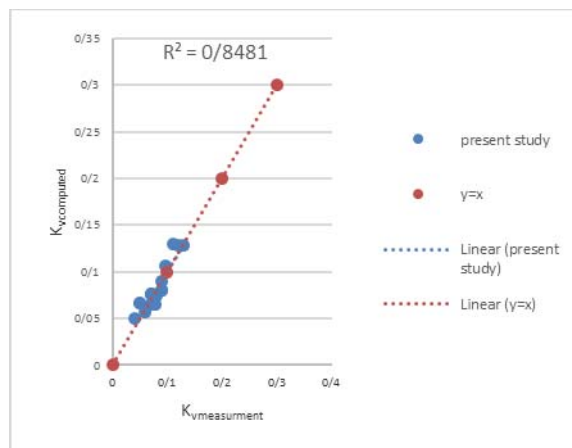
ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی

$$K_v = \frac{0.25V^{-0.046} L^{0.058}}{R^{0.558}} \quad R = 0.84 \quad (6)$$



شکل ۴- مقایسه میان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای ذرات یکنواخت

Figure 4- The comparison between calculated and measured horizontal hydraulic conductivity coefficient for uniform particle



شکل ۵ - مقایسه میان ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای ذرات یکنواخت

Figure 5- The comparison between calculated and measured vertical hydraulic conductivity coefficient for uniform particle

خاک بدست می‌آید.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (2)$$

ز) در این مرحله با استفاده از فرمول (۳) ضریب تخلخل به دست خواهد آمد. ρ_w جرم مخصوص آب، G_s چگالی ذرات جامد خاک و ρ_s دانسیته خشک نمونه خاک می باشد. دقت شود که تخلخل مینیمم در بیشترین حد دانسیته و برعکس حداکثر تخلخل در کمترین دانسیته بدست می‌آید.

$$e = \frac{\rho_w G_s}{\rho_s} - 1 \quad (3)$$

پارامترهای وابسته و آنالیز ابعادی

با توجه به پارامترهای حاکم بر این تحقیق و به منظور دستیابی به روابط حاکم بصورت عبارات بدون بعد در این تحقیق، اقدام به آنالیز ابعادی بین پارامترهای موثر در این پدیده گردید. به طور کلی پارامترهای موثر در تحقیق حاضر را می‌توان در سه دسته تقسیم‌بندی نمود: الف) پارامترهای هندسی (مصالح و اندازه کل نمونه) شامل:

قطر متوسط ذرات (d_{50})، طول نمونه (L)، سطح مقطع نمونه (A)، تخلخل نمونه (e)

ب) پارامترهای هیدرولیکی شامل:

هد آب (H)، سرعت جریان (V)

ج) پارامترهای وابسته به سیال شامل:

جرم واحد حجم سیال (ρ)، لزوجت (μ)، دما (T)

اگر سه پارامتر طول نمونه (L)، هد آب (H) و جرم واحد حجم

سیال به عنوان پارامترهای تکراری انتخاب شوند لذا بر اساس آنالیز ابعادی به روش π باکینگهام نتیجه می‌شود:

$$f(k, d_{50}, L, A, e, H, V, \rho, \mu, T) = \Omega \quad (4)$$

نتایج و بحث

میلیمتر انجام گردید. این نمونه‌ها در سه تراکم مختلف آماده‌سازی شده و هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی آنها تحت سه آبگذری متفاوت اندازه‌گیری شده است.

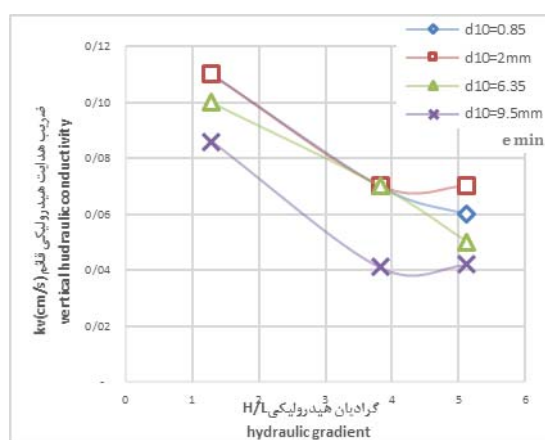
بررسی اثر بار آبی هیدرولیکی بر روی ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت

در شکل‌های (۶) تا (۹) تأثیر بار آبی هیدرولیکی بر روی هدایت هیدرولیکی افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت در شرایط حداقل و حداکثر تراکم نشان داده شده است.

نتایج حاصل از آزمایش‌های تحقیق را می‌توان در دو بخش ذرات یکنواخت و نمونه‌های غیر یکنواخت تقسیم‌بندی نمود:

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های یکنواخت

اولین بخش آزمایش‌های تحقیق حاضر، آزمایش‌های هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی بر روی نمونه‌های یکنواخت بوده که شامل مصالح درشت‌دانه با قطر متوسط ۰/۸۵، ۲، ۶/۳۵ و ۹/۵



شکل ۶- ضریب هدایت هیدرولیکی قائم براساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت با حداقل تخلخل

Figure 6- According vertical hydraulic conductivity to hydraulic gradient for uniform samples with minimal porosity

هیدرولیکی قائم روبه رو می‌شود. بنابراین نتایج آزمایش با افزایش بار آبی در حال ثابت شدن هستند. وانگ و همکاران (۱۵) با استفاده از سیال خروجی و سرعت جریان، بار آبی بحرانی را تخمین زدند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش بار آبی هیدرولیکی سرعت سیال خروجی افزایش می‌یابد و در مقادیر بالای بار آبی ذرات ریزتر خاک با شدت همراه با سیال خروجی از دستگاه خارج می‌شوند. آنها بار آبی بحرانی را حدوداً برابر ۰/۲ بدست آوردند.

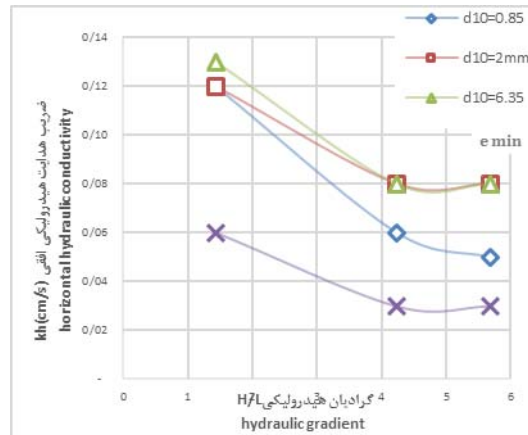
همانگونه که در اشکال (۶) و (۷) مشاهده می‌شود رفتار مشاهده شده در هر دو حالت هدایت هیدرولیکی قائم و افقی در شرایط تخلخل حداکثر مشابه شرایط رخ داده برای تخلخل حداقل می‌باشد. در این حالت ابتدا با افزایش بار آبی هیدرولیکی تا حدود مشابه قبل ضرایب هدایت هیدرولیکی کاهش و بعد مقدار ثابتی داشته است.

بررسی اثر تخلخل روی ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی نمونه‌های یکنواخت

به منظور بررسی تأثیر تخلخل نمونه بر ضریب هدایت

همانطور که در شکل (۶) مشخص است، در شرایط ضریب تخلخل حداقل با افزایش بار آبی هیدرولیکی تا حدود ($H/L=4$) ضریب هدایت هیدرولیکی قائم کاهش یافته و پس از آن، روند تغییرات تقریباً ثابت می‌ماند. وقتی بار آبی هیدرولیکی افزایش می‌یابد سرعت سیال خروجی نیز زیاد می‌شود که با افزایش بیش از حد آن جریان از حالت آرام خارج می‌شود و در این حالت ممکن است ذرات ریزتر همراه با سیال خارج شوند. به عنوان مثال برای نمونه یکنواخت با متوسط ذرات ۲ میلی‌متر با سه برابر شدن بار آبی هیدرولیکی میزان هدایت هیدرولیکی قائم ۳۶ درصد کاهش یافته و با چهار برابر کردن بار آبی هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی ثابت باقی می‌ماند. برای نمونه ۹/۵ میلی‌متری نیز با سه برابر کردن بار آبی هیدرولیکی ضریب هدایت هیدرولیکی قائم ۵۲ درصد کاهش یافته و بعد از آن ثابت باقی می‌ماند. نمونه ۰/۸۵ میلی‌متری با سه برابر شدن گرادیان به اندازه ۲۲ درصد و با چهار برابر کردن گرادیان ۱۴ درصد با کاهش میزان هدایت هیدرولیکی همراه است. نمونه ۶/۳۵ میلی‌متری با سه برابر شدن بار آبی ۳۰ درصد و با چهار برابر شدن آن ۲۸ درصد با کاهش هدایت

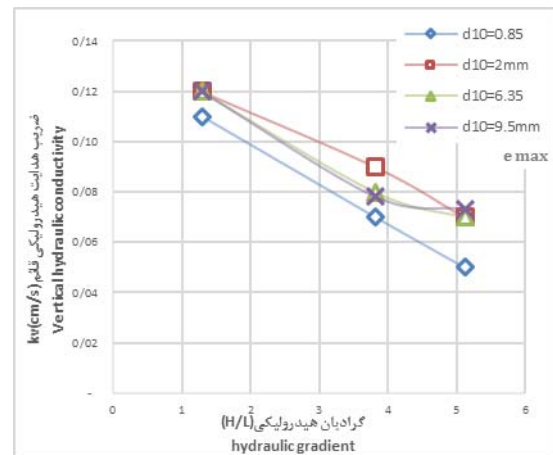
هیدرولیکی، اقدام به ترسیم ضریب هدایت هیدرولیکی قائم و افقی به صورت همزمان در مقابل تخلخل گردید. اشکال (۱۰) تا (۱۳) به



شکل ۷- ضریب هدایت هیدرولیکی افقی براساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه های یکنواخت با حداقل تخلخل

Figure 7- According Horizontal hydraulic conductivity to hydraulic gradient for uniform samples with minimal porosity

همچنین بررسی ها نشان می دهد با کاهش تخلخل تفاوت بین ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی افزایش یافته است. بررسی های چاپوس و همکاران (۹) نیز نشان می دهد که در شرایط تراکم مختلف با افزایش ضریب تخلخل هدایت هیدرولیکی در جهت قائم و افقی افزایش یافته که به علت افزایش فضای خالی بین ذرات خاک و قابلیت آسان تر عبور سیال بین فضای خالی می باشد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که ضریب هدایت هیدرولیکی افقی در شرایط تراکم استاتیکی بیشتر از ضریب هدایت هیدرولیکی قائم می باشد. شکل (۱۱) نمودار ضریب هدایت هیدرولیکی براساس تخلخل برای نمونه یکنواخت ۲ میلی متر را نشان می دهد. رفتار حاصل شده در این حالت نیز مشابه نمونه ۰/۸۵ میلی متر می باشد. بررسی ها نشان می دهد در شرایط حداکثر تخلخل ($e=0.97$) میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی ۰/۳۵ درصد افزایش یافته است و در شرایط حداقل تخلخل ($e=0.67$) میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی یک درصد بیشتر از ضریب هدایت هیدرولیکی قائم بدست آمده است. شکل (۱۲) نمودار ضریب هدایت هیدرولیکی براساس تخلخل برای نمونه یکنواخت ۶/۳۵ میلی متر را نشان می دهد. بررسی ها نشان می دهد میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی در حداکثر تخلخل ($e=0.66$) نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی ۱۴/۲۸ درصد افزایش می یابد. در تخلخل ($e=0.61$) میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی ۸/۳۴ درصد کمتر از ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی بدست آمده است. همچنین در حداقل تخلخل ($e=0.53$) میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی ۲۳ درصد بیشتر از ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی بدست آمده است. شکل (۱۳) نمودار ضریب هدایت هیدرولیکی براساس تخلخل برای

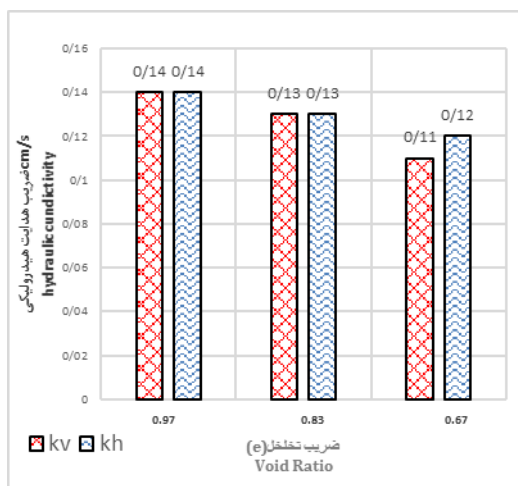


شکل ۸- ضریب هدایت هیدرولیکی قائم براساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه های یکنواخت با حداکثر تخلخل

Figure 8- According vertical hydraulic conductivity to hydraulic gradient for uniform samples with maximum porosity

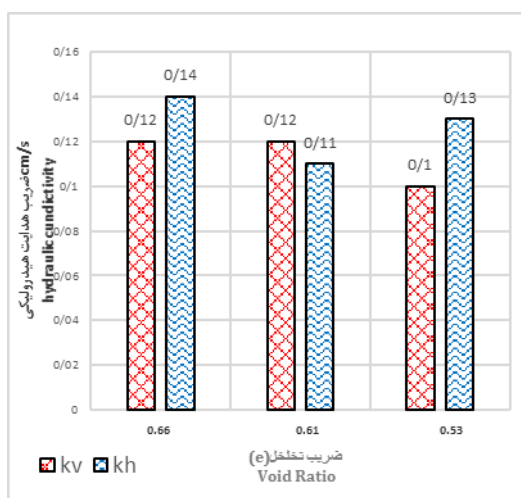
همانطور که از شکل (۱۰) مشخص است، میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی برای نمونه با قطر متوسط ۰/۸۵ از ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی بیشتر است و در تخلخل ماکزیمم ($e=0.98$)، ضریب هدایت هیدرولیکی افقی حدود ۹/۱ درصد بیشتر از ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی می باشد. همچنین در حداقل تخلخل ($e=0.46$)، ضریب هدایت هیدرولیکی افقی حدود ۳۳/۳۴ درصد بیشتر از ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی بدست آمده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد با افزایش ضریب تخلخل هر دو ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی افزایش یافته است

است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در یک روند تقریباً کلی با افزایش ضریب تخلخل میزان ضریب هدایت هیدرولیکی برای هر نمونه در دو راستای افقی و عمودی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت با قطر ۲ میلی‌متر

Figure 11- Horizontal and vertical hydraulic conductivity coefficient for the uniform sample with 2 diameter



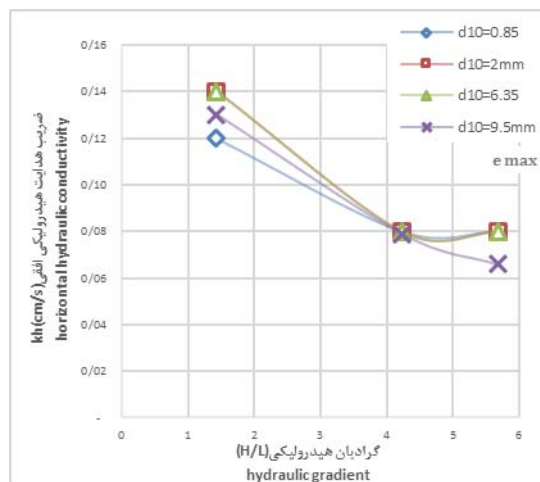
شکل ۱۲- تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت با قطر ۶/۳۵ میلی‌متر

Figure 12- Horizontal and vertical hydraulic conductivity coefficient for the uniform sample with 6.35 diameter

بررسی اثر تخلخل بر روی ضریب ناهمسانی هدایت هیدرولیکی نمونه‌های یکنواخت

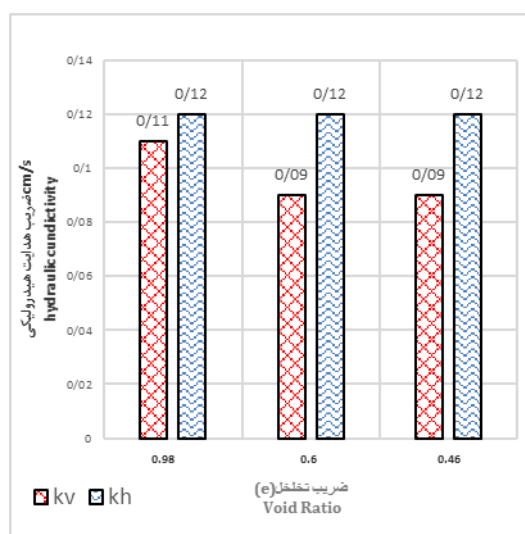
ضریب ناهمسانی هدایت هیدرولیکی به صورت نسبت ضریب هدایت هیدرولیکی افقی به ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی تعریف می‌شود. شکل (۱۴) میزان ضریب ناهمسانی هدایت هیدرولیکی در

نمونه یکنواخت ۹/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۹- ضریب هدایت هیدرولیکی افقی براساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت با حداکثر تخلخل

Figure 9- According horizontal hydraulic conductivity to hydraulic gradient for uniform samples with maximum porosity



شکل ۱۰- تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت با قطر ۰/۸۵ میلی‌متر

Figure 10- Horizontal and vertical hydraulic conductivity coefficient for the uniform sample with 0.85 diameter

میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی در حداکثر تخلخل ($e = 0.63$) نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی ۷/۶ درصد افزایش و در تخلخل ($e = 0.56$) میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی سه درصد بیشتر از ضریب هدایت هیدرولیکی قائم و در شرایط حداقل تخلخل ($e = 0.51$) میزان ضریب هدایت هیدرولیکی افقی ۲۵ درصد کمتر از میزان ضریب هدایت هیدرولیکی قائم بدست آمده

مقابل تخلخل برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است.

بررسی‌ها نتایج نشان می‌دهد با افزایش تخلخل میزان ضریب ناهمسانی هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت کاهش می‌یابد و این ضریب برای نمونه‌های یکنواخت در محدوده ۰/۸۹ تا ۱/۳۵ قرار دارد. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی رس‌های همگن، سنگها و خاکهای دانه‌ای بسیار شبیه به هم می‌باشد و میزان آن کمتر از ۴ می‌باشد. مطالعات چاپوس و جیل (۱۰) نشان می‌دهند که میزان ناهمسانی ماسه‌ها و شن‌ها در محدوده ۰/۷۵ تا ۴/۱ قرار دارد، ۹۵٪ میزان I_k در محدوده ۰/۵ تا ۲/۱ گزارش شده است. نتایج آزمایش همچنین نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته، میزان I_k افزایش، و با افزایش درجه تخلخل کاهش می‌یابد.

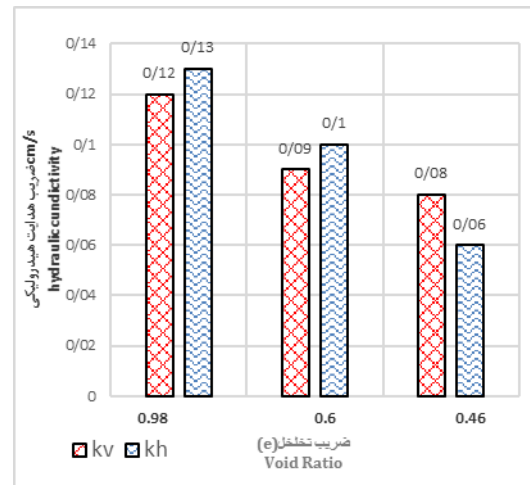
نتیجه‌گیری کلی

می‌توان نتایج نهایی را به صورت موارد زیر خلاصه نمود:

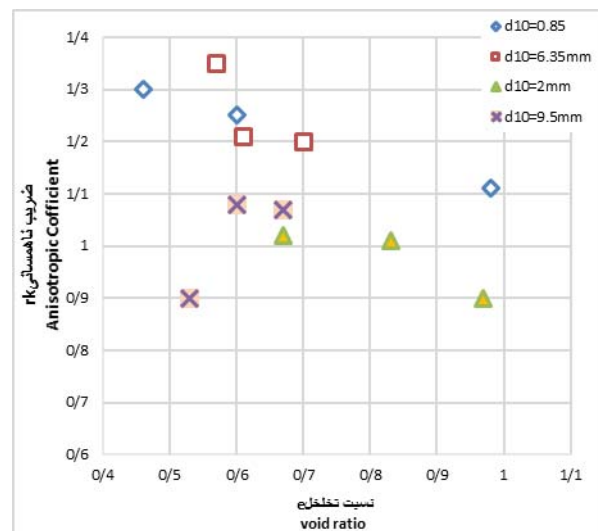
- (۱) هدایت هیدرولیکی در جهت افقی اغلب بیشتر از هدایت هیدرولیکی در جهت قائم است.
- (۲) میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت مقادیر نزدیک به یک دارد و در این تحقیق محدوده بین ۰/۸۵ تا ۱/۳۵ را در بر می‌گیرد، همچنین میزان ناهمسانی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد.
- (۳) هدایت هیدرولیکی بالاتر اغلب در تخلخل‌های بالاتر برای نمونه‌های یکنواخت اتفاق می‌افتد.
- (۴) با افزایش ضریب یکنواختی میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت ایجاد شرایط انجام تحقیق حاضر، سپاسگزاری می‌نمایند.



شکل ۱۳- تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت با قطر ۹/۵ میلی‌متر
Figure 13- Horizontal and vertical hydraulic conductivity coefficient for the uniform sample with 9.5 diameter



شکل ۱۴- میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی در مقابل تخلخل نمونه‌های یکنواخت

Figure 14- Anisotropy of hydraulic conductivity to porosity for uniform particle

منابع

1. ASTM. 2011a. Standard D2434 – Permeability of granular soils (Constant Head). ASTM annual CDs of standards, 04. 08, West Conshohocken, PA.
2. ASTM. 2006a. ASTM D4253-00: Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM int., West Conshohocken, PA. doi:10. 1520/D4253-00R06.
3. ASTM. 2006b. ASTM D4254-00: Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM int., West Conshohocken, PA. doi:10. 1520/D4254-00.

4. ASTM D5856-15: Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter.
5. Ahmad N, and D.K. Sunada. 1969. Nonlinear flow in porous media. ASCE Journal of the Hydraulics Division, vol.95, HY6, Nov., 1847-1857.
6. Bear J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: Dover Publications.
7. Bagarello V., Sferlazza S., and A. Sgroi. 2009. Testing laboratory methods to determine the anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a sandy-loam soil. Geoderma 154(1):52-58. Doi:10.106/j.geoderma. 2009.09.012
8. Esmaili M, Ghalindarzadeh A., and A. Choobbasti .2012. Behavior of sand-gravel composite with two different preparation method under seismic liquefaction condition. Technical journal of Engineering and Applied Sciences. ISSN 2051-0853 .
9. Chapuis P . Denis G and K. Bass. 1989 .Laboratory Permeability Test on Sand: Influence of the Compaction Method on Anisotropy. Canadian Geotechnical Journal . Vol .26 ,1989.
10. Chapuis R.P ., and D.E. Gill. 1989. Hydraulic anisotropy of homogeneous soils and rocks: Influence of the densification process. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 39:75-86. Doi:10.1007/BF02592538.
11. Chapuis R.P . D.E Gill and K. Baass. 1989. Laboratory permeability tests on sand: Influence of the compaction method on anisotropy. Canadian Geotechnical Journal. 26:614-622. Doi:10.1139/t89-074.
12. Freeze R.A and J.A. Cherry. 1979. Groundwater: Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
13. Felton G.K and N.M. Herrera. 1995. Design procedure for rock fill dams. Applied Engineering in Agriculture, Applied Engr. In Agri. Vol.11, no.5,p.653-657.
14. Holtz R. D., Kovacks W. D., and T. C Sheahan., 2011. An introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 853 p.
15. Jun-Jie Wang and Zhen-Feng Qiu .2015. Anisotropic hydraulic conductivity and critical hydraulic gradient of a crushed sandstone-mudstone particle mixture, Marine Georesources & Geotechnology, DOI: 10.1080/1064119X.2015.1103825
16. Moore, P. J.1979. Determination of Permeability Anisotropy in a Two-Way Permeameter. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 2, No. 3, Sept. 1979, pp. 167-169.
17. PARE J .J., ARES R ., CABOT L ., and GARZON M. 1982. Large scale permeability and filter tests at LG3. Proceedings, 14th Large Dams, Rio de Janeiro, vol. Q.55, R.7, Congress on pp. 103-122.
18. Guo P., Liu Y and Stolle D.2015. Limit of Anisotropic Hydraulic Conductivity Ratio of Homogeneous Granular Materials. soil science society of America 5585 Guilford Rd., Madison, WI 53711 USA.
19. Stephenson D. 1979. ROCKFILL IN HYDRAULIC ENGINEERING. Elsevier Scientific, Amsterdam, 215 pp.
20. Tejas G. Murthy, Monica Prezzi.2010. Rodrigo Salgado, and Dimitrios Loukidis, "Influence Of Densification Method On Some Aspects Of Undrained Silty Sand Behavior. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Paper 29.
21. Witt K. J., Brauns, J.1983. Permeability-Anisotropy Due To Particle Shape. Journal of geotechnical Engineering .109(9) : 1181-1187

Experimental Investigation Anisotropy Permeability of Uniform Coarse Grain Soils

F. Pishro¹ - M. Bakhtiari² - N. Shahnikaramzadeh³

Received:26-02-2017

Accepted:22-08-2017

Introduction: Investigation of water passing through soil is one of the most important problems in soil mechanics and environmental engineering. It is an important parameter for predicting the movement of water and contaminants dissolved in the water through the soil and measured on soil samples in the lab and sometimes tests carried out in the field. Soil permeability generally depends on two factors, the first one is soil Specifications contains an empty space of soil, surface roughness of solid particles, saturation, and another one is characteristics of the fluid (water) that passes through soil. Already few efforts have been made to recognize the characteristics of anisotropy in the geotechnical designs therefore this study has been done. Physical and mechanical properties of soils and sedimentary rocks are generally heterogeneous and hydraulic conductivity (k) is not an exception. The anisotropy of hydraulic conductivity of soils has a great influence on the fluid flow and the transmission of contamination. Knowing the hydraulic conductivity in cases such as flow through dams and dikes, internal erosion in soil masses, settling of consolidated clay levels, optimal design of water and oil wells, and the design of drainage systems for roads, airports and agricultural land. Generally, the hydraulic conductivity is more in the horizontal direction than the hydraulic conductivity in the vertical direction, and the hydraulic conductivity anisotropy is shown with a non-dimensional parameter r_k which is equal to the ratio of the horizontal hydraulic conductivity to the vertical hydraulic conductivity. According to Chapuis et al. (1989), on more than 100 measurements of hydraulic conductivity along with the results of the experiments of Chapuis et al. (1990), Rice et al. (1970) and Leroueil et al. (1990), the anisotropy of the hydraulic conductivity of clays, sands and sedimentary rocks are almost like each other. The degree of anisotropy may depend on the shape of the particles, their arrangement, or the orientation of the free space among the particles of the soil, which appears to be less than 4. Due to the impossibility of preparing intact samples from grain materials, as well as the lack of suitable measuring instruments for grain samples, there are few valid results for non-sticky materials. As Chapuis et al. (1989) and Sferlazza et al. (2009) in accordance with most of the experimental results, the anisotropy of hydraulic conductivity increases with density, and also the degree of anisotropy decreases with increasing porosity ratio.

Materials and Methods: In order to conduct the present research, measurement device was designed and built. This device is a cube with 150 mm \times 150 mm \times 173 mm dimensions. The components of the device are: bleeding valves, inlet and outlet valves, porous plates and the size of the sample respectively. In this study, four uniform soil samples were selected for test. Samples are prepared in falling manner, with three porosity and under three different hydraulic gradient were tested. In Table 1 The general pattern of research experiments is presented. In this study, 36 tests were performed.

Table 1-Pattern of research experiments

Water head	Void ratio	Diameter particle	Parameter
۳	۳	۴	The number of test cases

1, 2 and 3- Graduated of Costal & Port and Marine Science Structure and Assistant Professors of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology

(*Corresponding Author Email:mortezabakhtiari@yahoo.com)

To measure vertical permeability, due to large grains samples, according to ASTM D-2434 standard fixed-load test method has been used. First, the porous plate is placed on the bottom of the measuring device to prevent the soil from entering and exiting the water penetration then The soil is inserted from the fixed height into the device and the porous plate is placed on the sample. Then place should be located at the top of the device and close the screws so there should be no water leak. Then the weight of the soil should be measured and connect the system to the water. Then the outlet tap should be opened and water should be passed through the soil sample until the sample would be completely saturated and no air bubbles come out of the outlet pipe and fix water level. Then the water head and weigh the empty container and the duration of the outflow of water for a given water volume should be measured. After performing the test at a specified head, the elevation of water should be changed by reservoir adjustment and the permeability coefficient would be measured in other loads.

Results and Discussion:

The effect of hydraulic loads on horizontal and vertical hydraulic conductivity coefficients for uniform samples

Horizontal and vertical hydraulic conductivity tests were performed on uniform samples including coarse aggregate materials with a diameter of 0.85, 2, 6.35, and 5.9 mm. In Figures (1) to (3), the effect of hydraulic load on horizontal and vertical hydraulic conductivity for uniform samples in minimum and maximum conditions is shown.

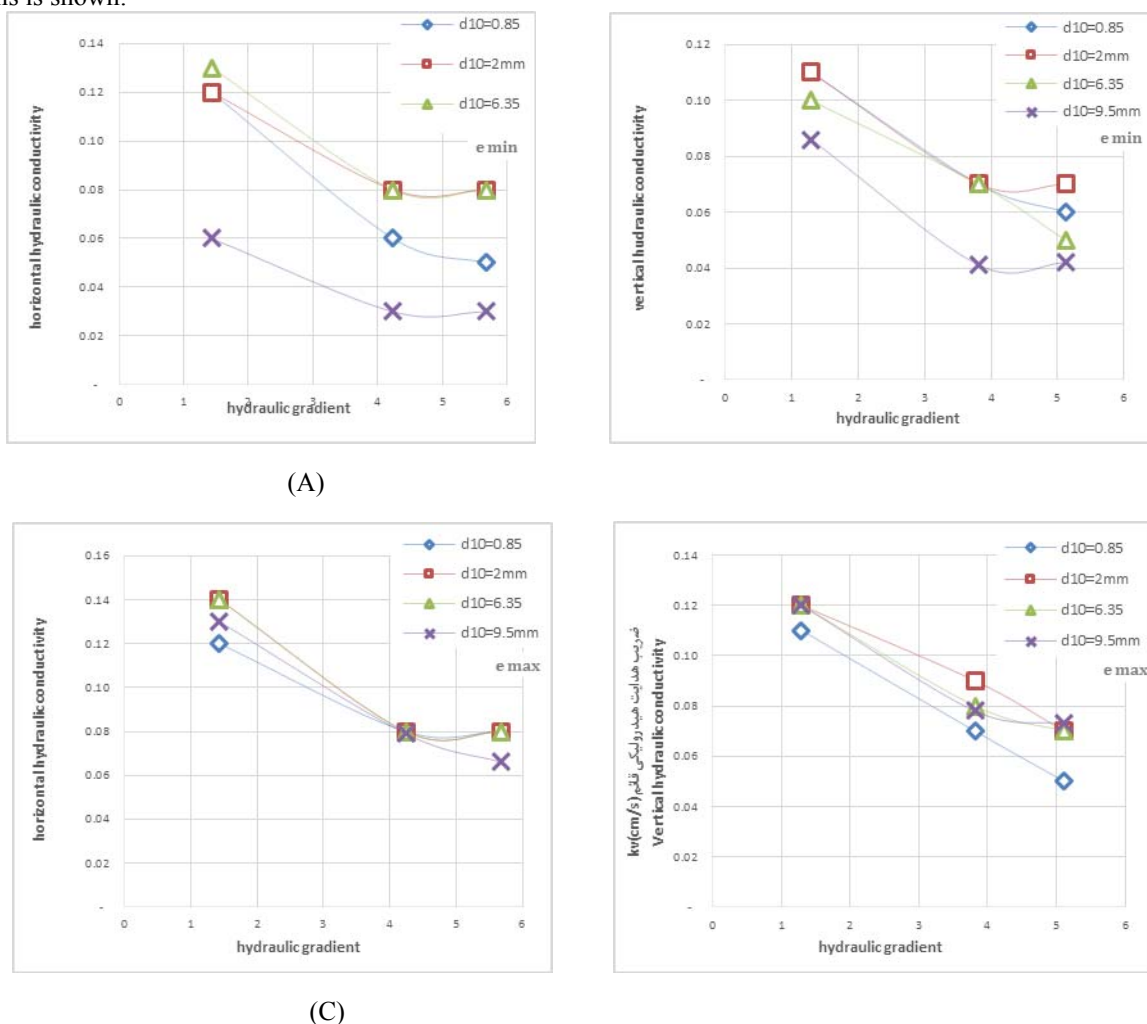


Figure1- According hydraulic conductivity to hydraulic gradient for uniform samples with A) vertical hydraulic conductivity, minimal porosity B) Horizontal hydraulic conductivity, minimal porosity C) vertical hydraulic conductivity, maximum porosity D) horizontal hydraulic, maximum porosity

Investigations showed that in all cases, with increasing hydraulic load, the horizontal and vertical hydraulic conductivity decreased and then the process of change was almost constant.

Investigation of the effect of porosity on horizontal and vertical hydraulic conductivity of uniform samples

The results showed that the horizontal hydraulic conductivity coefficient for all samples was higher than the vertical hydraulic conductivity coefficient.

Also, the results showed that the minimum hydraulic conductivity ($e = 0.46$) and maximum porosity ($e = 0.97$) were about 34.33 and 0.35 percent higher than the hydraulic hydraulic conductivity, respectively.

Investigation of the effect of porosity on the anisotropy coefficient of hydraulic conductivity of uniform samples: The results showed that with increasing porosity, the coefficient of heterogeneity of hydraulic conductivity for uniform samples was reduced and this coefficient was for uniform samples in the range of 0.89 to 1.35.

Conclusions: The final results can be summarized as follow:

1. The permeability in the horizontal direction is often greater than the permeability in the vertical direction.
2. The anisotropy permeability for uniform sample is between 0.85-1.35.
3. The anisotropy permeability decreases with increasing porosity.
4. In the uniform samples, maximum permeability occurs at higher hydraulic conductivity.
5. With increasing the uniformity coefficient, the amount of hydraulic conductivity decreases.

Key words: permeability, Coarse Grain Soils, Anisotropy, porosity