

بررسی آزمایشگاهی تأثیر دانه بندی، فاکتور شکل و تراکم بر نفوذپذیری ناهمسانگرد خاک‌های

درشت دانه

فاطمه پیشرو^۱، مرتضی بختیاری^۲، نیما شهنی کرم زاده^۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۵

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۲-استادیار، گروه مهندسی سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mortezabakhtiari@yahoo.com

چکیده

نفوذپذیری یکی از مهمترین مشخصات فیزیکی خاک است که در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است. نفوذپذیری خاک به چند عامل کلی بستگی دارد، که شامل مشخصات خاک مانند فضای خالی، زبری سطح ذرات جامد، درجه اشباع و مشخصات سیالی (آب) است که از آن عبور می‌کند. به منظور انجام تحقیق حاضر، اقدام به طراحی و ساخت دستگاهی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری افقی و قائم در نمونه ذرات درشت‌دانه شده است. در تحقیق حاضر چهار نمونه خاک یکنواخت و سه نمونه غیریکنواخت در شرایط تراکم‌های مختلف و بارهای آبی متفاوت برای آزمایش انتخاب گردیده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که نفوذپذیری در جهت افقی اغلب بیشتر از نفوذپذیری در جهت قائم است و برای نمونه‌های غیر یکنواخت در مقایسه با نمونه‌های یکنواخت این تفاوت بیشتر مشاهده می‌شود. میزان ناهمسانی نفوذپذیری برای نمونه‌های یکنواخت بین ۰/۸۵ تا ۱/۳۵ و برای نمونه‌های غیریکنواخت در محدوده ۱/۳۲ تا ۳/۵ قرار دارد همچنین با افزایش ضریب یکنواختی میزان ناهمسانی نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تحقیق آزمایشگاهی، دانه بندی، ذرات درشت‌دانه، ناهمسانگردی، نفوذپذیری

Experimental Investigation of Grading, Shape Factor and Compaction Effects Permeability of Coarse Grain Solis on Anisotropic

F Pishro¹, M Bakhtiari^{2*}, N Shehni Karamzadeh²

Received November 26, 2018 Accepted: July 5, 2020

¹ M.Sc. Grad., Department of Marine Structures Engineering, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

² Assist. Prof., Department of Marine Structures Engineering, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

*Corresponding Author, Email: mortezabakhtiari@yahoo.com

Abstract

The permeability is one of the most important physical properties of a soil that has been used in geotechnical engineering. Soil permeability generally depends on several factors, such as soli properties containing the porosity, surface roughness of solid particles, Saturation and fluid (water) properties which passes through the soil. In order to do the research a testing device is designed for measuring horizontal and vertical permeability of the coarse particles. In this study, four uniform soil samples and three non-uniform samples with different compactions are selected and tested under various water heads. The results show the permeability in the horizontal direction is often greater than the permeability in the vertical direction and this difference in non-uniform sample is greater than that in uniform samples. The permeability anisotropy ratio for uniform samples is between 0.85-1.35 and for non-uniform samples is between 1.32-3.5. Also, with increasing the uniformity coefficient the rate of anisotropy permeable decreases.

Keywords: Anisotropy, Coarse soil samples, Experimental research, Grading, Permeability

مقدمه

هدایت هیدرولیکی قائم است. مطابق با بررسی‌های چاپیوس و گیل (۱۹۸۹) بر روی بیش از ۱۰۰ اندازه-گیری میزان هدایت هیدرولیکی به همراه نتایج آزمایش چاپیوس و همکاران (۱۹۸۹)، رایس و همکاران (۱۹۷۰) و لرویل و همکاران (۱۹۹۰) ناهمسانی هدایت هیدرولیکی رسها، ماسه‌ها و سنگ‌های رسوبی تقریباً شبیه همدیگر است. میزان ناهمسانی می‌تواند وابسته به شکل ذرات، آرایش آنها و یا جهت‌گیری فضای خالی بین ذرات خاک باشد که به نظر می‌رسد میزان آن کمتر از ۴ می‌باشد. به دلیل عدم امکان تهیه نمونه‌های دست‌نخورده از مصالح دانه‌ای و همچنین فقدان دستگاه‌های اندازه‌گیری مناسب نمونه‌های دانه‌ای، نتایج معتبر اندکی برای مصالح غیرچسبنده وجود دارد. مطالعات چاپیوس و همکاران (۱۹۸۹) و اسفرلازا و همکاران (۲۰۰۹) بر روی

مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها و سنگ‌های رسوبی بطورکلی ناهمسان می‌باشند. هدایت هیدرولیکی (k) از این قاعده مستثنی نیست. ناهمسانی هدایت هیدرولیکی خاک‌ها تأثیر زیادی بر روی جریان سیال و انتقال آلودگی دارد. دانستن هدایت هیدرولیکی در مواردی چون جریان عبوری از زیر سدها و دایک‌ها، فرسایش درونی در توده‌های خاک، میزان نشست رسهای تحکیم شده، طراحی بهینه چاه‌های آب و نفت و همچنین طراحی سیستم‌های زهکشی برای جاده‌ها، فرودگاه‌ها و زمین‌های کشاورزی کاربرد دارد. به طور کلی هدایت هیدرولیکی در راستای افقی بیشتر از هدایت هیدرولیکی در راستای قائم است و میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی را با پارامتر بدون بعد α_k نشان می‌دهند که برابر نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به

می‌دهند که میزان ضریب نفوذپذیری افقی ۱/۲ تا ۲/۲۸ برابر ضریب نفوذپذیری قائم می‌باشد. شرایط آزمایشگاهی باید مشابه شرایط واقعی محل شبیه‌سازی شود. از طرفی تهیه نمونه‌های دست‌نخورده و آماده‌سازی نمونه‌های خاک مشابه شرایط محل اغلب دشوار است و همچنین گرادیان هیدرولیکی استفاده شده در آزمایشگاه برای سرعت بخشیدن به روند آزمایش‌ها زیاد در نظر گرفته می‌شود. معمولا گرادیان هیدرولیکی ۱ تا ۵ شرایط محل را بهتر پوشش می‌دهد.

آگویار و همکاران (۲۰۱۸)، در تحقیق آزمایشگاهی به مطالعه نفوذپذیری ناهمسانگرد خاک‌های رسی اشباع پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد نفوذپذیری افقی خاک‌های اشباع حدود ۸ برابر نفوذپذیری عمودی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد هر زمان نمونه‌ها با میزان بهینه آب متراکم می‌شوند هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

گرنز و همکاران (۲۰۱۹)، در تحقیقی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به مطالعه نفوذپذیری ناهمسانگرد خاک‌ها پرداختند. نتیجه تحقیق ایشان یافتن ارتباط منطقی میان پارامتر ضریب نفوذپذیری و مقاومت الکتریکی بوده است.

در تحقیق حاضر، دستگاهی برای اندازه‌گیری ناهمسانی نفوذپذیری ذرات درشت دانه خاک طراحی شده است، بطوری که هم نفوذپذیری افقی و نفوذپذیری عمودی در این دستگاه اندازه‌گیری می‌شود و همچنین اثر گرادیان هیدرولیکی و تفاوت تراکم نمونه‌های خاک بر میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی بررسی شده است.

نتایج آزمایشگاهی، نشان می‌دهد که میزان ناهمسانی هدایت هیدرولیکی با چگالی افزایش می‌یابد و همچنین میزان ناهمسانی با افزایش نسبت تخلخل کاهش می‌یابد. اخیرا شبیه‌سازی جریان عبوری از مصالح برای پیش-بینی نحوه انتقال در مصالح ناهمسان استفاده می‌شود. روش LBM 'معمولا برای مدل کردن جریان عبوری از مصالح دانه‌ای استفاده می‌شود. دستگاه‌های دیگری نیز برای اندازه‌گیری آزمایشگاهی ناهمسانی نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای و چسبنده طراحی شده‌اند. مور و همکاران (۱۹۷۹) یک دستگاه دوطرفه برای اندازه‌گیری ناهمسانی نفوذپذیری خاک‌های چسبنده طراحی کرد. گوه و همکاران (۲۰۱۵) یک دستگاه اندازه‌گیری برای بدست آوردن ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای در جهات مختلف (۰-۹۰ درجه) طراحی کردند. جون جی و همکاران (۲۰۱۵) دستگاه اصلاح شده‌ای برای اندازه‌گیری ناهمسانی نفوذپذیری خاک‌های درشت‌دانه طراحی کردند. میزان ناهمسانی نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در این دستگاه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مثل اندازه ذرات، آرایش آنها، نحوه آماده‌سازی نمونه و میزان تخلخل و همچنین گرادیان هیدرولیکی بوده است. میزان ناهمسانی نفوذپذیری رس‌های همگن، سنگ‌ها و خاک‌های دانه‌ای بسیار شبیه به هم می‌باشد. به نظر می‌رسد که میزان آن کمتر از ۴ باشد. مطالعات چاپیوس و گیل (۱۹۸۹) نشان می‌دهند که میزان ناهمسانی ماسه‌ها و شن‌ها در محدوده‌ی ۰/۷۵ تا ۴/۱ قرار دارد، ۹۵٪ میزان ضریب ناهمسانگردی در محدوده ۱/۶ تا ۲/۷ گزارش شده است. نتایج آزمایش همچنین نشان می‌دهد که با افزایش چگالی، میزان این ضریب افزایش، و با افزایش درجه تخلخل کاهش می‌یابد. گوه و همکاران (۲۰۱۵) میزان بیشینه ناهمسانی نفوذپذیری برای مصالح دانه‌ای همگن را برابر ۲/۵ بدست آوردند. نتایج آزمایش‌های جون جی و همکاران (۲۰۱۵) روی مصالح درشت‌دانه نشان

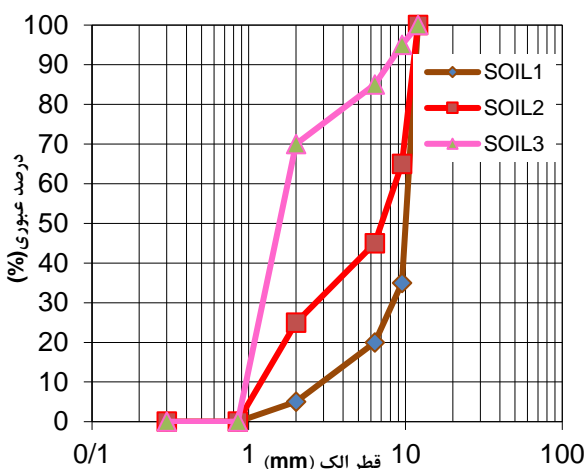
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر بر روی چهار نمونه با دانه بندی یکنواخت و سه نمونه غیریکنواخت انجام پذیرفت. در جدول ۱، ویژگی‌های نمونه‌های یکنواخت و در شکل ۱ گراف دانه‌بندی مصالح یکنواخت نشان داده شده است. پارامتر C_c نشان‌دهنده ضریب خمیدگی یا ضریب دانه بندی، C_u ضریب یکنواختی و D_{50} نشان دهنده قطری از الک است که ۵۰ درصد ذرات خاک از آن عبور کرده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای C_c ، C_u و D_{50} با توجه به نتایج آزمایش الک.

| نمونه | D_{50} | C_u | C_c |
|-------|----------|-------|-------|
| ۱ | ۰/۸۵ | ۱/۶۳ | ۰/۷۴ |
| ۲ | ۲ | ۱/۸۱ | ۰/۹۵ |
| ۳ | ۶/۳۵ | ۱/۲ | ۰/۹۵ |
| ۴ | ۹ | ۱/۱۰ | ۱/۰۰۷ |

و C_c بین یک تا سه می‌باشد. همان‌طور که از نمودار دانه‌بندی مشخص است نمونه‌های ۳ و ۴ یکنواخت و ذرات درشت دانه می‌باشند. نمونه ۳ و ۴ در طبقه‌بندی یونیفاید بصورت GP یا شن بد دانه‌بندی شده و نمونه‌های ۱ و ۲ در طبقه‌بندی SP یا ماسه بد دانه‌بندی شده، قرار می‌گیرند. در جدول ۲، مشخصات نمونه‌های یکنواخت و در شکل ۲ گراف دانه‌بندی مصالح غیریکنواخت نشان داده شده است.

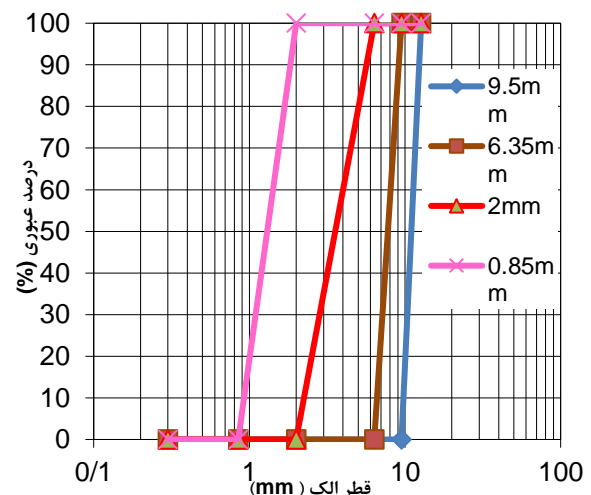


شکل ۲- نمودار دانه‌بندی نمونه‌های آزمایش.

جدول ۲- پارامترهای C_c ، C_u و D_{50} با توجه به نتایج آزمایش الک.

| نمونه | D_{10} | D_{60} | D_{30} | C_u | C_c |
|-------|----------|----------|----------|-------|-------|
| ۱ خاک | ۲/۸۵ | ۱۲ | ۹ | ۴/۲ | ۲/۳۶ |
| ۲ خاک | ۱/۱۶ | ۸/۸ | ۲/۷۵ | ۷/۵۸ | ۰/۷۴ |
| ۳ خاک | ۰/۹۲ | ۱/۸۵ | ۱/۲۸ | ۲ | ۰/۹۶ |

همان‌طور که از نمودار دانه‌بندی مشخص است، نمونه‌ها دارای دانه بندی منفصل می‌باشند و طبق طبقه‌بندی یونیفاید از نوع شن و ماسه بد دانه‌بندی شده می‌باشند.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ذرات یکنواخت.

مطابق طبقه‌بندی یونیفاید و مطالعات هولتز و همکاران (۲۰۱۱) ماسه خوب دانه‌بندی شده دارای C_u (ضریب یکنواختی) بزرگتر از ۴ و C_c (ضریب انحنا) بین یک تا سه و شن خوب دانه‌بندی دارای C_u بزرگتر از ۶

روش تحقیق

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

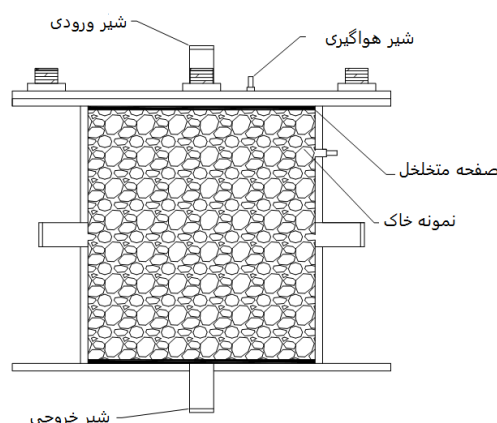
الگوی انجام آزمایش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، الگوی آزمایش‌ها در دو حالت دانه‌بندی یکنواخت و غیر یکنواخت تنظیم گردید به این صورت که در شرایط دانه‌بندی یکنواخت چهار قطر ذرات، سه تخلخل و سه بار آبی و برای شرایط غیر یکنواخت سه قطر ذرات، سه تخلخل و سه بار آبی آزمایش گردید.

آزمایش تراکم

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش تراکم، ابتدا نمونه را در کوره خشک نموده سپس نمونه برای هر دو آزمایش دانسیته بیشینه و کمینه 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 چگالی بیشینه و کمینه با استفاده از استاندارد^۲ تعیین گردد. این روش بازسازی بهترین روش در فرایند شبیه‌سازی رسوب‌گذاری طبیعی خاک(ماسه‌های سیلتی) با کمترین انرژی(ارتفاع سقوط صفر) می‌باشد، به این ترتیب می‌توان از جداسدگی 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 بیشینه تخلخل برای مصالح دانه‌ای بیشتر از ۰/۹۲ می‌باشد. نمونه‌های متراکم تراز ریختن سریع نمونه‌های خاک درون قیف و ارتفاع بیشتر بدست

به منظور انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر اقدام به طراحی و ساخت دستگاهی گردید که بتواند هم نفوذپذیری افقی و هم نفوذپذیری قائم را اندازه‌گیری نماید. این دستگاه مطابق با استانداردهای لازم^۲ برای دستگاه تست نفوذپذیری می‌باشد و شامل: شیرهای هواگیری، شیرهای ورودی و خروجی و هواگیری، صفحات متخلخل هم اندازه با نمونه می‌باشد. در شکل ۳ دستگاه طراحی و ساخته شده برای اندازه‌گیری نفوذپذیری افقی و عمودی نشان داده شده است.



شکل ۳- دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری.

مطابق با بررسی‌های وانگ و همکاران (۲۰۱۵)، ابعاد دستگاه اندازه‌گیری نباید کمتر از ۴-۶ برابر بزرگترین قطر موثر (D_{85}) ذرات خاک مورد استفاده در آزمایش باشد، 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 پیشنهاد می‌شود آزمایش‌های نفوذپذیری افقی و قائم به صورت مجزا انجام شود که در تحقیق حاضر این موضوع رعایت شده است زیرا در صورت انجام آزمایش نفوذپذیری قائم، باید در بالا و پایین صفحه‌ها متخلخل قرار داده

^۲ ASTM(D4253-2000) & ASTM(D4252-2000)

^۱ ASTM D5856

در این مرحله با استفاده از فرمول ۲ ضریب تخلخل (e) بدست خواهد آمد. دقت شود که تخلخل کمینه در بیشترین حد چگالی و برعکس تخلخل بیشینه در کمترین چگالی بدست می‌آید. در فرمول زیر ρ_w چگالی سیال و G_s چگالی جامد دانه‌های خاک می باشد.

$$e = \frac{\rho_w G_s}{\rho_d} - 1 \quad [2]$$

نتایج و بحث

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

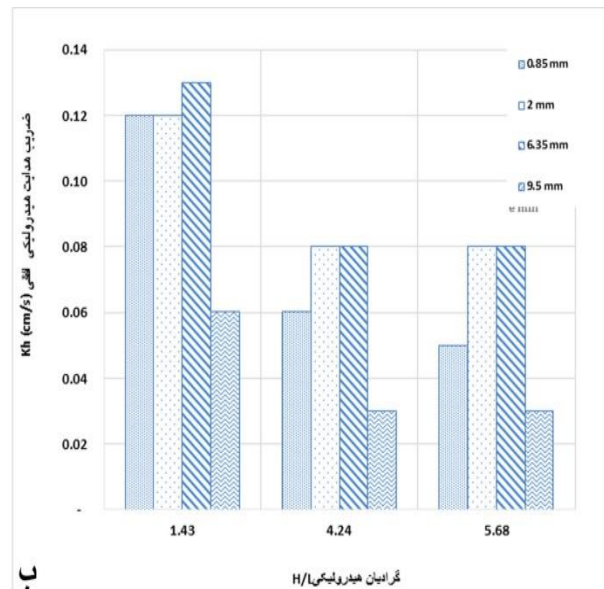
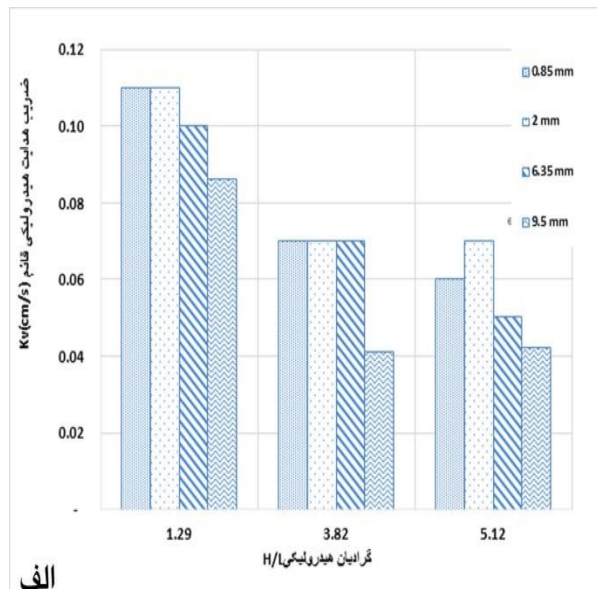
بررسی اثر گرادیان هیدرولیکی بر روی ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌های یکنواخت

در شکل های ۴ تا ۷ تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر روی نفوذپذیری افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت در شرایط کمترین و بیشترین تراکم نشان داده شده است.

می‌آیند. مراحل انجام آزمایش به شرح مقابل 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 میلی‌متر تا ۲۵ میلی‌متر بالای لبه قالب پر می‌شود.

سطح ماسه را هم‌تراز با لبه قالب تنظیم نموده، و باید توجه نمود که که نمونه متراکم نشود (برای نمونه‌های شل‌تر). مقدار نمونه باقیمانده را اندازه گرفته و به این ترتیب مقدار خاک ریخته شده در دستگاه بدست می‌آید (Ms). با داشتن ابعاد درونی دستگاه حجم (V) آن را محاسبه نموده و طبق رابطه ۱ چگالی خشک نمونه خاک (ρ_d) بدست می‌آید.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad [1]$$



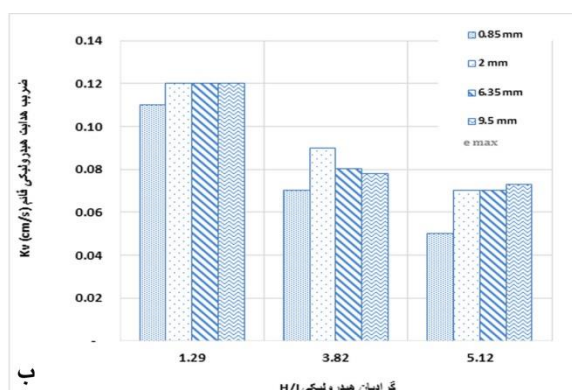
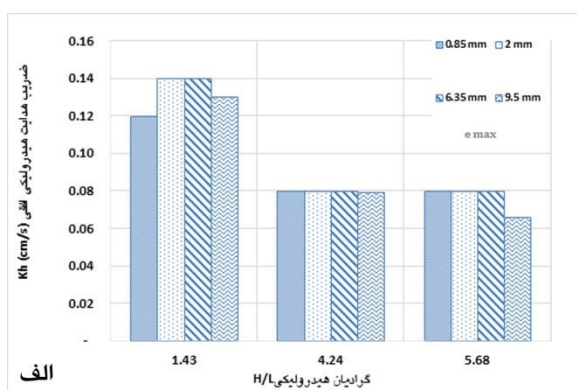
شکل ۴- الف) ضریب نفوذپذیری قائم بر اساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت: ب) ضریب نفوذپذیری افقی بر اساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت.

حدود ($H/L=4$) ضریب نفوذپذیری قائم کاهش یافته و پس از آن روند تغییرات تقریباً ثابت می‌ماند، زیرا پس

همانطور که در شکل ۶ الف مشخص است، در شرایط ضریب تخلخل کمینه با افزایش گرادیان هیدرولیکی تا

روبه رو می‌شود. بنابراین نتایج آزمایش با افزایش گرادیان در حال ثابت شدن هستند. رفتار رخ داده برای نفوذپذیری افقی نیز مشابه ضریب نفوذپذیری قائم می‌باشد. مطابق شکل ۴ ب در شرایط ضریب تخلخل کمینه با افزایش گرادیان هیدرولیکی تا حدود $(H/L=4/2)$ ضریب نفوذپذیری افقی کاهش یافته و پس از آن روند تغییرات تقریباً ثابت می‌ماند. نمونه‌های ۰/۸۵ و ۹/۵ میلی‌متری با سه برابر شدن گرادیان هیدرولیکی با کاهش ۵۰ درصدی ضریب نفوذپذیری همراه هستند و بعد از آن با افزایش گرادیان ثابت باقی می‌مانند. نمونه‌های ۲ و ۶/۳۵ میلی‌متری با سه برابر شدن گرادیان به ترتیب ۳۳ و ۳۸ درصد با کاهش نفوذپذیری همراه هستند و بعد از آن نفوذپذیری تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

از آن جریان از حالت آرام خارج شده بدست آوردن هدایت هیدرولیکی از این روش امکان‌پذیر نخواهد بود. به عنوان مثال برای نمونه یکنواخت با متوسط ذرات ۲ میلی‌متر با سه برابر شدن گرادیان هیدرولیکی میزان نفوذپذیری قائم ۳۶ درصد کاهش یافته و با چهار برابر کردن گرادیان هیدرولیکی نفوذپذیری ثابت باقی می‌ماند. برای نمونه ۹/۵ میلی‌متری نیز با سه برابر کردن گرادیان هیدرولیکی ضریب نفوذپذیری 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 نفوذپذیری همراه است. نمونه ۶/۳۵ میلی‌متری با سه برابر شدن گرادیان ۳۰ درصد و با چهار برابر شدن آن ۲۸ درصد با کاهش نفوذپذیری قائم

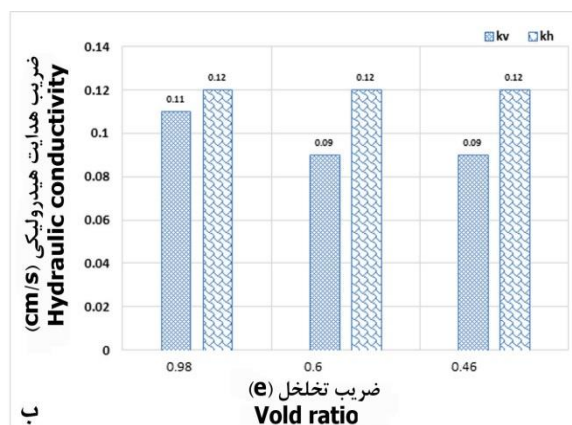
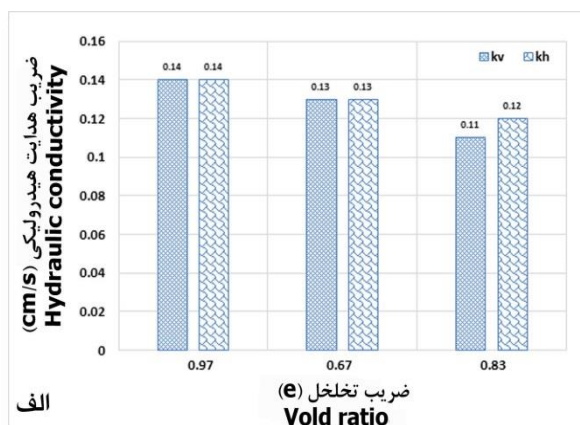


شکل ۵- الف) ضریب نفوذپذیری افقی براساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت با بیشترین تخلخل: ب) ضریب نفوذپذیری قائم براساس گرادیان هیدرولیکی برای نمونه‌های یکنواخت با بیشترین تخلخل.

بررسی اثر تخلخل روی ضریب نفوذپذیری نمونه‌های یکنواخت

به منظور بررسی تأثیر تخلخل نمونه بر ضریب نفوذپذیری، اقدام به ترسیم ضریب نفوذپذیری قائم و افقی به صورت همزمان در مقابل تخلخل گردید. اشکال ۶ و ۷ به نمودارهای یاد شده پرداخته است.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود رفتار مشاهده شده در هر دو حالت نفوذپذیری افقی و قائم در شرایط تخلخل بیشینه مشابه شرایط رخ داده برای تخلخل کمینه می‌باشد. در این حالت ابتدا با افزایش گرادیان هیدرولیکی تا حدود مشابه قبل ضرایب نفوذپذیری کاهش و بعد مقدار ثابتی داشته است.

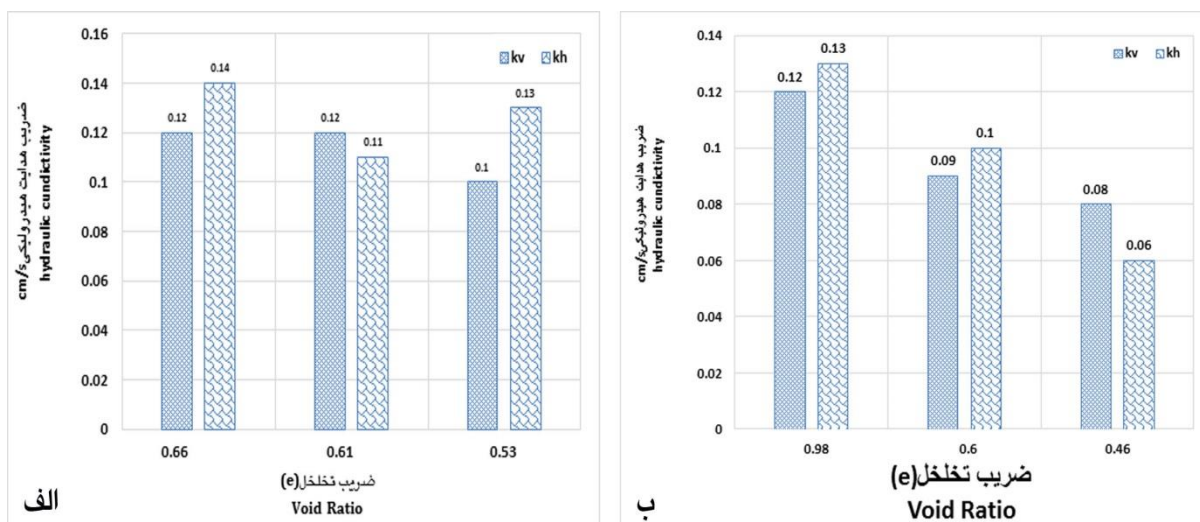


شکل ۶- الف) تغییرات ضریب نفوذپذیری افقی و قائم برای نمونه یکنواخت با قطر ۰/۸۵ میلی‌متر: ب) تغییرات ضریب نفوذپذیری افقی و قائم برای نمونه یکنواخت با قطر ۲ میلی‌متر.

بیشینه تخلخل ۰/۹۷ میزان ضریب نفوذپذیری افقی نسبت به ضریب نفوذپذیری عمودی ۰/۳۵ درصد افزایش یافته است و در شرایط کمترین تخلخل ۰/۶۷ میزان ضریب نفوذپذیری افقی یک درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری قائم بدست آمده است. شکل ۷الف نمودار ضریب نفوذپذیری براساس تخلخل برای نمونه یکنواخت ۶/۳۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان ضریب نفوذپذیری افقی در بیشینه تخلخل ۰/۶۶ نسبت به ضریب نفوذپذیری عمودی افزایش ۱۴/۲۸ درصد

می‌یابد. در تخلخل ۰/۶۱ میزان ضریب نفوذپذیری افقی ۸/۳۴ درصد کمتر از ضریب نفوذپذیری عمودی بدست آمده است. همچنین در کمترین تخلخل ۰/۵۳ میزان ضریب نفوذپذیری افقی ۲۳ درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری عمودی بدست آمده است.

همان‌طور که از شکل ۶الف مشخص است، میزان ضریب نفوذپذیری افقی برای نمونه با قطر متوسط ۰/۸۵ از ضریب نفوذپذیری عمودی بیشتر است و در تخلخل بیشینه ۰/۹۸، ضریب نفوذپذیری افقی حدود ۹/۱ درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری عمودی می‌باشد. همچنین در کمترین تخلخل ۰/۴۶، ضریب نفوذپذیری افقی حدود ۳۳/۳۴ درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری عمودی بدست آمده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش ضریب تخلخل هر دو ضریب نفوذپذیری افقی و عمودی افزایش یافته است همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد با کاهش تخلخل تفاوت بین ضریب نفوذپذیری افقی و عمودی افزایش یافته است. شکل ۶ب نمودار ضریب نفوذپذیری براساس تخلخل برای نمونه یکنواخت ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. رفتار حاصل شده در این حالت نیز مشابه نمونه ۰/۸۵ میلی‌متر می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط

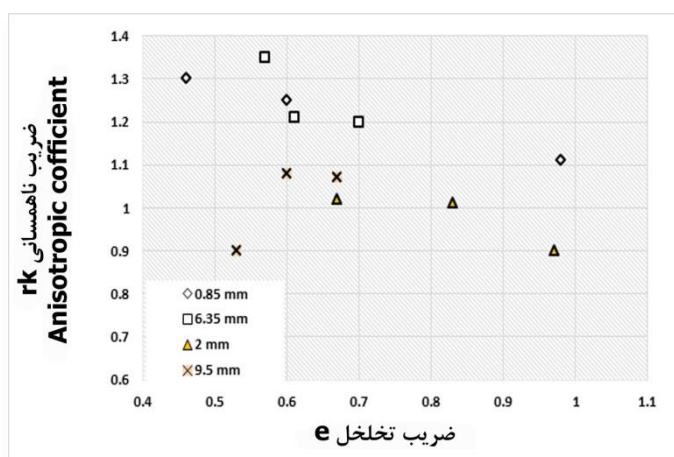


شکل ۷- الف) تغییرات ضریب نفوذپذیری افقی و قائم برای نمونه یکنواخت با قطر ۶/۳۵ میلی‌متر: ب) تغییرات ضریب نفوذپذیری افقی و قائم برای نمونه یکنواخت با قطر ۹ میلی‌متر.

بررسی اثر تخلخل بر روی ضریب ناهمسانی نفوذپذیری نمونه‌های یکنواخت

ضریب ناهمسانی نفوذپذیری به صورت نسبت ضریب نفوذپذیری افقی به ضریب نفوذپذیری عمودی تعریف می‌شود. شکل ۸ میزان ضریب ناهمسانی نفوذپذیری در مقابل تخلخل برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است.

شکل ۷ ب نمودار ضریب نفوذپذیری براساس تخلخل برای نمونه یکنواخت ۹/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. میزان ضریب نفوذپذیری افقی در بیشینه تخلخل ۰/۶۳ نسبت به ضریب نفوذپذیری عمودی ۷/۶ درصد افزایش و در تخلخل ۰/۵۶ میزان ضریب نفوذپذیری افقی سه درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری قائم و در شرایط کمینه تخلخل ۰/۵۱ میزان ضریب نفوذپذیری افقی ۲۵ درصد کمتر از میزان ضریب نفوذپذیری قائم بدست آمده است.



شکل ۸- میزان ناهمسانی نفوذپذیری در مقابل تخلخل نمونه‌های یکنواخت.

کاهش می‌یابد و این ضریب برای نمونه‌های یکنواخت در محدوده ۰/۸۹ تا ۱/۳۵ قرار دارد. بررسی مطالعات

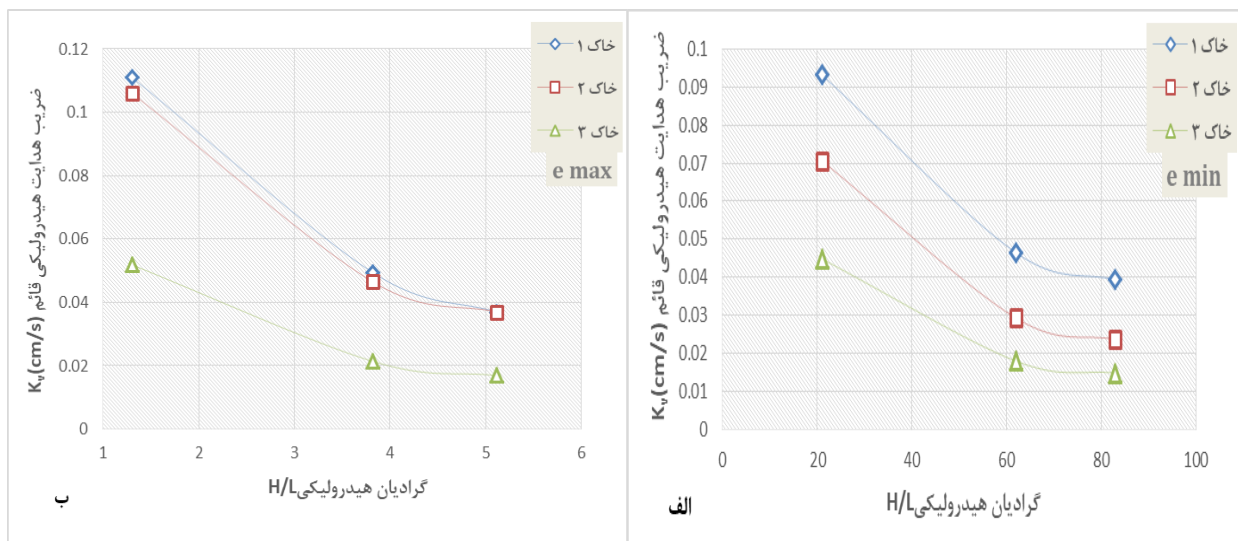
بررسی نتایج نشان می‌دهد با افزایش تخلخل میزان ضریب ناهمسانی نفوذپذیری برای نمونه‌های یکنواخت

چگالی، میزان ضریب ناهمسانگردی افزایش، و با افزایش درجه تخلخل کاهش می‌یابد.

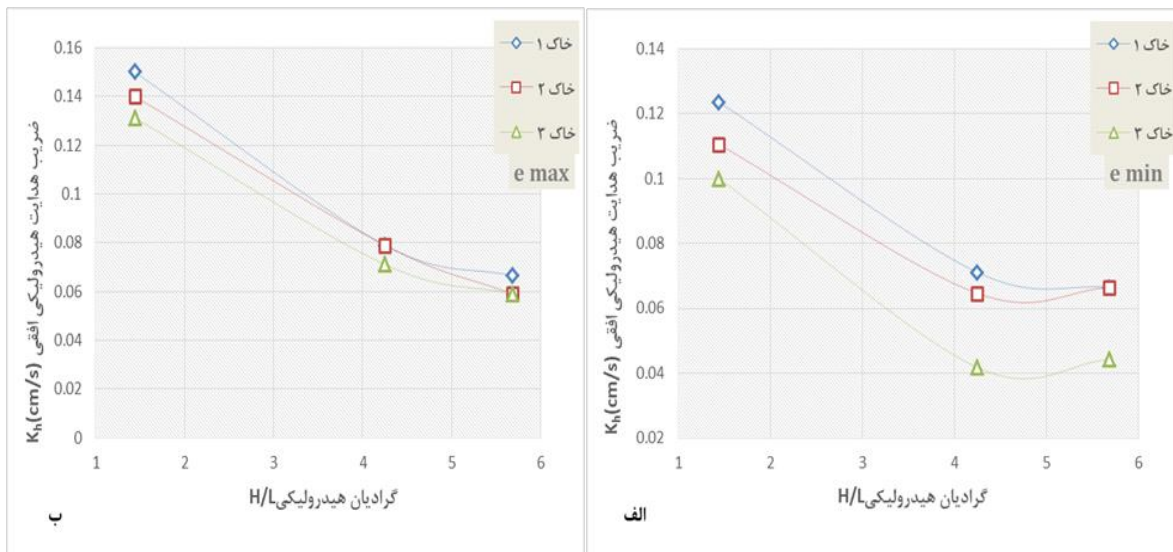
بررسی اثر گرادیان هیدرولیکی روی ضریب نفوذپذیری نمونه‌های غیریکنواخت

در شکل های ۹ و ۱۰ تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر روی نفوذپذیری افقی و قائم برای نمونه‌های یکنواخت در شرایط کمینه و بیشینه تراکم نشان داده شده است.

پیشین نشان می‌دهد میزان ناهمسانی نفوذپذیری رس-های همگن، سنگ‌ها و خاک‌های دانه‌ای بسیار شبیه به هم می‌باشد و میزان آن کمتر از ۴ می‌باشد. مطالعات چاپیوس و جیل (۱۹۸۹) نشان می‌دهند که میزان ناهمسانی ماسه‌ها و شن‌ها در محدوده‌ی ۰/۷۵ تا ۴/۱ قرار دارد، ۹۵٪ میزان ضریب ناهمسانگردی در محدوده ۱/۶ تا ۲/۷ گزارش شده است. نتایج آزمایش همچنین نشان می‌دهد که با افزایش



شکل ۹- الف) ضریب نفوذپذیری قائم نمونه‌های غیریکنواخت بر اساس گرادیان هیدرولیکی در شرایط کمینه تخلخل. ب) ضریب نفوذپذیری قائم نمونه‌های غیریکنواخت بر اساس گرادیان هیدرولیکی در شرایط بیشینه تخلخل.

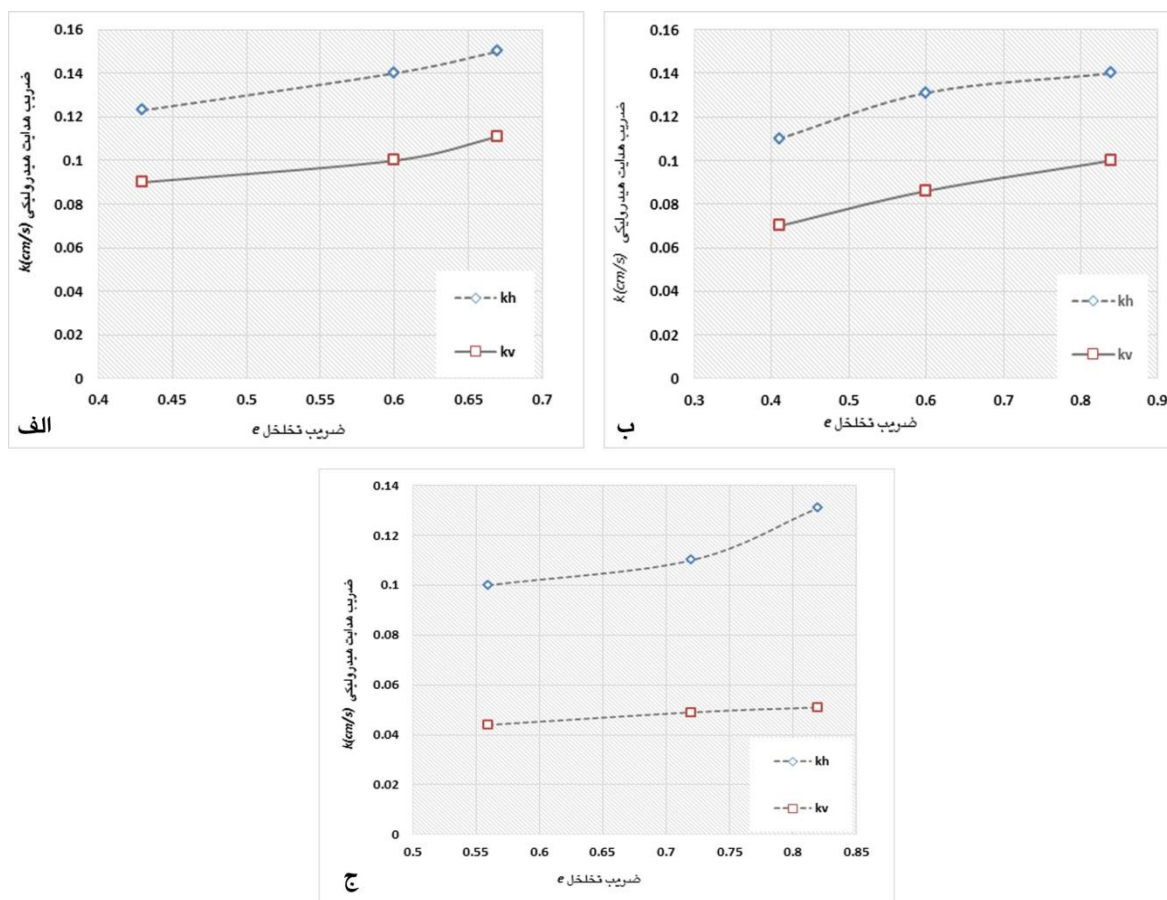


شکل ۱۰- الف) ضریب نفوذپذیری افقی نمونه های غیر یکنواخت بر اساس گرادیان هیدرولیکی در شرایط کمینه تخلخل. ب) ضریب نفوذپذیری افقی نمونه های غیر یکنواخت بر اساس گرادیان هیدرولیکی در شرایط بیشینه تخلخل.

بررسی اثر تخلخل بر روی ضریب نفوذپذیری نمونه های غیر یکنواخت

به منظور بررسی تأثیر تخلخل نمونه بر ضریب نفوذپذیری، اقدام به ترسیم ضریب نفوذپذیری قائم و افقی به صورت همزمان در مقابل تخلخل گردید. شکل ۱۱ به نمودارهای یاد شده پرداخته است.

نتایج بدست آمده نشان می دهد برای کلیه حالات مورد بررسی روند نتایج مشابه یکدیگر می باشد. بدین صورت که برای نفوذپذیری قائم برای هر دو حالت کمینه و بیشینه تخلخل در گرادیان هیدرولیکی حدود ۳/۸ و برای نفوذپذیری قائم برای هر دو حالت کمترین و بیشترین تخلخل تا گرادیان هیدرولیکی حدود ۴/۱ با افزایش گرادیان هیدرولیکی ضریب نفوذپذیری کاهش می یابد و پس از این مقادیر با افزایش گرادیان هیدرولیکی ضریب نفوذپذیری تقریباً ثابت می گردد.



شکل ۱۱- الف) ضریب نفوذپذیری قائم و افقی در مقابل تخلخل برای نمونه خاک ۱؛ ب) ضریب نفوذپذیری قائم و افقی در مقابل تخلخل برای نمونه خاک ۲؛ ج) ضریب نفوذپذیری قائم و افقی در مقابل تخلخل برای نمونه خاک ۳.

عمودی بدست آمده است همچنین میزان ناهمسانی نفوذپذیری برای نمونه خاک ۲ بین $1/32$ تا $2/81$ می-باشد. روند نتایج بدست آمده در این حالت نیز مشابه دو حالت قبل می‌باشد بدین ترتیب که در کلیه حالات مورد بررسی با افزایش تخلخل ضرایب نفوذپذیری در هر دو حالت افقی و قائم افزایش یافته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، میزان ضریب نفوذپذیری افقی در بیشینه تخلخل $0/82$ نسبت به ضریب نفوذپذیری عمودی $61/5$ درصد افزایش و در شرایط کمینه تخلخل $0/56$ میزان ضریب نفوذپذیری افقی 60 درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری قائم بدست آمده است. همچنین میزان ناهمسانی نفوذپذیری برای نمونه خاک ۳ بین $2/23$ تا $3/5$ می‌باشد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد، میزان ضریب نفوذپذیری افقی در بیشینه تخلخل $0/67$ نسبت به ضریب نفوذپذیری عمودی $26/67$ درصد افزایش می‌یابد و در شرایط کمینه تخلخل $0/43$ میزان ضریب نفوذپذیری افقی $22/5$ درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری عمودی بدست آمده است همچنین لازم به ذکر است میزان ناهمسانی نفوذپذیری برای نمونه خاک ۱ بین $1/32$ تا $1/8$ می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در کلیه حالات مورد بررسی با افزایش تخلخل ضرایب نفوذپذیری در هر دو حالت افقی و قائم افزایش یافته است. میزان ضریب نفوذپذیری افقی در بیشینه تخلخل $0/84$ نسبت به ضریب نفوذپذیری عمودی $28/57$ درصد افزایش و در شرایط کمینه تخلخل $0/41$ میزان ضریب نفوذپذیری افقی $36/36$ درصد بیشتر از ضریب نفوذپذیری

نتیجه‌گیری کلی

می‌توان نتایج نهایی را به صورت زیر خلاصه نمود:

نفوذپذیری در جهت افقی اغلب بیشتر از نفوذپذیری در جهت قائم است. و برای نمونه‌های غیریکنواخت در مقایسه با نمونه‌های یکنواخت این تفاوت بیشتر مشاهده می‌شود. با افزایش گرادیان هیدرولیکی، سرعت جریان عبوری از نمونه‌ها افزایش یافته و در بیشترین حد خود به $0/005$ متر بر ثانیه نیز می‌رسد، در چنین حالتی عدد رینولدز افزایش یافته و قانون داریسی نامعتبر و جریان در این حالت می‌تواند آشفته باشد و در آزمایش حاضر نتایج ثابت باقی می‌ماند. میزان ناهمسانی نفوذپذیری برای نمونه‌های یکنواخت مقادیر نزدیک به یک دارد و در این تحقیق محدوده بین $0/85$ تا $1/35$ را در بر می‌گیرد، همچنین میزان ناهمسانی با افزایش تخلخل کاهش

می‌یابد. میزان ناهمسانی نفوذپذیری بدست آمده در محدوده $1/32$ تا $3/5$ قرار دارد، به عبارت دیگر تفاوت نفوذپذیری افقی و عمودی برای نمونه‌های غیریکنواخت بیشتر از نمونه‌های یکنواخت است و همچنین برای نمونه‌ی ریزتر (نمونه خاک ۳) میزان ناهمسانی بیشتر است. با افزایش ضریب یکنواختی میزان ناهمسانی نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های غیریکنواخت با افزایش درصد ذرات ریز (ذراتی با قطر کوچکتر از $4/75$ میلی‌متر) میزان ناهمسانی نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

سپاسگزاری

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

منابع مورد استفاده

- Aguiar dos Santos R, Esquivel E, 2018 Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 10(5):986-991. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.04.005.
- Anonymous, 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.
- Anonymous, 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.
- Anonymous, 2011a. Standard D2434 – Permeability of granular soils (Constant Head). ASTM annual CDs of standards, 04. 08, West Conshohocken, PA.
- Anonymous, 2011b. ASTM D5856-15. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter. West Conshohocken, PA.
- Bagarello V, Sferlazza S and Sgroi A, 2009. Testing laboratory methods to determine the anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a sandy-loam soil. *Geoderma* 154(1): 52–58.
- Chapuis P, Denis G and Bass K, 1989. Laboratory Permeability Test on Sand: Influence of the Compaction Method on Anisotropy. *Geotechnical Testing Journal* 26: 32-35.
- Chapuis P and Gill D, 1989. Hydraulic anisotropy of homogeneous soils and rocks: Influence of the densification process. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 39: 75-86.
- Chapuis P, Gill DE and Baas K, 1989. Laboratory permeability tests on sand: Influence of the compaction method on anisotropy. *Geotechnical Testing Journal* 26: 614-622.
- Gernez S, Bouchedda A, Gloguen E, Paradis D. 2019. Comparison Between Hydraulic Conductivity Anisotropy and Electrical Resistivity Anisotropy from Tomography Inverse Modeling. *Front. Environ.* 7: 1-15 DOI: 10.3389/fenvs.2019.00067.
- Moore PJ, 1979. Determination of permeability anisotropy in a two-way permeameter. *Geotechnical Testing Journal* 2(3): 167-169.
- Stephenson D, 1979. *Rock Fills in Hydraulic Engineering*. Elsevier Scientific, Amsterdam, 215 p.

Wang J and Qiu Z, 2015. Anisotropic hydraulic conductivity and critical hydraulic gradient of a crushed sandstone–mudstone particle mixture. *Marine Georesources and Geotechnology* DOI: 10.1080/1064119X.2015.1103825.