

## ارزیابی اثر درصد تراکم و مقدار ریزدانه خاک بر جریان نشت دائمی و غیردائمی از گوره‌های مهار سیلاب

فواد کیلانه‌ئی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا منعمی<sup>۲</sup> و امیر محجوب<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله، اثر درصد تراکم و مقدار ریزدانه خاک بر مقدار نفوذپذیری خاک SC و جریان نشت از گوره‌های مهارسیلاب در حالت دائمی و غیردائمی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، سه نمونه منتخب خاک که در این تحقیق با نام‌های A، B و C مشخص شده‌اند و به ترتیب دارای درصد ریزدانه ۱۲، ۲۰/۸ و ۲۸/۴ هستند، با درصد تراکم‌های ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۶۰ مورد آزمایش نفوذپذیری قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد با افزایش درصد تراکم در هر یک از نمونه‌های مورد بررسی از مقدار ۶۰ به ۱۰۰، ۷۰ به ۱۰۰ و ۸۵ به ۱۰۰ ضریب نفوذپذیری به ترتیب به مقدار متوسط ۲۵، ۱۴/۳ و ۸/۹۱ برابر کاهش داشته است. در هر درصد تراکم نیز مقدار ضریب نفوذپذیری نمونه A به‌طور میانگین ۱/۲ برابر نمونه B و ۱/۶۹ برابر نمونه C و ضریب نفوذپذیری نمونه B به‌طور میانگین ۱/۴۱ برابر نمونه C تعیین شد. در ادامه، با مدل‌سازی عددی پدیده تراوش، دبی عبوری از گوره‌های مهار سیلاب با درصد تراکم‌های مختلف در حالت تراوش دائمی و سطح فریاتیک در حالت تراوش غیردائمی مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** تراوش، مدل فیزیکی، سطح فریاتیک، ضریب نفوذپذیری، سیل‌بند، مدل عددی.

**ارجاع:** کیلانه‌ئی ف. منعمی ح. ر. و محجوب ا. ۱۳۹۸. ارزیابی اثر درصد تراکم و مقدار ریزدانه خاک بر جریان نشت دائمی و غیردائمی از گوره‌های مهار سیلاب. مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۶۳-۷۳.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی پارسین، قزوین.

۳- استادیار گروه مهندسی راه و روسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران.

\* نویسنده مسئول: [kilanehei@eng.ikiu.ac.ir](mailto:kilanehei@eng.ikiu.ac.ir)

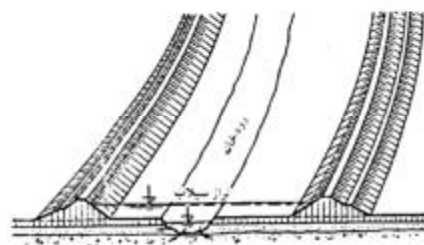
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸

## مقدمه

بر وجود مواد درشت‌دانه حاوی مقدار مناسب ریزدانه برای کاهش نفوذپذیری آن است. بنابراین، بهترین گزینه، انتخاب خاک درشت‌دانه رس‌دار با اولویت شن رس‌دار (GC) و ماسه رس‌دار (SC) است. بررسی اثر مقدار ریزدانه و درصد تراکم بر خصوصیات مقاومتی و نفوذپذیری خاک‌های مذکور برای رسیدن به شرایط مناسب ساخت گوره به لحاظ اقتصادی، سرعت و زمان اجرا از اهمیت بسیاری برخوردار است. در ادامه، تحقیقات انجام شده در مورد نفوذپذیری و مؤلفه‌های دیگر مؤثر بر نیروی نشت در سازه‌های خاکی بیان می‌شود. احدیان و همکاران (۱۳۸۷)، تغییرات درجهٔ پوکی و ضریب نفوذپذیری در اثر بارگذاری‌های مختلف را که در طی آزمایش تحکیم به وجود می‌آید، بررسی کردند. باقری و همکاران (۱۳۹۰)، در تحقیقی با انجام آزمایش‌های متعدد روی انواع خاک‌های ریزدانه، مشخصات فیزیکی و نفوذپذیری آنها را تعیین کردند؛ سپس، براساس نتایج به‌دست آمده، امکان استفاده از هوش مصنوعی را برای برآورد ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه با استفاده از مؤلفه‌های فیزیکی خاک بررسی کردند. دو نوع عمده مصالح اساس و زیراساس، شامل مصالح کوهی و رودخانه‌ای با پنج نوع دانه‌بندی مورد اشاره در آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران از نظر تراکم و نفوذپذیری توسط خاکی و همکاران (۱۳۹۳) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. این محققان، نتایج به‌دست‌آمده را با فرمول‌های تجربی موجود مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین، مشخص شد که در بیشتر موارد، ضریب نفوذپذیری مصالح کوهی از ضریب نفوذپذیری مصالح رودخانه‌ای کمتر بوده و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ اثر قابل توجهی بر روی نفوذپذیری مصالح دارد. یوکوهاما و همکاران (۲۰۱۴)، معادلات بین وضعیت تراکم و خواص مکانیکی حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی را با استفاده از نمونه‌های اشباع بیان کردند. منحنی مشخصهٔ آب-خاک، یکی از مهم‌ترین منحنی‌های کاربردی در مکانیک خاک غیراشباع است. این منحنی، رابطهٔ بین درصد رطوبت حجمی یا درصد رطوبت وزنی و مکش خاک را مشخص می‌کند. تابع نفوذپذیری خاک غیراشباع معمولاً توسط برآورد منحنی مشخصهٔ آب-خاک تعیین می‌شود. مدل‌های پیش‌بینی مختلف (به‌عنوان مثال، روش غیرمستقیم)، برای تابع نفوذپذیری توسط محققان مختلف بیان شده است. یک معادلهٔ جدید توسط

گوره<sup>۱</sup>، بند خاکی کوتاهی است که در فواصل مختلف از کناره دو طرف رودخانه و در امتداد آن ساخته می‌شود تا به‌عنوان کناره‌های مصنوعی در دوره‌های سیلابی که آب رودخانه از کناره‌های طبیعی خود بیرون می‌رود، زمین‌های اطراف رودخانه را از آب‌گرفتگی محافظت کند (شکل ۱). این روش از قدیمی‌ترین و در عین حال متداول‌ترین روش‌های مهارسیلاب به شمار می‌رود و در سال‌های اخیر به‌صورت گسترده‌ای به‌عنوان یک عملیات مهندسی مهار و حفاظت سیلاب مورد استفاده قرار گرفته است. مصالح مناسب برای احداث گوره می‌بایست دارای دو خاصیت اصلی باشد. از یک طرف، باید دارای مقدار کافی درشت‌دانه باشد تا بتواند در مقابل فرسایش ناشی از جریان آب در مجاورت گوره مقاومت نماید و همچنین مقاومت برشی بالایی را که مورد نیاز پایداری گوره است، فراهم آورد و از طرف دیگر، باید نفوذناپذیر باشد؛ از این رو، بایستی به مقدار کافی مواد ریزدانه داشته باشد تا از تراوش اضافی که آثار ناخواسته‌ای در پایداری گوره دارد، جلوگیری کند. چنین آثاری باعث خواهد شد تا تمهیدات خاص برای جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از آن نیز ضروری شود.



شکل ۱- جانمایی گوره در مجاورت رودخانه (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۰)

در ساخت و سازهایی که در آن حجم قابل توجهی از مصالح مورد نیاز است، همواره فاصلهٔ حمل از نکات اصلی و تعیین‌کننده در برآورد و هزینهٔ کلی طرح است. گوره معمولاً با مصالح موجود در محل ساخته می‌شود که این موضوع از امتیازهای این روش است. همان‌گونه که اشاره شد، گوره‌های مهارسیلاب نیازمند مصالحی است که علاوه

دانه‌بندی سه نمونه خاک گرفته شده که به ترتیب با نمونه A، B و C نام‌گذاری شده است، در شکل‌های شماره ۲ تا ۴ آمده است. همان‌طور که از نتایج آزمایش ملاحظه می‌شود، در نمونه‌های A، B و C درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ به ترتیب برابر با ۱۲/۸، ۲۰ و ۲۸/۴ درصد است. با توجه به اینکه مقدار درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ کمتر از ۵۰ درصد است؛ بنابراین، هر سه نوع خاک مورد مطالعه درشت‌دانه بوده و از آنجا که در هر سه نمونه منتخب درصد ماسه از درصد شن بیشتر است، جنس خاک‌ها از نوع درشت‌دانه ماسه‌ای است. برای طبقه‌بندی خاک تعیین پلاستیسیته آن ضروری است. نتایج آزمایش حدود اتربرگ در جدول ۱ آمده است. پس از بررسی و مطالعه این نتایج، مشاهده شد که با توجه به نمودار خمیری کاسگرانده، جنس ریزدانه تمامی نمونه‌ها از نوع رس بوده و بر طبق طبقه‌بندی یونیفاید تمامی نمونه‌ها ماسه رس‌دار (SC) هستند.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ

نمونه	حد روانی (LL)	حد خمیری (PI)	نشانه خمیری (PI)
A	۳۳/۳۹	۲۵/۳۲	۸/۰۷
B	۲۵/۶۷	۱۵/۱۷	۱۰/۵
C	۳۳/۹۵	۲۱/۰۷	۱۲/۸۸

### آزمایش تراکم

هدف از انجام آزمایش تراکم، تعیین رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر است. آزمایش تراکم به دو روش، آشتوی استاندارد و آشتوی اصلاح‌شده انجام می‌پذیرد. در پژوهش حاضر، آزمایش تراکم به روش اصلاح‌شده، انجام و نتایج آن برای نمونه‌های A، B و C در جدول ۲ ارائه شد. با دقت در اعداد جدول مذکور می‌توان به این مهم دست یافت که نمونه خاک C بیشترین درصد رطوبت بهینه و کمترین وزن مخصوص خشک حداکثر را دارد.

### آزمایش نفوذپذیری بار افتان

آزمایش بار ثابت و بار افتان، دو روش استاندارد است که برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به درصد ریزدانه نمونه‌های خاک مورد بررسی، در تحقیق حاضر آزمایش بار افتان به کار گرفته شده است.

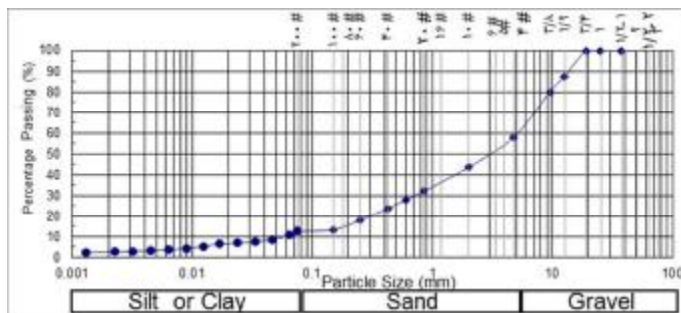
ژای و هاریانتو (۲۰۱۵)، برای محاسبه تابع نفوذپذیری بیان شده است که در آن تابع نفوذپذیری خاک غیراشباع با برخی از مؤلفه‌های منحنی آب-خاک در ارتباط است. معادله ارائه شده با استفاده از داده‌های تجربی مورد تأیید قرار گرفته است. ژو و همکاران (۲۰۱۴)، روشی را با استفاده از تراکم خاک دانه‌ای برای برآورد منحنی مشخصه آب-خاک ارائه کردند. با استفاده از نتایج این تحقیق، تخمین بهتری از منحنی مشخصه برای خاک دانه‌ای با تراکم‌های مختلف بیان شده است. اورن (۲۰۱۴)، روش جدیدی را که آزمون حجم رسوبات نامیده می‌شود، برای تخمین مؤلفه‌های تراکم، نظیر وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه پیشنهاد و ارائه کرد. تاکنون، مطالعات متعددی درباره ارتباط بین نسبت منافذ و دانه‌بندی با نفوذپذیری خاک‌ها انجام و معادلات بسیاری نیز پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات چاپیوس و همکاران (۱۹۸۹)، الیمنی و سن (۱۹۹۳)، اسپری و پیرس (۱۹۹۵)، چاپیوس و آرتین (۲۰۰۳)، چاپیوس (۲۰۰۴)، موکوا و تریمبل (۲۰۰۸)، رانایومانانا و همکاران (۲۰۱۶) و چو و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد؛ اما بررسی تأثیر هم‌زمان درصد ریزدانه و تراکم خاک بر نفوذپذیری آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی، ضرایب نفوذپذیری در تراکم‌های مختلف خاک‌های درشت‌دانه با درصد‌های متفاوت ریزدانه رسی اندازه‌گیری و سپس میزان نشست در خاکریزهای مهارسیلاب در شرایط گوناگون در نرم‌افزار ژئواستودیدو مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

### آزمون‌های آزمایشگاهی و نتایج آن‌ها

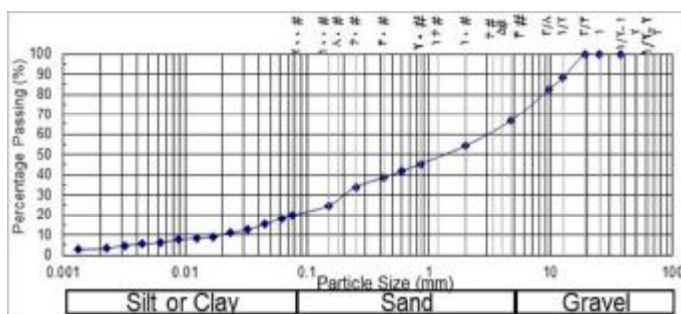
این بخش به موضوع آزمایشگاهی تحقیق حاضر اختصاص دارد. منطقه مورد مطالعه در جنوب استان فارس و در حاشیه رودخانه شور مهران واقع است. سه نمونه خاک از منابع قرضه منطقه یادشده گرفته شد و آزمایش‌های مورد نیاز روی آن انجام شد.

### طبقه‌بندی خاک

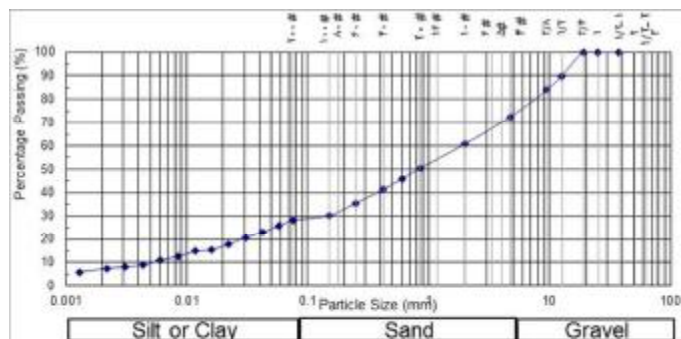
در کارهای مهندسی، طبقه‌بندی خاک براساس خواص ساده‌ای نظیر دانه‌بندی و پلاستیسیته استوار است. منحنی



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی نمونه A



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی نمونه B



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی نمونه C

جدول ۲- مقادیر درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر برای نمونه‌های A، B و C

نمونه	درصد رطوبت بهینه	وزن مخصوص خشک حداکثر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
A	۷/۱	۲/۰۸
B	۸/۴	۲/۰۸
C	۱۰	۲/۰۳

پنج قسمت مساوی تقسیم و مقدار خاک هر بخش در آن قسمت متراکم شده است. با انجام آزمایش نفوذپذیری برای نمونه‌های A، B و C، ضرایب نفوذپذیری حاصل از درصد تراکم‌های مختلف به دست می‌آید. نتایج در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است.

حجم قالب آزمایش نفوذپذیری با بار افتان ۹۲۱/۳۶ سانتی‌متر مکعب است. براساس وزن مخصوص خاک در درصد تراکم‌های مختلف و حجم قالب، مقدار خاک مورد نیاز محاسبه شده و این مقدار خاک در قالب متراکم می‌شود. برای اطمینان از یکنواختی تراکم، ارتفاع قالب به

جدول ۳- ضرایب نفوذپذیری نمونه A به ازای درصد تراکم‌های مختلف

درصد تراکم	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	وزن خاک مورد نیاز در قالب (گرم)	آب مورد نیاز (سی‌سی)	ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۱۰۰	۲/۰۸	۱۹۱۶/۴	۱۳۶	۳/۵۷۵e-۷
۸۵	۱/۷۶۸	۱۶۲۸/۹	۱۱۵	۲/۸۱۳e-۶
۷۰	۱/۴۵۶	۱۳۴۱/۵	۹۵	۴/۹۲۳e-۶
۶۰	۱/۲۴۸	۱۱۴۹/۸	۸۱	۷/۷۲۸e-۶

جدول ۴- ضرایب نفوذپذیری نمونه B به ازای درصد تراکم‌های مختلف

درصد تراکم	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	وزن خاک مورد نیاز در قالب (گرم)	آب مورد نیاز (سی‌سی)	ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۱۰۰	۲/۰۸	۱۹۱۶/۴	۱۶۰	۲/۸۳۱e-۷
۸۵	۱/۷۶۸	۱۶۲۸/۹	۱۳۶	۲/۵۱۴e-۶
۷۰	۱/۴۵۶	۱۳۴۱/۵	۱۱۲	۳/۷۰۱e-۶
۶۰	۱/۲۴۸	۱۱۴۹/۸	۹۶	۷/۰۴۶e-۶

جدول ۵- ضرایب نفوذپذیری نمونه C به ازای درصد تراکم‌های مختلف

درصد تراکم	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	وزن خاک مورد نیاز در قالب (گرم)	آب مورد نیاز (سی‌سی)	ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)
۱۰۰	۲/۰۳	۱۸۷۰/۳۶	۱۸۷	۱/۷۹۵e-۷
۸۵	۱/۷۲۵	۱۵۸۹/۸	۱۵۸	۱/۷۹۱e-۶
۷۰	۱/۴۲۱	۱۳۰۹/۲۵	۱۳۰	۲/۹۰۱e-۶
۶۰	۱/۲۱۸	۱۱۲۲/۲۱	۱۱۲	۵/۱۲۷e-۶

### تحلیل نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی

ابتدا تغییرات ضریب نفوذپذیری در هر نمونه (A، B و C) با توجه به درصد تراکم‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر ضریب نفوذپذیری در هر نمونه و به ازای درصد تراکم‌های مختلف در جدول ۶ آمده است. برای بررسی اثر درصد تراکم بر کاهش مقدار نفوذپذیری در هر نمونه خاک، نسبت مقدار نفوذپذیری در نسبت تراکم ۶۰ به ۱۰۰، ۷۵ به ۱۰۰ و ۸۵ به ۱۰۰ نیز در جدول ۷ ارائه شده است.

میزان تغییرات نفوذپذیری در نسبت تراکم ۶۰ به ۱۰۰ و در نمونه‌های A، B و C به ترتیب برابر ۲۱/۶، ۲۴/۹ و ۲۸/۶ به دست آمده است. دقت در نتایج، مؤید این موضوع است که با افزایش درصد تراکم در هر یک از نمونه‌های مورد بررسی از مقدار ۶۰ به ۱۰۰، ضریب نفوذپذیری به مقدار متوسط ۲۵ برابر کاهش داشته است. بررسی همین موضوع در نسبت تراکم ۷۰ به ۱۰۰ و ۸۵ به ۱۰۰ نیز کاهش متوسط ضریب نفوذپذیری به مقدار ۱۴/۳ و ۸/۹۱ را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه دیگر، این است که اثر کاهش ضریب نفوذپذیری در درصد تراکم‌های مختلف در نمونه‌های حاوی درصد ریزدانه بیشتر، مشهودتر است؛ به

گونه‌ای که در کلیه نسبت‌های تراکم، بیشترین کاهش نفوذپذیری در نمونه C که حاوی درصد رس بیشتری است، روی داده است. مقادیر ضریب نفوذپذیری در هر درصد تراکم و به ازای درصد ریزدانه‌های مختلف در جدول ۸ آمده است. برای بررسی اثر مقدار ریزدانه بر کاهش مقدار نفوذپذیری در هر درصد تراکم، نسبت مقدار نفوذپذیری نمونه A به نمونه B، نمونه A به نمونه C و نمونه B به نمونه C نیز در جدول ۹ ارائه شده است.

به‌طور کلی، نتایج حاصل از جدول ۹ نشان می‌دهد که مقدار ضریب نفوذپذیری نمونه A به‌طور میانگین ۱/۲ برابر نمونه B و ۱/۶۹ برابر نمونه C و ضریب نفوذپذیری نمونه B به‌طور میانگین ۱/۴۱ برابر نمونه C است. با استفاده از نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری و نمودارهای ضریب نفوذپذیری بر حسب مقدار ریزدانه و درصد تراکم که در شکل ۵ آمده است، می‌توان با استفاده از رگرسیون خطی رابطه بین ضریب نفوذپذیری و مؤلفه‌های مذکور را تعیین کرد. در جدول ۱۰، معادلات مذکور ارائه شده‌اند. در این معادلات، پارامتر k، مقدار ضریب نفوذپذیری بر حسب متر بر ثانیه و پارامتر F، مقدار درصد ریزدانه می‌باشد که مقدار آن بین ۱۲/۸ تا ۲۸/۴ درصد است.

جدول ۶- ضریب نفوذپذیری در هر نمونه خاک و به‌ازای درصد تراکم‌های مختلف

درصد تراکم	نمونه A	نمونه B	نمونه C
۱۰۰	۳/۵۸e-۰۷	۲/۸۳e-۰۷	۱/۸۰e-۰۷
۸۵	۲/۸۱e-۰۶	۲/۵۱e-۰۶	۱/۷۹e-۰۶
۷۰	۴/۹۲e-۰۶	۳/۷۰e-۰۶	۲/۹۰e-۰۶
۶۰	۷/۷۳e-۰۶	۷/۰۵e-۰۶	۵/۱۳e-۰۶

جدول ۷- تغییرات نسبت نفوذپذیری در نسبت تراکم‌های مختلف در هر نمونه خاک

نمونه خاک	نسبت ضریب نفوذپذیری		
	نسبت تراکم ۶۰ به ۱۰۰	نسبت تراکم ۷۰ به ۱۰۰	نسبت تراکم ۸۵ به ۱۰۰
A	۲۱/۶	۱۳/۸	۷/۸۷
B	۲۴/۹	۱۳/۱	۸/۸۸
C	۲۸/۶	۱۶/۳	۹/۹۸

جدول ۸- ضریب نفوذپذیری در هر درصد تراکم و به‌ازای درصد ریزدانه‌های مختلف

درصد ریزدانه	ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)			
	تراکم ۶۰ درصد	تراکم ۷۰ درصد	تراکم ۸۵ درصد	تراکم ۱۰۰ درصد
۱۲/۸	۷/۷۳e-۰۶	۴/۹۲e-۰۶	۲/۸۱e-۰۶	۳/۵۸e-۰۷
۲۰	۷/۰۵e-۰۶	۳/۷۰e-۰۶	۲/۵۱e-۰۶	۲/۸۳e-۰۷
۲۸/۴	۵/۱۳e-۰۶	۲/۹۰e-۰۶	۱/۷۹e-۰۶	۱/۸۰e-۰۷

جدول ۹- تغییرات نسبت ضریب نفوذپذیری به‌ازای درصد ریزدانه‌های مختلف در هر درصد تراکم

درصد تراکم	نسبت ضریب نفوذپذیری		
	نمونه A به B	نمونه A به C	نمونه B به C
۱۰۰	۱/۲۶	۱/۹۹	۱/۵۸
۸۵	۱/۱۲	۱/۵۷	۱/۴
۷۰	۱/۳۳	۱/۷	۱/۲۸
۶۰	۱/۱	۱/۵۱	۱/۳۷

### مدل‌سازی عددی

پژوهش، تحلیل پدیده تراوش با استفاده از نرم‌افزار ژئو استودیو و بخش سیپ<sup>۱</sup> آن انجام شده است. سیپ، نرم‌افزاری مبتنی بر روش المان محدود است که برای مدل‌سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل نظیر خاک تهیه شده است و قادر است جریان را در هر دو حالت اشباع و غیراشباع و برای مسائل ساده و بسیار پیچیده شبیه‌سازی کند. در این بخش، ابتدا مقدار دبی عبوری از گوره‌های مهار سیلاب در حالت جریان دائمی به‌ازای نمونه‌های A، B و C در درصد تراکم‌های مختلف تعیین می‌شود؛ سپس، با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از هیدروگراف مطالعات پهنه‌بندی سیلاب رودخانه شور مهران، مدل‌سازی گوره در حالت تراوش غیردائمی نیز انجام می‌شود.

گوره‌ها در معرض تخریب‌های ناشی از نفوذ و تراوش آب از شالوده و بدنه هستند؛ ولی به‌دلیل آنکه خاکریزها برای مدت نسبتاً کوتاهی در تماس با جریان سیل قرار می‌گیرند، اهمیت مسئله تراوش و خطرهای ناشی از آن در مقایسه با سدهای خاکی کمتر است. از طرفی، با توجه به اینکه گوره‌های مهار سیلاب فقط چند روز یا حداکثر چند هفته در طول سال (در مدت وقوع سیل) با آب در تماس هستند، مدل‌سازی این گوره‌ها در حالت غیردائمی ضروری به نظر می‌رسد. گوره‌های مهار سیلاب عموماً سازه‌هایی با ارتفاع کم هستند و استفاده از شیب‌های خاکریزی معمول در اجرا، پایداری کلی گوره را تأمین می‌کند. در این

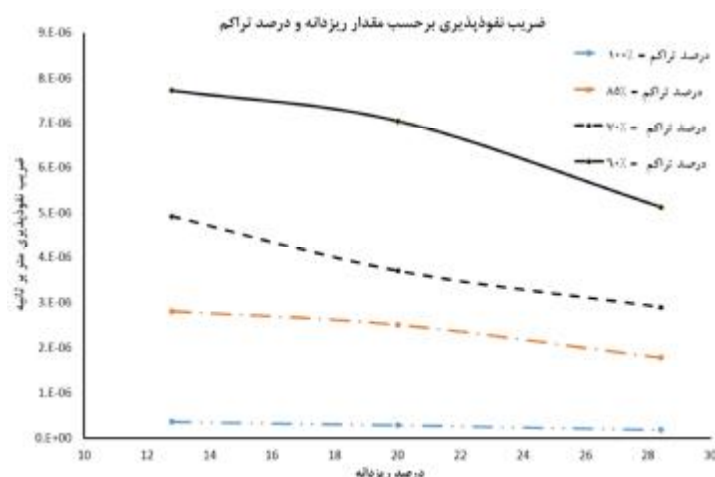
## مدل سازی گوره در حالت تراوش دائمی

بخش حاضر به مدل سازی عددی تراوش در حالت جریان دائمی اختصاص دارد. با توجه به مطالعات پایداری انجام شده براساس پارامترهای مقاومت برشی نمونه ها و سایر ضوابط طراحی گوره ها، مشخصات خاکریز مورد نظر

به صورت جدول ۱۱ در نظر گرفته شده است. با مدل سازی مسئله با شرایط بالا، به ازای نمونه های A، B و C در درصد تراکم های مختلف، خطوط هم پتانسیل، خطوط جریان، خط فریاتیگ و دبی عبوری برای خاکریزها تعیین می شود.

جدول ۱۰- معادلات تعیین ضریب نفوذپذیری برحسب مقدار ریزدانه در درصد تراکم های مختلف

ضریب رگرسیون	درصد تراکم	معادله رگرسیونی
۰/۹۵	۶۰	$k = -2e - 7 * F + 1e - 5$
۰/۹۷	۷۰	$k = -1e - 7 * F + 6e - 6$
۰/۹۹	۸۵	$k = -7e - 8 * F + 4e - 6$
۰/۹۶	۱۰۰	$k = -1e - 8 * F + 5e - 7$



شکل ۵- ضریب نفوذپذیری برحسب مقدار ریزدانه و درصد تراکم

معادله تحلیلی ذکر شده برای نمونه A در درصد تراکم های مختلف آمده است.

برای ارزیابی کمی نتایج حل عددی با معادلات تحلیلی، مقدار خطا با استفاده از معادله (۲) تعیین می شود:

$$\text{مقدار خطا} = \frac{\sqrt{\sum (Q_i^{nu} - Q_i^{an})^2}}{\sum Q_i^{an}} \cdot 100 \quad (2)$$

در معادله بالا، بالانویس های nu و an، به ترتیب بیانگر حل عددی و حل تحلیلی است.

با استفاده از معادله مذکور، جذر متوسط مربع خطاها به دست آمده از نرم افزار با معادله دوپویی در حدود ۶/۷٪ است که نشان دهنده نزدیک بودن آنالیز عددی و حل تحلیلی و دقت مناسب مدل سازی می باشد. در شکل ۶، نتایج مدل به ازای نمونه A در درصد تراکم های مختلف

علاوه بر هندسه مدل که براساس جدول ۱۱ به مدل معرفی شده است، مقادیر ضریب نفوذپذیری نیز با استفاده از نتایج ارائه شده در جدول ۶ لحاظ شده است. بررسی درستی نتایج مدل عددی بسته به نوع تحقیق و در دسترس بودن نتایج مطالعات قبلی به صورت های مختلفی انجام می پذیرد. در تحقیق حاضر، نتایج به دست آمده از مدل عددی با استفاده از معادله تحلیلی ارائه شده توسط دوپویی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

$$Q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2d} \quad (1)$$

در معادله بالا: K(m/s)، نفوذپذیری؛  $h_1(m)$  و  $h_2(m)$  به ترتیب ارتفاع آب در بالادست و پایین دست گوره؛  $Q(m^3/s)$ ، دبی خروجی و  $d(m)$ ، نماینده عرض گوره است. در جدول ۱۲، مقادیر دبی خروجی حاصل از مدل عددی و

ارائه شده است؛ در این شکل، علاوه بر مقدار دبی عبوری، خطوط هم‌پتانسیل به همراه مقادیر عددی آن آمده است. همچنین، در جدول ۱۳، مقادیر دبی عبوری از گوره‌های مهار سیلاب به‌ازای نمونه‌های A، B و C در درصد تراکم‌های مختلف آمده است.

جدول ۱۱- مشخصات هندسی گوره مهار سیلاب مورد بررسی

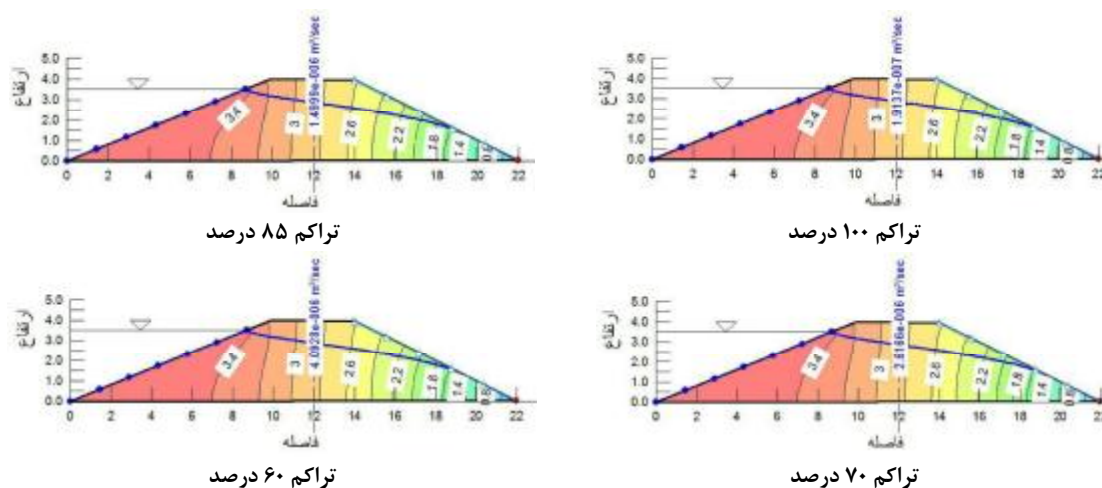
ارتفاع خاکریز (گوره)	ارتفاع آزاد سیلاب	شیب شیروانی در سمت رودخانه	شیب شیروانی در سمت خشکی	عرض تاج
۴ متر	۰/۵ متر	۱ قائم به ۲/۵ افقی	۱ قائم به ۲ افقی	۴ متر

جدول ۱۲- مقدار دبی محاسبه‌شده با مدل عددی و معادله تحلیلی برای نمونه A در درصد تراکم‌های مختلف

ردیف	درصد تراکم	مدل عددی	معادله تحلیلی	درصد خطای نسبی
۱	۱۰۰	۱/۹۱e-۷	۱/۶۹e-۷	۱۱/۷
۲	۸۵	۱/۴۹e-۶	۱/۳۲e-۶	۱۱/۱
۳	۷۰	۲/۶۲e-۶	۲/۳۲ e-۶	۱۱/۵
۴	۶۰	۴/۰۹e-۶	۳/۶۴e-۶	۱۱

جدول ۱۳- مقدار دبی عبوری از مقطع خاکریز به‌ازای نمونه‌های A، B و C در درصد تراکم‌های مختلف

ردیف	درصد تراکم	مقدار دبی عبوری از مقطع خاکریز گوره مهار سیلاب		
		نمونه A	نمونه B	نمونه C
۱	۱۰۰	۱/۹۱e-۷	۱/۵۳e-۷	۹/۶۷e-۸
۲	۸۵	۱/۴۹e-۶	۱/۳۴e-۶	۹/۷۵e-۷
۳	۷۰	۲/۶۲e-۶	۲/۰ e-۶	۱/۵۴ e-۶
۴	۶۰	۴/۰۹e-۶	۳/۷۶e-۶	۲/۷۵e-۶



شکل ۶- وضعیت خطوط هم‌پتانسیل، خطوط جریان، خط فریاتیگ و دبی عبوری در بدنه خاکریزها به‌ازای نمونه A در درصد تراکم‌های مختلف

مقطع خاکریز گوره‌های مهار سیلاب هم‌ارز با تغییرات مقدار ضریب نفوذپذیری است.

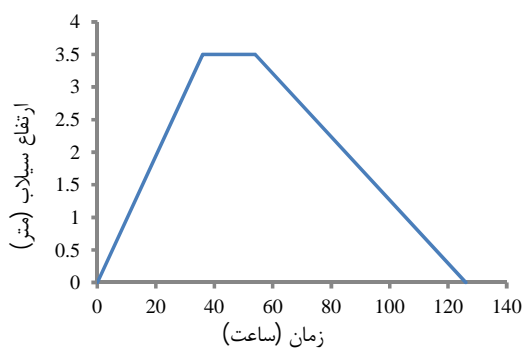
#### مدل‌سازی گوره در حالت تراوش غیردائمی

با توجه به داده‌های به‌دست آمده از هیدروگراف مطالعات پهنه‌بندی سیلاب رودخانه شور مهران (شکل ۷)،

همان‌طور که از نتایج ارائه شده در جدول بالا ملاحظه می‌شود، در نمونه‌های A، B و C با کاهش درصد تراکم، مقدار ضریب نفوذپذیری افزایش یافته و به تبع آن، مقدار دبی عبوری از گوره‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به اینکه خاک مدل‌شده در گوره‌های مهار سیلاب همگن فرض شده است، میزان تغییرات دبی عبوری از



به‌ازای نمونه‌های مذکور در درصد تراکم‌های ۸۵، ۷۰، ۶۰ درصد نسبت به درصد تراکم ۱۰۰ درصد به‌ترتیب ۱/۴۸، ۱/۷ و ۱/۹ برابر شده است.



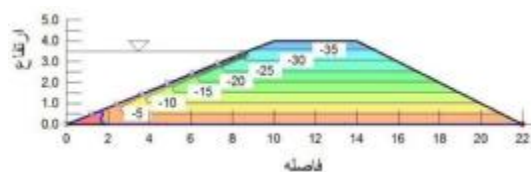
شکل ۷- هیدروگراف تراز آب در مدل عددی

از طرفی، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هیچ یک از موارد تحلیل تراوش غیردائمی از گوره‌ها سطح آزاد جریان آب با شیب پایین‌دست برخورد نکرده است. به‌عنوان نمونه، چنانچه از بین نمونه‌های مورد بررسی، نمونه B با تراکم ۸۵ درصد در نظر گرفته شود، جریان آب در حدود ۱۰ درصد مسیر پاشنه تا پنجه را طی کرده و مدت زمان زیادی مورد نیاز است تا جریان به سطح پایین‌دست برسد؛ بنابراین، در این حالت‌ها، خطر آب‌شستگی پایین‌دست و لزوم تعبیه زهکش برای رفع آن، منتفی می‌شود.

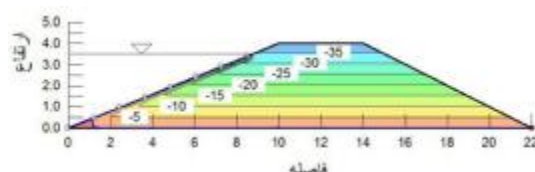
گوره‌های مهار سیلاب ظرف مدت ۳۶ ساعت از تراز صفر به تراز حداکثر، ۱۸ ساعت در تراز حداکثر (حالت پایدار) و ۷۲ ساعت تخلیه می‌گردند (مشاور ماب، ۱۳۹۳). با استفاده از این اطلاعات، گوره‌های مهار سیلاب در سه حالت بیان‌شده در برنامه سیپ مدل‌سازی و با استفاده از حالت جریان غیردائمی سطح فریاتیک در این موارد تعیین شده است.

با بررسی سطح فریاتیک، بیشترین حرکت آب به داخل بدنه گوره در حالت تخلیه روی داده است. شکل ۸، خط فریاتیک و کانتورهای فشار آب حفره‌ای در بدنه خاکریزهای گوره مهار سیلاب در حالت تخلیه را به‌ازای نمونه A و در درصد تراکم‌های مختلف نشان می‌دهد.

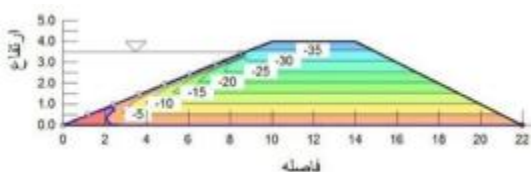
همچنین، جدول ۱۴، فاصله محل برخورد خط فریاتیک با پاشنه به‌ازای نمونه‌های A، B و C در درصد تراکم‌های مختلف را در حالت تخلیه بیان می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۴، مشاهده می‌شود برای دستیابی به فاصله کمتر محل برخورد خط فریاتیک با بالادست، افزایش درصد تراکم نمونه خاک نسبت به افزایش درصد ریزدانه آن مؤثرتر است. میانگین فاصله محل برخورد خط فریاتیک با بالادست در حالت تخلیه به‌ازای نمونه‌های A، B، C و در درصد تراکم‌های ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۱/۴، ۲/۰۸، ۲/۳۷ و ۲/۶۷ متر است؛ همچنین، میانگین فواصل محل برخورد خط فریاتیک با بالادست



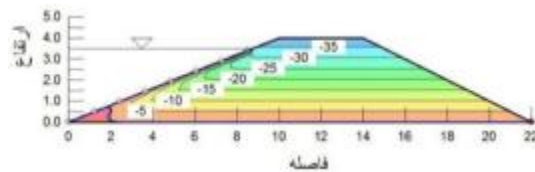
تراکم ۸۵ درصد



تراکم ۱۰۰ درصد



تراکم ۶۰ درصد



تراکم ۷۰ درصد

شکل ۸- خط فریاتیک حالت تخلیه در بدنه خاکریزها به‌ازای نمونه A در درصد تراکم‌های مختلف

جدول ۱۴- فاصله محل برخورد خط فریاتیگ با پاشنه در نمونه‌های A، B و C در درصد تراکم‌های مختلف و در حالت تخلیه

ردیف	درصد تراکم	فاصله محل برخورد خط فریاتیگ با بالادست در حالت تخلیه (متر)		
		نمونه A	نمونه B	نمونه C
۱	۱۰۰	۱/۵	۱/۴۵	۱/۲۵
۲	۸۵	۲/۲	۲/۱	۱/۹۵
۳	۷۰	۲/۵	۲/۴	۲/۲
۴	۶۰	۲/۷۵	۲/۷۲	۲/۵۵

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر درصد تراکم بر مقدار نفوذپذیری خاک SC با درصد ریزدانه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای رسیدن به این مهم، سه نمونه خاک از منابع قرصه ساخت گوره‌های مهار سیلاب رودخانه شور مهران با نام‌های A، B، C و درصد ریزدانه ۱۲/۸، ۲۰ و ۲۸/۴ انتخاب و آزمایش نفوذپذیری با درصد تراکم‌های ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۶۰ بر روی آن انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها، نشان داد که میزان تغییرات نفوذپذیری در نسبت تراکم ۶۰ به ۱۰۰ و در نمونه‌های A، B و C به ترتیب برابر ۲۱/۶، ۲۴/۹ و ۲۸/۶ است؛ به عبارت دیگر، با افزایش درصد تراکم در هر یک از نمونه‌های مورد بررسی از مقدار ۶۰ به ۱۰۰، ضریب نفوذپذیری به مقدار متوسط ۲۵ برابر کاهش داشته است. بررسی همین موضوع در نسبت تراکم ۷۰ به ۱۰۰ و ۸۵ به ۱۰۰ نیز کاهش متوسط ضریب نفوذپذیری به مقدار ۱۴/۳ و ۸/۹۱ را نشان داد. در ادامه، اثر مقدار ریزدانه بر کاهش مقدار نفوذپذیری در هر درصد تراکم مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ضریب نفوذپذیری نمونه A به‌طور میانگین ۱/۲ برابر نمونه B و ۱/۶۹ برابر نمونه C و ضریب نفوذپذیری نمونه B به‌طور میانگین ۱/۴۱ برابر نمونه C به‌دست آمد. مقایسه نتایج، مؤید این مهم است که برای دستیابی به مقدار نفوذپذیری کمتر، افزایش درصد تراکم نمونه خاک نسبت به افزایش درصد ریزدانه آن مؤثرتر است. در نهایت، نیز با مدل‌سازی عددی تراوش، دبی عبوری از گوره‌های مهار سیلاب با درصد تراکم‌های مختلف در حالت تراوش دائمی و سطح فریاتیگ در حالت تراوش غیردائمی تعیین شد. نتایج مدل عددی نشان داد در هیچ یک از موارد تحلیل تراوش غیردائمی از گوره‌ها، سطح آزاد جریان آب با شیب پایین‌دست تلاقی نداشته و فاصله بسیار زیادی نیز با آن دارد.

## منابع

۱. احدیان ج. نصراصفهانی م. ج. شفافی بجستان م. و کریمی غ. ۱۳۸۷. ارزیابی پتانسیل کاهش هدررفت آب در رس‌های اشباع جهت استفاده در خاکریز کانال‌ها. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. اهواز. دانشگاه شهید چمران. ۶ ص.
۲. باقری ق. شعبان‌زاده ح. و رسولی ا. ۱۳۹۰. تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و هوش مصنوعی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. سمنان. دانشگاه سمنان. ۷ ص.
۳. خاکی ع. باباگلی ر. و خردی راد ی. ۱۳۹۳. مقایسه تراکم و نفوذپذیری مصالح اساس و زیراساس کوهی با دانه‌بندی‌های متفاوت. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران. بابل. دانشگاه صنعتی نوشیروانی. ۹ ص.
۴. راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری گوره‌ها. ۱۳۸۰. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، نشریه شماره ۲۱۴. ۱۰۸ ص.
۵. گزارش مطالعات مهندسی رودخانه و پهنه‌بندی سیلاب رودخانه شور مهران. مهندسی مشاور ماب، ۱۳۹۳. ۳۵۴ ص.
6. Alyamani M. S. and Sen Z. 1993. Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Ground Water*. 31(4): 551-555.
7. Chapuis R. P. 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*. 41(5): 787-795.
8. Chapuis R. P. Gill D. E. and Baass K. 1989. Laboratory permeability tests on sand: influence of the compaction method on anisotropy. *Canadian Geotechnical Journal*.

- 26: 614-622.
9. Chapuis R. P. and Aubertin M. 2003. On the use of the Kozeny– Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 40: 616-628.
  10. Choo H. Kim J. Lee W. and Lee C. 2016. Relationship between hydraulic conductivity and formation factor of coarse-grained soils as a function of particle size. *J Appl Geophys*. 127: 91-101.
  11. Mokwa R. L. and Trimble N. R. 2008. Permeability of coarse-grain soil from void space and pore distribution. In *GeoCongress 2008: Characterization, monitoring, and modeling of GeoSystems*, A. N. Alshawabkeh, K. R. Reddy, and M. V. Khire, eds., ASCE, Reston, VA. 428-435.
  12. Ören A. H. 2014. Estimating compaction parameters of clayey soils from sediment volume test. *Applied Clay Science*. 101: 68-72.
  13. Ranaivomanana H. Razakamanantsoa A. and Amiri O. 2016. Permeability prediction of soils including degree of compaction and microstructure. *International Journal of Geomechanics*. American Society of Civil Engineers. 04016107. 11.
  14. Sperry M. S. and Pierce J. J. 1995. A model for estimating the hydraulic conductivity of granular material based on grain size and porosity. *Ground Water*. 33(6): 892-898.
  15. Yokohama S. Seiichi M. and Satoshi M. 2014. Change in the hydromechanical characteristics of embankment material due to compaction state conditions. *Soils and Foundations*. 54.4: 731-747.
  16. Zhai Q. and Harianto R. 2015. Estimation of permeability function from the soil–water characteristic curve. *Engineering Geology*. 199: 148-156.
  17. Zhou W. H. Ka-Veng Y. and Fang T. 2014. Estimation of soil–water characteristic curve and relative permeability for granular soils with different initial dry densities. *Engineering Geology*. 179: 1-9.

