

بررسی تراوایی خاک رسی در برابر سیال قطبی و غیرقطبی

حامد رجبی صیقلانی*^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱ تاریخ چاپ: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱

چکیده

خاک های رسی به عنوان متداول ترین مصالح برای آب بندی مطرح هستند و در کنترل آلودگی ناشی از مراکز دفن زباله در دراز مدت نقش اساسی دارند. تحقیقات پیشین نشان می دهد که با کاهش ثابت دی الکتریک سیالات آلی، لایه دوگانه در اطراف ذرات رس فشرده شده و باعث افزایش نفوذپذیری خاک می گردد. هدف از مقاله حاضر، بررسی و مقایسه تغییرات نفوذپذیری خاک رس در برابر عبور آب و متانول به عنوان محلول های قطبی و حل شدنی در آب، بنزین و روغن سوخته به عنوان محلول های غیر قطبی و حل نشدنی در آب می باشد. همچنین اثر درصد رطوبت در انرژی تراکمی ثابت، نیز مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور انجام این پژوهش، خاک مورد نظر آماده شده و آزمایش نفوذپذیری به روش بار آبی ثابت بروی نمونه ها انجام می گیرد. همچنین تاثیر پارامترهایی چون ثابت دی الکتریک سیالات، ویسکوزیته آن ها و درصد رطوبت نمونه های خاکی مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که کاهش ثابت دی الکتریک سیال آلی، منجر به کاهش ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه افزایش نفوذپذیری خاک رس می گردد. بطوری که با کاهش ثابت دی الکتریک از ۱، ۸۰ به ۲،۳ نفوذپذیری تا ۲۵۰۰ برابر افزایش می یابد.

واژگان کلیدی

نفوذپذیری، ثابت دی الکتریک، درصد رطوبت، سیال آلی، خاک رس

پژوهشگاه بین المللی مطالعات فزنی
رتال جامع علوم انسانی

مقدمه

خاک یکی از مهمترین مصالح در طرح های مهندسی عمران می باشد و در بسیاری از پروژه های عمرانی، سازه ها بر روی خاک قرار گرفته و در برخی سازه ها، مانند سدهای خاکی، مصالح اصلی تشکیل دهنده سازه از خاک تشکیل شده است. لذا شناخت مشخصات و ویژگیهای خاک در مهندسی عمران از اهمیت زیادی برخوردار میباشد. از مهمترین پارامترهای مود نیاز جهت طراحی در سازه های بزرگ، به خصوص در سازه های آبی، نفوذپذیری در خاک و زمین ساختگاه می باشد. امروزه روشهای مختلفی برای تعیین این ضریب در محل و یا در آزمایشگاه با توجه به نوع خاک وجود دارد. پارامترهای مختلف زیادی در میزان نفوذپذیری خاک مؤثر میباشند. جهت تعیین آزمایشگاهی ضریب نفوذپذیری خاکهای ریزدانه از آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر استفاده می گردد که بدلیل پایین بودن ضریب نفوذپذیری خاک های ریزدانه، این آزمایش زمان بر خواهد بود.

در طراحی لایه های نفوذ ناپذیر مراکز دفن زباله و یا کف دریاچه هایی که محل تخلیه مخازن مواد شیمیایی در هنگام تخلیه اضطراری است، نیاز بر آنست که لایه خاک مورد استفاده بتواند جلوی جریان هرگونه محلول آلاینده ای را بگیرد. براساس قوانین آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا حداقل تراوایی این لایه های رسی تحتانی کف لندفیلها باید ۰۱۹ متر بر ثانیه باشد که در آلمان، برزیل و چین هم مقادیر مشابهی به عنوان مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. اگرچه در مواردیکه محلول سد شونده از نوع محلولهای آبی باشد، می توان از خاکهای رسی کوبیده شده استفاده کرد، اما باید به این نکته توجه داشت که عملکرد این خاکها در برابر مایعات و حلالهای غیر قطبی نظیر هیدروکربنها و یا دیگر حلالهای ارگانیک زیر سؤال است. از طرفی با توجه به اینکه خاک یک مخلوط سه فازی غیر یکپارچه از دانه های کانیها، مواد آلی، آب و هوا است، رفتار و ویژگیهای آن وابسته به پارامترهای مختلفی می باشد. جهت تعیین مشخصات و ویژگیهای خاک، در کنار روابط تئوری ارائه شده نیاز به انجام آزمایشهای مختلف صحرایی و آزمایشگاهی نیز بوده که با استفاده از نتایج این آزمایشها برای برخی پارامترهای خاک، روابط تجربی ارائه می گردد. نفوذپذیری خاکها به عوامل متعددی از جمله ویسکوزیته سیال، اندازه و توزیع اندازه حفرات، دانه بندی، نسبت تخلخل، زبری سطح دانه ها و درجه اشباع خاک بستگی دارد.

سایر عوامل مهم که در نفوذپذیری رس ها مؤثرند، عبارتند از: تمرکز یونی و ضخامت لایه آبی که در اطراف ذرات رسی نگه داشته شده است. ضریب نفوذپذیری برای خاک های با دانه بندی متفاوت به مقدار زیادی تفاوت می کند. از این رو بررسی عوامل مختلف مؤثر بر میزان تراوایی خاک موضوع مطالعه بسیاری از محققان بوده است. از میان تلاش های صورت گرفته جهت تخمین ضریب نفوذپذیری خاک ها و بررسی تأثیرگذاری خواص اولیه خاک بر روی میزان تراوایی می توان به تحقیقات زیر اشاره کرد:

Hazen (1911)، Carman (1937)، Burmister (1954)، Olson (1963)، Mitchell et al. (1965)، Wang and Huang (1983)، Koltermann and Gorelick (1995)، Benson and Trast (1995)، Boadu (2000)، Chapuis (2004)، Sinha and Wang (2008)، Cote et al. (2012)

اشاره کرد. در مطالعات ذکر شده به وضوح مشاهده می شود که ضریب نفوذپذیری خاک به مشخصات دانه بندی و حدود آتربرگ آن وابسته است.

مبانی نظری

آلودگی خاک و آبهای زیر زمینی توسط آلاینده های آلی، سمی و خطرناک یک مشکل گسترده زیست محیطی است. یک گروه از این آلودگی ها فراورده های نفتی است. نگرانی اصلی زیست محیطی که سلامت انسان و محیط زیست را به مخاطره می اندازد در طی تمام مراحل اکتشاف، استخراج، حمل و نقل و مصرف است. آلودگی خاک ناشی از فعالیت پتروشیمی و نشت بنزین نه تنها یک مسئله زیست محیطی است بلکه یک مسئله ژئوتکنیکی نیز می باشد هر روز مقدار زیادی بنزین بعنوان سوخت استفاده می شود از این رو تعداد زیادی مخزن در پالایشگاهها و پمپ بنزین ها برای ذخیره سازی آن وجود دارد؛ نشت از این مخازن یا تانکرهای حمل هر روزه به شمار آلودگی خاک با بنزین و دیگر مواد آلاینده می افزاید. واکنش فیزیکی و شیمیایی بین خاک و مواد آلاینده موجب تغییر در رفتار ژئوتکنیکی خاک می گردد که اثر آن بر ضریب نفوذپذیری خاک یکی از آن موارد می باشد. تعیین مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی خاکها همواره گام اول در کلیه طراحیها و ساخت و سازها در مهندسی عمران می باشد. سطح دقت در این ارزیابیها دارای اهمیت بسیار زیادی می باشد چرا که می تواند مسائل اقتصادی را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. از سوی دیگر در گامهای آغازین یک پروژه محدودیتهای مالی حاکم بر سطح دقت مورد نیاز در این ارزیابیهای اولیه است و معمولاً حجم بررسیهای اولیه ژئوتکنیکی و تعیین مشخصات مکانیکی خاک بستر دچار جرح و تعدیلهای قابل ملاحظه ای می گردد. به این موضوع زمان بر بودن انجام آزمایشهای آزمایشگاهی را باید افزود که پروسه طراحی های ژئوتکنیکی را دچار وقفه می کند. طراحی لایه های نفوذ ناپذیر مراکز دفن زباله و یا هسته رسی سدهای خاکها، از جمله مواردی است که نیاز به چنین ارزیابی هایی دارد. براساس قوانین آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا حداقل تراوایی این لایه های رسی تحتانی کف لندفیلها باید به ۱۰ به توان ۹- متر بر ثانیه باشد که در آلمان، برزیل و چین هم مقادیر مشابهی به عنوان مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. درخصوص هسته رسی سدهای خاکی نیز محدودیتهای مشابهی را میتوان یافت چرا که به عنوان یک اصل کلی بدنه سد به عنوان یک المان نفوذناپذیر در برابر جریانهای موجود باید عمل کند. در چنین مواردی یافت یک منبع قرضه مناسب که بتواند در یک سطح انرژی تراکمی مناسب تراوایی لازم را جهت اجرای یک لایه تحتانی رسی در کف لندفیل و یا هسته یک سد خاکی تامین نماید، می تواند به یک پروسه زمان بر تبدیل گردد چرا که انجام آزمایشهای تراکم و متعاقب آن آزمایشهای نفوذپذیری بسیار زمان بر هستند.

در خصوص خاکهای غیر رسی شرایط به مراتب پیچیده تر می باشد. اگرچه خاکهای رسی از دید مهندسی ژئوتکنیک به عنوان انتخاب اولیه جهت سد کردن هر گونه جریانی می تواند دارای کاربرد باشد، اما باید به این نکته توجه داشت که عملکرد این خاکها در برابر مایعات و حلالهای غیر قطبی نظیر هیدروکربنها و یا دیگر حلالهای ارگانیک زیر سؤال است. ضریب نفوذپذیری خاک به توانایی محیط متخلخل برای انتقال آب از حفرات خاک اطلاق می گردد. ضریب نفوذپذیری خاکها به عوامل متعددی از جمله: ویسکوزیته سیال، اندازه و توزیع اندازه حفرات، دانه بندی، نسبت تخلخل، زبری سطح دانه ها و درجه اشباع خاک بستگی دارد. در خاکهای رسدار، ساختار خاک تأثیر مهمی در ضریب نفوذپذیری نفوذپذیری دارد. سایر عوامل مهم که در نفوذپذیری رسها مؤثرند، عبارتند از: تمرکز یونی و ضخامت لایه آبی که در اطراف ذرات رسی نگه داشته شده است. ضریب نفوذپذیری برای خاکهای مختلف به مقدار زیادی تفاوت میکند. جدول ۲۰ حدود تغییرات ضریب- نفوذپذیری برای خاکهای مختلف را ارائه میکند.

جدول ۱- مقادیر مختلف ضریب نفوذپذیری

| نوع خاک | فوذپذیری (cm/sec) | ضریب نفوذپذیری (m/day) |
|-----------|-------------------|------------------------|
| شن تمیز | ۱-۱۰۰ | ۸۶۴-۸۶۴۰۰ |
| ماسه درشت | ۰/۰۱-۱ | ۸/۶۴-۸۶۴ |
| ماسه ریز | ۰/۰۰۱-۰/۰۱ | ۰/۸۶-۸/۶۴ |
| لای | ۰/۰۰۰۰۱-۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰۸۶-۰/۸۶ |
| رس | کمتر از $۱۰^{-۶}$ | کمتر از $۰/۰۰۰۸۶$ |

همانگونه که در جدول بالا مشاهده میشود، خاکهای درشتدانه ضریب نفوذپذیری بیشتری دارند و با افزایش سهم ریزدانه خاک قابلیت نفوذپذیری خاک کاهش میابد. به طور کلی به منظور تعیین ضریب نفوذپذیری خاکها از روشهای متعددی میتوان بهره گرفت که در ادامه ارائه خواهد شد:

الف) روشهای مستقیم:

۱- روش آزمایشگاهی: روش هد ثابت- روش هد - متغیر

۲- روشهای صحرایی- : نتایج آزمایش پمپاژ- حفر چاههای گمانه

ب) روشهای غیرمستقیم: ۱- استفاده از نتایج آزمایش تحکیم و سه محوری ۲- استفاده از فرمولهای تجربی با استفاده از سایر خواص خاک

۲-۲ جریان آب در خاک

بررسی جریان آب عبوری از خاک یکی از مسایل بنیادی در مکانیک خاک و مهندسی محیط زیست می باشد. بدیهی است که اگر آبی در خاک وجود نداشته باشد، هیچ اکو سیستمی و هیچ انسانی بر روی زمین نخواهد بود و لزوماً دیگر احتیاجی به مهندسی مکانیک خاک و محیط زیست نیست. مقدار جریان، اغلب به عنوان پارامتر کلیدی در تعیین افتهای دبی خروجی از یک مخزن و مقدار آب قابل مصرف خانگی و مصارف صنعتی در نظر گرفته می شود. در بررسی جریان آب در خاک، مهم ترین مسأله، فشار آب حفره ای است. فشار آب حفره ای چه مثبت و چه منفی یک نسبت مستقیم با مقاومت برشی و خصوصیات تغییر شکل خاک دارد. در چند دهه گذشته تحقیقات نشان می دهد که حتی جریان مرطوب در خاک غیراشباع نزدیک سطح زمین با مکش خاک (فشار منفی آب) رابطهای مستقیم دارد. بنابراین حتی اگر مقدار جریان هدف اصلی باشد، مهم آن است که فشارهای آب حفره ای به طور دقیق شناسایی شود. در گذشته، تحلیلهای مرتبط با جریان آب زیرزمینی بر روی جریان در خاک اشباع متمرکز بود. این مسایل به دو صورت معمولاً وجود داشتند. در حالت اول سفره آب زیرزمینی محصور بوده و تحت فشار قرار می گیرد در حالت دوم سفره آزاد بوده و تحت فشار قرار ندارد. مسایل نامحصور جریان بسیار دشوارتر تحلیل می شوند زیرا تحلیل آن احتیاج به تعیین سطح آزاد آب دارد. از این رو سطح آزاد آب به صورت یک مرز فوقانی در نظر گرفته شده و از جریانهایی که ممکن است در ناحیه موینگی بوجود بیاید، صرف نظر می شود.

این ساده سازی و صرف نظر کردن از جریان غیراشباع بالای سطح آزاد آب قابل قبول نیست. انجام این کار نه فقط چشم پوشی از یک جزء با اهمیت، از جریان آب در خاک است بلکه مهمتر این است که انواع مسایلی که می تواند مورد تحلیل قرار گیرد، محدود می شود. جریان غیراشباع در وضعیتهای متنوع مانند تراوش ناشی از بارندگی باید بررسی شود. موارد جریانهای زودگذر نیز مثال خوبی از این دست می باشند. تقریباً این امکان وجود ندارد که تراوش آب باران در زمین را بدون در نظر گرفتن شرایط خاک غیراشباع مدل نمود. اصطلاح تراوش معمولاً به وضعیتهایی که نیروی رانش اولیه توسط گرانش زمین کنترل می شود، اطلاق میگردد؛ نظیر تراوش و افتهای مربوطه از یک مخزن که نیروی رانش مجموع اختلاف هد هیدرولیکی بین نقاط ورودی و خروجی است. یعنی حرکت آب صرفاً ناشی از نیروی گرانشی می باشد.

۲-۲-۱ نفوذ پذیری و نشت

هر توده خاکی از دانه های جامد با اندازه های مختلف و فضاهای خالی به هم پیوسته تشکیل شده است. فضاهای خالی به هم پیوسته در خاک این اجازه را میدهند که آب از یک نقطه با انرژی بیشتر به سمت یک نقطه با انرژی کمتر حرکت کند. خاصیتی از خاک که اجازه نشت مایعات از بین فضاهای خالی به هم پیوسته را می دهد، خاصیت نفوذ پذیری نامیده

می شود. در ابتدا جهت سهولت یادگیری مفاهیم پایه یادآوری می شود. در این قسمت تنها به نفوذ پذیری و نشت در خاک اشباع می پردازیم و روابط حاکم بر خاک های غیر اشباع در قسمت بعدی بیان می شود.

۲-۲-۲ قانون دارسی

دارسی یک رابطه ساده بین سرعت جریان و شیب هیدرولیکی را انتشار داد: $V=ki$

که در آن:

V = سرعت جریان دارسی

i = شیب هیدرولیکی

K ضریب نفوذ پذیری

و در نتیجه دبی نشت Q به صورت زیر داده می شود:

$$Q=kiA$$

لازم به یادآوری است که A سطح مقطع عرضی خاک عمود بر امتداد جریان می باشد. ضریب نفوذ پذیری K دارای واحد سرعت نظیر cm/s یا mm/s می باشد و شاخصی از میزان مقاومت خاک در برابر حرکت آب است. در خاک اشباع K را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$k(cm/s)=K\rho g\mu$$

که در آن:

K نفوذ پذیری ذاتی بر حسب cm/s

ρ جرم حجمی ماده بر حسب kg/cm^3

g شتاب ثقل زمین بر حسب cm/s^2

μ لزجت مطلق ماده بر حسب پواز $gr/(cm.s)$

سرعت v داده شده در معادله بالا سرعت جریان محاسبه شده بر اساس سطح کل مقطع عرضی است. از آنجا که آب فقط می تواند از میان فضای حفره های پیوسته جریان پیدا کند، سرعت واقعی نشت از میان خاک، v توسط رابطه زیر داده می شود:

$$Vs=vn$$

که n درجه پوکی خاک است. در خاک غیر اشباع، این سرعت واقعی متوسط برابر با سرعت دارسی تقسیم بر محتوای حجمی آب در خاک است. به طور کل ضریب نفوذ پذیری به عوامل متعددی بستگی دارد که اغلب آنها در ذیل آورده می شوند:

□ شکل و اندازه دانه های خاک

□ نسبت تخلخل، نفوذ پذیری با افزایش نسبت تخلخل افزایش می یابد.

□ درجه اشباع، نفوذ پذیری خاک با افزایش درجه اشباع، افزایش پیدا می کند.

ترکیب دانه های خاک ؛ این عامل برای خاک های دارای کانی های رس از عوامل بسیار مهم می باشد. نفوذپذیری در این حالت بستگی به ضخامت آب نگداشته شده در ذرات خاک دارد که خود تابعی از تبادل یون منفی و ظرفیت کاتیون ها و غیره است. وجود بار منفی در سطح ذرات رس یک لایه دوگانه از آب در اطراف ذرات ایجاد می نماید. با ثابت ماندن سایر عوامل، ضریب نفوذپذیری با افزایش ضخامت لایه دوگانه کاهش پیدا می کند.

لزجت مایع نفوذکننده.

چگالی و غلظت مایع نفوذکننده.

درجه حرارات.

۲-۲-۳ گرادیان هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی افقی، یکی از مهمترین مشخصه های هیدرودینامیکی خاک است که در محاسبه فاصله های زهکشی زیرزمینی مورد نیاز بوده و در مطالعات زهکشی مورد توجه قرار می گیرد. روشهای متعددی برای اندازه گیری صحرائی هدایت هیدرولیک اشباع خاک وجود دارد که اساس کلیه آنها بر اندازه گیری سرعت جریان افقی آب در خاک استوار است. بر حسب اینکه اندازه گیری سرعت جریان آب در خاک در زیر سطح ایستابی یا در بالای سطح ایستابی صورت گیرد، روشهای تعیین هدایت هیدرولیک نیز متفاوت خواهد بود. برای اندازه گیری در شرایط زیر سطح ایستابی، دو روش، بیش از سایر روشها متداول و معمول است که یکی به روش چاهک و دیگری به روش حفره زیر لوله یا روش پیزومتری موسوم است. وقتی آب در محیط اندازه گیری نباشد، روش های چاهک معکوس یا پورشه، تزریق چاهک و روش موسوم به نفوذسنج گلف به کار برده می شود. هدایت هیدرولیک قائم نیز در زهکشی اهمیت داشته و برای اندازه گیری آن، از روش تیوب یا روش استوانه استفاده می شود. هرچند مبانی علمی و روش های فنی اندازه گیری هدایت هیدرولیکی در حدود متعارف خود شناخته شده و در مآخذ مختلف توضیحاتی کلی در مورد آن داده شده است، ولی تجربه نشان داده که افراد مختلف متناسب با برداشتها و استنباطهایی که از مآخذ به دست می آورند، روشهایی را به کار می برند که بالقوه می تواند به نتیجه های متفاوتی از یکدیگر منجر شود. در چنین شرایطی، در عمل، قضاوت درباره نتیجه های به دست آمده از اندازه گیری، اشکال به وجود خواهد آورد. اگر فرض کنیم که سیل از نقطه A به نقطه B با سرعت V و با فشار P در جریان باشد، مقدار هد آب یا سیل در نقطه A برابر است با $hA=ZA+PA\gamma W+VA^2/2g$

$$hB=ZB+PB\gamma W+VB^2/2g$$

و در نقطه B برابر است با:

اما هد سیال در نقطه B کمتر از A خواهد بود یعنی مقدار $\Delta h=hA-hB$ انرژی کم شده است و علت آن اصطکاک

است که مولکول های سیال در برخورد با هم در حین حرکت پیدا می کنند و مقداری از انرژی خود را از دست می

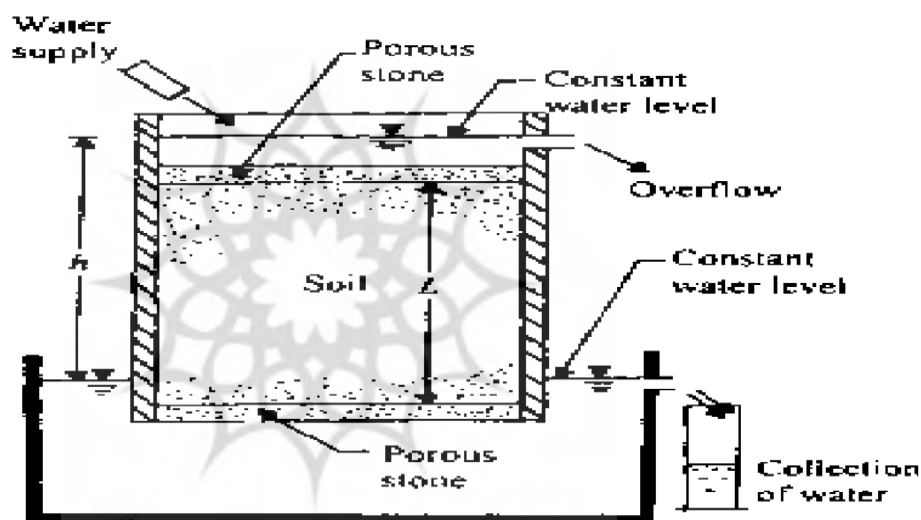
دهند. این افت انرژی در طول L در واحد طول به دست آوردیم. کافی است که Δh را بر L تقسیم کنیم این صورت شیب هیدرولیکی به دست می آید. در واقع شیب هیدرولیکی عبارتست از مقدار افت انرژی سیال در واحد طول که دیمنسیون آن بدون بعد است.

$$i = \Delta h / L$$

تعیین ضریب نفوذپذیری در آزمایشگاه

آزمایش بار ثابت

آزمایش بار ثابت برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاکهای درشت دانه که دارای ضریب نفوذپذیری بزرگی هستند، مفید میباشد. در این آزمایش دبی ورودی طوری تنظیم میشود که اختلاف بار بین ورودی و خروجی در طی آزمایش ثابت بماند. بعد از ثابت شدن اختلاف بار و دبی ورودی، توسط یک ظرف مدرج، مقدار خروجی در مدت زمان مشخصی اندازهگیری میشود. اصول کلی دستگاه در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت

با استفاده از مقدار آب خروجی، مدت زمان میتوان ضریب نفوذپذیری خاک را اندازه گرفت

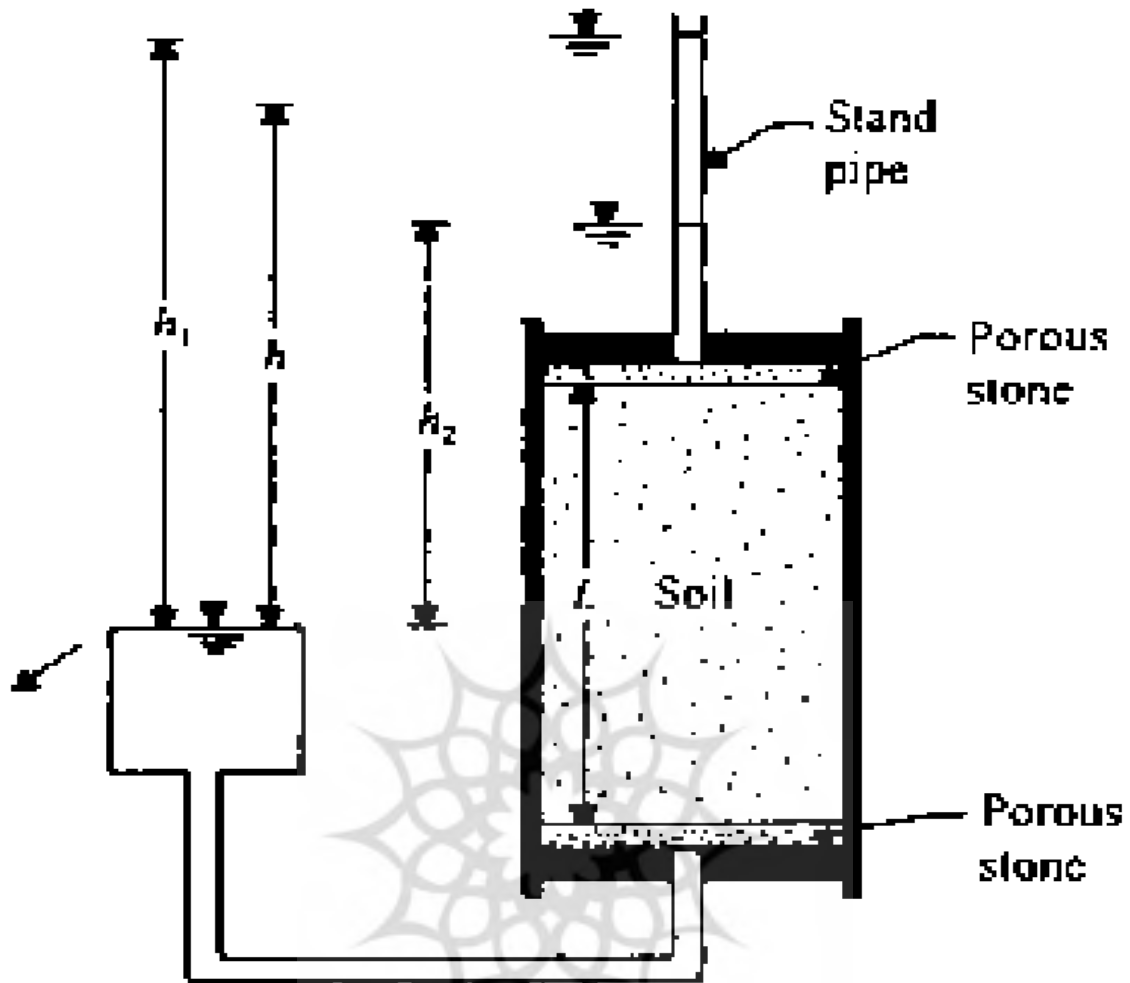
$$k = QL / Aht$$

Q : حجم آب جمع شده، A : سطح مقطع نمونه خاک، t : مدت زمان جمع آوری آب و L طول نمونه

آزمایش بار افتان

آزمایش بار افتان برای خاکهای ریزدانه با ضریب نفوذپذیری کم مفید است. اصول کلی دستگاه آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. آب از طریق یک لوله قائم وارد خاک میشود. در زمان $t=0$ اختلاف پتانسیل اولیه h_1 ثبت شده و به آب اجازه داده میشود که از میان نمونه خاک جریان یابد. اختلاف پتانسیل نهایی در زمان $t=t_f$ مساوی h_2 ثبت میگردد. در نهایت ضریب نفوذپذیری با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

$$k = 2.303aL / At \log_{10} h_1 / h_2$$

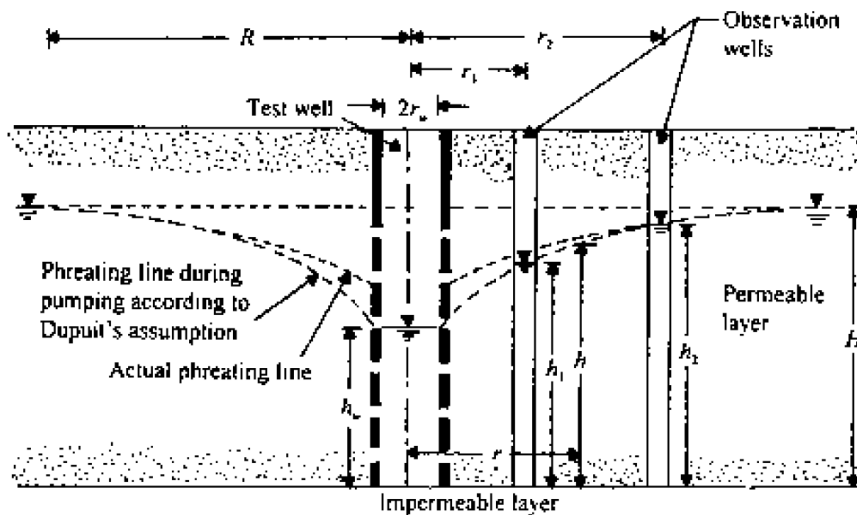


شکل ۲-۳ آزمایش نفوذپذیری با هد افتان

تعیین ضریب نفوذپذیری در صحرا

آزمایش پمپاژ

در صحرا ضریب نفوذپذیری متوسط یک لایه رسوبی خاک در امتداد جریان را میتوان با پمپاژ یک چاه آزمایشی به دست آورد. شکل ۲-۴ حالتی را نشان میدهد که قرار است ضریب نفوذپذیری لایه فوقانی نفوذپذیر که بر روی یک لایه نفوذناپذیر قرار دارد، اندازه گیری شود.



شکل ۲-۴ آزمایش پمپاژ چاه در یک لایه نفوذپذیر قرار گرفته روی یک لایه نفوذ ناپذیر

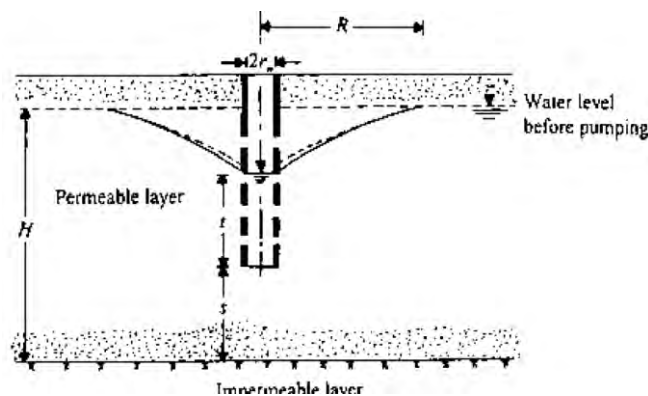
در انجام آزمایش، آب با دبی ثابتی از چاه آزمایشی که دارای پوسته سوراخدار میباشد، پمپ میشود. در اطراف چاه پمپاژ، در فواصل مختلف شعاعی، چاههای مشاهدهای ایجاد میشود. بعد از شروع پمپاژ تا لحظهای که حالت دائمی به وجود آید، تراز سفره آب زیرزمینی در چاه اصلی و چاههای مشاهدهای اندازهگیری میشود. وقتی که تراز سفره آب زیرزمینی در چاه اصلی و چاههای مشاهدهای ثابت بماند، حالت دائمی به وجود میآید. رابطه دبی آب ورودی از سفره آب زیرزمینی به داخل چاه، q ، که مساوی دبی پمپاژ میباشد، به صورت زیر به دست می آید:

$$q = k \left(\frac{dh}{dr} \right) 2\pi r \cdot h$$

در صورتی که از اندازه گیریهای صحرائی، r_1 ، $2r$ و h_1 و h_2 معلوم باشند، ضریب نفوذ پذیری را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$k = \frac{2.303q \log_{10}(r_1 r_2)}{\pi (h_1^2 - h_2^2)}$$

ضریب نفوذپذیری متوسط برای یک لایه آبدار بسته را نیز میتوان با آزمایش پمپاژ چاهی که به طور کامل در تمام عمق لایه آبدار وارد شده به همراه چند چاه مشاهده به دست آورد (شکل ۲-۵)



شکل ۲-۵ آزمایش پمپاژ از چاهی که به طور کامل در لایه آبدار فرورفته است

پمپاژ با دبی ثابت تا رسیدن به حالت دائمی ادامه پیدا میکند. از آنجایی که آب زیرزمینی فقط از طریق ضخامت H لایه آبدار میتواند وارد چاه شود، دبی در حالت دائمی برابر است با:

$$q = k(dh/dr)2\pi r.H$$

با استفاده از رابطه فوق، ضریب نفوذپذیری در امتداد جریان برابر میشود با:

$$k = \frac{q \log_{10}(r_1/r_2)}{2.727H(h_1 - h_2)}$$

آزمایش چاه گمانه

ضریب نفوذپذیری را میتوان در صحرا از طریق چاه گمانه نیز تعیین کرد (شکل ۲-۶) برای آزمایش، چاه مته ای که به عمق L داخل سفره آب زیرزمینی شده، حفر میگردد. سپس آب از درون گمانه ها پمپاژ میشود تا سطح آب درون آن افت نماید. بعد از قطع پمپاژ، آب از طریق جداره و کف وارد گمانه شده و سطح آب آن بالا میاید. بالا آمدن تراز آب در گمانه به همراه زمان مربوطه ثبت میشود. با استفاده از قرائتهای صورت گرفته میتوان ضریب نفوذپذیری را از رابطه زیر به دست آورد:

$$k = 40(20 + L/r)(2 - y/L)r/y\Delta y/\Delta t$$

که در آن، L بر حسب متر و k بر حسب متر بر ثانیه و Γ شعاع چاه گمانه

$Y =$ مقدار متوسط فاصله تراز آب درون چاه گمانه تا تراز آب در سطح آزاد سفره آب زیرزمینی طی فاصله زمانی t



شکل ۲-۶ تعیین ضریب نفوذپذیری از چاه گمانه

۲-۵ تخمین ضریب نفوذپذیری با استفاده از روابط تجربی

استفاده از مشخصات دانه بندی و مشخصات خمیری خاک (حد روانی، حد خمیری، نشانه خمیری و حد انقباض جهت تخمین تراوایی خاک موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. از میان تحقیقات صورت گرفته بر روی ضریب هدایت هیدرولیکی میتوان به شناخته شده ترین آنها که رابطه Hazen (1911) میباشد، اشاره کرد. بر اساس مطالعات وی، ضریب نفوذپذیری خاک ماسهای با دانه بندی یکنواخت با مربع اندازه مؤثر ذرات D_{10} رابطه مستقیم دارد.

$$K = AD_{10}^2$$

که در آن K ضریب هدایت هیدرولیکی بر حسب cm/sec ، A عدد ثابت در حدود ۱ تا $1/5$ و D_{10} قطر موثر ذرات (قطری که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچکتر هستند) بر حسب mm می باشد.

Uma et al. 1989 رابطه ای مشابه رابطه ارائه شده توسط هازن یافتند، اما نشان داده شد که ضریب A که تاکنون ثابت فرض میشد، متغیر است و به طبیعت ژئولوژیک خاک وابسته است. هم چنین نشان داده شد که مقدار A برای ماسه تحکیم نیافته برابر ۶ و ماسه های تحکیم یافته $3/8$ و خاکهای متراکم شده برابر ۲ می باشد. در ادامه Zunker 1930 به ارائه رابطهای خطی در مقیاس لگاریتمی بین پارامترهای دانه بندی و نفوذپذیری خاک با دانه بندی یکنواخت پرداخت. از سوی دیگر، مطالعات صورت گرفته توسط urmister 1954 و Horn 1971 و Chen بیانگر این است که تخمین ضریب نفوذپذیری خاک با استفاده از اندازه متوسط ذرات نتایج بهتری به دست می دهد، نسبت به حالتی که از اندازه مؤثر ذرات استفاده شده است. Wang & Huang 1984 با استفاده از ۵۷ مورد اطلاعاتی از خاکهایی که بصورت مصنوعی تولید شده بودند روابطی را برای تعیین مشخصات تراکمی خاک و نیز تراوایی آن با استفاده از پارامترهای نظیر D_{10} و D_{50} مدول ریزی FM ضریب یکنواختی (U) و درصد ذرات ریزتر از 0.075 میلی متر ارائه کردند. در تحقیق مذکور، دو مدل برای تخمین ضریب نفوذپذیری ارائه شده است که مربوط به تراوایی در دو سطح انرژی تراکم 90% و 95% می باشد.

$$\log_{10}k_{90} = -2.611 - 0.0053LL - 0.0096PL - 0.328\log_{10}D_{50} - 0.328\log_{10}D_{10}$$

$$\log_{10}k_{90} = -2.611 - 0.0053LL - 0.0096PL - 0.328\log_{10}D_{50} - 0.328\log_{10}D_{10}$$

آنها همچنین با ترکیب دو رابطه بالا رابطهای ارائه کردند که قادر به تخمین نفوذپذیری خاکهایی با درصد تراکم بین 90% تا 95% درصد میباشد.

$$\log_{10}K = (1692.9/P - 21.421) + (1.026/P - 0.017)LL + (2.394/P - 0.036)PL - \log_{10}D_{50} - (82.08/P - 0.584)\log_{10}D_{10}$$

در رابطه بالا P درصد تراکم است که مقداری بین 90% تا 95% میتواند داشته باشد. رابطه ارائه شده نسبت به روابط قبلی طیف وسیعتری از خاکها را در بر میگیرد.

رابطه Kozeny-Carman 1937 با دقت مناسبی می تواند تراوایی یک خاک را بصورت تابعی از تخلخل خاک تعیین نماید. واضح است که حداقل تخلخل یک خاک مترادف با حداکثر چگالی خشک یک خاک است که طی آزمایش تراکم قابل تعیین است.

$$K = (\rho_w g / \mu) e^3 / (1 - e)^2 (D_m^2 / 180)$$

که در آن ρ_w چگالی سیال μ ویسکوزیته سیال، n تخلخل و D_m اندازه ذره مؤثر است. انتخاب این اندازه در موفقیت و دقت تخمین هدایت هیدرولیکی به شدت تأثیر گذار است. همان طور که در تحقیقات Koltermann & Gorelick 1995 آمده است، استفاده از میانگین هندسی در روابط سبب میشود که مقدار ضریب نفوذپذیری برای خاکهایی با درصد ریزدانه قابل توجه، کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده شود. از سوی دیگر نتایج بیانگر این امر است که

استفاده از میانگین هارمونیک در خاکهایی با درصد ریزدانه کم موجب تخمین مقادیر بیشتر ضریب نفوذپذیری نسبت به مقادیر واقعی آن میشود. همانگونه که در مطالعات ذکر شده مشخص است، انتخاب اندازه ذرات در دقت روابط به دست آمده تأثیر بسیار زیادی دارد. از این رو، Boadu 2000 ایده ابتکاری بعد فراکتال و آنتروپی را به عنوان شاخص های ذاتی منحنی دانه بندی خاک جهت تعیین تراوایی خاک مطرح کرد. وی با مطالعه نمونه هایی که آزمایشات تراکم، نفوذپذیری با هد ثابت و متغیر و دانه بندی به روش الک های استاندارد بر روی آنها صورت گرفته و استفاده از تحلیل های رگرسیون رابطه زیر را برای تخمین میزان تراوایی خاک ها ارائه کرد.

$$\ln K = 33.09 + 0.10P - 0.18n + 0.33S - 7.36D - 11.09\rho$$

در رابطه فوق P درصد ریزدانه، n تخلخل، S آنتروپی، D دانسیته می باشد. مفهوم آنتروپی به ارائه اطلاعاتی ρ بعد فراکتال و در خصوص نحوه قرارگیری و طبقه بندی ذرات خاک میپردازد. آنتروپی با رابطه زیر تعریف میشود:

$$S(P) = -\sum p_i \ln p_i$$

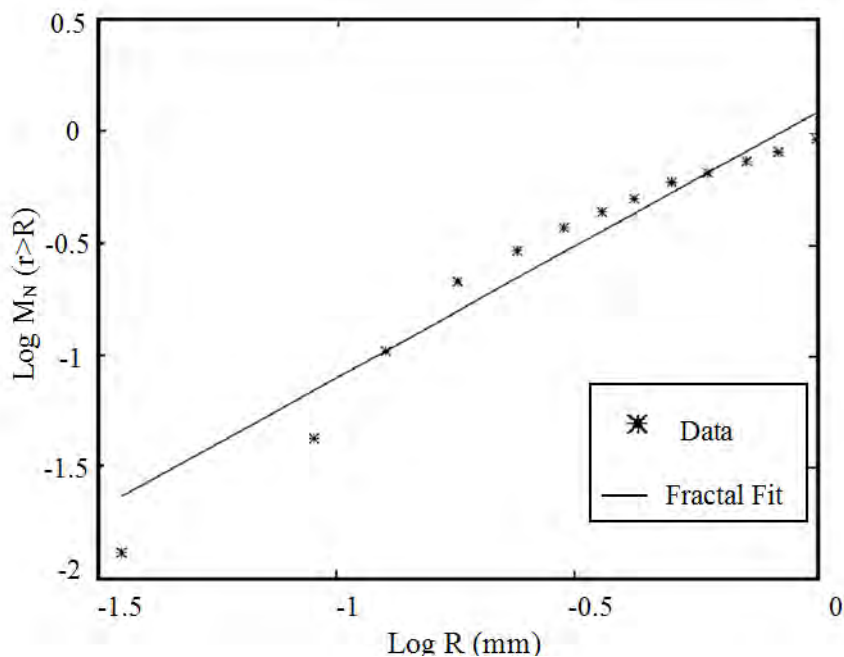
که در آن P_i درصد جرم باقیمانده بر روی الک i ام تعریف میشود. خاکهایی با آنتروپی کمتر، بدانه بندی شده اند و محدوده کمتری از اندازه ذرات را در بر میگیرند. در مقابل خاکهایی با آنتروپی بیشتر خوب دانه بندی شده اند و محدوده وسیعتری از اندازه ذرات را در بر میگیرند. خاکهای خوب طبقه شده دارای تخلخل کمتری هستند که این امر سبب افزایش ضریب نفوذپذیری خاک میشود. (Turcotte (1986) و Mandelbrot (1982) رابطه ای بر اساس مفهوم فراکتال برای توزیع دانه بندی ارائه کردند:

$$N(r > R) \propto R^{3-D}$$

که در آن N تعداد ذراتی است که اندازه آنها از R بزرگتر است و D بعد فراکتال است. از آنجا که شمارش تعداد ذرات عملاً امکان پذیر نیست، از توزیع جرم ذرات استفاده میشود. از این رو از رابطه زیر برای محاسبه بعد فراکتال استفاده میشود:

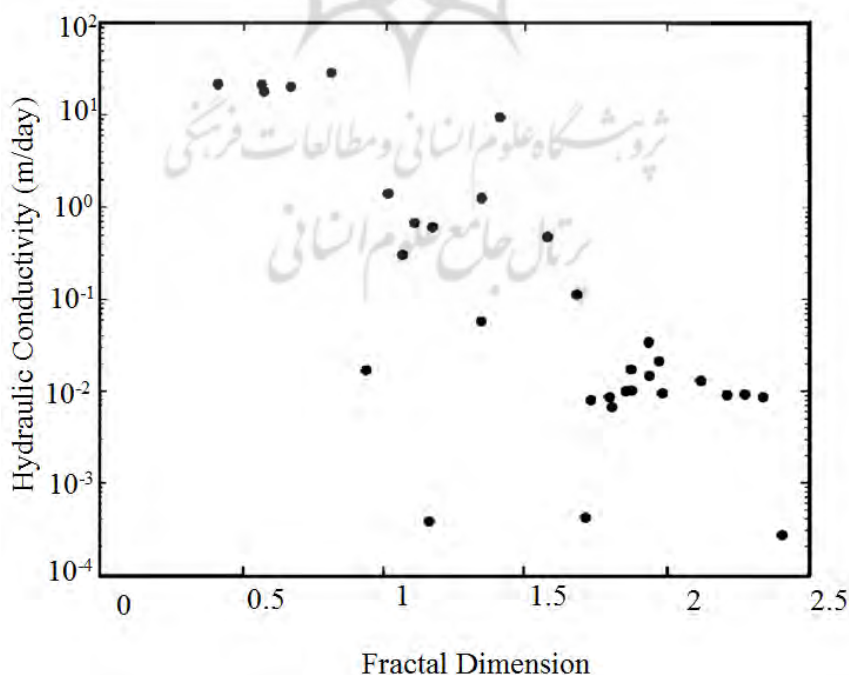
$$M(r < R) / MT = (R / RUL)^{3-D}$$

در رابطه فوق RUL بزرگترین اندازه ذرات، $M(r < R)$ جرم ذرات با قطر کوچکتر از R و MT جرم کل ذرات است. در عمل برای به دست آوردن بعد فراکتال از طرفین رابطه فوق لگاریتم گرفته میشود و با برازش رگرسیون خطی، D به دست می آید. شکل ۲-۷ نمونه های از نمودار جرم تجمعی نرمالیزه شده را در برابر اندازه ذرات نرمالیزه شده نشان می دهد.



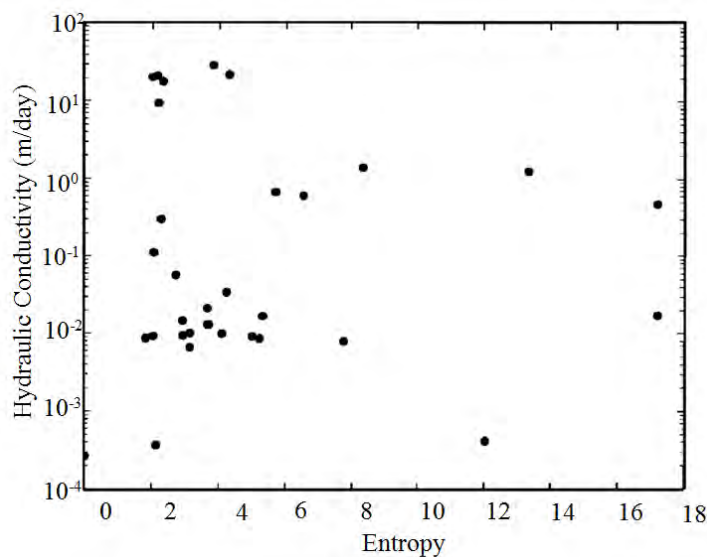
شکل ۲-۷ نمودار تجمعی جرم ذرات در برابر اندازه ذرات (Boadu, 2000)

وی همچنین در تحقیقات خود به بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری با تغییرات مقادیر بعد فراکتال، آنتروپی و درصد ریزدانه پرداخت. همانگونه که در شکل ۲۰ مشاهده میشود، با افزایش بعد فراکتال ضریب نفوذپذیری خاک کاهش مییابد. به عبارت دیگر مقادیر کمتر D ، حاکی از محدوده خاصی از اندازه ذرات است. این در حالی است که مقادیر بالای D بیانگر طیف وسیعی از اندازه ذرات است.



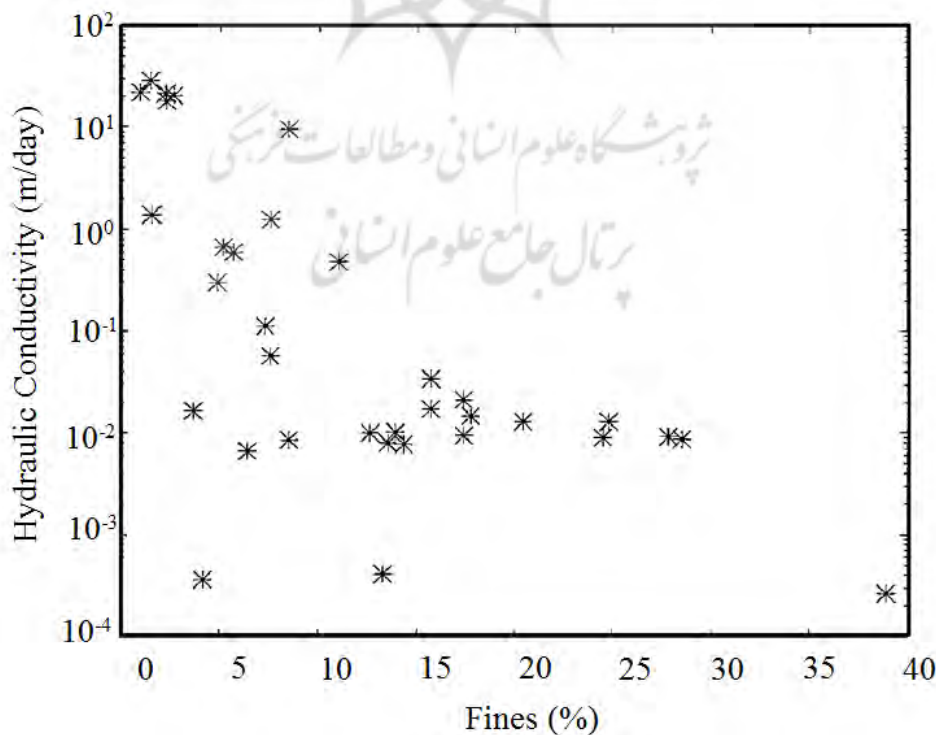
شکل ۲-۸ رابطه بین ضریب نفوذپذیری خاک و بعد فراکتال منحنی دانه بندی (Boadu, 2000)

همانگونه که در شکل ۲-۹ نمایان است، نمیتوان روند مشخصی بین ضریب نفوذپذیری و آنتروپی پیدا کرد. ولی به طور کلی میتوان ادعا کرد که با افزایش آنتروپی، میزان نفوذپذیری خاک روندی کاهشی دارد.



شکل ۲-۹ رابطه بین ضریب نفوذپذیری خاک و آنتروپی (Boadu, 2000)

ترسیم تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر تغییرات درصد ریزدانه بیانگر روند کاهشی ضریب نفوذپذیری به ازای افزایش درصد ریزدانه میباشد. البته لازم به توضیح است که افزایش درصد ریزدانه تا ۱۱ درصد موجب کاهش چشمگیر مقادیر نفوذپذیری میشود ولی افزایش درصد ریزدانه بیشتر از این مقدار تغییر قابل توجهی در ضریب نفوذپذیری خاک ایجاد نمیکند. (شکل ۲-۱۰)



شکل ۲-۱۰ تغییرات ضریب نفوذپذیری با درصد ریزدانه (Boadu, 2000)

Alyamani & Sen (1993) با مطالعه ۳۲ مورد خاک ماسه‌ای رابط‌های بین هدایت هیدرولیکی اشباع، اندازه ذرات خاک و عرض از مبدأ منحنی دانه بندی ارائه کردند. رابطه به دست آمده بیانگر رابطه مستقیم بین ضریب نفوذپذیری و عرض از مبدأ منحنی دانه بندی می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش عرض از مبدأ منحنی دانه بندی، سبب افزایش درصد ذرات درشت دانه می‌شود که این امر موجب افزایش میزان تراوایی خاک می‌شود.

$$k=1.505 [I_0+0.025(D50-D10)]^2$$

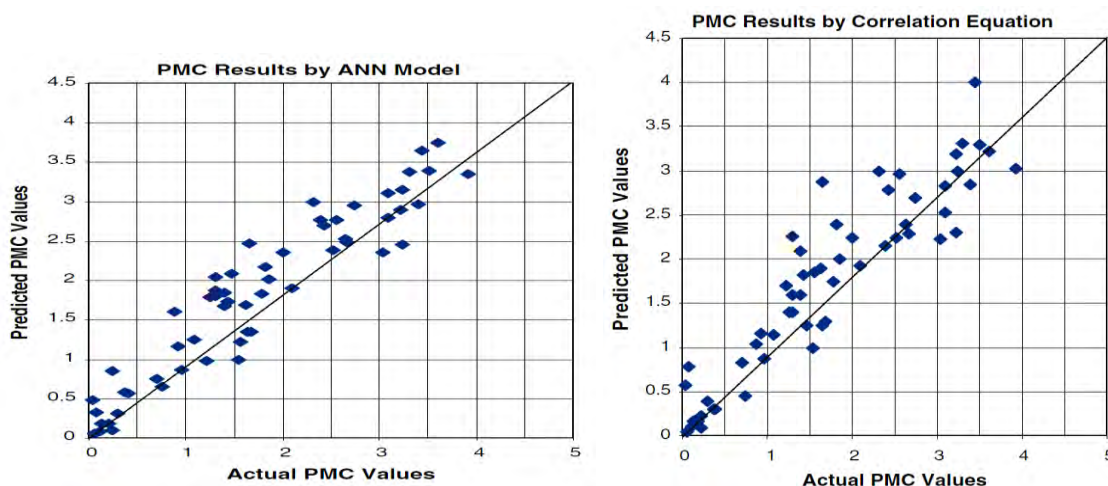
در رابطه فوق I_0 بیانگر عرض از مبدأ منحنی دانه بندی است و $D50-10$ نیز بیانگر شیب منحنی دانه بندی رسم شده بر روی کاغذ معمولی است. مشاهده می‌شود که رابطه ای معکوس بین هدایت هیدرولیکی و شیب منحنی دانه بندی برقرار است. با افزایش شیب منحنی دانه بندی، درصد ریزدانه زیاد می‌شود و متعاقب آن ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

مطالعات صورت گرفته توسط Chapuis (2004) به ارائه رابط‌های تجربی بین ضریب نفوذپذیری و پارامترهای دانه بندی خاک می‌پردازد. همانطور که رابطه زیر نشان می‌دهد، نتایج بیانگر این است که ضریب نفوذپذیری با استفاده از تخلخل و اندازه مؤثر ذرات ($D10$) با دقت قابل قبولی تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که رابطه به دست آمده برای خاکهای ماسه ای طبیعی و خاکهای رسی غیر خمیری کاربرد دارد.

$$K=0.00246[D10^2(n^3/(1-n)^2)]^{0.7825}$$

وی در تحقیقات خود سعی بر آن داشت که رابطه فوق را به سنگهای خرد شده نیز تعمیم بدهد، ولی نتایج حاکی از مغایرت مقادیر به دست آمده از رابطه و مقادیر واقعی ضریب نفوذپذیری داشت. علت این امر را میتوان به زاویه دار بودن ذرات خرد شده سنگ و تفاوت در حفرات موجود در بین آن نسبت به خاک طبیعی دانست.

Sinha & Wang (2008) با استفاده از سیستم شبکه‌های عصبی هوشمند ۰ به ارائه مدلی جهت تخمین ضریب نفوذپذیری خاکها پرداختند. آنها در مطالعات خود به این نکته توجه داشتند که روابط و معادلات رگرسیون تنها در محدوده خاصی از پارامترهای ورودی قادر به عملکرد صحیح می‌باشند و گسترش محدوده داده‌ها منجر به بروز خطاهای قابل توجه می‌شود. این در حالی است که مدلهای به دست آمده از شبکه‌های عصبی هوشمند این مشکل را ندارند. آنها با بهره‌گیری از شبکه ای با ۵ پارامتر ورودی و یک لایه پنهان مشتمل بر ۳ نرون به تخمین نفوذپذیری خاک پرداختند. در تحقیق مذکور با استفاده از بانک داده‌های Wang & Huang (1984) و در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر D_{10} ، D_{50} ، LL ، PL و P درصد تراکم (مدلی ارائه شده که مقایسه نتایج آن با نتایج به دست آمده از رابطه Wang & Huang (1984) بیانگر عملکرد بالای این روش است. همانگونه که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است، مدل به دست آمده از سیستم شبکه عصبی هوشمند از دقت بالاتری نسبت به مدل ارائه شده توسط Wang & Huang برخوردار است.



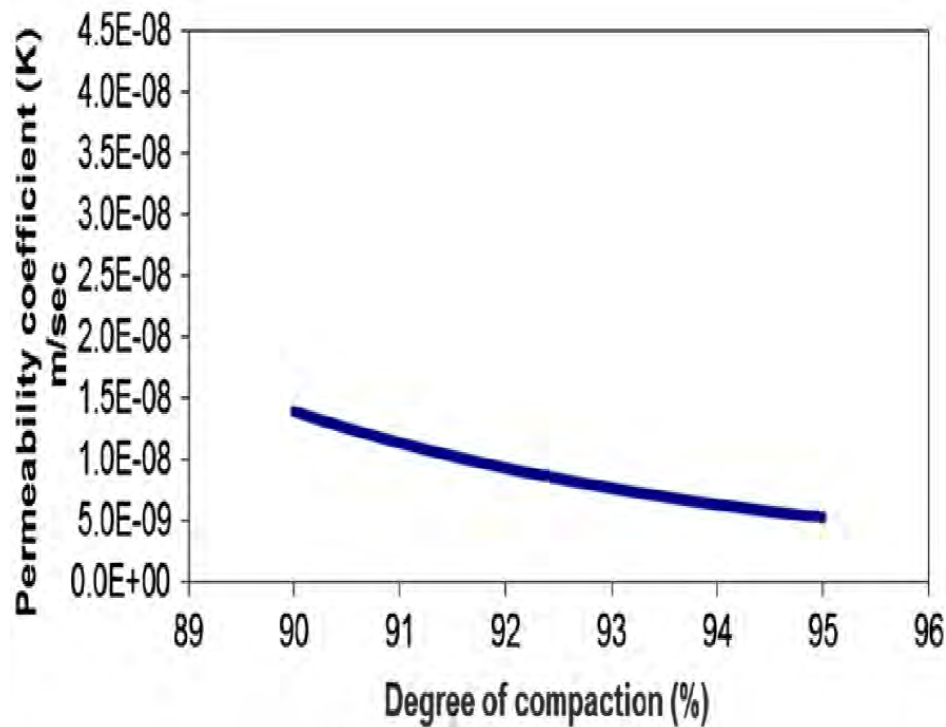
شکل ۲-۱۱ مقایسه مقادیر ضریب نفوذپذیری با استفاده از الف

(رابطه - Wang & Huang, 2008، ب) شبکه عصبی مصنوعی (Sinha & Wang, 2008)

در تحقیقی دیگر ۲۰۱۱ et al Asr -Ahangar با استفاده از نرم افزار ۲ EPR و همچنین با استفاده از داده‌های Wang & Huang (1984) به ارائه مدلی جهت تخمین تراوایی خاک پرداخته شده است. لازم به ذکر است که نرم افزار یاد شده مبتنی بر رگرسیون تکاملی چند جمله‌ای می باشد که در فصل سوم به معرفی آن پرداخته خواهد شد. رابطه به دست آمده در تحقیق فوق عبارتست از:

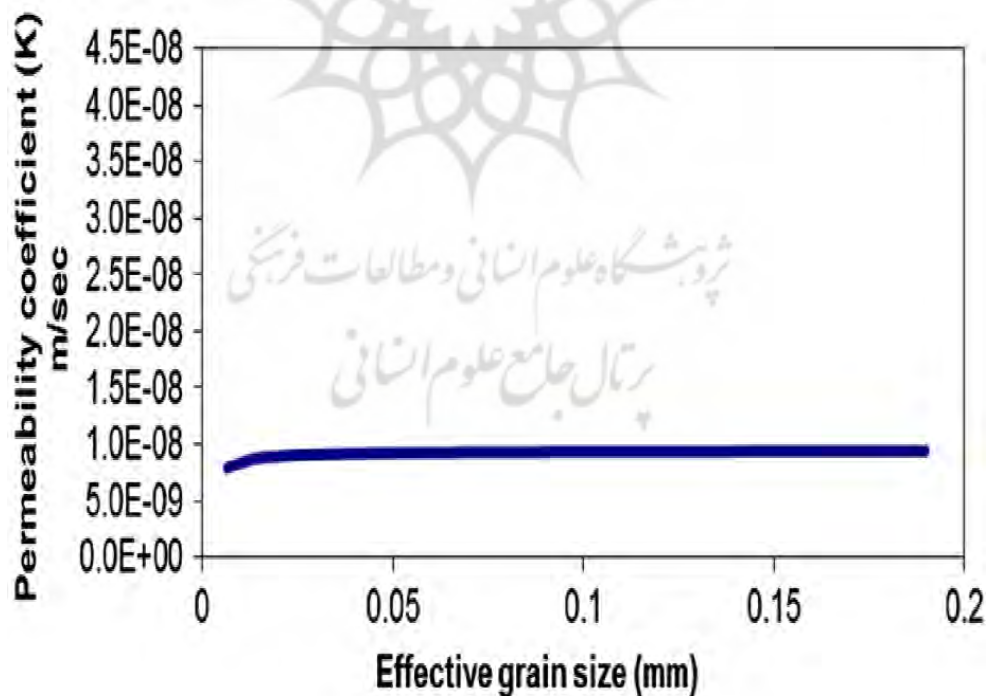
$$\log_{10}(K) = 600.25/P(1+4600(D50)/P^2) - 121.96/D50^2 \times 108 + 2 \times 10^{-6} PL^2/D50 - 3.42 LL - 1983.12/D10^3 \times 1015 - 1.53 \times 103(D50^30) + 47.2/D10 \times 10^5 - 5.09 \times 10^{-4} PL^2(1+0.774LL(D50) - 2.66 \times 10^{-2} LL \times PL(D50)) - 13.8$$

که در آن P درصد تراکم خاک میباشد که میتواند مقادیری بین ۹۱٪ تا ۹۱٪ را در برگیرد. مقایسه ضریب تعیین (COD) روابط و مدل‌های به دست آمده از تحقیقات Wang & Huang (1984) و Sinha & Wang (2008) بیانگر دقت و عملکرد بهتر و بالاتر مدل ارائه شده توسط Ahangar-Asr et al. (2011) میباشد. همچنین در تحقیق مذکور به منظور ارزیابی عملکرد رابطه به دست آمده به بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری با درصد تراکم، اندازه مؤثر ذرات و نشانه خمیری پرداخته شده است. همان طور که در شکل ۲۰۲ نشان داده شده است، افزایش درصد تراکم سبب کاهش حفرات موجود در خاک شده و این امر سبب کاهش ضریب نفوذپذیری میشود.



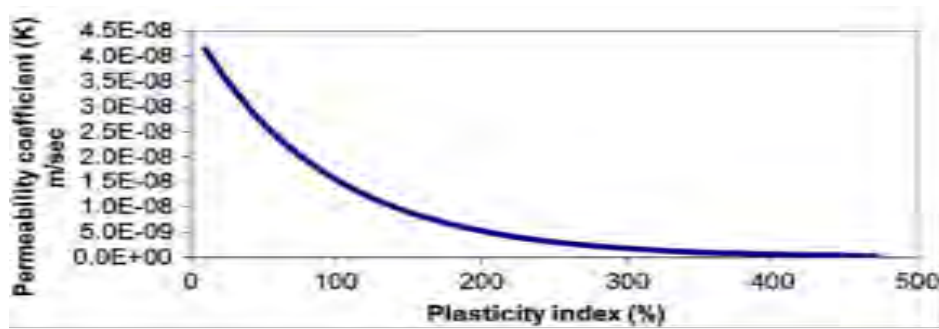
شکل ۱۲-۲ تغییرات ضریب نفوذپذیری با درصد تراکم Ahangar-Asr et al., 2011

از سوی دیگر با افزایش اندازه مؤثر ذرات، خاک درشت دانه تر میشود و مقدار ضریب نفوذپذیری تا نقطه ای زیاد میشود و بعد از آن با نرخ بسیار کمی افزایش مییابد شکل ۱۳-۲.



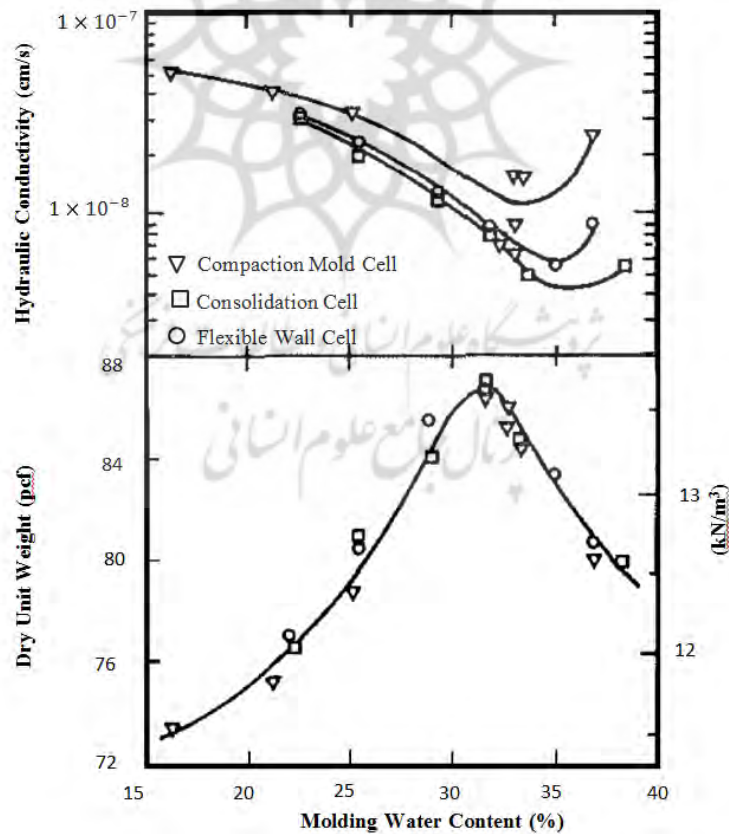
شکل ۱۳-۲ تغییرات ضریب نفوذپذیری با اندازه مؤثر ذرات Ahangar-Asr et al., 2011

همچنین افزایش نشانه خمیری (PI) به منزله درصد ریزدانه بیشتر در خاک است که این امر موجب کاهش تراوایی خاک میشود شکل ۱۴-۲ همانگونه که در اشکال ۱۲-۲ تا ۱۴-۲ مشاهده میشود، نشانه خمیری بیشترین تأثیر را بر روی میزان نفوذپذیری خاک دارد. این در حالی است که تأثیر درصد تراکم و اندازه متوسط ذرات بر روی ضریب نفوذپذیری بسیار کم است.



شکل ۱۴-۲ تغییرات ضریب نفوذپذیری با نشانه خمیری Ahangar-Asr et al., 2011

همچنین مطالعات صورت گرفته توسط Boynton & Daniel (1985) نیز بیانگر وابستگی میزان تراوایی خاک به درصد تراکم خاک مورد نظر میباشد. همانگونه که در شکل ۱۵-۲ مشاهده میشود، با تغییر درصد تراکم یک نوع از خاک، میزان نفوذپذیری تغییر چشمگیری خواهد داشت.

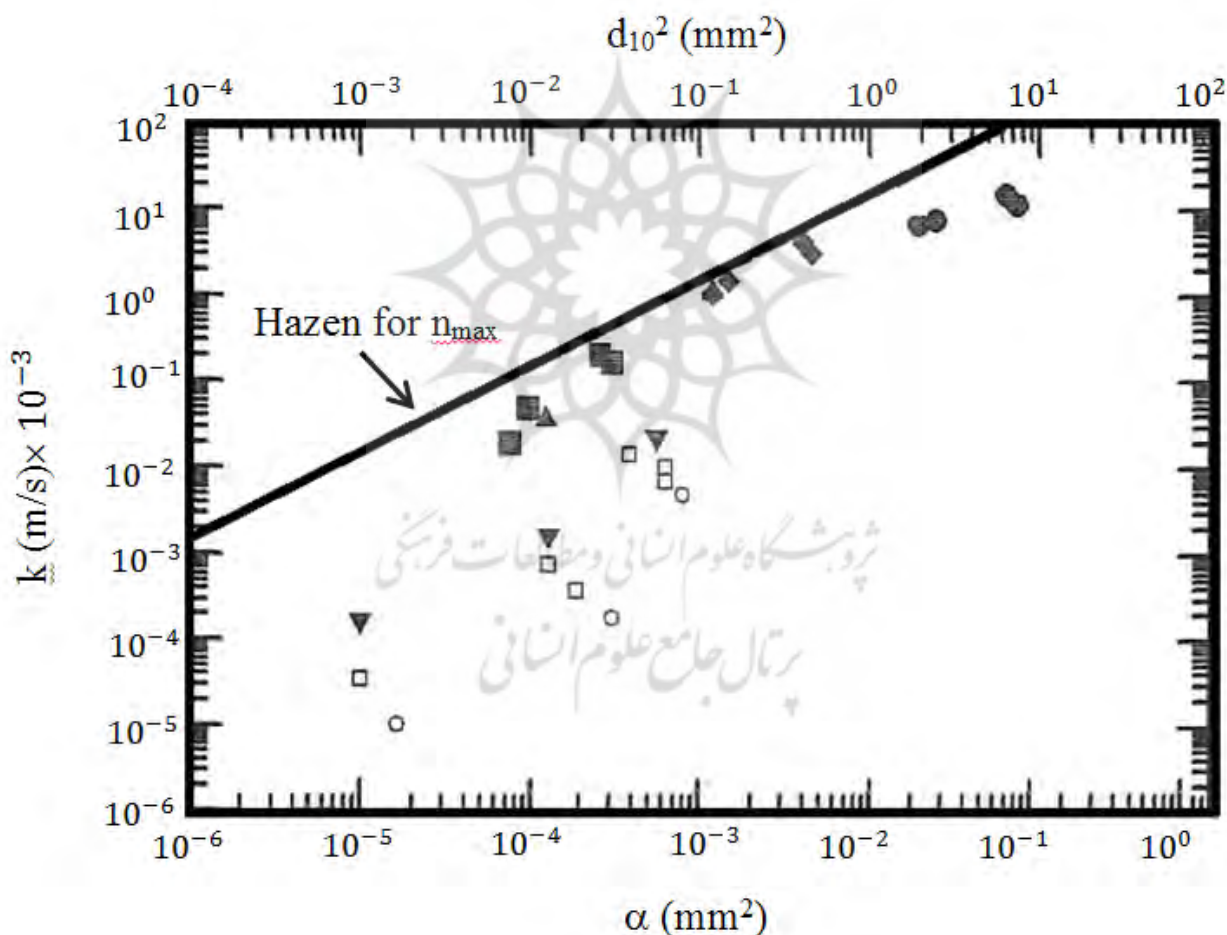


شکل ۱۵-۲ تغییرات ضریب نفوذپذیری با درصد تراکم Boynton & Daniel, 1985

در ادامه مطالعات صورت گرفته توسط Chapuis (2004) سعی در تعمیم رابطه موجود به سنگ خرد شده داشت. آنها در مطالعات خود دریافته اند که رابطه Chapuis تنها در مواردی کاربرد دارد که مقدار ضریب بزرگتر از ۰/۰۰۱ باشد. ضریب α با رابطه زیر تعریف میشود:

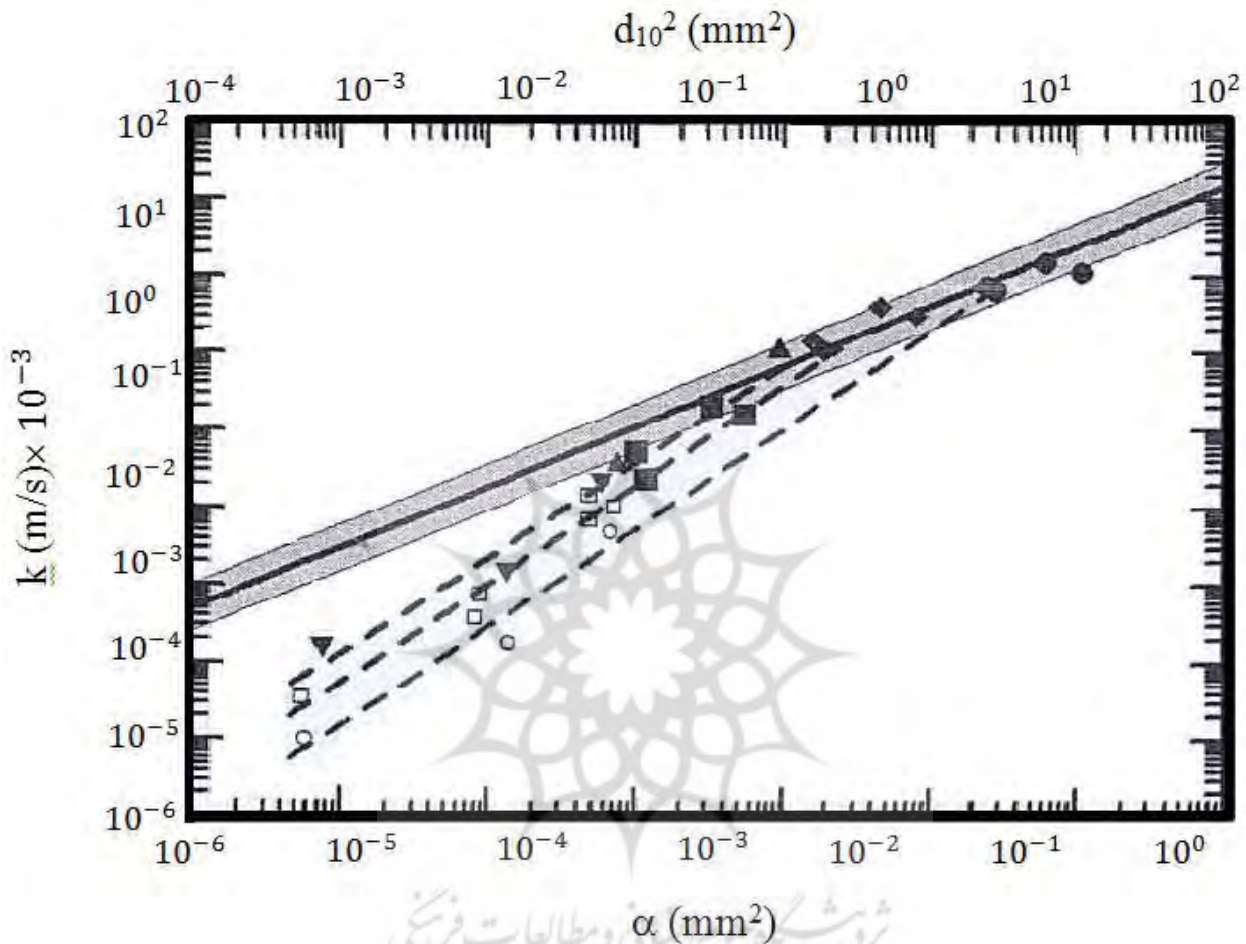
$$\alpha = D 10^{2n^3 / (1-n)^2}$$

از این رو، آنها به مطالعه اثر اندازه ذرات و تخلخل بر روی نفوذپذیری خاک ماسهای گرانیتی خرد شده پرداختند. در تحقیق مذکور انتخاب دانهدندی ذرات بهگونهای است که اندازه مؤثر ذرات ۱۰ D و تخلخل مقادیر متفاوتی را در برگیرد و از نتایج آزمایش نفوذپذیری به روش بار افتان استفاده شده است. شکل ۲-۱۶ مقادیر تجربی ضریب نفوذپذیری را در برابر مربع اندازه مؤثر ذرات نشان میدهد. همانگونه که مشاهده میشود اندازه مؤثر ذرات تأثیر بسیار زیادی بر روی مقدار تراوایی خاک دارد. خط رسم شده در شکل نمایانگر رابطه Hazen میباشد و به وضوح مشاهده میشود که مقادیر تجربی K به این خط نزدیک است.



شکل ۲-۱۶ مقادیر تجربی ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تخمین یافته از رابطه Hazen Cote et al., 2012

از سوی دیگر، شکل ۲-۱۷ مقادیر مختلف ضریب نفوذپذیری را به صورت تابعی از ضریب α ارائه میکند. خط ترسیم شده در شکل بیانگر رابطه Chapuis می باشد. همانگونه که در شکل مشخص است، در مقادیر α کمتر از ۰/۰۱ مصالح گرانیتی خرد شده (رابطه Chapuis کارایی خوبی ندارد و ضریب نفوذپذیری را بیشتر از مقادیر واقعی آن تخمین میزند).



شکل ۲-۱۷ مقادیر تجربی ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تخمین یافته از رابطه Chapuis Cote et al., 2012

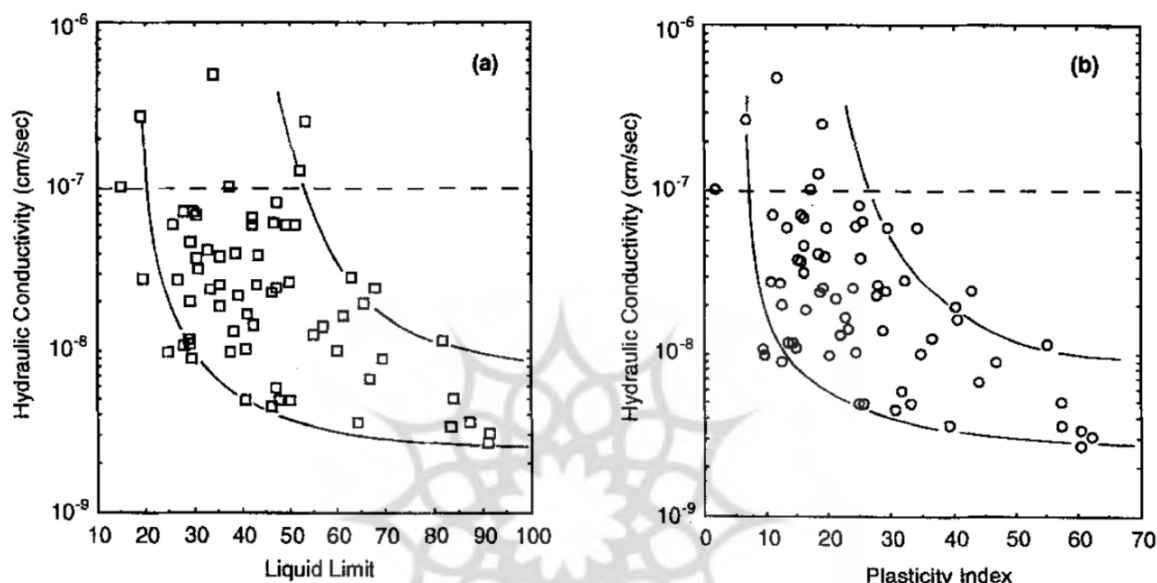
از این رو Cote et al 2012 رابطه اصلاح شده زیر را برای تخمین تراوایی ماسه گرانیتی خرد شده پیشنهاد کرد:

$$K=0.0212[D10^2(n^3/(1-n)^2)]^{1.25}$$

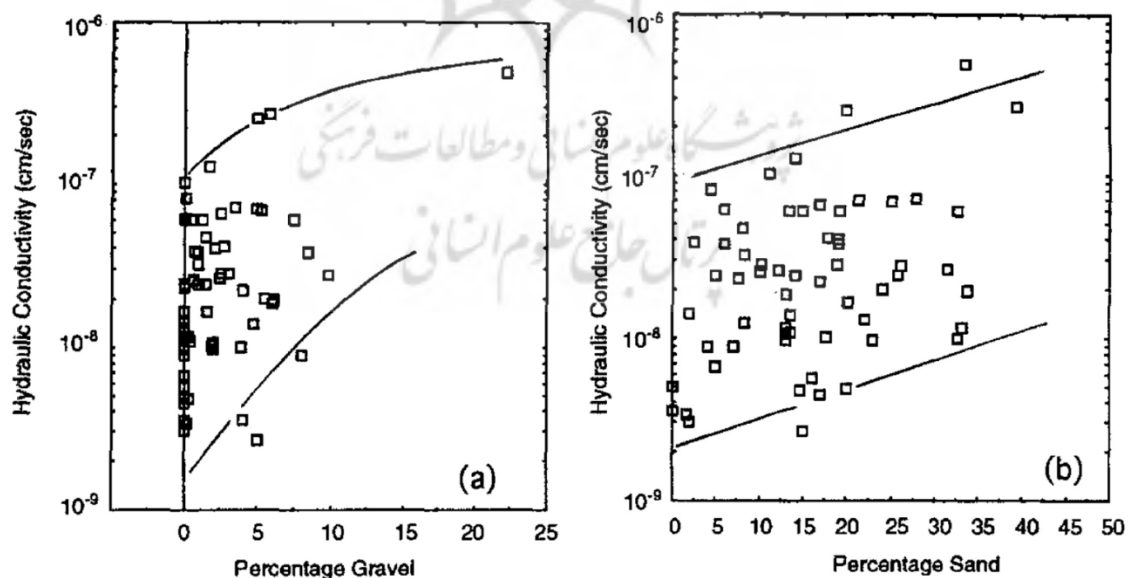
۲-۶ پارامترهای تأثیرگذار بر روی ضریب نفوذپذیری خاکها

همانگونه که در ابتدای این فصل بیان شد، ضریب نفوذپذیری خاکها به عوامل متعددی از جمله: ویسکوزیته سیال، اندازه و توزیع اندازه حفرات، دانه بندی، نسبت تخلخل، زبری سطح دانهها و درجه اشباع خاک بستگی دارد. در میان پارامترهای تأثیرگذار بر روی میزان تراوایی خاک، اندازه ذرات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط (Benson et al., 1994) در خاکهای خوب دانه بندی شده و ریزدانه ضریب نفوذپذیری کمی دارند. تحقیقات صورت گرفته توسط (Daniel 1987) نیز این مطلب را تأیید میکند. آنها در مطالعات خود دریافتند

که افزایش صفر تا ۸ درصد بنتونیت به ماسه، ضریب نفوذپذیری آن را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین به ازای مقادیر بیشتر از ۰/۰۸ بنتونیت، ضریب نفوذپذیری بسیار کم است و خاک ماسه‌ای عملاً رفتاری شبیه به رس خواهد داشت. (Benson et al., (1994) با مطالعه ۶۷ مورد داده به بررسی رابطه بین اندازه ذرات و حدود اتربرگ و میزان نفوذپذیری خاک پرداخت. همانگونه که در اشکال ۱۸-۲ و ۱۹-۲ نشان داده شده است، با افزایش نشانه خمیری و حد روانی، ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که افزایش حد روانی از ۲۰٪ تا ۴۰٪ و افزایش نشانه خمیری از ۱۰٪ تا ۳۰٪ سبب کاهش ناگهانی در مقدار ضریب نفوذپذیری می‌شود.

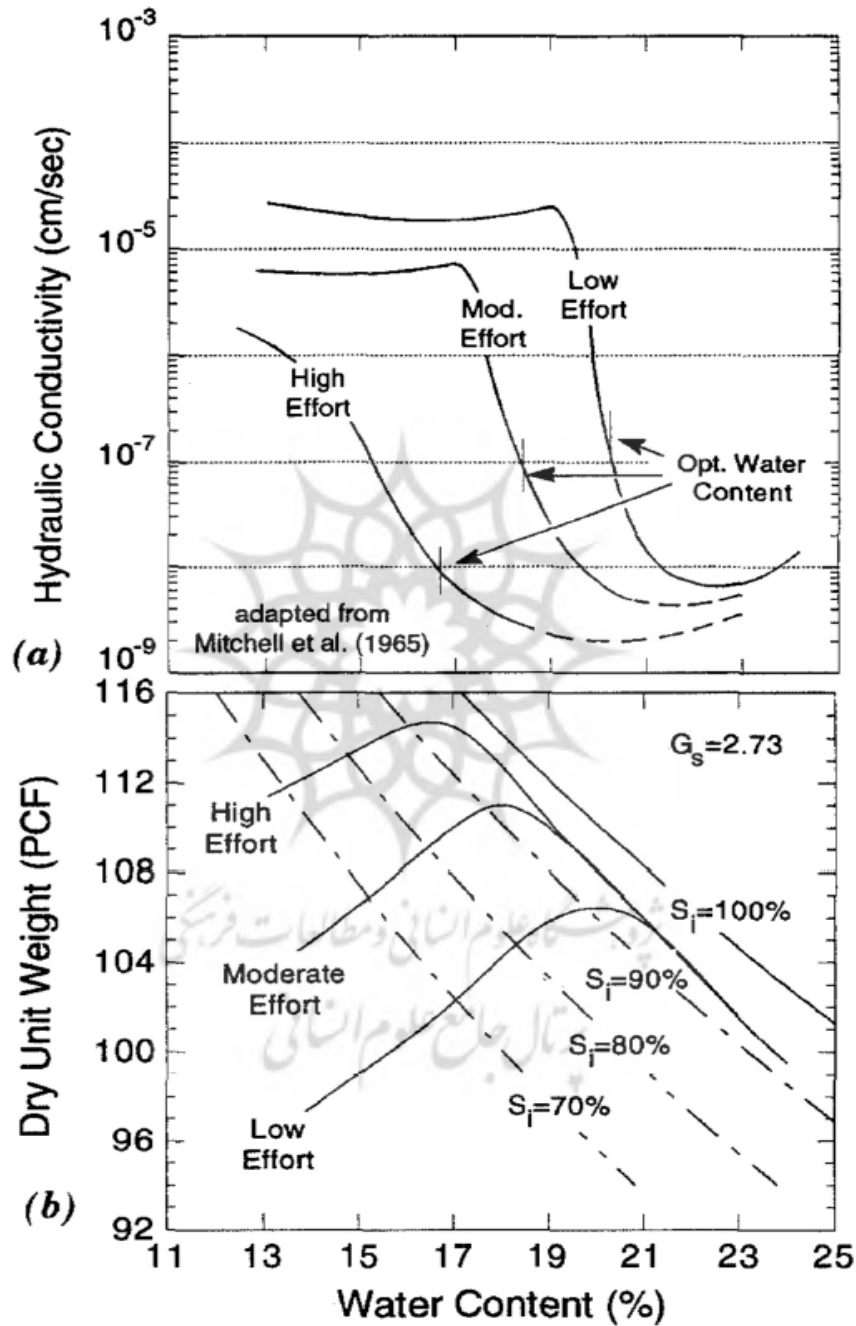


شکل ۱۸-۲ تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر الف) نشانه خمیری، ب) حد روانی



شکل ۱۹-۲ تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر الف) درصد ماسه، ب) درصد شن، ج) درصد رس و د) درصد ریزدانه

در تحقیق دیگری، Mitchell et al. (1965) نشان داد که ضریب نفوذپذیری رس های متراکم شدیداً به انرژی تراکمی و درصد رطوبت خاک بستگی دارد. همانطور که در شکل 2-20 نشان داده شده است، افزایش درصد رطوبت و انرژی تراکم سبب کاهش ضریب نفوذپذیری میشود. نتایج مشابه در مطالعات (Lambe (1954) ، Benson and Daniel (1990) مشاهده میشود.



شکل ۲-۲۰ رابطه میان ضریب نفوذپذیری با انرژی تراکم و درصد رطوبت Mitchell et al., 1965

منابع و مأخذ

1. Alsanad, H.A., Ismael, N.F., 1997. Aging effect on oil contaminated Kuwaiti sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 290–294.
2. Bolt, G.H. (1955). "Analysis of the Validity of the Gouy-Chapman Theory of the Electric Double Layer," *Journal of Colloid Science*, Vol. 10, pp. 206-219.
3. Bolt, G.H. (1956). "Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays," *Geotechnique*, Vol. 6, No. 2, pp. 86-93.
4. Collins, K. and McGown, A. (1974). "The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils," *Geotechnique*, Vol. 24, pp. 223-254.
5. Fernandez, F. and Quigley, R.M. (1985). "Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp.205-214.
6. Gordon, B.B. and Forrest, M. (1981). "Permeability of Soils Using Contaminated Permeant," *Permeability and Groundwater Contaminant Transport*, ASTM STP746, pp.101-120.
7. Lambe, T.W. (1954). "The Permeability of Fine-Grained Soils," *ASTM STP* 163, pp.56-67.
8. Michaels, A.S. and Lin, C.S. (1954). "The Permeability of Kaolinite," *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 46, pp. 1239-1246.
9. Mitchell, J.K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, New York, 422 p.
10. Mitchell, J.K., Hooper, D.R., and Campanella, R.G. (1965). "Permeability of Compacted Clay," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 91, No. SM4, July 1965, pp. 41-65.
11. Meegoda, N.J., Ratnaweera, P., 1994. Compressibility of contaminated fine grained soils. *Geotechnical Testing Journal* 17 (1), 101–112.
12. Simons, H., Hansel, w., and Reuter, E. (1984). "Physical and Chemical Behavior of Clay- Based Barriers under Percolation with Test Liquids," *Proc. Int. Symposium on Clay Barriers for Isolation of Toxic Chemical Wastes*, May 28-30, 1984, Stockholm, p. 117. Expanded version in German, pp. 118-127.
13. Akinwumi I. I., Diwa D and Obianigwe N. (2014). "Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay", *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, Vol. 3, Issue 4
14. Khamehchiyan, M., Charkhabi A.H., Tajik, M., (2007), " Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils," *Journal of Engineering Geology*, (89), 220–229.
15. Habib-ur-Rehman, Abduljauwad SN and Akram T. (2007). *Geotechnical Behavior of Oil Contaminated Fine Grained Soils*, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, EJGE, 12, - Bundle A; 0720.

16. Rahman Z., Hamzah U and Taha MR. (2010). Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil. American Journal of Applied Sciences, 7(7), pp 954-961.
17. Mashalah, K., 2006. The effects of crude oil contamination on geotechnical properties of Bushehr coastal soils in Iran. The Geological Society of London 2006, IAEG2006 Paper number 214.
18. Ahmed S. Mohammed and Vipulanandan C. (2011). Behavior of Oil Contaminated CL Soil. THC-IT Conference & Exhibition

