

# بررسی اثر چرخه‌ی خشک و تر شدن در نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار

نگین قبادپور (کارشناس ارشد)

محمود حسناوراد\* (دانشیار)

فواد کیلانه‌ای (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (صص. ۱۱۵-۱۲۴)، پژوهشی  
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۱۵-۱۲۴، پژوهشی

در نوشتار حاضر، تغییرات ایجاد شده در نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ی رس‌دار با احتمال واقع شدن آن‌ها برای مدت‌طولانی در معرض خشکسالی بررسی شده است. خاک استفاده شده برای مطالعه‌ی حاضر، ترکیب ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ و رس کائولن با ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماسه بوده است. آزمایش‌های نفوذپذیری در دو مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی با دستگاه سه‌محوری بر روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که خشک‌شدگی و ترشدگی در نفوذپذیری نمونه‌ها در ابتدای عبور آب، به دلیل ایجاد ترک‌های ناشی از خشک شدن تأثیر قابل توجهی دارد و با گذشت زمان و جذب مجدد رطوبت توسط خاک، نفوذپذیری کاهش می‌یابد و به عدد ثابتی میل می‌کند. همچنین نمونه‌هایی که در مسیر خشک و تر شدن واقع شده بودند، نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه به دلیل ایجاد درز و ترک، نفوذپذیری بیشتری نشان داده‌اند. برای مثال، در ابتدای ورود آب به نمونه‌ی کاملاً خشک، ضریب نفوذپذیری آن نسبت به نمونه با رطوبت بهینه برابر ۱/۸ و ۲/۵ به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد رس بوده است. از طرفی آزمایش‌ها نشان دادند که لزوماً نمونه‌ی کاملاً خشک، بیشترین نفوذپذیری را ندارد.

واژگان کلیدی: ضریب نفوذپذیری، خاک ماسه‌ی رس‌دار، خشک‌شدگی، ترشدگی.

neginghr@gmail.com  
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir  
kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

## ۱. مقدمه

ایران از نظر اقلیمی در ناحیه‌های خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، لذا در زمان خشکسالی حفاظت و مدیریت مخازن ذخیره‌ی آب، اهمیت بالایی دارد. در نواحی خشک ممکن است سد بعد از ساخته شدن، مدت زمان طولانی آبدگیری نشود و بدنه‌ی سد خشک شود و حتی در دوره‌های بعد این اتفاق تکرار شود. همچنین ممکن است به یکباره بارندگی‌های شدید رخ دهد و سد پُر شود. در بسیاری از مناطق جنوبی و مرکزی ایران، این موضوع محتمل است. این مدت زمان طولانی خشک شدن و یا خیس شدن مجدد منجر به تغییر ساختار خاک می‌شود و ترک‌هایی را در آن ایجاد خواهد کرد. برای نمونه، پور حسینی و همکاران (۱۳۹۶) ملاحظه کردند که با افزایش دما، درصد رطوبت مربوط به شروع اولین ترک ناشی از خشک‌شدگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درجه حرارت، تعداد نهایی ترک‌های انقباضی در سطح خاک کاهش می‌یابد و این موضوع را به کاهش کشش سطحی آب و

تمرکزگرایی حفره‌های خاک ارتباط می‌دهند.<sup>[۱]</sup>

ضریب نفوذپذیری<sup>۱</sup>، یکی از مهم‌ترین پارامترهای بررسی شده در احداث سدهای خاکی است که برای بررسی مقدار دبی عبوری از سد و حتی پایداری شیب‌های خاکی سدها، یک پارامتر تعیین‌کننده است. عوامل مختلفی در پارامتر ضریب نفوذپذیری، تأثیرگذار هستند، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به: درجه‌ی حرارت محیط، خشک شدن و یا خیس شدن مجدد، درز و ترک‌های ایجاد شده، جنس خاک استفاده شده و غیره اشاره کرد. لذا خشک و خیس شدن خاک‌ها باعث به وجود آمدن تغییراتی در مشخصه‌های فیزیکی خاک از جمله نفوذپذیری آن می‌شود که لازم است در کنترل رفتار هیدرولیکی سدهای خاکی و میزان آبدگری و حتی در پایداری آن در نظر گرفته شود.

ضریب نفوذپذیری خاک، در واقع مقاومت خاک در برابر عبور آب است.<sup>[۲]</sup> در خاک‌های اشباع، نفوذپذیری خاک تابعی از فضاها‌ی منافذ است. به هر حال در خاک‌های غیراشباع، هر دو فاز آب و هوا، جریان آب در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و ضریب نفوذپذیری خاک به مقدار درصد آب و فضاها‌ی منفذی مربوط

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۱۸/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱۹/۲۸، پذیرش ۱۴۰۲/۱۱/۱۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61377.3167

استناد به این مقاله:

قبادپور، نگین، حسناوراد، محمود و کیلانه‌ای، فواد، ۱۴۰۲. بررسی اثر چرخه‌ی خشک و تر شدن در نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۱۱۵-۱۲۴.

است. [۴] مطالعات نشان داده است که آب فقط از میان منافذ عبور می‌کند که به طور پیوسته با آب پر شده است، بنابراین نفوذپذیری خاک غیراشباع به دو متغیر تنش قائم خالص<sup>۲</sup> و مکش بافتی<sup>۳</sup> وابسته است که مقدار آب را در خاک غیراشباع کنترل می‌کنند. [۴] در مکانیک خاک، تنش خالص به صورت تفاوت تنش کل و فشار هوای حفره‌یی ( $\sigma - u_a$ ) تعریف می‌شود و مکش بافتی به صورت تفاوت فشار هوای حفره‌یی و فشار آب حفره‌یی بیان می‌شود (یعنی  $u_a - u_w$ ).

مکش بافتی، تأثیر قابل توجهی در درصد رطوبت خاک دارد. کاهش درصد رطوبت به دلیل افزایش مکش بافتی باعث کاهش قابل توجه نفوذپذیری خاک غیراشباع می‌شود. ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع بیش از ۱۰ برابر تغییرات مکش بافتی تغییر می‌کند. ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که نفوذپذیری خاک غیراشباع، رابطه‌ی نزدیکی با منحنی مشخصه‌ی آب و خاک (SWCC) در فرایندهای خشک‌شدگی و ترشدگی دارد. [۶،۵] به عبارت دیگر، نفوذپذیری خاک غیراشباع، رفتار هیسترسیس دارد و منحنی مشخصه‌ی آب و خاک که در آن ساختار مجدد خاک برگشت پذیر باشد، باعث کاهش رفتار هیسترسیس می‌شود. [۸،۷،۳]

معمولاً برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آب در خاک از روش مستقیم پایدار استفاده می‌شود. در این حالت، مقادیر هد جریان و مکش بافتی ثابت‌اند و حالت پایدار با نزدیک شدن جریان ورودی به نمونه با جریان خروجی از آن برقرار می‌شود. با افزایش درجه اشباع خاک، ضریب نفوذپذیری خاک در بازه‌های ترشدگی و خشک‌شدگی متناوباً افزایش می‌یابد، ولی با افزایش مکش بافتی، ضریب نفوذپذیری خاک در هر دو فرایند ترشدگی و خشک‌شدگی کاهش می‌یابد. [۹] اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود. این امر به دلیل افزایش حجم خلل و فرج در نمونه‌های تحت اثر تر و خشک شدن متوالی است. [۱۱] همچنین ترک‌خوردگی با تعداد چرخه‌های خشک و خیس شدن افزایش می‌یابد. [۱۱] هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه‌ی آب و خاک به یکدیگر مرتبط هستند. پژوهشگران نشان داده‌اند که هدایت هیدرولیکی در شاخه‌ی خشک، نسبت به شاخه‌ی تر، مقدار بیشتری دارد. در هنگام خشک شدن در دو خاک مشابه، در خاکی که چگالی خشک بیشتری دارد، نمونه‌ها با سرعت کمتری نسبت به نمونه‌ها با چگالی کم اشباع می‌شوند. همچنین در هنگام تر شدن، خاک با چگالی خشک بیشتر، رفتار هیسترسیس کمتری از خود نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این امر ناشی از کاهش کلی اندازه‌ی منافذ به دلیل چگالی اولیه‌ی بالاتر باشد، که به دلیل تخلخل کمتر اتفاق می‌افتد. [۱۲]

فردلوند<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۴)، [۵] بیان کرده‌اند که نفوذپذیری خاک غیراشباع در ابتدا تابع توزیع اندازه‌ی منافذ خاک است و به طور غیرمستقیم ضریب نفوذپذیری تابع منحنی مشخصه‌ی آب و خاک است. با این ویژگی‌ها، ارزیابی درصد رطوبت باقیمانده جهت تعیین نفوذپذیری خاک غیراشباع ضروری نیست. طالب‌العلم<sup>۵</sup> (۲۰۱۹) در پژوهشی اثر خیس و خشک شدن متوالی هسته‌ی رسی سد دوستی را بررسی کرده و دریافته است که پس از ۶ چرخه‌ی خیس و خشک شدن، در کنار کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها، میزان نفوذپذیری هسته‌ی سد حدود ۱/۹ برابر افزایش یافته است. [۱۳] گالانگ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، [۸] یک پارامتر جدید برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع با استفاده از روش جریان پایدار و اندازه‌گیری مستقیم مکش بافتی معرفی کرده‌اند. ایشان برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، از دو نوع ماسه در فرایند خشک‌شدگی و خیس‌شدگی استفاده کرده‌اند که رفتار هیسترسیس قابل توجهی در برابر مکش بافتی نشان داده‌اند. اما رفتار هیسترسیس برای ضریب هدایت هیدرولیکی در برابر درصد رطوبت مشاهده نشده است. در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱)، یک دستگاه سه‌محوری اصلاح شده برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری و

مقاومت برشی سه نوع خاک غیراشباع در چرخه‌های خشک‌شدگی و خیس‌شدگی استفاده شده است، [۱۳] که در نتایج به دست آمده، سازگاری خوبی با داده‌های گزارش شده در ادبیات مشاهده شده است. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که در کنار بررسی نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع، تعدادی از پژوهشگران، اثر رطوبت را در مقاومت برشی خاک‌ها بررسی کرده‌اند. برای نمونه می‌توان به مطالعات الشایه<sup>۷</sup> (۲۰۰۱) و دونگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که به جهت اختصار از ذکر جزئیات آن‌ها صرف‌نظر شده است. [۱۵،۱۴]

کای<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، یک روش جدید برای تخمین آثار چگالی در ضریب نفوذپذیری یک خاک غیراشباع و عوامل نفوذپذیری وابسته به چگالی را معرفی کرده‌اند. [۱۶] همچنین گوه<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، دستگاه سه‌محوری معمولی را برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع اصلاح کرده‌اند که همزمان با اندازه‌گیری مقاومت برشی، ضریب نفوذپذیری را نیز اندازه‌گیری می‌کند. [۱۷] ژنگ و فردلوند<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۵)، نیز توابع مختلف را که توسط سایر پژوهشگران برای تخمین ضریب نفوذپذیری در خاک‌های غیراشباع بیان شده بود، ارزیابی کرده‌اند. [۱۸] همچنین نظری و همکاران (۲۰۱۸)، توابع اخیر را جهت تخمین ضریب نفوذپذیری خاک‌های با ترکیب ماسه و سیلت با انجام آزمایش ارزیابی کرده و نتیجه گرفته‌اند که ضریب نفوذپذیری خاک مخلوط ماسه و سیلت، تابعی از کشش بافتی، اندازه‌ی منافذ، و درصد ریزدانه (سیلت) است. همچنین ایشان دریافتند که افزایش ریزدانه، مخصوصاً در مقادیر مکش بالاتر می‌تواند باعث کاهش نفوذپذیری شود. [۱۹] در سال ۲۰۲۱، ون<sup>۱۲</sup> و همکاران، نیز یک تابع نفوذپذیری برای تخمین ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع براساس معادله‌ی تعادل فاز آب پیشنهاد دادند که نیاز به یک پارامتر داشت که به راحتی با استفاده از آزمایش نفوذپذیری خاک غیراشباع با مقادیر مختلف تخلخل به دست می‌آید. [۲۰]

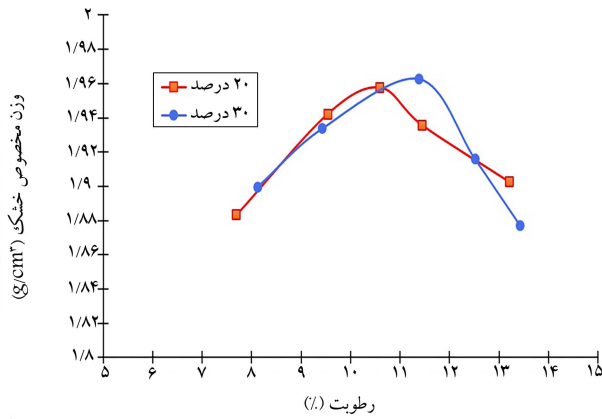
همچنین انگوین<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، یک روش ساده‌ی انتقالی برای تخمین ضریب نفوذپذیری خاک غیراشباع بیان کردند. در واقع آن‌ها جهت غلبه بر مشکلات روش پروفیل آبی (IP)، یک روش ساده و جدید پیشنهاد دادند. ایشان تغییرات مقدار رطوبت حجمی و فشار آب منفذی نظیر آن را برای روش پیشنهادی خود استفاده کردند و دریافتند که روش پیشنهادی‌شان بدون در نظر گرفتن نوع خاک نسبت به روش IP کاربردی‌تر است. [۲۱] بیشتر مطالعات مذکور، اثر یک چرخه‌ی کامل خشک‌شدگی و ترشدگی را در نفوذپذیری در شرایط پایدار و شکل‌گیری مجدد کامل جریان بررسی کرده و کمتر کسی تغییرات نفوذپذیری را در حین و طول مدت آبیگری از حالت کاملاً خشک تا برقراری شرایط پایدار بررسی کرده است. لذا در پژوهش حاضر، ضریب نفوذپذیری خاک ماسه‌ی رس‌دار با دو درصد متفاوت ۲۰ و ۳۰ در مسیر خشک و تر شدن با انجام تعدادی آزمایش نفوذپذیری بررسی شده است، تا به نوعی رفتار آب‌گذری یک سازه‌ی خاکی با رطوبت‌های اولیه‌ی مختلف ارزیابی شود.

## ۲. مصالح مصرفی و روش انجام آزمایش‌ها

در بخش حاضر، ابتدا مواد و مصالح مصرفی و سپس روش انجام آزمایش‌ها تشریح شده است:

### ۱.۲. مصالح مصرفی و مشخصات آن‌ها

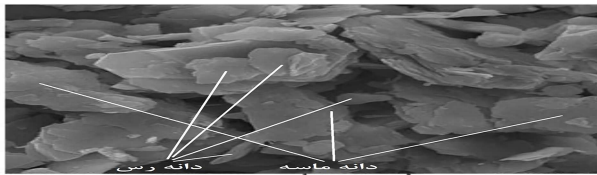
خاک مصرفی در پژوهش حاضر، شامل ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ و رس کاتولن و ترکیب خاک استفاده شده شامل ۲۰ و ۳۰ درصد رس و مابقی آن ماسه بوده است که به صورت درصد وزنی خشک با یکدیگر ترکیب شده‌اند. به عبارتی،



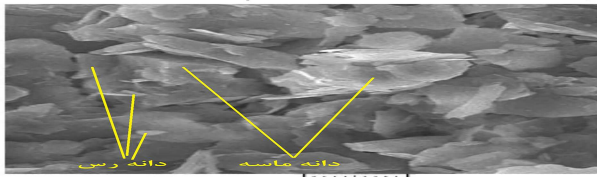
شکل ۲. منحنی تراکم دو ترکیب خاک.

جدول ۴. مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص پیشینه برای ترکیب خاک.

درصد رس	% ۲۰	% ۳۰
وزن مخصوص خشک پیشینه ( $KN/m^3$ )	۱۹/۵۸	۱۹/۶۳
رطوبت بهینه (%)	۱۰/۶	۱۱/۴



خاک با ۲۰ درصد رس



خاک با ۳۰ درصد رس

شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دو نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ (با حفره‌های بیشتر) و ۳۰٪ (با حفره‌های کمتر) رس.

رس، ساختار بازتر و منافذ بیشتری دارد. هر چند در شکل‌های مذکور، دانه‌های ماسه با ذرات رس پوشیده شده‌اند، ولی تا حدودی دانه‌های ماسه و رس مشخص هستند.

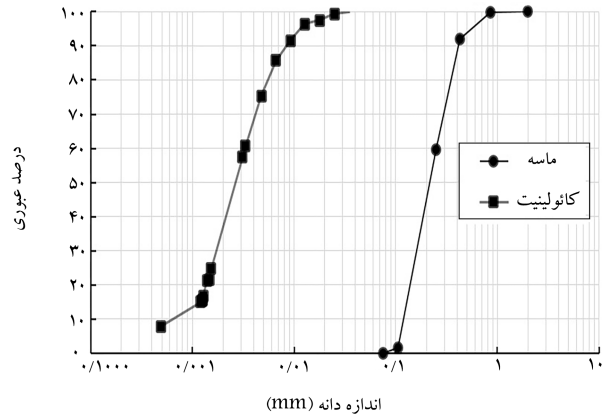
### ۲.۲. روند انجام آزمایش‌ها

وزن مخصوص خشک پیشینه و مقدار رطوبت بهینه به کمک آزمایش تراکم استاندارد تعیین شده‌اند. ترکیب خاک (ماسه و رس) به صورت درصد وزنی در حالت کاملاً خشک با یکدیگر ترکیب و سپس آب، به اندازه‌ی درصد رطوبت بهینه به خاک اضافه و مخلوط شده است. در نهایت، مخلوط به دست آمده به جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد. برای ساخت نمونه‌ها از قالب دوتکه‌یی به قطر ۳/۸ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده و نمونه‌سازی با تراکم ۱۰۰٪ در داخل قالب انجام شده است.

نکته‌ی اصلی، میزان از دست‌دادن رطوبت نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه در فرایند خشک و خیس شدن و به دست آوردن مجدد رطوبت آن‌هاست. لذا

جدول ۱. آزمایش‌های شناسایی مصالح.

استاندارد	آزمایش
ASTM D۴۲۲	دانه بندی
ASTM D۴۲۲	هیدرومتری
ASTM D۸۵۴	تعیین چگالی ویژه
ASTM D۶۹۸	تراکم استاندارد
ASTM D۴۳۱۸	حدود اتربرگ



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ و رس کاتولن.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

۲/۶۷	$G_s$	توده‌ی ویژه
۱/۹	$c_u$	ضریب یکنواختی
۰/۸	$c_c$	ضریب انحنای
۰/۲	$D_{50}$	اندازه‌ی متوسط دانه‌ها
SP	USCS	طبقه‌بندی متحده

جدول ۳. مشخصات خاک رس کاتولن.

USCS	PI (%)	PL (%)	LL (%)	$G_s$
CL	۱۷/۳	۳۱/۵	۴۸/۸	۲/۶۳

منظور از ۲۰٪ رس، یک قسمت رس و ۴ قسمت ماسه است. در ابتدا، به کمک آزمایش‌های استاندارد طبق جدول ۱، خصوصیات فیزیکی خاک‌های استفاده شده مانند: دانه بندی، چگالی جامد دانه‌ها، وزن مخصوص خشک پیشینه، رطوبت بهینه، حد روانی و حد خمیری خاک تعیین شده است. [۲۲-۲۵]

مطابق شکل ۱، منحنی دانه بندی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه به صورت یکنواخت و بد دانه بندی است. همچنین مشخصات فیزیکی آن، شامل توده‌ی ویژه و رده‌ی آن طبق روش متحده در جدول ۲ ارائه شده است. منحنی دانه بندی خاک رس کاتولن استفاده شده و مشخصات آن، شامل توده‌ی ویژه، حدود اتربرگ و رده‌ی آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۳ ارائه شده است.

در شکل ۲، منحنی تراکم ماسه‌ی فیروزکوه کد ۱۶۱ با دو درصد مختلف کاتولن (۲۰ و ۳۰ درصد) مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک پیشینه‌ی دو ترکیب اخیر خاک در جدول ۴ ارائه شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌ها نیز با مقیاس برابر در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ رس نسبت به نمونه با ۳۰٪

### ۳.۲. انجام آزمایش نفوذپذیری با دستگاه سه محوری

آزمایش‌هایی مانند هد ثابت و یا افتان برای شرایط جریان پایدار هستند و به دلیل اینکه در پژوهش حاضر هدف بررسی تغییرات نفوذپذیری از ابتدای ورود آب به نمونه تا شکل‌گیری جریان پایدار بوده است، از دستگاه سه محوری استفاده شده است. با استفاده از دستگاه سه محوری، نفوذپذیری نمونه‌ی استوانه‌ی خاک در سلول سه محوری براساس استاندارد ASTM D2۸۵۰ تحت تنش مؤثر و پس فشار معینی به دست می‌آید.<sup>[۲۵]</sup> در واقع، حجم سیال عبوری از خاک در زمانی مشخص، تحت گرادین هیدرولیکی ثابت اندازه‌گیری می‌شود. بدین صورت که دبی خروجی و ورودی به نمونه در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. طبق استاندارد، آزمایش با قطر نمونه‌های ۳/۸ و ۱۰ سانتی‌متر انجام پذیر بوده و در باره‌ی ارتفاع نمونه، محدودیتی داده نشده است، لذا به دلیل بسیار زمان‌بر بودن آزمایش، از نمونه‌ها با ارتفاع کمتری استفاده شده است. ارتفاع نمونه از ۱ تا ۳ سانتی‌متر توصیه شده است. به دلیل تراکم بالای نمونه‌ها، فرایند نمونه‌سازی خارج از دستگاه و به کمک قالب‌های فلزی دوتکه انجام شده است. در پژوهش حاضر، اندازه‌گیری حجم آب ورودی به نمونه و حجم آب خروجی از نمونه حائز اهمیت است. به همین منظور، در مسیر آب ورودی، قبل از شیر آب ورودی به نمونه، یک عدد حجم‌سنج قرار داده شده است، تا بتوان حجم آب ورودی را اندازه‌گیری کرد. همچنین برای اندازه‌گیری آب خروجی از نمونه، از یک ترازوی دیجیتال استفاده و پس از خروج آب و ریختن آن در ظرفی که بر روی ترازو قرار دارد، وزن آب خروجی به صورت تجمعی تعیین شده است.

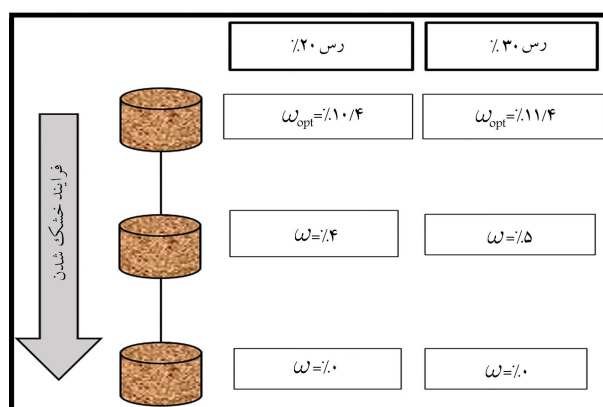
پیش از انجام آزمایش، باید از نبود هرگونه انسدادی در تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها اطمینان حاصل می‌شود. همچنین شلنگ‌های ورودی و خروجی، سنگ متخلخل و کاغذ صافی جاگذاری شده قبل از آزمایش اشباع می‌شوند. در دستگاه سه محوری، تنش همه‌جانبه توسط کمپرسور باد به سلول‌های تحت فشار منتقل می‌شود، سپس سلول‌های مذکور فشار را به آبی که در اطراف نمونه حضور دارد اعمال می‌کنند و بدین شکل تنش به نمونه وارد می‌شود. این فشار توسط رگلاتور به صورت دستی قابل تنظیم است و با باز کردن شیر مرتبط به نمونه منتقل می‌شود. در پژوهش حاضر، میزان فشار همه‌جانبه برابر ۵۰ کیلو پاسکال و پس فشار ۳۰ کیلو پاسکال انتخاب شده است. بدین صورت که آب با فشار ۳۰ کیلو پاسکال از حجم‌سنج عبور کرده و سپس وارد نمونه شده است. آزمایش تا مقدار آب عبوری از هر نمونه به اندازه‌ی ۶ برابر حجم نمونه ادامه یافته و پس از آن، آزمایش متوقف شده است. لذا زمان آب عبوری از نمونه وابسته به میزان درصد رس، رطوبت نمونه، قرار گرفتن در شاخه‌ی ترشدگی و یا خشک‌شدگی و میزان ترک‌های ایجاد شده در هر نمونه متفاوت است و تغییر هر یک از پارامترهای اخیر در زمان کلی آزمایش، اختلاف زمان آب ورودی و خروجی از نمونه، و عدد نفوذپذیری تأثیرگذار است؛ ولی در حالت کلی نمونه‌ها با درصد رس بالاتر، زمان بیشتری را برای آزمایش نیاز دارند. همان‌طور که بیان شد، اختلاف فشار همه‌جانبه و پس فشار اعمال شده بر نمونه‌ها برابر ۲۰ کیلو پاسکال بوده و در همه‌ی آزمایش‌ها این مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. این مقدار تنش مؤثر جهت اطمینان از این است که آب از مسیر ترجیحی مابین غشاء و خاک عبور نکند. نتایج به دست آمده برای هر دو درصد رس (۲۰ و ۳۰)، هر کدام به صورت جداگانه در دو نمودار به صورت دو روند خشک‌شدگی و ترشدگی ارائه شده است، که هر دو روند اخیر با نمونه‌ی اولیه (با رطوبت بهینه) مقایسه شده‌اند. آزمایش نفوذپذیری برای هر رطوبت، با ۳ بار تکرار انجام شده است. در شکل ۶، تصویری از انجام آزمایش نفوذپذیری به کمک دستگاه سه محوری موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی مشاهده می‌شود.

رطوبت نمونه قبل از آزمایش در نتایج و نفوذپذیری بسیار اثرگذار است. ادامه‌ی روند انجام آزمایش به این شرح است:

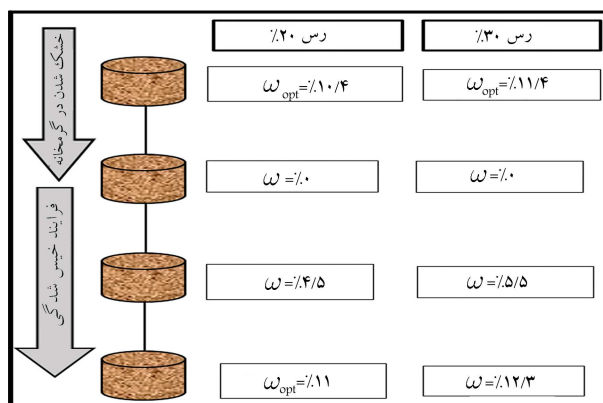
-- روند خشک‌شدگی: در روش حاضر، نمونه‌ها با رطوبت بهینه ساخته می‌شوند و به منظور کاهش رطوبت، در گرمخانه قرار می‌گیرند، تا به رطوبت موردنظر برسند. بدین منظور ساعت‌های قرارگیری نمونه‌ها در گرمخانه متفاوت است. دمای قرارگیری نمونه‌ها در گرمخانه، ۴۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد (جهت شبیه‌سازی دمای هوای گرم). برای مشخص شدن میزان رطوبت موردنظر در پایان هر مرحله، نمونه‌ها از گرمخانه خارج و وزن شدند.

-- روند ترشدگی: در بخش کنونی، ابتدا نمونه‌ها طبق روند خشک‌شدگی ساخته شدند و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار گرفتند، تا وزن آن‌ها ثابت شود. برای رطوبت‌دهی به نمونه‌های خشک شده، از محفظه با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد با رطوبت ۹۵٪ استفاده شده است. نمونه‌های خشک شده در محفظه‌ی رطوبت قرار گرفتند و تا رسیدن به رطوبت موردنظر در آن باقی ماندند. در هر مرحله، برای اطمینان از رطوبت نمونه‌ی خاک، در پایان هر مرحله نمونه‌ها وزن شده‌اند.

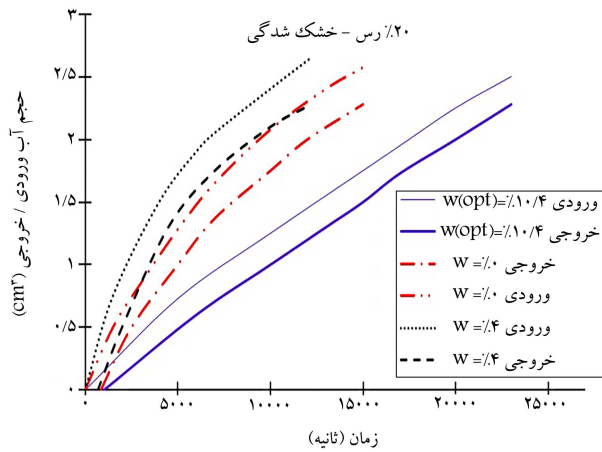
روند انجام آزمایش و رطوبت‌های موردنظر آزمایش‌های انجام شده برای هر دو مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. روند خشک‌شدگی نمونه‌های خاک با ۲۰ و ۳۰ درصد رس و آزمایش‌های انجام شده.

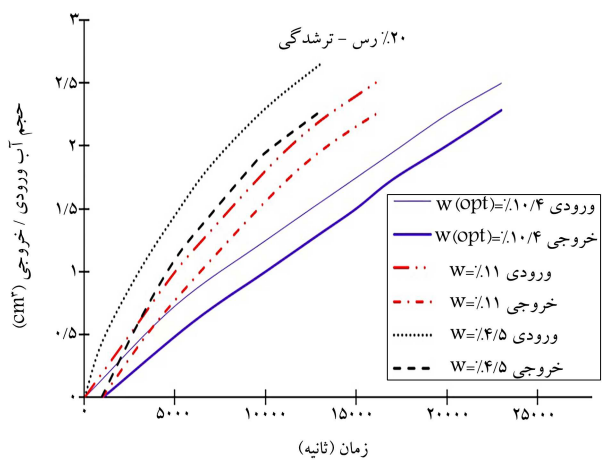


شکل ۵. روند ترشدگی نمونه‌های خاک با ۲۰ و ۳۰ درصد رس و آزمایش‌های انجام شده.



شکل ۶. تصویری از انجام آزمایش نفوذپذیری به کمک دستگاه سه محوری در آزمایشگاه.

شکل ۷. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر خشک شدگی برای خاک با ۲۰ درصد رس.



شکل ۸. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر ترشدگی برای خاک با ۲۰ درصد رس.

برابر ۲/۲۸ سانتی متر مکعب بر ثانیه را داشته و میزان دبی ورودی در نمونه‌ها وابسته به فضای خالی داخلی نمونه بوده است و اختلاف این دو متحنی در هر لحظه، مقدار آب جمع شده در منافذ و یا جذب شده توسط ذرات خاک را نشان می‌دهد.

در شکل ۸، نمودار دبی تجمعی ورودی و خروجی در نمونه با ۲۰٪ رس در مسیر تر شدن مشاهده می‌شود؛ به صورتی که نمونه‌ها با رطوبت بهینه ساخته شده، سپس در گرم‌خانه کاملاً خشک شده و به رطوبت صفر رسیده، و بعد از آن با قرار دادن نمونه‌ها در محفظه به رطوبت ۴/۵ و ۱۱ درصد رسیده‌اند. همچنین در شکل مذکور، مقایسه‌ی جریان ورودی و خروجی به دست آمده از نمونه‌ها با نمونه‌ی اولیه (ساخته شده با رطوبت بهینه) صورت گرفته است. ۳۰° در هر دو شکل خشک‌شدگی و ترشدگی، نمونه‌ی آزمایش شده با رطوبت بهینه، بیشترین زمان آزمایش را داشته و نمونه‌هایی که در مسیر خشک و تر شدن قرار گرفته‌اند، جریان ورودی و خروجی در زمان کمتری از نمونه عبور کرده است (حتی برای نمونه‌ی که در فرایند مجدد ترشدگی به رطوبتی بیش از رطوبت بهینه رسیده است). برای نمونه‌های ذکر شده (تحت خشک و تر شدن) هر چه زمان جریان عبوری کمتر باشد، اختلاف دبی ورودی و خروجی از یکدیگر بیشتر شده و اختلاف نمودار جریان

### ۳. نتایج آزمایش

در ادامه، نتایج آزمایش‌های انجام شده ارائه و تشریح شده است:

#### ۱.۳. بررسی روند خشک و تر شدن بر جریان

در بخش کنونی، به تأثیر خشک و تر شدن در جریان آب ورودی و خروجی پرداخته شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، در مسیر شلنگ آب ورودی به نمونه و قبل از شیر متصل به سلول، حسگر اندازه‌گیری تغییر حجم قرار داده شده است که به کمک آن، حجم آب ورودی به نمونه توسط دیتالاگر متصل به رایانه اندازه‌گیری شده است. همچنین با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۲ گرم که در زیر شیر خروجی سلول قرار گرفته است، وزن آب خروجی در لحظات موردنظر قرائت شده است. در بخش حاضر، نمودارهای دبی تجمعی ورودی و خروجی به ترتیب برای ترکیب خاک‌های موردنظر با دو مقدار رس ۲۰ و ۳۰ درصد ارائه شده است.

#### ۱.۱.۳. نمودار جریان بر حسب زمان برای خاک با ۲۰٪ رس

در شکل ۷، دبی تجمعی آب ورودی و خروجی به نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ رس در مسیر خشک شدن مشاهده می‌شود. در مسیر خشک شدن، دو نمونه با رطوبت صفر و ۴ درصد آزمایش شده‌اند، بدین صورت که نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه در گرم‌خانه به رطوبت ۴٪ رسیده و نمونه‌ی دیگر کاملاً خشک شده و نتایج با نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه مقایسه شده است. بدیهی است که در هر نمونه، دبی جریان ورودی از زمان صفر شروع و آب ورودی پس از پُر کردن خلل و فرج نمونه و عبور از آن، پس از مدتی از شروع آزمایش از نمونه خارج می‌شود، لذا اندازه‌گیری دبی جریان خروجی نسبت به دبی جریان ورودی با اختلاف زمان همراه است و به این دلیل در هر نمونه، دبی جریان خروجی در موقعیتی پایین‌تر از دبی جریان ورودی قرار گرفته است. نکته‌ی دیگر در مورد شکل ۷ این است که نرخ افزایش دبی در نمونه با رطوبت بهینه به علت تقریباً پُر و مسدود بودن منافذ با آب، کمتر از نمونه‌های خشک و تر است. از طرفی، نرخ افزایش دبی تجمعی در نمونه‌ی حاوی ۴٪ رطوبت اولیه بیشتر از نمونه‌ی کاملاً خشک است؛ لذا به نظر می‌رسد فقط کمتر بودن رطوبت اولیه، تنها عامل در ورود و جریان آب نیست و در کنار آن، مکش بافتی و توان خروج هوا از نمونه و جایگزینی آن با آب نیز در این مورد دخیل هستند و باعث پیچیده شدن جریان آب می‌شوند. حجم آب خروجی از نمونه‌ها در لحظه‌ی آخر یکسان و مقداری

خشک‌شدگی، نمونه‌ی خاک با صفر و ۵ درصد رطوبت و برای مسیر ترشدگی نمونه‌ی خاک با رطوبت‌های ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد، با نمونه‌ی خاک ساخته شده با رطوبت بهینه مقایسه شده‌اند.

مطابق شکل‌های ۷ الی ۱۰، برای نمونه با رطوبت بهینه، زمان آب عبوری در خاک با ۳۰٪ رس از نمونه‌ی خاک با ۲۰٪ رس بیشتر بوده است. این زمان برای خاک با ۳۰٪ رس حدود ۳/۵ برابر خاک با ۲۰٪ رس بوده است. مسلماً بیشتر بودن زمان آب عبوری در خاک ۳۰٪ رس به دلیل وجود رس بیشتر بوده و با افزایش مقدار رس در ترکیب خاک، مسیر حرکت ذره‌ی آب و قدرت جذب آب بیشتر شده است. همچنین در ترکیب خاک با ۳۰٪ رس، ذرات رس کاملاً دور دانه‌های ماسه را فرا گرفته و بافت خاک بیشتر به سمت خاک رسی متمایل شده است.

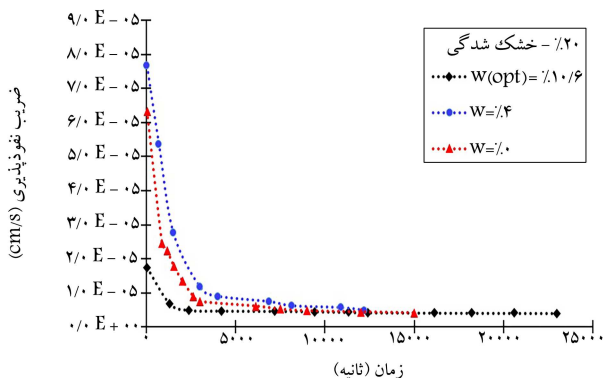
فاصله‌ی دو نمودار جریان ورودی و خروجی در خاک با ۳۰٪ رس در رطوبت بهینه، از فاصله‌ی نمودار جریان ورودی و خروجی با ۲۰٪ رس بیشتر است. این فاصله‌ی بیشتر نیز به دلیل وجود رس بیشتر است که افزایش آن باعث جذب آب بیشتری در نمونه‌ی خاک شده است. همچنین زمان آزمایش برای نمونه با ۳۰٪ رس تحت روند خشک و تر شدن نسبت به نمونه با رطوبت بهینه کمتر بوده است که نشانگر زیاد بودن دبی جریان خروجی و ورودی در نمونه‌های مذکور به دلیل ترک‌های ایجاد شده و افزایش فضای خالی در آن‌هاست. این روند در نمونه با ۳۰٪ رس همانند ترکیب با ۲۰٪ رس بوده است.

### ۲.۳. بررسی روند خشک و تر شدن در نفوذپذیری

مقادیر نفوذپذیری در بخش حاضر، با استفاده از نمودارهای دبی جریان در لحظه به دست آمده‌اند. این توضیح لازم است که ضریب نفوذپذیری براساس رابطه‌ی دارسی ( $V = k_v i$ ) محاسبه شده است که مقادیر  $i$  و  $V$  به صورت  $i = \Delta h / L$  و  $V = q / A$  و  $\Delta h = \Delta p / \gamma_w$  است. در روابط اخیر،  $i$  گرادیان هیدرولیکی و  $\Delta h$  اختلاف هد ورودی و خروجی نمونه،  $A$  سطح مقطع نمونه و  $\Delta p$  اختلاف فشار ورودی و خروجی نمونه،  $q$  دبی ورودی به نمونه و  $V$  سرعت تراوش هستند.

### ۱.۲.۳. نمودارهای نفوذپذیری برحسب زمان برای خاک با ۲۰٪ رس

در شکل ۱۱، نمودار ضریب نفوذپذیری برای روند خشک شدن مشاهده می‌شود. در روند خشک‌شدگی، نمونه‌های خاک در حالت کاملاً خشک و ۴٪ رطوبت آزمایش شده‌اند. در دو نمونه‌ی اخیر و نمونه با رطوبت بهینه، نفوذپذیری در لحظات اولیه بیشتر بوده و سپس با گذشت زمان، نفوذپذیری کاهش یافته و پس از مدتی به سمت مقدار ثابتی میل کرده است. کمترین نفوذپذیری در لحظه‌ی ابتدایی مربوط به نمونه با رطوبت بهینه بوده و این مقدار برای نمونه‌هایی که در مسیر خشک

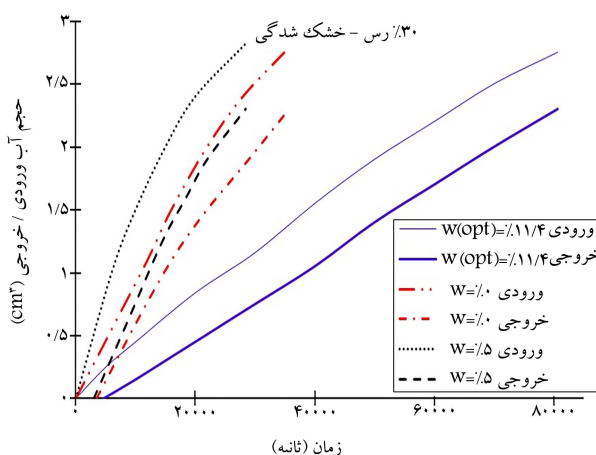


شکل ۱۱. نفوذپذیری در روند خشک‌شدگی برای خاک با ۲۰٪ رس.

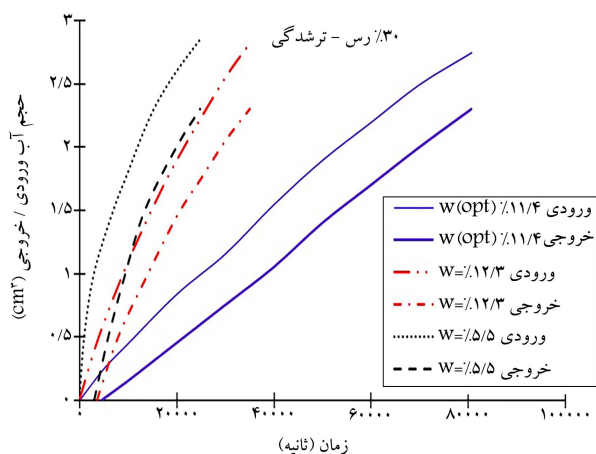
ورودی و خروجی برای نمونه با رطوبت بهینه، از دو نمونه‌ی دیگر تحت روند تر شدن و خشک شدن کمتر بوده است. در نمونه با رطوبت بهینه به دلیل آنکه ذرات خاک با انرژی تراکم مناسب در کنار هم قرار گرفته‌اند، ساختار همگن‌تری با کمترین فضای خالی را داشته است؛ لذا نیاز به زمان بیشتری برای عبور آب از بین دانه‌های خاک دارد. برای نمونه‌های تحت روند خشک‌شدگی و ترشدگی، نمونه‌ها یک بار در گرمخانه قرار گرفتند؛ لذا این موضوع باعث تبخیر شدن آب داخل خاک و منقبض شدن آن و ایجاد ترک در خاک شده است. برای نمونه‌های تحت روند تر شدن علاوه بر گرمخانه، نمونه‌ها در محفظه‌ی رطوبت قرار گرفته و دچار انبساط نیز شده‌اند. این انقباض و انبساط مجددی که در خاک رخ داده است، بر دبی جریان ورودی و خروجی و زمان عبور آب و در نتیجه نرخ تغییرات دبی بر حسب زمان تأثیر گذاشته و احتمالاً نمونه‌ی که به رطوبتی (۱۱٪) بیش از رطوبت بهینه (۱۰/۴٪) رسیده است، همچنان ساختار ترک‌خورده‌ی آن کاملاً ترمیم نشده و ساختار ترک‌ها احتمالاً حفظ شده است.

### ۲.۱.۳. نمودار جریان بر حسب زمان برای خاک با ۳۰٪ رس

در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمودار دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی به ترتیب برای روند خشک و تر شدن برای خاک با ۳۰٪ رس مشاهده می‌شود. برای مسیر

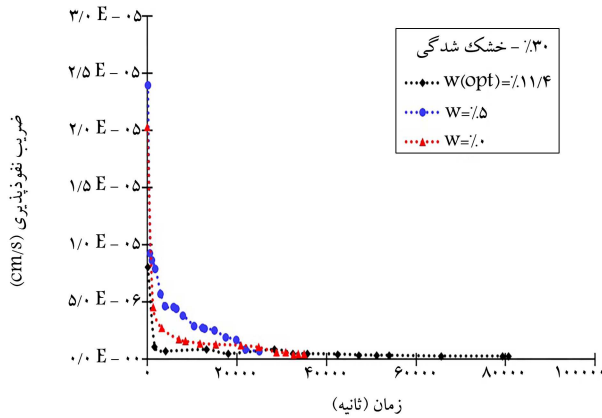


شکل ۹. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر خشک‌شدگی برای خاک با ۳۰٪ رس.

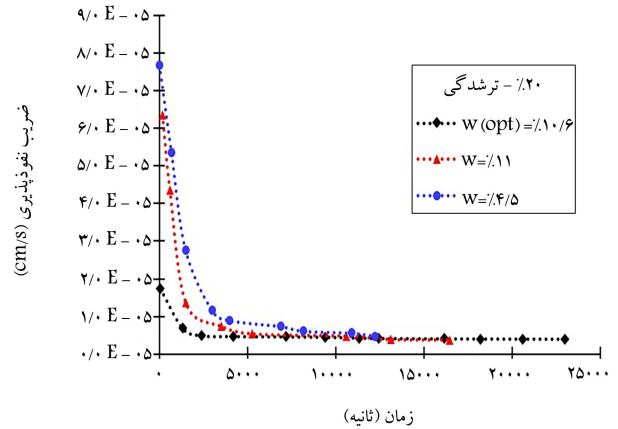


شکل ۱۰. دبی تجمعی جریان ورودی و خروجی در مسیر تر شدن برای خاک با ۳۰٪ رس.

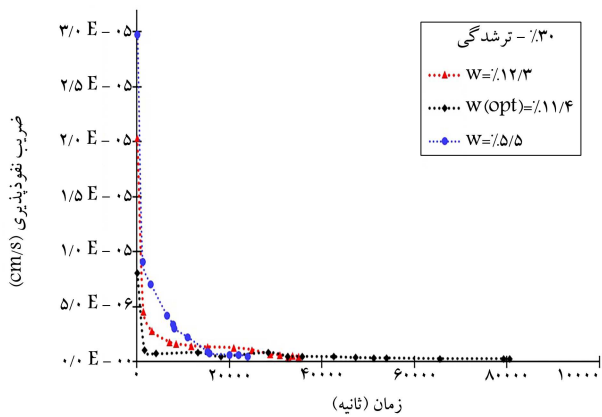




شکل ۱۳. نفوذپذیری در روند خشک شدن خاک با ۳۰ درصد رس.



شکل ۱۲. نفوذپذیری در روند تر شدن خاک با ۲۰ درصد رس.



شکل ۱۴. نفوذپذیری در روند تر شدن خاک با ۳۰ درصد رس.

شدن قرار گرفته‌اند، بیشتر بوده است؛ که به دلیل وارد شدن آب بیشتر به نمونه‌های تحت فرایند خشک‌شدگی به علت وجود فضاهای خالی ناشی از خشک شدن بوده است. اما رفته‌رفته با قرارگیری آب در بین فضاهای خالی ذکر شده و جذب آن توسط ذرات خاک، ترک‌ها بسته و فضاهای خالی پر و آب با سرعت کمتری قادر به عبور از نمونه‌ی خاک شده است؛ لذا پیوسته نفوذپذیری خاک کم شده و نرخ تغییرات نفوذپذیری نسبت به زمان اولیه کاهش یافته و با گذشت زمان، نفوذپذیری به سمت مقدار ثابتی میل کرده است. طبق نمودار، ضریب نفوذپذیری اولیه برای نمونه با ۴٪ رطوبت نسبت به نمونه‌ی کاملاً خشک بیشتر بوده است. در نمونه با رطوبت بهینه، فضای خالی بین دانه‌های خاک کم بوده و انسجام نمونه نسبت به حالت خشک شده بیشتر شده و نمونه دستخوش تغییرات زیاد نشده است.

در شکل ۱۲، تغییرات ضریب نفوذپذیری در روند ترشدگی برای خاک با ۲۰٪ رس مشاهده می‌شود. نمونه‌های تحت فرایند ترشدگی، رطوبتی برابر ۴/۵ و ۱۱ درصد دارند. در مسیر ترشدگی نیز نمونه با رطوبت بهینه، کمترین نفوذپذیری را نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است. در نمونه‌های ترشده، ابتدا نمونه‌ها کاملاً خشک و دچار ترک شده و سپس در محفظه‌ی رطوبت قرار گرفته‌اند. این مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی باعث می‌شود که خاک منقبض و منبسط شود و نیز ساختار و خلل و فرج نمونه با حالت اولیه (رطوبت بهینه) متفاوت باشد و ترک‌های به‌وجود آمده در خاک ترمیم نشوند؛ لذا نفوذپذیری در لحظات اولیه در نمونه‌های تر شده نسبت به نمونه‌ی سالم افزایش یافته و پس از گذشت زمان، نفوذپذیری در تمامی نمونه‌ها تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. طبق آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ساخته شده، ضریب نفوذپذیری برای خاک ماسه‌یی رس‌دار با ۲۰٪ رس، به میزان  $3/98 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  به دست آمده است.

**۲.۲.۳. نمودارهای نفوذپذیری برحسب زمان برای خاک با ۳۰ درصد رس**  
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ترتیب نفوذپذیری در مسیر خشک‌شدگی و ترشدگی برای خاک با ۳۰٪ رس مشاهده می‌شود. آزمایش‌ها در مسیر خشک‌شدگی برای نمونه‌ی کاملاً خشک با رطوبت صفر و نمونه با ۵٪ رطوبت و در مسیر ترشدگی برای نمونه با ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد رطوبت انجام و با نمونه با رطوبت بهینه مقایسه شده‌اند. نمونه با ۳۰٪ رس با رطوبت بهینه، کمترین نفوذپذیری را در زمان‌های اولیه‌ی آزمایش نسبت به نمونه‌های خشک شده و تر شده داشته است که این موضوع همانند خاک با ۲۰٪ رس بوده است. تغییرات نفوذپذیری در لحظات اولیه برای نمونه با رطوبت بهینه

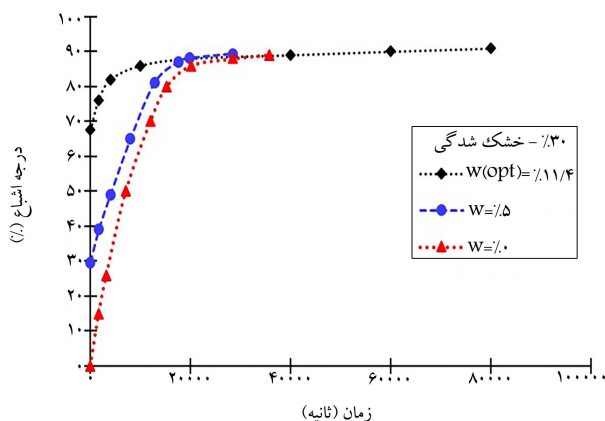
و نمونه‌های خشک و تر شده با ۳۰٪ رس نسبت به نمونه با ۲۰٪ رس بیشتر بوده است. هر چه میزان رس در نمونه‌ها بیشتر باشد، میزان رطوبت برای ساخت نمونه بیشتر می‌شود، لذا در هنگام خشک شدن نمونه، میزان رطوبتی که نمونه‌ی خاک از دست می‌دهد، بیشتر می‌شود که همین موضوع باعث ترک‌خوردگی بیشتر در نمونه نیز می‌شود. نفوذپذیری نهایی برای خاک با ۳۰٪ رس، برابر  $4/8 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  است. به دست آمده است که این مقدار به دلیل وجود رس بیشتر نسبت به نمونه با ۲۰٪ رس بوده است.

### ۳.۳. بررسی روند خشک و تر شدن بر درجه اشباع

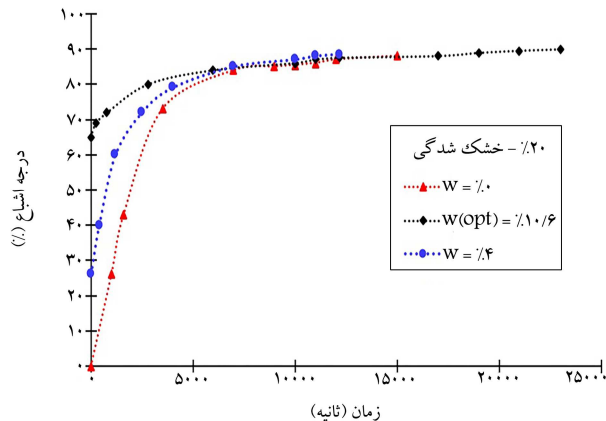
در ادامه، تغییرات درصد رطوبت و درجه اشباع در حین عبور آب برای نمونه‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است تغییرات درصد رطوبت و درجه اشباع طبق روابط وزنی حجمی محاسبه شده‌اند.

#### ۱.۳.۳. تغییرات درجه اشباع برای خاک با ۲۰٪ رس

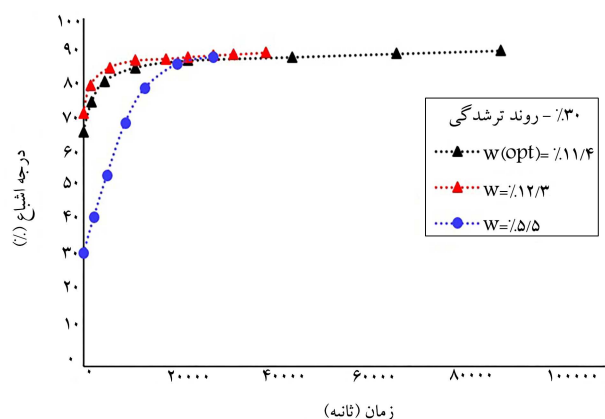
در شکل ۱۵، تغییرات درجه اشباع برای خاک با ۲۰٪ رس در روند خشک‌شدگی مشاهده می‌شود که مطابق آن ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های با رطوبت‌ها و درجه‌های اشباع‌شدگی اولیه‌ی مختلف طی زمان و عبور آب و با جذب آب، درجه اشباع با نرخ‌های متفاوت با جذب آب افزایش یافته و به مقدار ثابتی میل کرده است. نتایج آزمایش نشان داد که نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه، در ابتدا رطوبتی برابر  $10/6$ ٪ و اشباع‌شدگی برابر ۶۵٪ داشته و برای نمونه‌ی کاملاً خشک و نمونه با رطوبت اولیه‌ی ۴٪، درجه اشباع در ابتدا به ترتیب صفر و ۲۶٪ بوده است که



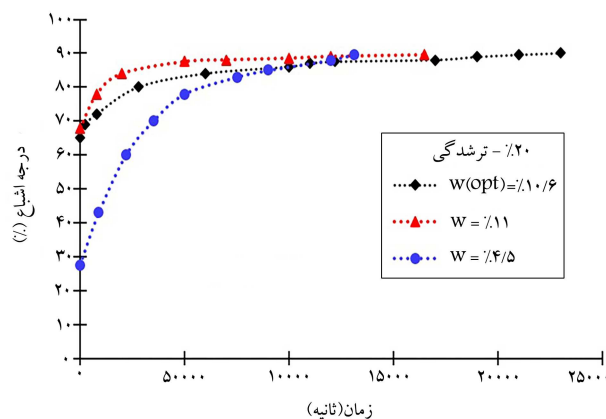
شکل ۱۷. تغییرات درصد اشباع‌شدگی در مسیر خشک شدن برای نمونه با ۳۰٪ رس.



شکل ۱۵. تغییرات درجه اشباع در روند خشک‌شدگی برای نمونه با ۲۰٪ رس.



شکل ۱۸. تغییرات درجه‌ی اشباع در مسیر ترشدگی برای نمونه با ۳۰٪ رس.



شکل ۱۶. تغییرات درصد اشباع در روند ترشدن نمونه با ۲۰٪ رس.

در شکل ۱۸، هم تغییرات درجه اشباع خاک با ۳۰٪ رس در مسیر تر شدن مشاهده می‌شود. در روند ترشدگی، تغییرات درجه اشباع نمونه‌ها با رطوبت‌های ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد با نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه، که در مسیر ترشدگی قرار نگرفته است، مقایسه شده است. درجه اشباع برای نمونه‌های با رطوبت‌های اولیه ۵/۵ و ۱۲/۳ درصد در ابتدای آزمایش به ترتیب ۳۲/۶ و ۷۲/۸ درصد بوده است که در انتهای آزمایش، حدوداً به ۹۱٪ رسیده است.

با توجه و مقایسه‌ی شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ و نیز ۱۵ الی ۱۸ نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش درجه اشباع و کاهش قدرت عبور و جذب آب، نفوذپذیری نمونه‌ها نیز کاهش یافته است. خاک خشک نسبت به نمونه‌ی مرطوب، خلل و فرج و ترک بیشتری دارد؛ چرا که در اثر جذب رطوبت توسط ذرات رس، مولکول‌های آب، جذب سطحی ذرات رس می‌شوند و لذا منافذ کوچک‌تر و ترک‌ها بسته می‌شوند و در جریان از دست دادن رطوبت، عکس این موضوع رخ می‌دهد. همچنین نمونه‌ی خشک میل به جذب بیشتر آب دارد، بنابراین در ابتدای ورود آب، آب با نرخ بیشتری وارد نمونه می‌شود و لذا نفوذپذیری آن بیشتر و با گذشت زمان، نفوذپذیری خاک کمتر شده است. از طرفی، بنا به وجود حد انقباض، می‌توان گفت با کاهش رطوبت، نقطه‌ی وجود دارد که با کاهش بیشتر رطوبت، کاهش حجم بیشتری رخ نمی‌دهد. بنابراین شاید این موضوع دلیلی باشد بر اینکه چرا در ابتدای ورود آب به نمونه، نفوذپذیری خاک کاملاً خشک از نمونه‌ی حاوی اندکی رطوبت بیشتر نشده است.

رطوبت بیشینه‌ی نهایی آن‌ها به ۱۴/۵٪ (بیش از بهینه) رسیده است. همچنین بیشینه‌ی درجه اشباع در انتهای آزمایش برای نمونه با رطوبت اولیه‌ی بهینه بوده است که به حدود ۸۹/۹٪ رسیده است. لذا ملاحظه می‌شود که حصول درجه اشباع کامل در اثر عبور آب تقریباً غیرممکن بوده است.

در شکل ۱۶، نیز تغییرات درجه اشباع برای نمونه با ۲۰٪ رس در مسیر ترشدگی مشاهده می‌شود که مطابق آن، برای نمونه با رطوبت اولیه‌ی ۴/۵٪، درجه‌ی اشباع در ابتدای آزمایش برابر ۲۷/۵٪ و برای نمونه با ۱۱٪ رطوبت اولیه برابر ۶۸٪ بوده است. برای نمونه‌های اخیر، بیشینه‌ی درصد رطوبت در انتهای آزمایش مربوط به نمونه با رطوبت بهینه بوده است، که به مقداری برابر ۱۴/۵٪ رسیده است. همچنین درجه اشباع نمونه‌ها نیز به حدود ۹۰٪ رسیده است.

### ۲.۳.۳. تغییرات درجه‌ی اشباع برای خاک با ۳۰٪ رس

در شکل ۱۷، تغییرات درجه اشباع خاک با ۳۰٪ رس در مسیر خشک شدن مشاهده می‌شود که مطابق آن، برای نمونه خشک با ۳۰٪ رس، رطوبت بهینه‌ی نمونه برابر ۱۱/۴٪ بوده است. همان‌طور که گفته شد، در مسیر خشک‌شدگی دو نمونه با رطوبت اولیه‌ی صفر و ۵ درصد آزمایش شده‌اند. درجه اشباع در ابتدای آزمایش برای نمونه با رطوبت بهینه برابر ۶۷/۵٪ و برای نمونه‌های با رطوبت صفر و ۵ درصد، به ترتیب برابر صفر و ۲۹/۶ درصد به دست آمده و بیشترین درجه اشباع در انتهای آزمایش برای نمونه با رطوبت اولیه‌ی ۱۱/۴٪ بهینه بوده است که حدوداً به ۹۰/۹٪ رسیده است.



## ۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، اثر فرایند خشک‌شدگی و ترشدگی مجدد خاک ماسه حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد رس در روند تغییرات ضریب نفوذپذیری آن به کمک دستگاه سه‌محوری بررسی شده است، اهم نتایج به دست آمده به این شرح بوده است:

- در هر نمونه‌ی حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد رس (هم در مسیر خشک‌شدگی و هم در مسیر ترشدگی)، دبی خروجی با اختلاف زمانی از دبی ورودی شروع می‌شود؛ به این دلیل که ابتدا آب خلل و فرج داخل نمونه را پر می‌کند و سپس از نمونه خارج می‌شود؛ لذا زمان شروع دبی جریان خروجی نسبت به زمان دبی جریان ورودی، دیرتر اتفاق می‌افتد.
- اختلاف دبی جریان ورودی و خروجی در نمونه‌ی ساخته شده با رطوبت بهینه نسبت به نمونه‌های تحت روند خشک‌شدگی و ترشدگی کمتر است، که دلیل آن تقریباً پر بودن فضای خالی نمونه با رطوبت بهینه و ایجاد ترک و خلل و فرج در اثر فرایند خشک‌شدگی و ترشدگی است.

- در ابتدای ورود آب به نمونه، نفوذپذیری نمونه‌ی اولیه با رطوبت بهینه، کمتر از نمونه با رطوبت‌های دیگر (چه در فرایند خشک‌شدگی و چه در فرایند ترشدگی) بوده است که به دلیل خلل و فرج و حفره‌های ایجاد شده در خاک در اثر ترک‌خوردگی نمونه‌های خشک شده است. هر چند نمونه‌ی کاملاً خشک، کمترین نفوذپذیری را نشان نداده است. لذا به نظر می‌رسد بیشترین نفوذپذیری اولیه در یک درصد رطوبت بین رطوبت بهینه و نمونه‌ی کاملاً خشک ایجاد شود.
- در تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان، نفوذپذیری ابتدا با نرخ بیشتر و سپس با نرخ کمتر کاهش یافته است، و سپس در همه‌ی آن‌ها، به سمت مقدار ثابتی میل کرده است. چراکه ظاهراً با جذب بیشتر آب، ساختار تغییر یافته‌ی خاک در اثر خشک شدن، بازسازی و تا حدودی یکسان می‌شود.
- با گذشت زمان و عبور آب از نمونه، آب بیشتری جذب خاک می‌شود و درجه اشباع و درصد رطوبت نمونه، افزایش می‌یابد. هر چقدر رطوبت اولیه‌ی نمونه، کمتر و نمونه خشک‌تر باشد، نرخ جذب آب و افزایش درصد رطوبت و نیز درجه اشباع بیشتر است.

## پانویس‌ها

1. Permeability Coefficient
2. Net Normal Stress
3. Matric Suction
4. Fredlund
5. Talebolelm
6. Gallage
7. Al-Shayea
8. Dong
9. Cai
10. Goh
11. Zahng & Fredlund
12. Wen
13. Nguyen

## منابع (References)

1. Pourhosseini, R., Mossavi, M. and Nassiri, N. "Influence of temperature on desiccation cracking of clay soil", *Amirkabir J. Civil Eng*, **49**(3), pp. 161-164 (2017).
2. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. "An introduction to geotechnical engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA (1981).
3. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. "Soil mechanics for unsaturated soils", *John Wiley & Sons*, New York, NY, USA (1993).
4. Mirzaii, A. and Yasrobi, S.S. "Effect of net stress on hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Transport in Porous Media*, **95**(3), pp. 497-505 (2012).
5. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S. "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(4), pp. 533-546 (1994).
6. Mirzaii, A., Yasrobi, S.S. and Khalili, N. "Experimental investigation of hydraulic conductivity in unsaturated compressible soils", in *Proceedings of the 2nd European Conference on Unsaturated Soils*, pp. 205-212, Napoli, Italy (June, 2012).
7. Fredlund, D.G. "Unsaturated soil mechanics in engineering practise", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(3), pp. 286-321 (2006).
8. Gallage, C., Kodikara, J. and Uchimura, T. "Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes", *Soils and Foundations*, **53**(3), pp. 417-430 (2013).
9. Adelian Bahanmiri, G., Yasrobi, S. and Mirzaei, A. "Evaluation of the effects of hydraulic and mechanical parameters on the water coefficient permeability of clayey sand with a novel permeameter for unsaturated soils", *Sharif Civil Engineering Journal*, **2-28**(4), pp. 15-24 (In Persian) (1391/2013).
10. Lu, H., Li, J., Wang, W. and et al. "Cracking and water seepage of Xiashu loess used as landfill cover under wetting-drying cycles", *Environmental Earth Sciences*, **74**(11), pp. 7441-7450 (2015).
11. Bakti, L.A.A., Kirchoff, G. and Som H.B. "Effect of wetting and drying on structural regeneration of puddled soil", *Soil Solutions for a Changing World, Proc. 19th World Congr, Soil Science* (2010).
12. Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Shear strength of unsaturated soils under multiple drying-wetting cycles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **140**(2), p. 06013001 (2014).

13. Talebolelm, A. "Investigation of mechanical characteristics on core dam materials in reservoir fluctuations and frequently changes in core degree of saturation (case study: Doosty Dam)", Ph.D Thesis, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian) (1397/2019) (2019).
14. Al-Shayea, N.A. "The combined effect of clay and moisture content on the remolded unsaturated soils", *Engineering Geology*, **62**(4), pp. 319-342 (2001).
15. Dong, Y., Wu, Y., Yin, J. and et al. "Investigation of soil shear-strength parameters and prediction of the collapse of gully walls in the black soil region of northeastern China", *Physical Geography*, **32**(2). pp. 161-178 (2011).
16. Cai, G., Zhou, A. and Sheng, D. "Permeability function for unsaturated soils with different initial densities", *Canadian Geotechnical Journal*, **51**(12), pp. 1456-1467 (2014).
17. Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Modification of triaxial apparatus for permeability measurement of unsaturated soils", *Soils and Foundations*, **55**(1). pp. 63-73 (2015).
18. Zahng, F. and Fredlund, D.C. "Examination of the estimation of relative permeability for unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(12), pp. 2077-2087 (2015).
19. Nazari, S., Hassanlourad, M., Chavoshi, E. and et al. "Experimental investigation of unsaturated silt-sand soil permeability", *Advances in Civil Engineering*, pp. 1-12 (2018).
20. Wen, T., Shao, L. and Guo, X. "Permeability function for unsaturated soil", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **25**(1), pp. 1-13 (2021).
21. Nguyen, B.T., Ishikawa, T., Zhu, Y. and et al. "New simplified transient method for determining the coefficient of permeability of unsaturated soil", *Engineering Geology*, **300**, p. 106564 (2022).
22. ASTM D422-63, "Standard test method for particle-size analysis of soils", West Conshohocken (1998).
23. ASTM D698-12, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", West Conshohocken (2012).
24. ASTM D4318, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", West Conshohocken (2005).
25. ASTM D854, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", West Conshohocken (2000).
26. ASTM D2850-03, "Standard test method for unconsolidated - undrained triaxial compression test on cohesive soils" (2017).