

# برآورد تأثیر رس در پتانسیل رهمبندگی خاک در روش‌های مختلف نفوذ آب

جواد محمودی (دانشجوی دکتری)

رضا پورحسینی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۲)  
دروزی ۳۹، شماره ۳، صص. ۱۱۱-۱۲۰، (پژوهشی)

خاک‌های رهمبده در زمان خیس شدن، نشست‌های قابل توجهی را تجربه می‌کنند. میزان رس به عنوان یک عامل مهم در رفتار خاک رهمبده در نظر گرفته می‌شود. آب از منابع مختلف وارد خاک می‌شود، اما آزمایش‌های موجود برای اندازه‌گیری پتانسیل رهمبندگی، قابلیت مدل‌سازی نحوه‌ی نفوذ آب در خاک را ندارند. در مطالعه‌ی حاضر، از دستگاهی استفاده شده است که نحوه‌ی ورود آب به خاک را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که در همه‌ی آزمایش‌ها با افزایش میزان رس، پتانسیل رهمبندگی افزایش یافته است؛ اما میزان افزایش یکسان نبوده است. میزان افزایش پتانسیل رهمبندگی، در آزمایش‌های ادهومتر بیشتر از آزمایش‌های با شبیه‌سازی الگوی نفوذ آب بوده است. در بین الگوهای مختلف نفوذ آب در خاک، با افزایش ۹/۱٪ رس، بیشترین افزایش پتانسیل رهمبندگی مربوط به نفوذ آب از بالا به صورت نقطه‌یی ( $C_p = 4/79$ ) و کمترین افزایش مربوط به نفوذ آب از پایین به صورت گسترده ( $C_p = 3/69$ ) بوده است. اما با افزایش ۲۳٪ رس، بیشترین افزایش مربوط به نفوذ آب از بالا به صورت گسترده ( $C_p = 8/62$ ) و کمترین افزایش مربوط به نفوذ آب از پایین به صورت گسترده ( $C_p = 7/8$ ) بوده است.

واژگان کلیدی: درصد رس، پتانسیل رهمبندگی، الگوی نشست آب، دستگاه آزمایشگاهی، خاک رهمبده.

mahmoudijavad70@gmail.com  
r\_porhoseini@yazd.ac.ir

## ۱. مقدمه

خاک رهمبده در حالت خشک از خود پایداری خوبی نشان می‌دهد، اما وقتی آب وارد خاک رهمبده می‌شود، دچار نشست‌های ناگهانی و قابل توجه می‌شود. رفتار خاک رهمبده باعث شده است که در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی بر روی شناسایی، بررسی رفتار، و بهسازی آن انجام شود.

خاک‌های رهمبده بیش از ۱۰٪ از وسعت خشکی دنیا را شامل می‌شوند. کشورهایی مانند: چین، روسیه، ایالات متحده‌ی آمریکا، آلمان، آرژانتین، فرانسه و نیوزلند بیشترین نهشته‌های رهمبده را دارند. [۵-۱]

نیروی مویبندگی یا مکش زمینیهی، نیروهای بین مولکولی ذرات، نیروی الکترواستاتیک یونی، پل‌های رسی بین ذرات سیلت و ماسه و اتصال‌های شیمیایی، مانند: کلسیم کربنات، نمک‌ها و اکسید آهن باعث می‌شوند که خاک‌های رهمبده در حالت خشک، مقاومت قابل توجهی از خود نشان دهند، اما با ورود آب، اتصال‌های شیمیایی ذکر شده از بین می‌رود و خاک دچار نشست‌های ناگهانی می‌شود. [۷، ۶]

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

استناد به این مقاله:

محمودی، جواد و پورحسینی، رضا، ۱۴۰۲. برآورد تأثیر رس در پتانسیل رهمبندگی خاک در روش‌های مختلف نفوذ آب. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۱۱۱-۱۲۱.

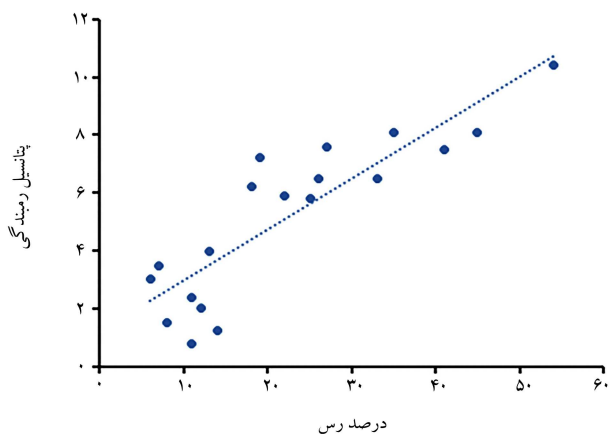
DOI:10.24200/J30.2023.61519.3179

ویژگی‌های شاخص خاک‌های رهمبده، عبارت از: وزن مخصوص کم، ساختار باز، پوکی بالا، نهشته‌ی جوان، درصد رطوبت کم و پیوند ضعیف بین ذرات هستند. [۴، ۱-۸، ۱۰] رهمبندگی و مشکلات مرتبط با آن، مانند: نشست تفاضلی ترک‌های سطح زمین، زمین‌لغزش باعث ایجاد خسارت در زیرساخت‌های قرار گرفته بر روی نهشته‌های رهمبده شده است، حتی در بعضی از موارد از دست رفتن جان انسان نیز گزارش شده است. [۱۲، ۱۱]

ساخت و ساز ساختمان‌ها بر روی خاک‌های رهمبده، که معمولاً در نقاط خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، نیازمند پایداری یا بهسازی خاک‌های رهمبده است. [۱۳] مهم‌ترین مسئله در برخورد با خاک‌های رهمبده، پیش‌بینی رفتار آنها در زمان خیس شدن است. در مطالعات مربوط به خاک رهمبده از پارامتر پتانسیل رهمبندگی برای پیش‌بینی نشست‌های آن در زمان خیس شدن استفاده می‌شود. پتانسیل رهمبندگی، یک شاخص از میزان تغییر حجم کل یک خاک است، که در اثر بارگذاری و خیس شدن از خود نشان می‌دهد. در نشست یک‌بعدی، پتانسیل رهمبندگی با استفاده از تغییر ضخامت نمونه پس از خیس شدن و اعمال بار محاسبه می‌شود. در

جدول ۱. طبقه‌بندی شاخص ریمبندگی. [۱۶]

شاخص ریمبندگی	درجه‌ی ریمبندگی
۰	ندارد
۰/۱-۲	اندک
۲/۱-۶	متوسط
۶/۱-۱۰	تا حدی شدید
> ۱۰	شدید



شکل ۱. نتایج مطالعات الوایل و همکارانش (۱۹۹۴). [۲۷]

بوده است. برای درصد ریزدانه‌ی افزایش یافته (۲۰ و ۳۰ درصد)، میزان ریمبندگی به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش یافته است. [۱۹]

لاون<sup>۶</sup> و همکارانش (۱۹۹۲)، تأثیر میزان رس در نشست‌های ناشی از خیس شدن را بررسی کرده و دریافته‌اند که در خاک ماسه - رس، پتانسیل ریمبندگی ابتدا با افزایش درصد رس افزایش می‌یابد. با این حال، زمانی که درصد رس در خاک غالب می‌شود (درصد رس بیش از ۴۰٪)، تورم رس، رفتار خاک را کنترل می‌کند و باعث کاهش نشست می‌شود. در خاک سیلت - رس، اثر درصد رس شبیه به خاک ماسه - رس بوده است، با این تفاوت که درصد رس بحرانی حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد بوده است. در خاک ماسه‌ی اوتاوا - کائولین، بیشترین ریمبندگی برای درصد رس بین ۱۲ تا ۱۶ درصد اتفاق افتاده و برای درصد رس ۵ تا ۲۵ درصد، مخلوط ماسه‌ی اوتاوا - کائولین، بیشتر از دو نمونه‌ی خاک دیگر دچار ریمبندگی شده است. [۱۸]

الوایل<sup>۷</sup> و همکارانش (۱۹۹۴)، تأثیر درصد رس را در ریمبندگی بررسی کرده‌اند. مطالعات ایشان، شامل ۲۵ نمونه‌ی خاک با درصد ریزدانه (۵۵، ۴۵، ۳۵، ۲۵، ۱۵) و نسبت رس به سیلت (۱، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۳۱) بوده است. آنها از ادومتر دوپل برای بررسی رفتار نمونه‌های اخیر استفاده کرده‌اند و یافته‌ی اصلی آنها، یک رابطه‌ی خطی بین بیشترین ریمبندگی و درصد رس بوده است، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همچنین ایشان مشاهده کردند که نسبت رس به سیلت بالا، ریمبندگی بیشتری در مقایسه با نسبت رس به سیلت پایین ایجاد می‌کند. [۲۷]

کیم<sup>۸</sup> و همکارانش (۲۰۰۸)، رفتار ریمبندگی لس ایندیانا را برای استفاده به عنوان خاکریز در جاده بررسی کرده‌اند. خاک به دو صورت طبیعی و همراه با اضافه کردن ۵ تا ۱۰ درصد رس آزمایش شده است. برنامه‌ی آزمایشگاهی آنها شامل: آزمایش تراکم و آزمایش ادومتر تک (اشباع در ۱۰۰ کیلوپاسکال) بر روی خاک‌های با ۴ میزان مختلف رس (۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰ درصد) بوده است. آنها دریافته‌اند که پتانسیل ریمبندگی با کاهش درصد رس از ۳۰ تا ۱۰ درصد، افزایش یافته است. [۲۲]

آب می‌تواند از منابع مختلفی، مانند: بارندگی، سیلاب‌ها، آبیاری درختان، نشست و شکست لوله‌های انتقال آب، بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، نشست فاضلاب و... وارد خاک ریمبندگی شود. [۲۸] در مطالعاتی که تا به امروز بر روی تأثیر میزان رس در خاک ریمبندگی انجام گرفته است، از دستگاه ادومتر استفاده شده است، که در آن، نمونه از بالا و پایین به صورت هم‌زمان اشباع می‌شود. در واقعیت، این روش اشباع کردن، الگوی مناسبی برای مدل‌سازی هیچ‌کدام از منابع نفوذ آب به خاک ریمبندگی نیست. در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از دستگاهی با قابلیت مدل‌سازی الگوهای

معادله‌ی ۱، یک تعریف مهندسی از پتانسیل ریمبندگی با استفاده از تغییرات نسبت تخلخل ارائه شده است: [۱۶]

$$C_p = \frac{\Delta e}{1 + e_s} \times 100 = \frac{\Delta h}{h_s} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،  $C_p$  پتانسیل ریمبندگی،  $\Delta e$  تغییر نسبت تخلخل ناشی از خیس شدن،  $e_s$  نسبت تخلخل اولیه،  $\Delta h$  تغییر ارتفاع نمونه ناشی از خیس شدن و  $h_s$  ارتفاع اولیه‌ی نمونه است.

پتانسیل ریمبندگی می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلفی اندازه‌گیری شود، که مهم‌ترین آنها عبارت از: روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های صحرایی و استفاده از روابط بین پتانسیل ریمبندگی و سایر مشخصات خاک است. [۱۵]

متداول‌ترین روش‌های اخیر، استفاده از آزمایش ادومتر و آزمایش سه‌محوری است. دو نوع آزمایش ادومتر برای تعیین پتانسیل ریمبندگی استفاده می‌شود: آزمایش ادومتر تک<sup>۱</sup> و آزمایش ادومتر دوگانه<sup>۲</sup>.

در استاندارد ASTM D ۵۳۳۳، روش اندازه‌گیری پتانسیل ریمبندگی خاک‌ها با استفاده از آزمایش ادومتر تک، تشریح و پتانسیل ریمبندگی<sup>۳</sup> ( $I_c$ ) معرفی شده است، که برابر با میزان ریمبندگی خاک است، که در هر سطح تنش می‌تواند با استفاده از معادله‌ی ۲ محاسبه شود. [۱۶]

$$I_c = \left[ \frac{d_f - d_i}{h_s} \right] 100 \quad (2)$$

که در آن،  $I_c$  پتانسیل ریمبندگی،  $d_f$  قرائت گیج بعد از خیس شدن،  $d_i$  قرائت گیج قبل از خیس شدن و  $h_s$  ارتفاع اولیه‌ی نمونه است.

در ادامه در استاندارد اخیر، شاخص ریمبندگی<sup>۴</sup> ( $I_e$ ) معرفی شده است، که میزان پتانسیل ریمبندگی در تنش اعمالی مرجع ۲۰۰ kPa را نشان می‌دهد، که براساس مقادیر شاخص ریمبندگی، درجه‌ی ریمبندگی نمونه مطابق جدول ۱ طبقه‌بندی می‌شود. [۱۶]

پارامترهای زیادی می‌توانند در رفتار خاک‌های ریمبندگی تأثیر بگذارند. پارامترهایی که تأثیر آنها در برخی مطالعات بررسی شده است، شامل: شرایط اولیه‌ی خاک (وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت، نسبت تخلخل و...)، شرایط بارگذاری (میزان سربار، مسیر تنش، سرعت بارگذاری و...) و کیفیت دانه‌بندی (درصد رس، ضریب یکنواختی و...) می‌شود. [۱۷-۲۷]

میزان رس موجود در خاک ریمبندگی، پارامتری است که می‌تواند تأثیر زیادی در رفتار خاک ریمبندگی در زمان خیس شدن بگذارد. استیدمن<sup>۵</sup> (۱۹۸۷)، برای بررسی تأثیر درصد ریزدانه‌ها در پتانسیل ریمبندگی از خاک ساختگی استفاده کرده است، که شامل ماسه و سیلت می‌شد. دامنه‌ی تغییرات تراکم خاک آزمایشی، شامل: تراکم نسبی ۸۵٪ تا ۹۰٪ و درصد رطوبت ۳٪ زیر رطوبت بهینه بوده است. براساس آزمایش‌های انجام شده، استیدمن متوجه شد که برای درصد ریزدانه‌ی کم (تقریباً ۱۰٪)، ریمبندگی برای همه‌ی خاک‌ها خیلی کوچک (در حدود ۸/ تا ۲/۱ درصد)

جدول ۲. ترکیب‌های شیمیایی کائولین استفاده شده.

ترکیب‌های دیگر	S	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب شیمیایی مقدار (%)
۷/۱۷	۰/۰۲	< ۰/۰۱	< ۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۴۹	۱۸/۸۴	۷۲/۳۹	(%)

جدول ۳. نتایج نمونه‌های اولیه.

میزان رس (%)	نسبت رس به ماسه (%)	پتانسیل رمبندگی	درجه رمبندگی
۰	۰	۲/۶۹	متوسط
۴/۷	۵	۴/۱۳	متوسط
۹/۱	۱۰	۵/۶۴	متوسط
۱۳	۱۵	۷/۵	تا حدی شدید
۱۶/۶	۲۰	۸/۱۹	تا حدی شدید
۲۰	۲۵	۸/۵۵	تا حدی شدید
۲۳	۳۰	۸/۸۷	تا حدی شدید
۲۵/۹	۳۵	۹/۱۹	تا حدی شدید
۲۸/۵	۴۰	۹/۴۹	تا حدی شدید

جدول ۴. مشخصات فیزیکی خاک استفاده شده.

C <sub>v</sub>	C <sub>u</sub>	G <sub>s</sub>	ω <sub>opt</sub> (%)	γ <sub>d, max</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	ω(%)	γ(kN/m <sup>3</sup> )	نوع خاک	ویژگی
۲/۴	۱۵	۲/۷۲	۸/۳	۲۰/۹۷	۵	۱۳	SW-SC	خاک A
۲/۳۸	۸/۵	۲/۷۰	۱۰/۳	۲۰	۵	۱۳	SW-SC	خاک B
۱/۰۳	۲/۷۶	۲/۶۸	۱۰/۹۸	۱۸/۱۸	۵	۱۳	SP	خاک C

در مطالعه‌ی حاضر، از ۹ نسبت وزنی مختلف رس به ماسه ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد برای ساخت نمونه‌های با پتانسیل رمبندگی مختلف استفاده شده است. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده در جدول ۳ ارائه شده است. از میان نمونه‌های اخیر، سه نمونه‌ی A، B و C به ترتیب با میزان رس ۲۳، ۹/۱ و ۰ درصد برای استفاده در دستگاه با قابلیت مدل‌سازی روش‌های مختلف نفوذ آب و بررسی تأثیر میزان رس موجود در خاک رمبند استفاده شده است. مشخصات ژئوتکنیکی سه نمونه‌ی مذکور در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است، که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نمودارهای دانه‌بندی و نتایج آزمایش تراکم سه نمونه خاک A، B و C به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ و منحنی‌های تنش - نشست آزمایش تعیین پتانسیل رمبندگی با استفاده از دستگاه ادنومتر آنها نیز در شکل ۴ مشاهده می‌شوند.

### ۲.۲. دستگاه با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای نشست آب

در مطالعات انجام شده از دستگاه‌هایی برای اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی استفاده شده است، که آب به صورت یک‌دفعه از بالا و پایین و به صورت گسترده وارد نمونه‌ی خاک می‌شود، که این نوع اشباع‌شدگی نمی‌تواند مدل مناسبی برای تحلیل انواع شرایط اشباع شدن خاک در واقعیت باشد. با توجه به محدودیت دستگاه‌های موجود، مطابق با شکل ۵، دستگاهی با قابلیت شبیه‌سازی انواع نشست آب در خاک ساخته و استفاده شده است. برای این‌که روش‌های مختلف نفوذ آب در خاک قابلیت مدل‌سازی داشته باشند، ابعاد سلول نسبت به دستگاه ادنومتر افزایش پیدا کرده و از نمونه‌ها با قطر ۱۴ و

مختلف نفوذ آب در خاک، پتانسیل رمبندگی خاک رمبند برای روش‌های مختلف نفوذ آب در خاک بررسی شده است. تغییرات پتانسیل رمبندگی ناشی از افزایش میزان رس در آزمایش‌های ادنومتر تک و ادنومتر دوگانه و آزمایش‌های با قابلیت شبیه‌سازی الگوی نفوذ آب، اندازه‌گیری و مقایسه شده است.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

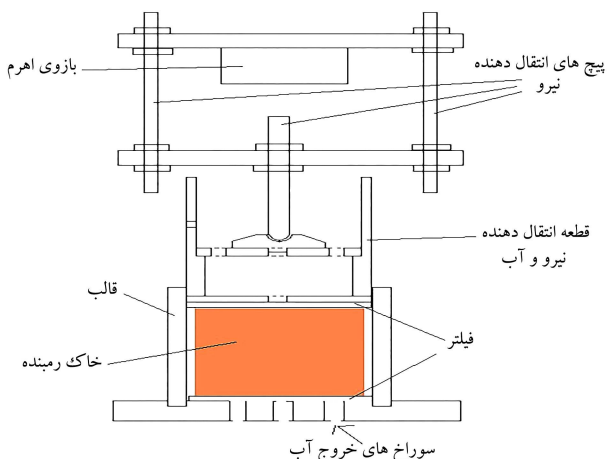
### ۲.۱. آماده‌سازی نمونه

در مطالعات آزمایشگاهی از یک نمونه خاک رمبندگی ساخته شده در آزمایشگاه استفاده شده است. مطابق با مطالعات هانا و سلیمان<sup>۹</sup> (۲۰۱۷)، می‌توان با ترکیب ماسه‌ی ریزدانه و رس کائولین و اضافه کردن مقداری رطوبت، یک خاک رمبندگی ساخت. با استفاده از نسبت‌های مختلف رس به ماسه و وزن مخصوص‌های متفاوت (انرژی تراکم متفاوت)، می‌توان نمونه‌هایی با پتانسیل‌های رمبندگی مختلف ساخت. کائولین نقش اتصال‌دهندگی بین ذرات ماسه‌ی را در نمونه‌ها دارد. مشخصات شیمیایی کائولین استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

مطابق با مطالعه‌ی محمدی و همکارانش (۱۳۹۲)، روش بارشی به دلیل ایجاد نمونه‌های همگن و مشابه به رسوب‌های طبیعی، نسبت به روش‌های دیگر ساخت نمونه مناسب‌تر است.<sup>۱۳</sup> در مطالعه‌ی حاضر نیز از روش بارش برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است؛ که در آن، پس از مخلوط کردن ماسه و رس کائولین با نسبت‌های وزنی مختلف و اضافه کردن ۵٪ رطوبت، نمونه‌ی ترکیب شده از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بارش شده و داخل قالب دستگاه ادنومتر ریخته شده است.



شکل ۵. دستگاه ارزیابی پتانسیل رهمبندگی با قابلیت مدل‌سازی الگوی نفوذ آب.

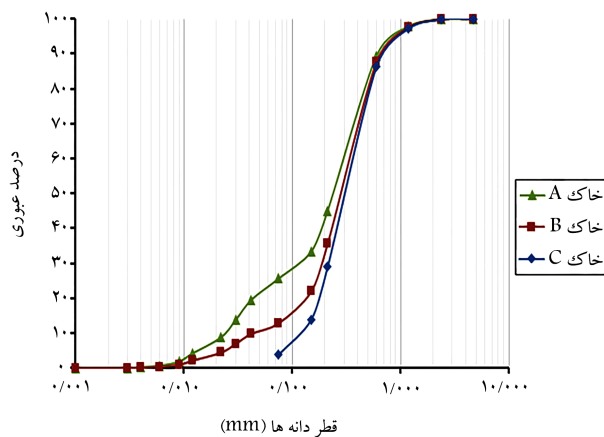


شکل ۶. نحوه مدل‌سازی نفوذ آب از بالا به پایین به صورت نقطه‌یی.

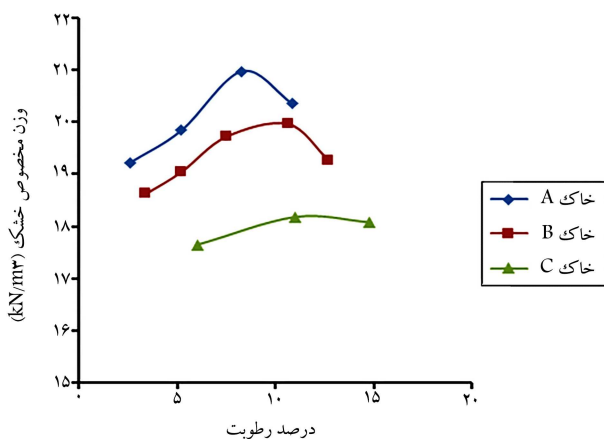
روی صفحه‌ی انتقال دهنده‌ی نیرو به نمونه قرار می‌گیرد و با دقت ۱/۰ میلی‌متر مقدار نشست‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و مقادیر اندازه‌گیری شده در حافظه ذخیره می‌شوند. به طور کلی منابع نفوذ آب به خاک را می‌توان به ۴ دسته تقسیم کرد: الف) منابعی که به صورت نقطه‌یی از بالا به پایین باعث اشباع شدن یک ناحیه‌ی خاص از خاک رهمبده می‌شوند، مانند: نشست لوله‌های سطحی؛ ب) منابعی که به صورت گسترده و از بالا به پایین باعث اشباع خاک می‌شوند، مانند: جاری شدن سیل؛ ج) منابعی که به صورت نقطه‌یی از پایین به بالا باعث اشباع شدن یک ناحیه‌ی خاص از خاک رهمبده می‌شوند، مانند: نشست از لوله‌های مدفون؛ د) منابعی که به صورت گسترده و از پایین به بالا باعث اشباع خاک می‌شوند، مانند: بالا آمدن سطح آب زیرزمینی.

دستگاه اشاره شده، قابلیت مدل‌سازی هر ۴ نوع الگوی نفوذ آب در خاک را دارد. در الگوهای با حرکت آب از بالا به پایین، نمونه داخل قالب قرار می‌گیرد و یک قطعه‌ی از پیش ساخته شده بر روی نمونه قرار می‌گیرد که دو عملکرد دارد: ۱) بار را از سیستم بارگذاری دریافت و بر روی سطح نمونه انتقال می‌دهد؛ ۲) آب را براساس نحوه‌ی توزیع آب (نقطه‌یی یا گسترده) بر روی سطح نمونه می‌رساند. این قطعه به گونه‌ی طراحی شده است که سطح آب ثابت باقی می‌ماند. آب از بالا وارد قطعه‌ی مذکور می‌شود و مقداری از آن وارد نمونه می‌شود و مقدار اضافه توسط یک شیر خروجی قرار گرفته روی جداره‌ی آن خارج می‌شود. همچنین با جمع‌آوری آب خارج شده از پایین نمونه و انجام آزمایش‌های شیمیایی بر روی آن، می‌توان جنس اتصال‌های بین ذرات خاک رهمبده را، که در آب حل و از پایین نمونه خارج شده‌اند، به دست آورد.

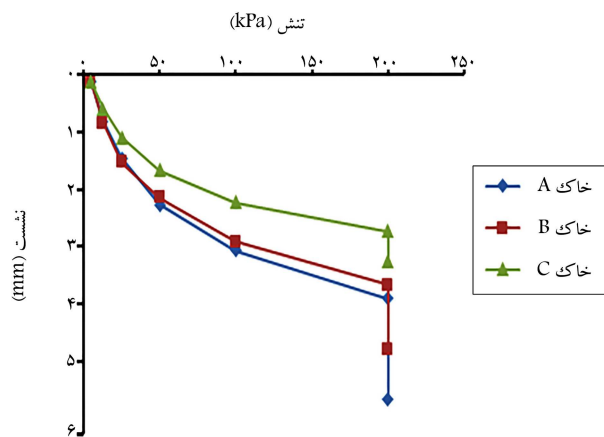
در شکل ۶، نحوه‌ی مدل‌سازی نفوذ آب از بالا به سمت پایین به صورت نقطه‌یی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری نمونه‌های استفاده شده.



شکل ۳. منحنی تراکم نمونه‌های استفاده شده.

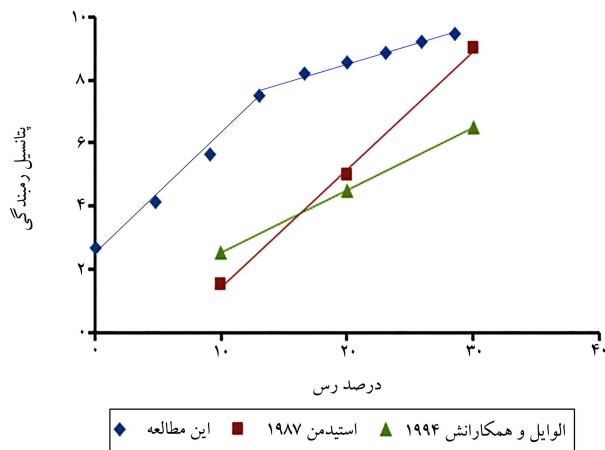


شکل ۴. نتایج آزمایش ادنومتر نمونه‌های استفاده شده.

ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در دستگاه اخیر استفاده شده است تا تأثیر الگوهای نشست آب در خاک بررسی شوند.

در دستگاه ارزیابی پتانسیل رهمبندگی برای بارگذاری نمونه و اعمال تنش‌های مورد نظر بر روی سطح نمونه، از یک سیستم بارگذاری اهرمی استفاده شده است که نیرو را ۴/۵ برابر می‌کند.

برای اندازه‌گیری نشست‌ها در هر مرحله از بارگذاری و پس از اشباع کردن نمونه، از یک جابه‌جایی‌سنج (LVDT)، دیتالاگر و رایانه استفاده شده است. جابه‌جایی‌سنج بر



شکل ۸. تغییرات پتانسیل رطوبتی در مقابل درصد رس موجود در خاک.

شده است. مطابق شکل ۸، با افزایش میزان رس موجود در نمونه تا میزان ۲۸/۵٪، میزان پتانسیل رطوبتی افزایش می‌یابد. در لس‌ها، رس بین ذرات ماسه یا سیلت یک اتصال به وجود می‌آورد، که در حالت خشک مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد؛ اما در زمان خیس شدن فرو می‌ریزد و باعث نشست ناگهانی و قابل توجه در لایه‌ی خاک رطوبت‌دهنده می‌شود.

مطابق با شکل ۸، نتایج مطالعه‌ی حاضر و مطالعات استیدمن (۱۹۸۷) و الوایل و همکارانش (۱۹۹۴) نشان می‌دهند که با افزایش میزان رس، تا ۳۰٪ پتانسیل رطوبتی افزایش یافته است. اما براساس نتایج مطالعه‌ی حاضر، سرعت افزایش پتانسیل رطوبتی بعد از میزان ۱۳٪ رس کاهش یافته است. در صورتی که در مطالعات پیشین، سرعت رشد پتانسیل رطوبتی ثابت بوده است.

### ۲.۳. ادئومتر دوگانه

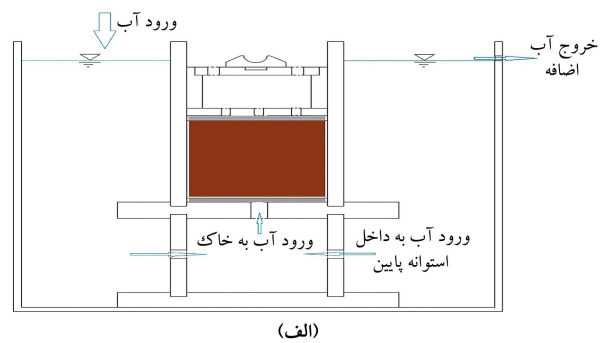
قاعده‌ی آزمایش ادئومتر دوگانه بر این اساس است که تغییرشکل‌های به وجود آمده در اثر خیس شدن، مستقل از مسیر بارگذاری - خیس شدن خواهند بود. آزمایش ادئومتر دوگانه با استفاده از دو نمونه‌ی یکسان انجام می‌شود، یکی به روش آزمایش ادئومتر معمول در درصد رطوبت طبیعی صورت می‌گیرد و نمونه‌ی دیگر، پس از غرقاب شدن بارگذاری می‌شود.

در شکل ۹، نتایج آزمایش ادئومتر دوگانه برای سه نمونه‌ی نهایی مشاهده می‌شود. اختلاف دو منحنی خشک و خیس در هر سرباری، نشان‌دهنده‌ی میزان نشست رطوبتی در همان سربار است. پتانسیل رطوبتی برای خاک‌های A، B و C برای سربار ۲۰۰ kPa به ترتیب: ۸/۹۲، ۵/۷ و ۲/۷۵ بوده است.

### ۳.۳. نفوذ آب با الگوی بالا - نقطه‌ی

ابعاد نمونه نسبت به آزمایش ادئومتر افزایش یافت و در داخل دستگاه قرار گرفت. پس از رسیدن تنش سربار به میزان ۲۰۰ kPa، آب از بالا و از یک نقطه در وسط سطح نمونه وارد خاک شد و به سمت پایین حرکت کرد و میزان نشست تا ۲۴ ساعت بعد از شروع فرایند نفوذ آب، اندازه‌گیری شد.

در شکل ۱۰، نتایج خاک‌های A، B و C، برای نفوذ نقطه‌ی آب از بالا به صورت نشست در مقابل تنش مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۱۱، منحنی نشست مطلق بعد از شروع فرایند اشباع شدن تا ۲۴ ساعت بعد از آن به صورت نشست - زمان مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی تغییرات نشست در زمان‌های



(الف)



(ب)

شکل ۷. الف) نحوه‌ی مدل‌سازی نفوذ آب از پایین به سمت بالا و به صورت نقطه‌ی بی؛ ب) ثابت نگهداشتن ارتفاع آب.

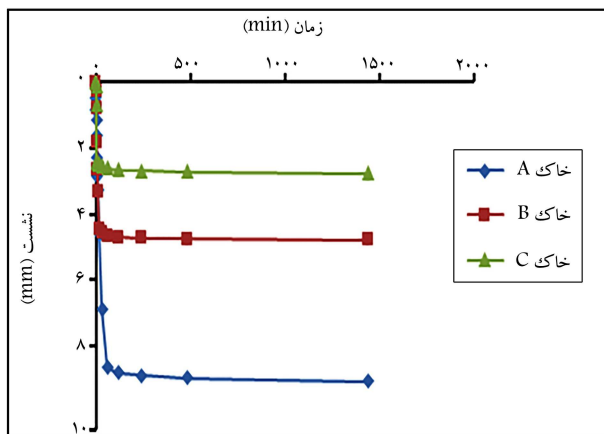
مشاهده می‌شود. برای مدل‌سازی توزیع گسترده در حرکت آب از بالا به سمت پایین، کافی است که صفحه‌ی دایره‌ی شکل قرار گرفته بر روی نمونه تغییر کند و به جای استفاده از صفحه با یک سوراخ، از صفحه‌ی با ۵ سوراخ استفاده کرد.

برای مدل‌سازی الگوهای نفوذ آب از پایین به سمت بالا، قالب نمونه روی یک استوانه قرار می‌گیرد. این استوانه ۴ سوراخ بر روی جداره‌ی خود دارد، که اجازه می‌دهد آب وارد آن شود. بین قالب و استوانه‌ی زیر آن از یک صفحه استفاده می‌شود، که براساس نحوه‌ی توزیع آب (نقطه‌ی یا گسترده) می‌تواند ۱ یا ۵ سوراخ داشته باشد. بر روی نمونه نیز یک قطعه قرار می‌گیرد، که هم بار را از سیستم بارگذاری به نمونه انتقال می‌دهد و هم آب پس از عبور از نمونه، داخل آن جمع می‌شود. تمامی قطعات ذکر شده داخل یک محفظه‌ی پلاستیکی قرار می‌گیرند، که در زمان اشباع شدن پر از آب می‌شود و آب داخل آن وارد استوانه‌ی کف قالب می‌شود و بعد از آن از طریق سوراخ یا سوراخ‌های قرار گرفته بر روی صفحه بین قالب و استوانه، آب وارد نمونه می‌شود. در این نوع اشباع شدن نیز سطح آب در محفظه‌ی پلاستیکی با استفاده از دو شیر ورودی و خروجی ثابت می‌ماند. در شکل ۷، نحوه‌ی مدل‌سازی نفوذ آب از پایین به سمت بالا و به صورت نقطه‌ی نشان داده شده است. در این نوع اشباع شدن نیز می‌توان با استفاده از آب جمع شده در قطعه‌ی روی نمونه و انجام آزمایش‌های شیمیایی، جنس اتصال‌های بین ذرات خاک رطوبت‌دهنده را تعیین کرد.

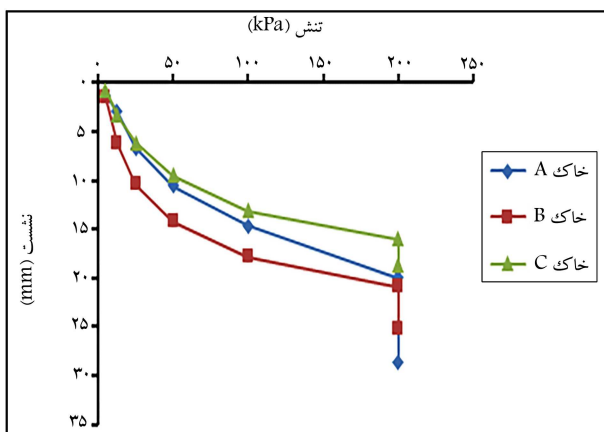
## ۳. نتایج

### ۱.۳. ادئومتر تک

برای بررسی تأثیر میزان رس با استفاده از آزمایش ادئومتر تک، علاوه بر سه نمونه‌ی نهایی از نتایج دیگر نمونه‌های استفاده شده در مرحله‌ی ساخت نمونه نیز استفاده



شکل ۱۱. منحنی های نشست - زمان الگوی نفوذ آب از بالا - نقطه‌یی.



شکل ۱۲. نتایج آزمایش با الگوی نفوذ آب از بالا - گسترده.

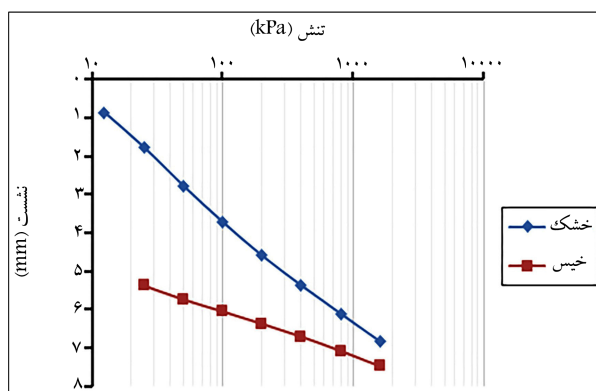
مختلف است. میزان پتانسیل رمیبتنگی با استفاده از معادله‌ی ۲ و میزان نشست قبل از اشباع شدن و نشست ۲۴ ساعت بعد از اشباع شدن، برای خاک‌های A، B و C به ترتیب ۰/۸، ۰/۹، ۰/۴۷ و ۰/۴۲ اندازه‌گیری شده است.

### ۴.۳. نفوذ آب با الگوی بالا - گسترده

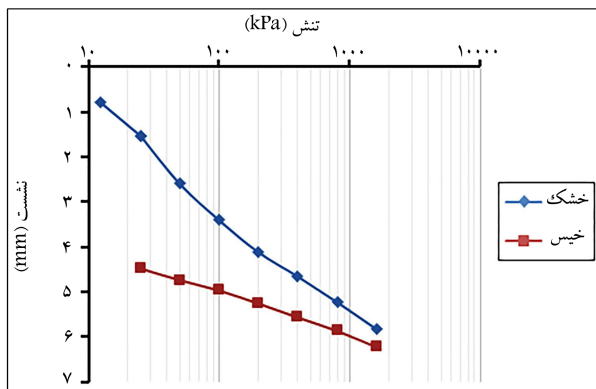
در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب نمودارهای تنش - نشست و نشست - زمان مربوط به نفوذ گسترده‌ی آب از بالا به سمت پایین برای خاک‌های A، B و C مشاهده می‌شوند. با توجه به میزان نشست قبل از اشباع شدن و ۲۴ ساعت پس از اشباع شدن، میزان پتانسیل رمیبتنگی در خاک‌های A، B و C به ترتیب ۰/۶۲، ۰/۴ و ۰/۵۸ بوده است.

### ۵.۳. نفوذ آب با الگوی پایین - نقطه‌یی

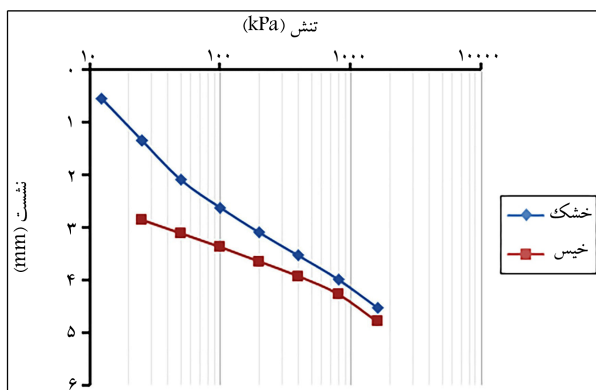
در الگوی ذکر شده‌ی نفوذ آب، پس از رسیدن به سربار  $kPa$  ۲۰۰، آب از پایین و مرکز نمونه وارد خاک رمیبتند می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند تا نمونه کاملاً اشباع شود. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب نمودارهای تنش - نشست و نشست - زمان مربوط به الگوی نفوذ آب از پایین - نقطه‌یی مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، میزان پتانسیل رمیبتنگی برای خاک‌های A، B و C به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۶۶ و ۰/۴۹ است.



خاک A

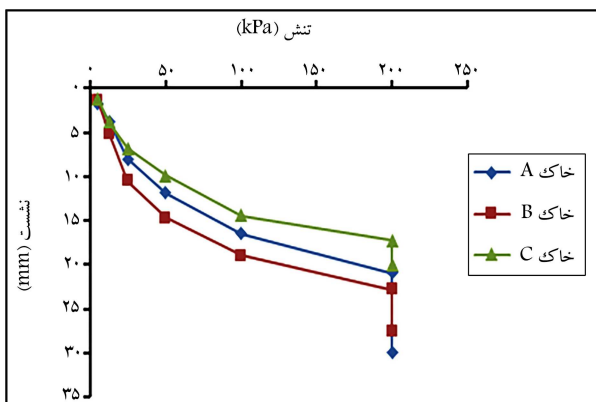


خاک B

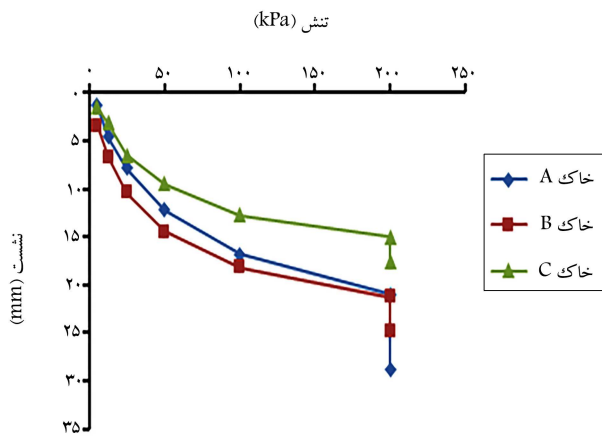


خاک C

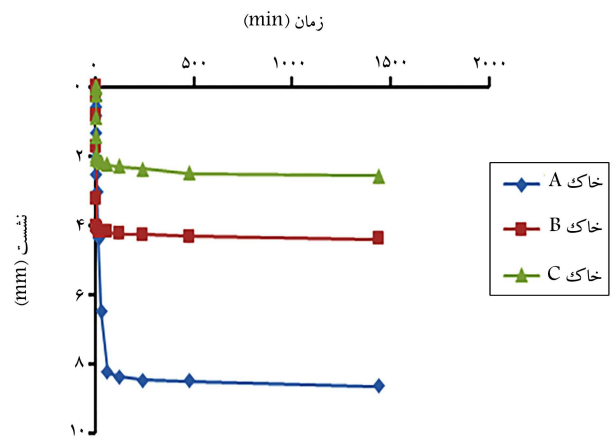
شکل ۹. نتایج آزمایش ادمومتر دوگانه برای خاک‌های A، B و C.



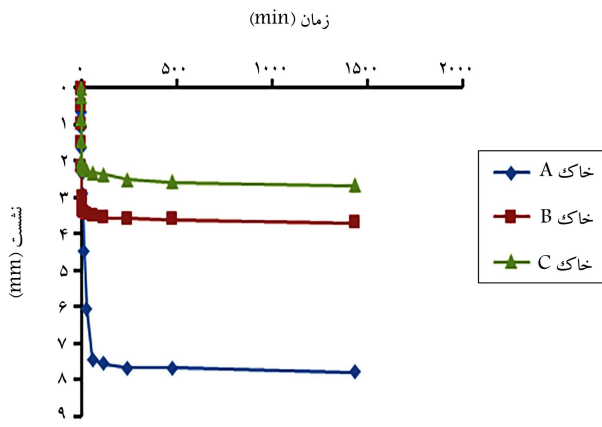
شکل ۱۰. نتایج آزمایش با الگوی نفوذ آب از بالا - نقطه‌یی.



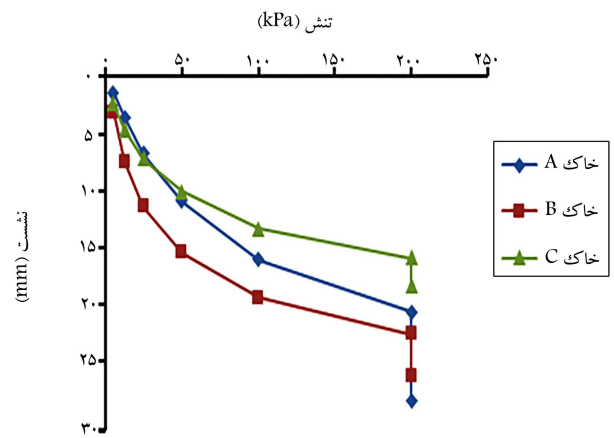
شکل ۱۶. نتایج آزمایش با الگوی نفوذ آب از پایین - گسترده.



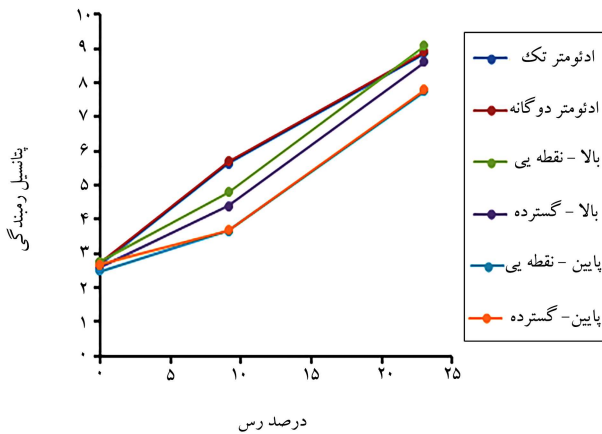
شکل ۱۳. منحنی های نشست - زمان الگوی نفوذ آب از بالا - گسترده.



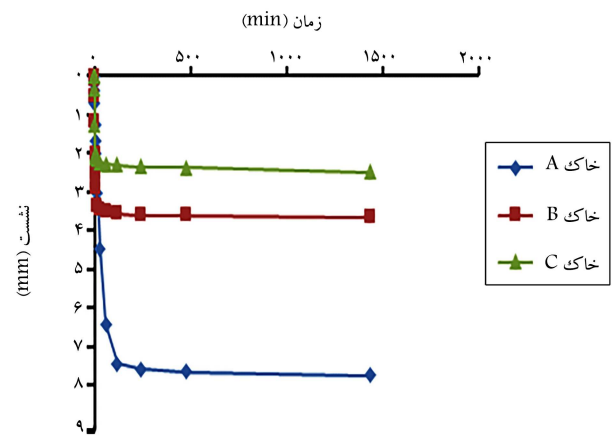
شکل ۱۷. منحنی های نشست - زمان الگو نفوذ آب از پایین - گسترده.



شکل ۱۴. نتایج آزمایش با الگوی نفوذ آب از پایین - نقطه‌یی.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی نتایج آزمایش های ادتومتر و آزمایش های با قابلیت شبیه سازی الگوی نفوذ آب در خاک.



شکل ۱۵. منحنی های نشست - زمان الگوی نفوذ آب از پایین - نقطه‌یی.

#### ۴. آنالیز

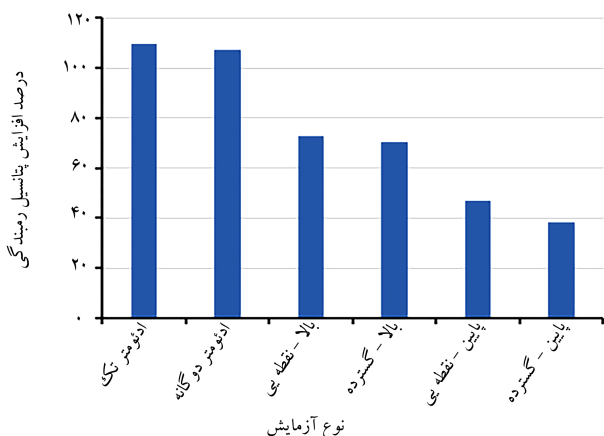
در شکل ۱۸، تغییرات پتانسیل رمیندگی در مقابل درصد رس موجود در خاک رمینده برای آزمایش های ادتومتر تک و دوگانه و آزمایش های با قابلیت شبیه سازی الگوی نفوذ آب در خاک مشاهده می شود. براساس نتایج به دست آمده برای تمام آزمایش ها با افزایش میزان رس، پتانسیل رمیندگی افزایش یافته است. اما شیب

#### ۶.۳. نفوذ آب با الگوی پایین - گسترده

در شکل های ۱۶ و ۱۷، به ترتیب نمودارهای تنش - نشست و نشست - زمان مربوط به نفوذ گسترده ی آب از پایین به سمت بالا مشاهده می شوند؛ که مطابق آنها، میزان پتانسیل رمیندگی برای خاک های A، B و C به ترتیب ۷/۸، ۳/۶۹ و ۲/۶۷ است.

جدول ۵. اختلاف پتانسیل رمیندگی خاک‌های A و B نسبت به خاک C.

نوع آزمایش	خاک C (رس ۰٪)		خاک B (رس ۱/۹٪)		خاک C (رس ۲۳٪)	
	پتانسیل رمیندگی	اختلاف با خاک C (%)	پتانسیل رمیندگی	اختلاف با خاک C (%)	پتانسیل رمیندگی	اختلاف با خاک C (%)
ادئومتر تک	۲/۶۹	۵/۶۴	۸/۸۷	۱۰۹	۲۲۹	۲۲۹
ادئومتر دوپل	۲/۷۵	۵/۷	۸/۹۲	۱۰۷	۲۲۴	۲۲۴
بالا - نقطه‌یی	۲/۷۷	۴/۷۹	۹/۰۸	۷۲	۲۲۷	۲۲۷
بالا - گسترده	۲/۵۸	۴/۴	۸/۶۲	۷۰	۲۳۴	۲۳۴
پایین نقطه‌یی	۲/۴۹	۳/۶۶	۷/۷۵	۴۷	۲۱۱	۲۱۱
پایین گسترده	۲/۶۷	۳/۶۹	۷/۸	۳۸	۱۹۲	۱۹۲



شکل ۱۹. میزان افزایش پتانسیل رمیندگی خاک B نسبت به خاک C در آزمایش‌های مختلف.

تک و دوگانه، ۱۰۸٪ بوده است، در صورتی که مقدار آن برای آزمایش‌های با الگوی نفوذ آب، ۵۷٪ بوده است، که تقریباً نصف آزمایش‌های ادئومتر است. بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار خاک‌های رمینده با میزان ۹/۱ درصدی رس موجود در نمونه، بهتر است از آزمایش‌های با الگوی نفوذ آب استفاده کرد.

در بین الگوهای نفوذ آب در خاک، بیشترین میزان افزایش پتانسیل رمیندگی مربوط به نفوذ آب از بالا به صورت نقطه‌یی بوده است، که مقدار آن ۷۲٪ و کمترین آن مربوط به نفوذ آب از پایین به صورت گسترده با مقدار ۳۸٪ بوده است.

میزان افزایش برای الگوهای با نفوذ آب از بالا به پایین به طور متوسط ۷۱٪ و برای الگوهای نفوذ آب از پایین به بالا، ۴۲٪ بوده است، که نشان می‌دهد میزان افزایش پتانسیل رمیندگی برای الگوهای نفوذ آب از بالا، برابر این مقدار برای الگوهای با نفوذ آب از پایین است.

در بررسی تأثیر نحوه توزیع آب (نقطه‌یی یا گسترده) در افزایش میزان پتانسیل رمیندگی، میزان افزایش در توزیع نقطه‌یی به طور متوسط ۵۹٪ و در توزیع گسترده ۵۴٪ بوده است، که نشان می‌دهد میزان افزایش پتانسیل رمیندگی برای توزیع نقطه‌یی، برابر توزیع گسترده است.

این نتایج نشان می‌دهند که تأثیر جهت حرکت آب در میزان افزایش پتانسیل رمیندگی ناشی از افزایش میزان رس موجود در نمونه، بیشتر از تأثیر نحوه توزیع آب است.

در شکل ۲۰، میزان افزایش پتانسیل رمیندگی خاک A نسبت به خاک C در آزمایش‌های مختلف مشاهده می‌شود. با افزایش ۲۳ درصدی میزان رس موجود در

افزایش و میزان پتانسیل رمیندگی اندازه‌گیری شده در همه آزمایش‌ها یکسان نبوده است. نتایج آزمایش ادئومتر تک و دوگانه به دلیل شباهت در نوع اشباع شدن تطابق زیادی دارند. در الگوهای با نفوذ آب از پایین به صورت نقطه‌یی و گسترده نیز شباهت زیادی در نتایج مشاهده می‌شود، که نشان می‌دهد در جهت اخیر حرکت آب، نحوه توزیع آب (نقطه‌یی یا گسترده)، تأثیر زیادی در پتانسیل رمیندگی خاک نداشته است.

در خاک C، تقریباً نتایج برای همه آزمایش‌ها نزدیک به هم بوده و الگوی نفوذ آب برای خاک‌های بدون رس، تأثیر زیادی در پتانسیل رمیندگی نگذاشته است و می‌توان از نتایج آزمایش ادئومتر استفاده کرد.

در خاک B، نتایج آزمایش ادئومتر و آزمایش‌های با الگوی نفوذ آب، تفاوت چشمگیری داشته و میزان پتانسیل رمیندگی برای تمام الگوهای نفوذ آب، نسبت به نتایج ادئومتر کمتر بوده است. نتایج مذکور نشان می‌دهند که در خاک‌های با میزان رس حدود ۱۰٪، نتایج آزمایش ادئومتر دقت کافی را ندارند و باید از نتایج آزمایش‌های با الگوی نفوذ آب استفاده شود.

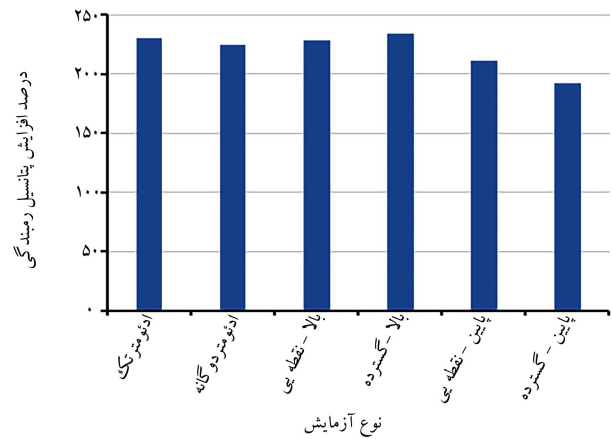
در خاک A، اختلاف بین نتایج آزمایش‌های مختلف مشاهده می‌شود، اما میزان اختلاف نسبت به خاک B کمتر بوده است. در الگوهای نفوذ آب از بالا به صورت نقطه‌یی و گسترده، نتایج نزدیک به نتایج آزمایش ادئومتر بوده است؛ حتی در الگوی نفوذ آب بالا به صورت نقطه‌یی، میزان پتانسیل رمیندگی مقدار کمی بیشتر از نتایج ادئومتر بوده است. اما در الگوهای با نفوذ آب از پایین به صورت نقطه‌یی و گسترده، اختلاف نتایج با آزمایش ادئومتر چشمگیر بوده است. لذا، بهتر است در جهت حرکت آب از پایین، از نتایج آزمایش با قابلیت شبیه‌سازی الگوی نفوذ آب استفاده شود.

از آن‌جا که نتایج برای خاک بدون رس (خاک C)، در آزمایش‌های مختلف نزدیک به هم هستند، از نتایج خاک C به عنوان مبنا استفاده و میزان افزایش پتانسیل رمیندگی در اثر افزایش میزان رس موجود در خاک برای آزمایش‌های مختلف محاسبه شده است. در جدول ۵، میزان پتانسیل رمیندگی خاک‌های A، B و C برای آزمایش‌های مختلف و میزان اختلاف نتایج خاک‌های A و B نسبت به خاک C ارائه شده است.

در شکل ۱۹، میزان افزایش پتانسیل رمیندگی در خاک B نسبت به خاک C برای آزمایش‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ که براساس نتایج به دست آمده با افزایش ۹/۱ درصدی میزان رس موجود در نمونه، میزان پتانسیل رمیندگی افزایش یافته است، اما میزان آن برای تمام آزمایش‌ها یکسان نبوده است.

میزان افزایش پتانسیل رمیندگی در آزمایش‌های ادئومتر با آزمایش‌های با قابلیت شبیه‌سازی الگوی نفوذ آب اختلاف داشته و میانگین میزان آن در آزمایش‌های ادئومتر





شکل ۲۰. میزان افزایش پتانسیل رمبندگی خاک A نسبت به خاک C در آزمایش های مختلف.

خاک رمبند، میزان پتانسیل رمبندگی در همه ی آزمایش ها افزایش یافته است، اما میزان آن در آزمایش های مختلف یکسان نبوده است. این اختلاف نتایج آزمایش های مختلف نسبت به نمونه با رس ۹/۱٪، کمتر بوده است.

میزان افزایش پتانسیل رمبندگی در آزمایش های ادمومتر به طور متوسط ۲۲۷٪ و برای آزمایش های با الگوی نفوذ آب از بالا به پایین، ۲۳۰٪ بوده است، که نشان می دهد اختلاف ناچیزی با هم دارند و برای خاک رمبند با میزان رس ۲۳٪، می توان برای الگوهای با نفوذ آب از بالا به پایین از نتایج ادمومتر استفاده کرد. اما در الگوهای با نفوذ آب از پایین به بالا، میزان افزایش پتانسیل رمبندگی به طور متوسط ۲۰۱٪ بوده است، که با نتایج آزمایش های ادمومتر اختلاف بیشتری دارد و بهتر است برای الگوهای نفوذ آب با مقدار ۲۳٪ رس موجود در نمونه، از آزمایش های با قابلیت شبیه سازی الگوهای نفوذ آب در خاک استفاده کرد.

در بین الگوهای نفوذ آب در خاک، بیشترین افزایش پتانسیل رمبندگی با مقدار ۲۳۴٪، مربوط به نفوذ آب از بالا و به صورت گسترده و کمترین میزان آن مربوط به نفوذ آب از پایین به صورت گسترده با مقدار ۱۹۲٪ بوده است.

بررسی تأثیر پارامتر جهت حرکت آب در میزان افزایش پتانسیل رمبندگی ناشی از افزایش میزان رس موجود در نمونه نشان می دهد که میزان افزایش پتانسیل رمبندگی در حرکت آب از بالا به پایین به طور متوسط ۲۳۰٪ و در حرکت آب از پایین به بالا به طور متوسط ۲۰۱٪ بوده است. براساس نتایج اخیر، افزایش رس به میزان ۲۳٪، در الگوهای با نفوذ آب از بالا، تأثیر بیشتری در پتانسیل رمبندگی نسبت به الگوهای با نفوذ آب از پایین گذاشته است.

در بررسی تأثیر نحوه ی توزیع آب برای نمونه ی اخیر، در الگوهای با توزیع نقطه یی میزان افزایش پتانسیل رمبندگی به طور متوسط ۲۱۹٪ و در توزیع گسترده به طور متوسط ۲۱۳٪ بوده است، که این نتایج نشان می دهد توزیع آب نقطه یی، تأثیر بیشتری در افزایش پتانسیل رمبندگی نسبت به توزیع گسترده داشته است؛ اما اختلاف آنها ناچیز بوده است و می توان از تأثیر نحوه ی توزیع آب برای خاک با ۲۳٪ رس، چشم پوشی کرد.

نتایج به دست آمده نشان می دهند که برای نمونه ی اخیر، نیز جهت حرکت آب در میزان افزایش پتانسیل رمبندگی ناشی از افزایش میزان رس موجود در نمونه، پارامتر مؤثرتری نسبت به نحوه ی توزیع آب بوده است.

براساس نتایج به دست آمده در هر دو مقدار افزایش مقدار رس به میزان ۹/۱

و ۲۳ درصد، جهت حرکت آب بیشترین تأثیر را در افزایش پتانسیل رمبندگی ناشی از افزایش رس گذاشته است، که تأثیر حرکت آب از بالا به پایین بیشتر از حرکت آب از پایین به بالا بوده است. در زمانی که آب به سمت پایین حرکت کرده است، نیروی تراوش آب به سمت پایین و زمانی که به سمت بالا حرکت کرده است، نیروی تراوش آب به سمت بالا بوده است، که این اختلاف نیرو می تواند باعث ایجاد تفاوت در مقادیر پتانسیل رمبندگی شود. همچنین نیروی جاذبه باعث می شود که آب در حرکت به سمت پایین نسبت به حرکت به سمت بالا سریع تر در لایه ی خاک حرکت کند و نمونه سریع تر اشباع شود، که تغییرات سرعت اشباع شدن می تواند عامل دیگری از تفاوت مقادیر پتانسیل رمبندگی در دو جهت حرکت آب به سمت بالا و پایین باشد.

## ۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر میزان رس موجود در نمونه ی خاک رمبند در پتانسیل رمبندگی بررسی شده است. علاوه بر آزمایش های معمول، از دستگای استفاده شده است که قابلیت شبیه سازی الگوهای نفوذ آب در خاک را داشته است. میزان تغییر پتانسیل رمبندگی در مقابل میزان افزایش رس با دو مقدار ۹/۱ و ۲۳ درصد اندازه گیری شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. افزایش میزان رس موجود در نمونه باعث افزایش پتانسیل رمبندگی خاک رمبند شده است، اما میزان افزایش آن در آزمایش های مختلف یکسان نبوده است؛

۲. میزان افزایش پتانسیل رمبندگی در آزمایش های ادمومتر تک و دوگانه به دلیل ماهیت اشباع شدن یکسان، در هر دو مقدار افزایش میزان رس تطابق زیادی داشته اند؛

۳. به طور کلی در هر دو مقدار افزایش میزان رس موجود در نمونه، میزان افزایش پتانسیل رمبندگی در نتایج آزمایش های ادمومتر بیشتر از نتایج آزمایش های با قابلیت شبیه سازی الگو نفوذ آب بوده است، اما این اختلاف در افزایش میزان رس به مقدار ۹/۱٪ بیشتر از افزایش رس به میزان ۲۳٪ بوده است؛

۴. برای افزایش رس به میزان ۹/۱٪، در بین الگوهای نفوذ آب در خاک، بیشترین افزایش پتانسیل رمبندگی مربوط به الگوی نفوذ آب از بالا به صورت نقطه یی با میزان ۷۲٪ و کمترین میزان افزایش پتانسیل رمبندگی مربوط به نفوذ آب از پایین و به صورت گسترده با مقدار ۳۸٪ بوده است. برای افزایش رس موجود در نمونه به میزان ۲۳٪، بیشترین افزایش پتانسیل رمبندگی مربوط به الگوی نفوذ آب از بالا به صورت گسترده با میزان ۲۳۴٪ و کمترین میزان افزایش پتانسیل رمبندگی مربوط به نفوذ آب از پایین و به صورت گسترده با مقدار ۱۹۲٪ بوده است؛

۵. برای هر دو مقدار افزایش رس، میزان افزایش پتانسیل رمبندگی در حرکت آب از بالا به پایین بیشتر از حالت رو به بالای آب بوده است. میزان اختلاف نتایج برای افزایش رس به مقدار ۹/۱٪ بیشتر از افزایش رس به مقدار ۲۳٪ بوده است؛

۶. در نمونه با افزایش رس به مقدار ۹/۱٪، توزیع نقطه یی افزایش پتانسیل رمبندگی بیشتری نسبت به توزیع گسترده ایجاد شده است؛ اما در افزایش رس به مقدار ۲۳٪، اختلاف نتایج برای توزیع نقطه یی و گسترده ناچیز بوده است؛

۷. نتایج به دست آمده نشان می دهند که در هر دو مقدار افزایش رس (۹/۱ و ۲۳ درصد)، عامل جهت حرکت آب نسبت به نحوه ی توزیع آب در افزایش پتانسیل رمبندگی مؤثرتر بوده است.

## پانوشتها

1. Single-Oedometer
2. Double-Oedometer
3. Collapse Potential
4. Collapse Index
5. Steadman
6. Lawton
7. Alwail
8. Kim
9. Hanna & Soliman

## منابع (References)

1. Mitchell, J.K. and Soga, K., 2005. Fundamentals of soil behavior. *John Wiley & Sons New York*.
2. Gaaver, K.E., 2012. Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils. *Alexandria Engineering Journal*, 51(3), pp.205-210. <http://dx.doi.org/10.1016>
3. Murthy, V.N.S., 2003. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482275858>.
4. Rogers, C., Dijkstra, T. and Smalley, I., 1994. Hydroconsolidation and subsidence of loess: Studies from China, Russia, North America and Europe: In memory of Jan Sajgalik. *Engineering Geology*, 37(2), pp.83-113. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90045-0).
5. Nouaouria, M., Guenfoud, M. and Laffi, B., 2008. Engineering properties of loess in Algeria. *Engineering Geology*, 99(1.2), pp.85-90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.013>.
6. Osipov, V. and Sokolov, V., 1995. *Factors and Mechanism of Loess Collapsibility*. In *Genesis and Properties of Collapsible Soils*: Springer, 468, pp.49-63.
7. Clemence, S.P. and Finbarr, A.O., 1981. Design considerations for collapsible soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(3), pp.305-317. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001102>.
8. Noutash, M., Hajjalilue, B. and Cheshmdoost, M., 2010. Preponding of canals as a remediation method for collapsible soils. In *the Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran.
9. Li, P., Vanapalli, S. and Li, T., 2016. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), pp.256-274. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.002>.
10. Zimbaro, M., Ercoli, L. and Megna, B., 2016. The open metastable structure of a collapsible sand: Fabric and bonding. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), pp.125-139. DOI:10.1007/s10064-015-0752-7
11. Derbyshire, E., 2001. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China. *Earth-Science Reviews*, 54(1.3), pp.231-260. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00050-2).
12. Houston, S.L., Houston, W.N., Zapata, C.E. and et al., 2001. *Geotechnical Engineering Practice for Collapsible Soils*. In *Unsaturated Soil Concepts and Their Application in Geotechnical Practice*: Springer, pp.333-355.
13. Ayadat, T., 2022. Geotechnical performance of encapsulated and stabilized stone columns in a collapsible soil. *International Journal of Geomechanics*, 22(6), p.04022057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002368](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002368).
14. Jennings, J.E, Knight, K. 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collaoese of grain structure. *Proceedings of the 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 99-105.
15. Mahmoudian, H., Hashemi, M., Ajalloeian, R. and et al., 2020. Investigating the effect of additives' size on the improvement of the tensile and compressive strengths and deformation characteristics of collapsible soils. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), pp.1-16. DOI:10.1007/s12665-020-09085-1.
16. ASTM D5333., 2003. *Standard Test Methods for Measurement of Collapse Potential of Soils*, Ed: Annual Book of ASTM Standards.
17. Lawton, E.C., 1986. Wetting-induced collapse in compacted soil, Ph.D. thesis, Washington State University, Pullman, Wash.
18. Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hetherington, M.D., 1992. Review of wetting-induced collapse in compacted soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(9), pp.1376-1394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:9\(1376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:9(1376)).
19. Steadman, L., 1987. Collapse settlement in compacted soils of variable fines content. Master's thesis, *Washington State University*, Pullman, Wash.
20. Basma, A.A. and Tuncer, E.R., 1992. Evaluation and control of collapsible soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), pp.1491-1504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:10\(1491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:10(1491)).
21. Houston, S., Houston, W. and Lawrence, C., 2002. Collapsible soil engineering in highway infrastructure development. *Journal of Transportation Engineering*, 128(3), pp.295-300. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:3\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:3(295)).
22. Kim, D., Chung, Y., Siddiki, N.Z. and et al., 2008. Mechanical characteristics of indiana loess soils for highway Embankments, Transportation Research Board 87<sup>th</sup> Annual Meeting.
23. Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), pp.405-430. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>.
24. Wheeler, S., Sharma, R. and Buisson, M., 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), pp.41-54. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.41>.
25. Pereira, J.H., Fredlund, D.G., Cardão Neto, M.P. and et al., 2005. Hydraulic behavior of collapsible compacted gneiss soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10),

- pp.1264-1273. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1264\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1264)).
26. Medero, G., Schnaid, F. and Gehling, W., 2009. Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), pp.840-843. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:6\(840\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:6(840)).
27. Alwail, T., Ho, C. and Fragaszy, R., 1994. Collapse mechanism of compacted clayey and silty sands. In *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, 2(40), pp.1435-1446.
28. Haeri, S.M., 2016. Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(1), pp.25-40. <https://doi.org/10.3208/jgssp.KL-3>.
29. Hanna, A. and Soliman, S., 2017. Experimental investigation of foundation on collapsible soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(11), p.04017085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001750](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001750).
30. Mohammadi, S.D. and Ajalloeian, R., 2014. Investigation of desirability of sand pluviation technique in order to sample making of sandy soils for laboratory models. (in Eng). *Modares Civil Engineering Journal*, 13(5), pp.53-63 [In Persian].