

# برآورد تاثیر شدت سربار بر پتانسیل رمبندگی خاک در الگوهای مختلف نفوذ آب

جواد محمودی<sup>۱</sup>، رضا پورحسینی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران، mahmoudijavad70@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران، r\_porhoseini@yazd.ac.ir

## چکیده

خاک رمبنده در حالت خشک پایداری خوبی از خود نشان می‌دهد اما با ورود آب دچار نشست‌های قابل توجه می‌گردد. پارامترهای زیادی می‌توانند بر میزان نشست رمبندگی تاثیر بگذارند. میزان سربار در زمان خیس شدن یکی از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار بر روی نشست و رفتار خاک رمبنده است. اشباع شدن خاک رمبنده از طریق منابع مختلفی مانند سیلاب، بارندگی، آبیاری، نشت لوله‌های مدفون و ... انجام می‌شود اما در آزمایش‌هایی که برای بررسی رفتار خاک رمبنده استفاده می‌شود، تاثیر این منابع قابل بررسی نیست. یک دستگاه با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای مختلف نفوذ آب در خاک ساخته شد و با استفاده از سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال تاثیر سربار در هر الگو نفوذ آب به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که برای خاک رمبنده استفاده شده، در هر سه سربار میزان پتانسیل رمبندگی آزمایش ادنومتر با آزمایش‌های الگوهای نفوذ آب اختلاف دارد و بیشترین اختلاف با مقدار ۱۶ درصد مربوط به سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال است و در بین الگوهای مختلف نفوذ آب، الگوی نفوذ آب نقطه‌ای از بالا بیشترین پتانسیل رمبندگی را ایجاد می‌کند. تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل تغییرات سربار اشباع شدگی نشان می‌دهد در تمام الگوهای نفوذ آب با افزایش سربار اشباع شدگی، پتانسیل رمبندگی کاهش می‌یابد اما میزان تغییرات برای هر الگو متفاوت است. به عنوان مثال با افزایش سربار از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین کاهش پتانسیل رمبندگی با مقدار ۲۷/۲ درصد در الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین ایجاد می‌گردد.

## کلمات کلیدی

پتانسیل رمبندگی، نشت آب، دستگاه بزرگ مقیاس، سربار، خاک رمبنده.

خاک رَمبنده به عنوان یکی از خاک‌های مساله‌دار می‌تواند خسارات زیادی را به پروژه‌های عمرانی تحمیل کند. خاک رَمبنده در حالت خشک، پایداری خوبی از خود نشان می‌دهد اما با ورود آب دچار نشست‌های ناگهانی و قابل توجه می‌گردد.

کشورهای زیادی مانند چین، روسیه، ایالات متحده آمریکا، آلمان، آرژانتین، فرانسه و نیوزلند دارای خاک رَمبنده هستند. در مجموع این خاک‌ها بیش از ۱۰ درصد از وسعت خشکی دنیا را شامل می‌شوند که نشان دهنده اهمیت این خاک‌ها است. [۱-۵]

خاک رَمبنده دارای ویژگی‌های شاخصی است که وزن مخصوص کم، ساختار باز، پوکی بالا، نهشته جوان، درصد رطوبت کم و پیوند ضعیف بین ذرات از مهمترین آن‌ها است. [۱، ۴، ۶-۸] این خاک‌ها شامل رس، سیلت، خاکسترهای آتشفشانی و ماسه ریز می‌شوند. [۹، ۱۰]

پتانسیل رَمبندگی یک شاخص از میزان تغییر حجم کل یک خاک است که در اثر بارگذاری و خیس شدن از خود نشان می‌دهد. در نشست یک بعدی، پتانسیل رَمبندگی با استفاده از تغییر ضخامت نمونه پس از خیس شدن و اعمال بار محاسبه می‌گردد. معادله (۱) یک تعریف مهندسی از پتانسیل رَمبندگی با استفاده از تغییرات نسبت تخلخل است. [۱۱]

$$C_p = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times 100 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $C_p$  پتانسیل رَمبندگی،  $\Delta e$  تغییر نسبت تخلخل ناشی از خیس شدن،  $e_0$  نسبت تخلخل اولیه،  $\Delta h$  تغییر ارتفاع نمونه ناشی از خیس شدن و  $h_0$  ارتفاع اولیه نمونه است.

متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری پتانسیل رَمبندگی، آزمایش ادنومتر و آزمایش سه محوری است. دو نوع آزمایش ادنومتر برای تعیین پتانسیل رَمبندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد: آزمایش ادنومتر تک<sup>۱</sup> و آزمایش ادنومتر دوگانه<sup>۲</sup>.

پارامترهای زیادی می‌توانند بر روی میزان نشست و پتانسیل رَمبندگی خاک رَمبنده در زمان خیس شدن تاثیر بگذارند. مهمترین پارامترهایی که تا به امروز مورد مطالعه قرار گرفته اند شامل شرایط اولیه 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. [۱۲-۲۱]

مقدار پتانسیل رَمبندگی بر اساس تعریفی که دارد برای یک میزان سربار خاص اندازه‌گیری می‌شود و این مقدار در سربار دیگر متفاوت است که نشان می‌دهد میزان نشست‌های رَمبندگی وابسته به میزان سربار در زمان اشباع شدن است. یکی از موضوعاتی که تا به امروز مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی تغییرات میزان نشست و پتانسیل رَمبندگی در مقابل تغییرات میزان سربار اشباع شدگی است.

لاوتن<sup>۳</sup> ۱۹۸۶ بیش از ۱۵۰ آزمایش را برای شناسایی رَمبندگی خاک‌ها متراکم انجام داد. آزمایش‌های یک بعدی با استفاده از ادنومتر برای شبیه‌سازی شرایط کرنش صفحه‌ای و آزمایش‌های سه بعدی با استفاده از آزمایش سه محوری برای ارزیابی تاثیر تنش‌های اصلی انجام گرفت. خاک مورد استفاده یک خاک طبیعی از جنوب کالیفرنیا با ۶۲ درصد ماسه و ۲۳ درصد سیلت و ۱۵ درصد ذرات با اندازه رس است. این خاک دارای حد خمیری ۱۹ درصد، حد روانی ۳۴ درصد، شاخص خمیری ۱۵ درصد و چگالی ویژه ۲/۷۳ است و بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید، SC و بر اساس سیستم آشتو A-6(2) نامگذاری می‌گردد. لاوتن نشان داد که میزان رَمبندگی وابسته به سربار در زمان اشباع شدن است و در خاک‌های رَمبنده متراکم یک میزان سربار بحرانی وجود دارد که در آن بیشترین میزان نشست رَمبندگی به وجود می‌آید. ابتدا با افزایش سربار میزان نشست رَمبندگی افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به سربار بحرانی با افزایش سربار اشباع شدگی، میزان نشست رَمبندگی کاهش می‌یابد. [۲۲]

<sup>1</sup> single-oedometer

<sup>2</sup> double-oedometer

<sup>3</sup> Lawton

اسماعیل و همکارانش ۱۹۸۷ در یک مطالعه آزمایشگاهی تاثیر سه پارامتر تراکم نسبی، سربار اشباع شدگی و دستخوردگی نمونه را بر روی پتانسیل رمبندگی ماسه‌های آهکی بیابان کویت بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش سربار اشباع شدگی میزان پتانسیل رمبندگی کاهش می‌یابد. [۲۳]

هوایک<sup>۱</sup> و همکارانش ۲۰۱۲ در یک مطالعه آزمایشگاهی، رفتار خاک‌های رمبنده منطقه ایندیانا آمریکا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از دو نمونه خاک موجود در این منطقه استفاده نمودند و با تغییر شرایط اولیه نمونه‌ها مانند درصد تراکم و میزان رطوبت اولیه، تاثیر پارامترهای مختلف را بر روی رفتار خاک‌های رمبنده این منطقه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که برای همه نمونه‌ها با درصد رطوبت اولیه مختلف، با افزایش سربار اشباع شدگی، میزان کرنش رمبندگی ابتدا افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. [۲۴]

مشهور<sup>۲</sup> و همکارانش ۲۰۱۹ با یک مدل آزمایشگاهی، شمع‌های قرار گرفته در خاک‌های رمبنده را مورد بررسی قرار دادند. وقتی خاک رمبنده اشباع می‌شود و نشست‌های ناگهانی و بزرگی را تجربه می‌کند باعث ایجاد نیروی اصطکاک جداره منفی در طول شمع می‌شود. در این مطالعه آب از پایین لایه خاک رمبنده به صورت گسترده وارد خاک می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند. نتایج نشان داد که با افزایش سربار اشباع شدگی، کرنش رمبندگی افزایش می‌یابد. [۲۵]

الاصل<sup>۳</sup> و همکارانش ۲۰۲۰ تاثیر پارامترهای مختلفی را مانند میزان سیلت موجود در نمونه، مکش زمینه‌ای اولیه، درصد رطوبت، دامنه خمیری و سربار اشباع شدگی را بر روی رفتار خاک رمبنده مورد بررسی قرار دادند. تاثیر سربار اشباع شدگی با استفاده از چهار نمونه با میزان ماسه ۶۰ درصد و ترکیبات مختلف وزنی سیلت و رس بررسی شد. نمونه‌ها با مقدار رطوبت اولیه ۵ درصد و تراکم نسبی ۳۵ درصد، داخل قالب دستگاه ادنومتر ریخته می‌شوند و آزمایش‌های ادنومتر با سربار اشباع شدگی مختلف بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد. بر اساس نتایج در هر چهار نمونه با افزایش سربار اشباع شدگی ( $P_w$ ) تا ۱۰۰ کیلوپاسکال، پتانسیل رمبندگی ( $C_p$ ) افزایش می‌یابد و بعد از آن تا ۲۰۰ کیلوپاسکال تقریباً ثابت می‌شود. [۲۶]

در اغلب مطالعات تاثیر میزان سربار اشباع شدگی روی خاک رمبنده، از دستگاه ادنومتر استفاده گردیده است که در این دستگاه نمونه از بالا و پایین به صورت همزمان اشباع می‌گردد. از آنجا که آب می‌تواند از منابع مختلفی مانند بارندگی، سیلاب‌ها، آبیاری درختان و.... وارد خاک رمبنده شود [۲۷]، این روش اشباع کردن الگوی مناسبی برای مدلسازی منابع نفوذ آب به خاک رمبنده در واقعیت نیست.

در این مطالعه از یک نمونه ساخته شده در آزمایشگاه استفاده گردید و ابتدا با استفاده از دستگاه ادنومتر رفتار این خاک رمبنده مورد بررسی قرار گرفت و بعد از آن با استفاده از یک دستگاه بزرگ مقیاس با قابلیت مدلسازی الگوهای مختلف نفوذ آب در خاک، تاثیر سربار اشباع شدگی بر پتانسیل رمبندگی در الگوهای مختلف نفوذ آب به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج برای الگوهای مختلف نفوذ آب مقایسه گردید.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱- آماده سازی نمونه

در مطالعات آزمایشگاهی از یک نمونه خاک رمبنده ساخته شده در آزمایشگاه استفاده گردید. مطابق با مطالعات هانا<sup>۴</sup> و سلیمان<sup>۵</sup> [۲۸] می‌توان با ترکیب ماسه ریزدانه و رس کائولین و اضافه کردن مقداری رطوبت، یک خاک رمبنده ساخت. ماسه نقش ذرات اصلی و رس نقش ایجاد اتصالات بین ذرات ماسه را دارد. کائولین استفاده شده از شرکت صنایع خاک چینی الماس اردکان تهیه گردید که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

<sup>1</sup> Howayek  
<sup>2</sup> Mashhour  
<sup>3</sup> Alassal  
<sup>4</sup> Hanna  
<sup>5</sup> Soliman

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی کائولین استفاده شده

Table 1. Chemical analysis of kaolin used

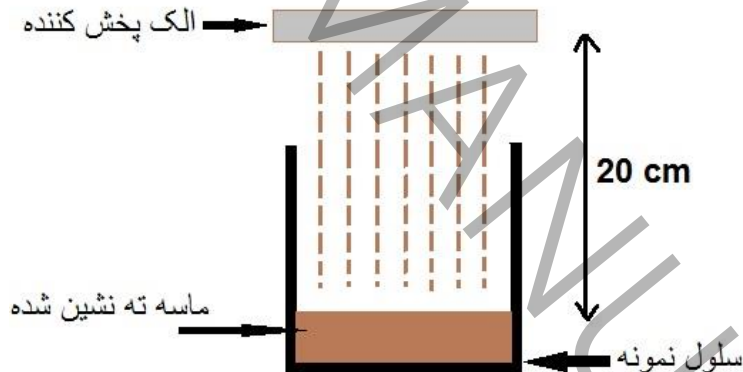
ترکیبات دیگر	S	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب شیمیایی
۷/۱۷	۰/۰۲	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۴۹	۱۸/۸۴	۷۲/۳۹	مقدار (%)

روش بارشی به دلیل ایجاد نمونه‌های همگن و مشابه به رسوبات طبیعی نسبت به روش‌های دیگر ساخت نمونه مناسب‌تر است. [۲۹] در این مطالعه نیز از روش بارش برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. پس از مخلوط کردن ماسه و رس کائولین و اضافه کردن ۵ درصد رطوبت (شکل ۱)، نمونه ترکیب شده از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به صورت بارشی داخل قالب ریخته می‌شود (شکل ۲). به منظور مقایسه شرایط ساخت نمونه برای تمام آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شد.



شکل ۱: ترکیب ماسه و کائولین و اضافه کردن رطوبت برای ساخت نمونه رمبنده در آزمایشگاه

Figure 1. Mixing sand and kaolin and adding moisture to make a collapsible sample in the laboratory



شکل ۲: ساخت نمونه به صورت بارشی

Figure 2. Sample making by sand pluviation technique

با استفاده از نسبت‌های وزنی مختلف رس به ماسه و وزن مخصوص‌های متفاوت (انرژی تراکم متفاوت) می‌توان نمونه‌های با پتانسیل رمبندگی مختلف ساخت. در این مطالعه با توجه به استفاده از روش بارش برای ساخت نمونه، انرژی تراکم ثابت در نظر گرفته شد و فقط با استفاده از نسبت‌های مختلف رس به ماسه، نمونه‌های با پتانسیل رمبندگی مختلف ساخته شد. نتایج به دست آمده در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: نتایج ریبندگی نمونه‌های ساخته شده

Table2. The results of the collapsible made samples

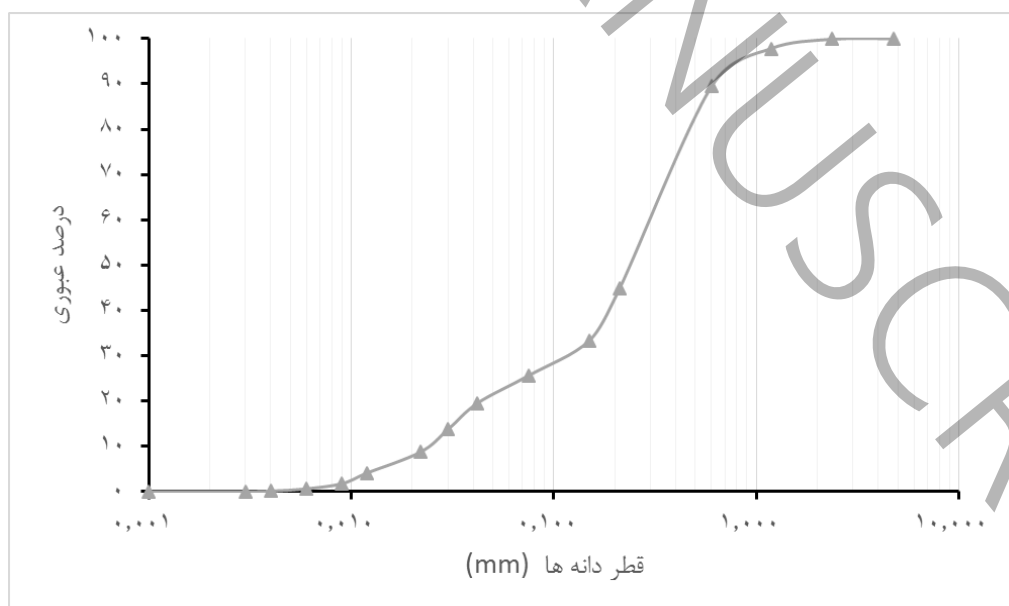
درجه ریبندگی	پتانسیل ریبندگی	نسبت رس به ماسه ( % )	میزان رس ( % )
متوسط	۲ / ۶۹	.	.
متوسط	۴ / ۱۳	۵	۴ / ۷
متوسط	۵ / ۶۴	۱۰	۹ / ۱
تا حدی شدید	۷ / ۵	۱۵	۱۳
تا حدی شدید	۸ / ۱۹	۲۰	۱۶ / ۶
تا حدی شدید	۸ / ۵۵	۲۵	۲۰
تا حدی شدید	۸ / ۸۷	۳۰	۲۳
تا حدی شدید	۹ / ۱۹	۳۵	۲۵ / ۹
تا حدی شدید	۹ / ۴۹	۴۰	۲۸ / ۵

در بررسی تاثیر میزان سربار اشباع شدگی بر رفتار خاک ریبنده از نمونه با میزان رس به ماسه ۳۰ درصد استفاده گردید. برای شناسایی این خاک آزمایش های مربوطه انجام گرفت که منحنی دانه بندی و تراکم آن به ترتیب در شکل ۳ و ۴ و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۳ آورده شده است. همچنین نتایج مربوط به آزمایش تعیین پتانسیل ریبندگی این نمونه با استفاده از دستگاه ادنومتر در شکل ۵ آمده است.

جدول ۳ مشخصات نمونه خاک

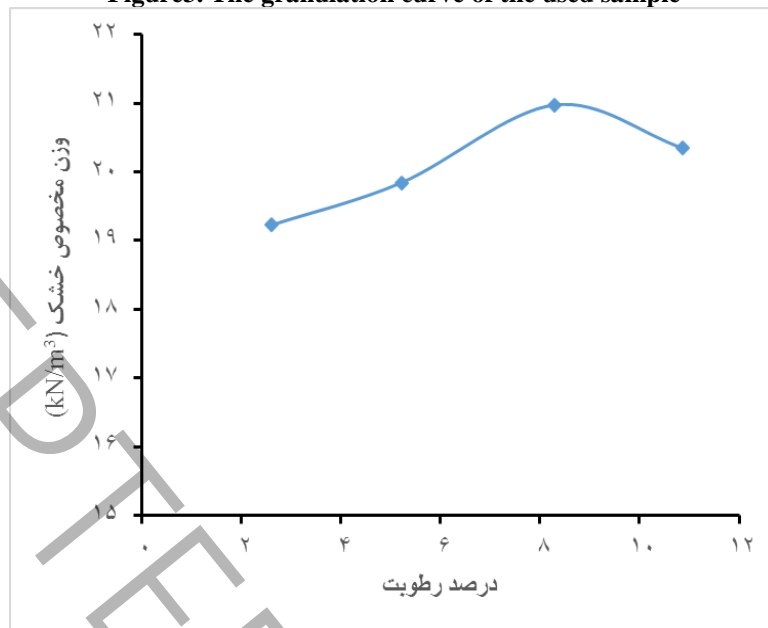
Table3. Soil sample properties

ویژگی	نوع خاک	$\gamma (kN / m^3)$	$\omega (\%)$	$\gamma_{d, max} (kN / m^3)$	$\omega_{opt} (\%)$	$G_s$	$C_u$	$C_c$
مقدار	SM-SC	۱۳	۵	۲۰ / ۹۷	۸ / ۳	۲ / ۷۲	۱۵	۲ / ۴



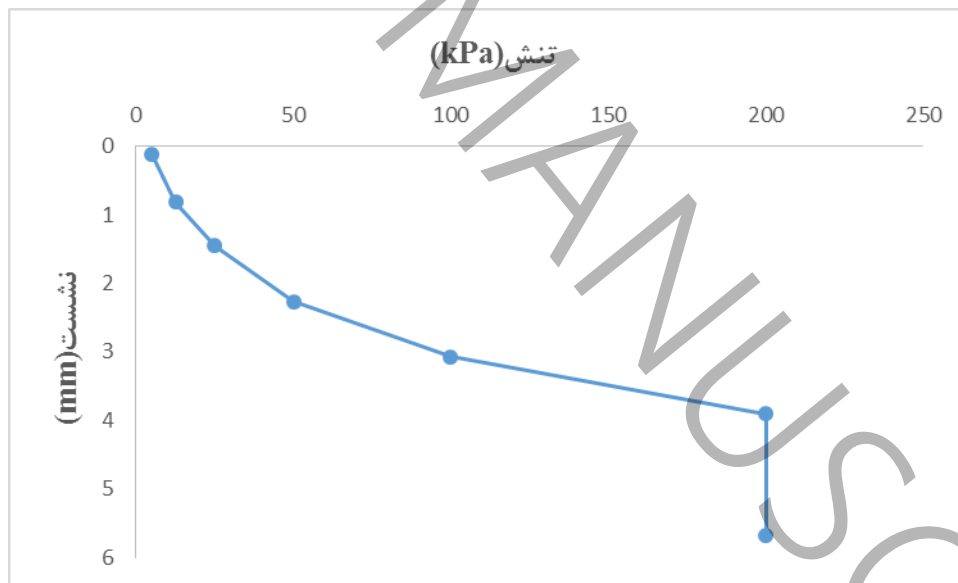
شکل ۳: منحنی دانه بندی نمونه استفاده شده

Figure3. The granulation curve of the used sample



شکل ۴: نتایج آزمایش تراکم استاندارد

Figure4. Standard compaction test results laboratory



شکل ۵: نمودار تنش-نشست آزمایش ادئومتر برای نمونه استفاده شده

Figure5. Stress-settlement diagram of oedometer test for the used sample

۲-۲- دستگاه با قابلیت شبیه سازی الگوهای نشت آب

با توجه به محدودیت دستگاه‌های موجود، مطابق با شکل ۶ دستگاهی با قابلیت شبیه‌سازی انواع نشت آب در خاک ساخته و استفاده شد.



۱- نیروی ورودی ۲- بازوی اهرم ۳- نیروی متعادل کننده ۴- جابجایی سنج ۵- سلول  
۶- تکیه گاه ثابت ۷- تکیه گاه موقت ۸- کامپیوتر و دیتالاگر

شکل ۶: دستگاه ارزیابی پتانسیل رمبندگی با قابلیت شبیه سازی الگوهای مختلف نفوذ آب به خاک و قسمت های مختلف آن

**Figure 6. Collapse potential measurement apparatus with the ability to simulate the different water infiltration patterns and its different parts**

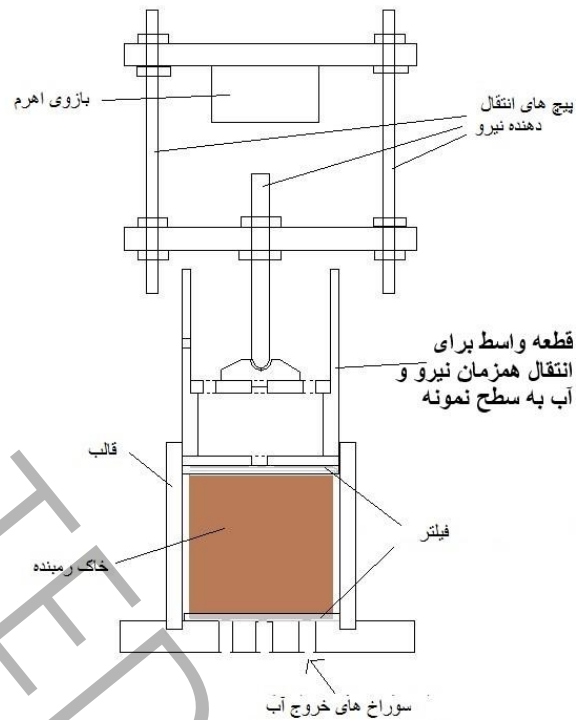
از نمونه ها با قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۰ سانتی متر در این دستگاه استفاده گردید تا تاثیر الگوهای مختلف نشت آب در خاک قابل بررسی باشند. در این دستگاه برای بارگذاری نمونه و اعمال تنش های مورد نظر بر روی سطح نمونه از یک سیستم بارگذاری اهرمی استفاده گردید که نیرو را ۴/۵ برابر می کند.

برای اندازه گیری نشست ها در هر مرحله از بارگذاری و پس از اشباع کردن نمونه، از یک جابجایی سنج (LVDT)، دیتالاگر و کامپیوتر استفاده شد. جابجایی سنج بر روی صفحه انتقال دهنده نیرو به نمونه قرار می گیرد و با دقت ۰/۰۱ میلیمتر مقدار نشست ها را اندازه گیری می کند. مقادیر اندازه گیری شده در حافظه ذخیره می گردند.

منابع نفوذ آب به خاک را می توان به چهار دسته تقسیم نمود: الف) منابعی که به صورت نقطه ای از بالا به سمت پایین باعث اشباع شدن یک ناحیه خاص از خاک رمبند می گردند مانند نشت لوله های سطحی. ب) منابعی که به صورت گسترده و از بالا به سمت پایین باعث اشباع خاک می گردند مانند جاری شدن سیل ج) منابعی که به صورت نقطه ای از پایین به سمت بالا باعث اشباع شدن یک ناحیه خاص از خاک رمبند می گردند مانند نشت از لوله های مدفون د) منابعی که به صورت گسترده و از پایین به سمت بالا باعث اشباع خاک می گردند مانند بالا آمدن سطح آب زیرزمینی

این دستگاه قابلیت مدلسازی هر چهار نوع الگو نفوذ آب در خاک را دارد. در الگوهای با حرکت آب از بالا به پایین، یک قطعه از پیش ساخته شده بر روی نمونه قرار می گیرد که سطح آب را ثابت نگه می دارد. آبی که از بالا وارد این قطعه می شود، مقداری از آن وارد نمونه می شود و مقدار اضافه توسط یک شیر خروجی خارج می شود.

در شکل ۷ نحوه مدلسازی نفوذ آب از بالا به سمت پایین به صورت نقطه ای قابل مشاهده است. برای مدلسازی توزیع گسترده در حرکت آب از بالا به سمت پایین، از صفحه ای با ۵ سوراخ استفاده می شود. از قطعه واسط برای انتقال همزمان نیرو و آب به سطح نمونه استفاده شده است.

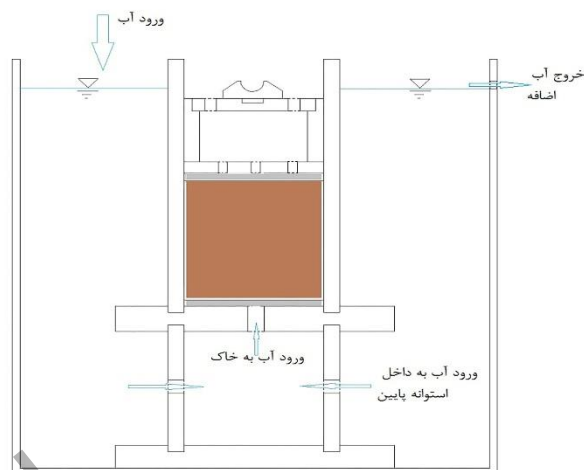


شکل ۷. نحوه مدلسازی نفوذ آب از بالا به سمت پایین به صورت نقطه‌ای

**Figure 7. How to model the top-point water infiltration pattern**

برای مدلسازی الگوهای نفوذ آب از پایین به سمت بالا، قالب نمونه روی یک استوانه قرار می‌گیرد. این استوانه دارای ۴ سوراخ بر روی جداره خود است که اجازه می‌دهد آب وارد آن شود. بین قالب و استوانه زیر آن از یک صفحه استفاده می‌شود که بر اساس نحوه توزیع آب (نقطه‌ای یا گسترده) با یک یا پنج سوراخ است. در این نوع اشباع شدن نیز سطح آب در محفظه پلاستیکی با استفاده از دو شیر ورودی و خروجی ثابت می‌ماند. در شکل ۸ نحوه مدلسازی نفوذ آب از پایین به سمت بالا و به صورت نقطه‌ای نشان داده شده است.





(الف)



(ب)

شکل ۸. الف) نحوه مدل‌سازی نفوذ آب از پایین به سمت بالا و به صورت نقطه‌ای (ب) ثابت نگه‌داشتن ارتفاع آب در مخزن با استفاده از یک شیر خروجی

**Figure 8. a) How to model the bottom-point water infiltration pattern b) Keeping the water level in the tank constant using an outlet valve**

### ۳- نتایج

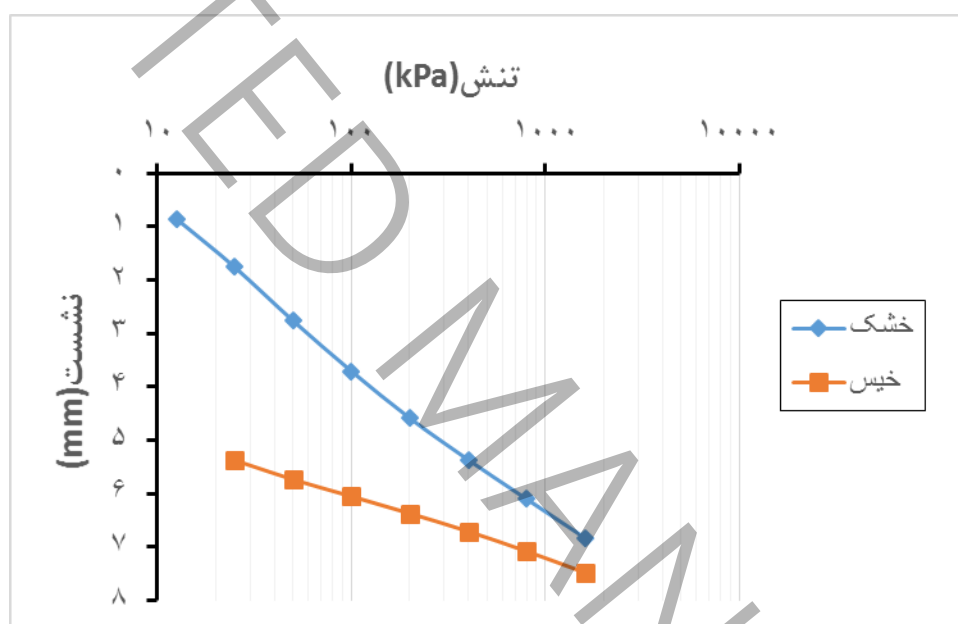
پس از ساخت نمونه در آزمایشگاه، با استفاده از دو دستگاه ادنومتر و دستگاه ساخته شده با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای نفوذ آب، تاثیر سرپار اشباع شدگی بر روی پتانسیل رمبندگی بررسی گردید. با استفاده از آزمایش ادنومتر دوگانه که نمونه در آن غرقاب می‌شود مانند مطالعات گذشته روند تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل سرپار بررسی گردید و با استفاده از دستگاه ساخته شده بر خلاف مطالعات گذشته برای هر الگوی نفوذ آب به صورت جداگانه، تاثیر تغییرات سرپار بر روی پتانسیل رمبندگی مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن روند تغییرات پتانسیل رمبندگی در الگوهای مختلف نفوذ آب با هم مقایسه گردید. همچنین نتایج با آزمایش ادنومتر نیز مقایسه شد.

۳-۱- ادنومتر دوگانه

آزمایش ادئومتر دوگانه بر این اساس است که تغییر شکل‌های به وجود آمده در اثر خیس شدن مستقل از مسیر بارگذاری-خیس شدن خواهد بود. این آزمایش با استفاده از دو نمونه یکسان انجام می‌گردد، یکی به روش آزمایش ادئومتر معمول در درصد رطوبت طبیعی انجام می‌گردد و نمونه دیگر پس از غرقاب شدن مورد بارگذاری قرار می‌گیرد. با استفاده از یک آزمایش ادئومتر دوگانه می‌توان میزان پتانسیل رمبندگی را در سربارهای مختلف اندازه‌گیری کرد.

شکل ۹ نتایج آزمایش ادئومتر دوگانه را برای نمونه نهایی نشان می‌دهد. با استفاده از اختلاف نشست‌های حالت خیس و خشک (با رطوبت طبیعی) و ضخامت اولیه نمونه می‌توان میزان پتانسیل رمبندگی را برای سربارهای مختلف اندازه‌گیری کرد که نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

شکل ۱۰ تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل سربار را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج با افزایش سربار، پتانسیل رمبندگی کاهش می‌یابد.



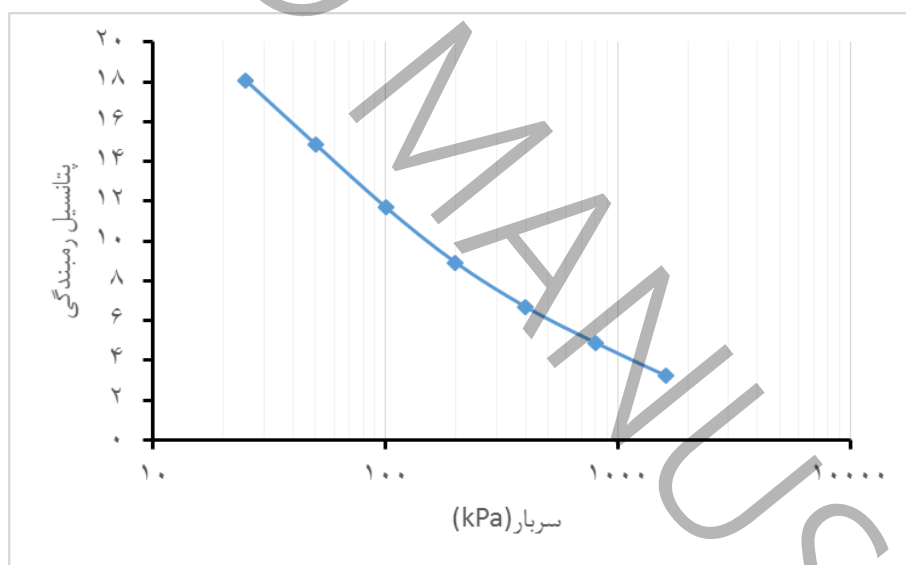
شکل ۹: نمودار تنش-نشست آزمایش ادئومتر دوگانه برای دو حالت خشک (رطوبت طبیعی) و خیس

Figure 9. Stress-settlement diagram of double oedometer test for two dry (natural moisture) and wet states

جدول ۴: محاسبه پتانسیل رمبندگی در سربارهای مختلف

Table 4. Calculating the collapse potential in different surcharges

پتانسیل رمبندگی	ضخامت نمونه (mm)	نشست (mm)		سربار (kPa)
		خشک (با رطوبت طبیعی)	خیس	
۱۸/۰۸	۲۰	۱/۷۵۹	۵/۳۷۵	۲۵
۱۴/۸۶	۲۰	۲/۷۶۴	۵/۷۳۶	۵۰
۱۱/۷۱	۲۰	۳/۷۰۹	۶/۰۵۱	۱۰۰
۸/۹۲	۲۰	۴/۵۸۸	۶/۳۷۲	۲۰۰
۶/۶۹۵	۲۰	۵/۳۶۸	۶/۷۰۷	۴۰۰
۴/۸۸۵	۲۰	۶/۱۰۴	۷/۰۸۱	۸۰۰
۳/۲۴۰	۲۰	۶/۸۳۲	۷/۴۸۰	۱۶۰۰

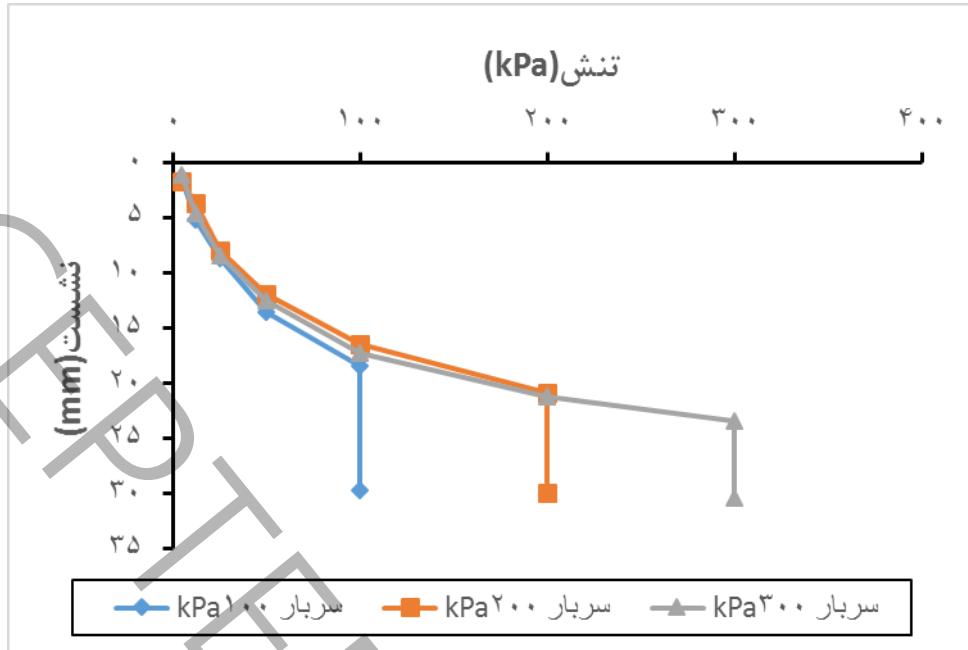


شکل ۱۰: تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل تغییرات سربار اشباع شدگی با استفاده از نتایج آزمایش ادئومتر دوگانه

Figure 10. Variations of collapse potential versus variations of surcharge using double oedometer test results

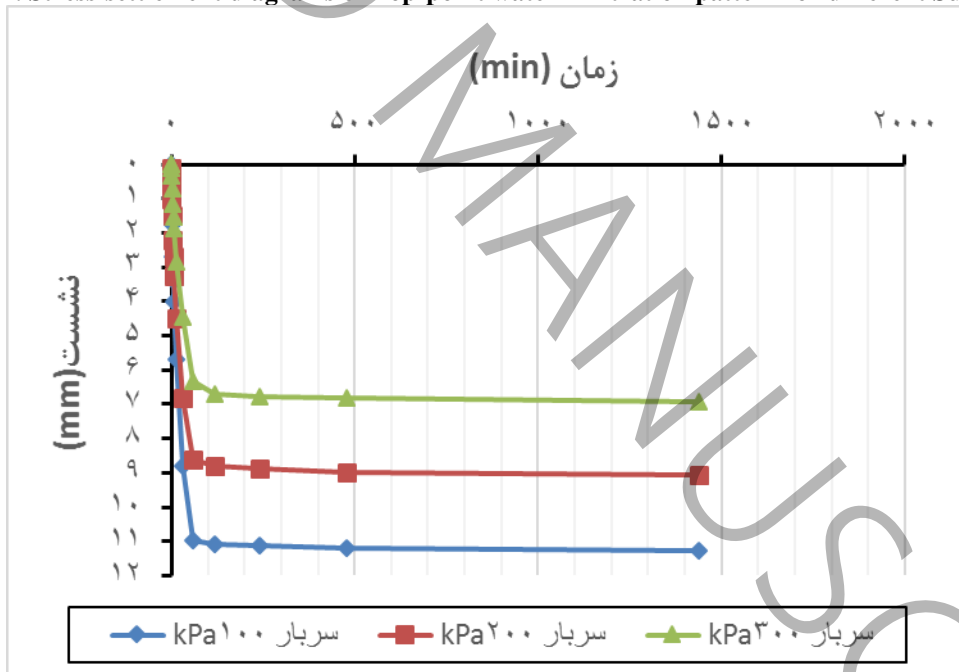
### ۳-۳ الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا

از سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال استفاده می‌گردد و در هر آزمایش پس از بارگذاری تا سربار مورد نظر، آب از بالا به صورت نقطه‌ای وارد نمونه می‌شود و میزان نشست در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نمودارهای تنش-نشست و نشست-زمان مربوط به این الگو نفوذ آب را نشان می‌دهند. بر اساس این نتایج و رابطه ۲ میزان پتانسیل رمبندگی برای سه سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۱۱/۲۸، ۹/۰۸ و ۶/۹۱ محاسبه می‌گردد.



شکل ۱۱: نمودارهای تنش-نشست الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا برای سربارهای مختلف

Figure 11. Stress-settlement diagrams of Top-point water infiltration pattern for different Surcharges



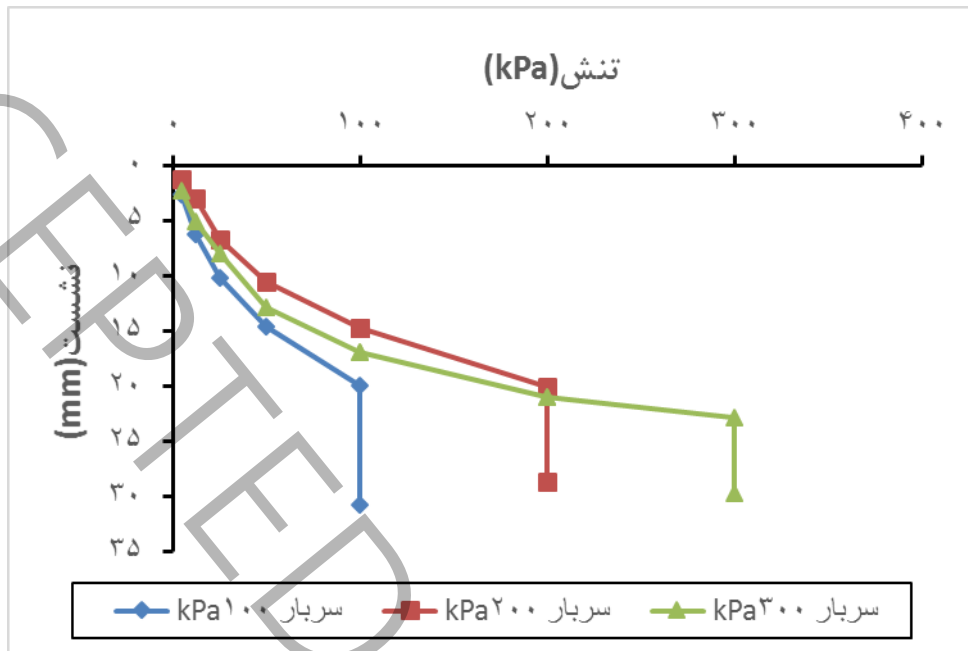
شکل ۱۲: نمودارهای نشست-زمان الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا برای سربارهای مختلف

Figure 12. Settlement-time diagrams of Top-point water infiltration pattern for different Surcharges

۳-۳ الگو نفوذ آب گسترده از بالا

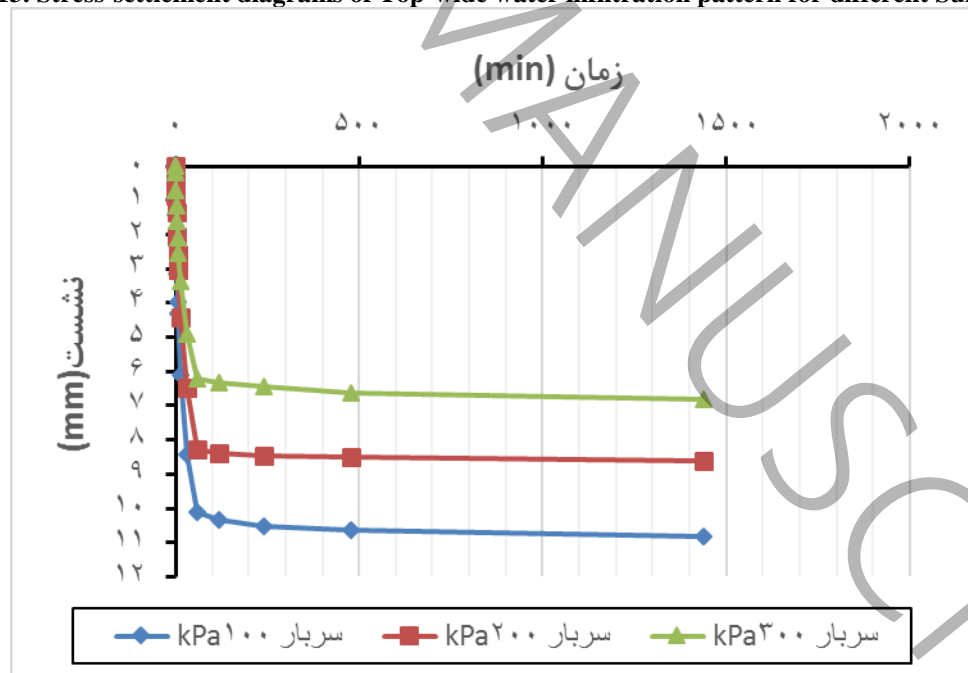
در این الگو نفوذ آب پس از رسیدن به سربار اشباع شدگی مورد نظر، آب به صورت گسترده از بالا وارد نمونه می‌شود و به سمت پایین حرکت می‌کند. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمودارهای تنش-نشست و نشست-زمان سه سربار مختلف در این الگو نفوذ آب را نشان

می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده میزان پتانسیل رمبندگی برای سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر با ۱۰/۸۱، ۸/۶۲ و ۶/۸ است.



شکل ۱۳: نمودارهای تنش-نشست الگو نفوذ آب گسترده از بالا برای سربارهای مختلف

Figure13. Stress-settlement diagrams of Top-wide water infiltration pattern for different Surcharges

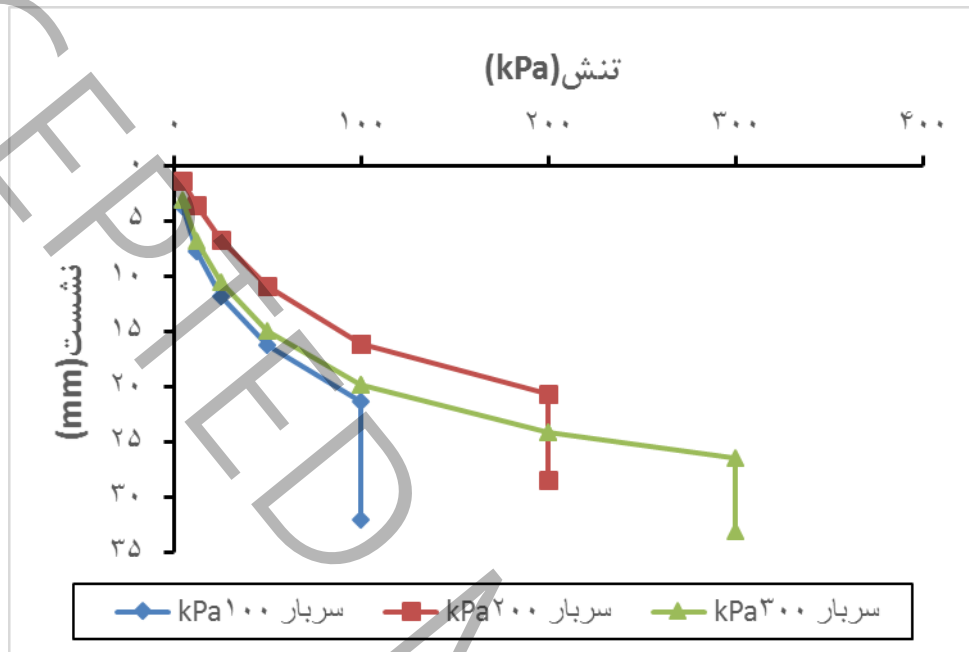


شکل ۱۴: نمودارهای نشست-زمان الگو نفوذ آب گسترده از بالا برای سربارهای مختلف

Figure14. Settlement-time diagrams of Top-wide water infiltration pattern for different Surcharges

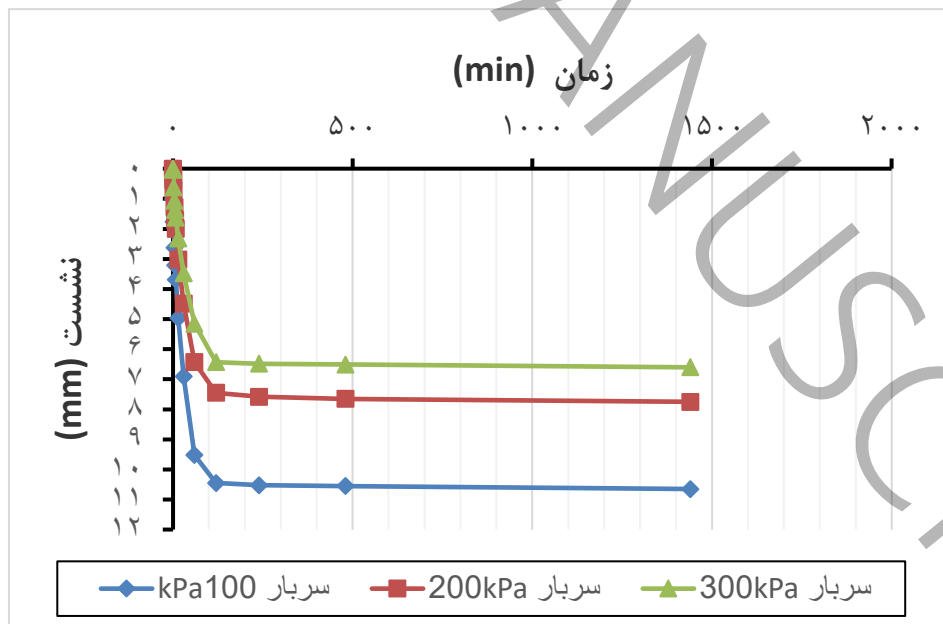
۳-۴ الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمودارهای تنش-نشست و نشست-زمان را برای الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین نشان می‌دهند. در این الگو پس از رسیدن به سربار اشباع شدگی، آب به صورت نقطه‌ای از پایین وارد نمونه می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند. بر اساس نشست‌های قبل از اشباع شدن و ۲۴ ساعت بعد از آن، میزان پتانسیل رطوبت‌رسانی برای سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال برابر با ۱۰/۶۵، ۷/۷۵ و ۶/۶ است.



شکل ۱۵: نمودارهای تنش-نشست الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین برای سربارهای مختلف

Figure 15. Stress-settlement diagrams of Bottom-point water infiltration pattern for different Surcharges

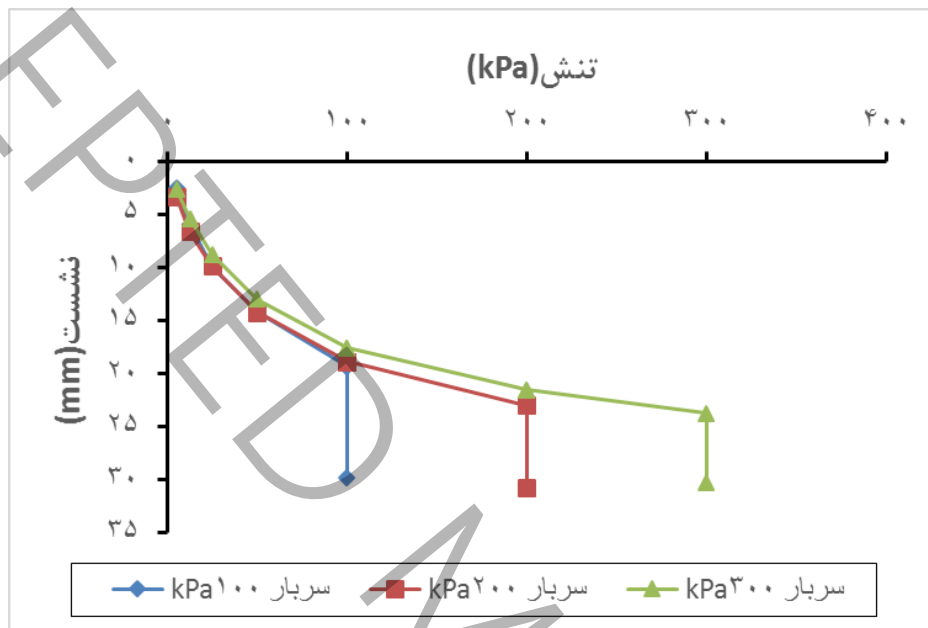


شکل ۱۶: نمودارهای نشست-زمان الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین برای سربارهای مختلف

Figure 16. Settlement-time diagrams of Bottom-point water infiltration pattern for different Surcharges

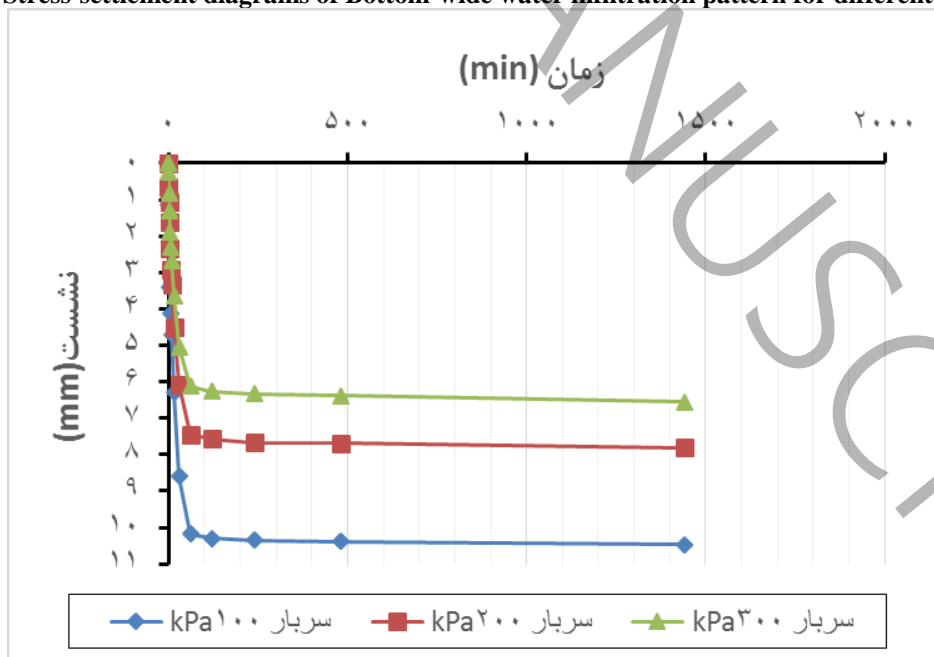
۳-۵ الگو نفوذ آب گسترده از پایین

در این الگو پس از رسیدن به سربار اشباع شدگی مورد نظر، آب از پایین به صورت گسترده وارد نمونه می‌شود و میزان نشست تا ۲۴ ساعت بعد از آن ثبت می‌گردد. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب نمودارهای تنش-نشست و نشست-زمان را برای این الگو نفوذ آب نشان می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده میزان پتانسیل رمبندگی برای سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال برابر با ۱۰/۴۷، ۷/۸ و ۶/۵۶ است.



شکل ۱۷: نمودارهای تنش-نشست الگو نفوذ آب گسترده از پایین برای سربارهای مختلف

Figure17. Stress-settlement diagrams of Bottom-wide water infiltration pattern for different Surcharges



شکل ۱۸: نمودارهای نشست-زمان الگو نفوذ آب گسترده از پایین برای سربارهای مختلف

Figure18. Settlement-time diagrams of Bottom-wide water infiltration pattern for different Surcharges

#### ۴- آنالیز نتایج

برای بررسی تاثیر شبیه‌سازی الگوهای مختلف نفوذ آب بر روی نشست رمبندگی، میزان پتانسیل رمبندگی به دست آمده از آزمایش های مختلف در سربارهای اشباع شدگی مختلف مقایسه گردید. در سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال میزان پتانسیل رمبندگی در آزمایش ادئومتر بیشتر از آزمایش‌های الگوهای نفوذ آب است که بیشترین اختلاف را با الگو نفوذ آب گسترده از پایین با مقدار ۱۳/۷ درصد دارد. در بین الگوهای مختلف نفوذ آب، الگو نقطه‌ای از بالا بیشترین و الگو گسترده از پایین کمترین پتانسیل رمبندگی را دارند و میزان اختلاف در این الگو ۷/۷ درصد است. به طور کلی الگوهای با حرکت آب از بالا پتانسیل رمبندگی بیشتری نسبت به الگوهای با حرکت آب از پایین دارند. همچنین در هر دو جهت حرکت آب میزان پتانسیل رمبندگی در توزیع نقطه‌ای بیشتر از گسترده است.

مقایسه پتانسیل رمبندگی آزمایش‌های مختلف در سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد که در این سربار پتانسیل رمبندگی آزمایش ادئومتر با الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا تقریباً برابر است و از سایر الگوهای نفوذ آب بیشتر است و بیشترین اختلاف را با الگو نقطه‌ای از پایین دارد که مقدار آن ۱۵ درصد است. در بین الگوهای مختلف نفوذ آب الگو نقطه‌ای از بالا بیشترین و الگو نقطه‌ای از پایین کمترین پتانسیل رمبندگی را دارند و میزان اختلاف آن‌ها ۱۷/۱ درصد است. در هر دو نوع توزیع آب، میزان پتانسیل رمبندگی در زمان حرکت آب از بالا بیشتر از حرکت آب از پایین است. در حرکت آب از بالا، میزان پتانسیل رمبندگی در توزیع نقطه‌ای بیشتر از گسترده است و در حرکت آب از پایین، پتانسیل رمبندگی در هر دو نوع توزیع آب نزدیک به هم است.

در سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال، میزان پتانسیل رمبندگی در آزمایش ادئومتر بیشتر از تمام الگوهای نفوذ آب است و بیشترین اختلاف را با الگو گسترده از پایین با میزان ۱۶ درصد دارد. در بین الگوهای مختلف نفوذ آب، الگو نقطه‌ای از بالا بیشترین و الگو گسترده از پایین کمترین پتانسیل رمبندگی را دارند که میزان اختلاف آن‌ها ۵/۳ درصد است. در هر دو نوع توزیع آب، جهت حرکت آب از بالا پتانسیل رمبندگی بیشتری نسبت به جهت حرکت آب از پایین ایجاد می‌کند. در هر دو جهت حرکت آب، پتانسیل رمبندگی در توزیع نقطه‌ای بیشتر از گسترده است.

مقایسه بین نتایج هر سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد که میزان پتانسیل رمبندگی در آزمایش ادئومتر و آزمایش‌های با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای مختلف نفوذ آب متفاوت است و نتایج آزمایش ادئومتر از دقت کافی برخوردار نیستند. حداکثر میزان اختلاف پتانسیل رمبندگی بین آزمایش ادئومتر و آزمایش‌های الگوهای نفوذ آب در سربارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب عبارتند از ۱۳/۷، ۱۵ و ۱۶ درصد که بر اساس این نتایج بیشترین اختلاف در سربار اشباع شدگی ۳۰۰ کیلوپاسکال اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد در این سربار تاثیر الگوهای مختلف نفوذ آب بیشتر است.

همچنین نتایج پتانسیل رمبندگی الگوهای مختلف نفوذ آب در هر سه سربار اشباع شدگی نشان می‌دهد که پتانسیل رمبندگی در الگوهای مختلف نفوذ آب متفاوت است و نمی‌توان از نتیجه یک الگو نفوذ آب برای تمام الگوها استفاده کرد. حداکثر اختلاف پتانسیل رمبندگی بین الگوهای مختلف نفوذ آب برای سه سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر است با ۷/۷، ۱۷/۱ و ۵/۳ درصد که بر اساس این نتایج در سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال، نوع الگو نفوذ آب بیشترین تاثیر را در پتانسیل رمبندگی می‌گذارد.

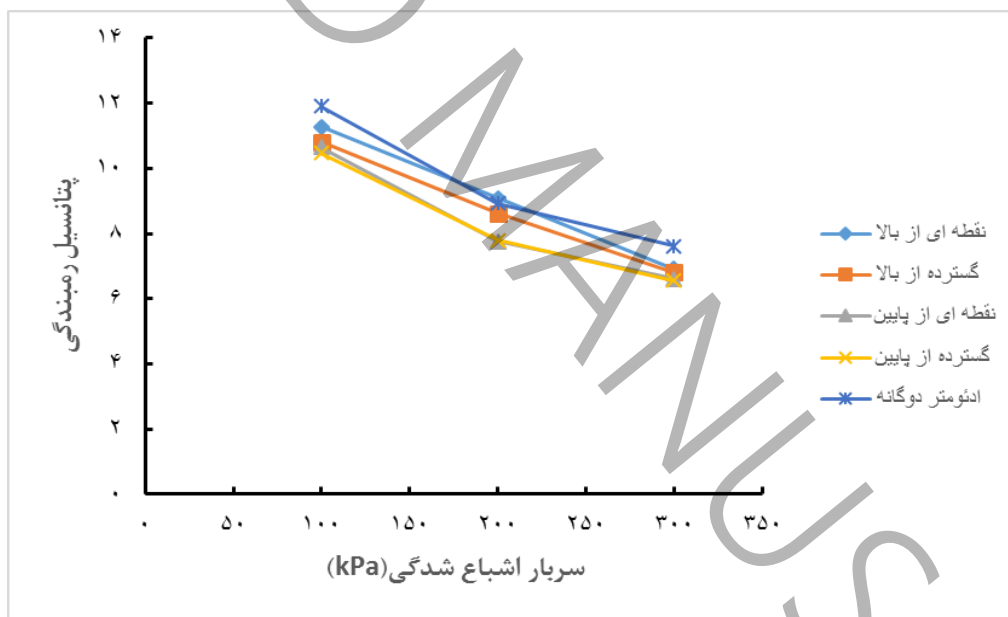
شکل ۱۹ تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل افزایش سربار اشباع شدگی از ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال را در آزمایش ادئومتر و آزمایش های با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای مختلف نشأت آب را نشان می‌دهد. با افزایش سربار اشباع شدگی، میزان پتانسیل رمبندگی در تمام آزمایش‌ها کاهش می‌یابد. نتایج مربوط به سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و میزان تغییر پتانسیل رمبندگی برای دو سربار ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس جدول ۵ در افزایش سربار از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال بیشترین کاهش پتانسیل رمبندگی مربوط به الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین با میزان ۲۷/۲ درصد و کمترین آن مربوط به



الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا با میزان ۱۹/۵ درصد است. میزان کاهش پتانسیل رمبندگی در الگوهای با حرکت آب از پایین به بالا بیشتر از الگوهای با حرکت آب از بالا به پایین است.

در افزایش سربار از ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال، میزان کاهش پتانسیل رمبندگی در آزمایش ادئومتر کمتر از آزمایش‌های با قابلیت شبیه سازی الگوهای نفوذ آب است و به طور کلی میزان کاهش پتانسیل رمبندگی در آزمایش‌های مختلف نزدیک به هم است و اختلاف ناچیزی دارند و در این مقدار افزایش سربار اشباع شدگی، پتانسیل رمبندگی حدود ۳۷ درصد کاهش می‌یابد.

زمانی که آب به سمت پایین حرکت می‌کند، نیروی تراوش آب به سمت پایین و زمانی که به سمت بالا حرکت می‌کند، این نیرو به سمت بالا است که این اختلاف نیرو می‌تواند باعث ایجاد تفاوت در مقادیر پتانسیل رمبندگی گردد. همچنین نیروی جاذبه باعث می‌گردد که آب در حرکت به سمت پایین نسبت به حرکت به سمت بالا سریع‌تر در لایه خاک حرکت کند و نمونه سریع‌تر اشباع گردد که تغییرات سرعت اشباع شدن می‌تواند عامل دیگری از تفاوت مقادیر پتانسیل رمبندگی در دو جهت حرکت آب باشد. در الگوهای نفوذ آب نقطه‌ای نیز نسبت به نفوذ آب گسترده، شکل حرکت آب در نمونه متفاوت است که نحوه توزیع و حرکت آب در نمونه نیز می‌تواند عامل دیگری از اختلاف نتایج در الگوهای مختلف نفوذ آب باشد. بررسی دلایل اختلاف نتایج تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل تغییرات سربار در الگوهای مختلف نفوذ آب نیازمند بررسی‌های بیشتر است.



شکل ۱۹: مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل افزایش سربار اشباع شدگی در الگوهای مختلف نفوذ آب و آزمایش ادئومتر دوگانه

Figure 19. Comparison of the changes in the collapse potential against the increase of the surcharge in different water infiltration patterns and double oedometer test

جدول ۵: میزان کاهش پتانسیل رمبندگی برای افزایش سربارهای مختلف

Table5. The amount of reduction in the collapse potential for the increase of various surcharges

سربار اشباع شدگی (kPa)					نوع آزمایش
۳۰۰		۲۰۰		۱۰۰	
اختلاف با سربار kPa ۱۰۰ (%)	پتانسیل رمبندگی	اختلاف با سربار kPa ۱۰۰ (%)	پتانسیل رمبندگی	پتانسیل رمبندگی	
۳۶/۱	۷/۶۱	۲۵/۱	۸/۹۲	۱۱/۹۱	ادئومتر دو بل
۳۸/۷	۶/۹۱	۱۹/۵	۹/۰۸	۱۱/۲۸	بالا- نقطه‌ای
۳۷/۱	۶/۸	۲۰/۲	۸/۶۲	۱۰/۸۱	بالا- گسترده
۳۸/۰	۶/۶	۲۷/۲	۷/۷۵	۱۰/۶۵	پایین- نقطه‌ای
۳۷/۳	۶/۵۶	۲۵/۵	۷/۸	۱۰/۴۷	پایین- گسترده

### ۵- نتیجه گیری

میزان سربار اشباع شدگی یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار خاک رمبند است. تاثیر این پارامتر ابتدا با استفاده از آزمایش ادئومتر مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه با استفاده از دستگاه بزرگ مقیاس با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای مختلف نفوذ آب، میزان نشست های رمبندگی در سه سربار ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال برای الگوهای مختلف نفوذ آب مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

۱- پتانسیل رمبندگی وابسته به سربار اشباع شدگی است. در خاک های طبیعی با افزایش سربار اشباع شدگی، پتانسیل رمبندگی کاهش می‌یابد اما در خاک‌های متراکم شده با افزایش سربار اشباع شدگی، پتانسیل رمبندگی افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به یک سربار بحرانی کاهش می‌یابد.

۲- مقدار پتانسیل رمبندگی وابسته به الگو نفوذ آب در خاک رمبند است. برای خاک رمبند استفاده شده، در هر سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال میزان پتانسیل رمبندگی به دست آمده از آزمایش ادئومتر از آزمایش‌های با قابلیت شبیه سازی الگوهای مختلف نفوذ آب بیشتر است.

۳- در بین الگوهای مختلف نفوذ آب، الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا بیشترین پتانسیل رمبندگی را در هر سه سربار اشباع شدگی ایجاد می‌کند. کمترین پتانسیل رمبندگی در بین الگوها، برای سربار ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال مربوط به الگو نفوذ آب گسترده از پایین و برای سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال مربوط به الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین است.

۴- در هر سه سربار اشباع شدگی، زمانی که آب از بالا به سمت پایین حرکت می‌کند نسبت به زمانی که از پایین به بالا حرکت می‌کند پتانسیل رمبندگی بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین در جهت حرکت آب از بالا، توزیع نقطه‌ای پتانسیل رمبندگی بیشتری نسبت به توزیع گسترده ایجاد می‌کند و در حرکت آب از پایین، میزان پتانسیل رمبندگی در هر دو نوع توزیع آب نزدیک به هم است.

۵- مقایسه بین سه سربار اشباع شدگی نشان می‌دهد که تاثیر شبیه‌سازی الگوهای نفوذ آب در سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال نسبت به دو سربار دیگر بیشتر است و در این سربار حداکثر میزان اختلاف پتانسیل رمبندگی بین آزمایش ادئومتر و آزمایش‌های الگوهای نفوذ آب به ۱۶ درصد می‌رسد.

۶- در افزایش سربار اشباع شدگی از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین کاهش پتانسیل رهمبندگی مربوط به الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین با میزان ۲۷/۲ درصد و کمترین آن مربوط به الگو نفوذ آب نقطه‌ای از بالا با میزان ۱۹/۵ درصد است. در افزایش سربار اشباع شدگی از ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال، میزان کاهش پتانسیل رهمبندگی در آزمایش ادئومتر کمتر از آزمایش‌های با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای نفوذ آب است.

## ۶- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

پتانسیل رهمبندگی	$CP$
تغییرات نسبت تخلخل	$\Delta e$
نسبت تخلخل اولیه	$e_0$
تغییرات ارتفاع، mm	$\Delta h$
ارتفاع اولیه، mm	$h_0$
پتانسیل رهمبندگی	$Ic$
قرائت گیج بعد از خیس شدن، mm	$d_f$
قرائت گیج قبل از خیس شدن، mm	$d_i$
درصد رطوبت	$\omega$
وزن مخصوص، $kN/m^3$	$\gamma$
وزن مخصوص خشک حداکثر، $kN/m^3$	$\gamma_{d,max}$
درصد رطوبت بهینه	$\omega_{opt}$
چگالی ویژه	$G_s$
ضریب یکنواختی	$C_u$
ضریب دانه بندی	$C_c$

## ۷- منابع و مراجع

- [1] J.K. Mitchell, K. Soga, Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons New York, (2005).
- [2] K.E. Gaaver, Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils, Alexandria Engineering Journal, 51(3) (2012) 205-210.
- [3] K.-z. Yuan, W.-k. Ni, X.-f. Lü, H.-m. Wang, Effect of water distribution on shear strength of compacted loess, Geomechanics and Engineering, 31(5) (2022) 519.
- [4] C. Rogers, T. Dijkstra, I. Smalley, Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe: in memory of Jan Sajgalik, Engineering Geology, 37(2) (1994) 83-113.
- [5] M. Nouaouria, M. Guenfoud, B. Lafifi, Engineering properties of loess in Algeria, Engineering Geology, 99(1-2) (2008) 85-90.
- [6] M. Noutash, B. Hajjalilue, M. Cheshmdoost, Preponding of canals as a remediation method for collapsible soils, in: Proceedings of the 4th international conference on geotechnical engineering and soil mechanics, Tehran, Iran, (2010).
- [7] P. Li, S. Vanapalli, T. Li, Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(2) (2016) 256-274.
- [8] M. Zimbaro, L. Ercoli, B. Megna, The open metastable structure of a collapsible sand: fabric and bonding, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75(1) (2016) 125-139.
- [9] M.S. Mahmood, M.J. Abraham, A review of collapsible soils behavior and prediction, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, (2021), pp. 012044.
- [10] M.U. Qureshi, Z. Mahmood, Q.U. Farooq, Q. Qureshi, H. Alhandasi, I. Chang, Engineering characteristics of dune sand-fine marble waste mixtures, Geomech. Eng, 28 (2022) 547-557.

- [11] J. Jennings, A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure, (1975).
- [12] E.C. Lawton, R.J. Frigaszy, M.D. Hetherington, Review of wetting-induced collapse in compacted soil, *Journal of geotechnical engineering*, 118(9) (1992) 1376-1394.
- [13] L. Steadman, Collapse settlement in compacted soils of variable fines content, Washington State University, (1987).
- [14] Y. Guo, W. Ni, H. Liu, Effects of dry density and water content on compressibility and shear strength of loess, *Geomechanics and Engineering*, 24(5) (2021) 419-430.
- [15] S. Houston, W. Houston, C. Lawrence, Collapsible soil engineering in highway infrastructure development, *Journal of Transportation Engineering*, 128(3) (2002) 295-300.
- [16] D. Kim, Y. Chung, N.Z. Siddiki, Y. Shin, J.R. Kim, Mechanical Characteristics of Indiana Loess Soils for Highway Embankments, (2008).
- [17] M.S. Mahmood, A. Akhtarpour, R. Almahmodi, M.M.A. Husain, Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2020), pp. 012080.
- [18] S. Wheeler, R. Sharma, M. Buisson, Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils, *Géotechnique*, 53(1) (2003) 41-54.
- [19] J.H. Pereira, D.G. Fredlund, M.P. Cardão Neto, G.d.F. Gitirana Jr, Hydraulic behavior of collapsible compacted gneiss soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10) (2005) 1264-1273.
- [20] G. Medero, F. Schnaid, W. Gehling, Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6) (2009) 840-843.
- [21] T. Alwail, C. Ho, R. Fragaszy, Collapse mechanism of compacted clayey and silty sands, in: *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, ASCE, (1994), pp. 1435-1446.
- [22] E.C. Lawton, *Wetting-induced collapse in compacted soil*, Washington State University, (1986).
- [23] N. Ismael, A. Jeragh, M. Mollah, O. Khaldi, Factors affecting the collapse potential of calcareous desert sands, in: *Southeast Asian geotechnical conference*. 9, (1987), pp. 147-158.
- [24] A. El Howayek, P.-T. Huang, R. Bisnett, M.C. Santagata, Identification and behavior of collapsible soils, Purdue University. Joint Transportation Research Program, (2011).
- [25] I. Mashhour, A. Hanna, Drag load on end-bearing piles in collapsible soil due to inundation, *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12) (2016) 2030-2038.
- [26] M.A. Alassal, A.M. Hassan, H.H. Elmamlouk, Effect of Fines and Matric Suction on the Collapsibility of Sandy Soils, in: *International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures"*, Springer, (2019), pp. 61-72.
- [27] S.M. Haeri, Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(1) (2016) 25-40.
- [28] A. Hanna, S. Soliman, Experimental investigation of foundation on collapsible soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(11) (2017) 04017085.
- [29] S.D. Mohammadi, R. Ajalloeian, Investigation of Desirability of Sand Pluviation Technique in order to Sample Making of Sandy Soils for Laboratory Models, *Modares Civil Engineering journal*, 13(5) (2014) 53-63. **(in Persion)**

# **Evaluation the effect of surcharge intensity on collapse potential of soils in different water infiltration patterns**

## **ABSTRACT**

Collapsible soils have good stability in dry state, but it experiences significant settlements due to wetting. Many characteristics can affect the collapse settlement. The amount of wetting pressure is one of the most important parameters affecting the collapsible soil. Water can enter the collapsible soil from various sources such as floods, rainfall, irrigation, etc. But in the tests used to investigate the behavior of the collapsible soils, the influence of these sources cannot be investigated. An apparatus capable of simulating different patterns of water infiltration in the soil was built and using three wetting pressure of 100, 200, and 300 kPa, the effect of surcharge in each pattern of water infiltration was investigated separately. The results show that for collapsible soil is used, in all three surcharges, the collapse potential of the oedometer test is different from the water infiltration tests. The biggest difference is related to the surcharge of 300 kPa that the maximum difference between the oedometer and water infiltration tests is 16%. When the water enters as top-point pattern, the highest collapse potential is created among the different patterns. The collapse potential decreases with the increase of the surcharge, but the amount of changes is different for each pattern. For example, with the increase of surcharge from 100 to 200 kPa, the greatest reduction of the collapse potential with a value of 27.2% is created in the bottom-point pattern.

## **KEYWORDS**

Collapse potential, Water infiltration, Apparatus, Surcharge, collapsible soil.