



University Of Qom



## The Study of the Effect of Drainage Conditions on the Collapse Potential of Soil

Javad Mahmoudi<sup>1</sup> , Reza Porhoseini<sup>2</sup> 

1. Ph.D., Faculty of Civil Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran. E-mail: [j.mahmoudi@stu.yazd.ac.ir](mailto:j.mahmoudi@stu.yazd.ac.ir)

2. Corresponding author, Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran. E-mail: [r\\_porhoseini@yazd.ac.ir](mailto:r_porhoseini@yazd.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 05 Nov 2023

Revised 15 Jan 2024

Accepted 19 Jan 2024

#### Keywords:

Collapsible Soil,  
Collapse Potential,  
Drainage,  
Large Scale Apparatus,  
Water infiltration.

### ABSTRACT

*Collapsible soils are one of the problematic soils, as they exhibit good stability in dry conditions but undergo sudden and significant settlements upon water entry. The surrounding layers of collapsible soil can be either permeable or impermeable, but the existing devices for determining the collapse potential lack the ability to model the drainage conditions around the collapsible soil layer. In this study, an apparatus capable of modeling drainage conditions was constructed. A collapsible soil was made in laboratory, and its collapse potential was determined using single and double oedometer tests as well as the constructed apparatus. The results show that drainage conditions are an influential factor on the behavior of collapsible soils. The collapse potential obtained from this apparatus is lower than the collapse potential obtained from the oedometer test. The comparison of the two conditions with drainage and without drainage in two point and wide water distributions shows that in both water distributions, the collapse potential is higher in the condition with drainage than in the condition without drainage. For example, in the point distribution, the collapse potential with drainage is 27.7% higher than the without drainage, while in the wide distribution, it is 19.5% higher.*

**Cite this article:** Mahmoudi J, Pourhosseini R. The Study of the Effect of Drainage Conditions on the Collapse Potential of Soil. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 109-124. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10063.1520>



## مطالعه تأثیر شرایط زهکشی بر ظرفیت رمبندگی خاک

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

۱. دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: [j.mahmoudi@stu.yazd.ac.ir](mailto:j.mahmoudi@stu.yazd.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: [r\\_porhoseini@yazd.ac.ir](mailto:r_porhoseini@yazd.ac.ir)

### چکیده

خاک رمبند یکی از خاک‌های مشکل آفرین است که در حالت خشک، پایداری خوبی از خود نشان می‌دهد، اما به محض ورود آب دچار نشست‌های ناگهانی و قابل توجه می‌گردد. عوامل زیادی بر روی رفتار خاک رمبند تأثیر می‌گذارد که این عوامل را می‌توان به چهار دسته شرایط اولیه خاک، شرایط بارگذاری، کیفیت دانه‌بندی و نحوه نفوذ آب در خاک تقسیم‌بندی نمود. لایه‌های اطراف خاک رمبند می‌توانند نفوذپذیر و یا نفوذناپذیر باشند، اما دستگاه‌های موجود برای تعیین ظرفیت رمبندگی قابلیت مدل‌سازی شرایط زهکشی مرزهای لایه خاک رمبند را ندارند. در این مطالعه، دستگاهی با قابلیت مدل‌سازی شرایط زهکشی در آزمایشگاه ساخته شد. خاک رمبند در آزمایشگاه تولید و میزان ظرفیت رمبندگی آن با استفاده از آزمایش ادومتر تک، دوگانه و دستگاه ساخته شده تعیین گردید. نتایج نشان داد که شرایط زهکشی یک عامل تأثیرگذار بر روی رفتار خاک‌های رمبند است. ظرفیت رمبندگی به‌دست آمده از این دستگاه با توجه به ورود آب از یک طرف، در هر دو حالت با زهکشی و بدون زهکشی کمتر از ظرفیت رمبندگی آزمایش ادومتر است. مقایسه دو حالت با زهکشی و بدون زهکشی در دو توزیع آب نقطه‌ای و گسترده نشان می‌دهد در هر دو توزیع آب، میزان ظرفیت رمبندگی در حالت با زهکشی بیشتر از حالت بدون زهکشی است. به عنوان مثال، در توزیع نقطه‌ای ظرفیت رمبندگی حالت با زهکشی ۲۷/۷ درصد و در توزیع گسترده ۱۹/۵ درصد بیشتر از حالت بدون زهکشی است.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹

### کلیدواژه‌ها:

خاک رمبند،

ظرفیت رمبندگی،

زهکشی،

دستگاه بزرگ مقیاس،

نفوذ آب.

استناد: محمودی جواد، پورحسینی رضا. مطالعه تأثیر شرایط زهکشی بر ظرفیت رمبندگی خاک. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛

<https://doi.org/10.22091/cer.2024.10063.1520>. ۱۰۹-۱۲۴، (۱)۱۰

## ۱- مقدمه

رس، ضریب یکنواختی و غیره) و نحوه نفوذ آب (مسیر حرکت آب، نحوه توزیع آب و غیره) می‌شود [۲۱-۲۸]. رمیندگی می‌تواند در اثر دلایل طبیعی مانند سیل و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و یا در اثر فعالیت‌های انسانی مانند شکسته شدن خطوط آب یا فاضلاب، آبیاری مناظر سبز و زهکشی ضعیف سطحی اتفاق بیافتد [۲۹-۳۱].

الواجی<sup>۲</sup>، تأثیر نشت آب بر روی تغییر شکل لوله‌های مدفون داخل خاک رمینده را مورد بررسی قرار داد و نشان داد با افزایش عمق اشباع‌شدگی در اثر نشت آب، نشست و تغییر شکل لوله‌های مدفون افزایش می‌یابد [۳۲]. محققان در بررسی نشست خاک رمینده ناشی از آبیاری قطره‌ای نشان دادند با افزایش ضخامت خاک رمینده میزان نشست و زمان موردنیاز برای رسیدن به رمیندگی کامل افزایش می‌یابد، اما نسبت میزان نشست به ضخامت، تقریباً مقدار ثابتی دارد [۳۳]. مشهور<sup>۳</sup> و همکاران، تأثیر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی بر روی ظرفیت باربری شمع‌های قرار گرفته در خاک رمینده را مورد بررسی قرار دادند و نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد رمیندگی باعث ایجاد نیروی اصطکاک جداره منفی در شمع می‌گردد که این نیرو با سرعت اشباع شدن لایه خاک رمینده رابطه مستقیم دارد [۳۴]. محمودی و همکاران، در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند نحوه ورود آب به خاک رمینده، یک پارامتر تأثیرگذار بر روی نشست رمیندگی است و زمانی که آب از بالا وارد خاک رمینده می‌شود نسبت به ورود آب از پایین، نشست رمیندگی بیشتری به وجود می‌آید [۲۸]. در مطالعاتی دیگر، تأثیر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی بر روی پی‌های سطحی قرار گرفته روی خاک رمینده و همچنین تأثیر حرکت رطوبت در اثر موئینگی و استفاده از سد موئینگی بر روی نشست رمیندگی بررسی شد [۳۵ و ۳۶].

خاک‌های رمینده یکی از خاک‌های حساس به رطوبت هستند که در حالت خشک مقاومت خوبی در مقابل بارهای عمودی از خود نشان می‌دهند، اما با خیس شدن دچار نشست‌های ناگهانی و قابل توجه می‌گردند [۱-۴]. این خاک‌ها شامل رس‌ها، سیلت‌ها، لس‌ها، خاکسترهای آتشفشانی و ماسه‌های ریز می‌شوند [۵-۷]. نیروی موئینگی یا مکش، نیروهای بین مولکولی ذرات، نیروی الکترواستاتیک یونی، پل‌های رسی بین ذرات سیلت و ماسه و اتصالات شیمیایی مانند کربنات کلسیم، نمک‌ها و اکسید آهن باعث می‌گردند این خاک‌ها در حالت خشک مقاومت قابل توجه از خود نشان دهند [۸-۱۰]. تا به امروز مطالعات زیادی بر روی مکانیزم رمیندگی صورت گرفته است که لی<sup>۱</sup> و همکاران، در یک مقاله مروری این مطالعات را به سه دسته روش‌های سنتی، روش‌های میکروسکوپی و روش‌های مبتنی بر مکانیک خاک تقسیم‌بندی کردند [۱۱].

ویژگی‌های شاخص خاک‌های رمینده، وزن مخصوص کم، ساختار باز، پوکی بالا، نهشته جوان، درصد رطوبت کم و پیوند مناسب بین ذرات در حالت غیراشباع است [۱۲-۱۶].

این خاک‌ها بیش از ۱۰ درصد از خشکی دنیا را شامل می‌شوند و در بسیاری از نقاط دنیا از جمله مرکز و جنوب ایالات متحده، قسمتی از آسیا و آفریقای جنوبی یافت می‌شوند [۱۷-۲۰].

پارامترهایی زیادی می‌توانند بر روی رفتار خاک‌های رمینده تأثیر بگذارند. پارامترهایی که تأثیر آن‌ها در مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است شامل شرایط اولیه خاک (وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت، نسبت تخلخل و غیره)، شرایط بارگذاری (میزان سربار، مسیر تنش، سرعت بارگذاری و غیره)، کیفیت دانه‌بندی (درصد

<sup>2</sup>- Alawaji

<sup>3</sup>- Mashhour

<sup>1</sup>- Li

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

که در آن، CP ظرفیت رمبندگی،  $\Delta e$  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 [۳۷].

پیش‌بینی رمبندگی و اندازه‌گیری ظرفیت رمبندگی می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلفی انجام شود که مهم‌ترین آن‌ها روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های صحرایی و استفاده از روابط تجربی بین رمبندگی و سایر مشخصات خاک است [۳۸ و ۳۹]. روابط تجربی زیادی برای پیش‌بینی رمبندگی و ظرفیت رمبندگی براساس مشخصات معمول خاک ارائه شده است [۴۰-۴۲]. اما بیشتر این روابط برای همان محلی که از خاک آن برای به‌دست آوردن رابطه استفاده شده است معتبر است [۱۱].

## ۲-۱- روش‌های آزمایشگاهی

ظرفیت رمبندگی در آزمایشگاه به روش‌های مختلفی قابل اندازه‌گیری است که مهم‌ترین آن‌ها آزمایش ادومتر و سه‌محوری است. عموماً نتایج آزمایش‌های ادومتر برای تحلیل‌های یک‌بعدی و آزمایش‌های سه‌محوری برای تحلیل‌های سه‌بعدی استفاده می‌گردند. لاوتن<sup>۶</sup>، نشان داد که اطلاعات اضافی که از آزمایش سه‌محوری به‌دست می‌آید نسبت به آزمایش ادومتر کم است، به همین دلیل آزمایش ادومتر متداول‌تر است [۴۳]. تا به امروز مطالعات زیادی برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی خاک‌های رمبند با استفاده از آزمایش ادومتر و سه‌محوری انجام شده است.

دو نوع آزمایش ادومتر برای تعیین ظرفیت رمبندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد: ادومتر تک<sup>۷</sup> و

شرایط زهکشی اطراف لایه خاک رمبند، براساس جنس لایه‌های خاک بالا و پایین، می‌تواند متفاوت باشد. زمانی که یک خاک با نفوذپذیری کم مانند رس متراکم در بالا یا پایین لایه خاک رمبند قرار می‌گیرد، اجازه خارج شدن آب از خاک رمبند را نمی‌دهد. اما زمانی که در اطراف لایه خاک رمبند، یک خاک با نفوذپذیری بالا مانند ماسه درشت‌دانه قرار می‌گیرد، به خوبی آب می‌تواند از لایه خاک رمبند عبور نماید. با این وجود، در مطالعاتی که تا به امروز بر روی خاک رمبند صورت گرفته است، تأثیر شرایط نفوذپذیری خاک اطراف لایه خاک رمبند در نظر گرفته نشده است.

در این مطالعه، شرایط زهکشی اطراف خاک رمبند در آزمایشگاه مدل‌سازی شده است و تأثیر این شرایط بر روی نشست و ظرفیت رمبندگی این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای این بررسی از یک خاک رمبند ساخته شده در آزمایشگاه و آزمایش‌های ادومتر تک و دوگانه و چهار آزمایش با قابلیت شبیه‌سازی شرایط زهکشی و نحوه توزیع آب استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی شرایط زهکشی با نتایج دستگاه ادومتر و نتایج دو حالت با زهکشی و بدون زهکشی مقایسه گردیده است.

## ۲- ارزیابی رمبندگی و ظرفیت رمبندگی

ظرفیت رمبندگی<sup>۴</sup> یک شاخص از میزان تغییر حجم کل یک خاک است که در اثر بارگذاری و خیس شدن از خود نشان می‌دهد. در نشست یک‌بعدی، ظرفیت رمبندگی با استفاده از تغییر ضخامت نمونه پس از خیس شدن و اعمال بار محاسبه می‌گردد. معادله (۱) یک تعریف مهندسی از ظرفیت رمبندگی با استفاده از تغییرات نسبت تخلخل<sup>۵</sup> را نشان می‌دهد:

<sup>6</sup> -Lawton  
<sup>7</sup> -Single-Oedometer

<sup>4</sup> -Collapse potential  
<sup>5</sup> - Void ratio

تعبیه شده در زیر نمونه خارج می شود. در این دستگاه، آب ورودی به سلول باید بیشتر از آب خروجی از پایین نمونه باشد. همچنین در این دستگاه اگر از آب مقطر استفاده شود، می توان با استفاده از تحلیل شیمیایی آب خارج شده از پایین نمونه، جنس اتصالات بین ذرات خاک رمینده را که توسط آب حل شده اند را مشخص کرد [۴۵].

پژوهشگران دیگر، از دستگاه ادمتر اصلاح شده جهت بررسی رفتار خاک های رمینده غیراشباع و کنترل و پایش مکش در نمونه های خاک استفاده نمودند [۴۶-۴۹]. در تحقیقات دیگری، از دستگاه سه محوری با قابلیت کنترل مکش در نمونه ها خاک رمینده استفاده شد که نسبت به آزمایش ادمتر، کنترل مکش قابلیت بررسی رفتار خاک رمینده غیراشباع تحت شرایط بارگذاری پیچیده را دارد [۵۰-۵۲].

ایادت<sup>۱۱</sup> و همکاران، از دستگاه مخروط سقوط<sup>۱۲</sup> که معمولاً برای اندازه گیری حد خمیری و حد روانی استفاده می شود، جهت اندازه گیری ظرفیت رمیندگی استفاده کردند. آنها مجموعه ای از آزمایش ها با استفاده از دو دستگاه مخروط سقوط و ادمتر طراحی کردند و با استفاده از نتایج یک درون یابی بین ظرفیت رمیندگی و میزان نفوذ مخروط<sup>۱۳</sup> (P) را انجام دادند [۵۳].

## ۲-۲- روش های صحرائی

معمولاً ارزیابی رمیندگی در محل با استفاده از دیگر آزمایش های صحرائی مانند آزمایش نفوذ استاندارد، برش پره، آزمایش نفوذ مخروط، بارگذاری صفحه، دیلاتومتری و آزمایش های ژئوفیزیک انجام می گردد [۵۴ و ۵۵]. محققان نوعی آزمایش رمیندگی درجا را با استفاده از باکس های خاک قرار گرفته بر روی یک سطح بتنی پیشنهاد دادند. باکس های خاک بر روی پی ساخته شده

ادومتر دوگانه<sup>۸</sup>. آزمایش ادمتر تک، براساس روش خیس کردن بعد از بارگذاری انجام می گیرد، تنش سربار به صورت تدریجی اعمال می گردد و زمانی که کرنش ثابت شد نمونه تحت تنش اعمال شده غرقاب می گردد [۴۴].

قاعده آزمایش ادمتر دوگانه بر این اساس است که تغییر شکل های به وجود آمده در اثر خیس شدن مستقل از مسیر بارگذاری- خیس شدن خواهد بود. این آزمایش با استفاده از دو نمونه یکسان انجام می گردد، یکی به روش آزمایش ادمتر معمول در درصد رطوبت طبیعی انجام می گردد و نمونه دیگر پس از غرقاب شدن، بارگذاری می گردد [۴۳].

آیین نامه ASTM D5333 روش اندازه گیری ظرفیت رمیندگی خاک ها را با استفاده از آزمایش ادمتر تک تشریح می کند. این استاندارد شاخص رمیندگی<sup>۹</sup> (Ie) را معرفی می کند که میزان کرنش اندازه گیری شده در اثر خیس شدن در تنش اعمالی مرجع ۲۰۰ کیلو پاسکال را نشان می دهد. براساس مقادیر شاخص رمیندگی، درجه رمیندگی نمونه می تواند مطابق جدول ۱ طبقه بندی گردد [۴۴].

جدول ۱- طبقه بندی شاخص رمیندگی [۴۴]

شاخص رمیندگی	درجه رمیندگی
صفر	ندارد
۰/۱-۲	اندک
۱/۱-۶	متوسط
۱/۱-۱۰	تا حدی شدید
>۱۰	شدید

المودی<sup>۱۰</sup> و همکاران، دستگاه ادمتر تک را جهت ثابت نگه داشتن حد آب و شبیه سازی جریان آب از بالای لایه خاک رمینده به پایین آن اصلاح کردند. آن ها یک شیر ورودی و یک شیر خروجی تعبیه کردند تا با استفاده از آن بتوانند حد آب را ثابت نگه دارند. مطابق با شکل ۱ آب از بالا وارد نمونه می شود و سپس توسط دو سوراخ

<sup>11</sup> -Ayadat

<sup>12</sup> -Fall cone

<sup>13</sup> -Cone penetration

<sup>8</sup> -Double-Oedometer

<sup>9</sup> -Collapse Index

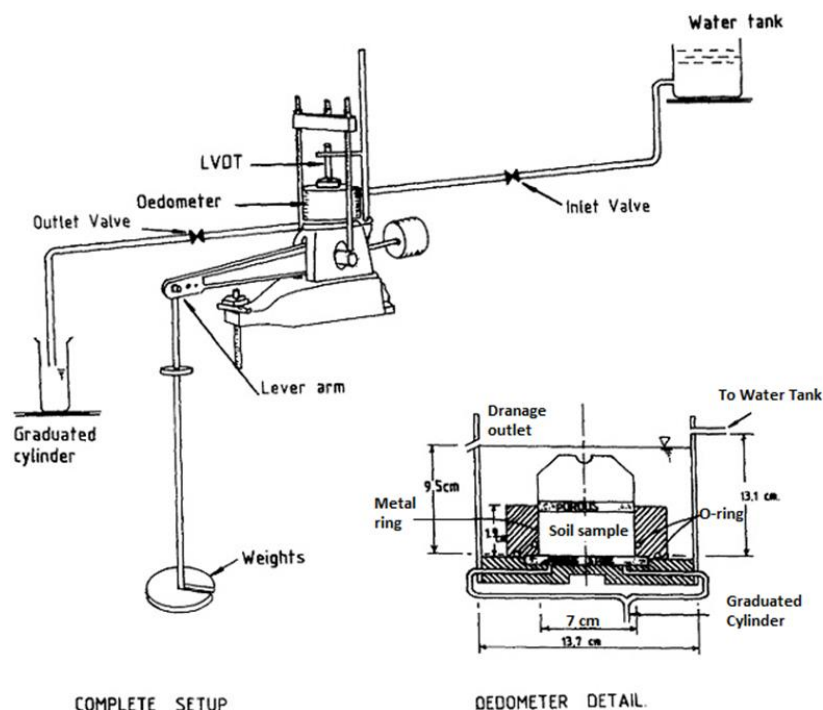
<sup>10</sup> -Al-Amoudi

مدل سازی مناسبی از شرایط مختلف لایه خاک رمبنده در طبیعت باشد. با توجه به محدودیت آزمایش‌های موجود، دستگاهی با قابلیت شبیه سازی شرایط زهکشی مختلف ساخته شد. مطابق با شکل ۲، مهمترین اجزای این دستگاه شامل سامانه بارگذاری، سلول نمونه، سامانه اندازه گیری و ثبت جابه جایی و قطعات شبیه سازی شرایط زهکشی می باشند.

جهت تأمین فشار اعمالی مورد نظر قرار می گیرند و بعد از آنکه فشار مورد نظر اعمال می گردد، آب جهت افزایش رطوبت خاک زیر پی، به گودال حفاری شده در اطراف پی بتنی اضافه می گردد و نشست بعد از اشباع شدن خاک رمبنده، اندازه گیری می شود [۵۶].

### ۳- مدل سازی آزمایشگاهی شرایط زهکشی

در آزمایش‌های موجود آب از بالا و پایین نمونه می تواند وارد و خارج شود، که این شرایط نمی تواند



شکل ۱- دستگاه ادمتر اصلاح شده [۴۵]

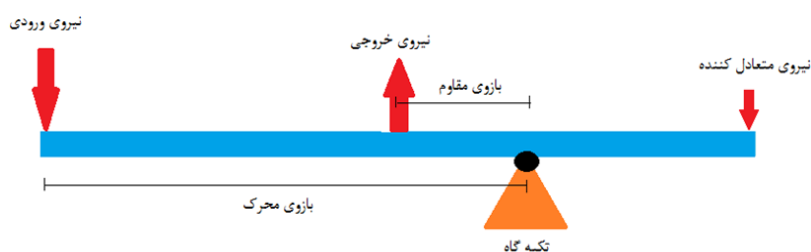


۱- نیروی ورودی ۲- نیروی خروجی ۳- نیروی متعادل کننده ۴- بازوی محرک ۵- بازوی مقاوم ۶- تکیه گاه ۷- تکیه گاه موقت

شکل ۲- دستگاه ادمتر بزرگ مقیاس با قابلیت مدل سازی شرایط زهکشی

## ۳-۱- سامانه بارگذاری

مطابق با شکل ۴، در محل نیروی خارجی یک صفحه فلزی جوش داده شده است تا بتواند نیرو را به وسیله دو پیچ عمودی به نمونه انتقال دهد. با استفاده از این دو پیچ می‌توان محل اعمال نیرو را به صورت عمودی جابه‌جا نمود. انتهای پیچ‌ها به یک صفحه دیگر به موازات صفحه بالا متصل می‌شود. در وسط صفحه پایین، یک پیچ دیگر تعبیه شده است که این پیچ نیز به صورت عمودی تنظیم و جابه‌جا می‌شود و نیرو را به صفحه بارگذاری قرار گرفته بر روی نمونه انتقال می‌دهد. این پیچ و صفحه بارگذاری به صورت نر و مادگی داخل هم قرار می‌گیرند تا نسبت به هم هیچگونه جابه‌جایی نداشته باشند.



شکل ۳- سامانه اهرمی برای بارگذاری

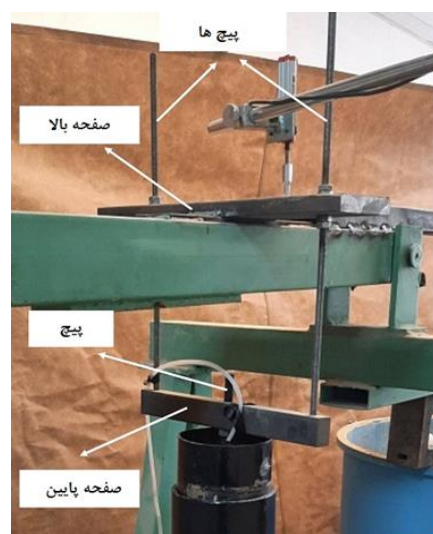
## ۳-۲- سلول نمونه

برای بررسی شرایط زهکشی از نمونه‌های با قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده گردید. این نمونه‌ها داخل یک سلول فلزی با قطر داخلی ۱۴ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر قرار می‌گیرند. برای اطمینان از صلبیت و ثابت بودن سطح مقطع در طول انجام آزمایش، سلول استفاده شده مورد بارگذاری قرار گرفت و تغییرات قطر سلول توسط یک جابه‌جایی‌سنج (LVDT<sup>۱۴</sup>) اندازه‌گیری شد. مقدار تغییر قطر سلول بسیار ناچیز و نزدیک به صفر بود، به طوری که تغییر حجم به وجود آمده در نمونه‌ها فقط ناشی از تغییر ارتفاع نمونه‌ها بوده و در طی بارگذاری سطح مقطع نمونه‌ها ثابت است.

## ۳-۳- سامانه اندازه‌گیری و ثبت جابه‌جایی‌ها

در این دستگاه برای بارگذاری نمونه و اعمال تنش‌های مورد نظر بر روی سطح نمونه از یک سامانه بارگذاری اهرمی استفاده گردید. نیروی خروجی در نقطه‌ای قرار گرفته است که نیروی ورودی را  $4/5$  برابر می‌کند. در سمت چپ بازوی اهرم یک محفظه قرار داده شده تا وزنه‌های نیروی ورودی روی آن قرار گیرند و در سمت راست آن یک وزنه تعادلی قرار داده می‌شود تا قبل از شروع بارگذاری، بازوی اهرم به صورت کاملاً افقی قرار گیرد. بازوی اهرم به وسیله لولا به یک تکیه‌گاه کاملاً صلب متصل می‌گردد (شکل ۳).

مطابق با شکل ۲، بین نیروی ورودی و خروجی یک تکیه‌گاه موقت تعبیه شده است که قبل از بارگذاری و در مراحل افزایش بار زیر بازوی اهرم قرار می‌گیرد و پس از افزایش نیروی ورودی به آهستگی با استفاده از دو پیچ متحرک از زیر بازوی اهرم خارج می‌شود تا بار به صورت استاتیکی به نمونه وارد شود.



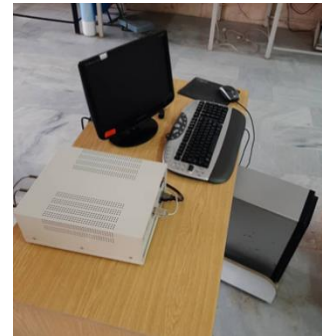
شکل ۴- نحوه انتقال نیرو به صفحه بارگذاری

14- Linear Variable Differential Transformer

مطابق با شکل ۶، در حالت (الف) آب از یک نقطه وارد خاک رَمبند می‌گردد و به دلیل نفوذپذیر بودن خاک لایه پایین، از طرف دیگر خارج می‌شود. در حالت (ب)، آب از یک نقطه وارد می‌شود ولی به دلیل نفوذناپذیر بودن خاک لایه پایین، آب نمی‌تواند از پایین خاک رَمبند خارج گردد. در حالت (ج)، آب به صورت گسترده از بالا وارد خاک رَمبند می‌گردد و به دلیل نفوذپذیر بودن خاک لایه پایین، از طرف دیگر خارج می‌شود. در حالت (د)، آب به صورت گسترده وارد می‌شود، ولی به دلیل نفوذناپذیر بودن خاک لایه پایین، آب نمی‌تواند از پایین خاک رَمبند خارج گردد.

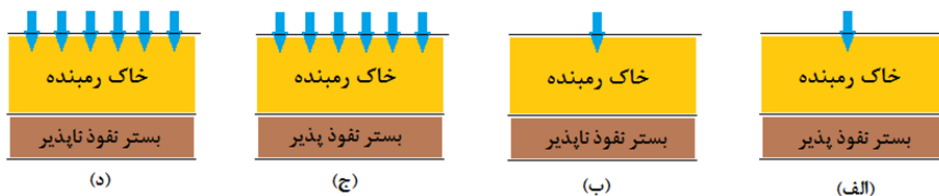


(ب)



(الف)

شکل ۵- (الف) داده‌خوان و رایانه و (ب) جابه‌جایی سنج (LVDT)



(د)

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۶- حالت‌های مختلف نفوذ آب و شرایط زهکشی

قطعه پیش‌ساخته، انتقال آب به نقطه مرکز بالای نمونه است. مطابق با شکل ۷، آب از بالا وارد این قطعه می‌شود و از طریق چهار سوراخ تعبیه شده بر روی صفحه میانی، آب به پایین این قطعه منتقل می‌شود و از طریق سوراخ ایجاد شده در مرکز صفحه دایره‌ای شکل زیر قطعه، وارد نمونه خاک می‌شود. برای اینکه حد آب ثابت باشد به فاصله ۷ سانتی‌متر از کف استوانه، یک سوراخ ایجاد شده تا آب اضافی از داخل استوانه خارج شود.

برای اندازه‌گیری نشست‌های ناشی از بارگذاری و اشباع کردن، مطابق با شکل ۵ از یک جابه‌جایی سنج (LVDT)، داده‌خوان و رایانه استفاده شد. جابه‌جایی سنج در نقطه اعمال بار خروجی قرار می‌گیرد و با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر مقدار نشست‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر اندازه‌گیری شده در حافظه رایانه ذخیره می‌گردند.

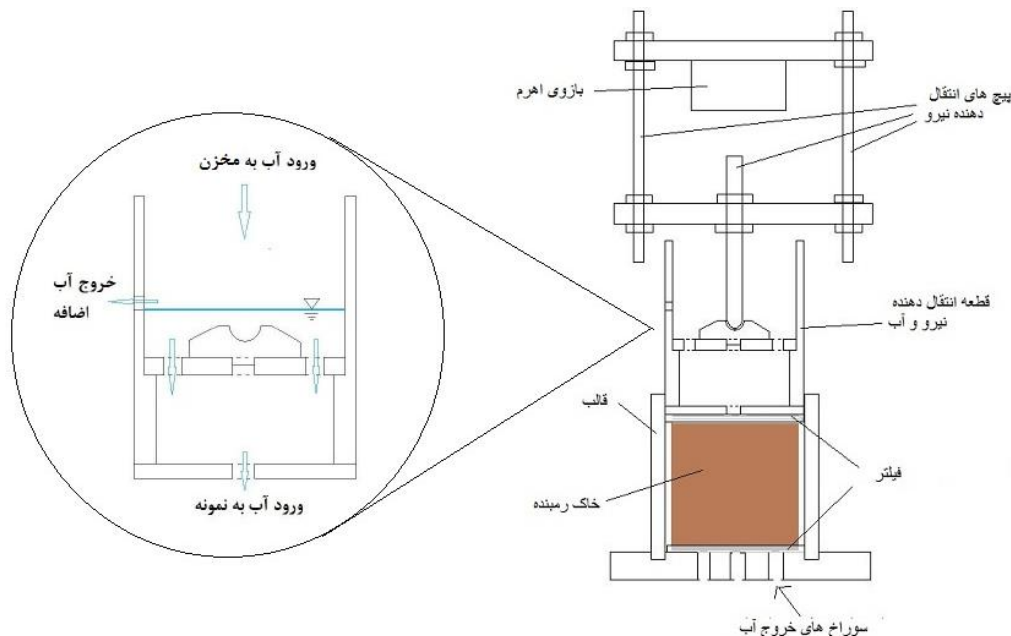
### ۳-۴- مدل‌سازی شرایط زهکشی

براساس نحوه ورود آب از بالا به خاک و شرایط زهکشی پایین لایه خاک رَمبند، چهار حالت مختلف برای بررسی تأثیر شرایط زهکشی در نظر گرفته شد.

دستگاه ساخته شده قابلیت شبیه‌سازی هر چهار حالت را دارد. براساس شکل ۷، برای مدل‌سازی حالت (الف)، ابتدا نمونه براساس دست‌خورده یا دست‌نخورده بودن داخل سلول قرار می‌گیرد و پس از آن یک قطعه پیش‌ساخته روی سطح خاک قرار می‌گیرد که این قطعه به‌گونه‌ای است که هم بار را بر روی سطح خاک انتقال می‌دهد و هم اجازه می‌دهد که آب از یک نقطه وارد خاک شود. این قطعه استوانه‌ای بار را از سامانه بارگذاری دریافت می‌کند و به نمونه انتقال می‌دهد. هدف دوم این



سلول و نمونه تغییر می‌کند و از یک صفحه بدون سوراخ استفاده می‌گردد تا آب از پایین نمونه خارج نشود. بدین ترتیب می‌توان با تغییر صفحه بالا و پایین نمونه، چهار حالت مختلف را مدل‌سازی کرد.



شکل ۷- نحوه مدل‌سازی شرایط زهکشی و توزیع آب

تهیه گردید که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۲ آمده است.

روش بارشی به دلیل ایجاد نمونه‌های همگن و مشابه با رسوبات طبیعی نسبت به روش‌های دیگر ساخت نمونه مناسب‌تر است [۵۷]. 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، نمونه ترکیب شده با استفاده از یک قیف از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به صورت بارشی داخل قالب ریخته می‌شود. با استفاده از نسبت‌های وزنی مختلف رس به ماسه و وزن مخصوص‌های متفاوت (انرژی تراکم متفاوت) می‌توان نمونه‌های با ظرفیت رمیندگی مختلف ساخت. در این مطالعه از نسبت رس به ماسه ۱۰ درصد استفاده گردید و یک خاک رمینده ساخته شد. مشخصات ژئوتکنیکی آن در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد که جدول ۳ این نتایج را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی توزیع گسترده، صفحه دایره‌ای شکل قرار گرفته زیر قطعه پیش‌ساخته تعویض می‌گردد و بجای صفحه با یک سوراخ، از صفحه‌ای با پنج سوراخ استفاده می‌گردد. برای مدل‌سازی حالت بدون زهکشی صفحه زیر

#### ۴- مطالعات آزمایشگاهی

یک نمونه خاک رمینده در آزمایشگاه ساخته شده و ظرفیت رمیندگی آن با استفاده از آزمایش‌های ادمومتر تک و دوگانه اندازه‌گیری شد. بعد از آن نمونه در دستگاه ساخته شده قرار گرفت و ظرفیت رمیندگی براساس شرایط مختلف زهکشی اندازه‌گیری گردید.

##### ۴-۱- آماده‌سازی نمونه

در مطالعات آزمایشگاهی از یک نمونه خاک رمینده ساخته شده در آزمایشگاه استفاده گردید. مطابق با مطالعات محققان می‌توان با ترکیب ماسه ریزدانه و رس کائولین و اضافه کردن مقداری رطوبت، یک خاک رمینده ساخت (شکل ۸) [۳۵]. ماسه نقش ذرات اصلی و رس نقش ایجاد اتصالات بین ذرات ماسه را دارد. کائولین استفاده شده از شرکت صنایع خاک چینی الماس اردکان



شکل ۸- نحوه ساخت خاک رمبنده در آزمایشگاه

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی کائولین استفاده شده

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
۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۴۹	۱۸/۸۴	۷۲/۳۹	مقدار (/.)
ترکیبات دیگر	S	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ترکیب شیمیایی
۷/۱۷	۰/۰۲	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲۶	مقدار (/.)

جدول ۳- مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

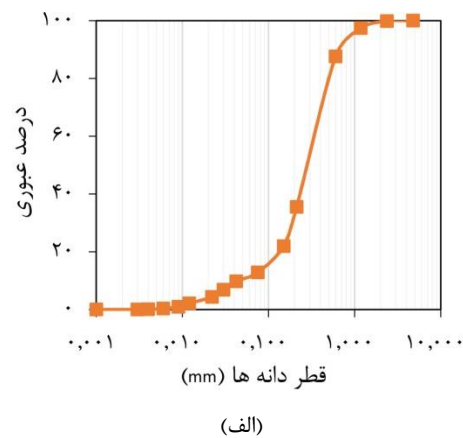
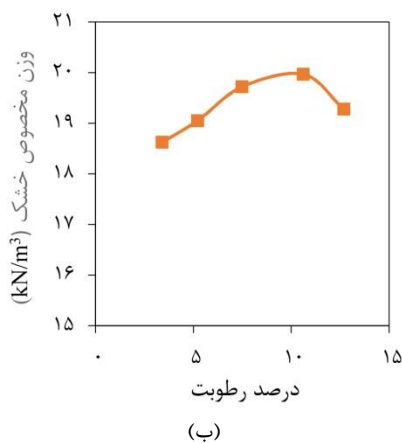
Cc	Cu	Gs	$\omega_{opt}$ (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	(%) $\omega$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	نوع خاک
۲/۳۸	۸/۵	۲/۷۰	۱۰/۳	۲۰	۵	۱۳	SW-SC

دستگاه اودومتر قرار گرفت و با درصد رطوبت طبیعی با سربارهای ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بارگذاری گردید. در هر مرحله از بارگذاری، نشست‌ها تا یک ساعت بعد از افزایش سربار، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها از یک گیج با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر استفاده گردید. پس از رسیدن به سربار ۲۰۰ کیلوپاسکال و گذشت زمان یک ساعت، نمونه اشباع شده و میزان نشست تا ۲۴ ساعت بعد از شروع فرآیند اشباع‌کردن، اندازه‌گیری گردید.

همچنین نمودارهای دانه‌بندی و نتایج آزمایش تراکم استاندارد (ASTM D698) این نمونه خاک در شکل ۹ ارائه شده است. نمونه استفاده شده و نحوه آماده‌سازی آن در تمام آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۲- آزمایش اودومتر تک

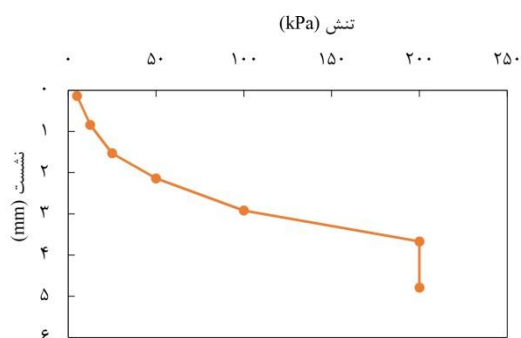
برای انجام این آزمایش از نمونه با قطر ۷/۵ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده گردید. مطابق با استاندارد ASTM D5333 نمونه پس از آماده‌سازی در داخل



شکل ۹- (الف) منحنی دانه‌بندی خاک رمبنده استفاده شده و (ب) منحنی تراکم استاندارد نمونه ساخته شده

## ۳-۴- آزمایش ادمتر دوگانه

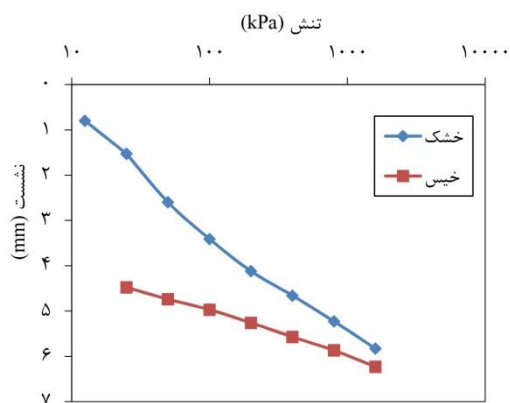
اشباع شدن  $3/671$  میلی‌متر و میزان نشست پس از گذشت ۲۴ ساعت از شروع فرآیند اشباع کردن،  $4/792$  میلی‌متر ثبت شد. با توجه به ضخامت اولیه ۲ سانتیمتری نمونه و استفاده از معادله (۱)، ظرفیت ریبندگی،  $5/64$  محاسبه گردید.



شکل ۱۰- نتایج آزمایش ادمتر نمونه استفاده شده

## ۵-۲- آزمایش ادمتر دوگانه

پس از انجام آزمایش ادمتر دوگانه، نتایج به صورت نمودار تنش- نشست برای دو حالت خشک (رطوبت طبیعی) و خیس، مطابق شکل ۱۱ ترسیم گردید. مطابق با مبانی نظری آزمایش ادمتر دوگانه، می‌توان میزان ظرفیت ریبندگی در هر سطح تنشی را با محاسبه اختلاف نشست بین دو حالت خشک (رطوبت طبیعی) و خیس در همان تنش، محاسبه کرد. در آزمایش با درصد رطوبت طبیعی میزان نشست در تنش  $200$  کیلوپاسکال  $4/122$  میلی‌متر و در آزمایش نمونه اشباع شده، این نشست  $5/263$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. براساس اختلاف نشست در دو حالت خشک و خیس و ارتفاع اولیه نمونه، میزان ظرفیت ریبندگی  $5/70$  محاسبه گردید.



شکل ۱۱- نتایج آزمایش ادمتر دوگانه

مطابق با مطالعه هوایک<sup>۱۵</sup> و همکاران، در این آزمایش از دو دستگاه ادمتر با استفاده گردید [۵۸]. در این آزمایش نیز از نمونه با قطر  $7/5$  و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده شد. در دستگاه اول، نمونه با درصد رطوبت طبیعی از  $12/5$  تا  $1600$  کیلوپاسکال به طوری که در هر مرحله میزان سربار دو برابر شود، بارگذاری گردید (حالت خشک). در دستگاه دوم، نمونه تا سربار  $25$  کیلوپاسکال با درصد رطوبت طبیعی بارگذاری شد و بعد از آن نمونه اشباع گردید. پس از اشباع شدن نمونه و ثابت شدن میزان جابه‌جایی، بارگذاری مانند دستگاه اول تا سربار  $1600$  کیلوپاسکال ادامه یافت (حالت خیس). در هر دو دستگاه میزان نشست تا یک ساعت بعد از هر مرحله از بارگذاری ثبت گردید.

## ۴-۴- آزمایش با شبیه‌سازی شرایط زهکشی

برای انجام این آزمایش از نمونه با قطر  $14$  و ارتفاع  $10$  سانتی‌متر استفاده گردید. نمونه با رطوبت  $5$  درصد از  $12/5$  تا  $200$  کیلوپاسکال بارگذاری شد. پس از ثابت شدن میزان جابه‌جایی‌ها، آب از بالا متناسب با نوع توزیع وارد نمونه شد. پس از آن در آزمایش‌های با زهکشی، آب از کف نمونه خارج گردید و در آزمایش‌های بدون زهکشی، از خارج شدن آب جلوگیری شد. در هر مرحله از بارگذاری و پس از شروع فرآیند اشباع کردن نمونه تا ۲۴ ساعت پس از آن، میزان نشست‌ها با استفاده از یک گیج با دقت  $0/01$  میلی‌متر ثبت گردید.

## ۵- نتایج

## ۵-۱- آزمایش ادمتر تک

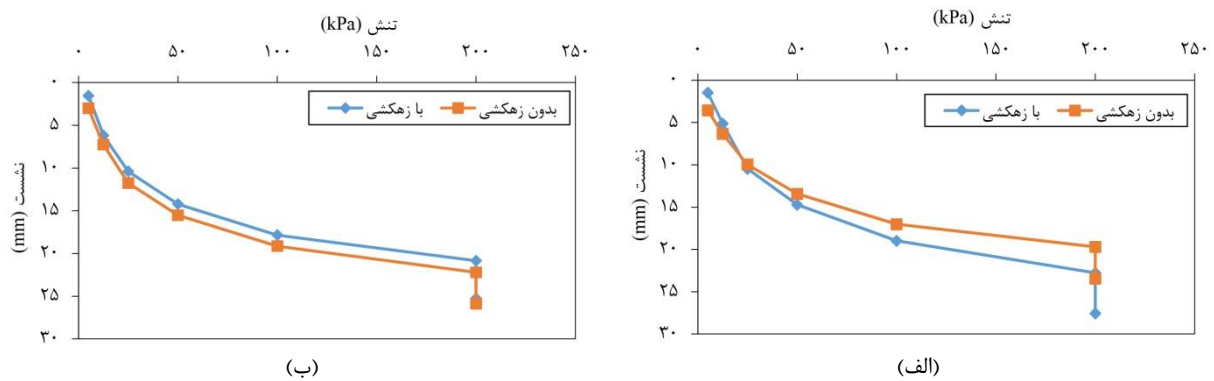
شکل ۱۰، نمودار جابه‌جایی در مقابل تنش مربوط به این آزمایش را نشان می‌دهد. میزان نشست قبل از

<sup>15</sup> - Howayek

۳-۵- آزمایش با شبیه‌سازی شرایط زهکشی

در دستگاه ساخته‌شده میزان نشست در زمان‌های مختلف ثبت می‌گردد. با این نتایج می‌توان سرعت نشست‌ها را بررسی نمود. در شکل‌های ۱۳-الف و ۱۳-ب به ترتیب نمودارهای نشست- زمان شرایط مختلف زهکشی در توزیع نقطه‌ای و گسترده آب، برای پس از پایان بارگذاری و شروع فرآیند اشباع کردن تا ۲۴ ساعت پس از ورود آب به نمونه مشاهده می‌گردد.

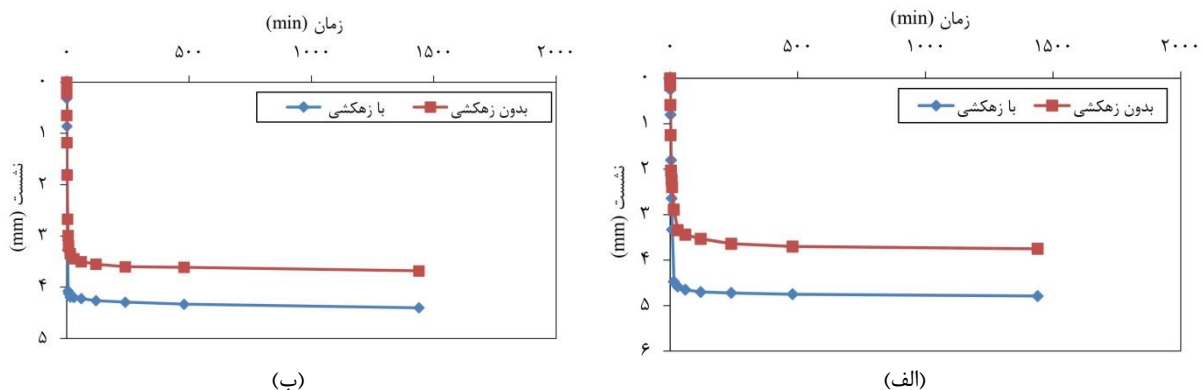
شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب به ترتیب نمودارهای تنش- نشست دو حالت با زهکشی و بدون زهکشی را برای توزیع آب نقطه‌ای و گسترده نشان می‌دهند. در جدول ۴، براساس مقدار نشست قبل از اشباع شدن و ۲۴ ساعت بعد از اشباع شدن، میزان ظرفیت رمبندگی برای هر آزمایش، محاسبه گردیده است.



شکل ۱۲- مقایسه نمودارهای تنش- نشست شرایط مختلف زهکشی با (الف) توزیع آب نقطه‌ای و (ب) توزیع آب گسترده

جدول ۴- محاسبه ظرفیت رمبندگی

ظرفیت رمبندگی	ضخامت نمونه (mm)	نشست ۲۴ ساعت بعد از اشباع شدن (mm)	نشست قبل از اشباع شدن (mm)	شرایط زهکشی	توزیع آب
۴/۷۹	۱۰۰	۲۷/۵۷	۲۲/۷۸	با زهکشی	نقطه‌ای
۳/۷۵	۱۰۰	۲۴/۴۵	۱۹/۷	بدون زهکشی	
۴/۴	۱۰۰	۲۵/۲۶	۲۰/۸۵	با زهکشی	گسترده
۳/۶۸	۱۰۰	۲۵/۹	۲۲/۲۲	بدون زهکشی	



شکل ۱۳- مقایسه نمودارهای نشست- زمان بعد از شروع فرآیند اشباع کردن تا ۲۴ ساعت بعد از آن برای شرایط مختلف زهکشی با (الف) توزیع آب نقطه‌ای و (ب) توزیع آب گسترده

برای مقایسه عملکرد دستگاه‌ها و آزمایش‌های مختلف، میزان ظرفیت رمبندگی به‌دست آمده از

۶- بحث

یک طرف وارد خاک می‌شود و نمونه را اشباع می‌کند و از طرف دیگر خارج می‌شود، میزان نشست به وجود آمده کمتر از آزمایش ادمتر است که در آن آب به طور همزمان از دو طرف وارد نمونه می‌شود [۲۸]. در مطالعه محمودی و همکاران، شرایط با زهکشی در نظر گرفته شده بود، اما نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در حالت بدون زهکشی نیز، وقتی آب از یک طرف وارد نمونه می‌شود و از طرف دیگر خارج نمی‌شود، میزان نشست کمتری نسبت به آزمایش ادمتر ایجاد می‌گردد و این نتیجه برای هر دو روش توزیع آب نقطه‌ای و گسترده قابل مشاهده است که ظرفیت رمبندگی در توزیع نقطه‌ای ۳۳/۵ درصد و در توزیع گسترده ۳۴/۷ درصد کمتر از آزمایش ادمتر است.

آزمایش‌های مختلف با هم مقایسه می‌گردد. آزمایش ادمتر تک، متداول‌ترین روش تعیین ظرفیت رمبندگی است، به همین دلیل نتایج مربوط به این آزمایش به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و نتایج سایر آزمایش‌ها با آن مقایسه می‌شود. در جدول ۵، میزان ظرفیت رمبندگی به دست آمده از هر آزمایش و اختلاف آن با ظرفیت رمبندگی آزمایش ادمتر تک آمده است.

بر اساس نتایج به دست آمده ظرفیت رمبندگی در دو آزمایش ادمتر تک و دوگانه به ترتیب ۵/۶۴ و ۵/۷۰ بودند که اختلاف ناچیزی است. علت این نزدیکی نتایج را می‌توان در نحوه اشباع کردن و شرایط زهکشی یکسان هر دو دانست. در هر چهار آزمایش دیگر، میزان ظرفیت رمبندگی کمتر از ظرفیت رمبندگی آزمایش ادمتر است. مطابق با مطالعه محمودی و همکاران، زمانی که آب از

جدول ۵- مقایسه ظرفیت رمبندگی آزمایش‌های مختلف

توزیع آب گسترده		توزیع آب نقطه‌ای				ادومتر دوگانه		ادومتر تک		
بدون زهکشی		با زهکشی		بدون زهکشی		با زهکشی				
اختلاف ظرفیت با ادمتر تک (%)	ظرفیت رمبندگی	اختلاف با ادمتر تک (%)	ظرفیت رمبندگی	اختلاف با ادمتر تک (%)	ظرفیت رمبندگی	اختلاف با ادمتر تک (%)	ظرفیت رمبندگی	ظرفیت رمبندگی		
-۳۴/۷	۳/۶۸	-۲۱/۹	۴/۴۰	-۳۳/۵	۳/۷۵	-۱۵	۴/۷۹	۱	۵/۷۰	۵/۶۴

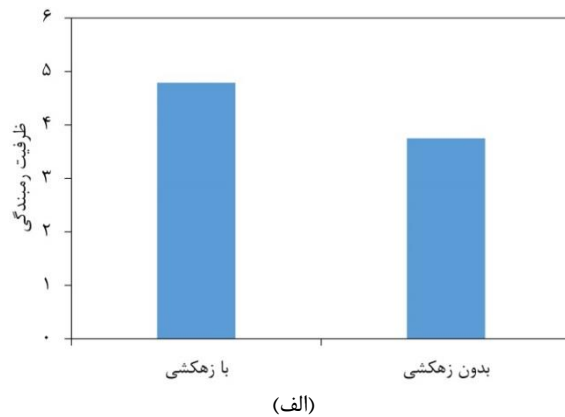
درصد بیشتر از توزیع گسترده و در شرایط بدون زهکشی ظرفیت رمبندگی توزیع نقطه‌ای حدود ۲ درصد بیشتر از توزیع گسترده است.

شکل‌های ۱۴- الف و ۱۴- ب به ترتیب مقایسه ظرفیت رمبندگی شرایط مختلف زهکشی در توزیع نقطه‌ای و گسترده آب را نشان می‌دهند. در هر دو توزیع نقطه‌ای و گسترده آب، میزان ظرفیت رمبندگی در حالت با زهکشی بیشتر از حالت بدون زهکشی است. در توزیع نقطه‌ای ظرفیت رمبندگی در حالت با زهکشی ۲۷/۷ درصد بیشتر از حالت بدون زهکشی است و در توزیع گسترده این اختلاف ۱۹/۵ درصد است. بنابراین زمانی که آب از یک نقطه وارد خاک رمبند می‌گردد، تأثیر شرایط

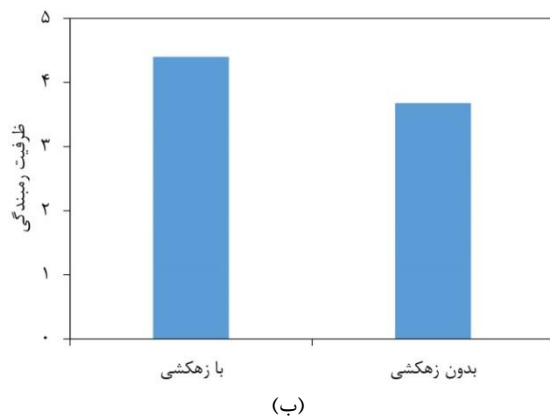
بیشترین اختلاف مربوط به زمانی است که آب به صورت گسترده وارد نمونه می‌شود و شرایط کف نمونه بدون زهکشی است که در این حالت میزان ظرفیت رمبندگی ۳۴/۷ درصد نسبت به آزمایش ادمتر کمتر است و کمترین اختلاف مربوط به آزمایش با توزیع آب نقطه‌ای و شرایط با زهکشی است که ظرفیت رمبندگی به دست آمده از این آزمایش ۱۵ درصد کمتر از آزمایش ادمتر است.

مقایسه نحوه توزیع آب نشان می‌دهد که در هر دو شرایط زهکشی، میزان ظرفیت رمبندگی در توزیع نقطه‌ای بیشتر از توزیع گسترده است. در شرایط با زهکشی میزان ظرفیت رمبندگی توزیع نقطه‌ای ۸/۸

زهکشی بیشتر است نسبت به زمانی که آب به صورت



گسترده وارد نمونه می‌گردد.



شکل ۱۴- مقایسه ظرفیت رمبندگی در شرایط مختلف زهکشی با (الف) توزیع آب نقطه ای و (ب) توزیع آب گسترده

محاسبه و مقایسه گردید. نتایج به دست آمده از این مطالعه در ادامه آورده شده است:

۱- علاوه بر نحوه ورود آب به خاک رمبند، شرایط زهکشی عامل مهم تأثیرگذار بر روی رفتار و نشست خاک رمبند در زمان اشباع شدن است.

۲- میزان ظرفیت رمبندگی به دست آمده از دستگاه با قابلیت مدل‌سازی شرایط زهکشی در هر دو حالت با زهکشی و بدون زهکشی کمتر از ظرفیت رمبندگی آزمایش ادومتر است.

۳- ظرفیت رمبندگی در حالت بدون زهکشی و زمانی که آب به صورت گسترده وارد خاک رمبند می‌گردد، بیشترین اختلاف را با ظرفیت رمبندگی آزمایش ادومتر دارد که میزان اختلاف آن‌ها ۳۴/۷ درصد است.

۴- به طور میانگین در زمانی که کف نمونه بدون زهکشی است و اجازه خروج آب داده نمی‌شود، میزان ظرفیت رمبندگی حدود ۳۴ درصد کمتر از ظرفیت رمبندگی آزمایش ادومتر است.

۵- در هر دو توزیع آب نقطه‌ای و گسترده، میزان ظرفیت رمبندگی در حالت با زهکشی بیشتر از حالت بدون زهکشی است. در توزیع نقطه‌ای ظرفیت رمبندگی در حالت با زهکشی ۲۷/۷

این مطالعه نشان می‌دهد که علاوه بر نحوه نفوذ آب به خاک، شرایط زهکشی نیز در خاک رمبند بر روی ظرفیت رمبندگی تأثیر می‌گذارد و نتایج به دست آمده از دستگاه‌های بدون قابلیت مدل‌سازی شرایط زهکشی برای تعیین ظرفیت رمبندگی همراه با خطا است. بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر ظرفیت رمبندگی خاک محل یک پروژه، باید جنس و میزان نفوذپذیری لایه‌های اطراف خاک رمبند تعیین گردد و سپس براساس آن میزان ظرفیت رمبندگی متناسب با شرایط زهکشی در آزمایشگاه تعیین گردد.

ذکر این نکته قابل اهمیت است که نتایج به دست آمده برای نمونه خاک استفاده شده با مشخصات ذکر شده است و از آنجا که میزان ظرفیت رمبندگی وابسته به عوامل مختلف است، این نتایج قابل تعمیم به تمام خاک‌های رمبند نیست. هدف اصلی ساخت این دستگاه همین است که بتوان برای هر خاک رمبند با هر شرایطی میزان ظرفیت رمبندگی را پیش‌بینی نمود.

## ۷- نتیجه‌گیری

برای بررسی تأثیر شرایط زهکشی، یک دستگاه با قابلیت مدل‌سازی شرایط زهکشی در آزمایشگاه ساخته شد و میزان ظرفیت رمبندگی با استفاده از آزمایش‌های تعیین ظرفیت رمبندگی متداول و دستگاه ساخته شده

درصد بیشتر از حالت بدون زهکشی است و در توزیع گسترده این اختلاف ۱۹/۵ درصد است.

## References

- [1] Barden L, McGown A, Collins K. The collapse mechanism in partly saturated soil. *Engineering Geology*. 1973 Jun 1; 7(1): 49-60. doi: **10.1016/0013-7952(73)90006-9**
- [2] Lutenegeger AJ, Saber RT. Determination of collapse potential of soils. *Geotechnical Testing Journal*. 1988 Sep 1; 11(3): 173-178. doi: **10.1520/GTJ10003J**
- [3] Assadi Langroudi A. Micromechanics of collapse in loess. Doctoral dissertation. 2014. University of Birmingham.
- [4] Qian ZZ, Lu XL, Yang WZ, Cui Q. Behaviour of micropiles in collapsible loess under tension or compression load. *Geomechanics and Engineering*. 2014; 7(5): 477-493. doi: **10.12989/gae.2014.7.5.477**
- [5] Mansour ZM, Chik Z, Taha MR. On the procedures of soil collapse potential evaluation. *Journal of Applied Sciences*. 2008 Nov 15; 8(23): 4434-4439. doi: **10.3923/jas.2008.4434.4439**
- [6] Mahmood MS, Abraham MJ. A review of collapsible soils behavior and prediction. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021 Feb 1; 1094(1): 012044. doi: 10.1088/1757-899X/1094/1/012044
- [7] Qureshi MU, Mahmood Z, Farooq QU, Qureshi QB, Al-Handasi H, Chang I. Engineering characteristics of dune sand-fine marble waste mixtures. *Geomechanics and Engineering*. 2022; 28(6): 547-557. doi: **10.12989/gae.2022.28.6.547**
- [8] Clemence SP, Finbarr AO. Design considerations for collapsible soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981 Mar; 107(3): 305-317. doi: **10.1061/AJGEB6.0001102**
- [9] Osipov VI, Sokolov VN. Factors and mechanism of loess collapsibility. In *Genesis and properties of collapsible soils*. 1995; 468: 49-63. doi: **10.1007/978-94-011-0097-7\_4**
- [10] Milodowski AE, Northmore KJ, Kemp SJ, Entwisle DC, Gunn DA, Jackson PD, Boardman DI, Zoumpakis A, Rogers CD, Dixon N, Jefferson I. The mineralogy and fabric of 'Brickearths' in Kent, UK and their relationship to engineering behaviour. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015 Nov; 74: 1187-211. doi: **10.1007/s10064-014-0694-5**
- [11] Li P, Vanapalli S, Li T. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016 Apr 1; 8(2): 256-274. doi: **10.1016/j.jrmge.2015.12.002**
- [12] Klukanova A, Sajgalik J. Changes in loess fabric caused by collapse: an experimental study. *Quaternary International*. 1994 Jan 1; 24: 35-39. doi: **10.1016/1040-6182(94)90036-1**
- [13] Rogers CD, Dijkstra TA, Smalley IJ. Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe: in memory of Jan Sajgalik. *Engineering Geology*. 1994 Jun 1; 37(2): 83-113. doi: **10.1016/0013-7952(94)90045-0**
- [14] John B, Tim C, Hilary S. ICE manual of geotechnical engineering. In: Thomas Telford Ltd. 2012.
- [15] Zimbardo M, Ercoli L, Megna B. The open metastable structure of a collapsible sand: fabric and bonding. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016 Feb; 75: 125-139. doi: **10.1007/s10064-015-0752-7**
- [16] Bakir N, Abbeche K, Panczer G. Experimental study of the effect of the glass fibers on reducing collapse of a collapsible soil. *Geomechanics and Engineering*. 2017 Jan 1; 12(1): 71-83. doi: **10.12989/gae.2017.12.1.071**
- [17] Mitchell JK, Soga K. *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Wiley & Sons; 2005 May 25.
- [18] Nouaouria MS, Guenfoud M, Lafifi B. Engineering properties of loess in Algeria. *Engineering Geology*. 2008 Jun 9; 99(1-2): 85-90. doi: **10.1016/j.enggeo.2008.01.013**
- [19] Gaaver KE. Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils. *Alexandria Engineering Journal*. 2012 Sep 1; 51(3): 205-210. doi: **10.1016/j.aej.2012.05.002**
- [20] Yuan KZ, Ni WK, Lü XF, Wang HM. Effect of water distribution on shear strength of compacted loess. *Geomechanics and Engineering*. 2022 Jan 1; 31(5): 519-527. doi: **10.12989/gae.2022.31.5.519**
- [21] Wheeler SJ, Sharma RS, Buisson MS. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*. 2003 Feb; 53(1): 41-54. doi: **10.1680/geot.2003.53.1.41**
- [22] Pereira JH, Fredlund DG, Cardão Neto MP, Gitirana Jr GD. Hydraulic behavior of collapsible compacted gneiss soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2005 Oct; 131(10): 1264-1273. doi: **10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1264)**
- [23] Medero GM, Schnaid F, Gehling WY. Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009 Jun; 135(6): 840-843. doi: **10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:6(840)**

- [24] Rezaei M, Ajalloeian R, Ghafoori M. Geotechnical properties of problematic soils emphasis on collapsible cases. *International Journal of Geosciences*. 2012 Feb 28; 3(1): 105-110. doi: **10.4236/ijg.2012.31012**
- [25] Alassal MA, Hassan AM, Elmamlouk HH. Effect of Fines and Matric Suction on the Collapsibility of Sandy Soils. In: Pinto, P., Ou, CY., Shehata, H. (eds) *Innovative Solutions for Deep Foundations and Retaining Structures*. GeoMEast 2019. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham. 2020; 61-72. doi: **10.1007/978-3-030-34190-9\_6**
- [26] Mahmood MS, Akhtarpour A, Almahmodi R, Husain MM. Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 Feb 1; 737(1): 012080. doi: **10.1088/1757-899X/737/1/012080**
- [27] Guo Y, Ni W, Liu H. Effects of dry density and water content on compressibility and shear strength of loess. *Geomechanics and Engineering*. 2021; 24(5): 419-430. doi: **10.12989/gae.2021.24.5.419**
- [28] Mahmoudi J, Pourhosseini R. Large-scale Apparatus for Measurement of Collapse Potential of Soils with Simulating the Pattern of Water Infiltration Ability. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2023 Feb 20; 54(12): 4809-4826. doi: **10.22060/ceej.2022.21524.7755** [In Persian]
- [29] Houston SL, Houston WN, Zapata CE, Lawrence C. Geotechnical engineering practice for collapsible soils. *Unsaturated soil concepts and their application in geotechnical practice*. 2001: 333-55. doi: **10.1007/978-94-015-9775-3\_6**
- [30] Hosseini A, Haeri SM, Mahvelati S, Fathi A. Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019 Oct 1; 11(5): 1055-1065. doi: **10.1016/j.jrmge.2019.06.004**
- [31] Al-Obaidi QA, Karim HH, Al-Shamoosi AA. Collapsibility of gypseous soil under suction control. *InIOP conference series: materials science and engineering* 2020 Feb 1; 737(1): 012103. doi: 10.1088/1757-899X/737/1/012103
- [32] Alawaji HA. Leak induced settlement of buried pipelines in collapsible soil. *InPipelines 2008: Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of our Pipeline Infrastructure* 2008; 1-10. doi: **10.1061/40994(321)19**
- [33] Vandanapu R, Omer JR, Attom MF. Laboratory simulation of irrigation-induced settlement of collapsible desert soils under constant surcharge. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017 Dec; 35: 2827-2840. doi: **10.1007/s10706-017-0282-0**
- [34] Mashhour I, Hanna A. Drag load on end-bearing piles in collapsible soil due to inundation. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016; 53(12): 2030-2038. doi: **10.1139/cgj-2015-0548**
- [35] Hanna A, Soliman S. Experimental investigation of foundation on collapsible soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2017 Nov 1; 143(11): 04017085. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001750**
- [36] Yan CG, Wan Q, Xu Y, Xie Y, Yin P. Experimental study of barrier effect on moisture movement and mechanical behaviors of loess soil. *Engineering Geology*. 2018 Jun 5; 240: 1-9. doi: **10.1016/j.enggeo.2018.04.007**
- [37] Jennings J. A Guide to Construction on or With Materials Exhibiting Additional Settlement Due to Collapse of Grain Structure. *Soil Mech, Conference Africa*. 1975; 1: 99-105.
- [38] Mahmoudian H, Hashemi M, Ajalloeian R, Movahedi B. Investigating the effect of additives' size on the improvement of the tensile and compressive strengths and deformation characteristics of collapsible soils. *Environmental Earth Sciences*. 2020 Jul; 79(13): 328. doi: **10.1007/s12665-020-09085-1**
- [39] Opukumo AW, Davie CT, Glendinning S, Oborie E. A review of the identification methods and types of collapsible soils. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2022 Dec; 69(1): 1-21. doi: **10.1186/s44147-021-00064-2**
- [40] Ayadat T, Hanna A. Prediction of collapse behaviour in soil. *Revue européenne de génie civil*. 2007 May 1; 11(5): 603-619. doi: **10.1080/17747120.2007.9692947**
- [41] Zorlu K, Kasapoglu KE. Determination of geomechanical properties and collapse potential of a caliche by in situ and laboratory tests. *Environmental Geology*. 2009 Feb; 56: 1449-1459. doi: **10.1007/s00254-008-1239-7**
- [42] Noor ST, Hanna A, Mashhour I. Numerical modeling of piles in collapsible soil subjected to inundation. *International Journal of Geomechanics*. 2013 Oct 1; 13(5): 514-526. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000235**
- [43] Lawton EC, Fragaszy RJ, Hardcastle JH. Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1989 Sep; 115(9): 1252-1267. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:9(1252)**
- [44] ASTM D5333. Standard Test Methods for Measurement of Collapse Potential of Soils. In *ASTM D5333: Annual Book of ASTM Standards*. 2003.
- [45] Al-Amoudi OS, Abduljauwad SN. Compressibility and collapse characteristics of arid saline sabkha soils. *Engineering Geology*. 1995 Jun 1; 39(3-4): 185-202. doi: **10.1016/0013-7952(95)00016-9**



- [46] Matyas EL, Radhakrishna HS. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*. 1968 Dec; 18(4): 432-448. doi: **10.1680/geot.1968.18.4.432**
- [47] Barden L, Madedor AO, Sides GR. Volume change characteristics of unsaturated clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1969 Jan; 95(1): 33-51. doi: **10.1061/JSFEAQ.0001226**
- [48] Tadeballi R, Rahardjo H, Fredlund DG. Measurements of matric suction and volume changes during inundation of collapsible soil. *Geotechnical Testing Journal*. 1992 Jun 1; 15(2): 115-122. doi: **10.1520/GTJ10233J**
- [49] Haeri SM, Zamani A, Garakani AA. Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples. In *Unsaturated Soils: Research and Applications*. 2012; 1: 301-308. doi: **10.1007/978-3-642-31116-1\_41**
- [50] Maatouk A, Leroueil S, La Rochelle P. Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil. *Géotechnique*. 1995 Sep; 45(3): 465-477. doi: **10.1680/geot.1995.45.3.465**
- [51] Sun DA, Sheng DC, Cui HB, Sloan SW. A density-dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2007 Sep; 31(11): 1257-1279. doi: **10.1002/nag.579**
- [52] Haeri SM, Akbari Garakani A, Khosravi A, Meehan CL. Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device. *Geotechnical Testing Journal*. 2014 Mar 1; 37(2): 190-204. doi: **10.1520/GTJ20130034**
- [53] Ayadat T, Hanna A. Identification of collapsible soil using the fall cone apparatus. *Geotechnical Testing Journal*. 2007 Jul 1; 30(4): 312-323. doi: **10.1520/GTJ14193**
- [54] Evans RD, Jefferson I, Kevin JN, Jackson P. In-situ investigation of problematical soils. In *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference*. 2004; 1269-1279.
- [55] Watts K, Charles JA. *Building on fill: geotechnical aspects*. IHS BRE Press Bracknell, UK. 2015.
- [56] Mahmoud HH, Houston WN, Houston SL. Apparatus and procedure for an in situ collapse test. *Geotechnical Testing Journal*. 1995 Dec 1; 18(4): 431-440. doi: **10.1520/GTJ11018J**
- [57] Mohammadi SD, Ajalloeian R. Investigation of Desirability of Sand Pluviation Technique in order to Sample Making of Sandy Soils for Laboratory Models. *Modares Civil Engineering journal*. 2014 Jan 10; 13(5): 53-63. [In Persian]
- [58] El Howayek A, Huang PT, Bisnett R, Santagata MC. Identification and behavior of collapsible soils. *Purdue University. Joint Transportation Research Program*; 2011 Jan 1.