

**A. Ghalandarzadeh**

Associate Professor, School of  
Engineering, Tehran  
University

**e-mail:** aghaland@ut.ac.ir

**M. R. Abdi**

Associate Professor, Faculty of  
Civil Engineering, K.N. Toosi  
University of Technology

**e-mail:** abdi@kntu.ac.ir

**L. Shafiei Chafi\***

Faculty of Civil Engineering,  
K.N. Toosi University of  
Technology

**e-mail:** Lshafiei@mail.kntu.ac.ir

## **Construction of a New Hollow Cylinder Apparatus to Study the Tensile Behavior of Clay with Different Plasticity Indices**

*Soil tensile strength is important in different geotechnical structures such as earth dams, roads, airports, landfills, and retaining walls. There are several experiments to study the tensile behavior of soils with different advantages and disadvantages. One of the methods used to investigate soil tensile behavior is tensile hollow cylinder apparatus, which has seldom been used. In this research, a hollow cylindrical device to measure the tensile properties of soil was built and operated. This device can apply tensile stress evenly to the entire soil sample so that stress concentration does not occur at any point in the sample. After designing, manufacturing, and assembling the apparatus, validation tests were performed to ensure the device was operating well. The results of the repeatability tests show the accurate performance of the device. Also, in this study, the effect of plasticity index (PI) on the tensile behavior of kaolinite clay was investigated. Clayey soils with plasticity indices of 10 and 24% were selected. The results show that for clays with a similar mineral, the tensile strength increases and the tensile failure strain decreases with increasing the plasticity index.*

**Keywords:** Tensile hollow cylinder test, tensile strength, clay, plasticity index.

---

\* Corresponding author

Received 20 September 2021, Revised 24 October 2021, Accepted 29 October 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7389.1303

## ساخت دستگاه استوانه توخالی برای بررسی رفتار کششی خاک‌های رسی با نگاهی بر اثر شاخص خمیری

مقاومت کششی خاک در سازه‌های مختلف ژئوتکنیکی از جمله سدهای خاکی، بستر راه‌ها، بستر فرودگاه‌ها، مکان‌های دفن زباله و خاکریز پشت دیوارهای حائل دارای اهمیت است. برای بررسی رفتار کششی خاک‌ها آزمایش‌های مختلفی وجود دارد که هر کدام نقاط قوت و ضعف خود را دارند. یکی از روش‌هایی که می‌توان مقاومت کششی خاک را به صورت مستقیم و مشابه با شرایط واقعی خاک به دست آورد، دستگاه استوانه توخالی کششی است که به ندرت در زمینه بررسی مقاومت کششی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق یک دستگاه استوانه توخالی با قابلیت اندازه‌گیری خصوصیات کششی خاک طراحی، ساخت و راه‌اندازی شد. این دستگاه قادر است تنش کششی را به طور یکنواخت به کل توده خاک اعمال نماید به طوری که تمرکز تنش در هیچ نقطه‌ای از نمونه رخ ندهد. پس از طراحی، ساخت قطعات و راه‌اندازی دستگاه، جهت بررسی نحوه عملکرد دستگاه آزمایش‌های صحت‌سنجی انجام پذیرفت. نتایج آزمایش تکرارپذیری نشان از عملکرد دقیق و مطلوب دستگاه دارد. همچنین در این تحقیق، اثر شاخص خمیری خاک رسی (کائولینیت) بر رفتار کششی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شاخص خمیری خاک‌ها ۱۰ و ۲۴ درصد انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد که برای خاک‌های رسی با یک منشاء مشخص، با افزایش شاخص خمیری، مقاومت کششی افزایش و کرنش گسیختگی کششی کاهش پیدا می‌کند.

**واژگان کلیدی:** آزمایش استوانه توخالی کششی، مقاومت کششی، خاک رسی، شاخص خمیری

عباس قلندرزاده

دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه  
تهران.

پست الکترونیک:

aghaland@ut.ac.ir

محمودرضا عبدی

دانشیار، دانشکده مهندسی  
عمران، دانشگاه صنعتی خواجه  
نصرالدین طوسی.

پست الکترونیک:

abdi@kntu.ac.ir

لیلا شفیعی چافی\*

دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین  
طوسی.

پست الکترونیک:

Lshafiei@mail.kntu.ac.ir

### ۱- مقدمه

لرزه‌ای و یا سایر بارهای خارجی ایجاد شود. وجود ترک‌های کششی در این سازه‌ها می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی آنها تأثیر بگذارد. مواردی از ترک‌های کششی در خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. مقاومت کششی در خاک‌های غیرپلاستیک خشک حدود صفر است؛ اما خاک‌های پلاستیک همچون رس، مقداری مقاومت کششی از خود نشان می‌دهند. یکی از پارامترهایی که بر مقاومت خاک‌های کششی اثرگذار است، شاخص خمیری آنهاست.

با توجه به اهمیت مقاومت کششی خاک که در بالا ذکر شد، این مسئله همیشه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و آزمایش‌هایی مانند آزمایش کشش

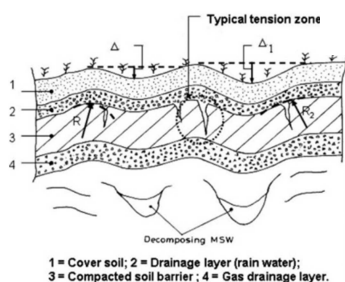
مقاومت کششی خاک در خاکریز سدها، موانع هیدرولیکی، شیروانی‌ها، بستر فرودگاه‌ها، حاشیه رودخانه‌ها، خاکریز بزرگراه‌ها و راه‌آهن، دیواره‌های نگهبان و مکان‌های دفن زباله که در آنها امکان وقوع ترک کششی وجود دارد، یک پارامتر مهم ژئوتکنیکی محسوب می‌شود. ترک‌های کششی در موارد فوق می‌تواند به دلیل نشست‌های نامتقارن، گسیختگی هیدرولیکی، حرکات

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۲۹، بازنگری ۱۴۰۰/۰۸/۰۲، پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۰۷.

(DOI): 10.22091/cer.2021.7389.1303 شناسه دیجیتال

خاک انجام می‌شود. هریک از آزمایش‌های کششی رایج ذکر شده دارای مزایا و معایبی هستند که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.



(ب) تنش‌های خمشی در پوشش و آستر مکان‌های دفن زباله [۲]

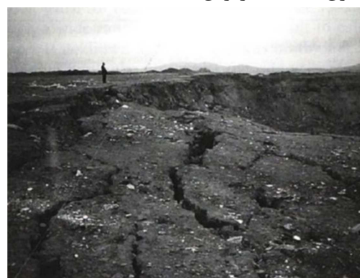
مستقیم، آزمایش کشش برزلی، آزمایش تیر خمشی و آزمایش دابل پانچ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه مقاومت کششی



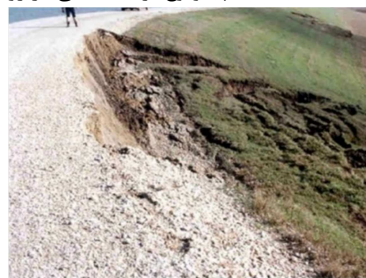
(الف) وقوع ترک کششی در پشت دیوار خاک مسلح [۱]



(پ) وقوع ترک کششی در روسازی راه به دلیل نشست نامتقارن لایه‌های زیرین خاک [۳]



(ث) وقوع ترک کششی در بالادست محل دفن زباله [۴]



(ت) وقوع گسیختگی کششی سطحی در بدنه سد Bardwell، تگزاس، آمریکا [۳]

شکل ۱- نمونه‌هایی از وقوع ترک‌های کششی در سازه‌های ژئوتکنیکی

روبروست. این آزمایش معمولاً بر روی نمونه‌های بسیار ترد مورد استفاده قرار می‌گیرد، به همین دلیل در حوزه مکانیک سنگ و محاسبه مقاومت کششی سنگ‌ها پرکاربرد است. همچنین امکان بارگذاری در نرخ کرنش‌های مختلف وجود ندارد، چون معمولاً شکست ترد در نمونه‌ها رخ می‌دهد، تکرارپذیری نتایج هم معمولاً با عدم قطعیت‌های بالایی همراه است. از طرفی دیگر، امکان محاسبه کرنش گسیختگی و ترسیم منحنی تنش-کرنش کششی در طول آزمون در این آزمایش وجود ندارد.

در پژوهش‌های محدودی نیز از آزمایش خمش، که آن نیز در دسته آزمایش‌های غیرمستقیم برای محاسبه

محققان زیادی از آزمایش کشش مستقیم برای به‌دست آوردن پارامترهای کششی خاک استفاده کرده‌اند [۵-۲۵]. این آزمایش به دلیل اعمال کشش مستقیم در خاک و سهولت استفاده مورد توجه محققان قرار گرفته است. همچنین بسیاری از معایب آزمایش‌های کشش غیرمستقیم همچون کشش برزلی را ندارد.

تحقیقات گسترده‌ای نیز با استفاده از آزمایش کشش برزلی، که در دسته آزمایش‌های غیرمستقیم برای محاسبه مقاومت کششی خاک‌ها و سنگ‌ها طبقه‌بندی می‌شود، بر روی نمونه‌های خاکی برنامه‌ریزی و اجرا گردیدند [۷ و ۲۶-۳۸]. نتایج آزمایش برزلی به دلیل محدودیت‌های آن با ابهامات متعددی توسط محققین

این حال به دلیل مزایای زیادشان از جمله سادگی انجام آزمایش و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی نسبتاً ساده به طور چشمگیری مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است.

آزمایش استوانه توخالی یکی از روش‌های پیشنهادی برای تعیین مقاومت کششی خاک است که می‌تواند برای شبیه‌سازی کشش در خاک مورد استفاده قرار گرفته و بسیاری از معایب ذکر شده برای سایر آزمایش‌های مقاومت کششی خاک را ندارد (جدول ۱).

مقاومت کششی خاک و سنگ طبقه‌بندی می‌شود، استفاده شده است [۲، ۵، ۶، ۳۹ و ۴۰].

آزمایش کشش مستقیم در عین برتری‌هایی که نسبت به سایر روش‌ها دارد، دارای معایبی از جمله دشواری اعمال تنش یکنواخت به کل نمونه، غیرقابل اجتناب بودن اثر تمرکز تنش و بارگذاری خارج از مرکز، مشکل بودن اتصال انتهای نمونه می‌باشد. به طور کلی، معایب ذکر شده در هریک از این آزمایش‌ها باعث می‌شود که ابهاماتی در نتایج حاصل از آنها وجود داشته باشد. با

جدول ۱- مقایسه معایب و مزایای روش‌های مختلف سنجش مقاومت کششی خاک

مزایا	معایب	نوع آزمایش
<ul style="list-style-type: none"> <li>- شرایط واقعی آزمایش کشش تک‌محوری را برآورده می‌کند.</li> <li>- می‌تواند رابطه تنش و فشار واقعی را تحت تنش اندازه‌گیری کند.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- مشکل بودن اعمال تنش یکنواخت بر روی کل نمونه</li> <li>- ایجاد تمرکز تنش در برخی از نقاط نمونه، خصوصاً در نقاط اتصال</li> <li>- سخت بودن ایجاد اتصال مناسب برای نگهداشتن نمونه در فرآیند آزمایش</li> <li>- حذف کامل ناهمترازی نسبتاً غیرممکن است.</li> </ul>	آزمایش کشش مستقیم
<ul style="list-style-type: none"> <li>- سادگی در اجرا</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تنها برای خاک‌های ترد استفاده می‌شود.</li> <li>- این آزمایش بیشتر جهت تعیین مقاومت کششی سنگ و بتن استفاده می‌شود.</li> <li>- عدم همگنی نمونه با توجه به اینکه تنش کششی بر صفحه تقارن نمونه وارد شده و بر کل نمونه وارد نمی‌شود</li> <li>- بر نتیجه بسیار اثرگذار است.</li> <li>- بررسی روند تغییرات کرنش در این روش امکان‌پذیر نیست.</li> </ul>	آزمایش برزیلی
<ul style="list-style-type: none"> <li>- سادگی در اجرا</li> <li>- شرایط بارگذاری آن می‌تواند شرایط سایت را شبیه‌سازی کند.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- فرض بر الاستیک بودن رفتار خاک است.</li> <li>- این روش اغلب برای بتن استفاده می‌شود.</li> <li>- از نیروی وزن نمونه در این آزمایش صرف‌نظر می‌شود.</li> <li>- کرنش نمونه در حین آزمایش تعیین نمی‌شود.</li> </ul>	آزمایش خمش
<ul style="list-style-type: none"> <li>- محل قرارگیری نمونه به گونه‌ای است که نیازی به اتصال در نمونه نیست و به این ترتیب تنش اضافی به نمونه وارد نمی‌شود.</li> <li>- تنش کششی یکنواخت به کل حجم نمونه وارد می‌شود.</li> <li>- شدت تنش فشاری شعاعی به‌طور قابل‌توجهی کوچکتر از تنش کششی مماسی است.</li> <li>- امکان اعمال تنش محوری علاوه بر فشار داخلی و خارجی وجود دارد.</li> <li>- امکان انجام آزمایش در تنش‌های همه‌جانبه مختلف وجود دارد.</li> <li>- فرآیند آزمایش در طول آزمایش کاملاً تحت کنترل بوده و تنش و کرنش به‌طور همزمان اندازه‌گیری می‌شود.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- فرض بر الاستیک بودن رفتار خاک است.</li> <li>- تنش کششی مستقیم تک‌محوری صرفاً اعمال نمی‌شود.</li> </ul>	آزمایش استوانه توخالی

با توجه به بررسی‌های انجام شده و مزیت‌های ذکر شده برای آزمایش استوانه توخالی کششی، در تحقیق حاضر طراحی، ساخت و راه‌اندازی دستگاه مذکور برنامه‌ریزی و اجرا گردید. این دستگاه قادر به اعمال تنش کششی مستقیم به نمونه و اندازه‌گیری تنش و کرنش کششی است. در این پژوهش، صحت‌سنجی داده‌های حاصله و تکرارپذیری آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر شاخص خمیری خاک‌های رسی بر خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل خاک مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- دستگاه استوانه توخالی

یکی از دستگاه‌هایی که برای بررسی رفتار کششی خاک‌ها استفاده می‌شود، دستگاه استوانه توخالی است. این روش آزمایش کشش نسبت به سایر روش‌های تعیین مقاومت کششی همچون تک نقطه‌ای، برزلی، چهار نقطه‌ای و غیره بسیار دقیق‌تر و قابل اعتمادتر است؛ زیرا با اندازه‌گیری کرنش‌های مماسی نمونه، حین اعمال بار و ترسیم منحنی‌های تنش-کرنش می‌توان بیشتر به بررسی رفتار کششی خاک پرداخته و تنش گسیختگی کششی آن را دقیقاً تعیین نمود. همچنین امکان انجام آزمایش در فشارهای همه جانبه متفاوت نیز فراهم است.

در این آزمایش، نمونه خاک به صورت استوانه‌ای توخالی ساخته می‌شود که می‌توان از داخل و خارج نمونه به آن فشار اعمال نمود. در صورتی که فشار خارج نمونه ثابت و فشار داخل افزایش یابد، نمونه خاکی دچار کشش شده و با توجه به مقاومت کششی آن تحت فشار معینی گسیخته می‌شود. بدین ترتیب می‌توان مقاومت کششی خاک‌های مختلف را مورد مطالعه قرار داد.

در تحقیق حاضر از نمونه استوانه توخالی با قطر بیرونی ۱۵، قطر داخلی ۱۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. چنانچه ضخامت نمونه بیش از یک‌بیستم قطر داخلی آن باشد، نمونه جدار ضخیم در نظر گرفته می‌شود [۴۲]. در اینجا با توجه به اینکه ضخامت

با این حال به دلیل هندسه مدل (که استوانه توخالی است و ساخت نمونه‌های آن نسبتاً دشوار است) و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی بیشتر و دقیق‌تر، بسیار کمتر مورد توجه محققان حوزه ژئوتکنیک قرار گرفته است. همچنین محققان حوزه مکانیک سنگ از این روش بیشتر برای محاسبه مقاومت کششی سنگ استفاده کرده‌اند. این روش دارای مزایای مختلفی است که آن را نسبت به سایر روش‌ها متمایز می‌کند:

(الف) قرارگیری نمونه در این آزمایش به گونه‌ای است که تنش‌های اضافی به نمونه وارد نمی‌شود.

(ب) تنش‌های کششی یکنواخت به روی کل حجم نمونه اثر می‌گذارد.

(پ) شدت تنش فشاری شعاعی به‌طور قابل توجهی کوچکتر از تنش کششی مماسی است.

(ت) امکان اعمال تنش محوری علاوه بر فشار داخلی و خارجی در این روش وجود دارد.

(ث) تغییرشکل نمونه در هنگام اعمال نیروی کششی به نمونه قابل اندازه‌گیری است.

(ج) امکان اعمال تنش همه جانبه مختلف و بررسی رفتار تنش کششی خاک‌ها در عمق نیز وجود دارد.

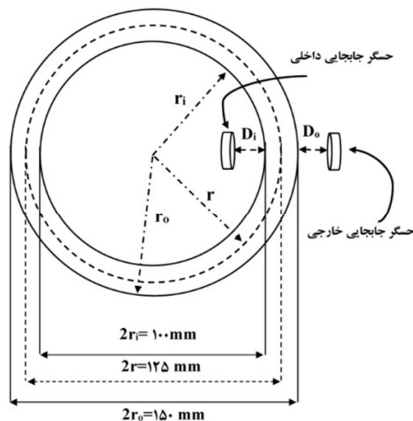
با مرور پژوهش‌های انجام شده ملاحظه می‌شود که علیرغم مزایای این روش، در بسیاری از پژوهش‌ها از آزمایش استوانه توخالی برای بررسی مقاومت کششی خاک استفاده نشده است و عملاً تنها یک تحقیق شاخص در زمینه استفاده از این روش برای بررسی مقاومت کششی خاک وجود دارد. در سال ۱۹۸۱ با استفاده از آزمایش استوانه توخالی مقاومت کششی خاک را مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با شرح جزئیات ساخت دستگاه خود، چندین آزمایش بر روی خاک‌های مختلف برای بررسی مقاومت کششی آنها برنامه‌ریزی و اجرا شد. قطر خارجی نمونه‌ها ۱۵۲/۴ (۶ اینچ)، قطر داخلی آن ۱۰۱/۶ (۴ اینچ) و ارتفاع نمونه نیز ۱۰۱/۶ میلیمتر (۴ اینچ) بود [۴۱].

آن  $\pi \times 125$  است. چنانچه محیط نمونه پس از بارگذاری به صورت  $\pi \times (125 + \Delta d)$  نشان داده شود، کرنش شعاعی عبارتست از:

$$\varepsilon_i = \frac{\pi \times (125 + \Delta d) - \pi \times 125}{\pi \times 125} = \frac{\Delta d}{125} = \frac{|\Delta D_i| + |\Delta D_o|}{125} \quad (3)$$

$$\Delta d = 2 \times \Delta r = 2 \times \frac{(|\Delta D_i| + |\Delta D_o|)}{2} = |\Delta D_i| + |\Delta D_o| \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)،  $D_o$  و  $D_i$  عبارتند از جابه‌جایی ثابت شده توسط حسگرهای جابه‌جایی سنج به ترتیب داخل و خارج نمونه.



شکل ۳- پارامترهای مرتبط با محاسبه کرنش مماسی و شعاعی

همچنین کرنش شعاعی از روابط (۵) و (۶) محاسبه

می‌شوند:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta t}{t} = \frac{\Delta t}{25} = \frac{|\Delta D_o| - |\Delta D_i|}{25} \quad (5)$$

$$\Delta t = |\Delta D_o| - |\Delta D_i| \quad (6)$$

## ۲-۱- ساختار دستگاه آزمایش استوانه توخالی

در تحقیق حاضر، یک سلول استوانه توخالی با قابلیت اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک‌ها طراحی و ساخته شد. جزئیات سلول ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. از جمله اجزای اصلی سازنده سلول می‌توان به این موارد اشاره کرد: صفحه زیرین سلول، مقر

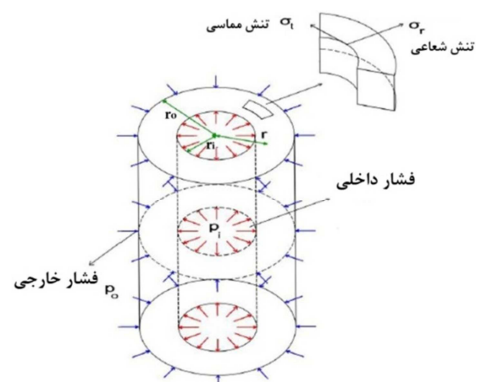
نمونه  $2/5$  سانتی‌متر است، استوانه توخالی جدار ضخیم محسوب می‌شود. تفاوت رفتار استوانه توخالی جدار ضخیم و جدار نازک، در معادلاتی است که برای بررسی رفتار مکانیکی آن‌ها استفاده می‌شود.

چنانچه یک استوانه توخالی جدار ضخیم به شعاع داخلی  $r_i$  و شعاع خارجی  $r_o$  تحت فشار یکنواخت داخل  $P_i$  و فشار خارج  $P_o$  قرار بگیرد (شکل ۲)، با فرض متقارن بودن تغییر شکل نمونه حول محور استوانه و الاستیک بودن رفتار آن می‌توان از روابط (۱) و (۲) برای محاسبه تنش شعاعی و مماسی ایجاد شده در آن استفاده نمود [۴۲]:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i - r_o^2 p_o}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{(p_i - p_o) r_i^2 r_o^2}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i - r_o^2 p_o}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(p_i - p_o) r_i^2 r_o^2}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (2)$$

که در آن  $\sigma_r$  تنش شعاعی،  $\sigma_t$  تنش مماسی و  $r$  نیز شعاع نقطه‌ای است که تنش آن محاسبه می‌شود.



شکل ۲- تصویری شماتیک از نمونه استوانه توخالی و قابلیت

اعمال فشارهای مختلف از بیرون و داخل نمونه [۴۳]

کرنش مماسی (و یا به عبارت بهتر کرنش کششی) عبارت است از نسبت افزایش محیط دایره نقطه‌چین نسبت به محیط اولیه (شکل ۳). دایره نقطه‌چین، دایره عبوری از وسط ضخامت مقطع استوانه توخالی است. بنابراین قطر این دایره  $125$  میلی‌متر (قطر داخلی دایره  $10$  و قطر خارجی آن  $15$  سانتی‌متر است) بوده و محیط



شکل ۵- تصویری از قطعات مجزای دستگاه استوانه توخالی

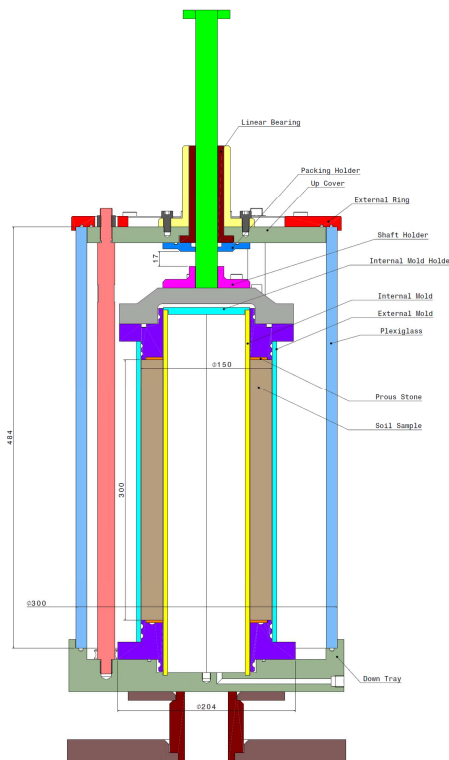
قبل از سرهم کردن

کلاهک پایینی، توسط ۶ عدد پیچ به صفحه زیرین سلول متصل شده و محکم می‌شود. نمونه خاکی بر روی این کلاهک مستقر می‌شود. نمونه به شکل استوانه توخالی به قطر داخلی ۱۰ و به قطر خارجی ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. در این پژوهش، نمونه‌ها به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. با این حال می‌توان نمونه‌های با ارتفاع بیشتر را نیز در این سلول ساخت. جهت حفاظت از نمونه و عدم تماس مستقیم عامل ایجاد فشار (آب یا هوا) با نمونه در داخل و خارج نمونه از غشای لاستیکی استفاده می‌شود.

کلاهک فوقانی نمونه از سه قسمت تشکیل شده است. یک قسمت به صورت حلقه‌ای شکل است که بر روی نمونه قرار می‌گیرد. پس از آن، قطعه دوم کلاهک فوقانی که یک قطعه دایره‌ای شکل است در مکان خود (بالای قطعه اول) قرار می‌گیرد. این قطعه به جهت آب‌بند شدن فضای داخل نمونه نسبت به فضای خارج آن در نظر گرفته شده است. قطعه سوم کلاهک فوقانی نمونه که باز هم یک قطعه حلقه‌ای شکل است، وظیفه یکپارچه‌کنندگی قطعات کلاهک بالا و آب‌بندی فضای داخل نمونه را بر عهده دارد (شکل ۶).

بر روی صفحه پایین سلول، سه عدد میله نگهدارنده تعبیه شده است که این میله‌ها با زاویه ۱۲۰ درجه از یکدیگر بر محیط یک دایره واقع شده‌اند. بر انتهای فوقانی

نمونه متشکل از کلاهک بالا و پایین، صفحه بالایی سلول، شفت مرکزی اعمال بار قائم، محفظه پلکسی گلاس و مقر حسگرهای جابه‌جایی داخل و خارج نمونه. قطعات فلزی سلول از استیل مرغوب ساخته شده است.



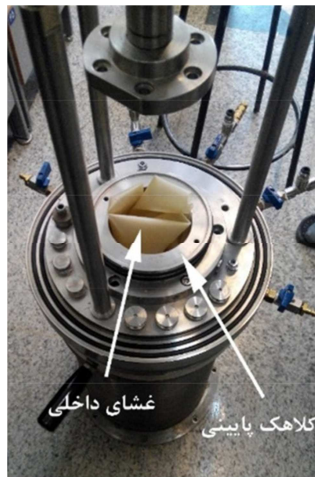
شکل ۴- تصویر شماتیک سلول آزمایش استوانه توخالی کششی

پایه سلول متشکل از صفحه زیرین سلول است که بستر سلول بوده و دیگر اجزای سلول بر روی آن واقع می‌شود. در صفحه زیرین سلول، ۵ عدد شیر تعبیه شده است که هر یک جهت ورود و خروج آب یا هوا به منظور اعمال فشار و یا ایجاد خلاء و یا اشباع‌سازی قسمت‌های مختلف سلول در نظر گرفته شده است. شکل ۵، تصویری از دستگاه استوانه توخالی به صورت قطعات مجزا و قبل از سرهم کردن را نشان می‌دهد.

در این دستگاه یک نمونه استوانه‌ای شکل توخالی در مرکز سلول واقع می‌شود. این نمونه استوانه‌ای شکل، بین دو کلاهک قرار می‌گیرد تا بدین ترتیب فضای داخل و خارج نمونه با یکدیگر مرتبط نبوده و بتوان با افزایش فشار داخل نمونه و ثابت نگه داشتن فشار خارج نمونه، نمونه خاکی را در معرض تنش کششی قرار داد.

این میله‌ها، نشیمن‌هایی طراحی شده است که صفحه

بالایی سلول بر روی آن قرار می‌گیرد و ثابت می‌ماند.



(ب)



(الف)

شکل ۶- کلاهک‌های (الف) فوقانی و (ب) پایینی و غشای داخلی نمونه

مقری استوانه‌ای شکل که بر یک پایه میله‌ای واقع می‌شود، ساخته شد. مقر استوانه‌ای شکل به‌گونه‌ای است که سه عدد حسگر با زاویه ۱۲۰ درجه از یکدیگر واقع می‌شوند. تراز قرارگیری حسگرها به نحوی در نظر گرفته شده است که جابه‌جایی میانه نمونه را اندازه‌گیری کند. برای حسگرهای خارج نمونه نیز مقرهایی بر روی میله‌های نگهدارنده تعبیه شده‌اند. این مقرها به صورت لولایی به میله‌های نگهدارنده متصل هستند. نحوه قرارگیری حسگرهای خارجی در حین انجام آزمایش باید به‌گونه‌ای باشد که سطح حسگر موازی نقطه سنجش تغییرمکان باشد.

محفظه سلول که از جنس پلکسی گلاس است، پس از استقرار نمونه و تنظیم حسگرهای جابه‌جایی داخل و خارج نمونه بر روی سلول قرار گرفته و توسط ۹ عدد پیچ که بر سطح فوقانی آن واقع شده است به صفحه بالایی سلول متصل شده و محکم می‌شود. جهت افزایش مقاومت محفظه پلکسی ۵ عدد بست آلومینیومی در بدنه محفظه به فواصل مساوی بسته شده است. طراحی ابعاد و قرارگیری آ-رینگ‌ها در مکان‌های تماس محفظه پلکسی گلاس و سلول به نحوی است که سلول کاملاً آب‌بند بوده و نگرانی هدر رفت فشار در آن وجود ندارد.

صفحه بالایی سلول دارای یک شفت (میله) مرکزی است که این شفت (میله) توسط ۶ عدد پیچ به قطعه دوم کلاهک فوقانی متصل و محکم می‌شود. از شفت مرکزی متصل به صفحه بالایی سلول برای ثابت نگه داشتن کلاهک بالا و جلوگیری از جابه‌جایی آن حین اعمال بار در طول آزمایش استفاده می‌شود. عدم جابه‌جایی قائم نمونه در طول آزمایش بدین جهت اهمیت دارد که روابط محاسباتی استفاده شده در این پژوهش جهت محاسبه تنش- کرنش کششی خاک مبتنی بر فرض عدم تغییر شکل قائم نمونه خاکی است.

در این پژوهش جهت اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی سطوح داخلی و خارجی نمونه در حین انجام آزمایش، از حسگرهای جابه‌جایی به نام حسگرهای غیرتماسی استفاده شد. همان‌طور که از نام حسگر مشخص است، این حسگر به صورت غیرتماسی با نقطه سنجش جابه‌جایی، تغییرمکان آن را اندازه‌گیری می‌کند. به عبارتی، علی‌رغم داشتن فاصله از نقطه هدف، قادر به اندازه‌گیری تغییرمکان آن با دقت بسیار بالا است. در هر آزمایش سه عدد از حسگرهای غیرتماسی در داخل نمونه و سه عدد دیگر در خارج نمونه و دقیقاً در راستای حسگرهای داخلی قرار دارند (شکل ۷). جهت استقرار حسگرهای داخل،





(ب)



(الف)

شکل ۷- حسگرهای جابه‌جایی (الف) داخلی و (ب) خارجی

از عمق حدود  $0/5$  متری زمین برداشت شده است. هم‌فشار شدن داخل و خارج نمونه نیز از طریق اتصال شیرهای مربوط به داخل و خارج نمونه به وسیله یک سیلینگ رابط انجام می‌شود. فشار داخل و خارج نمونه از طریق دو عدد حسگر فشارسنج که بر شیرهای ورودی داخل و خارج نمونه بسته می‌شوند اندازه‌گیری می‌شود. داده مربوط به این حسگرها در طول آزمایش از طریق یک دیتالاگر ثبت و پایش می‌شود. پس از رسیدن فشار داخل و خارج نمونه به میزان هدف (در تحقیق حاضر  $10$  کیلوپاسکال)، می‌توان فشار داخل نمونه را افزایش داد. به دلیل اینکه سرعت بارگذاری بر نحوه گسیختگی و رفتار خاک مؤثر است؛ می‌بایست فشار داخل نمونه با یک شیب ثابت در یک آزمایش و به طور یکسان در تمامی آزمایش‌ها بر نمونه‌ها اعمال شود. در این پژوهش، سرعت بارگذاری در تمامی آزمایش‌ها مقدار ثابت  $0/01$  کیلوپاسکال بر ثانیه است. بدین ترتیب فشار داخل نمونه با یک نرخ ثابت افزایش می‌یابد تا اینکه در نمونه گسیختگی رخ دهد. نحوه بارگذاری یکی از نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

در طی اعمال فشار خارج نمونه و افزایش فشار داخل نمونه، جهت محاسبه مقادیر کرنش و ترسیم منحنی تنش-کرنش، جابه‌جایی سطوح داخلی و خارجی

شکل ۸ نمایی از سلول ساخته شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- نحوه عملکرد دستگاه

در این آزمایش هدف، ایجاد نیروی کششی به طور متقارن و کنترل شده به نمونه استوانه توخالی است. بدین منظور می‌بایست در حالی که فشار خارج نمونه ثابت نگه داشته می‌شود، فشار داخل نمونه افزایش یابد.



شکل ۸- نمایی از سلول آماده آزمایش ساخته شده

در این آزمایش، فرآیند بارگذاری بر نمونه اینگونه طراحی شده است که ابتدا فشار یکسان به اندازه  $10$  کیلوپاسکال در داخل و خارج نمونه همزمان وارد می‌شود که این فشار در تحقیق حاضر، متناظر با نمونه‌ای است که

### ۲-۳- حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی

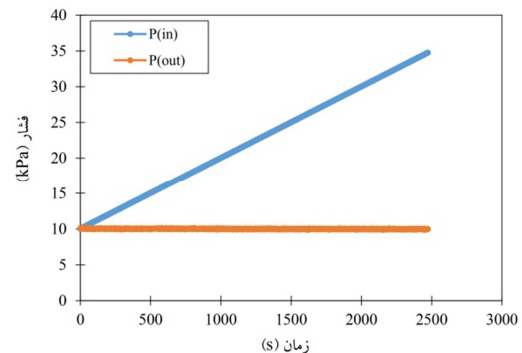
استفاده از حسگرهای اندازه‌گیری تغییرشکل در آزمایش‌های ژئوتکنیکی آزمایشگاهی یکی از رکن‌های مهم در برداشت داده برای تحلیل رفتار خاک است. با توجه به نوع آزمایش انجام‌شده (استاتیکی یا دینامیکی) و همچنین سطح کرنش و تغییرشکل‌های موردنیاز برای شناخت رفتار خاک، نوع حسگر و حساسیت آن متفاوت خواهد بود. به‌عنوان نمونه با توجه به اینکه سطح کرنش گسیختگی کششی خاک‌ها بسیار کم است، استفاده از حسگرهای با دقت بالا، همچون حسگرهای غیرتماسی، برای اندازه‌گیری جابه‌جایی رخ داده در خاک بسیار اهمیت دارد. این حسگرها برخلاف سایر حسگرهای رایج که با سطح نمونه در تماس است، همچون LVDTها، بدون تماس و براساس مکانیزم اثر هال جابه‌جایی را می‌سنجند. در تحقیق حاضر از حسگرهای غیرتماسی آزمایشگاه خاک دانشگاه تهران که دقت بسیار بالایی در اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها دارند برای بررسی رفتار کششی خاک استفاده شده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نمایی از حسگر جابه‌جایی غیرتماسی استفاده شده

حسگرهای غیرتماسی اگرچه بسیار دقیق هستند اما برای استفاده صحیح از آنها می‌بایست کالیبراسیون دقیق آنها صورت پذیرفته و عوامل تأثیرگذار بر عملکردشان به‌دقت شناسایی گردد. عدم کالیبراسیون صحیح که در نتیجه عدم توجه به این عوامل است، باعث می‌شود که حسگر نتایج ناصحیحی ارائه نماید.

نمونه توسط حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی اندازه‌گیری می‌شود.



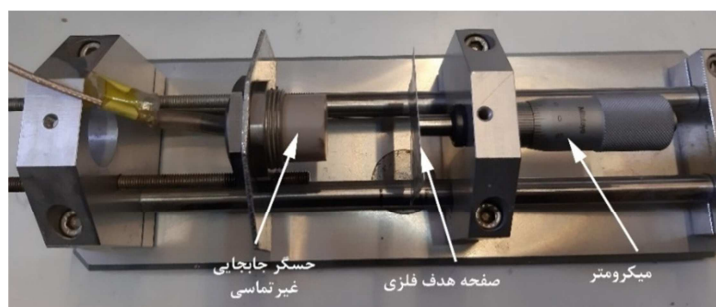
شکل ۹- تغییر فشارهای داخلی و خارجی با زمان برای ایجاد کشش در نمونه استوانه توخالی

حسگرهای داخلی که با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده می‌شوند در مقر خود قرار گرفته و با زاویه ۱۲۰ درجه، جابه‌جایی سه جهت مختلف از نمونه را اندازه می‌گیرند. حسگرهای ۴، ۵ و ۶ جابه‌جایی سطوح خارجی نمونه را اندازه‌گیری کرده و در مقرهای خارج نمونه مستقر هستند. نحوه قرارگیری حسگرها به‌گونه‌ای است که حسگرهای داخلی کاملاً در راستا و تراز یکسان با حسگرهای داخلی قرار دارند. در تمامی آزمایش‌ها حسگرهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در مقابل حسگرهای ۴، ۵ و ۶ قرار گرفته‌اند. به این دلیل از سه جفت حسگر استفاده می‌شود که بتوان تغییرشکل‌ها را در راستاهای بیشتری اندازه‌گیری کرده و خطاهای احتمالی را به حداقل کاهش داد. برای محاسبه تغییرشکل‌های مماسی و شعاعی جزئی و بسیار محدود نمونه‌های رسی با شاخص خمیری بالا که با درصد رطوبت بهینه متراکم شده‌اند، به دلیل مقادیر بسیار اندک کرنش گسیختگی کششی، باید از حسگرهای با دقت بسیار بالا استفاده نمود. حسگرهای غیرتماسی به‌کار رفته در این پژوهش بسیار دقیق هستند. آنها میزان جابه‌جایی را با دقت هزارم میلی‌متر (میکرون) اندازه‌گیری می‌کنند. جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی توسط حسگرها می‌بایست در مقابل آنها از صفحات هدف فلزی استفاده کرد. توضیحات مبسوط در زمینه حسگرهای مورد استفاده در بخش بعدی آورده شده است.

## ۲-۳-۱- کالیبراسیون حسگر جابه‌جایی غیرتماسی

می‌گیرد. در اینجا از چسب آلومینیومی استفاده می‌شود. این ورق آلومینیوم در مقابل حسگر قرار می‌گیرد. در این سیستم هر فاصله مشخص صفحه آلومینیومی از حسگر یک ولتاژ معین ایجاد می‌کند. در فرآیند کالیبره شدن دو فاصله معلوم از طریق دستگاه کالیبراسیون به حسگر معرفی شده و ولتاژ مربوط به این دو نقطه اندازه‌گیری می‌شود و به این ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار ولتاژ-تغییر مکان به دست آمده و به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

برای کالیبره کردن حسگرها از دستگاه ویژه‌ای که متشکل از یک میکرومتر است استفاده می‌گردد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این دستگاه یک صفحه فلزی (صفحه هدف) در مقابل حسگر قرار گرفته که با هر دور چرخاندن پیچ تنظیم فاصله، این صفحه نیم میلی‌متر جابه‌جا می‌شود. صفحه فلزی هدف باید از جنس همان فلزی باشد که در آزمایش اصلی در مقابل حسگرها قرار



شکل ۱۱- دستگاه کالیبراسیون حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی

## ۲-۳-۲- تعیین نواحی کور حسگر

کور ابتدایی یا انتهایی واقع نشود. عدم توجه به مقدار نواحی کور در هر حسگر می‌تواند منجر به عدم قرائت جابه‌جایی در طول انجام آزمایش و در نتیجه تولید داده‌های غلط شود. نواحی کور تعیین شده برای هر یک از حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ آمده است.

حسگرهای غیرتماسی در نواحی ابتدایی و انتهایی بازه سنجششان دارای مناطقی هستند که در آن اندازه‌گیری دقیقی ندارند. اصطلاحاً این مناطق، نواحی کور نامیده می‌شوند. برای تک‌تک حسگرها باید مرزهای این نواحی کور تعیین گردند تا در زمان استقرار حسگرها دقت شود که فاصله آن‌ها از سطح اندازه‌گیری در ناحیه

جدول ۲- مشخصات کالیبراسیون حسگرهای مورد استفاده

شماره حسگر	بازه کالیبره شده (mm)	حد کور انتهایی (mm)	حد کور ابتدایی (mm)
۱	صفر-۶	۷/۵	۱/۵
۲	صفر-۶	۷/۵	۱/۵
۳	صفر-۴	۶	۲
۴	صفر-۵	۷	۲
۵	صفر-۵	۷	۲
۶	صفر-۴	۶	۲

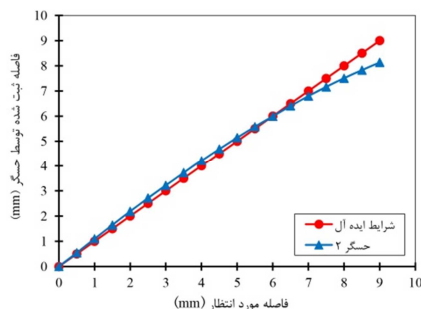
## ۲-۳-۲- بررسی خطی بودن کالیبراسیون در بازه اثر حسگر

پس از کالیبره شدن، نحوه عملکرد هر یک از حسگرها در بازه کالیبره شده و دورتر از محدوده کالیبره مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۲). این کار به این

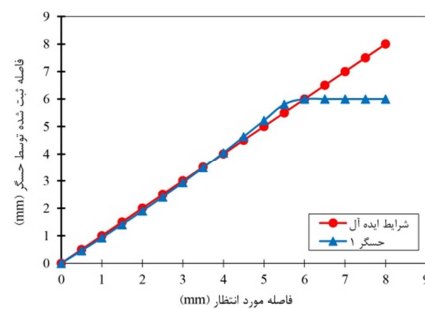
نمی‌کنند. به عبارتی تعریف نقاط ابتدایی و انتهایی کالیبراسیون بر بازه اندازه‌گیری این حسگرها اثرگذار است. اما در حسگرهای ۲، ۳ و ۶ (شکل ۱۲-ب، پ، ج) چنانچه میزان تغییر شکل بیشتر از بازه کالیبره شده باشد، می‌توان با اصلاح داده توسط شیب منحنی در خارج از محدوده کالیبراسیون از این داده‌ها نیز استفاده نمود. قابل ذکر است که این رفتار متفاوت حسگرها قابل توجه است. بنابراین شناخت مناسب رفتار حسگرهای غیرتماسی در استفاده صحیح از آن‌ها و دریافت داده‌های مناسب از اهمیت بسزایی برخوردار است.

دلیل انجام شده است که هم عملکرد صحیح حسگر بررسی شده و هم چنانچه تغییر شکل‌ها از محدوده کالیبره شده خارج شد، برحسب نمودار و رفتار حسگر این مقادیر اصلاح شوند. نکته مهم اینکه مطلوب‌ترین رفتار حسگرها، رفتار خطی آن‌هاست که در شکل ۱۲ تحت عنوان شرایط ایده‌آل بیان شده است. در شرایط ایده‌آل، جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط حسگر دقیقاً برابر با جابه‌جایی مورد انتظار است.

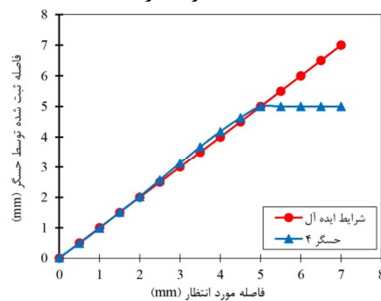
همان‌طور که در شکل ۱۲-الف، ت و ث مشاهده می‌شود، حسگرهای ۱، ۴ و ۵ دورتر از فاصله کالیبره شده عملکرد مناسبی ندارند و تقریباً می‌توان گفت حس



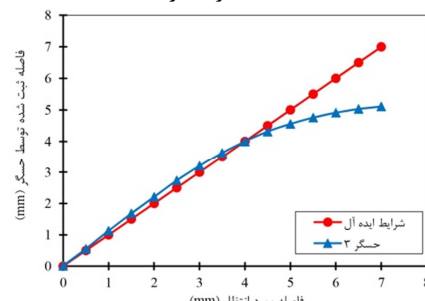
(ب) حسگر شماره ۲



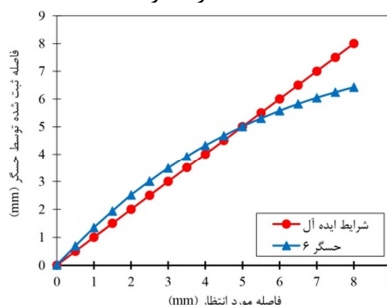
(الف) حسگر شماره ۱



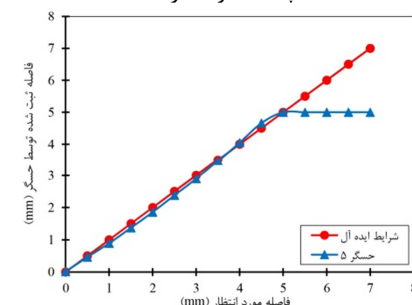
(پ) حسگر شماره ۴



(ت) حسگر شماره ۳



(ج) حسگر شماره ۶



(ث) حسگر شماره ۵

شکل ۱۲- کالیبراسیون حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی شماره ۱ تا ۶ مورد استفاده

در کالیبراسیون اولیه حسگرها، از صفحه آلومینیومی صاف استفاده شد. درحالی‌که در آزمایش،

۲-۳-۴- اثر هندسه صفحه هدف بر کالیبراسیون

سنجش در جهت مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده حسگر در فاصله‌ای ثابت از سطح هدف صاف و محدب نیز تکرار شد و نتیجه نشان داد که حسگر در فاصله‌ای ثابت از سطوح محدب مقادیر بیشتری از مقادیر واقعی نشان می‌دهد (جدول ۳).

همچنین مشاهده شد که فرم سطح هدف (صاف یا منحنی بودن) در نتیجه بسیار اثرگذار است. لذا مجدداً کالیبراسیون توسط سطح هدف مقعر (شکل ۱۳-الف) برای حسگرهای ۱، ۲ و ۳ (حسگرهای داخل نمونه) و سطح هدف محدب (شکل ۱۳-ب) برای حسگرهای ۴، ۵ و ۶ (حسگرهای بیرون نمونه) انجام شد.

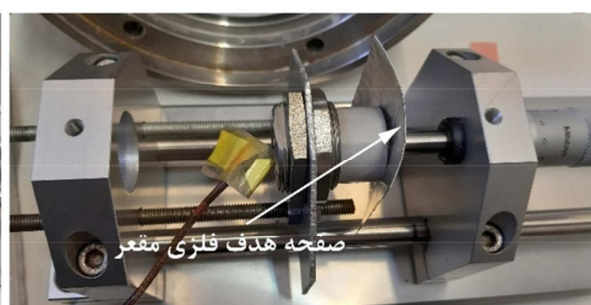
نمونه‌های استوانه توخالی دارای سطوحی منحنی هستند. به عبارتی در مقابل حسگرهای داخلی که تغییرشکل سطوح داخلی نمونه را اندازه‌گیری می‌کنند سطوح، مقعر بوده و در مقابل حسگرهای خارجی که تغییرشکل سطوح بیرونی استوانه توخالی را اندازه‌گیری می‌کنند سطوح، محدب هستند. این موضوع باعث گردید که برای سنجش تأثیر انحنا سطح هدف در یک فاصله ثابت، از یک صفحه صاف و بار دیگر از یک صفحه مقعر استفاده شود و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر مقایسه گردد. نتیجه نشان داد که حسگر در فاصله‌ای ثابت از سطوح مقعر مقادیری کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهند (جدول ۲). همین

جدول ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده حسگر از سطوح صاف و منحنی واقع شده در فاصله‌ای یکسان

در حالت سطح هدف محدب		در حالت سطح هدف مقعر		
سطح هدف محدب	سطح هدف صاف	سطح هدف مقعر	سطح هدف صاف	
۳/۰۹۹	۲/۸۶	۱/۶	۲/۷	مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر (mm)
۴/۲	۳/۹۸۵	۲/۴	۴/۰۴	



(ب)



(الف)

شکل ۱۳- کالیبراسیون با استفاده از صفحه هدف فلزی (الف) مقعر و (ب) محدب

خاک‌ها که براساس استانداردهای ASTM به دست آمده‌اند، در جدول ۴ و منحنی دانه‌بندی خاک‌ها در شکل ۱۴ آمده است. براساس طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)، خاک K<sub>24</sub> به صورت خاک CH (رس با خاصیت خمیری زیاد) و خاک K<sub>10</sub> به صورت خاک CL (رس با خاصیت خمیری کم) طبقه‌بندی می‌شوند. ترکیب شیمیایی خاک‌ها در جدول ۵ آمده است. برای تعیین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه جهت نمونه‌سازی، آزمایش تراکم استاندارد پروکتور بر روی هر دو خاک انجام شد. خلاصه‌ای از نتایج در جدول ۴ آمده است.

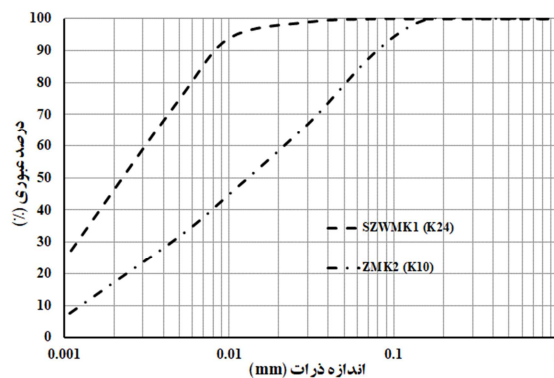
### ۳- مصالح مورد استفاده و نمونه سازی

#### ۳-۱- خاک رس

در این پژوهش از دو نوع خاک رسی با شاخص خمیری ۱۰ و ۲۴ درصد استفاده شده است. این خاک‌ها از کارخانه خاک چینی ایران تهیه شده‌اند. خاک‌های رسی با شاخص خمیری ۱۰ و ۲۴ درصد به نام‌های تجاری SZWMK1 و ZMK2 شناخته می‌شوند. در متن و به جهت اختصار، خاک‌های با شاخص خمیری ۱۰ و ۲۴ با نام‌های K<sub>10</sub> و K<sub>24</sub> نامگذاری می‌شوند. خصوصیات

جدول ۴- مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده

مشخصه	استاندارد	K <sub>10</sub>	K <sub>24</sub>
توزیع اندازه دانه‌ها (درصد عبوری وزنی)			
<0.075 mm	ASTM D: 422-63	۸۹	۱۰۰
وزن مخصوص	ASTM D: 854-00	۲/۶۵	۲/۶۳
حدود اتربرگ			
حد خمیری (%)	ASTM D: 4318-00	۲۱	۲۸
حد روانی (%)	ASTM D: 4318-00	۳۱	۵۲
شاخص خمیری (%)	ASTM D: 4318-00	۱۰	۲۴
خصوصیات تراکمی			
وزن مخصوص خشک (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D: 698-12e2	۱۷۴۰	۱۵۵۰
درصد رطوبت بهینه (%)	ASTM D: 698-12e2	۱۵/۶	۲۳/۵



شکل ۱۴- منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده

جدول ۵- ترکیب شیمیایی خاک‌های مورد استفاده

اکسیدها	K <sub>24</sub> (%)	K <sub>10</sub> (%)	اکسیدها	K <sub>24</sub> (%)	K <sub>10</sub> (%)
L.O.I	۹	۶	CaO	۱/۲	۱/۵
SiO <sub>2</sub>	۶۴	۷۵	MgO	۰/۴	۰/۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۴	۱۵	Na <sub>2</sub> O	۰/۳	۰/۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۵۵	۰/۴	K <sub>2</sub> O	۰/۴	۰/۴
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۴	۰/۰۴	سولفور	ناچیز	ناچیز

### ۳-۲- نحوه نمونه‌سازی

در این پژوهش نمونه‌هایی به شکل استوانه توخالی به قطر داخلی ۱۰ و قطر خارجی و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر ساخته شده است. جهت ساخت این نمونه‌ها، قالب‌هایی از جنس تفلون ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت. قالب داخلی نمونه از سه قطعه تشکیل شده است (شکل ۱۵). در صفحه پایین سلول در مجاورت دیواره کلاهک پایین نمونه، شیاری جهت قرارگیری آن‌ها تعبیه شده است.

قطعه دایره شکلی جهت قرارگیری در انتهای قطعات قالب داخل ساخته شده است. این قطعه توسط یک شفت مرکزی که در میانه سلول بسته می‌شود قطعات قالب داخل را به صورت یکپارچه در کنار یکدیگر نگه داشته و از جابه‌جایی آن‌ها حین ساخت نمونه جلوگیری می‌کند. باتوجه به شکل ۱۵، قالب خارجی نمونه از دو قطعه تشکیل شده که توسط دو عدد بست به هم بسته می‌شوند. به منظور اینکه حین نمونه‌سازی، خاک به دیواره

استفاده از افشانه بر ترکیب به‌دست آمده اضافه شده و مخلوط کردن تا زمانی که مخلوط یکنواختی حاصل شود ادامه می‌یابد (شکل ۱۶- الف).

سپس خاک‌های مرطوب در قالب بسته شده در پنج لایه ۳ سانتی‌متری متراکم شدند تا حداکثر تراکم خشک لازم به‌دست آید. هر لایه جداگانه توسط میله با قطر حدود ۲/۵ سانتی‌متر، به طور یکنواخت متراکم شدند تا در حد امکان ضخامت نمونه‌ها یکسان باشد. در هر مرحله و قبل از ریختن لایه بعدی خراش‌هایی در سطح لایه متراکم شده قبلی ایجاد می‌گردد تا قفل و بست لازم بین لایه‌ها به خوبی ایجاد گردد. پس از اتمام ساخت، نمونه یک روز در قالب باقی مانده تا از لحاظ رطوبتی همگن‌تر شده و انسجام بیشتری پیدا کند. روز بعد با دقت، ابتدا قالب‌های داخل و سپس قالب‌های خارج نمونه باز شده، نمونه خارج شده و در همان روز مورد آزمایش قرار می‌گیرند. شکل ۱۶- ب نمونه استوانه توخالی رسی آماده آزمایش را نشان می‌دهد.

قالب‌ها نچسبد و نمونه‌ها تخریب یا دچار آسیب نشوند، بر روی سطح خارجی قالب داخل و سطح داخلی قالب بیرونی یک لایه طلق نازک کشیده شده و سطح طلق به روغن آغشته می‌شود. جهت تراکم نمونه نیز از یک میله به قطر کمی کمتر از ۲/۵ سانتی‌متر استفاده شد.



شکل ۱۵- قالب‌های مورد استفاده برای نمونه‌سازی

مقادیر خاک مورد نیاز جهت نمونه‌سازی براساس حجم نمونه و وزن مخصوص خشک تعیین شده، مشخص می‌شود. مقدار آب افزودنی نیز برحسب مقدار درصد رطوبت بهینه‌ای که برای هر نوع خاک با استفاده از آزمایش پروکتور مشخص شد، محاسبه می‌گردد. آب با



(ب)

(الف)

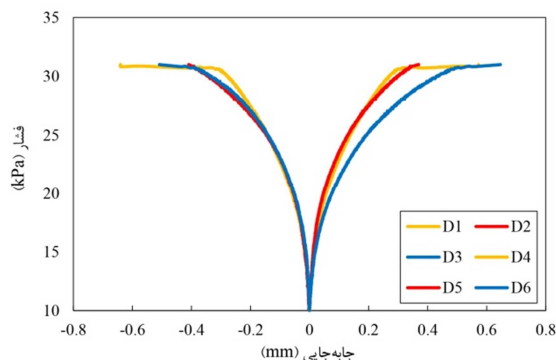
شکل ۱۶- (الف) اسپری کردن آب به خاک رسی جهت جلوگیری از کلوخه شدن و توزیع یکنواخت رطوبت و (ب) نمونه استوانه توخالی رسی آماده آزمایش

شده و عملکرد دستگاه با استفاده از آنها کنترل و چک گردید. به جهت بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها، مقاومت کششی خاک  $K_{24}$  تحت تنش همه جانبه اولیه ۱۰ کیلوپاسکال دو بار مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین برای درک بهتر اثر شاخص خمیری خاک‌های رسی بر

### ۳-۳- برنامه آزمایش‌ها

با توجه به اینکه در تحقیق حاضر دستگاه استوانه توخالی طراحی و ساخته شده است، در ابتدا نیاز به بررسی عملکرد صحیح دستگاه است. در این راستا ابتدا نمونه‌های مصنوعی (با استفاده از مواد شیمیایی) ساخته

حسگر است. حسگرهای ۴، ۵ و ۶ در خارج از نمونه قرار گرفته و جابه‌جایی سطوح خارجی نمونه را اندازه می‌گیرند. حسگرهای ۴، ۵ و ۶ به ترتیب در راستای حسگرهای ۱، ۲ و ۳ قرار گرفته‌اند. منفی بودن مقادیر ثبت شده توسط حسگرهای خارجی بیان‌کننده نزدیک شدن سطح نمونه به آن‌ها است. نمودارهای مربوط به حسگرهای هم‌راستا با یک رنگ مشخص شده‌اند. محور قائم نمودار، فشار داخل نمونه را نشان می‌دهد. فشار بیرون نمونه نیز در تمامی طول آزمایش ۱۰ کیلوپاسکال است. شکل ۱۸ نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های ثبت شده توسط حسگرهای داخلی و خارجی انطباق مناسبی با یکدیگر دارند و این به دلیل همگنی نمونه است. ملاحظه می‌شود که گسیختگی نمونه در فشار داخلی حدود ۳۱ کیلوپاسکال رخ داده است. در زمان گسیختگی سطح داخلی نمونه، جابه‌جایی متوسط حدود ۰/۳۷ میلی‌متر و سطح خارجی نمونه جابه‌جایی متوسط حدود ۰/۳۶ را تجربه کرده‌اند. جابه‌جایی بیشتر سطح داخلی نمونه نسبت به سطح خارجی آن به دلیل فشردن جدار نمونه است.



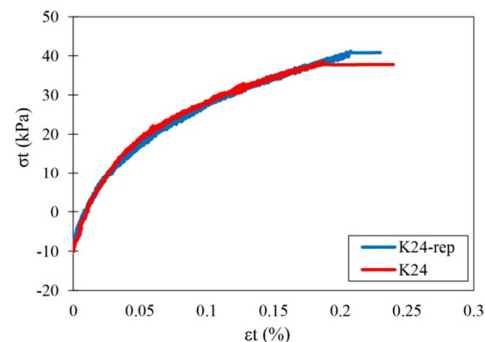
شکل ۱۸- نمودارهای جابه‌جایی- فشار برای ۶ نقطه بیرونی و داخلی هدف خاک  $K_{10}$

شکل ۱۹ نمودار جابه‌جایی- فشار را برای سطوح داخلی و خارجی نمونه استوانه توخالی ساخته شده از خاک  $K_{10}$  که توسط حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی و حسگر فشاری ثبت شده‌اند نشان می‌دهد. حسگرهای ۱، ۲ و ۳ در داخل نمونه واقع شده‌اند و مقادیر جابه‌جایی در این نمودار به صورت مثبت نمایش داده می‌شود. در واقع مثبت بودن مقادیر به معنی دور شدن سطح نمونه از

مقاومت کششی آنها، مقایسه‌ای بین نتایج مقاومت کششی خاک‌های  $K_{10}$  و  $K_{24}$  انجام پذیرفته است.

### ۳-۴- بررسی صحت عملکرد دستگاه

جهت صحت‌سنجی عملکرد دستگاه و بررسی قابل اعتماد بودن نتایج از خاک  $K_{24}$  دو نمونه با خصوصیات کاملاً یکسان ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمایش دو نمونه در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج به شکل مطلوبی بر یکدیگر منطبق بوده و در عمل، نتایج تکرار شده‌اند. این مساله نشان می‌دهد نمونه‌سازی مناسب و همگن و همچنین عملکرد دستگاه صحیح است و نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها قابل اعتماد و تکرارپذیر خواهند بود. نحوه دستیابی به این منحنی‌های تنش- کرنش در ادامه توضیح داده شده‌اند.



شکل ۱۷- بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها

### ۴- نتایج و تحلیل

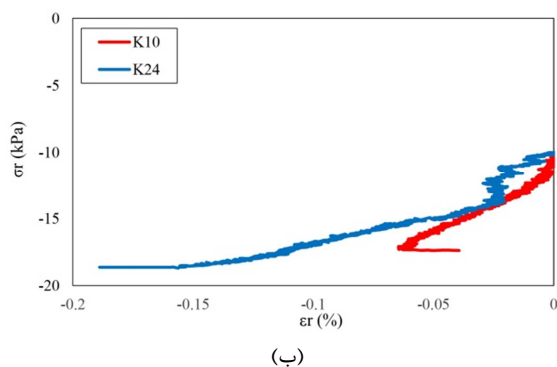
#### ۴-۱- نمودارهای جابه‌جایی- فشار ثبت شده توسط حسگرهای جابه‌جایی

شکل ۱۸ نمودار جابه‌جایی- فشار را برای سطوح داخلی و خارجی نمونه استوانه توخالی ساخته شده از خاک  $K_{10}$  که توسط حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی و حسگر فشاری ثبت شده‌اند نشان می‌دهد. حسگرهای ۱، ۲ و ۳ در داخل نمونه واقع شده‌اند و مقادیر جابه‌جایی در این نمودار به صورت مثبت نمایش داده می‌شود. در واقع مثبت بودن مقادیر به معنی دور شدن سطح نمونه از



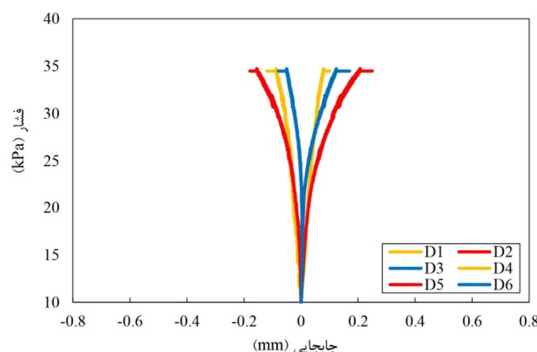
کششی ۳۰ کیلوپاسکال را از خود نشان داده است؛ این در حالی است که خاک  $K_{24}$  تا حدود ۳۸ کیلوپاسکال مقاومت کرده است. بنابراین مشاهده می‌شود که خاک دارای شاخص خمیری کمتر مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد. خاک‌های ریزدانه به دلیل چسبیده بودن از خود مقاومت کششی نشان می‌دهند. بنابراین چنانچه میزان چسبندگی خاک ریزدانه‌ای بیشتر باشد مقاومت کششی آن بیشتر خواهد بود. لذا خاک  $K_{24}$  که میزان چسبندگی بیشتری دارد، مقاومت کششی بیشتری نسبت به خاک  $K_{10}$  از خود نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که خاک دارای شاخص خمیری ۱۰ درصد، در کرنش حدود ۰/۶ درصد دچار گسیختگی شده و در خاک دارای شاخص خمیری ۲۴ درصد، کرنش گسیختگی حدود ۰/۱۸ درصد است. بنابراین خاک  $K_{10}$  رفتار نرم‌تری از خود نشان داده است.

به منظور ایجاد نیروی کششی در جدار نمونه از داخل و خارج نمونه به آن نیروی فشاری اعمال می‌شود اگرچه اختلاف فشار داخل و خارج نمونه از لحاظ مماسی به آن تنش کششی اعمال می‌کند، اما از لحاظ شعاعی به نمونه نیروی فشاری اعمال می‌شود. شکل ۲۰- ب نمودارهای تنش-کرنش شعاعی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر تنش در این نمودار به دلیل فشاری بودن و مقادیر کرنش نیز به دلیل کاهش بودن (فشرده شدن) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲۰- الف) منحنی تنش مماسی کششی-کرنش مماسی و ب) منحنی تنش شعاعی کششی-کرنش شعاعی برای خاک‌های  $K_{10}$  و  $K_{24}$

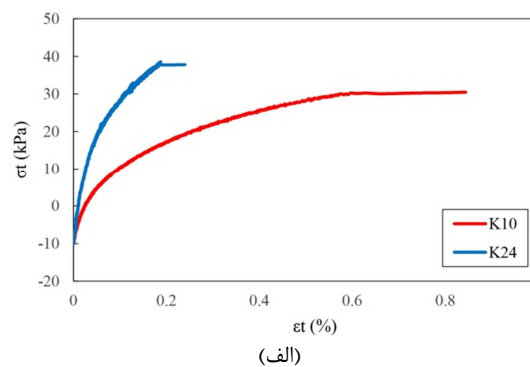
میلی‌متر و سطح خارجی نمونه جابه‌جایی متوسط ۰/۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در لحظه گسیختگی جدار نمونه به طور متوسط ۰/۰۴ میلی‌متر فشرده شده است.



شکل ۱۹- نمودارهای فشار- جابه‌جایی برای ۶ نقطه بیرونی و داخلی هدف خاک  $K_{24}$

#### ۴-۲- نمودارهای تنش-کرنش کششی و نحوه گسیختگی

با توجه به روابط ارائه شده در قسمت مبانی تئوریک دستگاه، مقادیر تنش و کرنش (مماسی و شعاعی) برای هر یک از نمونه‌ها براساس مقادیر فشار و جابه‌جایی ترسیم شده در شکل ۲۰ به دست می‌آیند. در شکل ۲۰- الف نمودارهای تنش-کرنش مماسی (کششی) نمونه‌های خاک  $K_{10}$  و  $K_{24}$  نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر تنش در این نمودار به دلیل کششی بودن و مقادیر کرنش نیز به دلیل افزایشی بودن مثبت نمایش داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که خاک  $K_{10}$  مقاومت

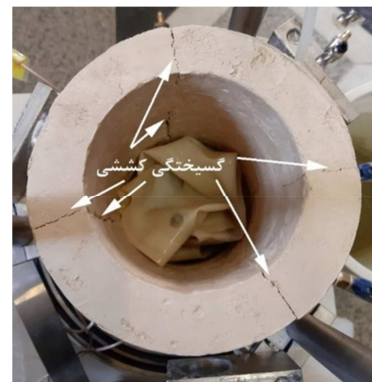


توسعه ترک‌های کششی ایجاد شده به صورت سرتاسری در کل ارتفاع نمونه و به صورت قائم است. این مسأله نشان می‌دهد که تنش فشاری داخلی، به صورت یکنواخت در ارتفاع نمونه توزیع شده و امکان استفاده از معادلات تئوریک برای محاسبه تنش و کرنش کاملاً امکان‌پذیر و دقیق است. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود، هیچگونه تغییری در توسعه ترک در مرز بین لایه‌ها مشاهده نمی‌شود و این مسأله بیانگر آن است که نمونه‌سازی مطلوب بوده و اثر نمونه‌سازی بر روی نتایج حداقل است.



(ب)

ملاحظه می‌شود که در زمان گسیختگی کششی، در نمونه  $K_{24}$  تنش فشاری ۱۸ کیلوپاسکال و در نمونه  $K_{10}$  تنش فشاری ۱۶ کیلوپاسکال ایجاد می‌شود. کرنش شعاعی برای خاک  $K_{24}$  حدود ۰/۱۵ درصد، و برای خاک  $K_{10}$  حدود ۰/۰۵ درصد است. تصویر نمونه رسی  $K_{24}$  پس از گسیختگی در شکل ۲۱-الف ملاحظه می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود در این نمونه در اثر تنش کششی چهار ترک سراسری ایجاد شده است. ترک‌ها حدوداً دوبه‌دو در مقابل هم واقع شده‌اند؛ این موضوع نشان‌دهنده همگنی ساخت نمونه و یکنواخت بودن رفتار آن در سرتاسر نمونه است. شکل ۲۱-ب نشان‌دهنده



(الف)

شکل ۲۱- نحوه گسیختگی نمونه، (الف) از نمای بالا و (ب) توسعه گسیختگی کششی در سرتاسر نمونه به صورت قائم

## ۵- نتیجه‌گیری

- ۴- با افزایش شاخص خمیری خاک از ۱۰ به ۲۴ درصد، مقاومت کششی از ۳۰ به ۳۸ کیلوپاسکال افزایش و کرنش گسیختگی از ۰/۶ تا ۰/۱۸ درصد کاهش پیدا می‌کند.
- ۵- تعداد و نحوه توسعه ترک‌های کششی در نمونه‌ها نشان‌دهنده صحت استفاده از معادلات تئوریک برای محاسبه منحنی‌های تنش-کرنش کششی است.

## قدردانی

از جناب آقای مهندس سلیمی کارشناس باتجربه آزمایشگاه خاک دانشگاه تهران که در راه‌اندازی دستگاه بسیار همکاری نمودند، تشکر و قدردانی ویژه می‌شود.

- ۱- در این پژوهش یک سلول استوانه توخالی با قابلیت اندازه‌گیری مقاومت کششی خاک طراحی، ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفت.
- ۲- صحت‌سنجی عملکرد دستگاه با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مشابه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان‌دهنده تکرارپذیر بودن نتایج است.
- ۳- منحنی‌های تنش-کرنش کششی برای نمونه‌های رسی با استفاده از روابط موجود بر استوانه توخالی جدار ضخیم ترسیم شد. رسم منحنی‌های فوق برای آزمایش استوانه توخالی کششی برای اولین بار صورت می‌پذیرد.

## مراجع

- [1] Vaníček, I., Jirásko, D., & Vaníček, M. (2020). *Modern Earth Structures for Transport Engineering: Engineering and Sustainability Aspects*. CRC Press <https://doi.org/10.1201/9780429263668>.
- [2] Viswanadham, B., Jha, B., & Pawar, S. (2010). "Experimental study on flexural testing of compacted soil beams", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(5), 460-468.
- [3] Puppala, A. J., & Pedarla, A. (2017). "Innovative ground improvement techniques for expansive soils", *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 1-15.
- [4] Kocasoy, G., & Curi, K. (1995) "The Ümraniye-Hekimbaşı open dump accident", *Waste management & research*, 13(4), 305-314.
- [5] Hudson, W. R., & Kennedy, T. W. (1968). *An indirect tensile test for stabilized materials*. Center for Highway Research, University of Texas at Austin.
- [6] Ajaz, A., & Parry, R. (1975). "Stress-strain behaviour of two compacted clays in tension and compression", *Geotechnique*, 25(3), 495-512.
- [7] Dass, R., Yen, S., Puri, V., Das, B., & Wright, M. (1993). "Tensile stress-strain behavior of lightly cemented sand", *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 30(7), 711-714.
- [8] Kim, T.-H., & Hwang, C. (2003). "Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content", *Engineering geology*, 69(3-4), 233-244.
- [9] Nahlawi, H., Chakrabarti, S., & Kodikara, J. (2004). "A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials", *Geotechnical Testing Journal*, 27(4), 356-361.
- [10] Ammeri, A., Jamei, M., Guiras, H., Bouassida, M., Villard, P., Plé, O., Camp, S., & Gourc, J.P. (2006). "A Numerical study of compacted clay tensile strength by discrete element modelling: A bending test application", *First Euro Mediterranean In Advance on Geomaterials and Structures*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01099835>
- [11] Lu, N., Wu, B., & Tan, C. P. (2007). "Tensile strength characteristics of unsaturated sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 144-154.
- [12] Tamrakar, S. B., Mitachi, T., & Toyosawa, Y. (2007). "Factors affecting tensile strength measurement and modified tensile strength measuring apparatus for soil, in Experimental Unsaturated Soil Mechanics", *Springer*, 207-218.
- [13] Zeh, R. M., & Witt, K. J. (2007). "The tensile strength of compacted clays as affected by suction and soil structure, in Experimental unsaturated soil mechanics", *Springer*, 219-226.
- [14] Wang, J.-J., Zhu, J.-G., Chiu, C., & Zhang, H. (2007). "Experimental study on fracture toughness and tensile strength of a clay", *Engineering Geology*, 94(1-2), 65-75.
- [15] Arslan, H., Sture, S., & Batiste, S. (2008). "Experimental simulation of tensile behavior of lunar soil simulant JSC-1", *Materials Science and Engineering: A*, 478(1-2), 201-207.
- [16] Kim, T.-H., & Sture, S. (2008). "Capillary-induced tensile strength in unsaturated sands", *Canadian Geotechnical Journal*, 45(5), 726-737.
- [17] Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X., & Shi, B. (2014). "Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 133-137.
- [18] Divya, P., Viswanadham, B., & Gourc, J. (2014). "Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests", *Journal of Materials in civil Engineering*, 26(1), 14-23.
- [19] Tang, C.-S., Pei, X.-J., Wang, D.-Y., Shi, B., & Li, J. (2015). "Tensile strength of compacted clayey soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014122.
- [20] Zhang, B.-y., Li, Q.-m., Yuan, H.-n., & Sun, X. (2015). "Tensile fracture characteristics of compacted soils under uniaxial tension", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10), 04014274.
- [21] Tang, C.-S., Wang, D.-Y., Cui, Y.-J., Shi, B., & Li, J. (2016). "Tensile strength of fiber-reinforced soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031.
- [22] Li, Y., Ling, X., Su, L., An, L., Li, P., & Zhao, Y. (2018). "Tensile strength of fiber reinforced soil under freeze-thaw condition", *Cold Regions Science and Technology*, 146, 53-59.
- [23] He, S., & Bai, H. (2019). "Elastic-Plastic Behavior of Compacted Loess under Direct and Cyclic Tension", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/6038505>.
- [24] Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2019). "Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test", *Journal of Building Engineering*, 24, 100748.
- [25] Wong, C. K., Wan, R. G., & Wong, R. C. (2020). "Tensile and shear failure behaviour of compacted clay-hybrid failure mode", *International journal of geotechnical engineering*, 14(3), 231-241.
- [26] Anagnos, J. N., Kennedy, T. W., & Hudson, W. R. (1970). *Evaluation and Prediction of Tensile Properties of Cement-Treated Materials*. Center for Highway Research, University of Texas, Austin
- [27] Krishnappa, A., & Eisenstein, Z. (1974). "Brazilian tensile test for soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 11(4), 632-642.

- [28] Consoli, N. C., da Fonseca, A. V., Cruz, R. C., & Silva, S. R. (2011). "Voids/cement ratio controlling tensile strength of cement-treated soils", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 137(11), 1126-1131.
- [29] Stracke, F., Jung, J. G., Korf, E. P., & Consoli, N. C. (2012). "The influence of moisture content on tensile and compressive strength of artificially cemented sand", *Soils Rocks*, 35(3), 303-308.
- [30] Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B. B., & Nahazanan H. (2015). "Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil", *Measurement*, 59, 372-381.
- [31] Gaspar, T. A. V. (2017). *Investigating the tensile behaviour of unsaturated soils using the Brazilian disc test*. MSc Thesis, Faculty of Engineering, University of Pretoria.
- [32] Yang, B.-h., Weng, X.-z., Liu, J.-z., Kou, Y.-n., Jiang, L., Li, H.-l., Yan, X.-c. (2017). "Strength characteristics of modified polypropylene fiber and cement-reinforced loess", *Journal of Central South University*, 24(3), 560-568.
- [33] Baldovino, J. A., Moreira, E. B., Izzo, R. L. d. S., & Rose, J. L. (2018). "Empirical relationships with unconfined compressive strength and split tensile strength for the long term of a lime-treated silty soil", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 06018008.
- [34] Khajeh, A., Mola-Abasi, H., & Naderi Semsani, S. (2019). "Tensile strength parameters controlling of zeolite-cemented sands", *Scientia Iranica*, 26(1), 213-223.
- [35] Gao, C., Du, G., Guo, Q., Xia, H., Pan, H., & Cai, J. (2020). "Dynamic and Static Splitting-Tensile Properties of Basalt Fiber-Reinforced Cemented Clay Under Freeze-Thaw Cycles", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10), 06020014.
- [36] Nezhad, M. G., Tabarsa, A., & Latifi, N. (2021). "Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), 626-642.
- [37] Guo, P., Gu, J., Su, Y., Wang, J., & Ding, Z. (2021). "Effect of cyclic wetting-drying on tensile mechanical behavior and microstructure of clay-bearing sandstone", *International Journal of Coal Science & Technology*, 1-13.
- [38] He, S., Wang, X., Bai, H., Xu, Z., & Ma, D. (2021). "Effect of fiber dispersion, content and aspect ratio on tensile strength of PP fiber reinforced soil", *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1613-1621.
- [39] MN, J., AW, A.-D., & MT, A.-L. (2008). "Tensile strength of natural and lime stabilized Mosul clay", *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 16(2), 1-11.
- [40] Correia, A. A., Oliveira, P. J. V., & Custódio, D. G. (2015). "Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders", *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2), 97-106.
- [41] Al-Hussaini, M. (1981). *Tensile properties of compacted soils, in Laboratory Shear Strength of Soil*. ASTM International, 740, 207-225.
- [42] Timoshenko, S. (1940). *Strength of Materials*. Part I (1940), Part II (1941). New York. Van Nostrand.
- [43] Pourzargar, A. (2017). *Application of suction stress concept to partially saturated compacted soils*. PhD Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Ruhr university bochum.