

## مقایسه حد روانی حاصل از روش جام کاساگرانده و نفوذ مخروط برای خاک‌های مخلوط ماسه و رس

محمود نیکخواه شه‌میرزادی<sup>۱\*</sup>، قاسم اعرابی<sup>۲</sup>، مینوزه‌را حافظی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

### چکیده

حد روانی یکی از ویژگی‌های مهم خاک است و تاثیر زیادی بر رفتار آن دارد. حد روانی به عنوان نقطه‌ای است که رفتار خاک رس از حالت خمیری به مایع تغییر می‌کند. مقاومت برشی این خاک در رطوبت نزدیک به حد روانی، بسیار کم است. بنابراین تعیین دقیق خواص خمیری خاک دارای اهمیت فراوانی است. در این پژوهش آزمایشگاهی، تاثیر ماسه بر حد روانی خاک مخلوط، رابطه بین حد روانی و درصد ماسه و رابطه بین حد روانی روش‌های نفوذ مخروط و جام کاساگرانده با پایه سخت مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار حد روانی برای رس بنتونیت دستگاه کاساگرانده برابر ۷۸ و دستگاه نفوذ مخروط برابر ۸۷ به دست آمد. با افزایش درصد ماسه، حد روانی کاهش یافت، رابطه حد روانی بر حسب درصد ماسه، خطی بود و مقدار ضریب تعیین برای آزمایش‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط به ترتیب برابر ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۹ بدست آمد. در رس بنتونیت، حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط حدود ۱۲ درصد بیشتر از حد روانی حاصل از دستگاه کاساگرانده بود. با کاهش حد روانی خاک مخلوط، اختلاف بین نتایج حاصل از دو دستگاه آزمایش افزایش یافت.

**کلیدواژه‌ها:** حد روانی، ماسه، بنتونیت، کاساگرانده، نفوذ مخروط

### ۱- مقدمه

خمیری خاک رس، معمولا حد خمیری<sup>۲</sup> (PL) نامیده می‌شود. حد روانی همراه با حد خمیری، مهم‌ترین حدود آتربرگ می‌باشند که در طبقه‌بندی خاک‌های چسبنده و رفتار آنها کاربرد دارند. آتربرگ، دریافت که خواص خمیری، ویژگی خاصی از خاک رس است.

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری و مشخص کردن خواص خمیری خاک رسی وجود دارد. دو روش کاساگرانده<sup>۳</sup> و نفوذ مخروط<sup>۴</sup> بیشتر برای تعیین حد روانی خاک‌ها استفاده می‌شوند. در عمل، هر دو دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط در نقاط مختلف

رفتار خاک چسبنده به عوامل زیادی بستگی دارد. مهمترین آن شامل ترکیب معدنی، ساختمان و میزان رطوبت هستند. بسته به میزان رطوبت، خاک چسبنده می‌تواند در حالت‌های مختلف فیزیکی، ساختاری متفاوت داشته باشد. پایداری خاک با توجه به میزان رطوبت آن در مراحل جامد، خمیری و مایع، حدود آتربرگ نامیده می‌شوند. حدود آتربرگ، نقش مهمی در ارزیابی و طبقه‌بندی رس‌ها دارند. آتربرگ رفتار خاک رس را بسته به درصد رطوبت آن در انواع مختلف تحت عنوان حدود آتربرگ تقسیم‌بندی نمود. درصد رطوبت خاک در مرز بین حالت مایع و خمیری را حد روانی<sup>۱</sup> (LL) گویند. حداقل مقدار آب لازم برای ایجاد حالت

<sup>3</sup> Casagrande

<sup>4</sup> Cone penetrometer

<sup>1</sup> Liquid limit

<sup>2</sup> Plastic limit

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۵۳۱۵۱۱۲

سرعت چرخش میل لنگ و غیره. ۵- دشواری تعیین زمانی که شیار بسته است.

با این وجود، این روش بسیار وابسته به شخصی است که با دستگاه کاساگرانده کار می‌کند. بنابراین کار برای تکرار نتایج زمانی که همان آزمایش با همان ماده توسط فرد دیگری انجام می‌شود، سخت است. زمانی که از دستگاه نفوذ مخروط استفاده می‌شود باید از حالت مخروطی آگاه بود، چون یک مخروط فرسوده می‌تواند بر ارتفاع سقوط و همچنین نتایج حد روانی تاثیر بگذارد. حساب-های هوای محبوس در اطراف محل نفوذ مخروط در خاک رس، می‌توانند بر عمق نفوذ اندازه‌گیری شده تاثیرگذار باشند.

آزمایش نفوذ مخروط، به زمان کمتری نیاز دارد و در مقایسه با آزمایش جام، آسان‌تر است. مزیت دستگاه نفوذ مخروط نسبت به کاساگرانده این است که عملیات دستگاه توسط اپراتور تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد و به این ترتیب نتایج مستقل از کاربر، قابل مقایسه است. روش نفوذ مخروط آسان‌تر، سریع‌تر و کم‌تر به عوامل ذهنی (تکرارپذیری بهتر آزمایش) حساس است.

فنگ<sup>۸</sup> (۲۰۰۴)، ثابت بیشتر، قابلیت تکرارپذیری بهتر، تعیین راحت‌تر و وابستگی کمتر به اپراتور را از جمله مزایای روش مخروط نفوذ اعلام نمود. بعضی از پژوهشگران معتقدند که نفوذ مخروط، تکرارپذیری بالاتری نسبت به جام کاساگرانده دارد (اوکلی<sup>۹</sup>، ۲۰۲۱؛ رحمان<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). برای خاک‌های با خاصیت خمیری کم یا غیرخمیری، روش کاساگرانده نسبت به روش نفوذ مخروط، کاربرد کمتری دارد (پراکاش و سریده‌اران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۲۲).

با این حال، بنبو و بریج واتر<sup>۱۲</sup> (۱۹۹۳) برخی از عوامل را گزارش دادند که می‌توانند دقت آزمون نفوذ را محدود کنند. اگر عمق نفوذ بیش از حد کوچک باشد، دقت آن محدود می‌شود. اگر نمونه به جای خمیری غالباً چسبناک باشد، نفوذ آن به زمان نفوذ بستگی دارد. علاوه بر این، نیروهای ناشی از کاهش سرعت مخروط در نظر گرفته نمی‌شوند.

گرونچ و همکاران (۲۰۱۱) حد روانی رس با حالت خمیری (پلاستیسیته) بالا را با استفاده از دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط مورد مقایسه قرار دادند. در حد روانی ۲۰۰، نتایج حاصل از دو روش، مساوی بودند. برای مقادیر حد روانی کمتر از ۲۰۰، حد روانی حاصل از روش نفوذ مخروط بیشتر از روش کاساگرانده بود.

دی متئو<sup>۱۳</sup> حد روانی حاصل از جام کاساگرانده و نفوذ مخروط خاک‌های با خاصیت خمیری کم تا متوسط را بررسی نمود. نتایج

دنیا برای مباحث ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (استراز<sup>۵</sup>، ۲۰۲۲).

آزمایش حد روانی، که برای اولین بار توسط آتربرگ (۱۹۱۱) پیشنهاد شد و بعدها توسط کاساگرانده (۱۹۳۲ و ۱۹۵۸) استانداردسازی شد، یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین آزمایش‌های مکانیک خاک برای طبقه‌بندی خاک‌های ریزدانه در مهندسی ژئوتکنیک است.

آزمایش نفوذ مخروط مطابق استاندارد BS 1377 انجام می‌شود. استانداردهای انگلیسی (BS1377:Part2,2003) روش نفوذ مخروط را به عنوان روش پایه و روش کاساگرانده را به عنوان روش جایگزین ارائه داده‌اند. با این حال، انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM D 4318-2010) روش کاساگرانده را توصیه می‌کند.

تفاوت مهم این است که پایه دستگاه کاساگرانده تعریف شده در BS 1377:Part 2 (2003) نسبتاً نرم‌تر از تعریف دستگاه کاساگرانده در ASTM D4318 (2010) است. همانطور که کاساگرانده (۱۹۵۸) اشاره کرد، سختی پایه تاثیر مستقیمی بر مقدار حد روانی دارد. کاساگرانده دریافت که مقدار حد روانی به دست آمده از دستگاه آزمایشگاه با پایه نرم، تا ۴ درصد بیشتر از دستگاه‌های با پایه سخت است.

اما روش‌های فوق برای تعیین حد روانی، دارای مزایا، معایب و محدودیت‌هایی هستند. آزمایش کاساگرانده، یک آزمون برش دینامیکی است و نتایج آن ممکن است توسط بسیاری از عوامل بیرونی و درونی، از جمله، تفاوت در طریقه چرخاندن تحت تاثیر قرار گیرد. این آزمایش به تجربه اپراتور بسیار حساس است.

گرونچ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۱) عوامل تاثیرگذار بر نتایج آزمایش جام کاساگرانده را به صورت زیر اعلام نمودند:

۱- سرعت سقوط (افتادن) جام ۲- قضاوت در مورد زمانی که طول شیار بسته شده به ۱۲/۷ میلی‌متر می‌رسد. ۳- موقعیت (قرار دادن) نمونه در جام ۴- شیار زدن ۵- ارتفاع سقوط جام. عوامل دیگری مانند مواد و موقعیت پایه و جام، سختی پایه و ابزار شیارزنی ممکن است بر روی نتایج تاثیر بگذارند.

نتایج حد روانی حاصل از دستگاه کاساگرانده می‌تواند به عوامل زیر بستگی داشته باشد (اوزر<sup>۷</sup>، ۲۰۰۹):

۱- تغییر جرم و ضخامت نمونه‌های خاک که روی جام دستگاه قرار می‌گیرند. ۲- حضور احتمالی حباب‌های هوا در خاک که در نزدیکی شیار باقی مانده است. ۳- تفاوت در آرایش ذرات هنگام قرار دادن نمونه خاک در جام. ۴- اثر اپراتور، مانند برش شیار،

<sup>10</sup> Rehman

<sup>11</sup> Prakash and Sridharan

<sup>12</sup> Benbow and Bridgwater

<sup>13</sup> Di Matteo

<sup>5</sup> Straž

<sup>6</sup> Gronbech

<sup>7</sup> Ozer

<sup>8</sup> Feng

<sup>9</sup> O'Kelly

رفتار خاک‌های مخلوط ماسه و رس بنتونیت و نیز روشن ساختن جنبه‌های مختلف رفتاری آن احساس می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبلی، تعدادی پژوهش آزمایشگاهی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. اما در داخل کشور پژوهش‌های کمی در این زمینه صورت پذیرفت، لذا انجام پژوهش جامع‌تری که بتواند تأثیر ماسه بر حد روانی خاک مخلوط را به‌خوبی نمایان سازد، ضروری به نظر می‌رسد، بنابراین در این پژوهش، با استفاده از دستگاه‌های آزمایش کاساگرانده و نفوذ مخلوط، حد روانی خاک مخلوط مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این نکات، بررسی اخیر نقش زیادی را با انجام تحلیل رابطه‌های میان دو روش برای تعیین حد روانی و بررسی خاک‌هایی که دارای مقادیر روانی کمتر از ۹۰ درصد می‌باشند ایفا می‌کند. در این مقاله، رابطه بین حد روانی روش‌های نفوذ مخروط و جام کاساگرانده خاک‌های مخلوط ماسه و رس مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، مقایسه مقادیر حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده با پایه سخت با روش نفوذ مخروط و ارائه رابطه بین حد روانی حاصل از دو روش بر حسب درصد ماسه در خاک مخلوط است.

**جدول ۱- رابطه بین حد روانی نفوذ مخروط و جام کاساگرانده با پایه سخت تعدادی از پژوهش‌های قبلی**

مرجع	رابطه پیشنهادی	محدوده حد روانی
بولویزو <sup>۱۷</sup> و همکاران (۱۹۸۵)	$LL_{cone} = 0.97LL_{cup} + 1.19$	۳۴-۱۳۴
دراگونی <sup>۱۸</sup> و همکاران (۲۰۰۸)	$LL_{cone} = 1.02LL_{cup} + 2.87$	۲۸-۷۴
فوجتووا <sup>۱۹</sup> و همکاران (۲۰۰۹)	$LL_{cone} = 1.00LL_{cup} + 2.44$	۲۰-۵۰
گرونچ و همکاران (۲۰۱۰)	$LL_{cone} = 1.01LL_{cup} + 3.49$	۸۰-۲۱۵
دی متو (۲۰۱۲)	$LL_{cone} = 1.00LL_{cup} + 2.20$	۲۴-۵۰
کایابالی <sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۱۶)	$LL_{cone} = 1.00LL_{cup} + 2.00$	۲۸-۱۶۶
کولاروس <sup>۲۱</sup> (۲۰۱۶)	$LL_{cone} = 1.03LL_{cup} - 4.93$	۵۳-۷۵
نیازی و همکاران (۲۰۲۰)	$LL_{cone} = 0.89LL_{cup} + 4.2$	۱۱-۶۵
دیاز <sup>۲۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱)	$LL_{cone} = 1.1892LL_{cup} - 3.426$	۱۷-۶۳

**۲- مواد و روش‌ها**  
**۲-۱- مصالح مصرفی**

این پژوهش با مقایسه ۱۰۰ مقدار از حدود روانی با گستره‌ای میان ۲۰ و ۵۰ درصد، نشان داد که حد روانی به دست آمده از روش نفوذ مخروط، حدود ۲ تا ۳ درصد بیشتر از مقدار حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده است.

کابالار و مصطفی<sup>۱۴</sup> تأثیر ماسه بر حد روانی خاک مخلوط رس و ماسه را با استفاده از دستگاه نفوذ مخروط، مورد بررسی قرار دادند. پنج نوع دانه‌بندی مختلف ذرات ماسه با اشکال متفاوت (گرد و زاویه‌دار) به یک رس با حالت خمیری کم با نسبت‌های صفر تا ۵۰ درصد وزنی اضافه شد. داده‌های مربوط به خاک مخلوط رس و ماسه نشان داد که رابطه عمق نفوذ مخروط نسبت به درصد رطوبت، خطی است. حد روانی اندازه‌گیری شده خاک مخلوط، به مقدار کمی تحت تأثیر دانه‌بندی و شکل دانه‌ها در محدوده مقادیر ماسه مورد استفاده بود. رفتار مهندسی مخلوط‌های خاک رس و ماسه با حد روانی یکسان، ممکن است به دلیل نوع و مقدار رس متفاوت باشند (کاراکان<sup>۱۵</sup>، ۲۰۲۲).

هروبسووا<sup>۱۶</sup> و همکاران حد روانی خاک‌های به دست آمده از آزمایش کاساگرانده و روش نفوذ مخروط اصلاح شده را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حد روانی بنتونیت (با خاصیت خمیری بسیار زیاد) بر اساس آزمایش نفوذ مخروط استاندارد (۲۰ میلی‌متر) به میزان قابل توجهی کمتر از حد روانی کاساگرانده است. برای خاک با خاصیت خمیری متوسط، حد روانی کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) بسیار شبیه به حد روانی به دست آمده از روش نفوذ مخروط استاندارد ( $LL_{cone}$ ) است. برای خاک‌های با خاصیت خمیری زیاد، آزمایش نفوذ مخروط استاندارد به طور قابل توجهی حد روانی ( $LL_{cone}$ ) را پایین‌تر از روش جام کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) می‌دهد. در خاک رس بنتونیت، حد روانی به دست آمده از روش نفوذ مخروط، حدود ۱۲ درصد بیشتر از روش کاساگرانده است. در خاک مخلوط با ۵۰ درصد بنتونیت، مقدار حد روانی روش نفوذ مخلوط حدود ۲۵ درصد بیشتر از جام کاساگرانده است. یعنی هرچه خاصیت خمیری خاک مخلوط افزایش یابد، اختلاف بین حد روانی حاصل از دو روش، کمتر می‌شود. در جدول ۱ رابطه بین حد روانی نفوذ مخروط و جام کاساگرانده با پایه سخت تعدادی از پژوهش‌های قبلی ارائه شده است.

با توجه به اهمیت و نقش کلیدی حد روانی در مهندسی ژئوتکنیک، نیاز مبرمی به انجام پژوهش‌های بیشتر در تعیین این ویژگی به روش‌های مختلف، برای حصول یک جمع‌بندی در زمینه

19 Fojtova

20 Kayabali

21 Kollaros

22 Diaz

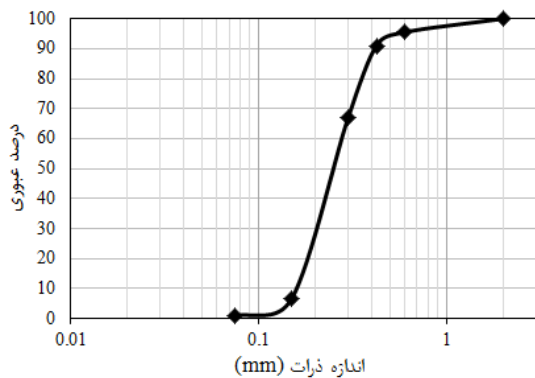
14 Cabalar and Mustafa

15 Karakan

16 Hrubesova

17 Belviso

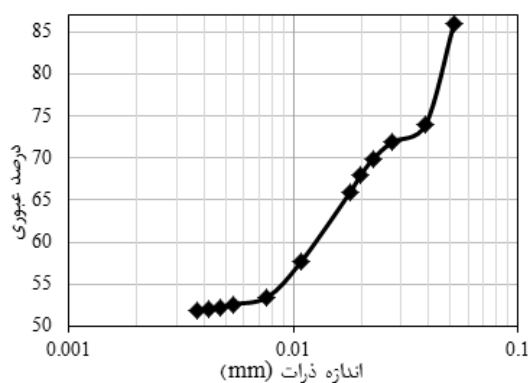
18 Dragoni



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

### ۲-۲-۲- آزمایش دانه‌بندی خاک رس بنتونیت به روش هیدرومتری

برای رسم منحنی دانه‌بندی خاک رسی، از روش هیدرومتری طبق استاندارد ASTM D422 استفاده شد. بعد از انجام مراحل آزمایش طبق استاندارد مذکور، منحنی دانه‌بندی رس بنتونیت، مطابق شکل ۳ به دست آمد.



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی خاک رس بنتونیت

### ۲-۲-۲- روش آماده‌سازی نمونه‌ها

روش آماده‌سازی نمونه خاک برای همه نمونه‌ها یکسان است. ابتدا هر نوع خاک، نمونه برداری شده و اطلاعات اولیه خاک مثل درصد رطوبت اولیه و اندازه ذرات و نحوه جذب آب آن مشاهده و تعیین شد. سپس با توجه به رطوبت اولیه هر خاک، بر پایه وزن خشک آن، مقدار آب و وزن خاک محاسبه گردید. برای انجام آزمایش، مقدار حداقل ۱۰ درصد آب به ترکیب خاک اضافه شد. به طور مثال برای تهیه نمونه خاک مخلوط با ۵۰ درصد ماسه، ۱۰۰ گرم ماسه خشک + ۱۰۰ گرم رس خشک + ۱۰ درصد وزنی کل خاک مخلوط، آب مورد نیاز است. خاک و آب توسط دستگاه همزن مخلوط شده و درصد رطوبت خمیر حاصله، تعیین شد. برای حفظ

### خاک ماسه‌ای

ماسه مورد استفاده در این پژوهش، ماسه نوع ۱۶۱ از منطقه فیروزکوه تهیه شده است که بر اساس طبقه‌بندی خاک‌ها به روش متحد (یونیفاید) در ردیف ماسه بد دانه‌بندی شده<sup>۲۳</sup> (SP) قرار دارد.

### خاک رسی

خاک مورد استفاده در این پژوهش، رس بنتونیت آسیاب شده منطقه شهرستان سمنان است. موقعیت معدن بنتونیت در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت معدن بنتونیت

### خاک مخلوط رس و ماسه

در این پژوهش خاک ماسه‌ای (۰/۰۷۵ تا ۲ میلی‌متر) به عنوان ماده‌ی اصلی و خاک رس بنتونیت (۰/۰۰۴ تا ۰/۰۵۲ میلی‌متر) به عنوان مکمل و عنصر سیمانی دارای چسبندگی به ماسه اضافه شد. در ادامه بسته به نیاز و محدودیت‌های آزمایش، از درصد‌های مختلف ماسه یا رس بنتونیت استفاده شد.

### ۲-۲- روش‌ها

#### ۲-۲-۱- آزمایش دانه‌بندی خاک ماسه‌ای به روش مکانیکی

برای رسم منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای، از روش مکانیکی الک طبق استاندارد ASTM D422 استفاده شد (۲۰۰۷). بعد از انجام مراحل آزمایش طبق استاندارد مذکور، منحنی دانه‌بندی ماسه، مطابق شکل ۲ به دست آمد.

که در آن طول ۱۲/۷ میلی‌متر از شیار استاندارد در اثر اعمال ۲۵ ضربه با سرعت ۲ ضربه در هر ثانیه بسته شود. دو روش برای تعیین حد روانی در این استاندارد ارائه شده است: آزمون چند نقطه‌ای و تک نقطه‌ای. در این پژوهش از روش چند نقطه‌ای به علت دقت بیشتر، استفاده شد. برای انجام این آزمایش، ابتدا ماسه و خاک رس به طور کامل در ظرف اختلاط، هم زده شده و درصد رطوبت آن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که قوام آن به اندازه‌ای برسد که حدود ۲۵ تا ۳۵ ضربه برای بسته شدن شیار جام دستگاه حد روانی لازم باشد. برای این منظور در ابتدا با استفاده از کاردک، بخشی از خاک آماده شده را در جام دستگاه حد روانی، در حالتی که جام روی پایه صلیبی قرار دارد، ریخته و سپس با فشار، درون جام پخش می‌شود. به طوری که عمق آن در عمیق‌ترین نقطه حدود ۸ میلی‌متر شود و سطحی تقریباً افقی تشکیل دهد. حباب‌های هوا از خاک درون جام باید خارج شوند، اما این کار تا حد امکان با کمترین حرکت باید انجام شود. خاک استفاده نشده در ظرف اختلاط نگهداری، قرار گرفته و ظرف با حوله نمدار پوشانیده شده تا رطوبت خاک حفظ شود.

شیارزن را در حالتی که لبه شیب‌دار آن به سمت جلو است، در راستای خطی که بالاترین نقطه روی لبه جام را به پایین‌ترین نقطه متصل می‌کند، روی خاک کشیده تا شیاری در آن ایجاد شود. در هنگام ایجاد شیار، شیارزن در برابر سطح جام نگه داشته شده و در راستای کمان (لبه جام) کشیده می‌شود. هنگام حرکت شیارزن، همواره باید عمود بر سطح جام باشد. در خاک‌هایی که نمی‌توان با یک حرکت و بدون گسیختگی خاک، شیار را در آنها ایجاد کرد، شیار با چندین حرکت شیارزن به تدریج ایجاد می‌شود (شکل ۵). به‌عنوان جایگزین، با استفاده از کاردک، شیار را با ابعادی کمتر از ابعاد الزام شده، برش داده و با شیارزن، به ابعاد نهایی می‌رسد. لازم به ذکر است در این مرحله باید از لغزش خاک نسبت به سطح جام جلوگیری شود.

قبل از سقوط جام، باید بررسی شود که خرده‌های خاک بر روی پایه یا در زیر جام وجود نداشته باشد. دسته با نرخ سقوط ۱/۹ تا ۲/۱ ضربه در ثانیه، تا زمانی که دو بخش خاک در پایین شیار در طول ۱۲/۷ میلی‌متر به هم برسند، چرخانده می‌شود (شکل ۵). پایه دستگاه در حالی که دسته می‌چرخد نباید با دست نگه داشته شود. توصیه می‌شود برای تعیین میزان بسته شدن شیار به اندازه ۱۲/۷ میلی‌متر، از خط‌کش استفاده شود.

باید دقت نمود تا وجود حباب هوا، موجب بسته شدن زود هنگام شیار نشود. برای این کار دقت شود دو وجه شیار با شکل تقریباً یکسان به سوی هم روان شده باشند.

رطوبت و نفوذ آب به تمام بخش‌ها یا دانه‌های ماسه و رس همگن، خاک مخلوط به مدت ۲۴ ساعت در محفظه‌ای قرار داده شد. پس از این مدت و بلافاصله قبل از شروع آزمایش‌ها، مجدداً نمونه به خوبی هم زده شد. در شکل ۴، ابزار مربوط به آماده‌سازی نمونه‌های همگن نشان داده شده است.



شکل ۴- روش آماده‌سازی نمونه‌های خاک مخلوط همگن

#### ۲-۲-۴- همگن‌سازی نمونه‌ها

برای هر دو روش جام کاساگرانده و نفوذ مخروط، خاک مخلوط مورد استفاده باید همگن باشد. همگن‌سازی خاک، بخش مهمی از آزمایش حد روانی است و باید با احتیاط انجام شود. اگر به طور کافی مخلوط رس و ماسه را همگن نکنیم یا هوا وارد آن باشد، تاثیر زیادی بر حد روانی دارد. باید کل مخلوط ماسه و رس بعد از همگن‌سازی، یکدست و یکسان شده و اندازه‌ی هر نوع خاک و یا در هر نقطه‌ای از آن یکسان و ثابت باشد. در همگن‌سازی، دما و رطوبت هوا، سرعت، قدرت و زمان مخلوط کردن توسط دستگاه همزن، تاثیرگذار است بنابراین باید این همگن‌سازی به صورتی انجام شود که علاوه بر حصول نتیجه، باعث نفوذ هوا با از بین رفتن رطوبت و شکل و بافت خاک نشود. توصیه می‌شود از دستگاه مخلوط کن مناسب با اندازه و دانه بندی خاک و در دور پایین استفاده شود. آب باید به صورت یکنواخت و در طول هم‌زدن نمونه، به مخلوط اضافه شود. مدت زمان ترکیب کردن مخلوط به اندازه‌ای باشد که خاک همگن شده و رطوبت خاک حفظ گردد.

#### ۲-۲-۵- آزمایش حد روانی بر اساس روش کاساگرانده

مطابق با استاندارد ASTM D4318 حدود آتربگ خاک تعیین شد. در روش کاساگرانده، از یک جام استاندارد فلزی استفاده می‌شود که در آن یک خمیر خاک قرار می‌گیرد و سپس توسط یک شیار زن، برشی در خاک ایجاد می‌شود. جام بر روی پایه ساخته شده از مواد استاندارد می‌افتد. هنگام استفاده از دستگاه کاساگرانده، حد روانی به عنوان درصد رطوبتی تعریف شده است

۲۵ ضربه، از روی نمودار استخراج و به عنوان حد روانی در نظر گرفته شد.

۲-۲-۶- آزمایش حد روانی بر اساس روش نفوذ مخروط در استاندارد BS1377، از یک مخروط کوچک از فولاد ضد زنگ متصل به میله که مطابق شکل ۶ استفاده می‌شود. دستگاه نفوذ مخروط شامل یک فنجان نمونه به قطر ۵۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر است. در این آزمایش، یک مخروط با زاویه نوک ۳۰ درجه، طول ۳۵ میلی‌متر و جرم کل ۸۰ گرم در بالای خاک و در تماس با آن نگه داشته می‌شود. سپس این مخروط به طور آزاد برای مدت زمان ۵ ثانیه رها می‌شود که سقوط کند. مقدار رطوبت مربوط به نفوذ مخروط به اندازه ۲۰ میلی‌متر، حد روانی را بیان می‌کند. حد خمیری<sup>۲۴</sup> با تکرار آزمایش به وسیله یک مخروط با شکل هندسی مشابه، اما با جرم ۲۴۰ گرم تعیین می‌شود (یو<sup>۲۵</sup> و همکاران، ۱۹۹۸).

برای انجام آزمایش، نمونه خاک را با مقدار کافی آب مخلوط می‌کنند تا خمیر یکنواختی به دست آید. سپس قسمی از این خمیر را در داخل استوانه فلزی که قطر داخلی آن ۵۵ و عمق آن ۴۰ میلی‌متر است، قرار می‌دهند. سطح آزاد خمیر در داخل استوانه کاملاً صاف می‌شود.



شکل ۵- ایجاد شیار بر روی نمونه خاک در دستگاه کاساگرانده

تعداد ضربه‌های مورد نیاز برای بسته شدن شیار یادداشت شده و درصد رطوبت آزمون تعیین می‌شود. برای این کار، برشی از خاک، تقریباً به پهنای کاردک که از یک لبه تا لبه دیگر خاک با زاویه قائم نسبت به محور شیار امتداد یافته است، چنان برداشته می‌شود که بخش به هم رسیده شیار را در برداشته باشد، آن را در ظرفی با جرم معین قرار داده و پس از تعیین جرم آن، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد گرمخانه قرار داده می‌شود. خاک مانده در جام به ظرف بازگردانیده می‌شود. جام و شیارزن را شسته و خشک نموده و برای آزمون بعدی، جام را دوباره به بدنه متصل می‌کنند. برای افزایش درصد رطوبت خاک و کاهش تعداد ضربه‌هایی که برای بستن شیار نیاز است، به آن آب افزوده می‌شود. برای هر یک از حالت‌هایی که نیازمند ۲۵ تا ۳۵ ضربه، ۲۰ تا ۳۰ ضربه و ۱۵ تا ۲۵ ضربه برای بسته شدن شیار هستند، باید یک آزمون انجام شود. برای هر آزمون، درصد رطوبت آزمون طبق استاندارد ASTM D2216 تعیین شد (۲۰۱۰). توصیه می‌شود جرم‌های اولیه (ظرف به همراه خاک مرطوب) بلافاصله پس از پایان آزمون تعیین شود. اگر انجام آزمون برای بیش از حدود ۱۵ دقیقه متوقف شود، جرم آزمون‌های درصد رطوبت (که پیش از این به دست آمده‌اند) را در زمان توقف تعیین می‌کنند. این روند تا زمانی که حداقل سه نقطه داده با استفاده از دستگاه کاساگرانده به دست آمد و تا زمانی که شیار با ۱۵ تا ۳۵ ضربه با توجه به توصیه ASTM بسته شد ادامه یافت. تغییرات درصد رطوبت و تعداد ضربه در نموداری که محور قائم آن درصد رطوبت و محور افقی آن تعداد ضربه است، ترسیم شده و درصد رطوبت متناظر با

شکل ۶- دستگاه آزمایش نفوذ مخروط

جدول ۲- تکرارپذیری آزمایش کاساگرانده

درصد ماسه	تعداد ضربه	درصد رطوبت	آزمایش اصلی
۷۵	۲۶	۲۱/۲	تکرار
۷۵	۲۶	۲۱/۳	آزمایش اصلی
۷۵	۲۴	۲۱/۸	تکرار
۲۵	۲۰	۵۶/۶	آزمایش اصلی
۲۵	۱۹	۵۷/۱	تکرار

جدول ۳- تکرارپذیری آزمایش نفوذ مخروط

درصد ماسه	عمق نفوذ (میلی-متر)	درصد رطوبت	آزمایش اصلی
۲۵	۲۴/۷	۵۶/۵	تکرار
۲۵	۲۴/۵	۵۷	آزمایش اصلی
۵۰	۲۰	۳۵/۷	تکرار
۵۰	۲۱	۳۶/۱	آزمایش اصلی

جدول ۴- تکرارپذیری آزمایش تعیین حد روانی

دستگاه نفوذ مخروط	دستگاه کاساگرانده	شماره تکرار
۴۷/۷	۳۸/۷	۱
۴۸/۵	۳۹/۶	۲
۴۷/۹	۳۸/۸	۳
۴۸/۴	۳۹/۴	۴
۴۸/۰	۳۹/۰	۵
۴۸/۱	۳۹/۱	میانگین
۰/۳۴	۰/۳۸	انحراف معیار

۳-۲- حد روانی حاصل از دستگاه آزمایش کاساگرانده (استاندارد ASTM 4318)

در شکل ۷، نمودار تغییرات درصد رطوبت بر حسب تعداد ضربه برای خاک مخلوط با مقادیر مختلف ماسه (صفر تا ۷۵ درصد) ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار رطوبت، تعداد ضربه لازم برای بسته شدن طول ۱۲/۷ میلی‌متر از شیار، کاهش می‌یابد. مقدار حد روانی برای رس بنتونیت برابر ۷۸ به‌دست آمد. با ازدیاد مقدار ماسه، شیب و عرض از مبدا خط درصد رطوبت بر حسب تعداد ضربه، کاهش می‌یابد. این نتایج برای خاک مخلوط مورد آزمایش به دست آمده است.

مخروط فلزی به حالت قائم بر سطح نمونه خاک قرار داده می‌شود، به‌گونه‌ای که نوک مخروط مماس بر سطح نمونه خاک باشد. سپس مخروط رها می‌شود تا به داخل خاک نفوذ کند و میزان نفوذ طی ۵ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. مقدار رطوبت خاک باید طوری باشد که اولین خواندن نفوذ مخروط در حدود ۱۵ میلی‌متر باشد. برای سنجش رطوبت، مقداری از خمیر خاک را در یک قوطی ریخته و پس از وزن کردن به گرمخانه منتقل می‌شود. بقیه خمیر موجود در استوانه فلزی را به ظرف اصلی برگردانده و مقداری آب مجدداً به آن اضافه می‌شود و آزمایش تکرار می‌شود. کلیه مراحل آزمایش باید حداقل ۴ بار برای نفوذ بین ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر، تکرار شود و هر بار بر میزان آب به کار برده شده افزوده شود. روند آزمایش باید از حالت خشک خاک به حالت مرطوب باشد. منحنی تغییرات عمق نفوذ مخروط بر حسب میلی‌متر نسبت به رطوبت خاک رسم می‌شود. با برازش یک خط از نتایج آزمایش، حد روانی متناظر با میزان رطوبت مربوط به درجه نفوذ ۲۰ میلی‌متر، تعیین می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

این مطالعه به مقایسه مقادیر حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط، پرداخته است. آزمایش‌ها بر روی خاک رس بنتونیت (صفر درصد ماسه) و خاک مخلوط ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد ماسه انجام شده است.

### ۳-۱- تکرارپذیری آزمایش‌ها

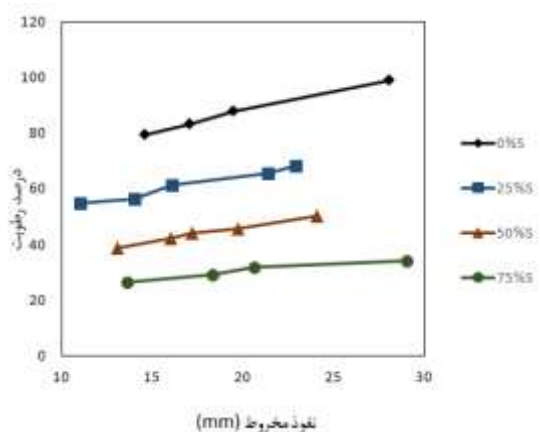
یکی از مسائل مهم در پژوهش‌های آزمایشگاهی، تکرارپذیری آزمایش‌ها است. تکرارپذیری به این معناست که نتایج در تکرار در مرحله اول توسط خود آزمایش‌کننده و در مرحله بعد توسط پژوهشگران دیگر نیز قابلیت تکرار با نتایج یکسان داشته باشد. اگر تکرارپذیری انجام شود و ثابت در نتایج وجود داشته باشد، نتایج مورد قبول است. آزمایش‌ها و پژوهش‌هایی که تکرارپذیری نداشته باشند، از وجهه علمی و اعتبار لازم برخوردار نیستند. در این پژوهش به صورت اتفاقی چندین آزمایش در دستگاه‌های مختلف تکرار و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه چند نمونه آن در جداول ۲ و ۳، آورده شده است. مقدار متوسط خطا در تعیین درصد رطوبت حدود ۱/۲ درصد و متوسط خطا تعداد ضربه آزمایش کاساگرانده حدود ۴/۴ درصد و متوسط عمق نفوذ در آزمایش مخروط نفوذ حدود ۳ درصد است که نشان دهنده قابلیت تکرار آزمایش‌های انجام شده است. در جدول ۴ مقدار میانگین و انحراف معیار ۵ آزمایش حد روانی حاصل از دستگاه‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط ارائه شده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات حد روانی روش کاساگرانده (LL) بر حسب درصد ماسه برای خاک مخلوط

۳-۳- حد روانی حاصل از دستگاه آزمایش نفوذ مخروط (استاندارد BS 1377)

در شکل ۹، نمودار تغییرات درصد رطوبت بر حسب میزان نفوذ مخروط در خاک مخلوط با مقادیر مختلف ماسه ترسیم شده است. مقدار حد روانی خاک پایه برابر ۸۷ است. با ازدیاد مقدار ماسه، شیب و عرض از مبدا خط درصد رطوبت بر حسب مقدار نفوذ، کاهش می‌یابد. این نتیجه مشابه نتایج پژوهش‌های کابالار و مصطفی (۲۰۱۵) روی خاک مخلوط رس و ماسه (۱۰ تا ۵۰ درصد) است که در آن رابطه بین درصد رطوبت و مقدار نفوذ مخروط، خطی بود.



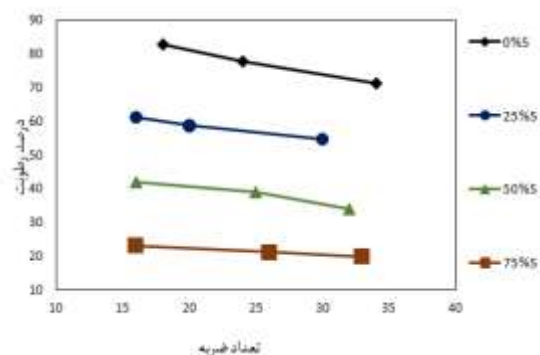
شکل ۹- نمودار تغییرات درصد رطوبت به عمق نفوذ برای خاک مخلوط با مقادیر مختلف ماسه

۳-۳-۱- تاثیر مقدار ماسه بر حد روانی به دست آمده از دستگاه نفوذ مخروط

نمودار تغییرات حد روانی بر حسب درصد ماسه حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. رابطه حد روانی بر حسب درصد ماسه خطی بوده و مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۹۹ است.

$$LL_{cone} = -0.7612S + 86.206 \quad (2)$$

مقدار S حد روانی دستگاه نفوذ مخروط و  $LL_{cone}$  در این رابطه، ماسه بر حسب درصد است. با افزایش میزان ماسه، مقدار حد روانی این نتیجه مشابه یافته‌های پژوهش‌های کابالار و کاهش می‌یابد. مصطفی (۲۰۱۵) روی خاک مخلوط رس و ماسه است.



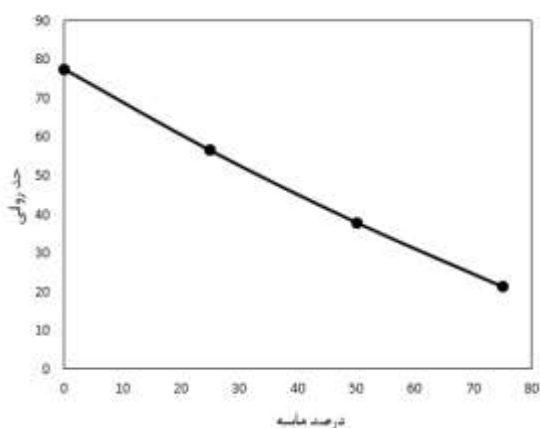
شکل ۷- نمودار تغییرات درصد رطوبت به تعداد ضربه برای خاک مخلوط با مقادیر مختلف ماسه

۳-۲-۱- تاثیر ماسه بر حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده

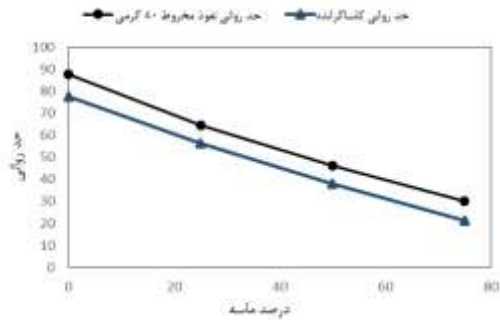
نمودار تغییرات حد روانی بر حسب درصد ماسه در شکل ۸ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد ماسه، حد روانی کاهش می‌یابد، در ضمن رابطه حد روانی بر حسب درصد ماسه، خطی بوده و مقدار ضریب تعیین  $R^2$  برابر ۰/۹۹۷ است.

$$LL_{cup} = -0.7486S + 76.429 \quad (1)$$

در این رابطه،  $LL_{cup}$  حد روانی دستگاه کاساگرانده و S مقدار ماسه بر حسب درصد است. این رابطه کلی نیست و برای خاک مخلوط آزمایش شده، ارائه شده است. خاصیت خمیری، مخصوص خاک رسی است و ماسه فاقد خاصیت خمیری است. به همین دلیل با ازدیاد مقدار ماسه، از حد روانی خاک مخلوط کاسته شده است. در پژوهش کابالار و مصطفی (۲۰۱۵) نیز مشابه این نتیجه حاصل شد.







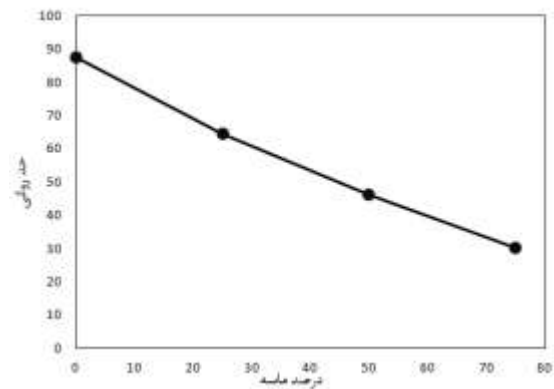
شکل ۱۱- نمودار مقایسه حد روانی بر حسب درصد ماسه خاک مخلوط در آزمایش‌های نفوذ مخروط و کاساگرانده

مطالعات قبلی خواص شاخص مخلوط خاک رس و ماسه، بیانگر کاهش خطی حد روانی با ازدیاد مقدار ماسه است (سید<sup>۲۷</sup> و همکاران، ۱۹۶۴؛ ناگراج و مورتی<sup>۲۸</sup>، ۱۹۸۷؛ تان<sup>۲۹</sup> و همکاران، ۱۹۹۴).

برای خاک‌های رس با خاصیت خمیری کم، مقادیر حد روانی روش نفوذ مخروط  $LL_{cone}$  معمولاً بیشتر از مقادیر روش جام کاساگرانده  $LL_{cup}$  است (گرونیچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ دراگونی و همکاران، ۲۰۰۸؛ کمبل<sup>۳۰</sup>، ۱۹۷۵؛ ویستی و بزریچی<sup>۳۱</sup> (۱۹۸۶)؛ کریستارس، ۱۹۹۱؛ سریدارن و پراکش، ۲۰۰۰).

بر اساس یافته‌های سامپسون و نتربرگ<sup>۳۱</sup> (۱۹۸۵)، ویستی و بزریچی<sup>۳۱</sup> (۱۹۸۶)، لروی و لی بی هان<sup>۳۲</sup> (۱۹۹۶) و سریدارن و پراکش (۲۰۰۰)؛ برای خاک‌هایی با  $LL$  بیشتر از ۶۰ تا ۷۰ درصد، حد روانی بدست آمده از روش جام کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) بیشتر از روش نفوذ مخروط ( $LL_{cone}$ ) است.

در شکل ۱۲ نمودارهای مقایسه‌ای رابطه بین حد روانی حاصل از این پژوهش با تعدادی از پژوهش‌های قبلی نشان داده شده است (سورس<sup>۳۳</sup>، ۱۹۶۰؛ لروئیل و بیهان<sup>۳۴</sup>، ۱۹۹۶؛ کلیو<sup>۳۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ میشرای و همکاران، ۲۰۱۲؛ الشیناوی، ۲۰۱۷). در پژوهش الرحمان<sup>۳۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، حد روانی حاصل از روش مخروط، حدود ۱۶ درصد بیشتر از کاساگرانده بود.



شکل ۱۰- نمودار حد روانی بر حسب درصد ماسه خاک مخلوط در آزمایش نفوذ مخروط

### ۳-۴- مقایسه حد روانی حاصل از دستگاه‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط

در شکل ۱۱، نمودار مقایسه‌ای تغییرات حد روانی به دست آمده از دستگاه‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط نشان داده شده است. رابطه بین حد روانی حاصل از آزمایش‌ها به صورت زیر است:

$$LL_{cone} = 1.022LL_{cup} + 7.58 \quad (۳)$$

در این رابطه،  $LL_{cone}$  حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط و  $LL_{cup}$  حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده است. نکته قابل ذکر اینکه این رابطه صرفاً برای خاک‌های مخلوط مورد آزمایش در این پژوهش به دست آمده و یک رابطه کلی نیست. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مقادیر حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، بطور متوسط حدود ۲۲ درصد بیشتر از دستگاه کاساگرانده است. در رس بنتونیت (ماسه صفر درصد) حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط حدود ۱۲ درصد بیشتر از حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده است. در مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد ماسه خاک مخلوط، حد روانی نفوذ مخروط به ترتیب حدود ۱۴، ۲۱ و ۴۰ درصد بیشتر از حد روانی کاساگرانده است. یعنی با کاهش حد روانی خاک مخلوط، اختلاف بین نتایج حاصل از دو دستگاه آزمایش افزایش می‌یابد.

<sup>32</sup> Leroeuil and Le Bihan

<sup>33</sup> Sowers

<sup>34</sup> Leroueil and Bihan

<sup>35</sup> Claveau

<sup>36</sup> Ur Rehman

<sup>27</sup> Seed

<sup>28</sup> Nagaraj and Morthy

<sup>29</sup> Tan

<sup>30</sup> Campbell

<sup>31</sup> Sampson and Netterberg

۴- نتیجه گیری

مفهوم خاصیت خمیری در بسیاری از حوزه های مهندسی و علوم کاربرد دارد. این مطالعه به مقایسه مقادیر حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط خاک های مخلوط رس و ماسه پرداخته است. تمرکز اصلی این مقاله، بررسی رابطه حد روانی بین آزمایش انجام شده توسط دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط بود. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، نتیجه گیری زیر را می توان در مورد حد روانی خاک مخلوط، انجام داد.

۱- مقدار حد روانی حاصل از دستگاه آزمایش کاساگرانده برای رس بنتونیت برابر ۷۸ به دست آمد. با ازدیاد مقدار ماسه، شیب و عرض از مبدا خط درصد رطوبت بر حسب تعداد ضربه، کاهش می یابد.

۲- با افزایش درصد ماسه، حد روانی کاهش می یابد، در ضمن رابطه حد روانی بر حسب درصد ماسه خطی بوده و مقدار ضریب

تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۹۷ است.

۳- مقدار حد روانی حاصل از دستگاه آزمایش نفوذ مخروط خاک رس بنتونیت برابر ۸۷ است. با ازدیاد مقدار ماسه، شیب و عرض از مبدا خط درصد رطوبت بر حسب مقدار نفوذ، کاهش می یابد.

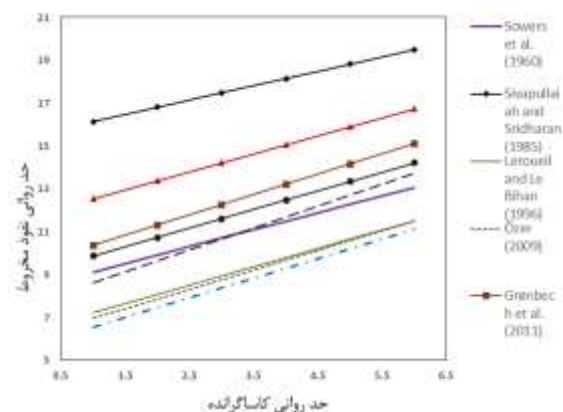
۴- نمودار تغییرات حد روانی بر حسب درصد ماسه حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، خطی بوده و مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۹۹۹ است.

۵- برای خاک های مخلوط مورد مطالعه، رابطه بین حد روانی حاصل از آزمایش نفوذ مخروط ( $LL_{cone}$ ) و آزمایش کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) به صورت زیر است:

$$LL_{cone} = 1.022LL_{cup} + 7.58$$

۶- مقادیر حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، به طور متوسط حدود ۲۲ درصد بیشتر از دستگاه کاساگرانده است. در رس بنتونیت (ماسه صفر درصد) حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط حدود ۱۲ درصد بیشتر از حد روانی به دست آمده از دستگاه کاساگرانده است. در مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد ماسه خاک مخلوط، حد روانی نفوذ مخروط به ترتیب حدود ۱۴، ۲۱ و ۴۰ درصد بیشتر از حد روانی کاساگرانده است.

۷- با کاهش حد روانی خاک مخلوط، اختلاف بین نتایج حاصل از دو دستگاه آزمایش افزایش یافت. به عبارتی دیگر، هرچه خاصیت خمیری خاک مخلوط افزایش یابد، اختلاف بین حد روانی حاصل از دو روش، کمتر می شود.



شکل ۱۲ - نمودارهای مقایسه ای رابطه بین حد روانی حاصل از این پژوهش با تعدادی از پژوهش های قبلی

در جدول ۲ مقادیر حد روانی حاصل از روابط پژوهشگران مختلف برای حد روانی جام کاساگرانده برابر ۵۰ ارائه شده است. مقدار حد روانی حاصل از رابطه در روش مخروط برای این پژوهش برابر ۵۸/۶۸ است. در کلیه این روابط، مقادیر حد روانی حاصل از روش مخروط، بیشتر از روش کاساگرانده است که مشابه نتایج این پژوهش است.

جدول ۲- مقایسه حد روانی روش مخروط این مطالعه با پژوهش-

مقدار اختلاف	LLCONE	مرجع
۵/۵۵	۵۳/۱۳	اورهان <sup>۳۷</sup> و همکاران (۲۰۰۶)
۴/۸۱	۵۳/۸۷	دراگونی و همکاران (۲۰۰۸)
۶/۳۴	۵۲/۴۴	فوجتوا و همکاران (۲۰۰۹)
۶/۹۴	۵۱/۷۴	زنتار <sup>۳۸</sup> و همکاران (۲۰۰۹)
۱/۷۸	۵۶/۹۰	گرونچ و همکاران (۲۰۱۱)
۸/۱۳	۵۰/۵۵	اسپانیولی <sup>۳۹</sup> (۲۰۱۲)
۴/۹۹	۵۳/۶۹	میشرا <sup>۴۰</sup> و همکاران (۲۰۱۲)
۶/۴۸	۵۲/۲۰	دی متنو (۲۰۱۲)
۵/۵۷	۵۳/۱۱	سیلوا <sup>۴۱</sup> (۲۰۱۳)
۶/۶۸	۵۲/۰۰	بیکالو <sup>۴۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴)
۴/۷۰	۵۳/۹۸	کولاروس (۲۰۱۶)
۷/۵۴	۵۱/۱۴	الشیناوی (۲۰۱۷)
۲/۷۳	۵۵/۹۵	پراکش و سریدهاران (۲۰۱۹)
۸/۶۱	۵۰/۰۷	اسنایدر <sup>۴۳</sup> و وازکونز (۲۰۲۱)

41 Silva

42 Bicalho

43 Snyder

37 Orhan

38 Zentar

39 Spagnoli

40 Mishra

- penetrometer. *Journal of Soil Science*, 26(3), pp.234-240.
- Casagrande, A., 1932. Research on the Atterberg limits of soils. *Public roads*, 13(8), pp.121-136.
- Casagrande, A., 1958. Notes on the design of the liquid limit device. *Geotechnique*, 8(2), pp.84-91.
- Christaras, B., 1991. A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece. *Engineering Geology*, 31(2), pp.131-142.
- Claveau-Mallet, D., Duhaime, F. and Chapuis, R.P., 2012. Practical considerations when using the Swedish fall cone. *Geotechnical Testing Journal*, 35(4), pp.618-628.
- Díaz, E., Pastor, J.L., Rabat, Á. and Tomás, R., 2021. Machine learning techniques for relating liquid limit obtained by Casagrande cup and fall cone test in low-medium plasticity fine grained soils. *Engineering Geology*, 294, p.106381.
- Di Matteo, L., 2012. Liquid limit of low-to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, pp.79-85.
- Dragoni, W., Prosperini, N. and Vinti, G., 2008. Some observations on the procedures for the determination of the liquid limit: an application on Plio-Pleistocene clayey soils from Umbria region (Italy). *Italian journal of engineering geology and environment*, pp.185-197.
- El-Shinawi, A., 2017. A comparison of liquid limit values for fine soils: A case study at the north Cairo-Suez district, Egypt. *Journal of the Geological Society of India*, 89, pp.339-343.
- Feng, T.W., 2004. Using a small ring and a fall-cone to determine the plastic limit. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(6), pp.630-635.
- Fojtová, L., Marschalko, M., Franeková, R. and Kovář, L., 2009. Study of compatibility of methods for liquid limit measurement according to Czech State Standard and newly adopted European Standard, *Geosci. Eng.*, LV(1), pp55-68.
- Grønbech, G., Nielsen, B.N. and Ibsen, L.B., 2010. Comparison of plasticity index of Søvind marl found by use of Casagrande cup, fall cone apparatus and loss on ignition, Department of Civil Engineering, Aalborg University, DCE Technical Reports, 87, 14.
- Grønbech, G.L., Nielsen, B.N. and Ibsen, L.B., 2011. Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of Casagrande and Fall Cone Apparatus. *Age (mil. Years)*, 40, pp.46-53.
- ۸- برای خاک‌های مخلوط ماسه و رس با خاصیت خمیری کم، مقادیر حد روانی روش نفوذ مخروط ( $LL_{cone}$ ) معمولاً بیشتر از مقادیر روش جام کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) است.
- از آنجایی که حد روانی یکی از عوامل مهم در طبقه‌بندی مهندسی خاک است و تاثیر زیادی بر رفتار خاک در عملیات تراکم، راه‌سازی، سدسازی، بهسازی و سایر عملیات خاکی را دارد، بنابراین تعیین دقیق خواص خمیری خاک‌های مخلوط دارای اهمیت فراوانی است، لذا برای به دست آوردن بینش دقیق‌تر در مورد تاثیر ماسه بر خواص خمیری خاک رس، انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی دیگر برای تعیین میزان تاثیر دانه‌بندی خاک مخلوط ماسه و رس بر حد روانی حاصل از دستگاه‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط پیشنهاد می‌شود.

#### مراجع

- ASTM, D422, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi, 10.
- ASTM, D2216, 2010. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM, D4318, 2010. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. *Annual Book of American Society for Testing and Material standards*, West Conshohocken, USA.
- Atterberg A. Die plastizität der Tone. *Intern mitt. boden*. 1911:4-37.
- Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V. and Federico, A., 1985. Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground Engineering*, 18(5)pp.21-22.
- Benbow, J. and Bridgwater, J., 1993. *Paste flow and extrusion*, Clarendon Press, Oxford.
- Bicalho, K.V., Gramelich, J.C., Cunha, C.L.S., 2014. Comparação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros Comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test for determining liquid limit of different Brazilian clays. *Comunicações Geológicas, Especial*, 1099-1099
- BSI 1377 Part 2 (2003). Liquid limit-cone penetrometer method. *British Standard Institution*, London.
- Cabalar, A.F. and Mustafa, W.S., 2015. Fall cone tests on clay-sand mixtures. *Engineering Geology*, 192, pp.154-165.
- Campbell, D.J., 1975. Liquid limit determination of arable topsoils using a drop-cone

- Prakash, K. and Sridharan, A., 2022. Critical appraisal of the Casagrande percussion and fall cone liquid limits of fine-grained soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(3), pp.318-326.
- Rehman, H.U., Pouladi, N., Pulido Moncada, M. and Arthur, E., 2020. Repeatability and agreement between methods for determining the Atterberg limits of fine-grained soils. *Soil Science Society of America Journal*, 84(1), pp.21-30.
- Sampson, L.R. and Netterberg, F., 1985. The cone penetration index: a simple new soil index test to replace the plasticity index. In *International conference on soil mechanics and foundation engineering*, 11, pp. 1041-1048.
- Silva, A.C.S., 2013. Definiç~ao de padr~oes de plasticidade de solos atrav~es do cone de penetraç~ao, por comparaç~ao com o m~etodo de Casagrande (Doctoral dissertation). Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Snyder, V.A. and Vázquez, M.A., 2021. Comparison of the casagrande and drop-cone penetrometer methods for measuring the liquid limit in puerto rican soils. *1*, 263-268
- Spagnoli, G., 2012. Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay. *Can. J. Soil Sci.* 92, 859-864.
- Straž, G., 2022. The effect of methodology on determining the liquid limits values of selected organic soils. *Archives of Civil Engineering*, pp.459-477.
- Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R., 1964. Fundamental aspects of the Atterberg limits. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(6), pp.75-106.
- Sridharan, A. and Prakash, K., 2000. Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: controlling mechanisms. *Geotechnical Testing Journal*, 23(2), pp.236-244.
- Sowers, G.F., Vesic, A. and Grandolfi, M., 1959. Penetration tests for liquid limit. *Papers on soils*, pp.216-24.
- Tan, T.S., Goh, T.C., Karunaratne, G.P. and Lee, S.L., 1994. Shear strength of very soft clay-sand mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 17(1), pp.27-34.
- Zentar, R., Abriak, N.E., Dubois, V., 2009. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments. *Appl. Clay Sci.* 42, 391-397.
- Hrubesova, E., Lunackova, B. and Brodzki, O., 2016. Comparison of liquid limit of soils resulted from Casagrande test and modified cone penetrometer methodology. *Procedia Engineering*, 142, pp.364-370.
- Karakan, E., 2022. Relationships among plasticity, clay fraction and activity of clay-sand mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), p.1-16.
- Kayabali, K., Akturk, O., Fener, M., Ozkeser, A., Ustun, A.B., Dikmen, O., Harputlugil, F. and Asadi, R., 2016. Determination of Atterberg limits using newly devised mud press machine. *Journal of African Earth Sciences*, 116, pp.127-133.
- Kollaros, G., 2016. Liquid limit values obtained by different testing methods. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50(2), pp.778-787.
- Leroueil, S. and Le Bihan, J.P., 1996. Liquid limits and fall cones. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(5), pp.793-798.
- Mishra, A.K., Ohtsubo, M., Li, L.Y. and Higashi, T., 2012. Influence of various factors on the difference in the liquid limit values determined by Casagrande's and fall cone method. *Environmental Earth Sciences*, 65, pp.21-27.
- Nagaraj, T.S. and Murthy, B.R.S., 1987. Liquid limit determination further simplified. *Technical note. ASTM Geotechnical Testing Journal*, 10(3), pp.302-307.
- Niazi, F.S.ros, Pinan-Llamas, A., Cholewa, C. and Amstutz, C., 2020. Liquid limit determination of low to medium plasticity Indiana soils by hard base Casagrande percussion cup vs. BS fall-cone methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(4), pp.2141-2158.
- O'Kelly, B.C., 2021. Review of recent developments and understanding of Atterberg limits determinations. *Geotechnics*, 1(1), pp.59-75.
- Orhan, M., Ozer, M., Is,ik, N.S., 2006. Comparison of casagrande and cone penetration tests for the determination of the liquid limit of natural soils. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.* 21, 711-720.
- Özer, M., 2009. Comparison of liquid limit values determined using the hard and soft base Casagrande apparatus and the cone penetrometer. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 68(3), pp.289-296.
- Prakash, K. & A. Sridharan (2019): Critical appraisal of the Casagrande percussion and fall cone liquid limits of fine-grained soils, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-9

- Wasti, Y. and Bezirci, M.H., 1986. Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(2), pp.241-246.
- Yu, H.S. and Mitchell, J.K., 1998. Analysis of cone resistance: review of methods. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(2), pp.140-149.