

## 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>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۲/۱۶

### چکیده

حد روانی (Liquid Limit) یکی از ویژگی‌های مهم خاک است و تأثیر زیادی بر رفتار آن دارد. حد روانی به‌عنوان 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، تأثیر ماسه بر حد روانی خاک مخلوط، رابطه بین حد روانی و درصد ماسه و رابطه بین حد روانی روش‌های نفوذ مخروط (Cone penetrometer) و جام کاساگرانده (Casagrande) با پایه سخت مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار حد روانی برای رس بنتونیت دستگاه کاساگرانده برابر ۷۸ و دستگاه نفوذ مخروط برابر ۸۷ به‌دست آمد. با افزایش درصد ماسه، حد روانی کاهش یافت، رابطه حد روانی برحسب درصد ماسه، خطی بود و مقدار ضریب تعیین (Coefficient of determination) برای آزمایش‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۹ به‌دست 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

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 و نفوذ مخروط بیشتر برای تعیین حد روانی خاک‌ها استفاده می‌شوند. در عمل، هر دو دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط در نقاط مختلف دنیا برای مباحث ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Straž, ۲۰۲۲).

آزمایش حد روانی، که برای اولین بار توسط Atterberg (۱۹۱۱) پیشنهاد شد و بعدها توسط Casagrande (۱۹۳۲) و (۱۹۵۸) استانداردسازی شد، یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین

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<sup>۱</sup> 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 (LL) گویند. حداقل مقدار آب لازم برای ایجاد حالت خمیری خاک رس، معمولاً حد خمیری (PL)<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. حد روانی

2. Plastic Limit

1. Atterberg





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 برحسب درصد ماسه در خاک مخلوط است.

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

محدوده حد روانی	رابطه پیشنهادی	مرجع
۳۴-۱۳۴	$LL_{cone}=0.97 LL_{cup}+1.19$	Belviso و همکاران (۱۹۸۵)
۲۸-۷۴	$LL_{cone}=1.02 LL_{cup}+2.87$	Dragoni و همکاران (۲۰۰۸)
۲۰-۵۰	$LL_{cone}=1.00 LL_{cup}+2.44$	Fojtova و همکاران (۲۰۰۹)
۸۰-۲۱۵	$LL_{cone}=1.01 LL_{cup}+3.49$	Grønbech و همکاران (۲۰۱۰)
۲۴-۵۰	$LL_{cone}=1.00 LL_{cup}+2.20$	Di Matteo (۲۰۱۲)
۲۸-۱۶۶	$LL_{cone}=1.00 LL_{cup}+2.00$	Kayabali و همکاران (۲۰۱۶)
۵۳-۷۵	$LL_{cone}=1.03 LL_{cup}+4.93$	Kollaros (۲۰۱۶)
۱۱-۶۵	$LL_{cone}=0.89 LL_{cup}+4.2$	Niazi و همکاران (۲۰۲۰)
۱۷-۶۳	$LL_{cone}=1.19 LL_{cup}-3.43$	Diaz و همکاران (۲۰۲۱)

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مصالح مصرفی

#### ۲-۱-۱- خاک ماسه‌ای

ماسه مورد استفاده در این پژوهش، ماسه نوع ۱۶۱ از منطقه فیروزکوه تهیه شده است که براساس طبقه‌بندی خاک‌ها به روش متحد (یونیفاید)<sup>۳</sup> در ردیف ماسه بد دانه‌بندی شده (SP)<sup>۴</sup> قرار دارد.

#### ۲-۱-۲- 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.

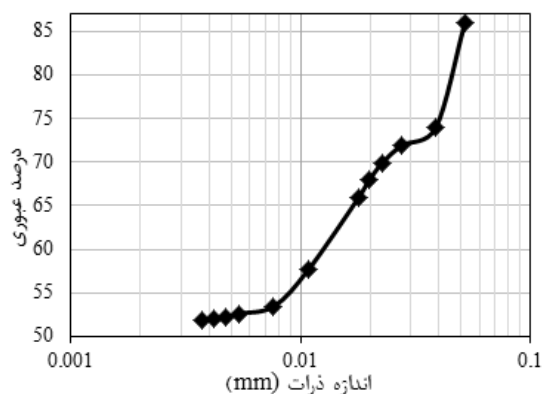
#### ۲-۱-۳- خاک مخلوط رس و ماسه

در این پژوهش خاک ماسه‌ای (۰/۰۷۵ تا ۲ میلی‌متر) به‌عنوان ماده اصلی و خاک رس بنتونیت (۰/۰۰۴ تا ۰/۰۵۲ میلی‌متر) به‌عنوان 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.

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 (Karakan, ۲۰۲۲).

Hrubesova و همکاران حد روانی خاک‌های به‌دست 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) به‌میزان قابل توجهی کمتر از حد روانی کاساگرانده است. برای خاک با خاصیت خمیری متوسط، حد روانی کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) بسیار شبیه به حد روانی به‌دست آمده از روش نفوذ مخروط استاندارد ( $LL_{cone}$ ) است. برای خاک‌های با خاصیت خمیری زیاد، آزمایش نفوذ مخروط استاندارد به‌طور قابل توجهی حد روانی ( $LL_{cone}$ ) را پایین‌تر از روش جام کاساگرانده ( $LL_{cup}$ ) می‌دهد. در خاک رس بنتونیت، حد روانی به‌دست 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 مخروط 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 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 به‌نظر می‌رسد، بنابراین در این پژوهش، با استفاده از دستگاه‌های آزمایش کاساگرانده و نفوذ مخروط، 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



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی خاک رس بنتونیت

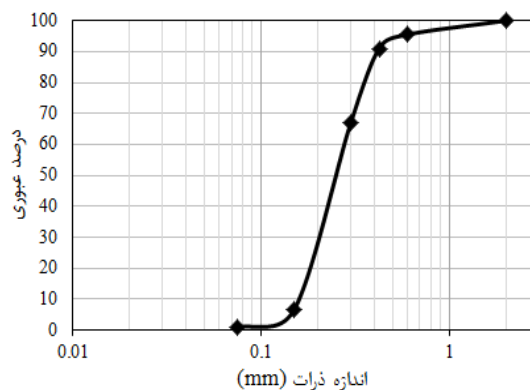


شکل ۱- موقعیت معدن بنتونیت

۲-۲-۲ روش‌ها

۲-۲-۲-۱- 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) به‌دست آمد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

۲-۲-۲-۲- 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) به‌دست آمد.



شکل ۴- روش آماده سازی نمونه‌های خاک مخلوط همگن

۳-۲-۲ 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. به‌طور 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 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.

## 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 به‌طور کافی مخلوط رس و ماسه را همگن نکنیم یا هوا وارد آن باشد، تأثیر 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، تأثیرگذار است بنابراین باید این همگن‌سازی به‌صورتی 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 دانه‌بندی خاک و در دور پایین استفاده شود. آب باید به‌صورت 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 براساس روش کاساگرانده

مطابق با استاندارد ASTM D4318 حدود آتربرگ 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 به‌عنوان درصد رطوبتی تعریف شده است 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 به‌علت دقت بیشتر، استفاده شد. برای انجام این آزمایش، ابتدا ماسه و خاک رس به‌طور کامل در ظرف اختلاط، هم‌زده شده و درصد رطوبت آن به‌گونه‌ای 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 صلبی قرار دارد، ریخته و سپس با فشار، درون جام پخش می‌شود. به‌طوری 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 به‌سمت جلو است، در راستای خطی که بالاترین نقطه روی لبه جام را به پایین‌ترین نقطه متصل می‌کند، روی خاک کشیده تا شیار در آن ایجاد شود. در هنگام ایجاد شیار، شیارزن در برابر سطح جام نگاه‌داشته 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 به‌تدریج 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 به‌ذکر 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 به‌هم برسند، چرخانده می‌شود (شکل (۵)). پایه دستگاه در حالی که دسته می‌چرخد نباید با دست ننگ 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 به‌سوی هم روان شده باشند.



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

تعداد ضربه‌های مورد نیاز برای بسته شدن شیار یادداشت شده و درصد رطوبت نمونه 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



شکل ۶- دستگاه آزمایش نفوذ مخروط

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 طرف 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 برحسب 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 به‌دست 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.

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 شیار 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 به‌همراه 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 ۲۵ ضربه، از روی نمودار استخراج و به‌عنوان 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 نگه‌داشته می‌شود. سپس این مخروط به‌طور آزاد، برای مدت زمان ۵ ثانیه رها می‌شود که سقوط کند. مقدار رطوبت مربوط به نفوذ مخروط به‌اندازه ۲۰ میلی‌متر، حد روانی را بیان می‌کند. حد خمیری با تکرار آزمایش به‌وسیله یک مخروط با شکل هندسی مشابه، اما با جرم ۲۴۰ گرم تعیین می‌شود (Yu و همکاران، ۱۹۹۸).

برای انجام آزمایش، نمونه خاک را با مقدار کافی آب مخلوط می‌کنند تا خمیر یکنواختی به‌دست آید. سپس قسمتی 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.



## 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 باشد، 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.

جدول ۲- تکرارپذیری آزمایش کاساگرانده

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

جدول ۳- تکرارپذیری آزمایش نفوذ مخروط

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

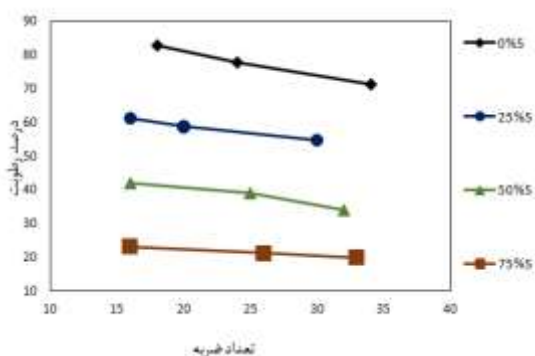
جدول ۴- تکرارپذیری آزمایش تعیین حد روانی

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 برحسب 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 مبدأ خط درصد رطوبت برحسب تعداد ضربه، کاهش می‌یابد. این نتایج برای خاک مخلوط مورد آزمایش به‌دست آمده است.



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

۳-۲-۱- تأثیر ماسه بر حد روانی به‌دست آمده از دستگاه کاساگرانده

نمودار تغییرات حد روانی برحسب 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 برحسب درصد ماسه، خطی بوده و مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۹۷ است.

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

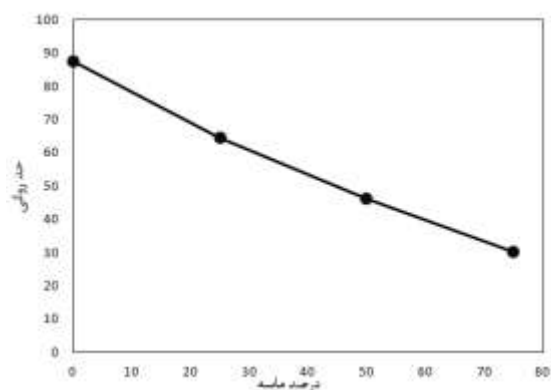
در این رابطه،  $LL_{cup}$  حد روانی دستگاه کاساگرانده و  $S$  مقدار ماسه برحسب درصد است. این رابطه کلی نیست و برای خاک مخلوط آزمایش شده، ارائه شده است.

خاصیت خمیری، مخصوص خاک رسی است و ماسه فاقد خاصیت خمیری است. به‌همین دلیل با ازدیاد مقدار ماسه، از حد روانی خاک مخلوط کاسته شده است. در پژوهش Cabalar و Mustafa (۲۰۱۵) نیز مشابه این نتیجه حاصل شد.

حد روانی برحسب درصد ماسه خطی بوده و مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۹۹ است.

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

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



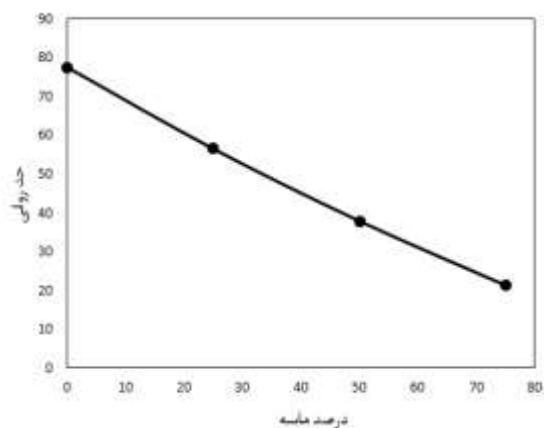
شکل ۱۰- نمودار حد روانی برحسب درصد ماسه خاک مخلوط در آزمایش نفوذ مخروط

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

در شکل (۱۱)، نمودار مقایسه‌ای تغییرات حد روانی به‌دست آمده از دستگاه‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط نشان داده شده است. رابطه بین حد روانی حاصل از آزمایش‌ها به‌صورت زیر است:

$$LL_{cone} = 1.022LL_{cup} + 7.58 \quad (3)$$

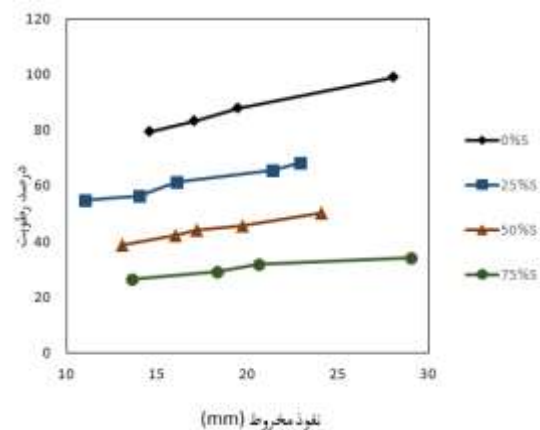
در این رابطه،  $LL_{cone}$  حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط و  $LL_{cup}$  حد روانی به‌دست آمده از دستگاه کاساگرانده است. نکته قابل ذکر این‌که این رابطه صرفاً برای خاک‌های مخلوط مورد آزمایش در این پژوهش به‌دست آمده و یک رابطه کلی نیست. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مقادیر حد روانی حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، به‌طور 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 به‌دست 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.



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 برحسب 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 مبدأ خط درصد رطوبت برحسب مقدار نفوذ، کاهش می‌یابد. این نتیجه مشابه نتایج پژوهش‌های Cabalar و Mustafa (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.



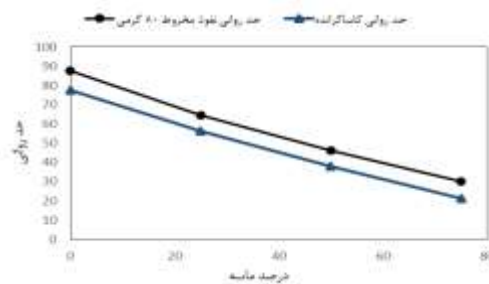
شکل ۹- نمودار تغییرات درصد رطوبت به عمق نفوذ برای خاک مخلوط با مقادیر مختلف ماسه

### ۳-۳-۱- تأثیر مقدار ماسه بر حد روانی به‌دست آمده از دستگاه نفوذ مخروط

نمودار تغییرات حد روانی برحسب درصد ماسه حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. رابطه



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.



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

جدول ۲- مقایسه حد روانی روش مخروط این مطالعه با پژوهش‌های قبلی برای حد روانی ۵۰

مقدار اختلاف	LLcone	مرجع
۵/۵۵	۵۳/۱۳	Orhan و همکاران (۲۰۰۶)
۴/۸۱	۵۳/۸۷	Dragoni و همکاران (۲۰۰۸)
۶/۳۴	۵۲/۴۴	Fojtová و همکاران (۲۰۰۹)
۶/۹۴	۵۱/۷۴	Zentar و همکاران (۲۰۰۹)
۱/۷۸	۵۶/۹۰	Grønbech و همکاران (۲۰۱۱)
۸/۱۳	۵۰/۵۵	Spagnoli (۲۰۱۲)
۴/۹۹	۵۳/۶۹	Mishra و همکاران (۲۰۱۲)
۶/۴۸	۵۲/۳۰	Di Matteo (۲۰۱۲)
۵/۵۷	۵۳/۱۱	Silva (۲۰۱۳)
۶/۶۸	۵۲/۰۰	Bicalho و همکاران (۲۰۱۴)
۴/۷۰	۵۳/۹۸	Kollaros (۲۰۱۶)
۷/۵۴	۵۱/۱۴	El-Shinawi (۲۰۱۷)
۲/۷۳	۵۵/۹۵	Prakash و Sridharan (۲۰۱۹)
۸/۶۱	۵۰/۰۷	Vázquez و Snyder (۲۰۲۱)

مطالعات قبلی خواص شاخص مخلوط خاک رس و ماسه، بیانگر کاهش خطی حد روانی با ازدیاد مقدار ماسه است (Seed و همکاران، ۱۹۶۴؛ Nagaraj و Morthy، ۱۹۸۷؛ Tan و همکاران، ۱۹۹۴).

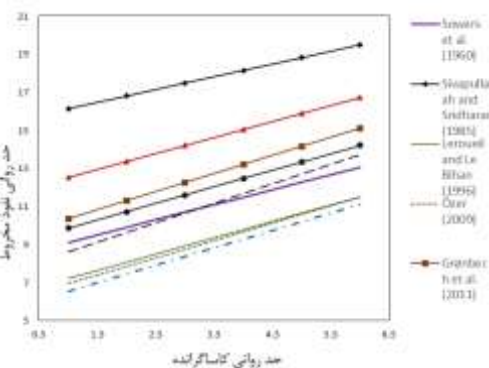
برای خاک‌های رس با خاصیت خمیری کم، مقادیر حد روانی روش نفوذ مخروط *LLcone* معمولاً بیشتر از مقادیر روش جام کاساگرانده *LLcup* است (Grønbech و همکاران، ۲۰۱۱؛ Dragoni و همکاران، ۲۰۰۸؛ Campbell، ۱۹۷۵؛ Wasti و Bezirci (۱۹۸۶)؛ Christaras، ۱۹۹۱؛ Prakash و Sridharan، ۲۰۰۰). براساس یافته‌های Sampson و Netterberg (۱۹۸۵)، Wasti و Bezirci (۱۹۸۶)، Leroueil و Le Bihan (۱۹۹۶) و Prakash و Sridharan (۲۰۰۰)؛ برای خاک‌هایی با *LL* بیشتر از ۶۰ تا ۷۰ درصد، حد روانی به‌دست آمده از روش جام کاساگرانده (*LLcup*) بیشتر از روش نفوذ مخروط (*LLcone*) است.

۴- نتیجه‌گیری

مفهوم خاصیت خمیری در بسیاری از حوزه‌های مهندسی و علوم کاربرد دارد. این مطالعه به مقایسه مقادیر حد روانی به‌دست آمده از دستگاه کاساگرانده و نفوذ مخروط خاک‌های 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 به‌دست آمده از پژوهش حاضر، نتیجه‌گیری زیر را می‌توان در مورد حد روانی خاک مخلوط، انجام داد.

در شکل (۱۲) نمودارهای مقایسه‌ای رابطه بین حد روانی حاصل از این پژوهش با تعدادی از پژوهش‌های قبلی نشان داده شده است (Sowers، ۱۹۶۰؛ Leroueil و Bihan، ۱۹۹۶؛ Claveau و همکاران، ۲۰۱۲؛ Mishra و همکاران، ۲۰۱۲؛ El-Shinawi، ۲۰۱۷). در پژوهش Ur Rehman و همکاران (۲۰۱۹)، حد روانی حاصل از روش مخروط، حدود ۱۶ درصد بیشتر از کاساگرانده بود.

۱- مقدار حد روانی حاصل از دستگاه آزمایش کاساگرانده 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.



شکل ۱۲- نمودارهای مقایسه‌ای رابطه بین حد روانی حاصل از این پژوهش با تعدادی از پژوهش‌های قبلی

۲- 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.

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 برحسب مقدار نفوذ، کاهش می‌یابد.

- limits", Ground Engineering, 1985, 18 (5), 21-22. <https://worldcat.org/issn/00174653>
- Benbow J, Bridgewater J, "Paste flow and extrusion", Clarendon Press, Oxford, 1993.
- Bicalho KV, Gramelich JC, Cunha CLS, "Comparaçao 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, 2014, 1099-1099
- BSI 1377 Part 2 "Liquid limit-cone penetrometer method", British Standard Institution, London, 2003.
- BSI 1377 Part 2 "Liquid limit-cone penetrometer method", British Standard Institution, London, 2003.
- BSI 1377 Part 2 "Liquid limit-cone penetrometer method", British Standard Institution, London, 2003.
- Cabalar AF, Mustafa WS, "Fall cone tests on clay-sand mixtures", Engineering Geology, 2015, 192, 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.009>
- Campbell DJ, "Liquid limit determination of arable topsoils using a drop-cone penetrometer", Journal of Soil Science, 1975, 26 (3), 234-240. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1975.tb01946.x>
- Casagrande A, "Notes on the design of the liquid limit device", Geotechnique, 1958, 8 (2), 84-91. <https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.2.84>
- Casagrande A, "Research on the Atterberg limits of soils", Public roads, 1932, 13 (8), 121-136.
- Charitaras B, "A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece", Engineering Geology, 1991, 31 (2), 131-142. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(91\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(91)90002-3)
- Claveau-Mallet D, Duhaime F, Chapuis RP, "Practical considerations when using the Swedish fall cone", Geotechnical Testing Journal, 2012, 35 (4), 618-628. <https://doi.org/10.1520/GTJ104178>
- Di Matteo L, "Liquid limit of low-to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71, 79-85. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0412-5>
- Díaz E, Pastor JL, Rabat Á, Tomás R, "Machine learning techniques for relating liquid limit obtained by Casagrande cup and fall cone test in low-medium plasticity fine grained soils", Engineering Geology, 2021, 294, 106381. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106381>
- Dragoni W, Prosperini N, Vinti G, "Some observations on the procedures for the determination of the liquid limit: an application on Plio-Pleistocenic clayey soils from Umbria region (Italy)", Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2008, 185-197. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2008-01.S-12>
- El-Shinawi A, "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, 2017, 89, 339-343. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0608-9>
- Feng TW, "Using a small ring and a fall-cone to determine the plastic limit", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (6), 4-6
- نمودار تغییرات حد روانی برحسب درصد ماسه حاصل از دستگاه نفوذ مخروط، خطی بوده و مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۹۹۹ است.
- ۵- برای خاک‌های مخلوط مورد مطالعه، رابطه بین حدروانی 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 می‌شود.
- 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 تأثیر 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 تأثیر ماسه بر خواص خمیری خاک رس، انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی دیگر برای تعیین میزان تأثیر دانه‌بندی خاک مخلوط ماسه و رس بر حد روانی حاصل از دستگاه‌های کاساگرانده و نفوذ مخروط پیشنهاد می‌شود.
- ۵- مراجع
- ASTM, D2216, "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass", Annual Book of ASTM Standards, 2010.
- ASTM, D422, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- ASTM, D4318, "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, 2010.
- Atterberg A, "Die plastizität der Tone", Internationall mitting boden. 1911, 4-37.
- Belviso R, Ciampoli S, Cotecchia V, Federico A, "Use of the cone penetrometer to determine consistency

- 68 (3), 289-296. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0191-4>
- Prakash K, Sridharan A, "Critical appraisal of the Casagrande percussion and fall cone liquid limits of fine-grained soils", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 1-9. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1684617>
- Prakash K, Sridharan A, "Critical appraisal of the Casagrande percussion and fall cone liquid limits of fine-grained soils", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 16 (3), 318-326. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1684617>
- Rehman HU, Pouladi N, Pulido Moncada M, Arthur E, "Repeatability and agreement between methods for determining the Atterberg limits of fine-grained soils", *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84 (1), 21-30. <https://doi.org/10.1002/saj2.20001>
- Sampson LR, Netterberg F, "The cone penetration index: a simple new soil index test to replace the plasticity index", In *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1985, 11, 1041-1048.
- Seed HB, Woodward RJ, Lundgren R, "Fundamental aspects of the Atterberg limits", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1964, 90 (6), 75-106. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000685>
- Silva ACS, "Definição de padrões de plasticidade de solos através do cone de penetração, por comparação com o método de Casagrande (Doctoral dissertation)", *Instituto Superior de Engenharia do Porto*, 2013. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v105i2.20086>
- Snyder VA, Vázquez MA, "Comparison of the casagrande and drop-cone penetrometer methods for measuring the liquid limit in puerto rican soils1", 2021, 263-268. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v105i2.20086>
- Sowers GF, Vesic A, Grandolfi M, "Penetration tests for liquid limit", *Papers on Soils*, 1959, 216-24.
- Spagnoli G, "Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay", *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92, 859-864. <https://doi.org/10.4141/cjss2012-011>
- Sridharan A, Prakash K, "Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: controlling mechanisms", *Geotechnical Testing Journal*, 2000, 23 (2), 236-244. <https://doi.org/10.1520/GTJ11048J>
- Straž G, "The effect of methodology on determining the liquid limits values of selected organic soils", *Archives of Civil Engineering*, 2022, 459-477.
- Tan TS, Goh TC, Karunaratne GP, Lee SL, "Shear strength of very soft clay-sand mixtures", *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17 (1), 27-34. <https://doi.org/10.1520/GTJ10069J>
- Wasti Y, Bezirci MH, "Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test", *Canadian Geotechnical Journal*, 1986, 23 (2), 241-246. <https://doi.org/10.1139/t86-033>
- Yu HS, Mitchell JK, "Analysis of cone resistance: review of methods", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124 (2), 140-149. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:2\(140\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:2(140))
- Zentar R, Abriak NE, Dubois V, "Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments", *Applied Clay Science*. 2009, 42, 391-397. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.04.003>
- 630-635. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:6\(630\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(630))
- Fojtová L, Marschalko M, Franeková R, Kovář L, "Study of compatibility of methods for liquid limit measurement according to Czech State Standard and newly adopted European Standard, *Geosci*", Eng, 2009, LV (1), 55-68.
- Grønbech G, Nielsen BN, Ibsen LB, "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*, 2010, 87, 14.
- Grønbech GL, Nielsen BN, Ibsen LB, "Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of Casagrande and Fall Cone Apparatus", *Age (mil. Years)*, 2011, 40, 46-53.
- Hrubesova E, Lunackova B, Brodzki O, "Comparison of liquid limit of soils resulted from Casagrande test and modified cone penetrometer methodology", *Procedia Engineering*, 2016, 142, 364-370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.063>
- Karakan E, "Relationships among plasticity, clay fraction and activity of clay-sand mixtures", *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15 (4), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09482-9>
- Kayabali K, Akturk O, Fener M, Ozkeser A, Ustun AB, Dikmen O, Harputlugil F, Asadi R, "Determination of Atterberg limits using newly devised mud press machine", *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 116, 127-133. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.005>
- Kollaros G, "Liquid limit values obtained by different testing methods", *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 2016, 50 (2), 778-787. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11784>
- Leroueil S, Le Bihan JP, "Liquid limits and fall cones", *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33 (5), 793-798. <https://doi.org/10.1139/t96-104-324>
- Mishra AK, Ohtsubo M, Li LY, Higashi T, "Influence of various factors on the difference in the liquid limit values determined by Casagrande's and fall cone method", *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65, 21-27. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1061-5>
- Nagaraj TS, Murthy BRS, "Liquid limit determination further simplified", *Technical note*, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 1987, 10 (3), 302-307. <https://doi.org/10.1520/GTJ10946J>
- Niazi FS, Pinan-Llamas A, Cholewa C, Amstutz C, "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*, 2020, 79 (4), 2141-2158. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01668-y>
- O'Kelly BC, "Review of recent developments and understanding of Atterberg limits determinations", *Geotechnics*, 2021, 1 (1), 59-75. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004>
- Orhan M, Ozer M, Isik NS, "Comparison of casagrande and cone penetration tests for the determination of the liquid limit of natural soils", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2006, 21, 711-720. <https://kutuphane.dogus.edu.tr/mvt/pdf.php>
- Özer M, "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*, 2009,

## EXTENDED ABSTRACT

# Comparison of Liquid Limit Obtained From Casagrande Cup Method and Cone Penetrometer for Sand and Clay Mixed Soils

Mahmoud Nikkhah Shahmirzadi \*, Ghasem Arabi, Minoos Zahra Hafezi

Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

Received: 17 November 2022; Review: 04 May 2023; Accepted: 06 May 2023

### Keywords:

Liquid limit, Sand, Bentonite, Casagrande, Cone penetration.

## 1. Introduction

The behavior of the cohesive soil depends on many factors. Atterberg limits play an important role in the evaluation and classification of clays. In this paper, the relationship between the Liquid limit of the cone penetrometer methods and Casagrande cup of sand and clay mixed soils has been evaluated.

The main purpose of this study is to compare the Liquid limit values obtained from the hard-base Casagrande device with the cone penetration method and to present the relationship between the Liquid limit values obtained from the two methods in terms of the percentage of sand in the mixed soil.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Sandy soil

The sand used in this research is type 161 sand from Firuzkoh region, which is classified as poorly graded sand (SP) based on the unified classification of soils.

### 2.2. Clay soil

The soil used in this research is the ground bentonite clay of Semnan city.

Liquid limit test based on Casagrande method

According to the ASTM D4318 standard, the Atterberg range of the soil was determined.

Liquid limit test based on cone penetration method

In standard BS1377, a small stainless steel cone is used.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Comparison of liquid limit obtained from Casagrande cup method and cone penetrometer

In Fig. 1, the comparative diagram of the changes in liquid limit obtained from the cup and cone penetration devices is shown.

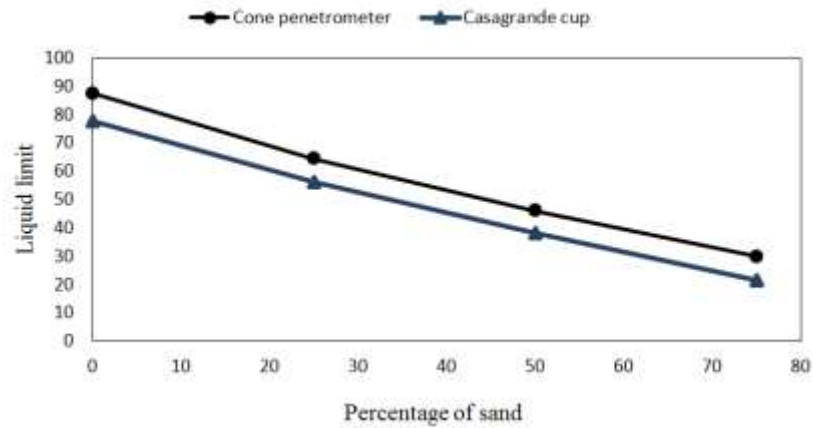


Fig. 1 Comparison chart of liquid limit to percentage of mixed soil sand in cone and cup penetration tests

The relationship between the liquid limit obtained from the experiments is as follows:

$$LL_{cone} = 1.022LL_{cup} + 7.58 \tag{1}$$

In this regard,  $LL_{cone}$  the liquid limit is obtained from the cone penetration device and  $LL_{cup}$  the liquid limit is obtained from the Casagrande device.

Previous studies of the index properties of clay and sand mixture indicate a linear decrease in the liquid limit with the increase in the amount of sand (Seed et al., 1964; Nagaraj and Morthy, 1987; Tan et al., 1994). In the research of Ur Rehman et al. (2020), the liquid limit obtained by the cone method was about 16% higher than that of Casagrande.

For the liquid limit of the Casagrande cup equal to 50, the value of the liquid limit resulting from the relationship in the cone method for this research is equal to 58.68. In Table 1, the liquid limit values obtained from the relationships of different researchers for the liquid limit of the Casagrande Cup equal to 50 are presented.

Table 1. Comparison of the liquid limit of the cone method of this study with previous researches for the liquid limit of 50

Reference	$LL_{cone}$	The difference amount
Kollaros (2016)	53.98	4.7
El-Shinawi (2017)	51.14	7.54
Prakash & Sridharan (2019)	55.95	2.73
Snyder & Vázquez (2021)	50.07	8.61

#### 4. Conclusions

The concept of plasticity property is used in many fields of engineering and science. The main focus of this article was to investigate the psychological limit relationship between the experiment performed by the Casagrande device and cone penetration. Based on the results obtained from the present research, the following conclusions can be made about the liquid limit of mixed soil.

1) The liquid limit value obtained from the Casagrande test device for bentonite clay was 78. As the amount of sand increases, the slope and width from the origin of the moisture percentage line decreases according to the number of blows.

2) As the percentage of sand increases, the liquid limit decreases, while the relationship of the liquid limit in terms of sand percentage is linear and the coefficient of determination ( $R^2$ ) is equal to 0.997.

3) The liquid limit value obtained from bentonite clay cone penetration testing device is equal to 87. As the amount of sand increases, the slope and width from the origin of the moisture percentage line decreases according to the amount of penetration.

4) The diagram of changes in liquid limit according to the percentage of sand obtained from the cone penetration device is linear and the value of the coefficient of determination is 0.999.

5) As the liquid limit of the mixed soil decreased, the difference between the results of the two test devices increased. In other words, as the plasticity property of the mixed soil increases, the difference between the liquid limit obtained by the two methods decreases.

6) For mixed soils of sand and clay with low plasticity properties, the liquid limit values of the cone penetration method are usually higher than the values of the Casagrande cup method.

Since the liquid limit is one of the important factors in the classification of soil engineering and has a great impact on soil behavior in compaction, road construction, dam construction, improvement and other soil operations, therefore, accurate determination of the plasticity properties of mixed soils is very important. Therefore, in order to gain a more detailed insight into the effect of sand on the pasty properties of clay, it is suggested to carry out other laboratory researches to determine the effect of sand and clay mixed soil granulation on the liquid limit obtained from Casagrande cup method and cone penetration.

## 5. References

- El-Shinawi A, "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*, 2017, 89, 339-343. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0608-9>
- Kollaros G, "Liquid limit values obtained by different testing methods", *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 2016, 50 (2), 778-787. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11784>
- Nagaraj TS, Murthy BRS, "Liquid limit determination further simplified", *Technical note*, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 1987, 10 (3), 302-307. <https://doi.org/10.1520/GTJ10946J>
- Prakash K, Sridharan A, "Critical appraisal of the Casagrande percussion and fall cone liquid limits of fine-grained soils", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 1-9. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1684617>
- Rehman HU, Pouladi N, Pulido Moncada M, Arthur E, "Repeatability and agreement between methods for determining the Atterberg limits of fine-grained soils", *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84 (1), 21-30. <https://doi.org/10.1002/saj2.20001>
- Seed HB, Woodward RJ, Lundgren R, "Fundamental aspects of the Atterberg limits", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1964, 90 (6), 75-106. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000685>
- Snyder VA, Vázquez MA, "Comparison of the casagrande and drop-cone penetrometer methods for measuring the liquid limit in puerto rican soils1", 2021, 263-268. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v105i2.20086>
- Tan TS, Goh TC, Karunaratne GP, Lee SL, "Shear strength of very soft clay-sand mixtures", *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17 (1), 27-34. <https://doi.org/10.1520/GTJ10069J>