

بخش سوم

آزمایش حد روانی و حد خمیری

(Liquid and Plastic Limits)

هدف از انجام این آزمایش، تعیین حد رولی و حد خمیری خاک می باشد.

خاک‌های ریزدانه با افزایش مقدار آب جذب شده حالات مختلفی به خود می گیرند. افزایش آب باعث پوشیده شدن دانه‌ها با یک لایه آب جذب سطحی می شود. با افزودن آب بیشتر، ضخامت لایه‌ی آب دور دانه‌ها اضافه شده، لغزش دانه‌ها روی یکدیگر راحت تر می شود. بنابراین رفتار خاک عملاً به میزان آب داخل مجموعه بستگی دارد.

کلی‌های رس به علت ساختمان بلوری، دارای نیروهای سطحی زیادی هستند که وجود آب جذب سطحی نیز به علت وجود همین نیروها می باشد و این نیروها، می توانند بر نیروی ثقل آب غلبه نمایند. بنابراین تنها ریزدانه‌ها بودن، برای شناخت خاک کافی نیست بلکه باید نوع ریزدانه (مثلاً کوارتز خرد شده، کلی‌های رس و ...) مشخص شود، زیرا ریزدانه‌های مختلف دارای رفتار مشابهی از جهت جذب آب سطحی نیستند. هم چنین کلی‌های مختلف رس نیز با توجه به میزان جذب رطوبت، عملکرد یکسانی ندارند و به همین جهت چنانچه تعریف خواهد شد، بیشترین سهم رفتار خاک در مقابل رطوبت، مربوط به خواص قسمت رسی آن می باشد.

خاک ریزدانه بر حسب درصد رطوبتش می تواند در یکی از حالات جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع دسته بندی

شود.

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

حد روانی

مرز بین حالت خمیری و حالت رولی (مایع) خاک.

حد خمیری

مرز بین حالت خمیری و نیمه جامد.

حد انقباض

مرز بین حالت نیمه جامد و جامد.

حد رولبی، درصد رطوبتی است که در این رطوبت و رطوبت‌های بالاتر از آن، خاک به صورت سیال لزوج

(Viscous Fluid) عمل می‌کند.

حد خمیری، درصد رطوبتی است که خاک در این رطوبت تا قبل از حد رولبی، به صورت خمیری رفتار

می‌کند.

حد انقباض، درصد رطوبتی است که اگر رطوبت خاک از آن کم‌تر شود، تغییری در حجم خاک به وجود

نمی‌آید.

اثر برگ‌علاوه بر سه حد فوق، دو حد دیگر نیز پیشنهاد کرده است:

حد چسبندگی (Cohesive Limit)

درصد رطوبتی که در آن خاک به سطوح فلزی مثل تیغه‌ی کاردک و ماشین‌آلات بیشتر می‌چسبد تا به ذرات

حد چکینی (Sticky Limit)

خود. ای حد، برای مهندسان کشاورزی و پیمان‌کاران عملیات خاکی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

توجه شود که درصد رطوبتی که باید به خاک اضافه شود تا از حد خمیری به حد رولبی خود برسد، بیلنگر میزان

خاصیت خمیری آن خاک می‌باشد که با شاخص خمیری (PI) مشخص می‌شود. شاخص خمیری، اختلاف حد رولبی و

حد خمیری خاک می‌باشد:

$$PI=LL-PL \quad \text{یا} \quad PI=W_L-W_P$$

باید توجه داشت که حد روئی و حد خمیری، برای خاک‌هایی تعیین می‌شوند که ساختار طبیعی خود را در اثر

ورز دادن از دست داده‌اند، اما حد لقیباض را می‌توان برای خاک‌های دست‌نخورده هم تعیین نمود. تفاوت بین حد

لقیباض خاک دست‌نخورده و دست‌خورده، با شاخص روئی (LI) آن مشخص می‌شود. این شاخص نسبت اختلاف

بین درصد رطوبت خاک در محل با حد خمیری، به شاخص خمیری است یعنی:

$$LI = \frac{W - PL}{LL - PL}$$

W: درصد رطوبت خاک در محل

ممکن است درصد رطوبت خاک در محل، برای یک خاک رسوبی تحکیم‌نیافته، بیش‌تر از درصد رطوبت حد

روئی باشد. در این حالت شاخص روئی بزرگ‌تر از یک می‌باشد. این خاک‌ها وقتی به حالت خمیری درمی‌آیند و

دست‌نخورده می‌شوند، می‌تولند حالت مایعی غلیظ را پیدا کنند. خاک‌های رسوبی که به شدت پیش تحکیم شده

باشند، ممکن است درصد رطوبتی کم‌تر از درصد رطوبت حد روئی و یا درصد رطوبت حد خمیری داشته باشند.

مقادیر روئی برای چنین خاک‌هایی نزدیک به صفر و یا منفی می‌باشد.

حد روئی، اندازه‌ی مقاومت برشی خاک با درصد مشخصی رطوبت می‌باشد. محاسبه‌ی حد روئی، مشابه

آزمایش برش است و کاساگرلده دریافت که هر ضربه که برای بسته‌شدن شیار استاندارد زده می‌شود، بیسگر حلود

$\frac{g}{cm^2}$ از مقاومت برشی خاک می‌باشد. نتایج مشابه به دست آمده به گونه‌ای است که می‌توان گفت حد روئی برای

همه‌ی خاک‌ها، مقاومت برشی ثابتی بین $\frac{20}{cm^2}$ تا $\frac{25}{cm^2}$ به دست می‌دهد. حد روئی با کاهش ابعاد ذرات

خاک کاهش می‌یابد، اما حد خمیری علاوه بر آن که مرز پایین منطقه‌ی رفتار پلاستیک خاک می‌باشد، با کاهش

اندازه‌ی ذرات افزایش می‌یابد.
WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

آزمایش تعیین حد روانی

هدف از انجام این آزمایش، تعیین درصد رطوبتی است که در آن مخلوط آب و خاک از حالت خمیری به

حالت مایع درمی آید.

۱. وسایل آزمایش

۱. دستگاه حد رولی کاساگرلنده

۲. شیارکش

۳. ظروف تعیین رطوبت

۴. ظروف چینی مخصوص تبخیر

۵. کاردک یا تیغه‌ی کاردی شکل

۶. گرمخانه

۷. ترازو با دقت ۰/۰۱ g

۸. بطری پلاستیکی

آماده کردن دستگاه کاساگرلنده

دستگاه کاساگرلنده وسیله‌ای مکانیکی است با یک پیاله‌ی برنجی به قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و وزن ۲۰۰ گرم. این پیاله از پشت به وسیله‌ی سنجاقی روی دوپایه‌ای که خودبسر روی سکوی از جنس پلاستیک سخت قرار دارد، لولا می‌شود. به وسیله‌ی گردلدن یک دسته، پیاله روی لولا چرخیده، بالا رفته، سپس پایین می‌افتد و در حقیقت ضربه‌ای به کف آن زده می‌شود. ارتفاع سقوط پیاله در حد استاندارد قابل تنظیم است. همراه با این وسیله میله‌ای نیز برای ایجاد یک شکاف استاندارد در داخل نمونه‌ی خاک محتوی پیاله تهیه شده است.

هنگام تنظیم دستگاه، باید توجه داشت که سنجاق اتصال دهنده‌ی پیاله به پایه، ساییده نشده باشد تا باعث جابجایی یا حرکت پیاله نشود. همچنین پیچ‌هایی که کاسه را به دستگیره متصل می‌نمایند باید سفت باشند و کف پیاله نیز نباید در اثر استفاده‌ی زیاد، گود شده باشد.

میله‌ی شیار دهنده، می‌تولد شکافی با مقطع فونته‌ای که قاعده‌ی کوچک آن در پایین به عرض ۲ میلی‌متر،

قاعده‌ی بزرگ آن در بالا به عرض ۱۱ میلی‌متر و ارتفاع آن ۸ میلی‌متر می‌باشد، ایجاد نماید.

لتهای میله‌ی شیاردهنده گرد و ضخامت آن ۱۰ میلی‌متر است که جهت تنظیم ارتفاع سقوط پیاله می‌باشد. بدین

ترتیب که قسمت لتهای میله‌ی شیاردهنده رازیر پیاله قرار داده، با پیچ‌های اتصال پیاله به پایه آن را تنظیم می‌کنند.

در حالی که میله‌ی شیاردهنده هنوز در جای خود می‌باشد با چندین بار چرخاندن سریع، دستگاه بررسی خواهد

شد؛ اگر دستگاه درست تنظیم شده باشد، صدای زنگ ضعیفی شنیده خواهد شد. اگر پیاله روی شیاردهنده بایستد یا

صدایی شنیده نشود، دستگاه تنظیم بیش‌تری لازم خواهد داشت.

آماده کردن نمونه‌ها

نمونه‌ای به وزن حدود ۵ تا ۱۵ g از ۲۰۰ از قسمتی از خاک که به خوبی مخلوط شده و از الک نمونه‌ی ۴۰ (۴۲۵)

میلی‌متر) ردا شده است، انتخاب می‌نماییم.

از آنجایی که نمونه‌ی خاک طبیعی بیش از حد مرطوب می‌باشد و از الک نمی‌گذرد، بهتر است آن را در هوا

خشک کرد (توجه: خاک خشک شده در گرمخانه روی حدوداً ۲۰٪ اثر برنگ اثر نامطلوب می‌گذارد و از این روش امروزه

جهت بررسی آلی بودن خاک استفاده می‌شود).

کاساگر لده نشان داد که حد خمیری و حد روانی انجام شده در مورد نمونه‌های خشک شده در هوا، حدود ۲ تا

۶ درصد کاهش نشان می‌دهد. برای رفع این مسأله و تعیین صحیح حدود اثر برنگ، بهتر است مصالح را با رطوبت طبیعی

(که از الک ۴۰ عبور می‌کند) آزمایش کرد. همچنین تجربه نشان داده است که نمونه‌های خشک شده در هوا یا در

گرمخانه اگر مجدداً با آب کافی مخلوط شوند، پس از ۲۴ یا ۴۸ ساعت به حدوداً ۲۰٪ رطوبت برسند و گشت.

بنابراین بهتر است نمونه‌ها را پس از ۲۴ ساعت مرطوب نمودن با آب آزمایش نمایند.

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

۲. روش انجام آزمایش

۱. وزن سه ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت را تعیین می‌کنیم (W_1).

۲. نمونه‌ی لتهای از خاکی را که در هوا خشک شده و از الک نمره‌ی ۴۰ عبور کرده است، در ظرف تبخیر

قرار می‌دهیم و به آن مقداری آب اضافه کرده، خاک را چنان مخلوط می‌کنیم تا به صورت یک خمیر یکدخت درآید.

۳. قسمتی از نمونه‌ی خاک آماده‌شده را در جام کاساگر لده قرار داده، در حالی که جام روی پایه ثابت است با استفاده از کاردک، سطح خاک داخل جام را صاف می‌کنیم، به طوری که عمق خاک در گودترین نقطه ۱۰ میلی‌متر باشد. مراقب باشید که حباب‌های هوای خاک را از بین ببرید. خاک اضافی باقی‌مانده را در یک ظرف جداگانه قرار دهید و روی آن را با یک دستمال خیس بپوشانید تا رطوبت خود را از دست ندهد.

۴. با استفاده از شیارکش، روی خاک داخل جام شیار در امتداد محور تقارن جام به وجود می‌آوریم. برای این کار، شیارکش را روی سطح خاک قرار داده، آن را روی یک منحنی حرکت می‌دهیم. در خاک‌هایی که با یک حرکت نمی‌توان شیار به وجود آورد، این کار را باید چندین بار تکرار نمود.

۵. بررسی می‌کنیم که روی پایه و یا زیر جام، حاکی نچسبیده باشد. دسته‌ی دستگاه را با سرعتی در حدود ۲ ضربه در هر ثلثیه می‌چرخانیم. با این کار، جام بالا می‌رود و فرو می‌افتد و به این وسیله یک ضربه بر جام اعمال می‌شود. این کار تا وقتی که شیار در طولی به اندازه‌ی ۳ میلی‌متر (۵/۱۰ اینچ) بسته شود، تکرار کنید.

۶. بررسی می‌کنیم که وجود حباب‌های هوا باعث بسته شدن زو هنگام شیار نشده باشد. در صورت مشاهده‌ی حباب هوا، آزمایش را از اول تکرار می‌کنیم. در این آزمایش اگر خاک روی سطح جام بلغزد، باید آزمایش را با درصد رطوبت بیش‌تر تکرار نمود. اگر بعد از چند بار تکرار با درصد رطوبت بالاتر، نمونه‌ی خاک هم‌چنان داخل جام لغزید و برای بسته شدن شیار، همیشه تعداد ضربات کم‌تر از ۲۵ به دست آمد، با این روش حد روی خاک مورد نظر را نمی‌توان تعیین نمود و آن را بدون انجام آزمایش حد خمیری، به عنوان یک خاک غیرخمیری معرفی می‌کنیم.

۷. تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار را یادداشت کرده، مقداری از خاک داخل جام را که شامل قسمت بسته شده‌ی شیار است، برای تعیین درصد رطوبت، داخل ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت می‌ریزیم و درپوش آن را می‌بندیم. سپس وزن ظرف و خاک مرطوب (W_p) را تعیین می‌کنیم.

۸. جام را خالی کرده، جام و شیارکش را تمیز می‌کنیم و برای مرحله‌ی بعد آماده می‌کنیم.

۹. به نمونه‌ی خاک، مقداری آب اضافه می‌کنیم تا درصد رطوبت آن بالاتر رود و تعداد ضربات لازم برای بسته شدن شیار کم شود. مراحل ۳ تا ۸ را مجدداً انجام می‌دهیم. این عمل باید برای تعداد ضربات بین ۵ تا ۲۵، ۲۰ تا ۳۰ و ۲۵ تا ۳۵ انجام شود.

۱۰. درصد رطوبت سه نمونه باید تعیین شود. برای این کار، ظرف‌های تعیین درصد رطوبت را در گرمخانه قرار می‌دهیم تا خاک خشک شود و به یک وزن ثابت (W_p) برسد.

توضیحات

۱. بعضی از خاک‌ها خیلی آهسته آب جذب می‌کنند؛ بنابراین ممکن است افزایش آب با سرعتی انجام گیرد که حد رولی غیر واقعی به دست آید. برای اجتناب از این کار، زمان اختلاط پیش‌تری اختصاص داده خواهد شد. زمان اختلاط آب و خاک ۵ تا ۳۰ دقیقه است و برای خاک‌های خمیری تر به زمان بیش‌تری نیاز می‌باشد.

۲. آزمایش‌هایی که بیش از ۳۵ ضربه یا کم‌تر از ۱۵ ضربه لازم داشته باشند، یادداشت نخواهند شد، ولی اگر اختلاف $\pm 5\%$ در مقدار حد رولی مجاز باشد، بسته شدن شیار با تعداد ضربات بین ۵ تا ۴۰ را می‌توان پذیرفت.

توجه

بر اساس استاندارد ASTM در آزمایش حد رولی همیشه باید از سمت خشک به سمت مرطوب حرکت کرد و برعکس آن مجاز نیست.

۳. محاسبات

درصد رطوبت را برای هر سه نمونه، مطابق زیر تعیین می‌کنیم:

$$w(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_3 - W_1} \times 100$$

رسم منحنی

یک منحنی نیمه‌لگاریتمی برای تغییرات درصد رطوبت، نسبت به تعداد ضربات (N در مقیاس لگاریتمی) رسم

می‌کنیم که تقریباً یک خط مستقیم خواهد بود و به نام منحنی جریان نامیده می‌شود. از این خط مستقیم، میزان رطوبت

مردود طبه تعداد ۲۵ ضربه را تعیین می کنیم. این درصد رطوبت، حد رولی خاک می باشد.

توجه

این آزمایش را می توان به دو روش تر و خشک انجام داد. در روش خشک به تر، از درصد پایین آب شروع کرده، با افزودن آب به نمونه کم کم درصد رطوبت (میزان رطوبت) را بالا می بریم تا به حد رولی خاک نزدیک شویم (مطابق استاندارد ASTM) و در روش تر به خشک عکس این عمل را انجام می دهیم.

معمولاً در آزمایشگاه، روش خشک به تر ترجیح داده می شود، زیرا افزودن آب به خاک خشک آسان تر است و نیز می توان درصد رطوبت را به طور حساب شده اضافه کرد ولی خشک کردن خاک با درصد رطوبت زیاد و تبدیل آن به خاک با درصد رطوبت کم تر، کار مشکلی است.

آزمایش تعیین حد خمیری

هدف از انجام این آزمایش، تعیین درصد رطوبتی است که در آن، خاک به صورت خمیری شکل پذیر در می آید.

حد خمیری درصد رطوبتی است که در آن یک خاک چسبنده از حالت خمیری به حالت نیمه جامد تغییر می کند. در آزمایشگاه، حد خمیری درصد رطوبتی است که در آن، خاک در اثر فیتله شدن وقتی که قطرش $\frac{1}{8}$ اینچ (حلو د $\frac{3}{2}$ میلی متر) می شود، شروع به ترک خوردن می کند. این آزمایش ممکن است تا حدی وابسته به مشخص آزمایش کننده به نظر برسد و نتایج نیز بر حسب این که چه کسی آزمایش را انجام می دهد، متفاوت باشد؛ ولی با تکرار آزمایش، نتایج تقریباً مشابهی می توان به دست آورد.

WWW.PARS-GEO-AZMA.COM

۱. وسایل آزمایش

۱. ظرف چینی مخصوص تبخیر

۲. کاردک

۳. بطری پلاستیکی

۴. ظروف تعیین درصد رطوبت

۵. شیشه‌ی مسطح

۶. ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم

۲. روش انجام آزمایش

۱. از ۲۰ گرم خاکی که در آزمایش تعیین حد رولبی استفاده شد، ۵/۱ تا ۲ گرم را برداشته، با فشردن بین لگشتان به صورت یک توده‌ی بیضی شکل درمی‌آوریم. این توده‌ی خاکی را بین لگشتان یک کف دست و یک صفحه‌ی شیشه‌ای که بر روی یک سطح صاف و افقی قرار دارد، با فشار کافی می‌غلطیم تا قطر فتیله‌ی حاصله در تمام طول آن یکسان باشد، میزان غلظدن برای اغلب خاک‌ها بین ۸ تا ۹۰ مالش در فقیه خواهد بود که هر مالش، یک حرکت کامل به جلو و عقب می‌باشد. این سرعت برای خاک‌های خیلی ترد و شکننده باید کم‌تر انتخاب شود. مقدار فشار اعمال شده، با توجه به نوع خاک، کاملاً متفاوت خواهد بود. مثلاً خاک‌های شکننده با خاصیت خمیری کم، بهتر است با سطح خارجی دست یا نوک لگشتان، بر روی صفحه‌ی شیشه‌ای غلظده شود.

وقتی فتیله به قطر ۳/۲ میلی‌متر در آمد، آن را به چند قطعه تقسیم می‌کنیم. قطعات را با هم بین لگشتان دو دست فشرده، به شکل توده‌ای یکدخت و بیضی شکل درمی‌آوریم و دوباره روی سطح شیشه‌ی می‌غلطیم. این عمل را آنقدر ادامه می‌دهیم تا وقتی که خاک، تحت فشار لازم برای غلظدن آن خرد شود و دیگر نتواند به شکل فتیله درآید. خرد شدن خاک ممکن است زودی پیش آید که قطر فتیله بیش از ۳/۲ میلی‌متر باشد؛ در صورتی که خاک، قبلاً به صورت

فتیله‌ای به قطر ۳/۲ میلی‌متر در آمده باشد، در این حالت عملیات را متوقف می‌کنیم.

۲. تکه‌های خرد شده‌ی نمونه را جمع کرده، در ظرف مخصوص تعیین درصد رطوبت قرار می‌دهیم و جهت

اطمینان برای دستیابی به حد خمیری، ده قوطی نمونه انتخاب کرده، میانگین درصد رطوبت حاصل از هر یک را به

عنوان حد خمیری گزارش می‌نماییم.

۳. قوطی و خاک را با قوت ۰/۰۱ گرم وزن کرده، داخل گرمخانه قرار داده، پس از خشک شدن نمونه مجدداً

قوطی حاوی نمونه را وزن می‌کنیم. کاهش وزن در نتیجهی خشک شدن را به عنوان وزن آب یادداشت کرده، درصد

رطوبت را که همان حد خمیری است محاسبه می‌کنیم.

۴. مجدداً با انتخاب مقداری دیگر از خاک آزمایش را تکرار می‌کنیم.

۳. محاسبات

همان‌طور که گفته شد، حد خمیری همان درصد رطوبت است که در آن فیلدهی خاک در قطر ۳/۲ میلی‌متر

شروع به ترک خوردن می‌کند.

$$\text{حد خمیری} = \frac{\text{وزن آب نمونه}}{\text{وزن خاک خشک شده در گرمخانه}} \times 100$$

رطوبت حد خمیری به آسانی قابل اندازه‌گیری است و هر کسی با کمی تجربه می‌تواند مقدار آن را با یک یا دو

درصد تقریب معین نماید.

$$PI = \frac{W_p - W_L}{W_p - W_i} \times 100$$

دامنه‌ی خمیری

دامنه‌ی خمیری، اختلاف عددی بین حد رول‌ی و حد خمیری خاک است و مشخص‌کننده‌ی درصد رطوبتی

است که در آن خاک به حالت خمیری می‌ماند. بنابراین:

$$PI = LL - PL$$

وقتی که تعیین حد رول‌ی یا حد خمیری یک خاک به روش‌های استاندارد ذکر شده امکان‌پذیر نباشد، دامنه‌ی

خمیری به صورت NP (خاک غیر پلاستیک) گزارش می‌شود. وقتی که حد خمیری مساوی یا بیش‌تر از حد رول‌ی

باشد، دامنه‌ی خمیری به صورت عدد صفر گزارش می‌شود.

استدانتد ASTM استفاده از آب مقطر را برای مخلوط کردن با خاک پیشنهاد کرده است. با وجود این برای

اغلب کارهای آزمایشگاهی، آب شهری مناسب است.

توجه شود که از حد رولی و حد خمیری به طور گسترده‌ای در سراسر فیما، برای تشخیص اولیه‌ی نوع خاک و طبقه‌بندی آن، استفاده می‌شود. از حد رولی برای تعیین میزان نشست ناشی از تحکیم نیز استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از آنها برای تخمین حداکثر چگالی (دلیسته) در مطالعات مربوط به تراکم، استفاده کرد.

حد چسبندگی و حد چکینگی کاربرد گسترده‌ای ندارند، به همین علت معمولاً حدود اتربرگ را به عنوان حد رولی، خمیری و لقباض معرفی می‌نمایند.

۴. مثال

از این‌جا از همان خاک آزمایش حد رولی نمونه‌گیری شده است.

شماره‌ی ظرف	۳۵	۳۷
وزن خاک مرطوب + وزن ظرف	۲۲/۲۶	۳۷/۰۳
وزن خاک خشک + وزن ظرف	۲۲/۸۴	۲۲/۶۴
وزن ظرف	۲۰/۶۳	۲۰/۶۶
وزن خاک خشک	۲/۲۱	۱/۹۸
وزن آب	۰/۴۲	۰/۳۹
درصد رطوبت	۱۹/۱۷	۱۹/۶

$$PL = \frac{19/17 - 19/6}{2} = 19/4$$

$$PI = 33/4 - 19/4 = 14/0$$