حدود اتربرگ (Atterberg Limits)

در **خاک‌های ریزدانه** رفتار خاک تا اندازه زیادی به درصد رطوبت طبیعی آن وابسته است. اگر به خاک آب اضافه شود حالت های زیر به وجود می آید :

حد روانی حد خمیری حد انقباض

حالت مایع یا روانی ⟵ حالت خمیری ⟵ حالت نیمه جامد ⟵ حالت جامد

کاربرد و اهمیت:

۱. این روش‌های آزمایش به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از چندین سیستم طبقه‌بندی مهندسی نام گذاری خاک برای مشخص کردن بخش‌های ریزدانه خاک و مصالح ساختمانی استفاده می‌شود.
۲. حد روانی، حد خمیری و شاخص پلاستیسیته خاک ها نیز به طور گسترده به صورت جداگانه یا همراه با سایر خواص خاک برای ارتباط با رفتار مهندسی مانند تراکم پذیری، هدایت هیدرولیکی (نفوذپذیری)، تراکم پذیری، انقباض - متورم شدن و استحکام برشی استفاده می شود.
۳. حدود روانی و خمیری خاک و درصد رطوبت آن را می توان برای بیان استحکام خاک یا نشانه روانی آن استفاده کرد. علاوه بر این، از نشانه خمیری و درصد ریزتر از اندازه ذرات ۲ میکرومتر می توان برای تعیین تعداد فعالیت آن استفاده کرد.
۴. گاهی اوقات از این روش ها برای ارزیابی ویژگی های هوازدگی مواد رسی-شیل استفاده می شود. هنگامی که در معرض چرخه های خیس کردن و خشک کردن مکرر قرار می گیرند، حد روانی این مواد افزایش می یابد. میزان افزایش به عنوان معیاری برای سنجش حساسیت شیل به هوازدگی در نظر گرفته می شود.
۵. وقتی خاک قبل از آزمایش در اون خشک می شود، حد روانی خاک حاوی مقادیر قابل توجهی مواد آلی به طور چشمگیری کاهش می یابد. بنابراین مقایسه حد مایع یک نمونه قبل و بعد از خشک کردن در اون می تواند به عنوان معیار کیفی محتوای مواد آلی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

نکته: شیل یا پلمه‌سنگ نوعی سنگ رسوبی آواری دانه‌ریز است که از ترکیب کانی رس و دیگر کانی‌ها و ذرات در اندازه لای ، به‌ویژه کوارتز و کلسیت می‌باشد.

محدودیت ها:

۱. ترکیب و غلظت نمک های محلول در خاک بر مقادیر حدود روانی و خمیری و همچنین مقادیر درصد رطوبت خاک تأثیر می گذارد (به روش ۲۲۱۶ D مراجعه کنید). بنابراین باید توجه ویژه‌ای به خاک‌های محیط دریایی یا سایر منابعی که غلظت نمک محلول در آن‌ها زیاد است، داده شود. میزان رقیق شدن یا غلیظ شدن نمک های موجود در این خاک ها باید به دقت مورد توجه قرار گیرد.

۲. روش های شرح داده شده در اینجا فقط روی آن قسمت از خاک انجام می شود که از غربال ۴۲۵ میکرومتری (شماره ۴۰) عبور می کند. بنابراین، هنگام استفاده از این آزمایش‌ها برای ارزیابی ویژگی‌های یک خاک، سهم نسبی این بخش از خاک در ویژگی‌های نمونه در کل باید در نظر گرفته شود.

۳. در این آزمایش ها بایستی اقدامات ایمنی و بهداشتی متناسب با شرایط خاص محل مورد استفاده توجه گردد.

۴. آزمایش حد خمیری بر روی مواد آماده شده برای آزمایش حد روانی انجام می شود.

۱. **حد روانی:** به درصد رطوبتی از خاک گفته میشود که خاک حالت سیال بسیار ویسکوز بخود بگیرد . در اینصورت اندرکنش بین ذرات کمتر میشود و مقاومت خاک در این حالت ناچیز است.

نحوه محاسبه حد روانی : دو روش وجود دارد (روش ASTM و روش BS)

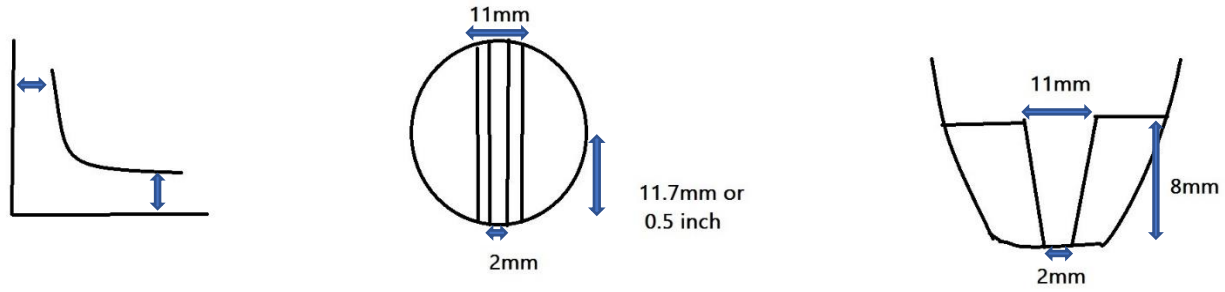
روش اول ASTM 4318 - 00 :

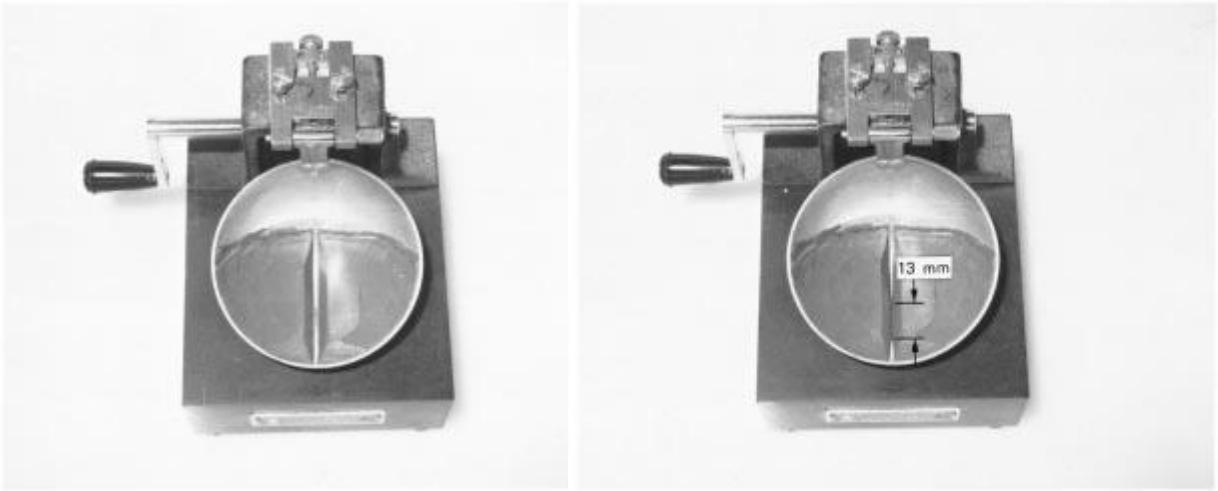
وسایل آزمایش:

- ✓ خاک خشک ریزدانه (عبوری از الک ۴۰)
- ✓ جام کاساگرانده
- ✓ شیار کش
- ✓ ظروف تعیین درصد رطوبت
- ✓ کاردک
- ✓ اون
- ✓ ترازو به دقت ۰.۰۱ گرم

روش انجام آزمایش : مقداری نمونه خاک خمیر شده را داخل یک پیاله برنجی دستگاه کازاگرانده به قطر تقریباً ۵۴ میلیمتر قرار میدهیم.

سپس در نمونه با یک میله ی شیاردهنده ، شکافی با مقطع ذوزنقه ای شکل که قاعده کوچک آن در پایین به عرض 2mm و قاعده بزرگ آن 11mm و ارتفاع آن 8mm است، شیاری ایجاد می‌کنیم. سپس با استفاده از حرکت دسته ی دستگاه کازاگرانده با سرعت ۲ دور بر ثانیه (2 rev/s) این جام بلند خواهد شد و از ارتفاع 1cm به پایه برخورد خواهد کرد. اگر با ۲۵ بار ضربه زدن، 12.7 mm از شیاربسته شود آنگاه درصد رطوبت خاک همان حد روانی است.



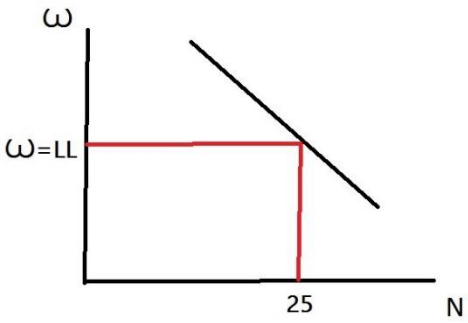


دستگاه کاساگرانده قبل و بعد بسته شدن ۰.۵ اینچ (حدودا ۱۳ میلیمتر)

مسلماً به ندرت پیش می آید که بر روی خاکی در بار اول با درصد رطوبت خاص آزمایش حد روانی انجام دهیم و درست تحت ۲۵ ضربه 12.7 mm بسته شود . بنابراین بهتر است حداقل این آزمایش را ۳ بار تکرار کنیم. اگر تعداد ضربات برای بسته شدن 0.5 inch ، بیشتر از ۳۵ ضربه باشد ، آزمایش باید مجددا تکرار شود. حال وقتی ۳ یا ۴ بار آزمایش انجام شد ، نمودار نیمه لگاریتمی را با محور افقی تعداد ضربه (N) و محور قائم درصد رطوبت رسم میکنیم.

این نمودار در محدوده $15<N<35$ خطی است. بنابراین با رسم این نمودار میتوان برای تعداد ضربه $N=25$ ، درصد رطوبت که همان حد روانی است را درونیابی یا برونیابی کرد.

شماره آزمایش	$\omega(\%)$	N
1	50%	18
2	43%	22
3	31%	30
4	38%	27



به پیشنهاد ASTM با انجام ۲حداقل آزمایش میتوان LL را پیدا کرد؛ لازم به ذکر است شیب خط ω - LogN را نشانه روانی گویند که از رابطه‌ی مقابل تعیین می‌شود:

$$I_f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\text{Log}\frac{N_2}{N_1}}$$

به پیشنهاد مهندسان ارتش آمریکا با انجام ۲ آزمایش نیز می‌توان LL را پیدا کرد:

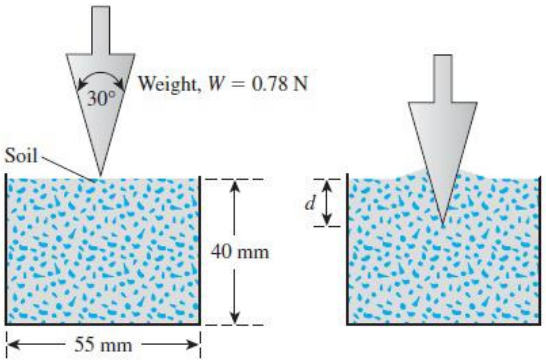
$$LL = (\frac{N}{25})^{0.121} \times \omega_N$$

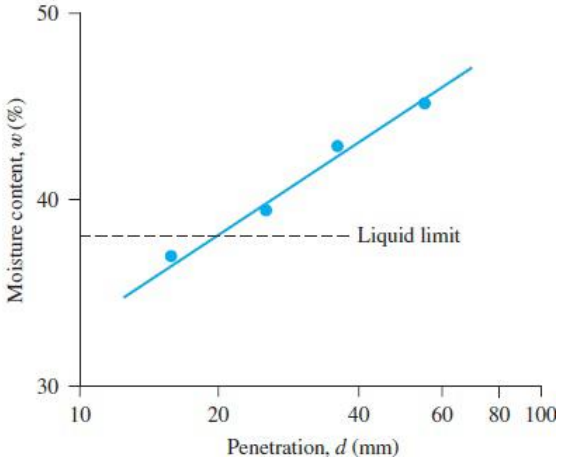
آزمایش حد روانی به ۲ روش انجام میشود :

۱. روش خشک به تر
۲. روش تر به خشک

* روش اول توصیه می شود چون ابتدا خمیر خاکی با رطوبت کم تهیه می‌شود و سپس برای مراحل بعدی آب به آن اضافه می‌شود. در روش دوم اگر از یک نمونه خاک استفاده شود ، باید برای آزمایش بعدی خاک را خشک کنیم. بنابراین روند آزمایش را کندتر و مشکل تر می کند.

روش دوم BS : این آزمایش در آسیا و اروپا متداول تر است و به نظر میرسد که روش دقیق تری است.





روش انجام آزمایش : مخلوط بطور آزاد برای پریود زمانی ۵ ثانیه رها می‌شود، رطوبت نظیر 20mm نفوذ را حد روانی میگویند. این روش همان استاندارد ASTM ، حداقل ۳ یا ۴ مرتبه تکرار شود و نهایتاً مقدار حد روانی تعیین میشود.

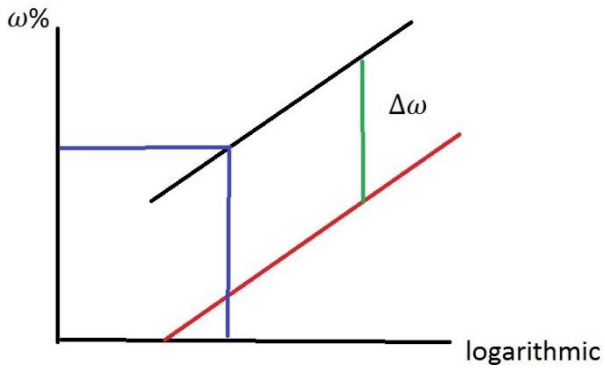
۲. **حد خمیری PL:** درصد رطوبتی است که در آن خاک به حالت خمیر شکل پذیر باشد و کمتر از این حد، خاک ترک برمی‌دارد.

نحوه محاسبه PL :

الف) روش BS : دقیقاً آزمایش با دستگاه مشابه مخروطی است با این تفاوت که به جای جرم ۸۰ گرمی ، از مخروط ۲۴۰ گرمی استفاده می‌شود.

$$PL = LL - \frac{2\Delta\omega}{\log\frac{m_2}{m_1}} = LL - 4.2\Delta\omega$$

روش بدست آوردن $\Delta\omega$:



انجام دادن آزمایش بصورت جداگانه با وزنه های ۸۰ و ۲۴۰ گرمی و سپس محاسبه اختلاف آنها که $\Delta\omega$ میباشد.

$$\Delta\omega = LL - \omega_{240}$$

ب) روش ASTM 4318 -00 : مقداری خاک ریز دانه را در نظر میگیریم و به آن آب اضافه میکنیم تا به حالت خمیر درآید. سپس با استفاده از انگشتان دست، خمیر را به سطوح صاف می غلتانیم تا به شکل فیتیله با قطر 3.2 mm درآید. اگر ترک های مویی مشاهده شود، آنگاه درصد رطوبت خاک همان PL است . اگر در این قطر ترک نخورد ، آن را به ۶ تا ۸ قسمت مساوی تقسیم میکنیم و سپس بین انگشتان فشرده و به شکل تقریبا بیضی درمی آوریم و دوباره روی سطوح شیشه ای یا صاف می غلتانیم ، با این کار خاک رطوبت خود را از دست میدهد . این کار را آنقدر ادامه میدهیم تا خاک در قطر 3.2 mm ترک بخورد. درصد رطوبت نمونه ترک خورده همان حد خمیریست.

۳. **دامنه یا نشانه خمیری:** اختلاف عددی بین حد روانی و حد خمیری خاک است و مشخص کننده درصد رطوبتی است که در آن حد خاک، به حالت خمیری می ماند. درصد رطوبتی است که در آن خاک به حالت خمیر شکل پذیر باشد و کمتر از این حد خاک ترک بر می دارد.

$$PI = LL - PL$$

PI	Description
0	Nonplastic
1–5	Slightly plastic
5–10	Low plasticity
10–20	Medium plasticity
20–40	High plasticity
>40	Very high plasticity

۴. نشانه روانی Liquidity Index: نشانه روانی از رابطه ی زیر تعیین می شود:

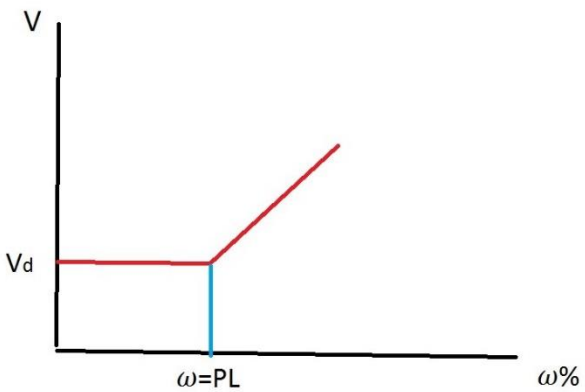
$$LI = \frac{\omega - PL}{PI} = \frac{\omega - PL}{LL - PL}$$

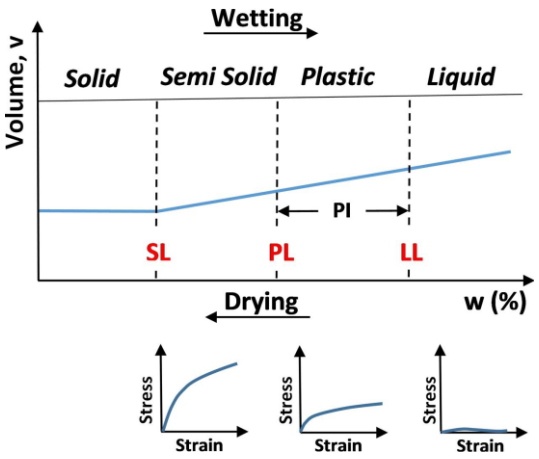
که در آن PL حد خمیری، LL حد روانی و ω درصد رطوبت فعلی خاک است. مطابق رابطه:

- if LI > 1 ⟹ $\omega > LL$ ⟹ خاک در بالاتر از حد روانی
- if LI = 1 ⟹ $\omega = LL$ ⟹ خاک در حد روانی
- if LI = 0 ⟹ $\omega = PL$ ⟹ خاک در حد خمیری
- if LI<0 ⟹ $\omega < PL$ ⟹ خاک در حالت نیمه جامد یا جامد

۵. حد انقباض (SL) :

درصد رطوبتی است که کمتر از آن حد ، اضافه یا کم کردن آب به خاک تاثیری در تغییر حجم خاک ندارد. . به عبارتی دیگر اگر به خاک در حالت جامد ، آب اضافه یا از آن کم کنیم ، تغییر حجم نمیدهد ولی اگر خاک در حالت نیمه جامد باشد و به آن آب اضافه یا کم کنیم ، حجم خاک تغییر خواهد کرد. در این حد خاک اشباع است.

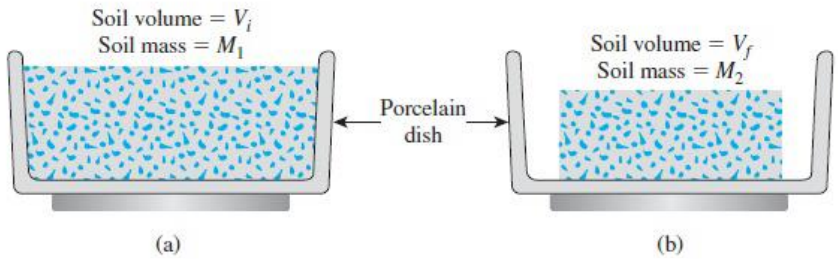




روش انجام آزمایش (ASTM D427): خاک خمیر شده را با رطوبت بالا درون ظرف چینی به قطر ۴۴.۵ و ارتفاع ۱۲.۵ میلیمتر می ریزیم به طوری که ظرف کاملا پر شده و سطح خاک را با کاردک صاف می کنیم. در اینصورت حجم اولیه خاک (V_1) برابر با حجم درون ظرف است. توجه شود که قبل از ریختن خمیر در ظرف، باید ظرف خالی به همراه درب آن را وزن کنیم (W_c)، سپس وزن ظرف پر شده از خاک خمیر شده (W_1) به همراه درب آن را نیز وزن می کنیم. سپس ظرف پر از خمیر را برای مدت ۲۴ ساعت درون اون قرار می دهیم تا خاک کاملا خشک شود و سپس مجددا آن را به همراه درب وزن می کنیم (W_2) و با داشتن وزن خمیر مرطوب و وزن خشک شده ی آن می توانیم درصد رطوبت آن را از رابطه زیر محاسبه کنیم:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100$$

بعد از خشک کردن خاک، حجم خاک خشک شده (V_2) را به کمک جیوه تعیین می کنیم. خمیر خاک پس از خشک شدن کاهش حجم دارد. اگر حجم از کاهش یافته را دوباره با جیوه پر کنیم آنگاه حجم جیوه و حجم از دست رفته ΔV با هم برابر خواهد بود. انتخاب جیوه برای تعیین حجم کاهش یافته به دو دلیل است: اولا سیال است، ثانیا به داخل ذرات خاک نفوذ نمی کند. نهایتا حد انقباض SL از فرمول زیر محاسبه می شود:



Mineral	Shrinkage limit
Montmorillonite	8.5–15
Illite	15–17
Kaolinite	25–29

$$SL = \omega - \frac{\Delta V \gamma_w}{W_2 - W_c} \times 100 = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} - \frac{V_1 - V_2}{W_2 - W_c}\gamma_w\right) \times 100 = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} - \frac{V_i - V_f}{M_2}\rho_w\right) \times 100$$

نکات:

۱. اگر از حد روانی و خمیری خاک ها برای همبستگی یا تخمین رفتار مهندسی خاک ها در حالت مرطوب طبیعی استفاده شود، نمونه ها نباید قبل از آزمایش خشک شوند مگر اینکه داده های مربوط به نمونه های خشک شده به طور خاص مورد نظر باشد.

۲. ترکیب و غلظت نمک های محلول در خاک بر مقادیر حدود روانی و خمیری و همچنین مقادیر درصد رطوبت خاک تأثیر می گذارد. بنابراین باید توجه ویژه‌ای به خاک‌های محیط دریایی یا سایر منابعی که غلظت نمک محلول در آن‌ها زیاد است، داده شود. میزان رقیق شدن یا غلیظ شدن نمک های موجود در این خاک ها باید به دقت مورد توجه قرار گیرد.

۳. مقدار درصد وزنی ذرات ریزتر از ۰.۰۰۲ میلیمتر با کمک درون یابی از اطلاعات منحنی دانه بندی آزمایش هیدرومتری به دست می‌آید.

جداول نمونه گزارش کار حدود اتربرگ:

داده ها و محاسبات آزمایش حد روانی:

زمان در آوردن از اون	زمان گذاشتن در اون	(ω%)درصد رطوبت	وزن نمونه خشک همراه با ظرف (gr)	وزن نمونه مرطوب همراه با ظرف (gr)	وزن ظرف (gr)	تعداد ضربه (N)	شماره گروه
13:20	17:30	29.076224	64.52	70.28	44.71	42	**1**
13:15	17:20	30.858283	70.18	77.91	45.13	38	**2**
13:12	17.21	31.454607	75.69	85.01	46.06	23	**3**
13:20	17:30	31.247375	69.82	77.26	46.01	26	**استاد**

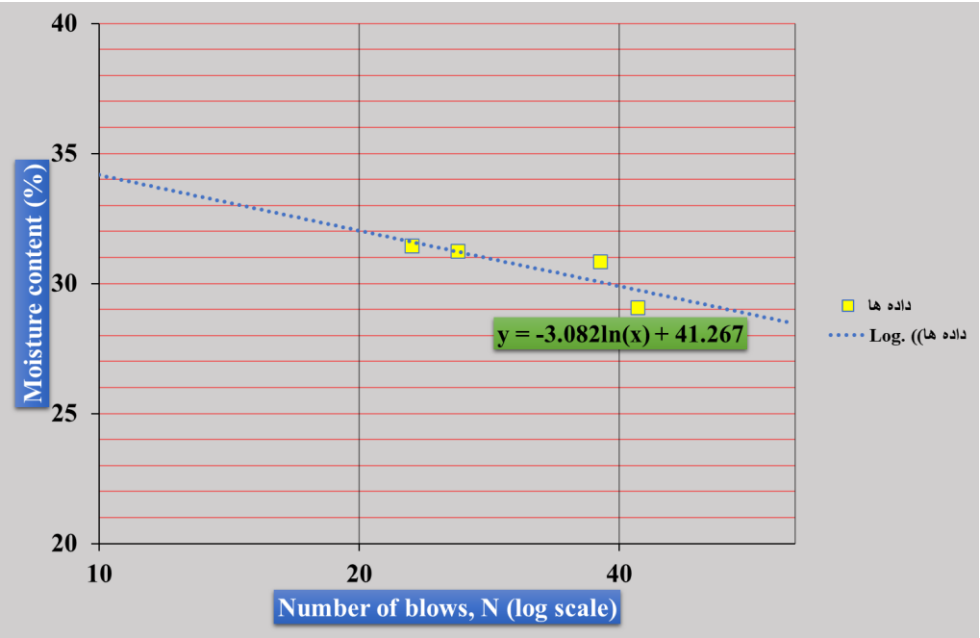
داده ها و محاسبات حد خمیری:

زمان در آوردن از اون	زمان گذاشتن در اون	(ω%)درصد رطوبت	وزن نمونه خشک همراه با ظرف (gr)	وزن نمونه مرطوب همراه با ظرف (gr)	وزن ظرف (gr)	شماره ظرف	شماره گروه
13:20	17:30	17.741935	49.31	49.64	47.45	۱	**1**
13:15	17:20	25.274725	49.24	49.47	48.33	۱	**2**
13:15	17:20	۱۸.۲۴۸۱۷۵	۴۶.۸۹	۴۷.۱۴	۴۵.۵۲	۲	**۲**
13:12	17.21	۶.۸۴۹۳۱۵۱	۴۵.۳۶	۴۵.۴۱	۴۴.۶۳	۱	**3**
13:12	17.21	12.280702	45.95	46.09	44.81	۲	**۳**
		16.090271					**میانگین**

جدول نتایج آزمایش های حد روانی و خمیری:

توضیحات	مقادیر و توصیف ها	فرمول ها و محدوده ها
حد روانی به روش برازش داده ها	31.34642471	**$LL = -3.082\ln(25) + 41.267$**
حد روانی به روش ارتش آمریکا	31.39601835	**$LL= \omega_N * (N/25)^{0.121}$**
حد خمیری	16.09027081	**PL**
نشانه خمیری	15.2561539	**PI=LL-PL**
محدوده PI	Medium plasticity	**10<PI<20**
مقدار درصد وزنی ذرات ریز تر از ۰.۰۰۲	2.1834	**$PP_c = 2645.3*(0.002) - 3.1072$**
فعالیت خاک	6.98733805	**A=PI/C**
پتانسیل تورم	0.060679467	**$S= 3.6*10^{-5}*A^{2.44} * C^{3.44}$**
تعیین نوع کانی	مونت موریونیت	**A>1.25**
میزان درجه تورم	کم	**0<S<1.5**
U-line	21.01178224	**PI=0.9(LL-8)**
A-line	8.282890037	**PI=0.73(LL-20)**
اسم خاک (یونیفاید)	CL or OL	**30 < LL < 50 , 7.32<PI < 19.83**
اسم خاک (آشو)	A-2-6 or A-6	**PI > 10 , 0 <LL< 40**

نمودار گزارش کار نمونه:



جداول پیشنهادی آزمایش حدود اتربرگ:

جدول داده ها و محاسبات آزمایش حد روانی:

زمان در آوردن از اون	زمان گذاشتن در اون	(ω%) درصد رطوبت	وزن نمونه خشک همراه با ظرف (gr)	وزن نمونه مرطوب همراه با ظرف (gr)	وزن ظرف (gr)	تعداد ضربه (N)	شماره گروه
							1
							2
							3

جدول داده ها و محاسبات آزمایش حد خمیری:

زمان در آوردن از اون	زمان گذاشتن در اون	(ω%)درصد رطوبت	وزن نمونه خشک همراه با ظرف (gr)	وزن نمونه مرطوب همراه با ظرف (gr)	وزن ظرف (gr)	شماره گروه
						1
						2
						3
						میانگین

جدول نتایج آزمایش های حد روانی و خمیری:

توضیحات	مقادیر و توصیف ها	فرمول ها و محدوده ها
حد روانی به روش برازش داده ها		LL = …ln(25) + …
حد روانی به روش ارتش آمریکا		$LL= \omega_N * (N/25)^{0.121}$
حد خمیری		PL
نشانه خمیری		PI=LL-PL
محدوده PI		…<PI< …
مقدار درصد وزنی ذرات ریز تر از ۰.۰۰۲		PP_c (با آزمایش هیدرومتری)
فعالیت خاک		A=PI/C
پتانسیل تورم		$S= 3.6*10^{-5}*A^{2.44} * C^{3.44}$
تعیین نوع کانی		… <A< …
میزان درجه تورم		… <S< …
U-line		PI=0.9(LL-8)
A-line		PI=0.73(LL-20)
اسم خاک (یونیفاید)		… < LL < … , …<PI < …
اسم خاک (آشو)		… <PI< … , … <LL< …