مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال دهم، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۷
ص ۴۰۳-۴۱۳

تأثیر روش‌های مختلف تعیین حدود آتربرگ بر نتایج کلاسه‌بندی یونیفاید خاک

احسان عبدی[1*]، مهاباد سلیمی زند[2] و فاطمه موسوی[3]

[1] دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
[2] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
[3] دانشجوی دکتری مهندسی جنگل گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۱۷)

چکیده

یکی از مشخصات مهم و اساسی خاک‌های ریزدانه، خاصیت خمیرایی یا حدود آتربرگ آنهاست که به‌صورت مستقیم در طبقه‌بندی و پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی و رفتار خاک کاربرد دارند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن نمونهٔ خاک در حدود آتربرگ و نیز نوع دستگاه اندازه‌گیری در تعیین حد روانی و اثرهای این عوامل در کلاسه‌بندی یونیفاید متناظر خاک است. همچنین در این تحقیق، نتایج روش حد روانی تک‌نقطه‌ای کازاگرانده با روش چندنقطه‌ای معمول مقایسه شد. به این منظور، نمونه‌های خاک از سه تیپ مختلف پوشش گیاهی جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تهران و از هر تیپ، از پنج عمق متفاوت تهیه شد و به آزمایشگاه انتقال یافت. نتایج نشان داد که تیمار خشک کردن موجب تفاوت در کلاسه‌بندی خاک در ۳۳ درصد نمونه‌ها شد. استفاده از روش آون‌خشک نسبت به هواخشک به‌طور متوسط سبب کم‌برآوردی ۱۴/۵، ۱۳/۷ و ۱۰ درصدی به‌ترتیب حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری شد. نتایج مقایسهٔ دو دستگاه کازاگرانده و مخروط نفوذ برای تعیین حد روانی خاک، نشان داد که با وجود نزدیک بودن نتایج دو روش در یک نمونه از ۱۵ نمونه خاک موجب کلاسه‌بندی متفاوت خاک شد. در نهایت، استفاده از روش تک‌نقطه‌ای در تعیین حد روانی، اختلافی با روش چندنقطه‌ای نشان نداد و اختلاف حد روانی دو روش به‌طور متوسط ۰/۲۶ درصد بود که به تغییر شاخص‌ها در مرزهای نمودار خمیرایی کازاگرانده منجر نشد؛ بنابراین روش تک‌نقطه‌ای در موارد وجود تجربهٔ کافی و تعداد نمونهٔ زیاد، به‌عنوان جایگزین مطمئن روش معمول چندنقطه‌ای قابل توصیه است. نتایج این مطالعه نشان داد که حتی ساده‌ترین موارد در روند انجام آزمایش‌های خمیرایی خاک مانند روش خشک کردن نمونه‌ها نیز می‌تواند صحت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.

واژه‌های کلیدی: حد روانی، خمیرایی خاک، روش تک‌نقطه‌ای، کازاگرانده، مخروط نفوذ.

مقدمه

رفتار خاک‌های ریزدانه و چسبنده به عوامل زیادی از جمله ترکیب مواد معدنی، درصد رطوبت و ساختمان خاک بستگی دارد. خاک‌های چسبنده بسته به مقدار رطوبت حالت‌های فیزیکی متفاوتی دارند و با افزایش مقدار آب جذب‌شده تغییر حالت فیزیکی می‌دهند (Rahimi, 2005). افزایش رطوبت در خاک‌های چسبنده موجب پوشیده شدن ذرات با یک‌لایه آب جذب سطحی می‌شود. با افزایش مقدار رطوبت، ضخامت لایه آب دور ذرات افزایش می‌یابد و لغزش آنها روی یکدیگر راحت‌تر می‌شود. ضخامت لایهٔ آب جذب‌شده در اطراف دانه‌های خاک به نوع کانی و

* نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۳۲۲۴۹۳۱۲- ۰۲۶
ایمیل: abdie@ut.ac.ir

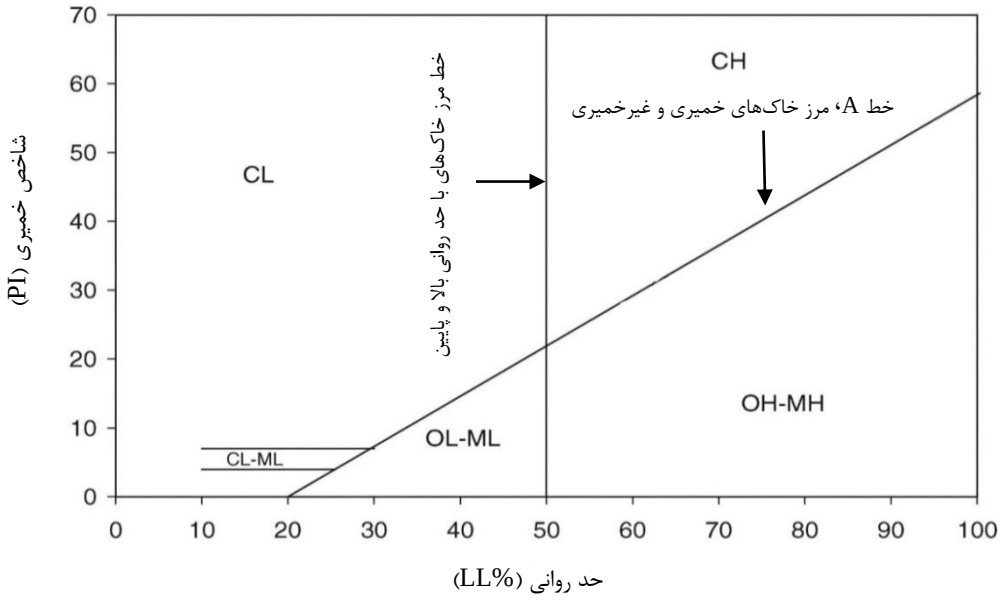
ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده، اندازه و شکل دانه‌های خاک وابسته است (Andrade et al., 2011). با توجه به اینکه ویژگی‌های مهمی از خاک، مانند تراکم‌پذیری، مقاومت و همچنین حدود آتربرگ، متأثر از مشخصات این لایه آب جذب شده است، رفتار خاک‌های ریزدانه به‌طور مستقیم به مقدار آب داخل مجموعه بستگی دارد (Murthy, 2003). حدود آتربرگ[1] و به‌ویژه حد روانی[2] و حد خمیری[3] مهم‌ترین ویژگی‌های مرتبط با رطوبت هستند که در طبقه‌بندی خاک‌های چسبنده به‌کار می‌روند و شاخص‌هایی برای تعریف خواص مکانیکی خاک‌های ریزدانه‌اند (Kayabali et al., 2015). در خاک‌های ریزدانه با افزایش بیش از اندازهٔ رطوبت، خاک به حالت مایع نزدیک شده و به‌اصطلاح روان می‌شود. حد روانی نقطه‌ای است که رفتار خاک از حالت خمیری به حالت روان تغییر می‌یابد (Rahimi, 2005). درصد رطوبتی که باید به خاک اضافه شود تا از حد خمیری به حد روانی برسد، بیانگر خاصیت خمیری آن خاک است که با شاخص خمیری[4] (PI) مشخص می‌شود. شاخص خمیری اختلاف حد روانی و حد خمیری است و هر چه این دامنه بیشتر باشد، خاک چسبنده‌تر و خمیری‌تر خواهد بود. مقاومت برشی خاک‌ها در حد روانی کاهش چشمگیری می‌یابد و مقاومت برشی در رطوبت نزدیک به حد روانی بسیار اندک و نزدیک صفر است که در صورت وقوع در محیط ممکن است سبب خسارت جبران‌ناپذیری شود. این مسئله به‌ویژه در مورد دامنه‌ها و شیب‌ها، اهمیت تعیین مقدار دقیق حد روانی را نشان می‌دهد (Andrade et al, 2011). حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به‌تنهایی یا همراه با دیگر ویژگی‌های خاک برای پیش‌بینی رفتارهای مهندسی مانند تراکم‌پذیری، نفوذپذیری، تورم و انقباض یا انتخاب شیوهٔ مناسب تثبیت خاک به‌طور گسترده استفاده می‌شوند (ASTM D4318, 2010)؛ بنابراین با توجه به اهمیت شاخص‌های خمیرایی خاک، تعیین دقیق آنها عاملی مهم در موفقیت پروژه‌های عمرانی و کاهش ریسک خسارت خواهد بود. با وجود سادگی نسبی روند اجرای آزمایش‌های مربوط به خمیرایی خاک، دو عامل شیوهٔ خشک کردن نمونه‌ها (Yong et al., 2012; Fookes et al., 1997) و نوع دستگاه به‌کاررفته (Mousavi & Abdi, 2015) ممکن است بر نتایج آزمایش تأثیرگذار باشند. بر اساس استاندارد ASTM D4318، خاک مورد استفاده در تعیین حدود آتربرگ باید در هوای آزاد خشک شده باشد و چنانکه برخی تحقیقات نشان داده‌اند، خشک شدن خاک در درجه حرارت‌های مختلف، خواص خاک را تغییر خواهد داد (Aashan et al., 2014).

گاهی به‌دلیل ناآگاهی از استاندارد (در برخی کتاب‌ها و راهنماها به روش خشک کردن پرداخته نشده است)، محدودیت زمانی یا مقدار زیاد رطوبت نسبی هوا در محیط (مانند شمال ایران)، نمونه‌های خاک در آون خشک می‌شوند که ممکن است به نتایج گمراه‌کننده‌ای بینجامد. از طرف دیگر نوع دستگاه مورد استفاده در تعیین حد روانی و تجربهٔ کاربر نیز ممکن است سبب ایجاد تفاوت در نتایج شود (Mousavi & Abdi, 2015). از نظر نوع دستگاه، دو روش اصلی استاندارد برای تعیین حد روانی خاک وجود دارد. رایج‌ترین روش ASTM D4318[5] و استفاده از دستگاه کازاگرانده[6] و روش دیگر استفاده از دستگاه مخروط نفوذ[7] (استاندارد BS 1377-2[8]) است. روش کازاگرانده با وجود سادگی، به تجربهٔ زیادی نیاز دارد و بیشترین خطا در آن مربوط به عملکرد و تجربهٔ کاربر است (Kayabali et al., 2015). عوامل مؤثر بر قطعی نبودن نتایج دستگاه کازاگرانده شامل میزان سختی پایهٔ دستگاه، تغییرات در ارتفاع سقوط به‌دلیل کالیبره نکردن منظم ارتفاع سقوط کاسهٔ فلزی، عملکرد

1. Atterberg limits
2. Liquid limit
3. Plastic limit
4. Plasticity index
5. American society for testing and materials
6. Casagrande
7. cone penetrometer
8. British Standard

کاربر، نوع خاک، استفاده از ابزار فرسوده، تشکیل نادرست شیار خاک و تمایل شیار خاک به یکی از دو نیم‌قسمت خاک است (Kayabali et al., 2015). روش مخروط نفوذسنج ساده‌تر و سریع‌تر است و به عوامل ذهنی و تجربهٔ کاربر حساسیت کمتری دارد و از این نظر، روش استاندارد برای تعیین حد روانی در استاندارد EC7[1] اروپا به‌شمار می‌رود (Aashan et al., 2014). علاوه بر نوع دستگاه اندازه‌گیری، روش دیگری که در ایران و به‌ویژه در مهندسی جنگل کمتر به آن توجه شده، پروتکل تک‌نقطه‌ای[2] به‌منظور سرعت بخشیدن به تعیین حد روانی در استاندارد ASTM است. در این روش با تنها یک تکرار آزمایش کازاگرانده، حد روانی خاک تعیین می‌شود. این روش که در حال حاضر در بسیاری از کشورها به‌کار می‌رود، اولین بار توسط ایستگاه آزمایشی راه‌های آبی ایالات متحده در سال ۱۹۴۹ با اجرای آزمایش حد روانی به‌وسیلهٔ دستگاه کازاگرانده بر روی ۷۶۷ نمونهٔ خاک اعمال شد. این رابطه در پی آن به‌عنوان روش تک‌نقطه‌ای برای تعیین حد روانی در استاندارد ASTM D4318 پذیرفته و اجرایی شد. تعداد ضربه در روش تک‌نقطه‌ای باید بین ۳۰-۲۰ باشد؛ اگر تعداد ضربات بیشتر از ۳۰ یا کمتر از ۲۰ باشد، با تنظیم مقدار آب خمیر خاک، آزمایش دوباره باید تکرار شود.

یکی از کاربردهای مهم شاخص‌های خمیرایی خاک، استفاده در طبقه‌بندی مهندسی خاک یا یونیفاید[3] است؛ پس از مشخص شدن طبقهٔ خاک، بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مانند تورم و مقاومت پیش‌بینی‌پذیر خواهند بود (Rahimi, 2005). اهمیت تعیین دقیق حدود آتربرگ در برخی موارد از جمله مرزهای منحنی خمیرایی کازاگرانده اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. در خاک‌های دارای حد روانی نزدیک عدد ۵۰ که مرز حد روانی بالا (سمت راست خط) و پایین (سمت چپ خط) هستند، مقدار کمی خطا از نظر فنی معنادار است و سبب طبقه‌بندی متفاوت خاک خواهد شد (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار خمیرایی کازاگرانده و خطوط مرزی حد روانی و A (Das, 1983)

1. Euro code 7
2. One- point protocol
3. Unified soil engineering classification

همچنین قسمت مهم دیگر، خط A مرز خاک‌های خمیری (بالای خط) و غیرخمیری (پایین خط) است؛ گاهی برخی اشکالات در تعیین حد خمیری ممکن است موجب تغییر شاخص خمیری و ایجاد خطا و تبدیل طبقهٔ M (لای) به C (رس) یا برعکس شود (شکل ۱). بدیهی است در این نقاط مرزی اندکی اشتباه در تعیین حدود آتربرگ، مشکل‌ساز است و اهمیت بسیار زیادی دارد (Mousavi & Abdi, 2015).

با توجه به مطالب ذکرشده، هدف این تحقیق، بررسی تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن نمونهٔ خاک و نوع دستگاه‌های اندازه‌گیری در تعیین حدود آتربرگ و کلاسه‌بندی یونیفاید متناظر خاک است. البته در صورت وجود تأثیر، جهت تغییرات نیز دارای اهمیت است. هدف فرعی تحقیق حاضر نیز، مقایسهٔ نتایج روش تک‌نقطه‌ای کازاگرانده (به‌عنوان روشی بسیار سریع) با نتایج روش چندنقطه‌ای[1] معمول کازاگرانده و تعیین حد تفاوت نتایج این روش در تعیین حد روانی و کلاسه‌بندی متناظر خاک است. شایان ذکر است که به‌منظور مقایسهٔ دو روش تعیین حد روانی خاک با استفاده از دستگاه مخروط نفوذ و کازاگرانده و همچنین مقایسهٔ روش تک‌نقطه‌ای کازاگرانده با روش چندنقطه‌ای کازاگرانده، نمونه‌های خاک براساس استاندارد ASTM D4318 در هوای آزاد خشک شدند.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

نمونه‌های خاک مورد نیاز آزمایش‌ها از پارسل ۱۱۷ بخش پاتم جنگل دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران در ۱۰ کیلومتری نوشهر تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. برای داشتن نمونه خاک‌هایی متفاوت، ۱۵ نمونه از سه منطقه با پوشش گیاهی سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و منطقهٔ گپ (حفرهٔ قطع یا فضای خالی از درخت) و از عمق‌های مختلف خاک (۳۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۲۰ سانتی‌متر) تهیه شدند. برای برداشت نمونه‌های خاک ابتدا در هر منطقه، پروفیلی به عمق ۲۲۰ سانتی‌متر به‌شکل دیوارهٔ پلکانی حفر و نمونه‌های دست‌نخوردهٔ خاک در هر عمق به‌وسیلهٔ آگر گرفته شد. براساس آزمایش‌های اولیهٔ دانه‌بندی، درصد عبوری از الک ۲۰۰ در همهٔ نمونه‌ها بیش از ۹۵ درصد بود و بنابراین کلیهٔ نمونه‌های خاک ریزدانه بودند.

روش پژوهش

ابتدا نمونه‌های خاک کوبیده شد و برای مقایسهٔ روش خشک کردن در آون[2] با روش هواخشک[3] و همچنین دستگاه کازاگرانده (ASTM D4318, 2010) با مخروط نفوذ (BS 1377-2, 1990) برای هر تیمار حدود ۳۰۰ گرم خاک عبور داده‌شده از الک شمارهٔ ۴۰ آماده شد و آزمایش‌ها مطابق استانداردهای مربوط انجام گرفت. برای مقایسهٔ روش‌های خشک کردن، مقدار لازم از هر نمونهٔ خاک به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد در آون قرار داده شد (ASTM D2216, 2010). همچنین در روش خشک کردن در هوای آزاد، نمونه‌ها دو هفته در آزمایشگاه روی کیسه‌های پلاستیکی پخش و در معرض هوای آزاد قرار داده می‌شوند تا زمانی که خاک دیگر رطوبتی برای از دست دادن نداشته باشد (وزن خاک ثابت شود). برای بررسی تأثیر این دو روش خشک کردن در تعیین حد روانی خاک، از دستگاه مخروط نفوذ استفاده شد. همچنین برای مقایسهٔ نتایج روش تک‌نقطه‌ای کازاگرانده (یک تکرار) با روش چندنقطه‌ای (شیوهٔ معمول)، در هر نمونهٔ خاک یک تکرار با دستگاه کازاگرانده که تعداد ضربه برای بستن شیار در دامنهٔ ۳۰-۲۰ ضربه قرار داشت، انجام گرفت. حد روانی خاک به‌روش تک‌نقطه‌ای با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه شد (Rahimi, 2005):

1. Multi-Point method
2. Oven dry
3. Air dry

رابطهٔ ۱ $$W_L = W_N \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan\beta}$$

W_L حد روانی خاک به‌روش تک‌نقطه‌ای، N تعداد ضرباتی که سبب بسته شدن شیار به طول ۱۳ میلی‌متر شده است، W_N درصد رطوبت در آن تعداد ضربه و tanβ شیب منحنی روانی خاک برابر ۰/۱۲۱ است (ASTM D4318, 2010).

در نهایت برای نشان دادن نتیجهٔ استفاده از آنالیز آماری نتایج حد روانی‌های به‌دست‌آمده در دو روش هواخشک با آون‌خشک، دستگاه کازاگرانده با دستگاه مخروط نفوذ و همچنین روش تک‌نقطه‌ای کازاگرانده با روش چندنقطه‌ای معمول از مقایسهٔ میانگین‌ها به روش تی جفتی در محیط نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج

- تیمار خشک کردن

نتایج آزمایش حدود آتربرگ و کلاسه‌بندی خاک با استفاده از دستگاه مخروط نفوذ با دو روش هواخشک و آون‌خشک در جدول ۱ و میانگین ± اشتباه معیار درصد تغییرات حدود آتربرگ در روش تیمار هواخشک در مقایسه با آون‌خشک در جدول ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است که برای بررسی تفاوت‌ها، مهم‌ترین معیار از نظر فنی عوض شدن کلاسهٔ یونیفاید خاک در اثر تغییرهای حدود آتربرگ بود.

جدول ۱- نتایج حدود آتربرگ دو تیمار هواخشک و آون‌خشک (حد روانی مربوط به دستگاه مخروط نفوذ)

کد نمونه خاک	هواخشک				آون‌خشک			
	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	کلاسه خاک	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	کلاسه خاک
C۳۰	۴۳/۸	۲۵/۲	۱۸/۶	CL	۳۸/۳	۲۱/۶	۱۶/۷	CL
C۶۰	۵۰/۸	۳۰/۲	۲۰/۶	MH	۴۰/۶	۲۶/۵	۱۴/۱	ML
C۱۰۰	۶۴/۷	۳۴/۳	۳۰/۴	MH	۵۹/۱	۳۱/۶	۲۷/۵	MH
C۱۵۰	۶۵/۲	۴۴/۳	۲۰/۹	MH	۵۷/۵	۴۰/۲	۱۷/۳	MH
C۲۲۰	۷۰/۵	۳۱/۷	۳۸/۸	CH	۶۳/۶	۲۴/۴	۳۹/۲	CH
G۳۰	۴۳/۵	۲۳/۱	۲۰/۴	CL	۴۰/۷	۲۰/۱	۲۰/۶	CL
G۶۰	۶۸/۴	۲۸/۷	۳۹/۶	CH	۵۶/۶	۲۴/۶	۳۲/۰	CH
G۱۰۰	۶۲/۷	۲۸/۵	۳۴/۲	CH	۵۲/۵	۲۴/۶	۲۸/۰	CH
G۱۵۰	۶۲/۳	۲۸/۷	۳۳/۶	CH	۵۳/۹	۲۵/۲	۲۸/۷	CH
G۲۲۰	۴۹/۷	۲۴/۴	۲۵/۳	CL	۴۴/۷	۲۰/۹	۲۳/۹	CL
D۳۰	۴۱/۹	۲۹/۹	۱۲/۰	ML	۳۹/۵	۲۵/۱	۱۴/۴	ML
D۶۰	۵۷/۴	۲۵/۹	۳۱/۵	CH	۴۷/۸	۲۱/۳	۲۶/۵	CL
D۱۰۰	۶۵/۰	۳۲/۰	۳۳/۰	MH	۵۴/۰	۲۶/۲	۲۷/۸	CH
D۱۵۰	۵۵/۴	۳۵/۸	۱۹/۶	MH	۴۹/۷	۲۸/۹	۲۰/۸	ML
D۲۲۰	۵۱/۳	۳۱/۲	۲۰/۰	MH	۴۴/۷	۳۰/۸	۱۳/۹	ML

(خانه‌های تیره نشان‌دهندهٔ تغییر کلاسهٔ یونیفاید خاک به‌دست‌آمده از دو روش است).

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در پنج نمونه، کلاسهٔ خاک در دو روش خشک کردن متفاوت است و این تفاوت هم شامل تفاوت در اندازهٔ روانی (H یا L) و هم خمیرایی خاک (M یا C) است. به‌صورت کلی مقادیر حد روانی و خمیری روش هواخشک بیش از تیمار آون‌خشک است.

جدول ۲- میانگین ± اشتباه معیار درصد تغییرات حدود آتربرگ تیمار هواخشک در مقایسه با آون‌خشک

مشخصهٔ خاک	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری
درصد تغییر	+۱۴/۵۴ ± ۱/۴۴	+۱۳/۷۸ ± ۱/۳۳	+۱۰/۶۶ ± ۳/۵۱

(علامت مثبت نشان‌دهندهٔ افزایش مقادیر است).

همان‌طور که از جدول ۲ پیداست، میانگین حد روانی و حد خمیری نمونه‌های خشک‌شده در هوای آزاد، به‌ترتیب حدود ۱۴ و ۱۳ درصد بیش از مقدار به‌دست‌آمده برای این شاخص‌ها در روش آون‌خشک بوده است.

- تیمار نوع دستگاه اندازه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از روش کازاگرانده و مخروط نفوذ برای تعیین حد روانی نمونه‌های هواخشک خاک در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج حدود روانی به‌دست‌آمده در دو دستگاه کازاگرانده و مخروط نفوذ و کلاسه‌بندی نمونه‌های خاک

کد نمونهٔ خاک	دستگاه مخروط نفوذ				دستگاه کازاگرانده				تفاوت حد روانی با دستگاه مخروط نفوذ و کازاگرانده
	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	کلاسهٔ خاک	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	کلاسهٔ خاک	
C۳۰	۴۳/۸	۲۵/۲	۱۸/۶	CL	۴۰/۹	۲۵/۲	۱۵/۷	ML	۲/۹+
C۶۰	۵۰/۸	۳۰/۲	۲۰/۶	MH	۵۱/۶	۳۰/۲	۲۱/۵	MH	۰/۸-
C۱۰۰	۶۴/۷	۳۴/۳	۳۰/۴	MH	۶۲/۴	۳۴/۳	۲۸/۱	MH	۲/۳+
C۱۵۰	۶۵/۲	۴۴/۳	۲۰/۹	MH	۶۴/۷	۴۴/۳	۲۰/۴	MH	۰/۵+
C۲۲۰	۷۰/۵	۳۱/۷	۳۸/۸	CH	۷۱/۳	۳۱/۷	۳۹/۶	CH	۰/۸-
G۳۰	۴۳/۵	۲۳/۱	۲۰/۴	CL	۴۳/۸	۲۳/۱	۲۰/۷	CL	۰/۳-
G۶۰	۶۸/۴	۲۸/۷	۳۹/۶	CH	۶۸/۸	۲۸/۷	۴۰/۱	CH	۰/۴-
G۱۰۰	۶۲/۷	۲۸/۵	۳۴/۲	CH	۶۴/۰	۲۸/۵	۳۵/۵	CH	۱/۳-
G۱۵۰	۶۲/۳	۲۸/۷	۳۳/۶	CH	۶۱/۳	۲۸/۷	۳۲/۶	CH	۱+
G۲۲۰	۴۹/۷	۲۴/۴	۲۵/۳	CL	۴۷/۱	۲۴/۴	۲۲/۷	CL	۲/۶+
D۳۰	۴۱/۹	۲۹/۹	۱۲/۰	ML	۳۹/۹	۲۹/۹	۱۰/۰	ML	۲+
D۶۰	۵۷/۴	۲۵/۹	۳۱/۵	CH	۵۴/۳	۲۵/۹	۲۸/۴	CH	۳/۱+
D۱۰۰	۶۵/۰	۳۲/۰	۳۳/۰	MH	۶۴/۷	۳۲/۰	۳۲/۷	MH	۰/۳+
D۱۵۰	۵۵/۴	۳۵/۸	۱۹/۶	MH	۵۱/۴	۳۵/۸	۱۵/۶	MH	۴+
D۲۲۰	۵۱/۳	۳۱/۲	۲۰/۰	MH	۵۵/۰	۳۱/۲	۲۳/۸	MH	۳/۷-

(خانه‌های تیره نشان‌دهندهٔ تغییر در کلاسه یونیفاید خاک به‌دست‌آمده از دو روش است).

همان‌طور که از نتایج پیداست تنها در یک مورد تفاوت در کلاسهٔ خاک (CL و ML) در اثر تغییر دستگاه اندازه‌گیری حد روانی دیده می‌شود و تفاوت حدود روانی در دو روش از نظر کمتر یا بیشتر بودن

دارای روند خاصی نیست.

- روش تک‌نقطه‌ای

در جدول ۴ نتایج حدود روانی به روش کازاگرانـدهٔ چندنقطه‌ای و نتایج به‌دست‌آمده از روش تک‌نقطـه‌ای و کلاسه‌بندی متناظر خاک نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج حد روانی‌های اندازه‌گیری‌شده به روش کازاگراندهٔ چندنقطه‌ای و روش تک‌نقطه‌ای

کد نمونهٔ خاک	دستگاه کازاگرانده، روش چندنقطه‌ای					دستگاه کازاگرانده، روش تک‌نقطه‌ای				
	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	کلاسهٔ خاک	تعداد ضربه	درصد رطوبت	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	کلاسهٔ خاک
C۳۰	۴۰/۹	۲۵/۲	۱۵/۷	ML	۲۴	۴۱/۱	۴۰/۹	۲۵/۲	۱۵/۷	ML
C۶۰	۵۱/۶	۳۰/۲	۲۱/۵	MH	۲۳	۵۲/۵	۵۲/۰	۳۰/۲	۲۱/۹	MH
C۱۰۰	۶۲/۴	۳۴/۳	۲۸/۱	MH	۲۸	۶۱/۶	۶۲/۴	۳۴/۳	۲۸/۱	MH
C۱۵۰	۶۴/۷	۴۴/۳	۲۰/۴	MH	۲۷	۶۳/۵	۶۴/۱	۴۴/۳	۱۹/۹	MH
C۲۲۰	۷۱/۳	۳۱/۷	۳۹/۶	CH	۲۱	۷۲/۵	۷۱/۰	۳۱/۷	۳۹/۳	CH
G۳۰	۴۳/۸	۲۳/۱	۲۰/۷	CL	۲۴	۴۳/۸	۴۳/۶	۲۳/۱	۲۰/۵	CL
G۶۰	۶۸/۸	۲۸/۷	۴۰/۱	CH	۲۱	۶۹/۵	۶۸/۰	۲۸/۷	۳۹/۳	CH
G۱۰۰	۶۴/۰	۲۸/۵	۳۵/۵	CH	۲۷	۶۳/۸	۶۴/۴	۲۸/۵	۳۵/۹	CH
G۱۵۰	۶۱/۳	۲۸/۷	۳۲/۶	CH	۲۲	۶۱/۳	۶۰/۳	۲۸/۷	۳۱/۶	CH
G۲۲۰	۴۷/۱	۲۴/۴	۲۲/۷	CL	۲۶	۴۶/۹	۴۷/۲	۲۴/۴	۲۲/۸	CL
D۳۰	۳۹/۹	۲۹/۹	۱۰/۰	ML	۲۳	۴۰/۷	۴۰/۳	۲۹/۹	۱۰/۴	ML
D۶۰	۵۴/۳	۲۵/۹	۲۸/۴	CH	۲۵	۵۴/۶	۵۴/۶	۲۵/۹	۲۸/۷	CH
D۱۰۰	۶۴/۷	۳۲/۰	۳۲/۷	MH	۲۲	۶۴/۶	۶۳/۷	۳۲/۰	۳۱/۷	MH
D۱۵۰	۵۱/۴	۳۵/۸	۱۵/۶	MH	۲۳	۵۲/۸	۵۲/۳	۳۵/۸	۱۶/۴	MH
D۲۲۰	۵۵/۰	۳۱/۲	۲۳/۸	MH	۲۷	۵۲/۰	۵۲/۵	۳۱/۲	۲۱/۳	MH

نتایج نشان دادند که در هیچ‌یک از نمونه‌ها تفاوتی در کلاسه‌بندی خـاک دیـده نمـی‌شـود و حـد روانـی حاصل از روش تک‌نقطه‌ای بـا وجـود صـرف هزینـه و وقت کمتر، همخوانی خوبی با روش چندنقطه‌ای دارد.

بحث

نتایج نشان داد که حد روانی و حـد خمیـری در دو روش آون‌خشـک و هواخشـک از نظـر تغییـر کلاسـهٔ یونیفاید در پنج نمونه از ۱۵ نمونه (۳۳ درصـد) بـا هـم تفاوت دارند. این اختلاف در برخی نمونه‌ها سبب ایجـاد تفاوت در مرز حد روانی (عـدد ۵۰) و در برخـی سـبب تفاوت در مرز نوع خاک (رس یا لای) و در کـل عـوض شدن کلاسهٔ یونیفاید خاک شده است. استفاده از روش آون‌خشک موجب کم‌برآوردی حدود آتربـرگ شـد کـه ایـن نتیجـه بـا یافتـه‌هـای (Aashan et al., 2014; Yoon et al., 2015) مطابقـت دارد. همچنـین مقـدار تغییرات ایجادشده در حد خمیری کمتر از حد روانـی است که با یافته‌های (Murthy, 2003) مطابقـت دارد. از طرفـی ایـن تغییـرات در مقـدار حـد روانـی و حـد خمیری موجب کاهش شاخص خمیـری و در نهایـت، سبب تفاوت در کلاسه‌های برخـی نمونـه‌هـای خـاک شده است. گزارش شده که خشک کردن نمونهٔ خـاک در دمای ۱۱۰ درجهٔ سانتی‌گـراد تمـام آب گرانشـی و مقدار زیادی از آب متصـل بـه ذرات خـاک (آب لایـهٔ مضاعف) را از بین می‌برد، درصورتی که خشک کـردن خاک در هوای آزاد موجب از دسـت دادن حـداقل آب

متصل به ذرات خاک می‌شود (Yong et al., 2012)؛ بنابراین خشک کردن با آون موجب از دست دادن آب آزاد و همچنین آب چسبیده به ذرات رس می‌شود که ممکن است موجب تخریب ساختمان خاک و در نتیجه عوامل مؤثر بر خواص خاک شود (Yoon et al., 2015). این مسئله در نهایت سبب کاهش حد روانی و شاخص خمیری خاک و احتمال تغییر کلاسهٔ خاک می‌شود (Yoon et al., 2015). اثر شیوهٔ خشک کردن خاک قبل از اجرای آزمایش ممکن است سبب کاهش چسبندگی ناشی از اکسیداسیون آهن و آلومینیوم و از دست دادن آب شود (Townsend, 1985). Murthy (2003) نیز بیان می‌کند که خشک کردن خاک در ویژگی‌های کلوئیدی مواد آلی موجود در خاک تغییر ایجاد می‌کند و موجب کاهش حد روانی و حد خمیری خاک می‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که به‌طور متوسط خشک کردن خاک در آون موجب کاهش ۱۰ درصدی شاخص خمیری شد. در مطالعه‌ای درصد تغییر در شاخص خمیری در دو روش خشک کردن برای درشت‌دانه‌ها ۴ درصد و برای ریزدانه‌ها ۱۳ درصد گزارش شد که برای ریزدانه‌ها نزدیک به اعداد مطالعهٔ حاضر است (Yoon et al., 2015). یافته‌های Schroeder et al. (2004) نیز نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار بین تأثیر دو دمای خشک کردن (هوای آزاد، ۱۱۰ درجه آون ۲۴ ساعت) بر شاخص خمیری خاک‌ها بود. گزارش شده که نحوهٔ خشک کردن ممکن است سبب تغییر دائمی خواص فیزیکی خاک نیز بشود (Yoon et al., 2015). نتایج تحقیقات دیگر نیز نشان داده است که هرچه خاک ریزدانه‌تر باشد، اثر خشک کردن در آون بر خاصیت خمیرایی آن بیشتر است (Aashan et al., 2014) و ازآنجا که بیشتر خاک‌های جنگلی ریزدانه و خمیری هستند، این تأثیر ممکن است زیاد باشد. نتایج تجربی نیز نشان داده که تورم‌پذیری ذاتی و تورم‌پذیری تحت فشار و مقاومت فشاری محصورنشده با افزایش درجهٔ حرارت در خشک کردن کاهش پیدا می‌کند، اما ضریب تراکم‌پذیری افزایش می‌یابد (Hrubesova et al., 2016). بنابراین هرگونه اختلال یا تغییر در شرایط اصلی نمونه‌های خاک ممکن است خواص ارزش‌های واقعی خاک را تحریف کند و داده‌های گمراه‌کننده‌ای را در طراحی مهندسی ارائه دهد.

نتایج مقایسهٔ دو دستگاه کازاگرانده و مخروط نفوذ برای تعیین حد روانی خاک نشان داد که این نتایج در دو روش به هم نزدیک بودند، اما این اختلاف اندک در یکی از نمونه‌ها (تفاوت ۲/۹ درصدی مربوط به دو روش در نمونهٔ خاک اول) موجب طبقه‌بندی خاک در کلاسه‌های متفاوتی شد. البته چنانچه از آزمون آماری استفاده می‌شد، نتایج حاکی از نبود تفاوت معنی‌دار در نتایج دو روش می‌بود (آزمون t جفتی، P=0.176) که نشان‌دهندهٔ همیشه نیاز نداشتن به روش‌های آماری در برخی مطالعات مکانیک خاک است (Mousavi & Abdi, 2015)، هرچند تفاوت فقط در یک نمونه وجود داشت. البته اگر حدود آتربرگ خاک در مرزها قرار داشته باشد، ممکن است این اختلاف‌ها بیشتر شود. با توجه به اینکه روش مخروط نفوذ سریع‌تر و ساده‌تر است و تجربهٔ کاربر در آن اهمیت کمتری دارد، بهتر است از این روش برای تعیین حد روانی در خاک‌های با خاصیت خمیرایی ضعیف تا متوسط استفاده شود (Mousavi & Abdi, 2015). از طرفی یافته‌های برخی از پژوهشگران نشان می‌دهد که دستگاه مخروط نفوذ برای خاک‌هایی با خاصیت خمیری زیاد مناسب نیست و حد روانی به‌دست‌آمده از این روش به‌طور چشمگیری کمتر از مقدار به‌دست‌آمده به روش کازاگرانده است (Hrubesova et al., 2016). در مورد این خاک‌ها بهتر است از روش کازاگرانده استفاده شود.

با توجه به نتایج، استفاده از روش تک‌نقطه‌ای در تعیین حد روانی، اختلافی با روش چندنقطه‌ای نشان نداد و موجب تغییر در کلاسهٔ هیچ‌یک از خاک‌ها نشد و تفاوت دو روش از نظر فنی معنی‌دار نبود؛ بنابراین در مواردی که تعداد نمونهٔ بسیار زیاد یا مقدار نمونهٔ

لازم برای تعیین حد روانی به روش‌های معمول کمتر از مقدار لازم است، این روش ممکن است کارگشا باشد. همچنین نتایج نشان داد که اختلاف حد روانی دو روش به‌طور متوسط ۰/۲۶ درصد است که سبب تغییر شاخص‌ها در مرزهای نمودار خمیرایی کازاگرانده نشد. البته این روش ممکن است برای برخی از خاک‌ها مانند خاک‌های آلی و خاک‌های محیط دریایی مناسب نباشد و در این موارد، حتماً باید از روش چندنقطه‌ای استفاده شود (ASTM D4318, 2010). گفتنی است که کیفیت نتایج حاصل از این روش، در عمل وابسته به کاربر آزمایش و مناسب بودن تجهیزات و امکانات به‌کاررفته است (ASTM D4318, 2010).

نتایج این پژوهش نشان داد که خاک به‌صورت هواخشک به‌منظور برآورد ویژگی‌های خمیرایی خاک اهمیت بسیار زیادی دارد و استفاده از روش آون‌خشک موجب کم‌برآوردی حدود آتربرگ می‌شود. همچنین استفاده از دستگاه مخروط نفوذ نسبت به دستگاه کازاگرانده، سریع‌تر و آسان‌تر است و به تجربهٔ چندانی نیاز ندارد. در نهایت نتایج نشان داد که می‌توان از روش تک‌نقطه‌ای به‌عنوان روشی ساده در مواردی با تعداد نمونهٔ زیاد توسط یک کاربر باتجربه استفاده کرد. البته شایان ذکر است که این روش در دامنهٔ تحقیقاتی حاضر دارای عملکرد مناسب بود و باید با تکرار آزمایش‌ها برای انواع دیگر خاک‌ها، نتایج ارائه‌شده صحت‌سنجی شوند. به‌طور کلی می‌توان گفت حتی در مورد آزمایش‌های سادهٔ خاک نیز عوامل بسیاری در صحت نتایج تأثیرگذارند که تنها با شناخت و کنترل آنها می‌توان به نتایج اطمینان‌بخش دست یافت.

References

Aashan, I., Syed Abbas, A., Shah, R., Muhammad Ahmad, R., & Muhammad, A. (2014). Effects of soil and air drying methods on soil plasticity of different cities of Pakistan. *Journal of Engineering Research and Applications, 4*(3), 49-53.

Andrade, F.A., Al-Qureshi, H.A., & Hotza, D. (2011). Measuring the plasticity of clays: a review. *Applied Clay Science, 51,* 1-7.

British Standards Institution. (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 1, General Requirements and Sample Preparation*. London, British Standards Institution.

Das, B.M. (1983). *Advanced Soil Mechanic*. Mc Graw Hill: New York.

Fookes, P.G. (1997). Tropical residual soils geological society engineering group working party report. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 23*(1), 4-10.

Hrubesova, E., Lunackovaa, B., & Brodzkia, O. (2016). Comparison of liquid limit of soils resulted from casagrande test and modificated cone penetrometer methodology. *Development of Civil, Urban and Transportation Engineering Conference, Procedia Engineering, 142,* 364 – 370.

Kayabali, K., Bulut Üstün A., & Özkeser, A. (2015). Refinement of the reverse extrusion test to determine the two consistency limits. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 150,* 131-144.

Mousavi, F., Abdi, E., & Rahimi, H. (2014). Effect of polymer stabilizer on swelling potential and CBR of forest road material. *KSCE journal of civil Engineering, 18*(7), 2064–2071.

Mousavi, F., & Abdi, E. (2015). A Comparison of Liquid Limit Value Determined Using the Casagrande and Cone Penetrometer. *Journal of Forest and Wood Product. Iranian Journal of Natural Resources, 67*(4), 647-655.

Murthy, V.N.S. (2003). *Geotechnical engineering – Principles and practices of soil mechanics & foundation engineering, Marcel Dekker*: New York, CRC Press.

Office of the deputy for the technical affairs bureau of technical affairs and standards. (2005). *Forest Road Project Guide Lines. No:148.* Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization: Tehran.

Rahimi, H. (2005). *Soil Mechanics. Science and Technology Press.* Tehran. Danesho Fan Press.

Standard, ASTM. (2010). *Standard test methods for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass*. West Conshohocken, American Society for Testing & Materials.

Standard, ASTM. (2010). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM International, West Conshohocken, American Society for Testing & Materials.

Schroeder, W.L., Dickinson, S.E., & Warrington Don, C. (2004). *Soils in Construction*. Pearson Education Ltd, fifth Edition, New Jersey, Waveland Press.

Townsend, F.C. (1985). Geotechnical Characteristics of Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering, 111*, 77-92.

Waterways Experiment Station. (1949). *Simplification of the Liquid Limit Test Procedure, Technical Memorandum No. 3-286, U.S.* Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, Miss.

Yong, R.N., Nakano, M., & Pusch, R. (2012). *Environmental soil properties & behavior,* London CRC Press.

Yoon, T.C., Yunes, N.Z.M., Marto, A., Hezmi, M.A., Jusoh, S.N., & Ahmad, K. (2015). Comparison of soil index properties value for different pre-drying conditions on clayey soil. *Journal of sciences & engineering, 76*(2), 23-30.

Iranian Journal of Forest
Vol. 10, No. 4, Winter 2019
pp. 403-413

The impact of different methods of Atterberg limits determination on the resulted Unified soil classification

E. Abdi[1*], M. Salimizand[2], and F. Mousavi[3]

[1] Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran
[2] Forest engineering MS student, Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran
[3] PhD student of Forest engineering, Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

(Received: 30 October 2016, Accepted: 07 June 2017)

Abstract

One of the essential characteristics of fine-grain soils is the plasticity or Atterberg limits of them that directly are used in classification and prediction of mechanical properties and soil behavior. The aim of this study was to investigate the effect of different treatments of drying the soil sample on the plastic and liquid limits, type of measurement apparatus that used to determine liquid limit and the impact of these factors on the Unified soil classification. Also in this study, the results of the one-point method of Casagrande were compared with the usual multi-point method. For this purpose, soil samples were taken from three different forest types and five different depths in each type. The results showed oven drying of samples resulted in underestimation of the Atterberg limits and a different soil class in 33 percent of samples. Comparing the results of Casagrande and cone penetration apparatus to determine the soil liquid limit showed that the results were similar in both methods and only in one sample, there was different soil class. However, the cone penetration method is faster and requires less user experience. Finally using one-point method to determine the liquid limit, did not show difference with multi-point method and liquid limit differences between the two methods is about 0.26 percent; Which did not lead to significant displacement on the borders of Casagrande plasticity chart. Thus, in the case of sufficient experience and high number of samples, is recommended as an alternative to the usual multi-point method.

Keywords: Casagrande, Cone penetrometer, Liquid limit, One-point method, Soil plasticity.

∗Corresponding author Tel: +982632249312 Email: abdie@ut.ac.ir