



ارزیابی آزمایشگاهی روش PLSR برای تخمین حدود آتربرگ خاک با استفاده از طیف‌سنج زمینی

فاطمه موسوی^{۱*}، احسان عبدی^۲، عباس قلندرزاده^۳، حسینعلی بهرامی^۴ و باریس مجنونیان^۵

^۱ دانش‌آموخته دکتری مهندسی جنگل دانشگاه تهران، کرج

^۲ دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

^۴ دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۵ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۱۸)

چکیده

به‌طور کلی در کشورهای در حال توسعه مثل ایران، به‌دلیل نیاز به صرف زمان و هزینه‌های زیاد تحقیقات و روش‌های آزمایشگاهی متعارف، مطالعات مکانیک خاک به‌صورت محدود انجام می‌گیرد یا اصلاً انجام نمی‌گیرد؛ کمبود اطلاعات در این زمینه ممکن است در نهایت سبب آسیب‌دیدگی سازه شود. امروزه روش‌های نوین مانند طیف‌سنجی زمینی در حال توسعه‌اند که می‌توانند این مشکل را تا حد زیادی برطرف کنند. طیف‌سنجی زمینی روشی غیرمخرب، سریع و ارزان است، ولی تا کنون تحقیقی در زمینه استفاده از این روش در برآورد ویژگی‌های مکانیک خاک در ایران انجام نگرفته است. در این پژوهش حدود آتربرگ خاک (حد روانی، حد خمیری، حد انقباض و شاخص خمیری) با استفاده از طیف‌سنج زمینی برآورد شد. به این منظور ۴۵ نمونه خاک از سری نم‌خانه جنگل خیرود جمع‌آوری شد و آزمایش‌های حدود آتربرگ انجام گرفت و سپس با استفاده از طیف‌سنج زمینی VNIR اندازه‌گیری طیفی نیز صورت پذیرفت و از روش PLSR (Partial Least Square Regression) برای پیش‌بینی حدود آتربرگ خاک در دو حالت طیف خام و مشتق اول طیف استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌سازی PLSR برای پارامترهای حد روانی و شاخص خمیری در حالت طیف خام و مشتق اول کاملاً مناسب است و برای حد خمیری قابل قبول و برای حد انقباض غیر قابل قبول و ضعیف است؛ بنابراین از طیف‌سنجی می‌توان به‌عنوان روشی سریع، ارزان و با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی حدود آتربرگ خاک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: حدود آتربرگ خاک، طیف‌سنجی زمینی، مشتق اول، PLSR.

مقدمه

چنانچه این فعالیت‌ها بدون شناخت خاک صورت گیرد مشکلاتی را در پی خواهد داشت که از آن جمله می‌توان به صرف هزینه‌های سنگین تعمیر و بازسازی جاده و شکست عملیات اشاره کرد. از طرفی اثبات

شناخت ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی خاک جنگل اهمیت زیادی در موفقیت عملیات مهندسی جنگل مانند تعمیر و بازسازی جاده‌های جنگلی دارد.

طیف‌سنج انعکاسی مرئی- مادون نزدیک^۱ (VNIR) است؛ تاکنون مطالعات مختلفی درباره استفاده از رفتار طیفی خاک به منظور برآورد ویژگی‌های مختلف خاک انجام گرفته است (Gisladdottir et al., 2005; Brown et al., 2006). بیشترین بخش از مطالعات طیف‌سنج انعکاسی به تعیین مقدار ترکیبات پایه‌ای خاک مانند ماده آلی، بافت خاک، کانی‌شناسی و همچنین عناصر غذایی خاک، حاصلخیزی خاک، ساختمان خاک و فعالیت‌های میکروبی آن اختصاص یافته است (Bowers et al., 2006; Rossel, 2006; Stenberg et al., 2010)، ولی تاکنون در زمینه استفاده از طیف‌سنجی برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی تحقیقات بسیار کمی انجام گرفته است (Yitagesu et al., 2008; Yitagesu et al., 2011; Yitagesu et al., 2012).

در تحقیقی از مدلی به منظور تخمین سریع حدود آتربرگ خاک (LL, PL, PI) براساس بازتاب طیفی در محدوده مادون قرمز نزدیک (NIR) به کمک روش PLSR استفاده شد. در این تحقیق، میزان همبستگی حدود آتربرگ خاک با طیف‌سنج انعکاسی برای LL و PI (≥ 0.70) و برای PL (< 0.70) بود. نتایج این تحقیق نشان داد که NIR-PLS را می‌توان برای برآورد سریع چندین ویژگی مهندسی خاک استفاده کرد (Waruru et al., 2014).

در تحقیقی دیگر از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) به منظور پیش‌بینی مدل‌های تجربی برای تخمین ویژگی‌های مهندسی خاک مانند حدود آتربرگ (LL, PL, PI) با استفاده از بازتاب طیفی استفاده شد (Yitagesu et al., 2012). نتایج این تحقیق نشان داد که از طیف‌سنجی در تخمین ویژگی‌های مهندسی می‌توان استفاده کرد و در پژوهش‌های ژئوتکنیکی می‌توان از آنها بهره برد. حداقل مربعات جزئی، مدل‌های چندمتغیره تحلیل عاملی مناسبی هستند که اساساً برای اهداف

شده است که خاک با بافت رسی از خاک‌هایی است که به‌وفور در مناطق جنگلی یافت می‌شود و ممکن است مشکلاتی را برای جاده‌سازی به وجود آورد (Petry & Little, 2002). در بیشتر مناطق جنگل‌های شمال نیز خاک‌های ریزدانه وجود دارد. بنابراین شناسایی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این خاک‌ها ضروری است. یکی از ویژگی‌های مهم خاک که شناخت آن اهمیت بسیار زیادی دارد، حدود آتربرگ خاک شامل حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، شاخص خمیری (PI) و حد انقباض (SL) است که در مهندسی جنگل کاربرد بسیار وسیع و دیرینه‌ای داشته است. از طرفی حدود آتربرگ خاک همبستگی زیادی با دیگر ویژگی‌های فنی خاک داشته و در برآورد سایر شاخص‌ها در امور مهندسی خاک مانند مقاومت برشی، توان باربری، تراکم‌پذیری و سطح ویژه کاربرد وسیعی دارد. بنابراین همان‌طور که گفته شد، تشخیص نوع خاک و ویژگی‌های فنی و مطالعه رفتار آنها و ارائه راه‌حل‌های مناسب برای جلوگیری از بروز خسارت به جاده‌های بنا شده بر روی آنها اهمیت زیادی در طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری جاده‌های جنگلی دارد. به همین منظور، برای جلوگیری و کاستن از پیامدهای منفی پیش و پس از ساخت، مطالعات فیزیکی و مکانیکی خاک صورت می‌گیرد که این مطالعات در تشخیص قابلیت زمین برای اجرای عملیات ساختمانی در طول مسیر جاده و قابلیت عبور و استفاده از خاک به‌عنوان مصالح ساختمانی در زیرسازی یا روسازی جاده ضروری است. به‌طور کلی بررسی نکردن مطالعات فیزیکی و مکانیکی خاک به‌دلیل هزینه زیاد روش‌های آزمایشگاهی استاندارد، مشکلاتی جدی را ایجاد خواهد کرد (Yitagesu et al., 2012). با توجه به هزینه سنگین مطالعات آزمایشگاهی و زمان‌بر بودن آنها باید در پی روش‌هایی بود که زمان و هزینه کمتری صرف کنند. امروزه یکی از روش‌های مطرح به‌منظور برآورد ویژگی‌های مختلف خاک، استفاده از

1. Visible and Near Infrared

گرفتن موارد یاد شده، در مجموع ۴۵ نمونه خاک تعیین شد (شکل ۱). با مشخص شدن محل نمونه برداری در عرصه با استفاده از GPS، مواد آلی و لایه رویی از سطح زمین کنار زده شد. به منظور تهیه نمونه‌های دست‌خورده، گمانه‌هایی به عمق حداکثر ۳۰ سانتی‌متری حفر شده و حدود ۱۵ کیلوگرم خاک از هر محل برداشت شد و در کیسه‌های پلاستیکی همراه با شماره محل قرار گرفت و به آزمایشگاه مکانیک خاک انتقال یافت. سپس نمونه‌های دست‌خورده هوا خشک شده و با چکش پلاستیکی کوبیده شدند.

روش پژوهش

آزمایش تعیین حدود آتربرگ

آزمایش حدود آتربرگ شامل حد روانی (LL) مطابق استاندارد BS و با استفاده از مخروط نفوذ انجام گرفت. برای تعیین حد روانی در استاندارد ASTM روش کاساگرانده معمول است، ولی از آنجا که در استاندارد BS، روش مخروط نفوذ توصیه می‌شود که نیاز به تجربه زیادی ندارد و خطای کاربر نیز در آن حداقل است (Ebnjalal & Bajestan, 2004)، از این روش استفاده شد. در این تحقیق برای تعیین حد روانی از دستگاه مخروط نفوذ مطابق استاندارد BS (BS, 1990) و برای تعیین حد خمیری از استاندارد ASTM D4318 (ASTM, 2010) استفاده شد. برای تعیین حد انقباض نیز از نمودار خمیرایی کاساگرانده استفاده شد، این خط منحنی حد روانی را در نقطه ای قطع می‌کند که بیانگر حد انقباض است (Das, 2008). شاخص خمیری خاک نیز از تفاضل حد روانی و حد خمیری خاک تعیین شد. شایان ذکر است که این حدود روی خاک عبوری از الک شماره ۴۰ تعیین شد. برای تعیین حدود آتربرگ هر نمونه، دست کم به دو روز زمان نیاز است که در روز اول آزمایش انجام می‌گیرد و ۲۴ ساعت هم نمونه‌ها باید در آون قرار گیرند.

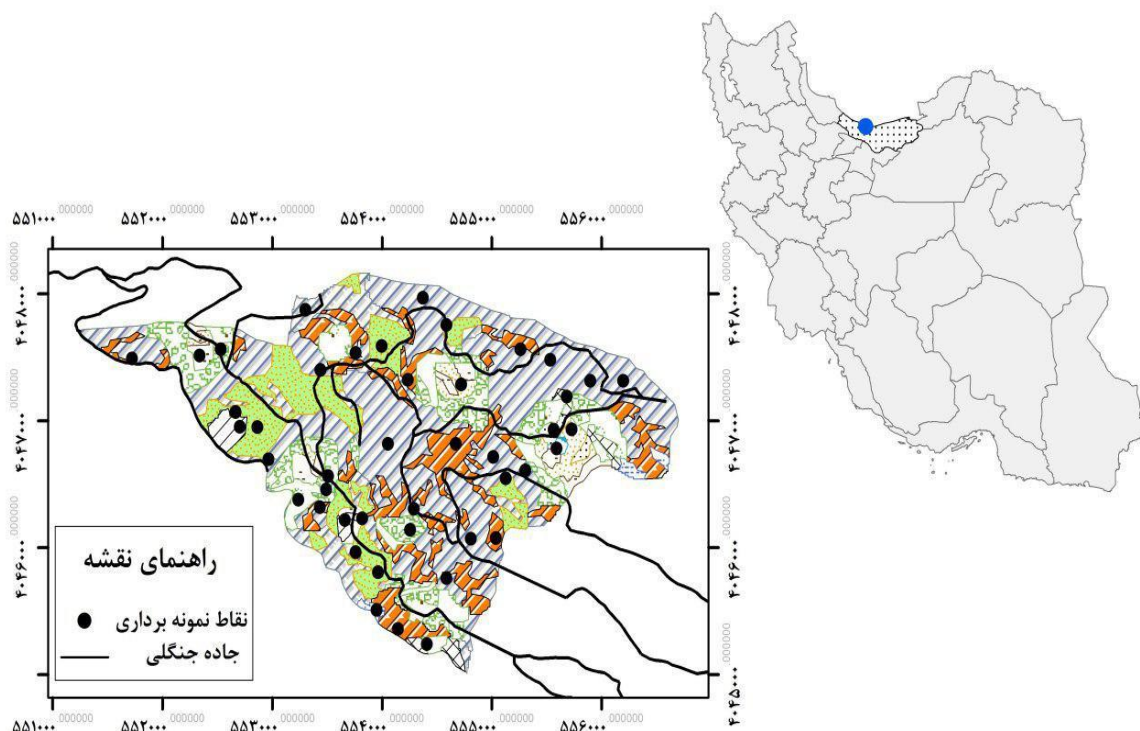
پیش‌بینی استفاده می‌شوند (Yitagesu et al., 2011). این روش نیازمند یک مرحله کالیبراسیونی برای مدلی است که خود از چند فاکتور مشخص ایجاد شده و به‌عنوان مثال توسط روش اعتبارسنجی متقاطع^۱ انتخاب می‌شود. تجزیه و تحلیل حداقل مربعات جزئی می‌تواند به‌منظور ایجاد یک مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک انجام گیرد. متأسفانه تا کنون مطالعه‌ای در زمینه استفاده از این روش در برآورد حدود آتربرگ خاک در ایران انجام نگرفته است. این تحقیق در نظر دارد به بررسی طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک (VNIR- SWIR) و مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR)، به‌عنوان روشی غیرمخرب، سریع، ارزان، دارای حداقل آماده‌سازی نمونه و بدون ضرر و تخریب برای محیط زیست (Rossel, 2006) به‌منظور برآورد حدود آتربرگ خاک جنگل خیرود بپردازد. بنابراین در پژوهش حاضر توانایی روش طیف‌سنجی به‌منظور تخمین حدود آتربرگ خاک (LL, PL, PI, SL) با استفاده از روش PLSR در حالت استفاده از بازتاب طیفی^۲ و مشتق اول بازتاب^۳ انجام پذیرفت و نتایج مقایسه و بررسی شد.

مواد و روش

منطقه پژوهش

این مطالعه در بخش نم‌خانه جنگل آموزشی- پژوهشی جنگل خیرود انجام گرفت. به‌منظور تهیه طرح نمونه‌برداری، ابتدا از روی هم‌گذاری نقشه شیب، جهت، ارتفاع و نقشه درصد رس منطقه (Salehi et al., 2005)، محدوده‌های همگن تعیین و تعداد نمونه‌ها با توجه به محدوده‌های همگن مشخص و محل نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی در درون پلی‌گون‌های همگن تعیین شد. در نهایت با در نظر

1. cross- validation leave-one-out
2. Reflectance spectra
3. First derivative reflectance



شکل ۱- نقشه منطقه تحقیق و پراکنش نمونه‌های خاک در منطقه

استفاده از نرم‌افزار ViewSpecPro به داده‌های متنی با فرمت ASCII تبدیل و وارد نرم‌افزارهای به کاررفته شد.

به دلیل اندازه‌گیری طیفی در محیط آزمایشگاهی امکان کنترل شرایط و کاهش خطاهای ناشی از تغییر شرایط محیطی و نور زاید، اندازه‌گیری طیفی با نویز کم انجام گرفت، با این حال خطاهایی در محدوده‌های مختلف منحنی طیفی ایجاد شد. به‌طور کلی داده‌های طیفی که ارزش طیفی آنها خارج از دامنه ± 2 برابر انحراف معیار اندازه‌گیری‌های دیگر برای آن نمونه باشد، داده‌های پرت و خطا تلقی می‌شوند و باید از مجموعه داده‌ها حذف شوند (Schaepman-Strub et al., 2008). برای شناسایی و حذف داده‌های پرت، ابتدا انحراف معیار ۱۰ طیف اندازه‌گیری‌شده برای یک نمونه محاسبه شد و طیف‌هایی خارج از دامنه ± 2 برابر انحراف معیار از محاسبات حذف و سپس از آنها میانگین‌گیری شد (Yitagesu et al., 2008). در مرحله بعد از روش‌های

طیف بازتابندگی خاک

نمونه‌ها پس از نمونه‌برداری به آزمایشگاه مربوط به طیف‌سنجی (تاریکخانه) منتقل شدند. در ابتدا نمونه‌های خاک هوا خشک‌شده از الک ۲ میلی‌متری گذرانده (Yitagesu et al., 2008) و سپس طیف بازتابی نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه طیف‌سنج 3 (Analytical Spectral Fieldspec) (Devices Inc, USA) در محدوده طیفی ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای هر نمونه در حدود ۲۰ گرم از خاک هوا خشک‌شده در پتری‌دیش قرار داده شد و برای آنالیز به کار رفت. اندازه‌گیری‌های طیفی از نمونه‌ها با روش پروب تماسی (Contact probe) و در اتاق تاریک به منظور جلوگیری از ورود نور و بازتاب اضافی انجام گرفت. برای ثبت هر طیف، ۷۲ تکرار تنظیم شد و به منظور کم کردن احتمال ناهمگنی نمونه، اندازه‌گیری طیفی برای هر نمونه ۱۰ بار با تغییر مکان پروب تکرار شد. داده‌های بازتاب طیفی با

جلوگیری از تطابق بر مدل مناسب کالیبره شده استفاده شد (Arana et al., 2005). از روش اعتبارسنجی متقاطع در این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل PLS استفاده شد.

در این روش برای حفظ بهینه بودن مدل، شرط لازم برای افزایش مؤلفه‌ها، کاهش مقدار RMSE برای روش اعتبارسنجی متقاطع است (Cho et al., 2007).

روش تحلیل

در این پژوهش برازش مدل PLSR با استفاده از نرم‌افزار The Unscrambler X 10.4 انجام گرفت.

نتایج

جدول ۱ آماره‌های توصیفی حدود آتربرگ خاک (LL, PL, PI, SL) را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ میزان طبقات حد روانی خاک (LL) برحسب طبقه‌بندی (Dakshnamurthy & Raman, 1973) آورده شده است.

توزیع نمونه‌ها روی منحنی کاساگرانده در شکل ۳ نشان داده شده است.

همبستگی بین حدود آتربرگ و میانگین بازتاب در هر طول موج در شکل ۴ نشان داده شده است.

طیف ۴ نوع مختلف خاک از طبقه‌های مختلف شامل CH, CL, MH و ML در یک منحنی (شکل ۵) نشان داده شده است.

پیش‌پردازش به‌منظور حذف یا به حداقل رساندن تأثیرات یاد شده استفاده شد. این تأثیرات شامل تغییرات شیب و تغییرات در صاف کردن منحنی‌هاست. به‌منظور پیش‌پردازش طیف‌ها، مقدار زیاد نویز در محدوده ابتدایی طیف (۴۰۰-۳۵۰ نانومتر) که ناشی از کم بودن شدت تابش در محدوده‌های طیفی فرابنفش و آبی است حذف شد. در این مطالعه به‌منظور پیش‌پردازش داده‌های طیفی از روش هموارسازی ساویتزکی-گولای و مشتق‌گیری استفاده شد؛ هموارسازی ساویتزکی-گولای نوعی شیوه مفید هموارسازی است که می‌تواند به‌طور مؤثر نویزهای تیز طیف را بدون از بین بردن اطلاعات طیفی برطرف کند (Savitzky & Golay, 1964). با روش مشتق‌گیری تأثیرات تعداد فراوان نویزهای تصادفی تولید شده توسط تداخل امواج زمینی حذف شد و نسبت سیگنال به نویز بهبود پیدا کرد (Ye et al., 2008).

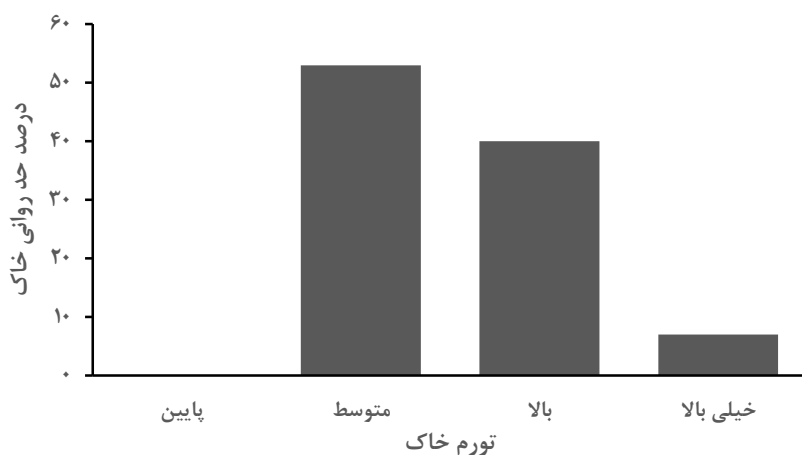
رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۱ (PLSR)

در این پژوهش از روش کالیبراسیون چندگانه PLSR به‌منظور پیش‌بینی مدل‌هایی که حدود آتربرگ را از طیف بازتاب آنها تخمین می‌زنند، استفاده شد. طیف اصلی و طیف مشتق اول برای ایجاد این روابط تجربی به‌کار گرفته شد.

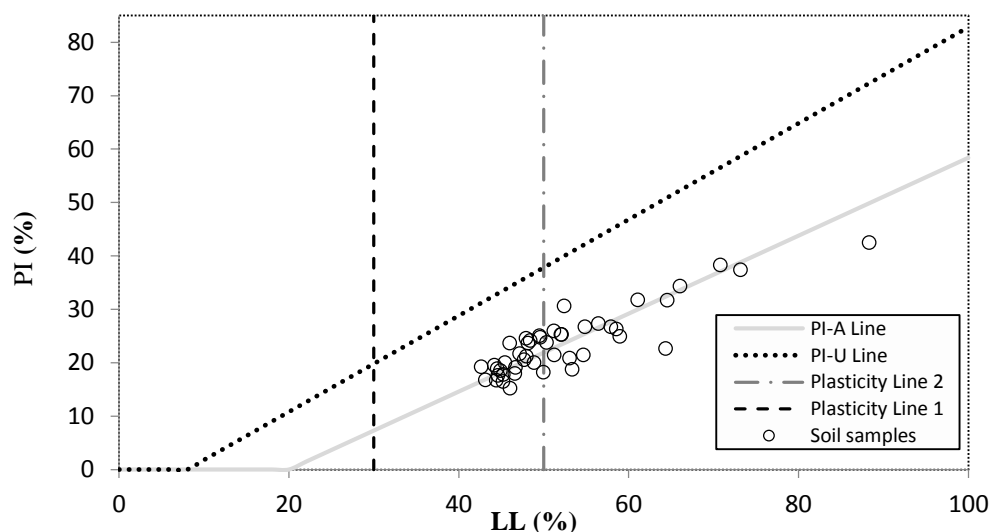
در طی توسعه مدل PLS اعتبارسنجی کامل مدل حداقل مربعات جزئی به‌منظور ارزیابی کیفیت و

جدول ۱- تجزیه واریانس حدود آتربرگ خاک

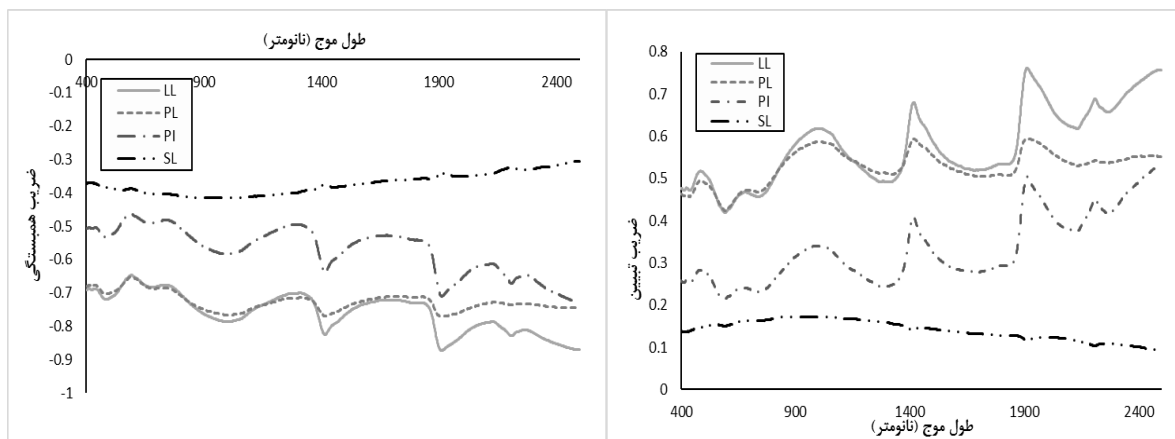
پارامترها	میانگین	حداکثر	حداقل	میان	انحراف از معیار	ضریب تغییرات
LL	۵۲/۴۵	۸۸/۳۲	۴۲/۶۵	۴۹/۶	۹/۱۷	۶/۶۳
PL	۲۸/۴۲	۴۵/۸۴	۲۱/۸	۲۷/۰۹	۴/۷۵	۳/۵۳
PI	۲۴/۰۳	۴۲/۵۲	۱۵/۲۳	۲۲/۶۸	۶/۱۲	۴/۶۱
SL	۲۰/۲۲	۲۵/۴۵	۱۴/۲۶	۱۹/۳۲	۲/۴۷	۱/۹۶



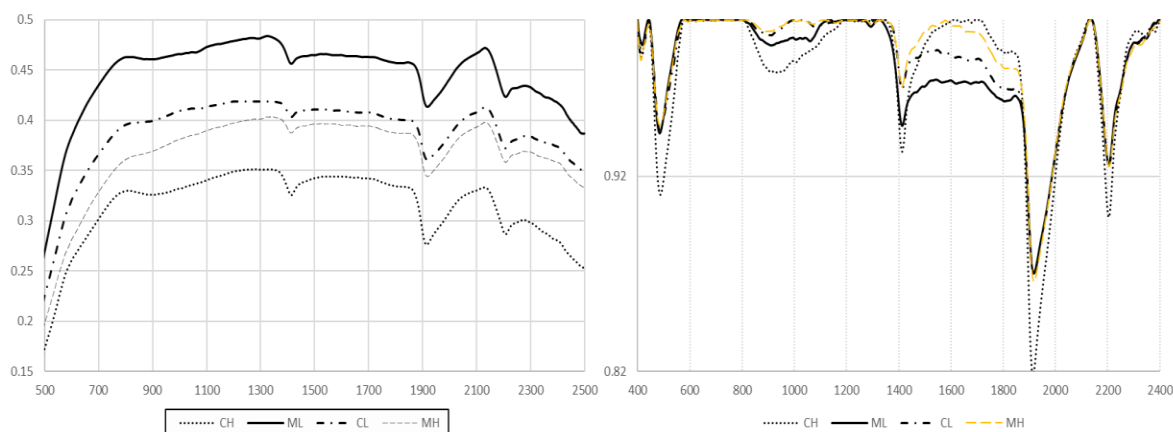
شکل ۲- طبقه‌بندی تورم خاک با استفاده از حد روانی خاک



شکل ۳- توزیع نمونه‌های خاک بر روی نمودار خمیرایی کاساگرانده



شکل ۴- همبستگی بین حدود آتربرگ و میانگین بازتاب در هر طول موج



شکل ۵- مشخصه‌های طیفی انواع خاک

جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر حاصل از مدل‌سازی بین پارامترهای خاک با بازتاب طیفی و مشتق اول بازتاب، با استفاده از مدل PLSR را با شاخص‌های R^2 ، RMSE و RPD در حالت واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهند.

نتایج حدود آتربرگ خاک با PLSR

برای تخمین حدود آتربرگ خاک با استفاده از طیف بازتاب و مشتق اول از PLSR استفاده شد و کالیبراسیون مدل با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع برای بیشترین فاکتور بهینه در بیشترین میزان R^2 و کمترین RMSE انجام گرفت (شکل‌های ۶ تا ۸).

جدول ۲- نتایج پردازش بازتاب طیفی با داده‌های آزمایشگاهی در حالت واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبار سنجی			واسنجی			فاکتور بهینه	ویژگی خاک
RPD	RMSE	R^2	RPD	RMSE	R^2		
۴/۰۳	۲/۲۷	۰/۹۳	۵/۲۴	۱/۷۵	۰/۹۶	۵	LL
۱/۵۵	۳/۰۵	۰/۵۹	۱/۸۹	۲/۵۱	۰/۷۱	۵	PL
۲/۰۷	۲/۹۵	۰/۷۷	۲/۳۱	۲/۶۴	۰/۸۰	۳	PI
۱/۰۴	۲/۳۷	۰/۱	۱/۰۹	۲/۲۶	۰/۱۴	۱	SL

*Not Available

جدول ۳- نتایج پردازش مشتق اول با داده‌های آزمایشگاهی در حالت واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبار سنجی			واسنجی			فاکتور بهینه	ویژگی خاک
RPD	RMSE	R^2	RPD	RMSE	R^2		
۴/۷	۱/۹۵	۰/۹۵	۶/۴۵	۱/۴۲	۰/۹۷	۳	LL
۱/۵۰	۳/۱۶	۰/۵۶	۱/۸۸	۲/۵۲	۰/۷۱	۳	PL
۲/۰۴	۲/۹۹	۰/۷۶	۲/۱۳	۲/۸۶	۰/۷۷	۱	PI
۱/۰۰	۲/۴۶	۰/۰۲	۱/۰۶	۲/۳۱	۰/۱	۱	SL

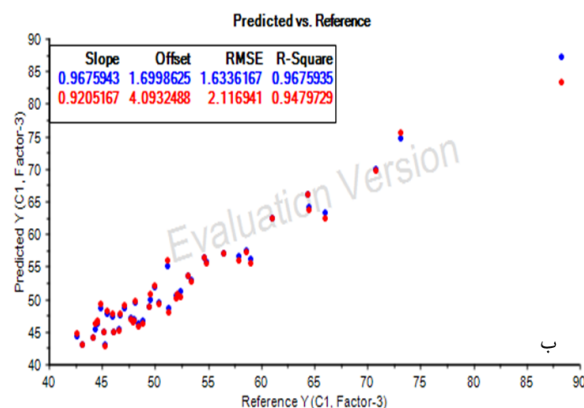
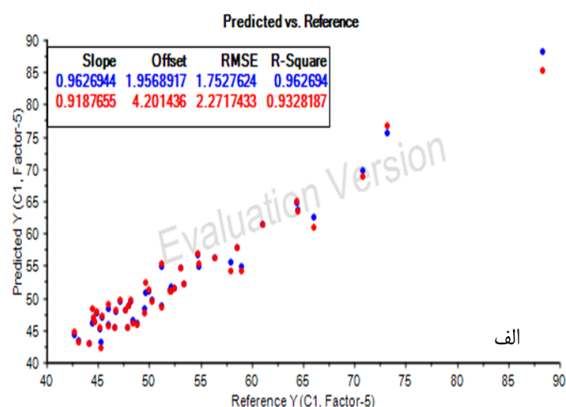
*Not Available

مدل سازی به روش اعتبارسنجی متقابل^۱ صورت گرفت (شکل ۶). در جدول ۴ رابطه رگرسیونی بین حدود آتبرگ با مؤلفه‌های بهینه نشان داده شده است.

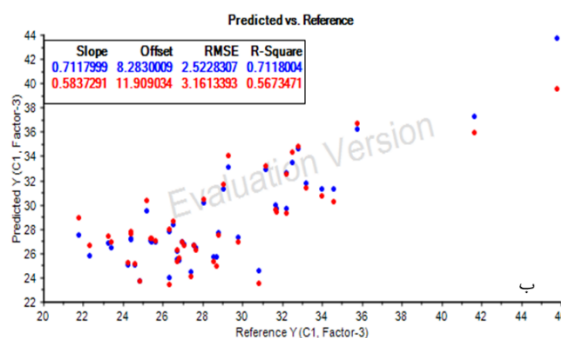
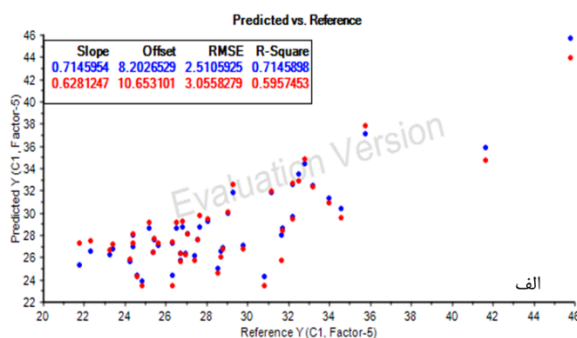
همان‌طور که گفته شد، پیش‌پردازشی که روی همه طیف‌ها صورت گرفت ثابت و روش ساویتزکی-گولای با درجه ۲ و تعداد نقطه‌های همسایگی ۱۱ بود و

جدول ۴- رابطه رگرسیونی بین حدود آتبرگ با مؤلفه‌های بهینه

رابطه رگرسیونی	پیش‌پردازش	ویژگی
$Y = 52/45 + 3/13 X_1 + 10/25 X_2 + 11/3 X_3 + 20/55 X_4 + 14/96 X_5 + 3/54$	R	LL
$Y = 52/45 + 2111/67 X_1 + 959/2 X_2 + 1585/36 X_3 + 2/92$	DR	LL
$Y = 28/74 - 1/52 X_1 + 14/98 X_2 + 1/12 X_3 + 1/9 X_4 + 7/24 X_5 + 7/27$	R	PL
$Y = 28/74 + 844/43 X_1 + 855/46 X_2 + 1245/77 X_3 + 6/98$	DR	PL
$Y = 23/71 - 1/62 X_1 + 7/11 X_2 + 10/52 X_3 + 7/68$	R	PI
$Y = 23/71 - 1304/87 X_1 + 8/56$	DR	PI
$Y = 19/81 - 0/4 X_1 + 5/34$	R	SL
$Y = 19/81 + 234/24 X_1 + 5/61$	DR	SL

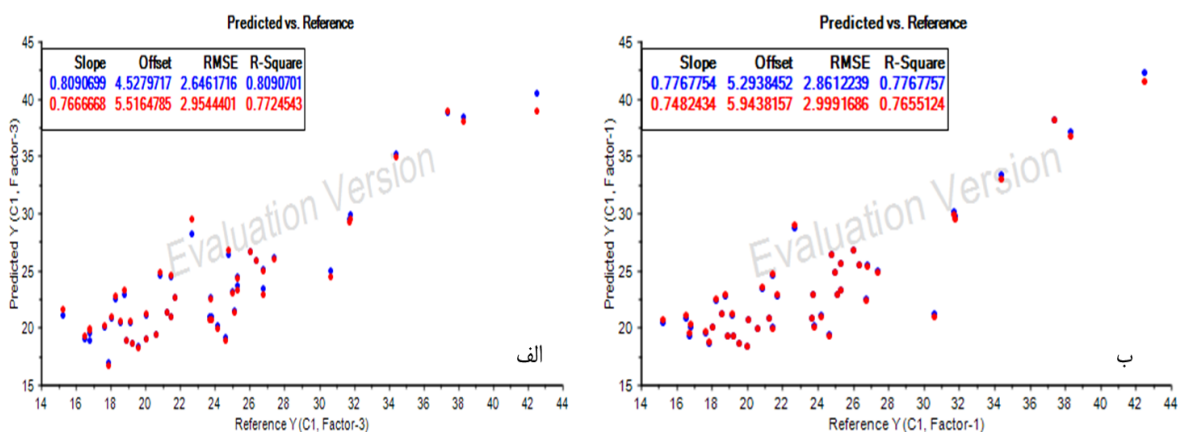


شکل ۶- رابطه بین مقدار LL اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده خاک با طیف خاک (الف) و مشتق اول طیف (ب)

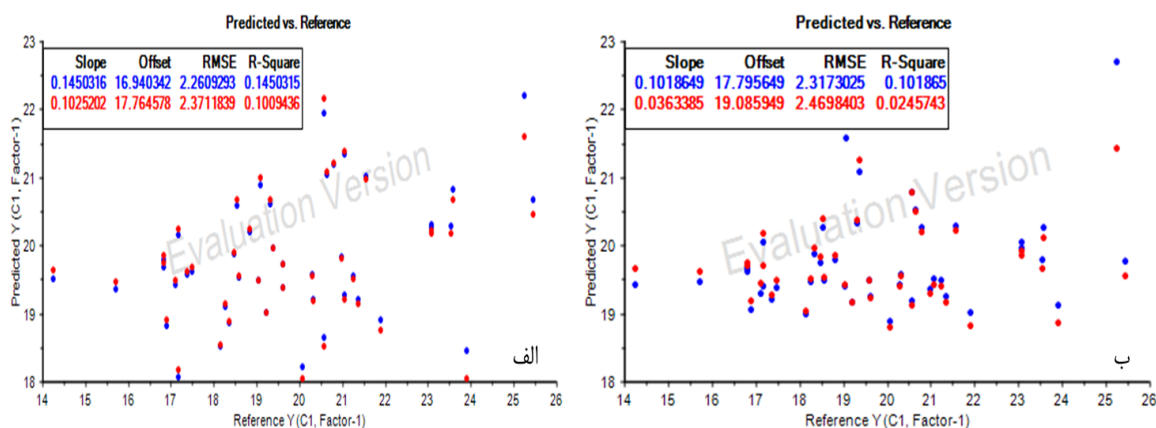


شکل ۷- رابطه بین مقدار PL اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده خاک با طیف خاک (الف) و مشتق اول طیف (ب)

¹ Cross validation



شکل ۸- رابطه بین مقدار PI اندازه گیری شده و پیش بینی شده خاک با طیف خاک (الف) و مشتق اول طیف (ب)



شکل ۹- رابطه بین مقدار SL اندازه گیری شده و پیش بینی شده خاک با طیف خاک (الف) و مشتق اول طیف (ب)

نشان داده شده است.

در جدول ۵، محدوده های بهینه مهم برای انواع ویژگی فیزیکی و مکانیکی خاک با استفاده از PLSR

جدول ۵- محدوده های بهینه برای انواع ویژگی فیزیکی و مکانیکی خاک با استفاده از PLSR

محدوده های بهینه (nm)	ویژگی های خاک
۱۱۵۶-۱۳۹۵، ۱۶۹۴-۱۶۷۴، ۱۸۶۴-۱۷۱۲، ۱۹۷۹-۱۸۹۰، ۲۰۱-۲۰۹۷، ۲۳۱۴-۲۲۲۲ ۵۷۲-۵۵۷، ۸۰۴-۷۱۴، ۹۹۹-۹۳۹، ۱۳۲۶	LL
۱۴۱۴-۱۷۶۳، ۱۷۷۴-۱۷۶۷، ۱۷۸۳-۱۷۸۰، ۱۸۴۸-۱۸۱۲، ۲۱۶۷-۲۱۱۵، ۲۲۶۳-۲۲۴۳ ۱۰۴۶-۹۱۷، ۱۰۵۳-۱۰۴۹، ۱۰۸۷-۱۰۶۷، ۱۴۷۷	PL
۲۵۰۰-۲۲۷۶، ۲۲۶۰-۲۱۱۷، ۲۰۲۶-۱۸۸۷، ۱۸۷۸-۱۴۸۱، ۱۳۹۲-۱۰۹۰، ۶۹۹-۵۴۴	PI
۲۵۰۰-۴۰۰	SL

بحث

به‌طور کلی حد روانی خاک نشان‌دهنده خاصیت خمیریایی خاک است که با توجه به نتایج جدول ۱، بیشتر نمونه‌ها به‌طور متوسط خمیریایی زیادی دارند. با توجه به شکل ۲، حد روانی زیاد، نشان می‌دهد که نمونه‌های خاک احتمالاً رس از نوع دارای مونت مرلونیت زیاد هستند (Das, 2008). براساس نمودار خمیریایی کاساگرانده در شکل ۲، نمونه‌های خاک دارای حد روانی ۳۵ تا ۵۰ درصد در طبقه با خمیریایی متوسط، نمونه‌های خاک دارای حد روانی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد در طبقه خمیریایی زیاد، و نمونه‌های خاک دارای حد روانی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد در طبقه با خمیریایی خیلی زیاد قرار می‌گیرند (Yitagesu et al., 2011). با توجه به نتایج، ۵۳ درصد نمونه‌ها در طبقه با خمیریایی متوسط، ۴۰ درصد در طبقه با خمیریایی زیاد و ۷ درصد در طبقه خمیریایی خیلی زیاد قرار می‌گیرند. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های خاک‌های تحت مطالعه، دامنه گسترده‌ای از تغییرات در خمیریایی خاک دارند. نتایج طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید (شکل ۳) نشان داد که ۲۸ درصد نمونه‌ها، رس با حد روانی زیاد (CH)، ۳۷ درصد نمونه‌های رس با حد روانی کم (CL)، ۲۰ درصد لای با حد روانی زیاد (MH) و ۱۵ درصد لای با حد روانی کم (ML) است. همان‌طور که همبستگی بین حدود آتربرگ و میانگین بازتاب در هر طول موج (شکل ۴) نشان می‌دهد، حد روانی و حد انقباض به ترتیب بیشترین و کمترین همبستگی را با طیف بازتابی خاک دارند. به‌طور کلی با توجه به طیف بازتابی همه خاک‌ها، بازتاب خاک در محدوده مرئی، کم و در محدوده فروسرخ، زیاد است. با توجه به شکل ۵ در طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر عوارض جذبی بارزی در طیف‌ها دیده شد که این باندها به OH آب آزاد در این طول موج‌ها مربوط می‌شود. این طول موج‌ها، طول موج‌های جذبی نام دارند و مربوط به جذب آب بر سطوح رس‌ها (طول موج ۱۴۰۰ نانومتر)، پیوندهای H-O-H مولکول‌های

آب حبس‌شده در شبکه رس‌ها (طول موج ۱۹۰۰ نانومتر) و پیوندهای OH با فلزات آلومینیوم، آهن و سیلیس (طول موج ۲۲۰۰ نانومتر) است (Cozzolino & Moron, 2003). مقایسه انواع خاک در این شکل نشان می‌دهد که خاک‌هایی با حد روانی کمتر بازتاب طیفی بیشتری از خاک‌هایی با حد روانی بیشتر دارند. از طرفی خاک‌های ML و CH بیشترین و کمترین بازتاب طیفی را در بین انواع مختلف خاک دارند. همچنین هرچه مقدار رس خاک بیشتر باشد، عمق باندهای جذبی بیشتر است، زیرا خاک‌های رسی، رطوبت بیشتری را در خود نگه می‌دارند. پژوهشگران دیگر نیز وجود این‌گونه باندهای جذبی را گزارش کرده‌اند (Ben-Dor et al., 1999; Sharma et al., 2006). بنابراین طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر باندهایی هستند که در فرایند تخمین حدود آتربرگ خاک مؤثرند.

با توجه به نتایج جدول ۲ می‌توان گفت مدل‌سازی PLSR برای پارامترهای LL و PI کاملاً مناسب، برای PL قابل قبول و برای SL غیر قابل قبول و ضعیف است. همچنین با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت مدل‌سازی PLSR برای پارامترهای LL و PI با مشتق اول طیف پیش‌بینی کاملاً مناسب، برای PL قابل قبول و برای SL پیش‌بینی ضعیف است. مقایسه مدل‌سازی PLSR با استفاده از طیف خام و مشتق اول نشان داد که نتایج به هم نزدیک است و اختلاف زیادی مشاهده نمی‌شود.

شکل ۶ نشان می‌دهد که برای مقدار LL خاک رابطه حاصل از طیف خام با مشتق اول اختلافی ندارد و همبستگی بسیار قوی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای تخمین LL خاک توسط بازتاب طیفی (الف) و مشتق اول بازتاب (ب) پس از انجام رگرسیون، می‌توان به ترتیب ۵ و ۳ فاکتور بهینه‌ای را معرفی کرد که تغییرات LL را به خوبی پوشش می‌دهند.

نتایج حاصل از این نمودار نشان می‌دهد که مدل

اول بازتاب توجیه می‌کند. همچنین پیش‌بینی‌ای که برای داده‌های اعتبارسنجی انجام گرفته، نشان می‌دهد که نرم‌افزار توانسته PI خاک را به میزان ۷۷ درصد با بازتاب طیفی و ۷۶ درصد با صحت پیش‌بینی کند.

با توجه به شکل ۹ نرم‌افزار برای طیف خام وارد شده (الف) و مشتق اول طیف (ب)، یک فاکتور را به‌عنوان تعداد فاکتور بهینه برای وارد کردن داده‌های طیفی به نرم‌افزار معرفی کرد که تغییرات SL را می‌تواند پوشش دهد.

نتایج حاصل از این نمودار نشان می‌دهد که مدل PLSR به دست آمده به میزان ۱۴ درصد توانست داده‌های درصد رس خاک را با بازتاب طیفی و به میزان ۱۰ درصد با مشتق اول بازتاب توجیه کند. نتایج این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی خاک مانند حدود آتربریگ خاک، اثر متقابل پیچیده‌ای بر رفتار طیفی خاک دارند و به منظور برآورد حدود آتربریگ خاک، محدوده‌های مادون قرمز از محدوده مرئی حساسیت بیشتری دارند. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که این روش به‌خوبی جانشین روش‌های متعارف و سنتی می‌شود و حدود آتربریگ خاک را تخمین می‌زند که با یافته‌های (Waruru et al., 2014; Yitagesu et al., 2008) همخوانی دارد.

سپاسگزاری

از حمایت مالی صندوق پژوهشگران و فناوران کشور در اجرای این تحقیق بسیار سپاسگزاریم.

رگرسیون به میزان ۹۶ درصد توانسته است داده‌های LL خاک را با بازتاب طیفی و مشتق اول بازتاب توجیه کند.

شکل ۷ نشان می‌دهد که برای مقدار PL خاک رابطه حاصل از طیف خام با مشتق اول ندارد و همبستگی قوی را نشان می‌دهد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که برای تخمین PL خاک توسط بازتاب طیفی (الف) و مشتق اول بازتاب (ب)، پس از انجام رگرسیون می‌توان به ترتیب ۵ و ۳ فاکتور بهینه‌ای را معرفی کرد که تغییرات PL را به‌خوبی پوشش می‌دهند. نتایج حاصل از این نمودار نشان می‌دهد که مدل به دست آمده به میزان ۷۱ درصد توانسته است داده‌های PL خاک را با بازتاب طیفی و مشتق اول بازتاب توجیه کند. همچنین پیش‌بینی انجام‌گرفته برای داده‌های اعتبارسنجی، نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی معرفی‌شده PL خاک را به میزان ۵۹ درصد با بازتاب طیفی و ۵۶ درصد با صحت پیش‌بینی کرد.

شکل ۸ نشان می‌دهد که برای مقدار PI خاک رابطه حاصل از طیف خام با مشتق اول اختلافی زیادی ندارد و همبستگی قوی را نشان می‌دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که برای تخمین PI خاک توسط بازتاب طیفی (الف) و مشتق اول بازتاب (ب) پس از انجام رگرسیون می‌توان به ترتیب ۳ و ۱ فاکتور بهینه‌ای را معرفی کرد که تغییرات PI را به‌خوبی پوشش می‌دهد. نتایج حاصل از این نمودار نشان می‌دهد که مدل به دست آمده به میزان ۸۰ و ۷۷ درصد، داده‌های PI خاک را با بازتاب طیفی و مشتق

References

- Arana, I., Jarén, C., & Arazuri, S. (2005). Maturity, variety and origin determination in white grapes (*Vitis vinifera* L.) using near infrared reflectance technology. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 13(6), 349-357.
- American Society for Testing and Materials, (2010). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- Ben-Dor, E., Irons, J.R., & Epema, G.F. (1999). Soil reflectance, P 111-188. In: A.N. Rencz (Ed.), Remote Sensing for Earth Sciences. Manual of Remote Sensing. John Wiley and Sons, Inc., Toronto.
- British Standards Institution, (1990). *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 1, General Requirements and Sample Preparation*. British Standards Institution.
- Brown, D. J., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., Mays, M. D., & Reinsch, T. G. (2006). Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 132(3-4), 273-290.
- Cho, J. H., Min, B. J., Chen, Y. J., Yoo, J. S., Wang, Q., Kim, J. D., & Kim, I. H. (2007). Evaluation of FSP (fermented soy protein) to replace soybean meal in weaned pigs: growth performance, blood urea nitrogen and total protein concentrations in serum and nutrient digestibility. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 20(12), 1874.
- Das, B.M. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. Taylor and Francis, New York, 370p.
- Dakshanamurthy, V., & Raman, V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and Foundations*, 13(1), 97-104.
- Ebnjalal, R., & Bajestan, S.B. (2004). *Theoretical and Practical Principles of Soil Mechanics*. Shahid Chamran University Press. 4th Ed. Ahvaz. 816 pp.
- Cozzolino, D., & Moron, A. 2003. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyse soil chemical and physical characteristics. *J. Agric. Sci.* 140, 65-71.
- Gisladottir, F. O., Arnalds, O., & Gisladottir, G. (2005). The effect of landscape and retreating glaciers on wind erosion in south Iceland. *Land degradation & development*, 16(2), 177-187.
- Petry, T. M., & Little, D.N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 447-460.
- Rossel, R.V., Walvoort, D., McBratney, A., Janik, L.J., & Skjemstad, J. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1), 59-75.
- Sharma, S., Mohanty, B.P., & Zhu, J. (2006). Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(1), 1430-1440.
- Schaepman-Strub, G., Limpens, J., Menken, M., Bartholomeus, H.M., & Schaepman, M.E. (2008). Towards spatial assessment of carbon sequestration in peatlands: spectroscopy based estimation of fractional cover of three plant functional types. *Biogeosciences Discussion*, 5(1), 1293-1317.
- Salehi, A., M. Zainkafsh, G. Zahedi Amiri., & Marvi Mohajer, R. (2005). A study of soil physical and chemical properties in relation to tree ecological groups in Nam-Khaneh district of Kheirood-Kenar forest, *Iranian Journal of Natural Resource*, 58(3), 567-578.
- Savitzky, A., & Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1638.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., & Wetterlind, J. (2010). Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy*, 107(1), 163-215.
- Waruru, B. K., Shepherd, K. D., Ndegwa, G. M., Kamoni, P. T., & Sila, A. M. (2014). Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *biosystems engineering*, 121, 177-185.
- Yitagesu, F. A., van der Meer, F., van der Werff, H., & Zigterman, W. (2008). Assessing Expansive Soil Engineering Parameters Using Spectroscopy. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International* (Vol. 2, pp. II-1255). IEEE.
- Yitagesu, F. A., Van der Meer, F., Van der Werff, H., & Hecker, C. (2011). Spectral characteristics of clay minerals in the 2.5–14 μm wavelength region. *Applied clay science*, 53(4), 581-591.

Yitagesu, F. A., van der Werff, H., van der Meer, F., & Hecker, C. (2012). On the relationship between plasticity and spectral characteristics of swelling soils: The 3–5 μ m wavelength region. *Applied clay science*, 69, 67-78.

Ye, X., Sakai, K., Sasao, A., & Asada, S. I. (2008). Potential of airborne hyperspectral imagery to estimate fruit yield in citrus. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90(2), 132-144.



Research Article

**Laboratory evaluation of the PLSR method to estimate
Atterberg limits of soil by field spectroscopy**

F. Mousavi^{1*}, E. Abdi², A. Ghalandarzadeh³, H. Bahrami⁴, and B. Majnounian⁵

^{1*} Phd, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

² Associate Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

³ Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, I. R. Iran

⁵ Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

(Received: 17 June 2018, Accepted: 9 August 2018)

Abstract

Generally in developing countries such as Iran, the studies in soil mechanics are rarely done or even not conducted due to high cost and time of research and conventional laboratory methods, so the lack of information in this field can damage the construction. Today new approaches such as field spectroscopy are being developed in order to dissolve many of these issues, which is a non-destructive, fast and inexpensive method. Spectrometry is a non-destructive, fast and inexpensive method that has not been applied in estimation of mechanical properties of forest soils in Iran yet. In this study, we estimated the Atterberg limits of soil (Liquid limit, Plastic limit, Plasticity index, and Shrinkage limit) by field spectroscopy. For this purpose, 45 soil samples were collected from Kheyrood forest (NAMKHANE district) to do Atterberg Limits and VNIR. Partial Least Square Regression (PLSR) was used to predict the Atterberg limits in both the raw spectra and the first derivative of the spectrum. The results showed that PLSR modeling for the parameters of Liquid Limit and Plasticity Limit in the raw and first derivative is very suitable and for Plastic Limit and Shrinkage Limit is weak and not acceptable. Therefore spectroscopy can be used as a fast, inexpensively and accurately acceptable method for predicting the Atterberg limits.

Keywords: Field spectroscopy, Atterberg limits of soil, PLSR, First derivative.