

بررسی امکان برآورد مقاومت تک‌محوری خاک جاده‌های جنگلی با استفاده از روش حذف

پیوستار

ستوده بابایی^۱، پرویز فاتحی^{۲*}، فاطمه موسوی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانش‌آموخته دکتری گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

چکیده

شناخت مقاومت خاک برای احداث و نگهداری جاده‌های جنگلی بسیار ضروری است. تعیین مقاومت خاک‌های جنگلی که بیشتر از نوع ریزدانه و خمیری‌اند با استفاده از روش آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری انجام می‌گیرد. طیف‌سنجی روشی سریع و غیرمخرب است که به شناخت خصوصیات خاک کمک می‌کند. پژوهش حاضر با هدف بررسی توانایی داده‌های طیف‌سنجی برای برآورد مقاومت تک‌محوری خاک انجام گرفته است. بدین منظور از روش حذف پیوستار، شاخص‌های ابرطیفی و ترکیب هر دو روش استفاده شد. در طیف خاک سه محدوده جذبی با مرکزیت طول‌موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر وجود دارد که در برآورد مقاومت تک‌محوری خاک مؤثرند. پس از جدا کردن محدوده‌های مورد نظر از طیف کامل خاک، روش حذف پیوستار بر روی این محدوده‌ها اعمال و شاخص‌های جذب پیوستار برای ۴۵ نمونه خاک محاسبه شد. مدل‌سازی برآورد مقاومت تک‌محوری خاک با استفاده از رگرسیون گام‌به‌گام انجام گرفت. روش ارزیابی متقابل و آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، درصد جذر میانگین مربعات خطا (rRMSE) برای انتخاب بهترین مدل به‌کار برده شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که شاخص‌های NINSON و NSMI با $R^2 = 0.75$ و $rRMSE\% = 11.29$ و شاخص NBDI حذف پیوستار با $R^2 = 0.78$ و $rRMSE\% = 10.16$ نتایج بهتری را ارائه دادند. خطای به‌نسبت کم مدل حاصل از روش حذف پیوستار نشان داد که از داده‌های طیف‌سنجی و روش حذف پیوستار می‌توان برای برآورد مقاومت خاک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: حذف پیوستار، رگرسیون گام‌به‌گام، شاخص ابرطیفی، طیف‌سنجی زمینی، مقاومت فشاری خاک.

مقدمه

دارد. چنین خاک‌هایی به‌ویژه در پاسخ به نوسان‌های مقدار رطوبت در پی تغییرات آب‌وهوای فصلی، مستعد تغییر حجم زیادی هستند. این تغییر حجم ممکن است سبب تغییر ساختار جاده‌های احداث‌شده روی بستری از این نوع خاک‌ها شده و ناپایداری این جاده‌ها را سبب شود [۲]. یکی از متداول‌ترین روش‌های بررسی مقاومت خاک‌های چسبنده،

وجود خاک در سازه‌های مهندسی تأثیر مهمی در برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و نگهداری به‌ویژه در قسمت زیر ساخت‌ها دارد. شناخت ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در احداث و تعمیر جاده‌های جنگلی اهمیت بسزایی دارد [۱]. به‌طور معمول در خاک‌های جنگلی مقدار زیادی رس وجود

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از طیف‌سنجی بنیان نهاده شده است. ساده‌ترین روش، عملیات ریاضی روی باندهای طیفی است که در سنجش از دور به شاخص‌های طیفی معروف‌اند. در تقسیم‌بندی کلی، شاخص‌های طیفی براساس پهنای باندهای طیفی استفاده شده به دو دسته شاخص‌های طیفی با پهنای باند بزرگ و شاخص‌های طیفی با پهنای باند باریک (شاخص‌های ابرطیفی) تقسیم می‌شوند. شاخص‌های ابرطیفی که از داده‌های طیف‌سنجی استخراج می‌شوند اختلاف بین بازتاب پدیده‌ها را که ناشی از تغییرات آنهاست تشدید می‌کنند و همچنین اثر عواقل منفی بر بازتاب را کاهش می‌دهند [۷]. از دیگر روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از طیف‌سنجی، روش حذف پیوستار^۳ است. امواج الکترومغناطیس هنگام برخورد با پدیده‌های سطح زمین دچار سه حالت جذب، عبور و انعکاس می‌شوند [۸]. وجود عناصر یا مشخصه‌ای خاص می‌تواند سبب تشدید پدیده جذب در منحنی طیفی شود. در روش حذف پیوستار توجه اساسی بر محدوده‌ها و پدیده‌های جذبی است. این روش نوعی نرمال‌سازی منحنی طیفی در دامنه طول موج‌هایی است که در آن جذب اتفاق می‌افتد و به عبارتی برخلاف شاخص‌های طیفی در محدوده‌ای مشخص به مقایسه شکل جذبی متغیر مورد نظر می‌پردازد و مقایسه شکل جذبی در طول موج‌های مختلف را ممکن می‌کند [۹]. انعکاس طیفی خاک تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله مقدار مواد آلی، عناصر تشکیل‌دهنده آن، نوع خاک، مقدار رطوبت و بافت خاک قرار دارد. تاکنون تحقیقات متعددی برای برآورد ویژگی‌های مختلف خاک صورت گرفته است [۱۰، ۱۱]. دایک و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از طیف‌سنجی ضمن توسعه شاخص‌های جدید به تهیه نقشه رطوبت خاک پرداختند [۱۲]. آکان و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه به مدل‌سازی برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک پرداختند

آزمایش مقاومت تک‌محوری^۱ است. براساس استاندارد ASTM^۲ مقاومت فشاری تک‌محوری، به مقدار تنش فشاری گفته می‌شود که نمونه استوانه‌ای خاک را در آزمایش فشاری تک‌محوری ساده دچار گسیختگی می‌کند. افزون‌بر این، در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، حداکثر بار در واحد سطح در نظر گرفته می‌شود [۳]. منطق این آزمایش به‌راحتی درک می‌شود، اما آزمایش مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است. بنابراین بررسی امکان استفاده از روش‌های کم‌هزینه‌تر و غیرمخرب ضروری است [۲]. سنجش از دور از طریق طیف‌سنجی در این زمینه بسیار راهگشا خواهد بود. امروزه طیف‌سنجی به‌علت در اختیار قرار دادن داده‌های بهنگام، مفید و غیرمخرب اهمیت روزافزونی در همه زمینه‌های علمی از جمله عمران و منابع طبیعی یافته است. طیف‌سنجی خاک به‌منزله روشی مکمل در برآورد پارامترهای خاک مورد توجه قرار گرفته و توانسته است اطلاعات مفیدی را در سطوح کوچک تا وسیع فراهم آورد که با روش‌های معمول به‌راحتی به‌دست نمی‌آیند [۴]. طیف‌سنجی به دو صورت زمینی و تصویری انجام می‌گیرد [۵]. طیف‌سنجی زمینی به‌علت برداشت داده از فاصله‌ای نزدیک از پدیده‌ها اطلاعات باکیفیت‌تر و با نویز کمتر ارائه می‌دهد. افزون‌بر این به‌علت در دسترس نبودن تصاویر ابرطیفی بهنگام و مناسب برای بسیاری از مناطق، طیف‌سنجی زمینی را می‌توان گزینه مناسبی در تحقیقات علوم خاک دانست. توان تفکیک طیفی داده‌های طیف‌نگار زمینی بین ۱۰-۱ نانومتر متغیر است و به‌دلیل حداقل بودن اثر عوامل محیطی بر داده‌های طیف‌نگار زمینی این اندازه‌گیری‌ها از نظر طیفی بسیار دقیق‌اند، به‌گونه‌ای که در توسعه و ایجاد کتابخانه‌های طیفی، در بسیاری از روش‌های طبقه‌بندی و همچنین کالیبره کردن داده‌های برداشت شده از سنجنده‌های هوایی و فضایی به‌عنوان عضو نهایی^۳ کاربرد دارند [۶]. روش‌های متفاوتی برای

3. Endmember
4. Continuum removal

1. Unconfined Compressive Strength
2. American Society for Testing and Materials

گرفت. سری نمخانه جنگل آموزشی - پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران در خیرودکنار در ۷ کیلومتری شرق شهر ستان نو شهر در طول جغرافیایی ۳۲° ۵۱' تا ۳۵° ۵۱' و عرض جغرافیایی ۳۴° ۳۶' تا ۳۶° ۳۷' قرار دارد و با مساحت تقریبی ۱۰۸۰ هکتار دومین بخش از جنگل خیرود است. میانگین بارش سالیانه منطقه ۱۳۵۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد است [۱۵].

موسوی و همکاران نمونه‌برداری را به شکل تصادفی در واحدهایی همگن انجام داده‌اند [۷]. آنها به این منظور ابتدا از نقشه‌های توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) را استخراج کردند. سپس با استفاده از این مدل، نقشه شیب و جهت منطقه تهیه شد. از ترکیب نقشه شیب، جهت و ارتفاع منطقه نقشه یگان شکل زمین به دست آمد. در مرحله بعد از روی هم‌گذاری نقشه شکل زمین و نقشه مقدار رس منطقه، محدوده‌های همگن تعیین و تعداد نمونه‌ها با توجه به محدوده‌های همگن در درون پلی‌گون‌هایی به صورت تصادفی انتخاب شدند. در نهایت ۴۵ نمونه خاک در سال ۱۳۹۴ با در نظر گرفتن موارد یاد شده برداشت شد (شکل ۱). محل‌های نمونه‌برداری در عرصه با استفاده از سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) مشخص شد و با کنار زدن مواد آلی سطح، گمانه‌ای به عمق حدود ۳۰ سانتی‌متر حفر و ۱ کیلوگرم خاک برداشت شد [۷].

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

برای برآورد مقاومت فشاری نمونه‌های خاک از آزمایش فشاری تک‌محوری استفاده شد. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D1633-00 برای ۴۵ نمونه با رطوبت ۱۴ درصد و وزن واحد خشک $1/387 \text{ g/cm}^3$ صورت گرفت [۷] (شکل‌های ۲ و ۳).

[۱۳]. موسوی و همکاران (۲۰۲۱) به منظور برآورد مقاومت فشاری خاک، از نفوذسنج جیبی^۱ استفاده کردند. آنها بدین منظور از چهار گروه خاک با مقدار رطوبت ۱۴، ۲۵، ۳۱ و ۳۶ درصد استفاده کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش رطوبت خاک، مقاومت تک‌محوری خاک به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. افزون‌بر این، داده‌های نفوذسنج جیبی می‌تواند مقاومت فشاری تک‌محوری را با دقت ($R^2=0/98$) پیش‌بینی کند [۱۴]. موسوی و همکاران (۲۰۲۱) مقاومت فشاری خاک جاده‌های جنگلی را با استفاده از طیف‌سنجی زمینی برآورد کرده و بدین منظور از مدل توسعه‌داده‌شده با رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۲ و مدل توسعه‌داده‌شده با شاخص تفاوت نرمال (NDI)^۳ استفاده کردند. نتایج نشان داد که توسعه مدل با استفاده از شاخص NDI موفق‌تر از مدل‌های توسعه‌یافته با رگرسیون حداقل مربعات جزئی است [۱۰].

با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک، دشواری آماده‌سازی نمونه مناسب برای آزمایش است [۲]، بررسی استفاده از روش‌های جایگزین مانند طیف‌سنجی ضرورت دارد. افزون‌بر این تا کنون تحقیقی به منظور برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک با استفاده از روش حذف پیوستار انجام نگرفته است. هدف این تحقیق، بررسی قابلیت داده‌های حاصل از طیف‌سنجی و روش حذف پیوستار برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک است و به معرفی شاخص‌های ابرطیفی مناسب برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک نیز پرداخته می‌شود.

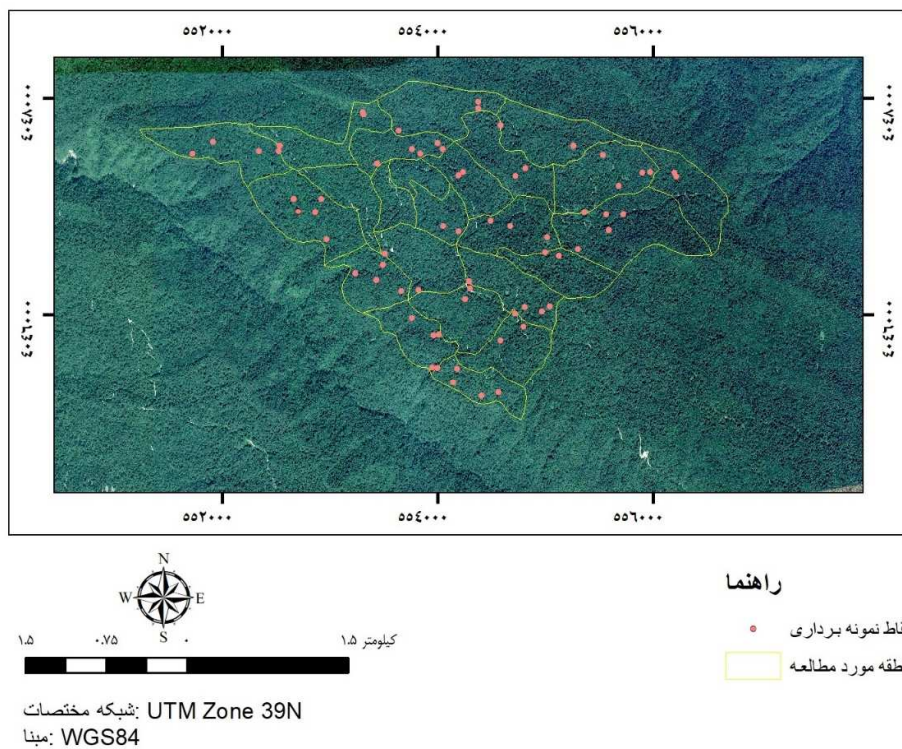
مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش و شیوه نمونه‌برداری

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت‌شده توسط موسوی و همکاران (۱۳۹۷) [۱۰، ۷] در سری نمخانه صورت

4. Digital Elevation Model
5. Global Positioning System

1. Pocket Penetrometer
2. Partial Least Squares Regression
3. Normal Difference Index



شکل ۱. نقشه منطقه پژوهش و پراکنش نمونه‌های خاک در سری نمخانه جنگل آموزشی - پژوهشی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران (google earth)



شکل ۳. نمونه خاک ساخته شده در دستگاه تک‌محوری



شکل ۲. ساخت نمونه خاک برای اجرای آزمایش تک‌محوری

اندازه‌گیری طیفی

خاک پس از نمونه‌برداری خشک و سپس کوبیده شد. برای ساخت نمونه خاک برای اجرای آزمایش تک‌محوری رطوبت ۱۴ در صد به صورت مصنوعی به خاک اضافه شد. پس از آزمایش تک‌محوری نمونه‌های شکسته شده حین آزمایش در آزمایشگاه جمع‌آوری شد. به‌منظور جلوگیری از تغییر مقدار رطوبت، نمونه‌ها در دو کیسه پلاستیکی قرار داده شده و برای اندازه‌گیری طیفی به آزمایشگاه منتقل شد. اندازه‌گیری طیفی در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از دستگاه طیف‌نگار ASD fieldspec3 با دامنه طیفی ۲۵۰-۳۵۰ نانومتر با استفاده از روش پروب تماسی^۱ و در اتاق تاریک (به‌منظور جلوگیری از ورود نور و بازتاب اضافی) صورت گرفت. تعداد تکرار برای ثبت هر اندازه‌گیری طیفی برابر با ۷۲ در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور کاهش اثر ناهمگنی موجود در سطح نمونه، اندازه‌گیری طیفی برای هر نمونه ده بار با تغییر مکان پروب تکرار شد. برای پیش‌پردازش نیز محدوده فرابنفش و آبی یعنی طول موج ۴۰۰-۳۵۰ نانومتر به‌علت بازتاب کم و نویز زیاد از طیف حذف شد [۷]. پس از اندازه‌گیری طیفی، رطوبت خاک دوباره بررسی شد و رطوبت همه نمونه‌ها ۱۴ درصد به‌دست آمد.



شکل ۴. اندازه‌گیری طیفی نمونه تک‌محوری پس از آزمایش مقاومت تک‌محوری

روش حذف پیوستار

امواج الکترومغناطیس هنگام برخورد به پدیده‌های سطح زمین دچار سه حالت انعکاس، جذب و عبور می‌شوند [۸]. در منحنی‌های طیفی اندازه‌گیری‌شده در بعضی از طول موج‌ها، نور بیشتری جذب می‌شود که در اصطلاح سبب ایجاد مناطق جذبی می‌شود [۱۶]. به‌منظور بررسی دقیق پدیده‌های جذبی و استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل طیفی، نرمال‌سازی منحنی طیفی در محدوده‌های مورد نظر ضرورت دارد [۶]. در این زمینه، روش حذف پیوستار ایجاد شده است. برای محاسبه منحنی حذف پیوستار ابتدا طول موج آغازین و پایانی محدوده جذبی مشخص شده و سپس خطی مستقیم به نام خط پیوستار^۲ که این دو نقطه را به هم متصل می‌کند رسم می‌شود [۱۷]. در هر طول موج میزان بازتاب طیفی بر ارزش‌های متناظر استخراج‌شده از خط پیوستار تقسیم می‌شود [۴]. منحنی به‌دست‌آمده دارای مقادیر جدیدی است که منحنی بدون پیوستار^۳ خوانده می‌شود (رابطه ۱). بنابراین حذف پیوستار نوعی نرمال‌سازی منحنی طیفی در دامنه طول موج‌هایی است که امکان مقایسه شکل جذبی را فراهم می‌کند. در این روش به‌جای استفاده از کل منحنی، طیفی از تغییرات مشخصه جذبی مورد نظر در محدوده طیفی خاصی استفاده می‌شود که با طول موج مرکزی معرفی خواهند شد [۱۸].

$$R' = \frac{R}{R_c} \quad (1)$$

R' منحنی بدون پیوستار، R مقدار بازتاب و R_c مقادیر متناظر بر خط پیوستار است [۱۹].

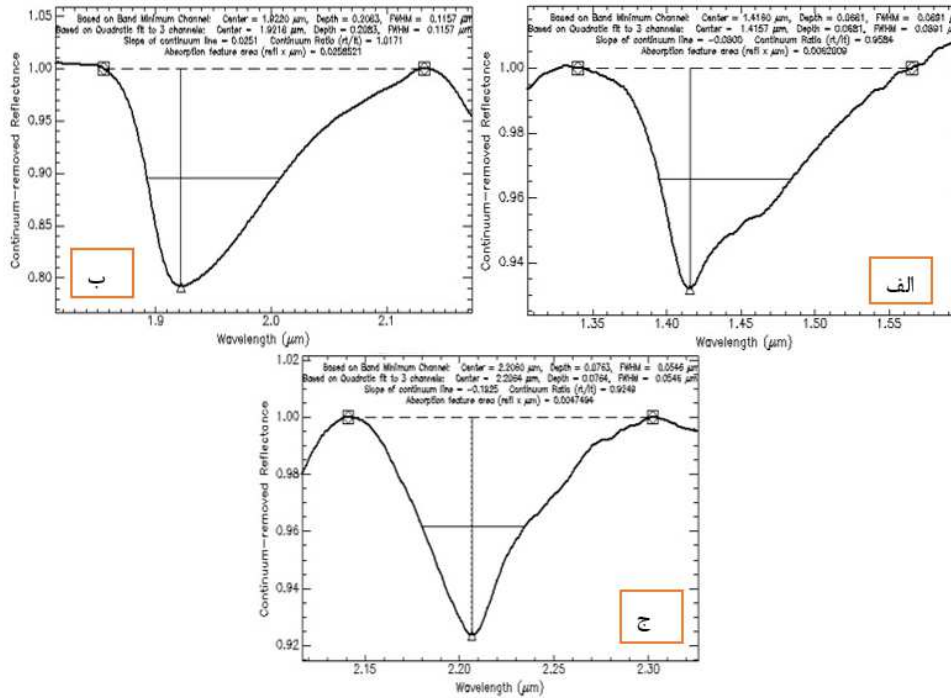
در منحنی طیفی خاک سه محدوده جذبی با مرکزیت طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر (شکل ۵) قابل شناسایی است که اغلب به جذب طیفی آب مربوط می‌شوند و در این پژوهش برای برآورد مقاومت فشاری خاک تجزیه و تحلیل می‌شوند (جدول ۱).



شکل ۵. موقعیت محدوده‌های جذب طیفی آب روی منحنی حاصل از بازتاب طیفی خاک

جدول ۱. محدوده‌های جذبی [۲۰]

شکل	طول موج مرکزی محدوده جذبی	طول موج ابتدایی و انتهایی محدوده جذبی
الف	۱۴۰۰	۱۵۶۰-۱۳۴۰
ب	۱۹۰۰	۲۱۴۰-۱۸۵۰
ج	۲۲۰۰	۲۳۰۰-۲۱۵۰



شکل ۶. منحنی حذف پیوستار محدوده جذبی ۱۴۰۰ نانومتر (الف)؛ منحنی حذف پیوستار محدوده جذبی ۱۹۰۰ نانومتر (ب)؛ منحنی حذف پیوستار محدوده جذبی ۲۲۰۰ نانومتر (ج).

جدول ۲. شاخص‌های ابرطیفی محاسبه‌شده در پژوهش حاضر

منبع	فرمول	نام شاخص
[۲۱]	$R_{700} \times (\text{SQRT}((a \times 670 + R_{670} + b)^2)) / R_{670} \times (a^2 + 1)^{a.5}$ [a=(R ₇₀₀ -R ₅₅₀)/150; b=R ₅₅₀ -(a×550)]	CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index)
[۲۲]	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
[۲۳]	$((R_{750} - R_{705}) - 0.2 \times (R_{750} - R_{550})) \times (R_{750} / R_{705})$	MCARI2
[۲۴]	$0.5 \times (2 \times R_{800} + 1 - \text{SQRT}((2 \times R_{800} + 1)^2 - 8 \times (R_{800} - R_{670})))$	MSAVI (Improved Soil Adjusted Vegetation Index)
[۲۵]	$((1 + 0.16) \times (R_{800} - R_{670})) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	OSAVI (Optimised Soil-Adjusted Vegetation Index)
[۲۶]	$3 \times ((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})) \times (R_{700} / R_{670})$	TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index)
[۲۳]	$3 \times ((R_{750} - R_{705}) - 0.2 \times (R_{750} - R_{550})) \times (R_{750} / R_{705})$	TCARI2
[۲۶]	TCARI/OSAVI	TCARI/OSAVI
[۲۳]	TCARI2/OSAVI2	TCARI2/OSAVI2
[۲۷]	$(R_{1800} - R_{2119}) / (R_{1800} + R_{2119})$	NSMI
[۲۸]	$(R_{2122} - R_{2230}) / (R_{2122} + R_{2230})$	NINSON
[۲۹]	$(R_{531} - B_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	PRI

این عملیات موجب تشدید اختلاف بین بازتاب پدیده‌ها و همچنین کاهش اثر منفی عوامل محیطی می‌شود [۸]. در پژوهش حاضر چند شاخص ابرطیفی (جدول ۲) محاسبه شد که بهترین نتایج با استفاده از دو شاخص ابرطیفی^۴ NINSON و NSMI^۵ به دست آمد.

تحلیل‌های آماری

به منظور بررسی ارتباط بین اندازه‌گیری‌های طیفی و اندازه‌گیری مقاومت فشاری خاک از رگرسیون گام‌به‌گام^۶ پی‌شرو استفاده شد. در روش رگرسیون گام‌به‌گام پی‌شرو ابتدا متغیرها یک‌به‌یک وارد مدل می‌شوند و متغیر دارای بیشترین همبستگی با متغیر وابسته انتخاب خواهد شد. شرط اصلی در ورود متغیرهای دیگر به مدل افزایش مقدار R² است. در این روش کارایی هر مرحله با آزمون F سنجیده می‌شود. در روش گام‌به‌گام، با ورود متغیرهای جدید متغیرهایی که قبلاً وارد مدل شده‌اند از نو آزموده می‌شوند تا مشخص شود که آیا هنوز هم حضور آنها در مدل به

شاخص‌های جذبی با استفاده از منحنی حذف پیوستار تو سعه داده می‌شوند [۱۹]. شاخص‌های BD^۱، BDR^۲ و NBDI^۳ (به ترتیب رابطه‌های ۲، ۳ و ۴) از جمله شاخص‌های عمق باند هستند که برای برآورد خصوصیات منحنی‌های بدون پیوستار که حاصل تجزیه و تحلیل حذف پیوستار است استفاده می‌شوند.

$$BD = 1 - R' \quad (۲)$$

$$BDI = \frac{BD}{BD_c} \quad (۳)$$

$$NBDI = \frac{BD - BD_c}{BD + BD_c} \quad (۴)$$

در اینجا BD نشان‌دهنده عمق محدوده جذبی و BD_c طول موج مرکزی محدوده جذبی است [۱۹].

شاخص‌های ابرطیفی

یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تبیین ارتباط بین داده‌های طیفی و مشخصه‌های ساختاری، استفاده از شاخص‌های طیفی است. شاخص‌های طیفی نتیجه اعمال یک فرمول ساده ریاضی بر روی دو یا چند باند طیفی است.

4. Normalized Index of NSWIR domain for Smc (Soil Moisture Content) estimation from Non-linear regression
5. Normalized soil moisture index
6. Stepwise regression

1. Band Depth
2. Band depth ratio
3. Normalized band depth index

نتایج و بحث

شکل ۷ نشان‌دهنده منحنی انعکاس طیفی ۴۵ نمونه با رطوبت ۱۴ در صد است. در این پژوهش به منظور بررسی توان روش‌های نوین طیف‌سنجی برای برآورد مقاومت خاک از دو روش شاخص‌های ابرطیفی و حذف پیوستار استفاده شد. پیش از این، پژوهشی برای بررسی قابلیت روش حذف پیوستار برای برآورد مقاومت فشاری خاک صورت نگرفته است. به‌طور کلی در منحنی طیفی خاک، میزان بازتاب خاک در محدوده مرئی کاهش و با افزایش طول موج افزایش می‌یابد، به‌نحوی که در محدوده مادون قرمز موج کوتاه^۵ (SWIR) به بیشترین حد ممکن در بخش اپتیکی می‌رسد. در تحقیقات در زمینه مقاومت تک‌محوری خاک به‌علت تأثیر رطوبت در مقاومت خاک محدوده مادون قرمز موج کوتاه از اهمیت بیشتری برخوردار است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، اگرچه بیشترین همبستگی بین مقاومت تک‌محوری خاک و طول موج‌های مختلف در محدوده مادون قرمز موج کوتاه مشاهده شد، همبستگی با درجات مختلف در کل طیف نیز دیده شد؛ بنابراین مانند دیگر تحقیقات از کل منحنی طیفی استفاده شد [۲]. نتایج الگوی طیفی (شکل ۳) نشان داد که خاک منطقه با الگوی کلی مشخصه طیفی^۶ خاک مطابقت دارد و میزان بازتاب از طول موج‌های کوتاه به سمت طول موج‌های بلند افزایش می‌یابد [۳۱].

به‌طور کلی در پژوهش‌های پیشین، استفاده از طیف‌سنجی برای برآورد خصوصیات ساختاری و بیوشیمیایی گیاهان نتایج مثبتی داشته است [۱۲، ۳۱]. همچنین در پژوهش‌های مربوط به حوزه خاک نیز داده‌های طیف‌سنجی نتایج مناسبی را ارائه داده‌اند [۲، ۴]. با توجه به این نتایج، قابلیت روش حذف پیوستار و شاخص‌های ابرطیفی به‌منظور برآورد مقاومت فشاری خاک بررسی شد.

موفقیت آن کمک می‌کند یا خیر [۳۰]. برای اعتبارسنجی نیز از روش اعتبارسنجی متقابل با یک نمونه خارج‌شده^۱ استفاده شد. شیوه اعتبارسنجی متقابل به این صورت است که با خارج کردن یک نمونه از نمونه‌های باقی مانده، برای n-1 مشاهده مدل توسعه‌یافته برازش می‌شود و یک نمونه برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود. این فرایند n بار تکرار می‌شود و همه داده‌ها دقیقاً یک بار برای اعتبارسنجی به‌کار می‌روند. در نهایت میانگین نتیجه این n بار اعتبارسنجی به‌عنوان تخمین نهایی برگزیده می‌شود.

با در اختیار داشتن اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقاومت فشاری خاک با استفاده از دستگاه تک‌محوری^۲ و برآورد مقاومت فشاری خاک به‌وسیله پردازش‌های طیفی، با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا^۳ RMSE (رابطه ۵) و جذر میانگین مربعات خطای نسبی^۴ rRMSE (رابطه ۶) اعتبار مدل‌های رگرسیونی ارزیابی شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (5)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (6)$$

\bar{y}_i و \hat{y}_i به ترتیب مقادیر برآوردشده مقاومت خاک، مقادیر مشاهده‌شده مقاومت خاک و متوسط مشاهده مقاومت خاک است.

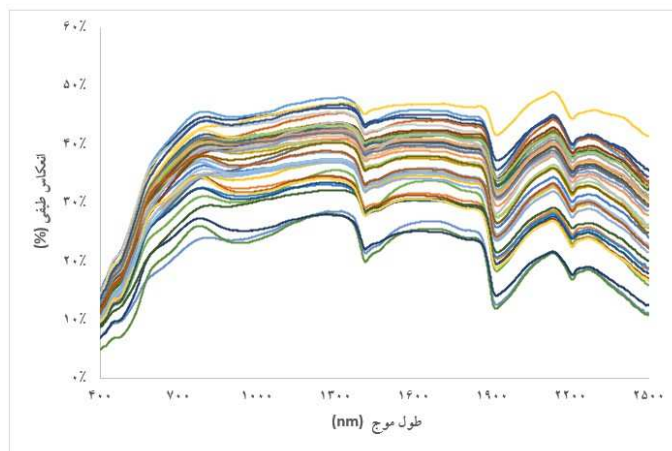
در این پژوهش توسعه مدل با استفاده از سه گروه داده انجام گرفت. این کار در گروه اول، تنها با استفاده از شاخص‌های ابرطیفی، در گروه دوم با استفاده از شاخص NBDI روش حذف پیوستار و شاخص‌های ابرطیفی با هم و در گروه سوم نیز با استفاده از همه شاخص‌های روش حذف پیوستار در هر سه محدوده جذبی با هم انجام پذیرفت و تفکیک چه از نظر محدوده جذبی و چه از نظر شاخص‌های روش حذف پیوستار صورت نگرفت.

4. relative Root Mean Square Error
5. Short Wave Infrared
6. Spectral signature

1. Cross Validation Leave One Out (LOOCV)
2. Unconfined compression device
3. Root Mean Square Error

رطوبت در خاک است. رطوبت خاک در عمق عوارض جذبی تأثیرگذار خواهد بود؛ بدین صورت که با افزایش رطوبت خاک، عمق عوارض جذبی افزایش خواهد یافت.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شد، در طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر محدوده جذبی قابل مشاهده است که این عوارض جذبی به دلیل وجود



شکل ۷. منحنی انعکاس طیفی نمونه‌های بررسی شده

نمودار توسعه مدل براساس داده‌های گروه‌های اول، دوم و سوم در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به جدول ۴، توسعه مدل به منظور برآورد مقاومت فشاری خاک با استفاده از شاخص‌های ابرطیفی NINSON و NMSI ضریب تعیین مناسبی ($R^2 = 0.75$) را نشان داد که نتایج پژوهشی دیگر [۲] نیز با استفاده از شاخص‌های ابرطیفی دیگری این یافته را تأیید می‌کند. افزون‌بر این، نتایج پژوهش حاضر توانایی شاخص‌های ابرطیفی NINSON و NMSI برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک منطقه را نشان داد که این شاخص‌ها نتایج قابل قبولی را در برخی پژوهش‌ها [۱۶، ۱۷] نیز ارائه کرده بودند.

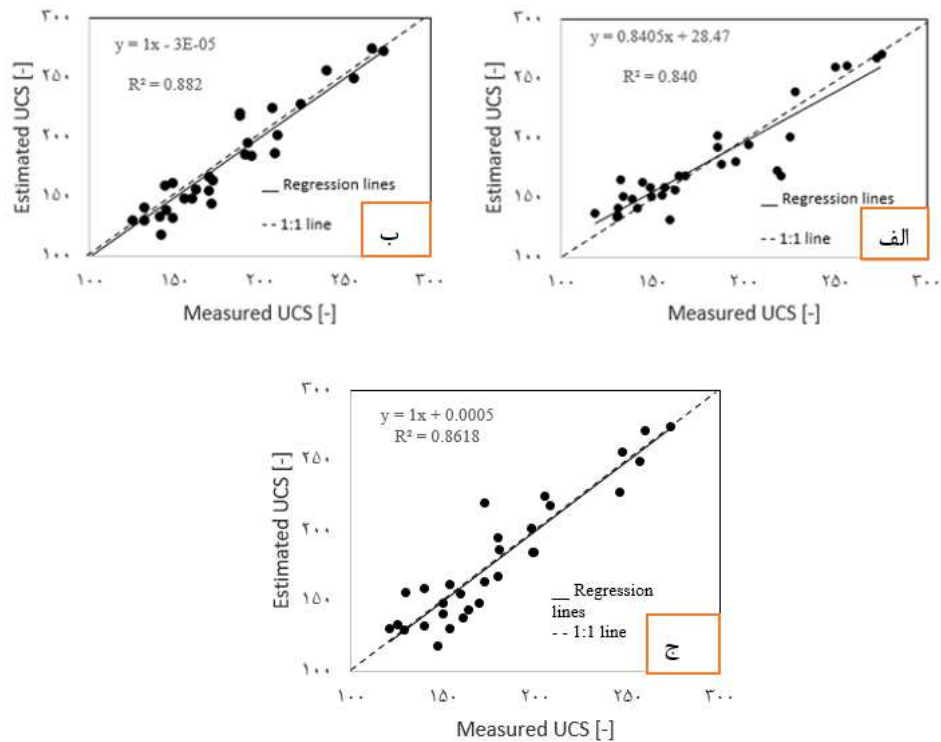
به منظور مدل‌سازی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ابتدا مدل‌های رگرسیون خطی ساده تک‌متغیره بین هر شاخص ابرطیفی و مقدار واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری توسعه داده شد. با توجه به جدول ۳ ضریب تعیین مربوط به شاخص NINSON برابر با ۰/۷۰ و ضریب تعیین مربوط به NMSI برابر با ۰/۶۹ است. در این پژوهش همان‌طور که در بخش مواد و روش اشاره شد، توسعه مدل برای استفاده از سه گروه داده انجام گرفت.

جدول ۳. ضریب تعیین شاخص‌های ابرطیفی با UCS

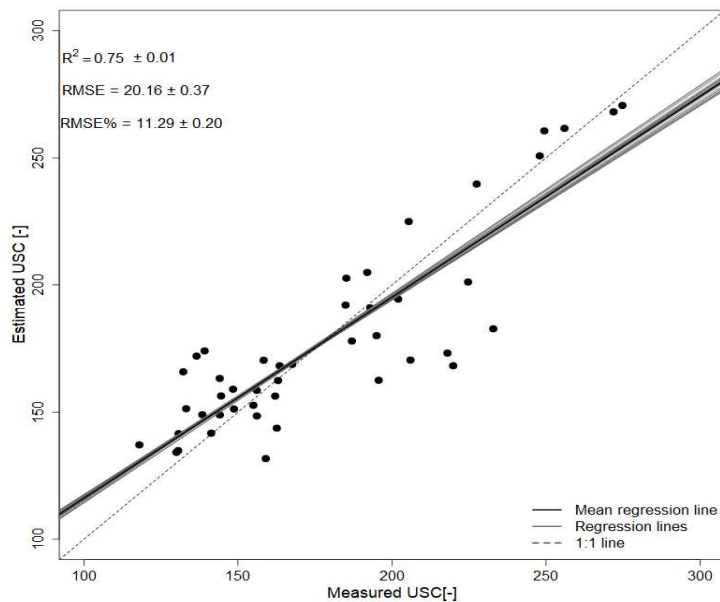
شماره	شاخص	R^2
۱	NINSON	۰/۷۰
۲	NMSI	۰/۶۹

جدول ۴. نتایج توسعه مدل‌های رگرسیونی

شماره گروه	شاخص	R^2 کالیبراسیون	R^2 اعتبارسنجی	RMSE	rRMSE%
گروه اول	NINSON NMSI	۰/۸۴	۰/۷۵	۲۰/۱۶	۱۱/۲۹
گروه دوم	NBDI و شاخص‌های ابرطیفی	۰/۸۸	۰/۷۸	۱۹/۴۵	۱۰/۸۹
گروه سوم	شاخص‌های حذف پیوستار	۰/۸۶	۰/۴۳	۳۴/۳۱	۱۹/۲۲



شکل ۸. نمودار کالیبراسیونی مدل گروه اول (الف)؛ نمودار کالیبراسیونی مدل گروه دوم (ب)؛ نمودار کالیبراسیونی گروه سوم (ج).



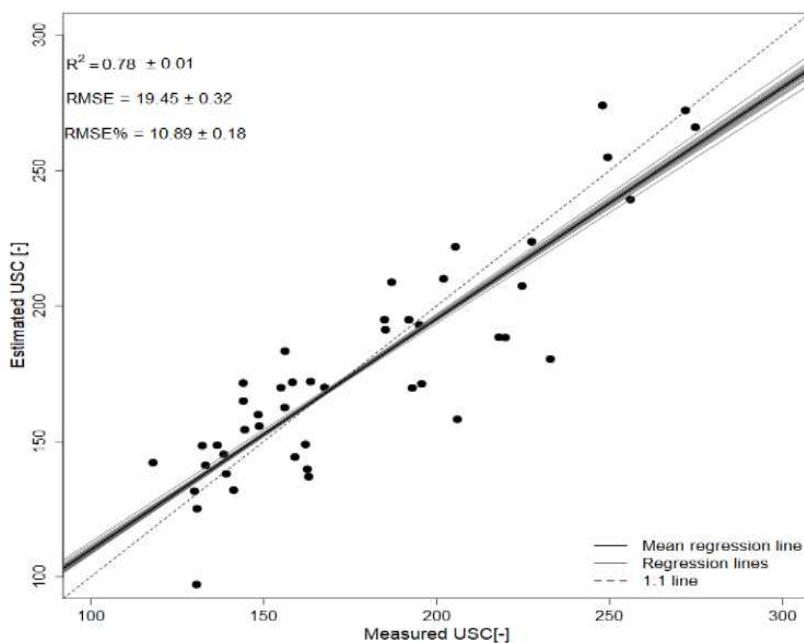
شکل ۹. نتایج اعتبارسنجی مدل شاخص‌های ابرطینی و مقاومت تک‌محوری خاک

چند طول موج از یک محدوده جذبی متشکل از تعداد زیادی طول موج استفاده می‌شود و در نتیجه اطلاعات دقیق‌تری ایجاد خواهد شد [۱۸].

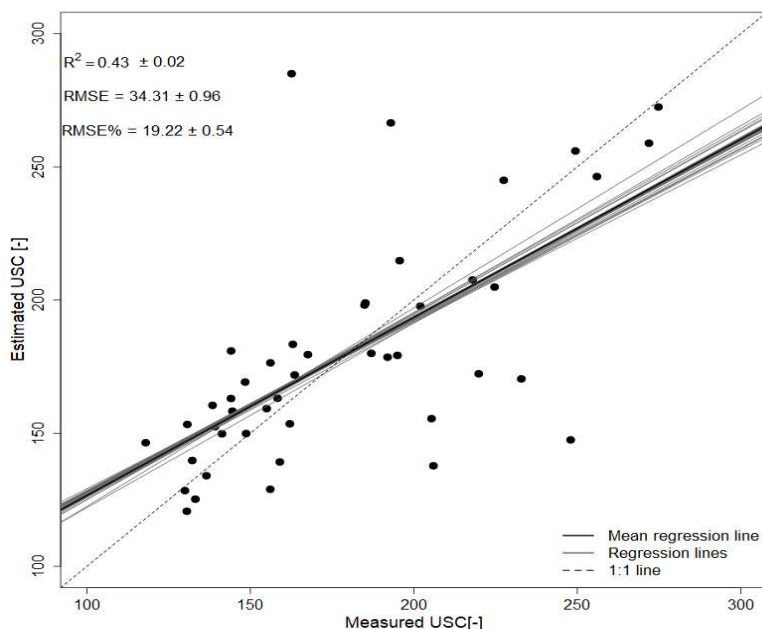
با توجه به نتایج ارائه شده و نمودار شکل ۱۰، ترکیب شاخص‌های ابرطیفی و روش حذف پیوستار نتایج بهتری نسبت به مدل مربوط به شاخص‌های ابرطیفی نشان داد. در مرحله آخر مدل‌سازی با استفاده از داده‌های هر سه شاخص روش حذف پیوستار در هر سه محدوده جذبی صورت گرفت.

نتایج ارائه شده در جدول ۴ و نمودار شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مدل شاخص‌های روش حذف پیوستار و مقاومت فشاری خاک با ضریب تعیین ۰/۴۳ و RMSE و rRMSE% به ترتیب با ۳۴/۳۱ و ۱۹/۲۲ درصد نسبت به دو مدل قبلی نتایج ضعیف‌تری داشت.

شکل ۹ نتایج اعتبارسنجی مدل شاخص‌های ابرطیفی و مقاومت تک‌محوری خاک را نشان می‌دهد. برای بررسی دقت مدل از دو آماره RMSE و rRMSE% استفاده شد که به ترتیب ۲۰/۱۶ و ۱۱/۲۹ درصد است. با توجه به این نکته که مدلی مناسب است که ضریب تعیین بزرگ و RMSE و rRMSE% کوچک داشته باشد، نتایج این مدل مناسب است. گروه دوم داده‌های مورد بررسی ترکیب شاخص‌های ابرطیفی و شاخص NBDI روش حذف پیوستار است. با توجه به نتایج جدول ۱، ضریب تعیین این مدل ۰/۷۸ بوده است. آماره‌های RMSE و rRMSE% نیز به ترتیب ۱۹/۴۵ و ۱۰/۸۹٪ هستند. مدل توسعه داده شده با استفاده از داده‌های گروه دوم نتایج بهتری را نسبت به داده‌های گروه اول ارائه کرد. این نتیجه ممکن است به علت استفاده از تعداد بیشتری طول موج در شاخص‌های روش حذف پیوستار باشد، زیرا در این روش به جای استفاده از دو یا



شکل ۱۰. نتایج اعتبارسنجی مدل شاخص‌های ابرطیفی به همراه شاخص NBDI و مقاومت تک‌محوری خاک



شکل ۱۱. نتایج اعتبارسنجی روش حذف پیوستار و مقاومت تک‌محوری خاک

نتیجه‌گیری

امکان‌پذیر است. استفاده از روش حذف پیوستار که بر محدوده‌های جذبی طیف تمرکز دارد در ترکیب با شاخص‌های طیفی با پهنای کم نتایج بهتری نسبت به پژوهش‌های انجام‌گرفته ارائه داده است.

با بررسی نتایج می‌توان گفت محدوده‌های طیفی ۱۸۶۴، ۲۱۲۳ نانومتر برای توسعه شاخص‌های NINSON و NMSI و همچنین محدوده جذبی ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر برای توسعه شاخص‌های جذبی طول موج‌های مؤثر در برآورد مقاومت تک‌محوری خاک هستند. این محدوده‌های طیفی در انتخاب سنجنده‌ها، تصاویر و همچنین طراحی باند مناسب برای تحقیقات در زمینه مقاومت تک‌محوری خاک نیز می‌توانند کمک‌کننده باشند.

آزمایش مقاومت تک‌محوری از متداول‌ترین روش‌های تعیین مقاومت خاک‌های جنگلی است که تأثیر مهمی در شناخت ویژگی‌های خاک در احداث و تعمیر جاده‌های جنگلی دارد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوری خاک، دشواری آماده‌سازی نمونه‌ها و هزینه به نسبت زیاد اجرای روش آزمایشگاهی است. در پژوهش حاضر توانایی داده‌های حاصل از طیف‌سنجی که روشی سریع و غیرمخرب است، در برآورد مقاومت فشاری خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که مدلسازی مقاومت فشاری خاک با دقت به نسبت زیاد

References

- [1]. Abdi, E., Salimizand, M., and Mousavi, F. (2019). The impact of different methods of Atterberg limits determination on the resulted Unified soil classification. *Iranian Journal of Forest*, 10, 403-413.
- [2]. Milton, E. J., Schaepman, M. E., Anderson, K., Kneubühler, M., and Fox, N. (2009). Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 113, S92-S109.
- [3]. Iranian Space Agency. (2020). *Spectroscopy Applications*: https://rs.isa.ir//index.php?module=cdk&func=loadmodule&system=cdk&sismodule=user/content_view.php&sisOp=view&ctp_id=602&cnt_id=52517&id=3761

- [4]. Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., and McMurtrey III, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 229-239.
- [5]. Malek, M. H., Berger, D. E., and Coburn, J. W. (2007). On the inappropriateness of stepwise regression analysis for model building and testing. *European Journal of Applied Physiology*, 101(2), 263-264.
- [6]. Huang, Z., Turner, B. J., Dury, S. J., Wallis, I. R., and Foley, W. J. (2004). Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis. *Remote Sensing of Environment*, 93(1-2), 18-29.
- [7]. Mousavi, F., Abdi, E., Ghalandarzadeh, A., Bahrami, H., and Majnounian, B. (2019). Laboratory evaluation of the PLSR method to estimate Atterberg limits of soil by field spectroscopy, *Iranian Journal of Forest*, 11, 151-164.
- [8]. Abbasi, M., Darvishsefat, A.A., and Schaepman, M. (2010). Comparison of adaxial and abaxial spectral reflectance of *Fagus orientalis* Lipsky and *Carpinus betulu* using field spectroradiometer and spectral indices. *Iranian Forest Journal, Iranian Forestry Association*, 3, 263-272.
- [9]. Kokaly, R. F. (2010). Spectroscopic analysis for material identification and mapping using PRISM, an ENVI/IDL based software package, *Proceedings of IGARSS 2010*.
- [10]. Mousavi, F., Abdi, E., Fatehi, P., Ghalandarzadeh, A., Bahrami, H. A., Majnounian, B., and Ziadi, N. (2021). Rapid determination of soil unconfined compressive strength using reflectance spectroscopy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(5), 3923-3938.
- [11]. Thompson, B. (1995). Stepwise regression and stepwise discriminant analysis need not apply here: A guidelines editorial. *Educational and Psychological Measurement*, 55(4), 525-534.
- [12]. Diek, S., Chabrillat, S., Nocita, M., Schaepman, M. E., and de Jong, R. (2019). Minimizing soil moisture variations in multi-temporal airborne imaging spectrometer data for digital soil mapping. *Geoderma*, 337, 607-621.
- [13]. Akan, R., Keskin, S. N., and Uzundurukan, S. (2015). Multiple regression model for the prediction of unconfined compressive strength of jet grout columns. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 299-303.
- [14]. Mousavi, F., Abdi, E., Ghalandarayeshi, S., and Page-Dumroese, D. S. (2021). Modeling unconfined compressive strength of fine-grained soils: Application of pocket penetrometer for predicting soil strength. *Catena*, 196, 104890.
- [15]. Etemad, V., Moridi, M., and Sefidi, K. (2017). Quantification of the horizontal structure of mixed *Fagus* stands in the evolutionary phase of rootstock reduction. *Forest and Wood Products*, 4, 647-656.
- [16]. Yitagesu, F. A., van der Meer, F., van der Werff, H., and Zigterman, W. (2009). Quantifying engineering parameters of expansive soils from their reflectance spectra. *Engineering Geology*, 105(3-4), 151-160.
- [17]. Gomez, C., Lagacherie, P., and Coulouma, G. (2008). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148(2), 141-148.
- [18]. ASTM, (2020). www.astm.org/Standards/D2166.htm.
- [19]. Fatehi, P., Damm, A., Schaepman, M. E., and Kneubühler, M. (2015). Estimation of alpine forest structural variables from imaging spectrometer data. *Remote Sensing*, 7(12), 16315-16338.
- [20]. Mobasheri, M. R., Amani, M., Beikpour, M., and Mahdavi, S. (2019). Soil moisture content estimation using water absorption bands. *Geomatica*, 73(3), 63-73.
- [21]. Main, R., Cho, M. A., Mathieu, R., O'Kennedy, M. M., Ramoelo, A., & Koch, S. (2011). An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), 751-761.
- [22]. Townshend, J. R., and Justice, C. O. (1986). Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1435-1445.

- [23]. Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., and Huang, W. (2008). Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8-9), 1230-1241.
- [24]. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., and Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126.
- [25]. Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107.
- [26]. Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., and Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 416-426.
- [27]. Haubrock, S. N., Chabrillat, S., Lemmertz, C., and Kaufmann, H. (2008). Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1), 3-29.
- [28]. Fabre, S., Briottet, X., and Lesaignoux, A. (2015). Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4–2.5 μm domain. *Sensors*, 15(2), 3262-3281.
- [29]. Middleton, E. M., Huemmrich, K. F., Landis, D. R., Black, T. A., Barr, A. G., and McCaughey, J. H. (2016). Photosynthetic efficiency of northern forest ecosystems using a MODIS-derived Photochemical Reflectance Index (PRI). *Remote Sensing of Environment*, 187, 345-366.
- [30]. Ma, S., Zhou, Y., Gowda, P. H., Dong, J., Zhang, G., Kakani, V. G., and Jiang, W. (2019). Application of the water-related spectral reflectance indices: A review. *Ecological Indicators*, 98, 68-79.
- [31]. Kokaly, R. F., and Clark, R. N. (1999). Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 67(3), 267-287.
- [32]. Curran, P. J., Dungan, J. L., and Peterson, D. L. (2001). Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 349-359.
- [33]. Sanches, I. D. A., Souza Filho, C. R., and Kokaly, R. F. (2014) Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680nm absorption feature with continuum removal. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97, 111–122.

Estimating unconfined compressive soil strength of forest roads using continuum removal technique

S., Babaei; M. Sc. Graduated, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

P., Fatehi*; Assist., Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

F., Mousavi; Ph.D. Graduated, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran.

(Received: 01 January 2022, Accepted: 09 March 2022)

ABSTRACT

Understanding soil resistance is essential for the construction and maintenance of forest roads. Unconfined compressive strength (UCS) test is used to determine the strength of fine-grained and cohesive forest soils. Spectroscopy is a fast and non-destructive method that can be used to understand, analysis, and assessment of the soil properties. The present study was aimed to investigate the capability of spectroscopy data to estimate UCS. To do so, a continuum removal technique, narrow band (i.e., hyperspectral) indices, and a combination of both methods were used. Three absorption ranges with wavelengths of 1400, 1900, and 2200 nm are effective in estimating the unconfined strength of the soil. The continuum removal technique was applied on the selected absorption regions and its indices were calculated for 45 soil sample plots. In addition, NINSON and NSMI hyperspectral indices were calculated. The capability of these data to estimate unconfined soil strength was evaluated using multiple stepwise regression analysis. The results of this study showed that NINSON and NSMI indices had an $R^2 = 0.75$ and an $rRMSE\% = 11.29\%$. Continuum removal index (i.e. NBDI) gained an $R^2 = 0.78$ and an $rRMSE\% = 10.16$ which shows a better result compared to the individual index. The results of the present study (i.e., a reasonable $rRMSE\%$) showed that the spectroscopy data and continuum removal techniques can be used to estimate soil strength.

Keywords: continuum removal, field spectroscopy, hyperspectral indices, stepwise regression, UCS.

* Corresponding Author, parviz.fatehi@ut.ac.ir, Tel: +982632249312