



توسعه و مقایسه توابع انتقالی خاک و توابع انتقالی طیفی برای برآورد نگاهداشت آب در برخی از خاک‌های استان کردستان

سیده ویدا حسینی^۱، * مسعود داوری^۲ و ناصر خالق پناه^۲

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان،

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

چکیده

سابقه و هدف: منحنی نگاهداشت آب در خاک از جمله ویژگی‌های مهم هیدرولیکی خاک بوده که در شبیه‌سازی جریان آب و انتقال املاح در بخش غیراشباع خاک کاربرد دارد. اندازه‌گیری مستقیم منحنی‌های نگاهداشت آب در خاک دشوار، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد؛ بدین‌منظور پژوهشگران روش‌هایی غیرمستقیم هم‌چون توابعی انتقالی را برای برآورد منحنی نگاهداشت آب در خاک با استفاده از داده‌های سهل‌الوصول پیشنهاد کرده‌اند. در چند دهه اخیر، استفاده از داده‌های طیفی خاک به‌عنوان روشی سریع، کم‌هزینه و غیرمخرب در برآورد ویژگی‌های مبنایی خاک به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در گستره مرئی-مادون قرمز نزدیک، به‌عنوان متغیر ورودی توابع انتقالی و ارزیابی عملکرد آن در مقایسه با ویژگی‌های مبنایی خاک در برآورد منحنی نگاهداشت آب در خاک بررسی گردید.

مواد و روش‌ها: تعداد ۱۰۰ نمونه خاک، جمع‌آوری و منحنی‌های بازتاب طیفی آن‌ها در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکترورادایومتر زمینی اندازه‌گیری شد. برخی از ویژگی‌های مبنایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری و حقیقی، مقدار کربن آلی و کربنات کلسیم معادل به‌همراه مقادیر رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۱۰، -۳۳، -۵۰، -۱۰۰، -۳۰۰، -۵۰۰، -۱۰۰۰ و -۱۵۰۰ کیلو پاسکال با دستگاه صفحات و غشاء فشاری تعیین شد. منحنی بازتاب طیفی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار RS³ موجود بر روی رایانه قابل‌حمل متصل به دستگاه اسپکترورادایومتر، با تعداد ۵ قرائت برای هر نمونه خاک ثبت شد. پس از انجام پیش‌پردازش‌های طیفی، همبستگی بین مقادیر جذب در هر یک از طول موج‌های مورد مطالعه با مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف بررسی شد. سپس با استفاده از روش رگرسیونی خطی چندگانه گام‌به‌گام و بهره‌گیری از داده‌های مبنایی و طیفی خاک، روابط ریاضی به‌ترتیب تحت‌عنوان توابع انتقالی خاکی (PTFs) و طیفی (STFs) پی‌ریزی شد. به‌منظور ارزیابی دقت توابع

* مسئول مکاتبه: m.davari@uok.ac.ir

۱- RS³ به نسخه سوم برنامه ASD (ابزار تجزیه و تحلیل طیفی) اشاره داشته که هدف آن دریافت و ذخیره داده‌های طیفی گسیل شده از اسپکترورادایومتر ASD است.

پیشنهادی از آماره‌هایی هم‌چون ضریب تبیین تعدیل شده (R_{adj}^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و نسبت انحراف دقت (RPD) استفاده شد.

یافته‌ها: توابع انتقالی خاکی (PTFs) در انتهای خشک منحنی نگهداشت آب در خاک در مقایسه با انتهای مرطوب آن برآوردهای دقیق‌تری ارائه کردند. دلیل این موضوع را می‌توان وجود همبستگی بالای رطوبت خاک با توزیع اندازه ذرات خاک در انتهای خشک منحنی نگهداشت آب خاک بیان کرد. نتایج حاصل از ارزیابی آماره‌ها نشان داد که PTFs پی‌ریزی شده جهت برآورد نگهداشت آب در خاک در مکش‌های ۱۰ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال از دقت پیش‌بینی خوبی برخوردار بودند. این در حالی است که STFs در مقایسه با PTFs پیشنهادی در برآورد پارامترهای مورد مطالعه، دارای نتایجی معقول اما به نسبت ضعیف‌تر بودند.

نتیجه‌گیری کلی: در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد، به‌رغم نتایج نسبتاً کم‌دقت‌تر STFs نسبت به PTFs به‌دلیل صرف هزینه، زمان و داده‌برداری صحرائی کم‌تر، استفاده از داده‌های طیفی خاک می‌تواند به‌عنوان روشی غیرمستقیم و نوین برای برآورد مقادیر رطوبت حجمی خاک به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل ماتریک، داده‌های طیفی خاک، رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام، ویژگی‌های مبنایی خاک

مقدمه

ویژگی‌های دیرپافت خاک (هم‌چون منحنی نگهداشت آب در خاک و هدایت هیدرولیکی) با متغیرهای زودپافت خاک را نشان دهد (۲۴، ۳۳ و ۳۷). گام اول در اشتقاق توابع انتقالی خاک، ارائه روابطی تجربی میان ویژگی‌های پایه خاک و عواملی است که باید پیش‌بینی شود. این کار می‌تواند به‌وسیله روش‌های مختلف ریاضی هم‌چون رگرسیون‌های چندگانه خطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی محقق گردد (۱۱). از آن‌جا که بسط توابع انتقالی جدید نیاز به داده‌های زیادی دارد و چنین داده‌هایی به‌طور معمول در دسترس نیست، استفاده از توابع انتقالی توسعه یافته موجود راهکار مناسبی است؛ اگرچه توابع انتقالی نباید برای اهداف برون‌یابی استفاده شود. به‌عبارت دیگر توابع انتقالی باید برای خاک‌های مشابه با شرایط توسعه آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد و استفاده از آن‌ها برای ویژگی‌های هیدرولیکی مناطق دیگر باید با احتیاط جدی صورت پذیرد (۱).

منحنی نگهداشت آب در خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بوده که به‌عنوان پارامترهای ورودی مهم در بسیاری از مدل‌های بررسی رفتار و حرکت آب در خاک، انتقال املاح و آلاینده‌ها، انتقال گرما و جابجایی گازها در خاک نقشی کلیدی دارند. این در حالی است که اندازه‌گیری این ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به طریق مستقیم دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است (۱۹، ۲۰ و ۳۳). از این‌رو، مدل‌ها و روابطی تحت عنوان توابع انتقالی خاکی (PTFs) توسعه یافته‌اند که می‌توانند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با استفاده از داده‌های زودپافت خاک هم‌چون توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک و با کمک روابط ریاضی مناسب برآورد کنند. به‌عبارت دیگر واژه PTFs برای نشان دادن معادله‌هایی به‌کار می‌رود که وابستگی

(MIR-PLSR¹) استفاده کردند. این پژوهشگران مقدار ضریب تبیین اعتبارسنجی متقاطع (R^2_{cv}) را برای داده‌های برآورد شده رطوبت حجمی خاک بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۷ و خطای استاندارد را ۳/۲ تا ۴/۱ گزارش کردند. آن‌ها همچنین از یک مجموعه داده مستقل رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم برای ارزیابی مدل‌های پیشنهادی بهره گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که خطای استاندارد برای داده‌های ارزیابی بیش‌تر از داده‌های واسنجی بود. در مجموع آن‌ها بیان کردند که روش MIR-PLSR، به‌عنوان یک روش سریع و ارزان، هم‌چون برخی از توابع انتقالی پیشنهادی می‌تواند در برآورد رطوبت حجمی برخی از انواع خاک‌ها و در دامنه‌هایی از مکش ماتریک کارایی مناسبی داشته باشد (۱۴). در پژوهشی مشابه، میناسنی و همکاران (۲۰۰۸) نیز مقدار رطوبت خاک را در مکش‌های ۱، ۱۰، ۳۰۰، ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از همین روش MIR-PLSR برآورد کردند. بر اساس نتایج آن‌ها، برآورد مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ۱۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال از دقت بالاتری در مقایسه با دیگر مکش‌های مورد مطالعه برخوردار بود (۱۹). در ایران نیز بابائیان و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه گام به گام - بوت استرپ (SMLR³-Bootstrap) و بهره‌گیری از داده‌های طیفی خاک در گستره مرئی تا مادون قرمز نزدیک، منحنی‌های نگه‌داشت آب در خاک را پیش‌بینی کردند. بدین‌منظور، تعداد ۱۷۴ نمونه خاک از حوزه آبخیز زنجان رود جمع‌آوری و منحنی‌های بازتاب طیفی آن‌ها را در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکترومتر زمینی اندازه‌گیری کردند. در این

در چند دهه اخیر نیز، بهره‌گیری از روش‌های غیرمستقیم دورسنجی در بررسی ویژگی‌های خاک به‌دلیل صرف هزینه، زمان و نیاز به داده‌برداری صحرائی کم‌تر، به مقدار زیادی مورد توجه قرار گرفته است (۱۵، ۲۳ و ۲۷). یکی از این روش‌های دورسنجی که در علوم خاک به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، طیف‌سنجی خاک است. طیف‌سنجی عبارت از تهیه منحنی‌های انعکاس طیفی پدیده یا پدیده‌های موردنظر در محدوده طول‌موج‌هایی مشخص است (۲۷ و ۲۹). استفاده از این منحنی‌های انعکاس طیفی خاک در برآورد برخی از ویژگی‌های مبنایی و دیریافت خاک می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های آزمایشگاهی را برطرف کند، زیرا برخلاف روش‌های مرسوم اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه، داده‌های خاک در رویکرد طیفی با یک روش استاندارد و تنها در یک مرحله بدون نیاز به مواد شیمیایی گران‌قیمت و سمی تعیین می‌شود. بنابراین خطای ناشی از روش‌های مختلف اندازه‌گیری و شخص کاربر به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (۳، ۴، ۵ و ۲۷). تاکنون پژوهش‌های بسیاری راجع به برآورد ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی خاک با استفاده از انعکاس طیفی صورت گرفته و نتایجی مطلوب نیز حاصل شده است (۲، ۱۵، ۱۶، ۲۱، ۲۵، ۲۶، ۳۲ و ۳۶). این در حالی است که راجع به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های طیفی خاک پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. از این میان می‌توان به پژوهش جانیک و همکاران (۲۰۰۷) در استرالیا اشاره کرد که برای برآورد مقدار رطوبت حجمی ۹۶ نمونه مختلف خاک در مکش‌های ماتریک ۱ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی - محدود مادون قرمز میانی

1- Mid-infrared-partial least squares regression
2- Cross-validated coefficient of determination
3- Stepwise multiple linear regression

یافت خاک شامل توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری و حقیقی، مقدار کربن آلی و کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (۹). میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات نیز با استفاده از روابط ارائه شده توسط شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) محاسبه شدند (۲۸). مقادیر رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۱۰-، ۳۳-، ۵۰-، ۱۰۰-، ۳۰۰-، ۵۰۰-، ۱۰۰۰- و ۱۵۰۰- کیلو پاسکال با بهره‌گیری از دستگاه صفحات فشاری و غشاء فشاری تعیین شد (۹).

اندازه‌گیری ویژگی‌های طیفی خاک و پردازش‌های طیفی: بازتاب طیفی نمونه خاک‌های جمع‌آوری شده در دامنه مرئی و مادون‌قرمز نزدیک (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) با استفاده از دستگاه اسپکترورادایومتر زمینی (FieldSpec®3, ASD, FR, USA) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش برای تعیین انعکاس طیفی خاک از نمونه‌های هوا خشک عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متری استفاده شد. در واقع این موضوع بیانگر آن است که طیف‌های انعکاسی خاک در پتانسیل‌های ماتریک ذکر شده در بالا اندازه‌گیری نشدند. پژوهش‌های مختلف بیانگر آن است که اندازه‌گیری طیف‌های خاک بر روی نمونه‌های هوا خشک الک شده رویکردی عادی و استاندارد بوده که به‌کرات در قبل و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است (۲، ۴، ۷، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۱، ۲۵، ۲۶، ۳۲، ۳۵ و ۳۶). این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که رطوبت خاک، به‌ویژه در مقادیر زیاد، باندهای جذبی قوی در محدوده Vis-NIR داشته و بنابراین می‌تواند با ویژگی‌های جذبی دیگر مؤلفه‌های خاک تداخل ایجاد کند که این خود می‌تواند کارایی نتایج واسنجی را کاهش دهد. این در حالی است که در نمونه‌های هوا خشک به‌دلیل تغییر اندک مقدار آب پیوندی (آب هیگروسکوپیک) ناشی از تغییرات بافت خاک، اثرات

پژوهش سه سناریو توابع انتقالی طیفی^۱ (STFs)، توابع انتقالی خاکی (PTFs) و توابع انتقالی مرکب^۲ (SPTFs) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، STFs و SPTFs در برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش‌های کم تا متوسط دقت بالایی ($R^2 > 0.50$) داشتند. این در حالی است که توابع انتقالی نقطه‌ای در برآورد رطوبت‌های نزدیک اشباع نتایج مطلوب ارائه کردند (۳).

همان‌گونه که در قبل بیان شد راجع به استفاده از داده‌های طیفی خاک در برآورد نگره‌داشت آب در خاک پژوهش‌هایی اندک در ایران و حتی در مقیاس جهانی صورت گرفته است؛ بنابراین در این پژوهش تلاش شد امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در برآورد نگره‌داشت آب در خاک در برخی از خاک‌های استان کردستان ارزیابی شود. افزون بر این، اعتبار این توابع انتقالی طیفی در برآورد مقدار رطوبت خاک در مقایسه با توابع انتقالی خاکی نیز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک: در این پژوهش، به‌منظور برآورد منحنی نگره‌داشت آب در خاک، در مجموع ۱۰۰ نمونه خاک دست‌خورده از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری سطح خاک در منطقه مطالعاتی، که شامل بخشی از اراضی کشاورزی شهرستان‌های قروه - دهگلان واقع در استان کردستان بود، به‌صورت تصادفی جمع‌آوری گردید (شکل ۱- الف). نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. نمونه‌های هوا خشک به دو قسمت تقسیم گردید: بخش اول نمونه‌ها برای مطالعه‌های طیف‌سنجی و بخش دوم آن‌ها برای تجزیه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. ویژگی‌های زود

1- Spectral transfer functions

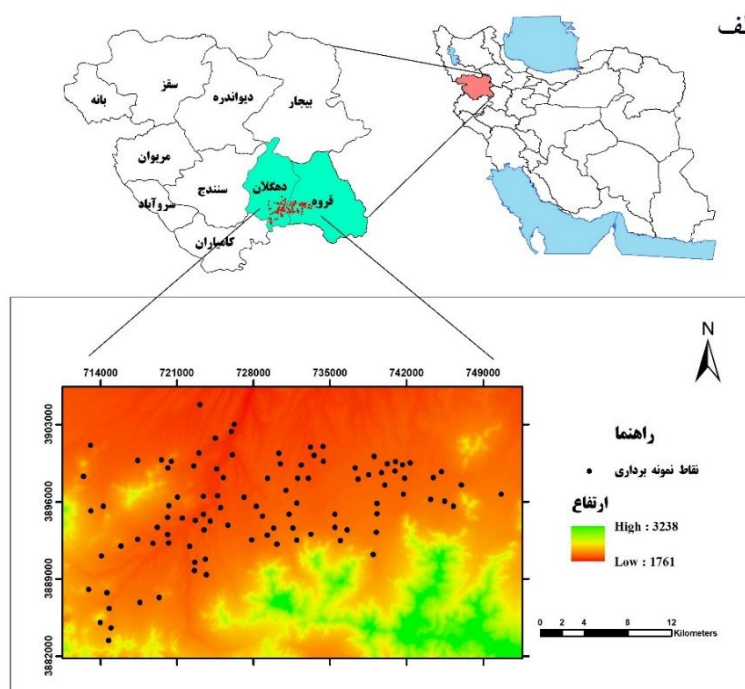
2- Spectral pedotransfer functions

آشفته‌گی‌ها در طیف‌های خاک (هم‌چون رفتار غیرخطی باندها، نرمال‌سازی طیف‌ها، فیلتر و بارزسازی طیفی) و بالا بردن کیفیت داده‌ها و به‌دست آوردن نتایج بهتر، روش‌های مختلف پیش‌پردازش با استفاده از نرم‌افزار ParLes v3.1 بر روی داده‌های طیفی انجام شد (۳۴). برای انجام پیش‌پردازش طیف‌ها، ابتدا دو بخش ابتدایی و انتهایی طیف‌ها (محدوده بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ و ۲۴۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به‌دلیل آشفته‌گی‌های زیاد طیفی از تمامی طیف‌ها حذف شده و در مدل‌سازی نیز مورد استفاده قرار نگرفت (۳۵). پس از ثبت طیف‌ها ابتدا از ۵ تکرار طیفی برای هر نمونه میانگین گرفته شد. سپس مقادیر انعکاس طیفی (R) با بهره‌گیری از رابطه $A = \text{Log}(1/R)$ به جذب (A) تبدیل شد. از انواع روش‌های پیش‌پردازش شامل فیلتر میانه، فیلتر ساویتزکی و گلائی^۱، نرمال‌سازی بر اساس میانگین، متغیر نرمال استاندارد^۲ (SNV)، تصحیح پخشیده چندگانه^۳ (MSC)، مشتق اول به‌همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی و مشتق دوم به‌همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی استفاده شد (۲۹، ۳۴ و ۳۵). بر اساس نتایج روش اعتبارسنجی متقابل و ارزیابی دقت نتایج حاصل، منحنی‌های جذب و فیلتر ساویتزکی و گلائی به‌صورت تابع چندجمله‌ای درجه اول، به‌عنوان مناسب‌ترین روش پیش‌پردازش داده‌های طیفی شناسایی شدند.

تداخلی این مقدار آب بر روی اندازه‌گیری‌های طیفی خاک قابل صرف‌نظر کردن است (۴). بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع، پژوهش حاضر در پی آن بود که بتواند از روی ویژگی‌های مؤثر طیفی شاخص‌هایی از خاک، که به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک تأثیر دارند، نگاه‌داشت آب در خاک را در مکش‌های ماتریک معین کمی کند. بدین‌منظور برای استخراج داده‌های طیفی، با واردکردن نمونه‌های هوا-خشک خاک الک شده به پتری‌دیش‌هایی به قطر ۱۰ سانتی‌متر، منحنی‌های طیفی آن‌ها در تاریک‌خانه با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (۲۹). اندازه‌گیری‌های طیفی به کمک پیستولی مجهز به لنز ۸ درجه با میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتی‌متر بر روی نمونه خاک‌ها انجام شد (شکل ۱-ب و ج). هم‌چنین، به‌منظور ثبت اندازه‌گیری‌ها به‌صورت مقدار بازتابش و حذف آشفته‌گی‌های طیفی (نویز)، به‌ازای قرائت از هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) در شرایطی کاملاً یکسان با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک انجام شد. منحنی بازتاب طیفی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار RS³ موجود بر روی رایانه قابل‌حمل متصل به دستگاه اسپکترورادیومتر، با تعداد ۵ قرائت برای هر نمونه خاک ثبت شد. با بهره‌گیری از نرم‌افزار ViewSpec Pro V6.0 یک میانگین به‌ازای تکرارهای مختلف برای هر نمونه خاک محاسبه و در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور ارتقاء و بارزسازی تفاوت موجود در طیف‌های خاک‌ها از منحنی حذف پیوستار استفاده شد که با استفاده از نرم‌افزار ENVI 4.8 به‌دست آمد. پیش‌پردازش داده‌های طیفی به‌منظور حذف عوامل خارجی و استفاده کارآمد از آن‌ها نقشی مؤثر در بهبود واسنجی دارد. بنابراین، به‌منظور حذف هرچه بیش‌تر

1- Savitzky - Golay
2- Standard normal variate
3- Multiplicative signal correction



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری (الف)، تصویری از وسایل اندازه گیری انعکاس طیفی خاک در تاریکخانه، دستگاه FieldSpec@3 و لوازم جانبی آن (ب) و نمونه خاک آماده شده در پتری دیش (ج).

Figure 1. Location of the study area and sampling points (a), an illustration of the soil spectral reflectance measuring device in the darkroom, FieldSpec@3 apparatus and its accessories (b) and, soil sample prepared in petridish (c).

میزان ارتباط بین مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج و هم چنین برخی ویژگی های مبنایی خاک با مقادیر رطوبت خاک به ازای مکش های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. از ۷۰٪ داده ها به صورت تصادفی برای واسنجی و اشتقاق توابع انتقالی و ۳۰٪ باقیمانده نیز به منظور آزمون توابع استفاده شد. در این پژوهش جهت اشتقاق توابع انتقالی برآوردی از روش رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR) در محیط نرم افزار SPSS ۲۶ استفاده شد. مقادیر رطوبت

تجزیه و تحلیل آماری داده ها، اشتقاق توابع انتقالی و شاخص های ارزیابی و دقت آزمایی آن ها: پیش از تجزیه و تحلیل داده ها، آماره های توصیفی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک محاسبه شد. سپس با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمرینف و بهره گیری از نرم افزار Minitab 17 نرمال بودن متغیرها در سطح معنی داری ۵ درصد ارزیابی شد. متغیرهایی که از توزیع نرمال پیروی نمی کردند، با تبدیل مناسب نرمال شدند. سپس با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون،

باشد دقت تخمین آن مدل به ترتیب عالی، قوی، متوسط، ضعیف و بدون هیچ گونه همبستگی تعریف می گردد (۱۲). شاخص RPD که اغلب در مطالعات طیف سنجی استفاده می شود نیز به سه گستره $1/4 <$ ، $2-1/4 >$ و $2 >$ که به ترتیب معرف برآورد ضعیف، قابل قبول و قوی می باشند، طبقه بندی شده است (۷ و ۱۴).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}}{X_{OBS}} \times 100 \quad (2)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-P-1} \quad (3)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (4)$$

که در آن ها، y_i و \hat{y}_i به ترتیب مقادیر مشاهده ای و برآوردی، \bar{y} و $\bar{\hat{y}}$ به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده ای و برآوردی، N تعداد مشاهدات، P تعداد متغیرهای ورودی به مدل و SD نیز بیانگر انحراف از معیار داده های مشاهده ای است. شایان ذکر است که در این پژوهش برای ارزیابی همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه و همچنین داده های طیفی خاک از ضریب همبستگی پیرسون^۷ (r) استفاده شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱، توصیف آماری برخی ویژگی های مبنایی خاک دو سری داده های واسنجی و اعتبارسنجی آورده شده است. نمونه خاک های مورد مطالعه شش کلاس بافتی رس، لوم رسی، رس سیلتی، لوم رس سیلتی، لوم و لوم رس شنی را در بر می گیرد. با توجه به نتایج، در منطقه مورد مطالعه فراوانی خاک های با

در پتانسیل های ماتریک مختلف به عنوان متغیرهای وابسته و داده های طیفی خاک و همچنین برخی داده های مبنایی خاک به عنوان متغیرهای مستقل مدل های خطی چندگانه در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی آزمون همراستایی بین متغیرهای مستقل از فاکتور عامل تورم واریانس^۱ (VIF) استفاده شد. اگر شاخص VIF برای متغیری بیش تر از مقدار بحرانی ۵ باشد، بدین معنی است که این متغیر با دیگر متغیرها دارای همبستگی بوده و از لیست متغیرهای ورودی به مدل باید حذف گردد. برای آزمون استقلال خطاها از یکدیگر نیز از آزمون دوربین- واتسون^۲ استفاده شد. چنانچه مقدار این آماره بین $1/5$ تا $2/5$ قرار گیرد، فرض وجود همبستگی بین خطاها رد شده و می توان از معادلات رگرسیونی بهره گرفت.

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از توابع انتقالی پیشنهادی، از آماره هایی همچون میانگین خطا^۳ (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۴ (NRMSE)، ضریب تبیین تعدیل شده^۵ (R_{adj}^2) و نسبت انحراف دقت^۶ (RPD) استفاده شد. ME مقدار کلی خطای نسبی و شدت کم و بیش برآوردی را نشان می دهد. حال آن که NRMSE هرچه کم تر باشد، نشان دهنده صحت بیش تر در برآورد متغیر است. لازم به ذکر است که NRMSE کم تر از 10 ، $20-10$ ، $30-20$ و بیش از 30 درصد به ترتیب نشان دهنده دقیق بودن، مناسب بودن، دقت متوسط و ضعیف بودن مدل های پیشنهادی است (۳، ۴ و ۳۳). با توجه به همیلتون (۱۹۹۰)، در صورتی که ضریب تبیین (R^2) یا ضریب تبیین تعدیل شده (R_{adj}^2) مدلی برابر 1 ، $1 <$ ، $0.66-0.76$ ، $0.25-0.66$ ، $0.25 <$ ، $0.04-0.25$ و $0.04 <$ -

- 1- Variance inflation factor
- 2- Dorbin-Watson
- 3- Mean error
- 4- Normalized root-mean-square error
- 5- Adjusted coefficient of determination
- 6- Ratio of performance deviation

7- Pearson correlation coefficient

مورد مطالعه نیز برابر ۱/۳۶ درصد اندازه‌گیری شد. به‌نظر می‌رسد این مقدار ماده آلی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر رفتار طیفی خاک‌ها نداشته باشد (۲۹ و ۳۵). یافته‌های موجود نشان می‌دهد وقتی ماده آلی خاک کم‌تر از ۲ درصد باشد، اثر آن بر روی بازتاب طیفی بسیار کم بوده و هرچه بر میزان ماده آلی خاک افزوده می‌شود، سبب خواهد شد که بازتابش کم‌تر از حالت معمولی گردد (۵ و ۲۳). مقدار کربنات کلسیم معادل، بازه‌ای گسترده از ۰/۱۲ تا ۶۰/۲۵ درصد را در بر گرفته که خود بیانگر ماهیت کربناتی بودن برخی از خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. توزیع و گستره ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بین محدوده انتخاب شده داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی انطباقی مناسب وجود دارد (جدول ۱)

بافت ریز و متوسط زیاد می‌باشد، زیرا که بافت‌های رس و لوم رسی، کلاس‌های بافتی غالب منطقه را تشکیل می‌دهند. با توجه به جدول ۱، مقدار میانگین هندسی قطر ذرات از ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۸۲ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی آن‌ها نیز از ۹/۳۱ تا ۲۰/۱۳ متغیر است. جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک‌های مورد مطالعه به‌ترتیب در دامنه‌ای از ۱/۹۱-۱/۲۹ و ۲/۵۰-۲/۸۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب بوده و میانگین آن‌ها نیز به‌ترتیب معادل ۱/۶۱ و ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب می‌باشد. بالا بودن جرم ویژه ظاهری خاک را شاید بتوان به روش اندازه‌گیری آن، که روش کلوخه بوده و دارای بیش‌برآوردی است، نسبت داد. هر چند تأثیر عملیات ممتد خاک‌ورزی بر افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک را نیز نمی‌توان نادیده گرفت (۹). مقدار متوسط ماده آلی خاک‌ها در منطقه

جدول ۱- توصیف آماری برخی ویژگی‌های مبنایی خاک در دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی.

Table 1. Statistical description of some soil basic properties in two calibration and validation datasets.

انحراف معیار Standard deviation	اعتبارسنجی Validation		میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	واسنجی Calibration		میانگین Mean	ویژگی‌ها Properties
	حداکثر Maximum	حداقل Minimum			حداکثر Maximum	حداقل Minimum		
9.32	58.49	19.50	35.74	8.00	51.78	20.00	35.79	رس Clay (%)
5.69	47.43	23.31	38.40	5.21	50.12	24.81	36.41	سیلت Silt (%)
11.78	51.86	4.03	25.85	10.49	51.39	9.47	27.78	شن Sand (%)
0.020	0.092	0.004	0.026	0.018	0.082	0.006	0.027	میانگین هندسی قطر ذرات d_g (mm)
2.61	19.09	6.78	13.57	2.39	20.13	9.31	14.60	انحراف معیار هندسی قطر ذرات σ_g
0.096	1.77	1.40	1.58	0.138	1.91	1.29	1.60	جرم ویژه ظاهری ρ_b (g/cm ³)
0.055	2.81	2.55	2.68	0.058	2.80	2.50	2.68	جرم ویژه حقیقی ρ_s (g/cm ³)
4.70	46.82	24.48	40.6	5.89	51.35	23.89	39.72	تخلخل Porosity (%)
0.46	2.16	0.25	1.42	0.47	2.34	0.44	1.36	ماده آلی OM (%)
17.05	59.75	0.13	26.44	17.87	60.25	0.12	25.41	کربنات کلسیم معادل CCE (%)

نشان داد که جرم ویژه ظاهری خاک تنها با مقدار رطوبت خاک در مکش ماتریک ۳۳ کیلوپاسکال همبستگی منفی و معنی‌داری دارد ($r = -0.843^{**}$). نتایج هم‌چنین بیانگر همبستگی مثبت و معنی‌داری رطوبت خاک در مکش‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال با کرنات کلسیم معادل است. این موضوع ممکن است به این دلیل باشد که کرنات‌ها به‌عنوان یک عامل سیمانی با دسته کردن ذرات کوچک‌تر به‌صورت ذراتی درشت‌تر، تخلخل ثانویه را افزایش داده که این خود می‌تواند به بهبود ساختمان خاک و به‌تبع آن نگه‌داشت رطوبت در خاک کمک کنند. شایان ذکر است که مقدار رطوبت در نقطه اشباع با هیچ‌یک از پارامترهای مبنایی خاک مورد مطالعه در این پژوهش همبستگی معنی‌داری نشان نداد. این نتایج با یافته‌های خداوردیلو و همکاران (۲۰۱۱) و بابائیان و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد (۱۷ و ۳).

ضریب همبستگی پیرسون (r) بین مقادیر رطوبت خاک به‌ازای مکش‌های مختلف با برخی ویژگی‌های مبنایی خاک: در جدول ۲، ضریب همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، بین مقادیر رس و سیلت خاک با مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. این در حالی است که بین مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف با مقدار شن، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات همبستگی معنی‌داری ولی منفی به‌دست آمد (جدول ۲). با توجه به نتایج، مقدار این همبستگی در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی خاک کم‌تر از انتهای خشک آن است، که دلیل آن وجود همبستگی بالای رطوبت خاک با توزیع اندازه ذرات خاک در انتهای خشک منحنی رطوبتی است (۴، ۱۰، ۱۳ و ۱۹). افزون بر این، نتایج

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و مقادیر رطوبت حجمی خاک به‌ازای مکش‌های ماتریک مختلف.

Table 2. Pearson's correlation coefficient between some basic soil properties and soil volumetric moisture contents retained at specific matric suctions.

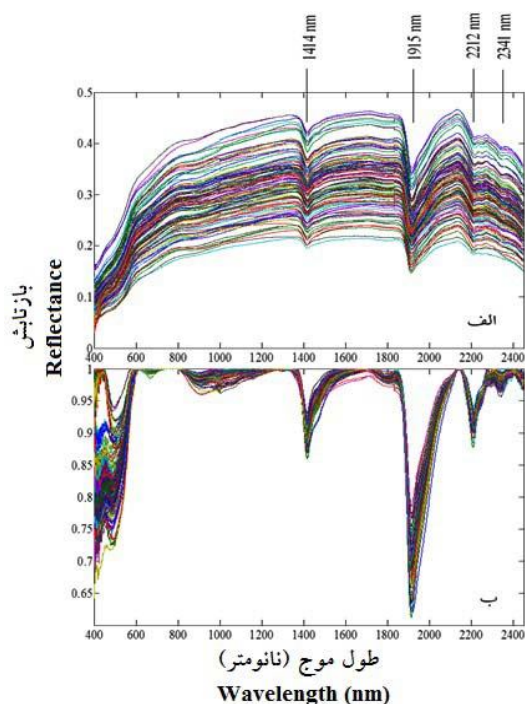
$\theta_{(1500 \text{ kPa})}$	$\theta_{(1000 \text{ kPa})}$	$\theta_{(500 \text{ kPa})}$	$\theta_{(300 \text{ kPa})}$	$\theta_{(100 \text{ kPa})}$	$\theta_{(50 \text{ kPa})}$	$\theta_{(33 \text{ kPa})}$	$\theta_{(10 \text{ kPa})}$	ویژگی‌ها Properties
0.821**	0.795**	0.790**	0.764**	0.777**	0.799**	0.751**	0.755**	رس Clay (%)
0.468**	0.478**	0.484**	0.510**	0.429**	0.406**	0.385**	0.170	سیلت Silt (%)
-0.865**	-0.850**	-0.850**	-0.842**	-0.812**	-0.818**	-0.770**	-0.666**	شن Sand (%)
-0.800**	-0.789**	-0.801**	-0.811**	-0.822**	-0.829**	-0.735**	-0.630**	میانگین هندسی قطر ذرات d_g (mm)
-0.720**	-0.713**	-0.699**	-0.672**	-0.583**	-0.576**	-0.607**	-0.503**	انحراف معیار هندسی قطر ذرات σ_g
0.121	0.157	0.184	0.245*	0.265**	0.254*	0.140	0.065	کرنات کلسیم معادل CCE (%)

θ : مقادیر رطوبت حجمی خاک به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک مختلف (سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب).

θ : Volumetric soil moisture content at specific matric suctions (cm^3/cm^3).

خام طیفی، الگوی معمول طیفی یک خاک را نشان می‌دهند که دارای یک برآمدگی در طول موج‌های بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و چهار مشخصه جذبی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۱ نانومتر می‌باشند (شکل ۲ الف). این مشخصه‌های طیفی در منحنی‌های حذف پیوستار (شکل ۲ ب) به‌طور مشخص‌تری مشهود است. یافته‌های موجود اثبات کرده‌اند که این مشخصه‌های جذبی مربوط به کشش و خمش OH آب هیگروسکوپیک یا آزاد (۱۴۱۴ و ۱۹۱۵ نانومتر)، پیوند گروه‌های عاملی OH با فلزات آلومینیوم، آهن، منیزیم و سیلیسیم موجود در شبکه کانی‌های رسی (۲۲۱۲ نانومتر) و گروه‌های CO₃ در خاک (۲۳۴۱ نانومتر) است (۸). بیشتر بودن عمق مشخصه جذبی در طول موج ۱۹۱۵ نانومتر بیانگر آن است که این طول موج حساسیت زیادی به وجود گروه‌های OH در شبکه کانی‌های رسی دارد (۲۹ و ۳۵).

تجزیه و تحلیل منحنی‌های بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه: در شکل ۲ میانگین منحنی‌های خام (الف) و حذف پیوستار (ب) بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد نمای کلی طیف‌ها در تمام خاک‌ها، با وجود اختلاف در شدت جذب و مقدار انعکاس، تقریباً مشابه می‌باشد، به‌گونه‌ای که ویژگی‌های جذبی آب و رس در همه این طیف‌ها قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۲ الف)، مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های زیر ۷۰۰ نانومتر (Vis) کم (دارای بیشینه ۰/۳۷) و در گستره مادون قرمز نزدیک (NIR)، زیاد (دارای بیشینه ۰/۴۷) می‌باشد. از سویی دیگر در طول موج‌های بین ۱۳۷۰ تا ۱۵۰۰، ۱۸۶۰ تا ۲۰۵۰ و ۲۲۰۰ تا ۲۳۳۰ نانومتر نیز مقادیر بازتاب طیفی خاک‌ها به شدت کاهش می‌یابد. این گستره طول موجی، همان طول موج‌های مشخصه‌های جذبی آب و رس‌ها می‌باشند. همان‌گونه که بیان شد منحنی‌های

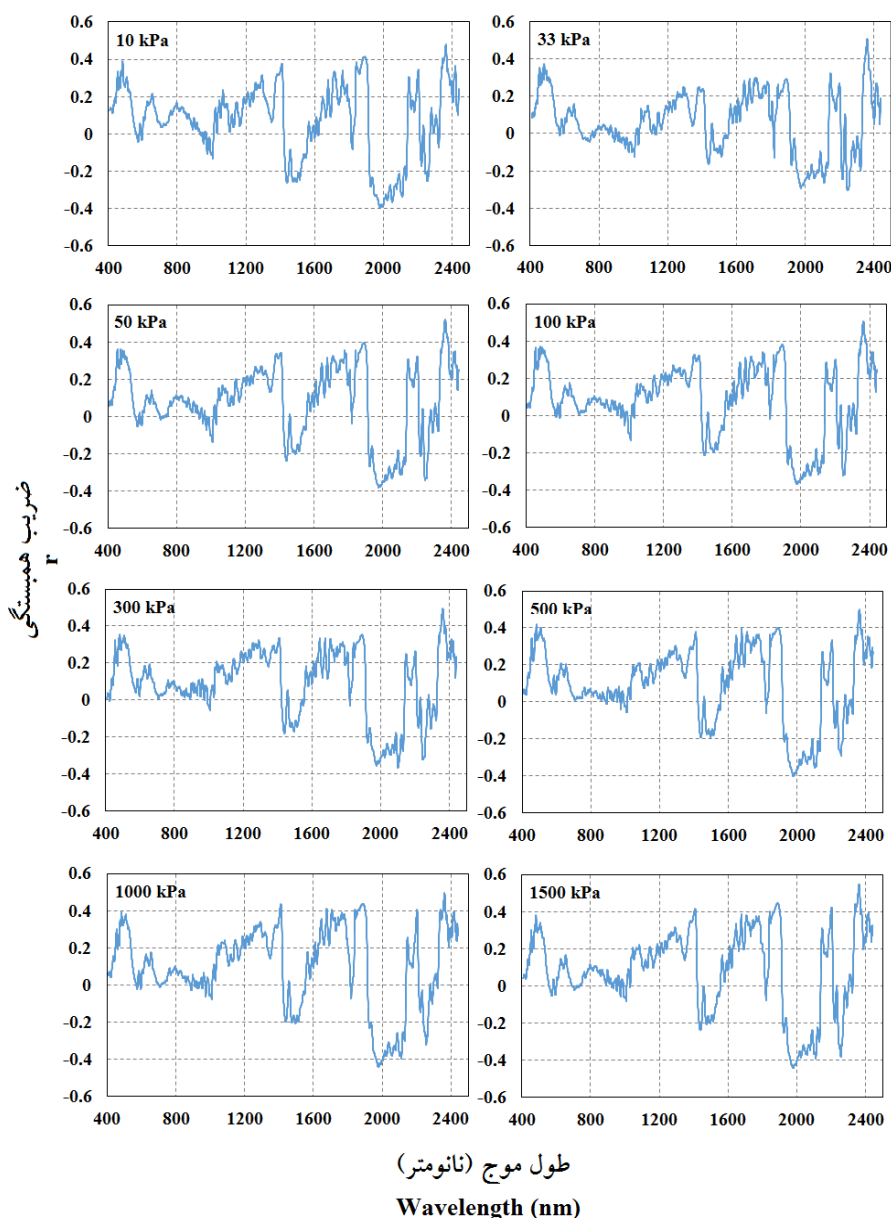


شکل ۲- میانگین منحنی‌های خام (الف) و حذف پیوستار (ب) بازتاب طیفی در خاک‌های مورد مطالعه (موقعیت مشخصه‌های جذبی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۱ نانومتر بر روی شکل مشخص شده است).

Figure 2. Mean of the raw (a) and continuum removed (b) spectral reflectance of the studied soils (absorption feature regions centered near 1414, 1915, 2212 and 2341 nm is shown on the figure).

مهم‌ترین متغیرها یا طول موج‌های مؤثر در برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش‌های مختلف را مشخص کرد. در شکل ۳ ضریب همبستگی پیرسون (r) بین مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف و مقادیر جذب طیفی در هر طول موج، از گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر، ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل و ارزیابی ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف با مقادیر جذب طیفی خاک: در این پژوهش از ضریب همبستگی پیرسون، r ، برای تعیین همبستگی بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با مقادیر انعکاس طیفی استفاده شد. با بهره‌گیری از این آماره می‌توان



شکل ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف.

Figure 3. Pearson's correlation coefficient between spectral reflectance values and soil moisture content retained at different suctions over Vis-NIR range.

وجود همبستگی معنی‌دار مقدار شن خاک با مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف اشاره شده است (۱۷، ۳۳ و ۳۷). یافته‌های حاصل از پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که بین نقاط مختلف رطوبتی خاک با مقادیر بازتاب طیفی، به دلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم بافت و ساختمان خاک، کانی‌های خاک و همچنین ماده آلی بر رفتار طیفی خاک، همبستگی‌های قوی و معنی‌داری وجود دارد (۲۹). بنابراین از آن‌جا که بین مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف با مقادیر جذب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف، همبستگی بالا و معنی‌داری دیده می‌شود؛ این احتمال وجود دارد که بتوان با بهره‌گیری از داده‌های طیفی خاک مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف را پیش‌بینی کرد.

توابع انتقالی خاک (PTFs)

اشتقاق توابع انتقالی نقطه‌ای و اعتبارسنجی آن‌ها: در جدول ۳ توابع انتقالی نقطه‌ای اشتقاق یافته (PTFs) برای برآورد مقادیر رطوبت حجمی خاک به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک مختلف با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک، به‌همراه آماره‌های ارزیابی ارائه شده است. با توجه به نتایج، مقدار رطوبت حجمی خاک در مکش‌های مختلف با دقتی نسبتاً بالا ($R^2_{adj cal} = 0.59-0.77$) برآورد شده‌اند. آماره NRMSE نیز به‌جز برای رطوبت حجمی خاک در مکش ماتریک ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، برای دیگر نقاط رطوبتی خاک کم‌تر از ۱۰ درصد محاسبه گردید. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در مکش ۱۰ کیلوپاسکال درصد رس و تخلخل کل و در مکش ۳۳ کیلوپاسکال میانگین هندسی قطر ذرات، کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک به‌عنوان مهم‌ترین متغیرها وارد شده‌اند. نگاه‌داشت رطوبت در مکش‌های کم تحت‌تأثیر ساختمان خاک یا به‌عبارتی خلل و فرج درشت خاک است. بنابراین، جرم ویژه ظاهری و تخلخل خاک که نمایان‌گر ساختمان خاک هستند در

با توجه به شکل ۳، بین نقاط مختلف رطوبتی خاک با مقادیر بازتاب طیفی در گستره مرئی - مادون قرمز نزدیک همبستگی‌های بالا و معنی‌داری وجود دارد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بالاترین مقدار ضریب همبستگی برآوردی برای مقادیر رطوبت در مکش‌های ماتریک ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۳۳ و ۱۰ کیلوپاسکال، برای طول موج‌هایی در گستره ۱۹۸۰-۱۹۷۵، ۲۱۰۱ و ۲۲۴۶ (دارای I از ۰/۳۱- تا ۰/۴۴-) و گستره ۲۳۶۱-۲۳۶۴ نانومتر (دارای I از ۰/۴۸ تا ۰/۵۵) به‌دست آمد. این نتایج بیانگر این موضوع است که طول‌موج‌های مؤثر در برآورد مقدار رطوبت خاک در مکش‌های مختلف در محدوده مادون قرمز نزدیک و غالباً بین ۲۱۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر قرار دارند. بابائیان و همکاران (۲۰۱۵) و میناسنی و همکاران (۲۰۰۸) نیز همبستگی بالایی بین مقدار بازتاب طیفی خاک در محدوده مرئی- مادون قرمز نزدیک و مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال گزارش کردند (۴ و ۱۹). لازم به ذکر است که الگوی همبستگی مقدار رطوبت خاک در مکش‌های مختلف، شبیه به الگوی همبستگی مقدار رس در طول موج‌های مختلف است. حال آن‌که این الگو با شن همبستگی منفی از خود نشان داد (داده‌های ضرایب همبستگی بین مقادیر رس و شن خاک با طول‌موج‌های مختلف در گستره طول‌موجی Vis-NIR ارائه نشده است). وجود روند مشابه با رس می‌تواند به‌دلیل انرژی بالای جذب سطحی ذرات رس به‌ویژه در بخش انتهای خشک منحنی نگاه‌داشت آب در خاک باشد که خود می‌تواند باعث افزایش گنجایش رطوبتی خاک شود. بالا بودن ضریب همبستگی بین جذب طیفی خاک و مقدار رطوبت در مکش‌های ماتریک ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال (به‌ترتیب با I معادل 0.55^{**} و 0.50^{**}) می‌تواند تأییدی بر این موضوع باشد. در منابع گوناگون نیز به

خاک است. همایی و فرخیان فیروزی (۲۰۰۸) مهم‌ترین پارامترهای ورودی جهت برآورد θ در مکش‌های مختلف را میانگین هندسی قطر ذرات و درصد گچ گزارش کرده‌اند (۱۳). قربانی دشتکی و همایی (۱۳۸۱) نیز افزون بر d_g و σ_g پارامتر Bd را به توابع پیشنهادی تخمین‌گر θ وارد کرده‌اند (۱۰). ارزیابی آماره ME نیز بیانگر آن است که همه توابع انتقالی نقطه‌ای اشتقاق یافته برای تخمین θ دارای اندکی بیش‌برآوردی می‌باشند (جدول ۳). شایان ذکر است که در این پژوهش برای برآورد رطوبت حجمی اشباع خاک هیچ تابع انتقالی پیشنهاد نشده است. عدم برآورد رطوبت حجمی در نقطه اشباع و دقت کم‌تر برآورد رطوبت در مکش‌های پایین را می‌توان تا حدودی به حذف اثر ساختمان خاک به دلیل عبور ذرات خاک از الک ۲ میلی‌متری نسبت داد. هرچند برخی از مطالعات دقت‌های نسبتاً بالاتری را به هنگام استفاده از PTFs در نقاط اشباع و نزدیک به آن نشان داده‌اند (۱۷ و ۳۰)؛ لیکن عواملی هم‌چون وسعت دامنه ویژگی‌های خاک، نوع روش اشتقاق، روش‌های اندازه‌گیری و عدم اطمینان موجود در بین داده‌ها می‌تواند بر نتایج اثرگذار باشد (۲۴ و ۳۳).

این مدل لحاظ شده است. کربن آلی خاک نیز با افزایش خاکدانه‌سازی و بهبود ساختمان خاک توزیع اندازه منافذ خاک را تغییر می‌دهد.

با توجه به نتایج، در مکش‌های ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال افزون بر میانگین هندسی قطر ذرات و کربن آلی خاک، کربنات کلسیم معادل نیز در تابع پیشنهادی وارد شده است. بهبود برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ماتریک ۵۰، ۱۰۰ و هم‌چنین ۳۰۰ کیلوپاسکال به دلیل لحاظ شدن کربنات کلسیم معادل در توابع پیشنهادی راه، شاید بتوان به تغییر توزیع اندازه منافذ خاک در اثر کربنات کلسیم‌های ثانویه نسبت داد. خداوردیلو و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که لحاظ کردن کربنات کلسیم معادل در توابع انتقالی پیشنهادی، تنها می‌تواند برآورد رطوبت را در مکش ماتریک ۱۰۰ کیلوپاسکال بهبود دهد (۱۷). نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد که در مکش‌های زیاد ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، تنها متغیر شن و با ضریب منفی در توابع اشتقاق یافته لحاظ شده است. با افزایش مقدار شن سطح ویژه خاک برای نگهداشت رطوبت کاهش می‌یابد. زیرا نگهداشت رطوبت در مکش‌های زیاد تحت‌تأثیر بافت

جدول ۳- توابع انتقالی نقطه‌ای اشتقاق یافته به‌منظور برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ماتریک مختلف (اعداد داخل پرانتز آماره‌های حاصل از اعتبارسنجی توابع انتقالی نقطه‌ای پیشنهادی می‌باشد (N=۳۰)).

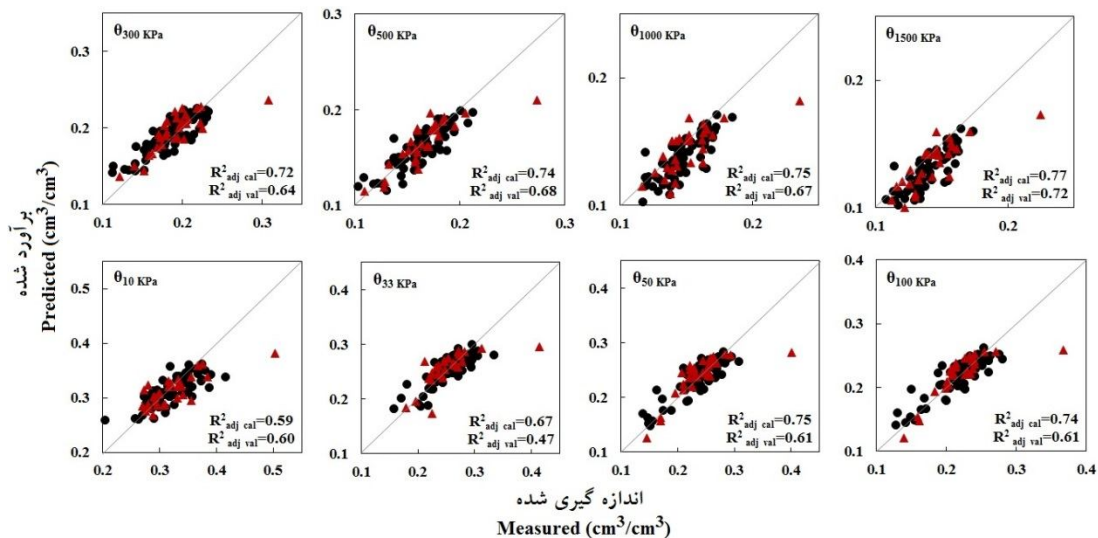
Table 3. Derived point pedotransfer functions, PTFs, for estimating soil volumetric moisture content at different matric suctions (Numbers in parentheses are the statistics obtained from validation of proposed point pedotransfer functions (N = 30)).

PTFs	R^2_{adj}	NRMSE	ME
$\theta_{10 \text{ kPa}} = 0.157 + 0.003 C + 0.118 f$	0.59 (0.60)	7.74 (9.88)	0.0006 (0.001)
$\theta_{33 \text{ kPa}} = 0.324 - 1.321 d_g + 0.016 OC - 0.034 Bd$	0.67 (0.47)	6.95 (11.36)	0.0003 (0.0008)
$\theta_{50 \text{ kPa}} = 0.257 - 1.626 d_g + 0.013 OC + 0.000309 CCE$	0.75 (0.61)	7.51 (11.31)	0.0003 (0.0007)
$\theta_{100 \text{ kPa}} = 0.235 - 1.422 d_g + 0.012 OC + 0.000297 CCE$	0.74 (0.61)	7.39 (10.72)	0.0002 (0.0006)
$\theta_{300 \text{ kPa}} = 0.239 - 0.002 S + 0.000287 CCE$	0.72 (0.64)	8.44 (10.37)	0.0002 (0.0004)
$\theta_{500 \text{ kPa}} = 0.218 - 0.002 S$	0.74 (0.68)	7.23 (9.39)	0.0001 (0.0003)
$\theta_{1000 \text{ kPa}} = 0.19 - 0.002 S$	0.75 (0.67)	0.22 (11.45)	0.0002 (0.0003)
$\theta_{1500 \text{ kPa}} = 0.181 - 0.002 S$	0.77 (0.72)	11.30 (11.77)	0.0002 (0.0003)

θ : مقدار رطوبت حجمی خاک به‌ازای مکش‌های ماتریک مختلف اعمال شده، d_g : میانگین هندسی قطر ذرات (mm)، f: تخلخل کل (cm^3/cm^3)، Bd : جرم ویژه ظاهری (g/cm^3)، CCE: کربنات کلسیم معادل خاک (%). C، S و OC نیز به‌ترتیب درصد رس، شن و کربن آلی خاک است. θ : Volumetric soil moisture content at specific matric suctions (cm^3/cm^3); d_g : geometric mean diameter of soil particles (mm); f: porosity (cm^3/cm^3); BD: bulk density (g/cm^3); CCE: calcium carbonate equivalent (%); C, S and OC are clay, sand and organic carbon content (%), respectively.

که هم‌چون مرحله مدل‌سازی، توابع اشتقاق یافته برای پیش‌بینی تمامی پارامترهای ذکر شده در مرحله اعتبارسنجی نیز دارای حالت بیش‌برآوردی می‌باشند. در شکل ۴، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی توابع انتقالی نقطه‌ای اشتقاق یافته در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است. نتایج حاصل از این شکل و آماره‌های ارائه شده در جدول ۳ برای هر دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر آن است که توابع نقطه‌ای اشتقاق یافته در برآورد مقدار رطوبت حجمی در مکش‌های ۱۰ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) دارای دقت برآورد متوسط و خوبی می‌باشند (مقدار آماره R^2_{adj} در دامنه‌ای از ۰/۴۹ تا ۰/۷۷ برای توابع نقطه‌ای به‌دست آمده است).

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳، دقت برآورد نسبتاً بالایی از رطوبت حجمی خاک به‌زای مکش‌های ماتریک ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آمد ($R^2_{adj\ val}$) از ۰/۶۴ تا ۰/۷۲ و آماره NRMSE از ۹/۳۹ تا ۱۱/۷۷ درصد). شایان ذکر است که توابع پیشنهادی برای برآورد $\theta_{10\ kPa}$ ، $\theta_{33\ kPa}$ ، $\theta_{50\ kPa}$ و $\theta_{100\ kPa}$ نیز از دقت پیش‌بینی متوسطی در مرحله اعتبارسنجی مدل برخوردار بودند ($R^2_{adj\ val}$) از ۰/۴۷ تا ۰/۶۱ و آماره NRMSE از ۹/۸۸ تا ۱۱/۳۶ درصد). در مرحله اعتبارسنجی آماره NRMSE برای تمام نقاط رطوبتی خاک کم‌تر از ۱۲ درصد محاسبه گردید. مقادیر آماره میانگین خطا (ME) در جدول ۳ نیز بیانگر این است



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت حجمی خاک (θ) در مکش‌های مختلف (۱۰ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) توسط توابع انتقالی نقطه‌ای برای مجموعه داده‌های واسنجی (●) و اعتبارسنجی (▲).

Figure 4. Measured and estimated volumetric soil moisture content (θ) at different matric suctions (10 to 1500 kPa) using point pedo-transfer functions for calibration (●) and validation (▲) dataset.

دقت قابل قبول تر برآوردها در مکش های بالا می تواند به دلیل همبستگی معنی دار و بیش تر رطوبت خاک در این مکش ها با مقادیر رس و شن باشد، که رس و شن نیز خود همبستگی معنی دار و بالایی را با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج های مختلف نشان داده اند (داده ها ارائه نشده است). از سوی دیگر، دقت پایین این توابع انتقالی طیفی پیشنهادی در انتهای مرطوب منحنی نگهداشت آب خاک را می توان به حساسیت پایین گستره مرئی و مادون قرمز به ساختمان خاک ارتباط داد، که نمی تواند این ویژگی خاک را که اثر قابل توجهی بر نگه داشت آب در خاک در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی دارد، به خوبی برآورد کند. پژوهش ها نشان داده اند آن دسته از ویژگی های خاک که مرتبط با منافذ خاک می باشند (هم چون جرم ویژه ظاهری و رطوبت اشباع) برخلاف ویژگی هایی که بخش جامد خاک را تشکیل می دهند، نمی توانند با دقت زیادی برآورد شوند (۶، ۱۹ و ۲۲). افزون بر این، نتایج حاصل هم چنین نشان داد در مکش های کم بین رطوبت خاک با ویژگی های مبنایی خاک هم چون مقدار رس، شن و میانگین هندسی قطر ذرات همبستگی کم تری وجود دارد. حال آن که این ویژگی های مبنایی خاک خود با دقت بالایی توسط داده های طیفی برآورد می شوند (نتایج ارائه نشده است). نتایج هم چنین نشان داد که طول موج های مؤثر برای برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش های مختلف، در ناحیه مرئی در گستره ۴۹۷ تا ۵۰۷ نانومتر و در ناحیه مادون قرمز در گستره های ۱۳۱۲-۱۲۷۲، ۱۴۱۷، ۱۶۷۷-۱۶۴۷ و ۲۴۰۲-۲۲۵۲ نانومتر بود.

توابع انتقالی طیفی (STFs)

اشتقاق توابع انتقالی طیفی نقطه ای: در جدول ۴ توابع انتقالی طیفی نقطه ای اشتقاق یافته به منظور برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک به ازای پتانسیل های ماتریک اعمال شده با استفاده از داده های طیفی خاک در طول موج های مؤثر، ارائه شده است. همان طور که در جدول ۴ دیده می شود توابع انتقالی طیفی نقطه ای اشتقاق یافته در برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک از دقت پیش بینی قابل قبولی برخوردار هستند. آماره های ارزیابی توابع پیشنهادی بیانگر این موضوع است که مقدار رطوبت خاک در انتهای خشک (مکش های زیاد) در مقایسه با مکش های کم و متوسط، با دقت بیشتری برآورد شده است (R^2_{adj} از ۰/۴۳ تا ۰/۶۵ و RPD از ۱/۳۸ تا ۱/۷۴).

افزایش مقادیر این آماره ها از انتهای مرطوب منحنی رطوبتی به سمت انتهای خشک آن منطبق با یافته های جانپک و همکاران (۲۰۰۷)، میناسنی و همکاران (۲۰۰۸) و بابائیان و همکاران (۲۰۱۵) است. این پژوهشگران با استفاده از داده های طیفی مادون قرمز دور ۲۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰ نانومتر نشان دادند دقت برآوردها از انتهای خشک (مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) به سمت انتهای مرطوب (مکش ۱۰ کیلو پاسکال) کاهش می یابد (۱۴ و ۱۹). در این زمینه بابائیان و همکاران (۲۰۱۵) نیز نتایجی مشابه گزارش کرده اند (۳). ترانتر و همکاران (۲۰۰۸) نیز با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز دور (۲۵۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر) نشان دادند که دقت برآوردها در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی خاک بسیار کم تر از انتهای خشک آن است. این پژوهشگران دلیل آن را همبستگی بالای رطوبت خاک با توزیع اندازه ذرات خاک در انتهای خشک منحنی رطوبتی عنوان کردند (۳۱).

جدول ۴- توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای اشتقاق یافته به منظور برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ماتریک مختلف (اعداد داخل پرانتز آماره‌های حاصل از صحت‌سنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای پیشنهادی می‌باشد (N=۳۰)).

Table 4. Derived point spectral transfer functions, STFs, to estimate soil volumetric moisture content at different matric suctions (Numbers in parentheses are the statistics obtained from validation of proposed point spectral transfer functions (N = 30)).

STFs	R^2_{adj}	RPD	NRMSE	ME
$\theta_{10 \text{ kPa}} = 0.385 + 184.244A_{1272} - 147.363A_{1312} + 46.744A_{2362} + 2.202A_{502}$	0.43 (0.33)	1.38 (1.29)	8.32 (11.27)	0.0007 (0.0013)
$\theta_{33 \text{ kPa}} = 0.347 + 31.199A_{2352} + 16.343A_{497} + 100.722A_{1672}$	0.49 (0.15)	1.44 (1.16)	8.70 (13.90)	0.0004 (0.0012)
$\theta_{50 \text{ kPa}} = 0.328 + 42.941A_{2372} + 17.562A_{502} + 116.659A_{1677}$	0.55 (0.48)	1.53 (1.40)	10.16 (13.49)	0.0006 (0.0010)
$\theta_{100 \text{ kPa}} = 0.28 + 38.191A_{2397} + 17.917A_{497} + 91.98A_{1672}$	0.51 (0.21)	1.47 (1.21)	10.16 (14.77)	0.0005 (0.0011)
$\theta_{300 \text{ kPa}} = 0.242 + 40.769A_{2397} + 15.055A_{497} + 80.747A_{1647} - 20.64A_{2287}$	0.55 (0.34)	1.55 (1.31)	9.92 (13.23)	0.0003 (0.0006)
$\theta_{500 \text{ kPa}} = 0.205 + 29.583A_{2402} + 13.221A_{497} + 91.357A_{1657}$	0.63 (0.17)	1.69 (1.17)	8.36 (14.65)	0.0002 (0.0005)
$\theta_{1000 \text{ kPa}} = 0.202 + 11.64A_{497} + 33.872A_{1417} - 25.213A_{2252}$	0.58 (0.30)	1.58 (1.26)	0.18 (13.29)	0.0002 (0.0004)
$\theta_{1500 \text{ kPa}} = 0.184 + 24.719A_{2357} + 8.689A_{507} + 77.874A_{1667}$	0.65 (0.47)	1.74 (1.40)	7.86 (12.09)	0.0001 (0.0003)

θ : مقدار رطوبت حجمی خاک به‌ازای مکش‌های ماتریک مختلف اعمال شده، A_w : درصد جذب طیفی به‌ازای طول موج W (نانومتر).

θ : Volumetric soil moisture content at specific matric suctions (cm^3/cm^3); A_w : spectral absorbance [%] in wavelength w in nm.

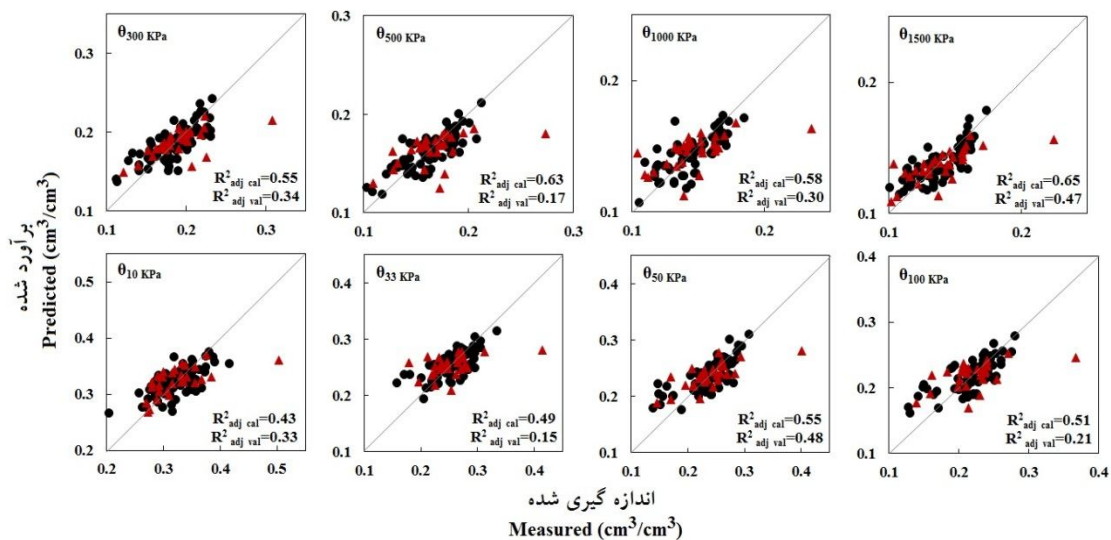
به‌دست آمد. با توجه به آماره NRMSE نیز، همه توابع پیشنهادی دارای دقت پیش‌بینی مناسبی هستند (دامنه تغییرات NRMSE از ۱۱/۲۷ تا ۱۴/۷۷ درصد). لازم به ذکر است که آماره ME در سری داده‌های اعتبارسنجی ارائه‌شده در جدول ۴ بیانگر بیش‌برآوردی همه توابع پیشنهادی در پیش‌بینی مقدار رطوبت حجمی خاک به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک اعمال شده است.

مقایسه آماره‌های ارزیابی در دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی (جدول ۴) نشان می‌دهد که وضعیت این آماره‌ها در سری داده‌های اعتبارسنجی اندکی از سری داده‌های واسنجی بهتر است. این موضوع می‌تواند به این علت باشد اگرچه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی مربوط به یک منطقه هستند، لیکن چنین وضعیتی معمول بوده و عمدتاً به‌دلیل انتخاب نمونه‌های مستقل طی فرایند اعتبارسنجی نتایج است (۳، ۲۹ و ۳۶).

اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای: در جدول ۴ هم‌چنین نتایج اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پیشنهادی در برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک اعمال شده برای سری داده‌های آزمون ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از آماره R^2_{adj} ، دقت برآوردهایی متوسط از رطوبت حجمی خاک به‌ازای مکش‌های ماتریک ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰، ۵۰ و ۱۰ کیلوپاسکال به‌دست آمد (با R^2_{adj} از ۰/۳۰ تا ۰/۴۸). شایان ذکر است که مقادیر برآورد شده در مکش‌های ۳۳، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال از دقت پایینی برخوردار بودند. تغییر آماره R^2_{adj} از ۰/۲۱- ۰/۱۵ در این مکش‌های ذکر شده بیان‌گر دقت کم‌تر توابع انتقالی طیفی و به‌عبارتی خطای بیش‌تر آن‌ها در پیش‌بینی این پارامترهای مورد مطالعه است (۱۲). براساس آماره RPD بهترین برآوردهای STFs پیشنهادی در مکش‌های ۵۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال ($RPD = 1/40$) و ضعیف‌ترین آن‌ها در مکش ۳۳ کیلوپاسکال ($RPD = 1/16$)

مورد مطالعه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها ارائه شده است نیز تأییدی بر این موضوع است. این نتایج با یافته‌های بابائیان و همکاران (۲۰۱۳) و (۲۰۱۵)، جانیک و همکاران (۲۰۰۷) و هم‌چنین میناسنی و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد (۳، ۴، ۱۴ و ۱۸). به‌عنوان مثال، بابائیان و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهش خود بیان کردند که توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای تنها در برآورد θ_{1500} ، θ_{1000} ، θ_{500} و θ_{300} از دقت پیش‌بینی متوسط تا خوبی برخوردار هستند (۴).

در مجموع با ارزیابی آماره‌های به‌دست آمده برای هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی (جدول ۴)، می‌توان این‌گونه بیان کرد که توابع انتقالی طیفی پیشنهادی، در برآورد رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ماتریک ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال دارای دقتی متوسط و در برآورد مقادیر برآورد شده رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ۱۰ و ۳۳ کیلوپاسکال از دقتی ضعیف برخوردار می‌باشند. شکل ۵ که مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در برآورد متغیرهای



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت حجمی خاک (θ) در مکش‌های ماتریک مختلف (۱۰ تا ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) توسط توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای برای مجموعه داده‌های واسنجی (●) و اعتبارسنجی (▲).

Figure 5. Measured and estimated volumetric soil moisture content (θ) at different matric suctions (10 to 1500 kPa) using point spectral transfer functions for calibration (●) and validation (▲) dataset.

گام‌به‌گام (SMLR) توابعی تحت عنوان توابع انتقالی خاکی (PTFs) و توابع انتقالی طیفی (STFs) برای برآورد این پارامترها پی‌ریزی گردید. با توجه به نتایج به‌دست آمده، توابع انتقالی خاکی (PTFs) در مقایسه با توابع انتقالی طیفی (STFs) در برآورد مقدار رطوبت خاک در تمامی مکش‌های ماتریک مورد مطالعه از دقت نسبتاً بالاتری برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در گستره مرئی- مادون‌قرمز نزدیک (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) و هم‌چنین ویژگی‌های مبنایی خاک، جهت برآورد نگاه‌داشت آب در خاک در مکش‌های ماتریک ۱۰ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال بررسی شد. بدین‌منظور با استفاده از روش رگرسیون چندگانه

گچی که آثار متفاوت بر رفتار طیفی خاک دارند)، ضروری است این توابع انتقالی با استفاده از اطلاعات موجود در سایر کتابخانه‌های طیفی و در دیگر مناطق کشور مورد ارزیابی و آزمون قرار گیرند. شایان ذکر است که در صورت توسعه طیف‌سنجی زمینی از طریق تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های طیفی پتانسیل استفاده در مقیاس‌های بزرگ را نیز داشته و می‌تواند امکان کمی‌کردن تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و همچنین دیگر ویژگی‌های مبنایی خاک را فراهم کنند. به‌رغم این‌که داده‌های ماهواره‌ای محدود به سطح خاک هستند، ولی در اراضی زراعی به‌دلیل همگن شدن لایه سطحی خاک در اثر عملیات خاک‌ورزی، می‌تواند گزینه‌ای کارآمد باشد. افزون بر این هم‌چنین پیشنهاد می‌شود امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در برآورد نگاهداشت رطوبت در خاک با بهره‌گیری از دیگر روش‌های داده‌کاوی هم‌چون رگرسیون حداقل مربعات جزئی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون مؤلفه‌های اصلی، الگوریتم ژنتیک، رگرسیون درختی و یا جنگل تصادفی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج نشان دادند که توابع انتقالی طیفی (STFs) پیشنهادی، مقدار رطوبت خاک را در انتهای خشک منحنی نگاهداشت آب در خاک با دقت بیشتری در مقایسه با انتهای مرطوب آن برآورد می‌کنند. این بدین معنی است که دقت توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای بستگی به ظرفیت نگاهداشت آب در خاک در یک مکش ماتریک معین دارد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد در صورت عدم دسترسی به PTFها، می‌توان از STFs جهت دستیابی به برآوردهایی کلی از مقادیر رطوبت حجمی خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف استفاده کرد. هرچند به‌نظر می‌رسد با توسعه پایگاه‌های اطلاعاتی خاکی و هم‌چنین ایجاد کتابخانه‌های طیفی می‌توان دقت تخمین این توابع انتقالی طیفی را افزایش داده و علاوه بر این بسیاری از محدودیت‌های توابع انتقالی خاکی را نیز برطرف کرد. ولی باید در نظر داشت که به‌دلیل ماهیت تجربی توابع انتقالی طیفی و هم‌چنین توابع انتقالی خاکی و تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی‌های خاکی در مناطق مختلف (هم‌چون خاک‌های شور، خاک‌های آلی، خاک‌های آهکی و

منابع

1. Acutis, M., and Donatelli, M. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and function. *European Journal of Agronomy*. 18: 373-377.
2. Askari, M.S., Cui, J., O'Rourke, S.M., and Holden, N.M. 2015. Evaluation of soil structural quality using VIS-NIR spectra. *Soil and Tillage Research*. 146: 108-117.
3. Babaeian, E., Homaei, M., Montzka, C., Vereecken, H., and Norouzi, A.A. 2015. Towards retrieving soil hydraulic properties by hyperspectral remote sensing. *Vadose Zone Journal*. 14: 3. 1-17.
4. Babaeian, E., Homaei, M., and Norouzi, A.A. 2013. Deriving and validating point spectrotransfer functions in VIS-NIR-SWIR range to estimate soil water retention. *Gorgan, Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 2: 3. 27-41. (In Persian)
5. Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Biehl, L.L., and Stoner, E.R. 1985. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*. 38: 1-44.
6. Cecillon, L.C., Barthesb, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, A., and Brun, J. 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Science*. 60: 770-784.

7. Chang, C.W., and Laird, D.A. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. *Soil Science*. 167: 2. 110-116.
8. Clark, R.N., King, T.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., and Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 95: B8. 12653-12680.
9. Dane, J.H., and Topp, C.G. 2002. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI. 1692p.
10. Ghorbani Dashtaki, Sh., Homae, M., and Khodaberdiloo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*. 26: 68-74.
11. Hagh Verdi, A., Ghahreman, B., Jalini, M., Khoshnood yazdi, A.A., and Arabi, Z. 2010. Modeling water retention curve of some Iranian soils using pseudo parametric neural network pedotransfer functions. *Kerman, Journal of Irrigation and Water Engineering*. 1: 1. 69-82. (In Persian)
12. Hamilton, L.C. 1990. *Modern data analysis. A first course in applied statistics*. Brooks/Cole Publishing Co. Pacific Grove, CA, USA. 684p.
13. Homae, M., and Farrokhan Firouzi, A.F. 2008. Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. *Soil Research*. 46: 3. 219-227.
14. Janik, L.J., Merry, R.H., Forrester, S.T., Lanyon, D.M., and Rawson, A. 2007. Rapid prediction of soil water retention using mid infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*. 71: 2. 507-514.
15. Karimi, S.A., Davari, M., Bahrami, H.A., Babaeian, E., and Hossaini, S.M.T. 2017. Predicting some soil properties using VIS-NIR spectroscopy in the Kurdistan province. *Tehran, Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48: 573-585. (In Persian)
16. Khayamim, F., Wetterlind, J., Khademi, H., Jean Robertson, A.H., Cano, A.F., and Stenberg, B. 2015. Using Visible and near Infrared Spectroscopy to Estimate Carbonates and Gypsum in Soils in Arid and Subhumid Regions of Isfahan, Iran. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 23: 155-165.
17. Khodaverdiloo, H., Homae, M., van Genuchten, M.T., and Dashtaki, S.G. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*. 399: 1-2. 93-99.
18. Lobell, D.B., and Asner, G.P. 2002. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*. 66: 722-727.
19. Minasny, B., McBratney, A., Tranter, G., and Murphy, B. 2008. Using soil knowledge for the evaluation of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for predicting soil physical and mechanical properties. *European Journal of Soil Science*. 59: 960-971.
20. Moazenzadeh, R., Ghahraman, B., Fathalian, F., and Khoshnood Yazdi, A.A. 2009. Effect of type and number of input variables on moisture retention curve and saturated hydraulic conductivity prediction. *Mashhad, Journal of Water and Soil*. 23: 3. 57-70. (In Persian)
21. Mousavi, F., Abdi, E., Ghalandarzadeh, A., Bahrami, H.A., Majnounian, B., and Ziadi, N. 2020. Diffuse reflectance spectroscopy for rapid estimation of soil Atterberg limits. *Geoderma*. 361. 114083.
22. Mutuo, P.K., Shepherd, K.D., Albrecht, A., and Cadisch, G. 2006. Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*. 38: 1658-1664.
23. Nanni, M.R., and Demattê, J.A.M. 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 2. 393-407.
24. Nemes, A., Schaap, M.G., and Wösten, J.H.M. 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 4. 1093-1102.

25. Nocita, M., Stevens, A., Noon, C., and van Wesemael, B. 2013. Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*. 199: 37-42.
26. Pinheiro, É.F., Ceddia, M., Clingensmith, C., Grunwald, S., and Vasques, G. 2017. Prediction of Soil Physical and Chemical Properties by Visible and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy in the Central Amazon. *Remote Sensing*. 9: 293.
27. Schneider, W.E., and Young, R. 1997. Spectroradiometry methods. P239-288, In: Casimer De Cusatis (ed). *Handbook of Applied Photometry*. Woodbury, New York.
28. Shirazi, M.A., and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 142-147.
29. Stenberg, B. 2010. Effects of soil sample pretreatments and standardised rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. *Geoderma*. 158: 15-22.
30. Tomasella, J., Pachepsky, Y.A., Crestana, S., and Rawls, W.J. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer function for water retention. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 1085-1092.
31. Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B. Rossel, R.A., and Murphy, B.W. 2008. Comparing spectral soil inference systems and mid-infrared spectroscopic predictions of soil moisture retention. *Soil Science Society of America Journal*. 72: 5. 1394-1400.
32. Tümsavaş, Z., Tekin, Y., Ulusoy, Y., and Mouazen, A.M. 2019. Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. *Biosystem Engineering*. 177: 90-100.
33. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., and Genuchten, M.T. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*. 9: 4. 795-820.
34. Viscarra Rossel, R.A. 2008. ParLeS software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 90: 1. 72-83.
35. Viscarra Rossel, R.A., McGlynn, R., and McBratney, A. 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*. 137: 70-82.
36. Volkan Bilgili, A., van Es, H.M., Akbas, F., Durak, A., and Hively, W.D. 2010. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. *Journal of Arid Environments*. 74: 229-238.
37. Wosten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer function: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*. 251: 123-150.



Developing and comparing pedotransfer functions and spectral transfer functions for predicting water retention in some soils of Kurdistan province

S.V. Hosseini¹, *M. Davari² and N. Khaleghpanah²

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan,

²Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan

Received: 03.31.2020; Accepted: 09.01.2020

Abstract

Background and Objectives: The soil water retention curve (SWRC), as an important hydraulic soil property, is used in modeling water flow and solute transport in the unsaturated zone of the soil. Direct measurements of SWRC are difficult, time-consuming and costly. Hence, researchers have proposed indirect methods such as pedotransfer functions to estimate soil water retention curve using readily available soil data. Over the last decades, soil spectral data as a rapid, low cost, and non-destructive method has been widely applied to estimate basic soil properties. Consequently, in this study, the feasibility of using soil spectral information in the visible and near-infrared region, as input variables for transfer functions, and evaluation its performance was investigated compared to basic soil properties in estimating soil water retention curve.

Materials and Methods: A number of 100 soil samples were collected and their spectral reflectance over 350-2500 nm region were measured using a handheld spectroradiometer apparatus. Some basic soil properties such as particle size distribution, particle density, bulk density, organic carbon content and calcium carbonate equivalent, and soil moisture content at matric potentials of -10, -33, -50, -100, -300, -500, -1000, and -1500 kPa were also determined with pressure plate - membrane apparatus. Spectral reflectance curves of the samples were recorded using RS³ software on a portable computer connected to a spectroradiometer with 5 readings per soil sample. After spectral preprocessing, the correlation coefficient between absorption features of soil in each wavelength with soil moisture content at different matric potentials were investigated. Stepwise multiple linear regression was applied to derive pedo-transfer functions (PTFs) and spectral transfer functions (STFs) that uses basic soil properties and soil spectral reflectance as input, respectively. The accuracy of the proposed functions were assessed by adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}), normalized root mean square error (NRMSE), mean error (ME), and the ratio of performance to deviation (RPD).

Results: Pedo-transfer functions (PTFs) provided more accurate estimates at the dry-end of the soil moisture curve than the wet-end, due to the high correlation of soil moisture with soil particle size distribution at the dry-end of the soil moisture curve. The results of the statistical parameters showed that the derived PTFs for estimating soil water retention at 10 to 1500 kPa matric suctions have good prediction accuracy. However, STFs also had reasonable but poorer results than the proposed PTFs in estimating the studied characteristics.

Conclusion: Overall, the results of this study revealed that, despite the relatively poorer results of STFs than PTF, due to lower costs, time and field data, soil spectral data can be used as an indirect and novel method for estimating volumetric soil moisture content at different matric potentials.

Keywords: Basic soil properties, Matric potential, Soil spectral data, Stepwise multiple linear regression

* Corresponding Author; Email: m.davari@uok.ac.ir

1- RS³ refers to the third version of ASD (Analytical Spectral Devices) application and its purpose is to receive and store the spectral data transmitted from an ASD spectroradiometer

