



ISSN 2251-7480

اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پارامتریک به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در گستره VIS-NIR-SWIR

ابراهیم بابائیان^۱، مهدی همایی^{۲*} و علی اکبر نوروزی^۳

(۱) دانشجوی دکتری؛ گروه خاک‌شناسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده کشاورزی؛ تهران، ایران

(۲) استاد؛ گروه خاک‌شناسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده کشاورزی؛ ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تهران، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: mhomaee@modares.ac.ir

(۳) استادیار؛ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

چکیده

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک اهمیت زیادی در چرخه آبی طبیعت دارند. هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر) به منظور برآورد پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بود. بدین منظور، بازتاب ابرطیفی نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه اسپکترورادیومتر و به کمک روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. پس از انجام پیش‌پردازش‌های طیفی، همبستگی بین مقادیر بازتاب در هر یک از طول موج‌های منحنی‌های حذف پیوستار طیفی با پارامترهای هیدرولیکی مدل معلم-ون گنوتخن (n ، α^* و Ks^*) مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از روش رگرسیون مرحله‌ای چندگانه، روابط ریاضی مربوطه پی‌ریزی و تحت عنوان توابع انتقالی طیفی پارامتریک (PSTFs) نامگذاری شدند. بر اساس نتایج، بیشترین ضریب همبستگی بین متغیرها در طول موج‌های نزدیک به ۵۵۰ و ۲۳۰۰ نانومتر (برای پارامترهای n و α^*) و ۱۹۲۷ نانومتر (برای پارامتر Ks^*) به دست آمد. توابع انتقالی طیفی دقت تقریباً یکسانی در برآورد پارامترهای α^* ($R=0/54$) و n ($R=0/58$) نشان دادند. در حالی که این توابع، بهترین تخمین‌ها را برای پارامتر Ks^* با ضریب همبستگی (R) برابر با ۰/۷۶ نشان دادند. با استفاده از توابع انتقالی طیفی، مقدار رطوبت خاک به ازای تمامی پتانسیل‌های ماتریک با متوسط RMSE برابر $cm^3 cm^{-3}$ ۰/۰۱۷^۳ برآورد شد. بر اساس نتایج این پژوهش، اگرچه پارامترهای هیدرولیکی تخمینی با دقت بسیار بالایی همراه نبودند، لیکن این رویکرد ضمن آن که می‌تواند به عنوان کاربرد نوینی از طیف‌سنجی خاک مطرح شود، می‌تواند به عنوان روشی غیرمستقیم برای برآورد پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نیز معرفی شود.

کلید واژه‌ها: بازتاب طیفی؛ ضریب آبگذری اشباع؛ منحنی حذف پیوستار؛ منحنی رطوبتی

مقدمه

خاک مطرح هستند. توابع انتقالی خاک (PTFs)^۱ یکی از روش‌های غیرمستقیم در اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است که در آنها از مشخصه‌های زود یافت خاک همچون توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع/غیراشباع خاک به عنوان پارامترهای ورودی مهم بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیک و به منظور مطالعه حرکت آب در خاک، انتقال املاح و آلاینده‌ها، انتقال گرما و جابجایی گازها در

^۱ Pedotransfer functions

آلی و جرم ویژه ظاهری خاک استفاده می‌شود (خداوردی‌لو و همایی، ۱۳۸۱؛ قربانی دشتکی و همایی، ۱۳۸۱، ۱۳۸۳، ۱۳۸۶؛ نوایان و همکاران، ۱۳۸۲؛ فرخیان فیروزی و همایی، ۱۳۸۳، ۱۳۸۴؛ مطلبی و همکاران، ۱۳۸۷، ۱۳۸۹). پژوهش‌های بسیاری در زمینه اشتقاق توابع انتقالی خاک برای خاک‌های مختلف در دنیا (Vereecken *et al.*, 1989, 1990; Schaap *et al.*, 2001; Wosten *et al.*, 1999) و نیز در ایران (Homaei and Farrokhian Firouzi, 2008; Ghorbani dashtaki *et al.*, 2010; Khodaverdiloo *et al.*, 2011) انجام شده است. این مسئله نشان می‌دهد به دلیل وجود تغییرپذیری مکانی در ویژگی‌های خاک، معمولاً توابع انتقالی به‌دست آمده در هر منطقه منحصر به آن منطقه است و نتایج تخمین در دیگر مناطق با عدم اطمینان بیشتری همراه است. مروری جامع بر نوع متغیرهای ورودی و دقت توابع انتقالی ارائه شده در چند دهه اخیر نشان می‌دهد که توابع انتقالی خاک با محدودیت‌هایی همچون؛ وابستگی به نوع و میزان دقت روش‌های اندازه‌گیری متغیرهای ورودی، وابستگی به میزان دقت آزمایشگر، عدم در نظر گرفتن ویژگی‌هایی همچون ساختمان و مینرالوژی رس، وابستگی زمانی توابع به دلیل وجود اثرات فرسایش و شخم، عدم وجود اطلاعات جانبی و تکمیلی در مورد شرایطی که در آن نمونه‌برداری خاک انجام شده و یا وضعیت پوشش گیاهی و سطح زمین مواجه است (Vereecken *et al.*, 2010).

طی چند دهه اخیر، از انعکاس طیفی^۲ خاک در دامنه‌های طیفی مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (SWIR) (طول موج بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به عنوان روشی سریع، مقرون به صرفه و غیرمخرب برای تخمین ویژگی‌های خاک استفاده شده است. تمرکز این تحقیقات بر مطالعه ویژگی‌های مبنایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات (Ben-Dor and Banin, 1995; Brown, 2007; Gomez *et al.*, 2008) مقدار ماده آلی (Nocita *et al.*, 2013)، مقدار آهک (Gomez *et al.*, 2013) و سایر پارامترهای خاک است. هدایت الکتریکی (Wang *et al.*, 2012)، ظرفیت تبادل کاتیونی (Janik *et al.*, 2010; Savvides *et al.*, 2009) و تعیین غلظت برخی عناصر ماکرو و میکرو در خاک بوده است (Janik *et al.*, 2009; Genot *et al.*, 2011; Kodaera and Shibusawa, 2013). بازتاب طیفی خاک متأثر از برهم‌کنش رطوبت، بافت، ساختمان و مقدار ماده آلی خاک با یکدیگر است. مهمترین اجزای خاک که بر مقدار بازتاب طیفی از خاک مؤثرند شامل نوع و فراوانی کانی‌های رس (کائولینایت، اسمکتایت و ایلایت)، کربنات‌ها، گروه‌های هیدروکسیل آب خاک، ترکیبات آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌باشند. برخی مشخصه‌های جذبی در گستره طول موج مرئی طیف‌های خاک مربوط به وجود ترکیبات تیره ماده آلی خاک می‌باشد. در حالی که مشخصه‌های جذبی ماده آلی در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی مربوط به وجود گروه‌های CH، NH و CO در ترکیبات آلی است (Workman, 2000). پژوهش‌ها نشان داده مشخصه‌های جذبی در طول موج‌های نزدیک به ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر مربوط به وجود آب هیگروسکوپیک در خاک و نیز گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رس می‌باشد (Viscara Rossel *et al.*, 2006c). در مورد اثر بافت خاک بر مقدار بازتاب طیفی می‌توان گفت به دلیل آنکه خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های رسی رطوبت کمتری در خود نگه می‌دارند، بازتاب طیفی بالاتری نسبت به خاک‌های ریز بافت دارند. تاکنون مطالعات اندکی در مورد برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کمک داده‌های طیفی انجام شده است. در پژوهشی Janik و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از بازتاب طیفی در گستره مادون قرمز دور (۲۰۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) و روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، مقدار رطوبت خاک را در پتانسیل‌های ماتریک ۱ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با ضریب تبیین بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۷ برآورد کردند. از آنجاکه سنجنده‌های ماهواره‌ای عمدتاً دارای باندهایی در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر می‌باشند،

آلی و جرم ویژه ظاهری خاک استفاده می‌شود (خداوردی‌لو و همایی، ۱۳۸۱؛ قربانی دشتکی و همایی، ۱۳۸۱، ۱۳۸۳، ۱۳۸۶؛ نوایان و همکاران، ۱۳۸۲؛ فرخیان فیروزی و همایی، ۱۳۸۳، ۱۳۸۴؛ مطلبی و همکاران، ۱۳۸۷، ۱۳۸۹). پژوهش‌های بسیاری در زمینه اشتقاق توابع انتقالی خاک برای خاک‌های مختلف در دنیا (Vereecken *et al.*, 1989, 1990; Schaap *et al.*, 2001; Wosten *et al.*, 1999) و نیز در ایران (Homaei and Farrokhian Firouzi, 2008; Ghorbani dashtaki *et al.*, 2010; Khodaverdiloo *et al.*, 2011) انجام شده است. این مسئله نشان می‌دهد به دلیل وجود تغییرپذیری مکانی در ویژگی‌های خاک، معمولاً توابع انتقالی به‌دست آمده در هر منطقه منحصر به آن منطقه است و نتایج تخمین در دیگر مناطق با عدم اطمینان بیشتری همراه است. مروری جامع بر نوع متغیرهای ورودی و دقت توابع انتقالی ارائه شده در چند دهه اخیر نشان می‌دهد که توابع انتقالی خاک با محدودیت‌هایی همچون؛ وابستگی به نوع و میزان دقت روش‌های اندازه‌گیری متغیرهای ورودی، وابستگی به میزان دقت آزمایشگر، عدم در نظر گرفتن ویژگی‌هایی همچون ساختمان و مینرالوژی رس، وابستگی زمانی توابع به دلیل وجود اثرات فرسایش و شخم، عدم وجود اطلاعات جانبی و تکمیلی در مورد شرایطی که در آن نمونه‌برداری خاک انجام شده و یا وضعیت پوشش گیاهی و سطح زمین مواجه است (Vereecken *et al.*, 2010).

طی چند دهه اخیر، از انعکاس طیفی^۲ خاک در دامنه‌های طیفی مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (SWIR) (طول موج بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به عنوان روشی سریع، مقرون به صرفه و غیرمخرب برای تخمین ویژگی‌های خاک استفاده شده است. تمرکز این تحقیقات بر مطالعه ویژگی‌های مبنایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات (Ben-Dor and Banin, 1995; Brown, 2007; Gomez *et al.*, 2008) مقدار ماده آلی (Nocita *et al.*, 2013)، مقدار آهک (Gomez *et al.*, 2013) و سایر پارامترهای خاک است. هدایت الکتریکی (Wang *et al.*, 2012)، ظرفیت تبادل کاتیونی (Janik *et al.*, 2010; Savvides *et al.*, 2009) و تعیین غلظت برخی عناصر ماکرو و میکرو در خاک بوده است (Janik *et al.*, 2009; Genot *et al.*, 2011; Kodaera and Shibusawa, 2013). بازتاب طیفی خاک متأثر از برهم‌کنش رطوبت، بافت، ساختمان و مقدار ماده آلی خاک با یکدیگر است. مهمترین اجزای خاک که بر مقدار بازتاب طیفی از خاک مؤثرند شامل نوع و فراوانی کانی‌های رس (کائولینایت، اسمکتایت و ایلایت)، کربنات‌ها، گروه‌های هیدروکسیل آب خاک، ترکیبات آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌باشند. برخی مشخصه‌های جذبی در گستره طول موج مرئی طیف‌های خاک مربوط به وجود ترکیبات تیره ماده آلی خاک می‌باشد. در حالی که مشخصه‌های جذبی ماده آلی در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی مربوط به وجود گروه‌های CH، NH و CO در ترکیبات آلی است (Workman, 2000). پژوهش‌ها نشان داده مشخصه‌های جذبی در طول موج‌های نزدیک به ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر مربوط به وجود آب هیگروسکوپیک در خاک و نیز گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رس می‌باشد (Viscara Rossel *et al.*, 2006c). در مورد اثر بافت خاک بر مقدار بازتاب طیفی می‌توان گفت به دلیل آنکه خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های رسی رطوبت کمتری در خود نگه می‌دارند، بازتاب طیفی بالاتری نسبت به خاک‌های ریز بافت دارند. تاکنون مطالعات اندکی در مورد برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کمک داده‌های طیفی انجام شده است. در پژوهشی Janik و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از بازتاب طیفی در گستره مادون قرمز دور (۲۰۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) و روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، مقدار رطوبت خاک را در پتانسیل‌های ماتریک ۱ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با ضریب تبیین بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۷ برآورد کردند. از آنجاکه سنجنده‌های ماهواره‌ای عمدتاً دارای باندهایی در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر می‌باشند،

² Proximal Spectral Reflectance

(PSTFs)^۳ به عنوان روشی غیرمستقیم برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل معلم-ون گنوختن بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تعداد ۱۷۴ نمونه خاک از لایه سطحی (۳۰- سانتیمتر) به صورت سری‌های دست‌خورده و دست‌نخورده از منطقه‌ای به وسعت ۲۵۰ کیلومتر مربع واقع در زیر حوزه آبخیز زنجان رود جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه انتقال و مقدار رطوبت حجمی خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک صفر، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتیمتر با استفاده از جعبه شنی و صفحات فشاری اندازه‌گیری شد (Vereecken *et al.*, 2010). سایر ویژگی‌های خاک همچون توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک به روش‌های هیدرومتری، واکلی بلاک و کلوخه اندازه‌گیری شدند. از نظر بافت خاک، خاک‌های غالب منطقه لومی رسی و لوم بوده و در زیر گروه بزرگ Typic Calcixerepts طبقه‌بندی می‌شوند.

به‌منظور توصیف منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌ها، از مدل رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) استفاده شد (رابطه ۱) (van Genuchten, 1980).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_s & h \geq 0 \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m & h < 0 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، h مکش ماتریک، α ، n و m (1- m) پارامترهای شکل منحنی رطوبتی (α بر حسب cm^{-1} ، n و m بدون بعد)، $\theta(h)$ مقدار رطوبت ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) به-ازای پتانسیل‌های ماتریک (h) معین (cm)، θ_r و θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) به ترتیب مقدار رطوبت باقی‌مانده و اشباع خاک است. ضریب آبگذری اشباع خاک نیز بر اساس نوع بافت خاک به دو روش بار ثابت و افتان اندازه‌گیری شد. تابع

استفاده از داده‌های طیفی در گستره مادون قرمز دور در مقیاس بزرگ قابل استفاده نخواهد بود. اخیراً Santra و همکاران (۲۰۰۹) از داده‌های طیفی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای شکل منحنی رطوبتی در شرایط نزدیک به اشباع استفاده کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد تنها پارامتر α با دقت متوسطی برآورد می‌شود و تخمین سایر پارامترهای هیدرولیکی با دقت پائینی همراه بود. به نظر می‌رسد اعتبار این نتایج تنها در شرایط نزدیک به اشباع خاک است، در حالی‌که از نقطه نظر مدیریت آب در مزرعه و جذب آب توسط گیاه (تفاوت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی)، لازم است دامنه وسیع‌تری مورد توجه قرار گیرد. اخیراً بابائیان و همکاران (۱۳۹۲) برای نخستین بار توابع جدیدی تحت عنوان توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای (STFs) را مطرح کردند که بر اساس آنها می‌توان با استفاده از داده‌های ابرطیفی خاک در گستره مرئی تا مادون قرمز میانی و روش PLSR، وضعیت نگهداشت آب در خاک را پیش‌بینی کرد. بر پایه نتایج آن‌ها، دقت تخمین‌ها در بخش میانی و انتهای خشک منحنی رطوبتی بیشتر از بخش مرطوب آن به‌دست آمد.

اگر فرض شود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک اثری غیرمستقیم بر رفتار طیفی خاک دارند، می‌توان با مطالعه رفتار طیفی خاک در گستره مرئی تا مادون قرمز، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را مطالعه کرد. اندازه‌گیری‌های طیفی به مراتب آسان‌تر، دقیق‌تر، کم‌هزینه‌تر، غیر مخرب، تکرارپذیر و مشتمل بر یک روش استاندارد اندازه‌گیری است که اثر ساختمان خاک و سایر ترکیبات خاک نیز در بازتاب طیفی خاک اعمال شده است. به دنبال مطالعه بابائیان و همکاران (۱۳۹۲)، هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی به منظور اشتقاق و ارزیابی توابع انتقالی طیفی پارامتریک

³ Parametric spectrotransfer functions

قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) مشابه با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک انجام شد. از هر نمونه خاک ۲۰ اسکن تهیه و مجموعاً ۳۵۰۰ منحنی طیفی ثبت و اقدام به ایجاد یک کتابخانه طیفی از خاک‌های منطقه شد. میانگین منحنی‌های طیفی هر یک از نمونه‌های خاک با نرم افزار ViewSpec محاسبه و به ازای هر نمونه خاک، یک منحنی طیفی در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. هر منحنی طیفی ثبت شده دارای تفکیک طیفی یک نانومتر بود، به طوری که در گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر هر منحنی طیفی شامل ۱۹۵۰ بازتاب طیفی (۱۹۵۰ طول موج) بود.

هدف اصلی از پیش‌پردازش داده‌های طیفی، حذف عوامل خارجی و استفاده کارآمد از داده‌های طیفی طی فرآیند تخمین است. به دلیل وجود آشفتگی‌های زیاد طیفی^۴ در طول موج‌های ۴۰۰-۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۴۵۰ نانومتر، این محدوده از تمامی طیف‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفت. با استفاده از نرم‌افزار Unscambler 10.3، روش‌های مختلف پیش‌پردازش بر روی داده‌های طیفی انجام شد و بر اساس روش اعتبارسنجی متقابل و دقت نتایج، از منحنی‌های حذف پیوستار و فیلتر Savitzky-Golay به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دوم، استفاده شد. منحنی حذف پیوستار، منحنی است که بر اساس خطی محدب و فرضی که دو انتهای یک مشخصه جذب طیفی را به یکدیگر وصل می‌کند، به دست می‌آید. با استفاده از رابطه (۴) می‌توان منحنی حذف پیوستار را محاسبه نمود (Lagacherie et al., 2008).

$$CR(\lambda_i) = R_{\lambda_i} / R_{CR(\lambda_i)} \quad (4)$$

که در آن، $R_{CR(\lambda_i)}$ مقدار بازتاب در منحنی حذف پیوستار به ازای طول موج λ_i ، R_{λ_i} مقدار بازتاب طول موج متناظر در منحنی خام طیفی و $R_{CR(\lambda_i)}$ مقدار بازتاب منحنی فرضی در طول موج‌های متناظر می‌باشد.

هدایت هیدرولیکی معلم-ون‌گونختن با استفاده از رابطه (۲)، بیان می‌شود (Mualem, 1976).

$$K(h) = \frac{K_s \left\{ 1 - (\alpha h)^{m,n} [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m,l}} \quad (2)$$

که در آن، K_s و $K(h)$ (بدون بعد) به ترتیب ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و نسبی (cm.d^{-1})، l پارامتر اتصال (پیچاپچی) منافذ خاک (بدون بعد و معمولاً برابر با ۰/۵ فرض می‌شود) و بقیه پارامترها نیز مفاهیم قبل را دارا می‌باشند. سپس با استفاده از کمینه‌سازی تابع هدف (رابطه ۳) به روش حداقل مربعات خطا، مدل رطوبتی ون‌گونختن به نقاط رطوبتی اندازه‌گیری شده برآزش و پارامترهای هیدرولیکی شامل α و n محاسبه شد. مقدار رطوبت باقی‌مانده (θ_r) خاک نیز برابر با صفر در نظر گرفته شد.

$$O(b) = \sum_{i=1}^N \{w_i [\theta_i - \bar{\theta}_i(b)]\}^2 \quad (3)$$

که در آن، θ_i و $\bar{\theta}_i$ به ترتیب مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و تخمینی، N تعداد نقاط منحنی رطوبتی و w_i ضرایب وزنی (برابر با یک) می‌باشند.

طیف‌سنجی خاک و پیش‌پردازش‌های طیفی

به منظور اندازه‌گیری بازتاب طیفی نمونه‌های خاک، از دستگاه اسپکترومتر زمینی (ASD, FieldSpec@3, USA) استفاده شد. تعداد ۱۷۴ نمونه خاک هوا خشک، از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد و منحنی‌های طیفی آنها در دامنه مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) با روش‌های استاندارد طیف‌سنجی در تاریکخانه اندازه‌گیری شد (Viscarra Rosset, 2008). اندازه‌گیری‌های طیفی به کمک پیستول مجهز به لنز ۸ درجه که میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتیمتر بر روی نمونه خاک ایجاد می‌کند، انجام شد. منبع نور نیز شامل یک لامپ هالوژن ۱۵۰ وات با زاویه استقرار ۴۵ درجه از محور قائم بود. همچنین، به منظور ثبت اندازه‌گیری‌ها به صورت مقدار بازتابش و حذف آشفتگی‌های طیفی (نویز)، به ازای هر ۳ نمونه خاک یک

⁴ Noise

همبستگی بین متغیرها، اشتقاق توابع و دقت آزمایی

پس از محاسبه آمار توصیفی، وضعیت نرمال بودن پارامترهای هیدرولیکی به کمک آزمون کلمگروف-اسمیرنف در سطح ۵ درصد بررسی شد. متغیرهایی که دارای توزیع غیر نرمال بودند، به کمک تبدیل مناسب نرمال شدند. سپس، با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، میزان ارتباط بین مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج با پارامترهای هیدرولیکی خاک بررسی شد. متغیرهایی که دارای همبستگی معنی‌دار در سطوح ۱ و ۵ درصد بودند، به عنوان متغیرهای ورودی رگرسیون مرحله‌ای چندگانه انتخاب شدند. به منظور فراهم کردن امکان ارزیابی صحیح دقت توابع، داده‌های هیدرولیکی و طیفی موجود به دو گروه داده‌های واسنجی (n=130) و اعتبارسنجی (n=44) تقسیم شدند. با استفاده از روش رگرسیون مرحله‌ای چندگانه رابطه ریاضی بین متغیرها به دست آمد. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی تخمینی، از روش ارائه شده توسط Weynants و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شد. در این روش، ضرایب رگرسیون به دست آمده در روابط رگرسیونی بین پارامترهای هیدرولیکی و مقادیر بازتاب طیفی، به عنوان مقادیر پیشین در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، مقدار بهینه این ضرایب از طریق کمینه کردن مجموع مربعات باقیمانده پارامترهای هیدرولیکی تخمینی در

مرحله اول و مقادیر پارامترهای هیدرولیکی مشاهده‌ای، محاسبه شد. ارزیابی دقت توابع حاصل با استفاده از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R) و شاخص انطباق (d) انجام شد. شاخص انطباق بیان‌کننده درجه‌ای از دقت است که در آن مقادیر تخمینی به دست آمده است. در مقایسه با ضریب تبیین (R^2) که به نوعی همبستگی بین مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد، شاخص انطباق درجه‌ای را بیان می‌کند که در آن پیش‌بینی‌های مدل عاری از خطا می‌باشند (Willmott, 1981). تمامی محاسبات موردنظر در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام پذیرفت.

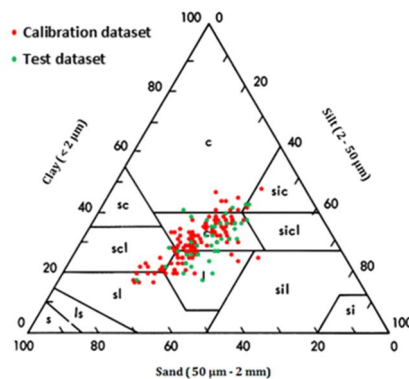
$$ME = \frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (E_i - M_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}} \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i^p - \theta_i^o)^2}{\sum_{i=1}^N [|(\theta_i^p - \bar{\theta}^p)| + |(\theta_i^o - \bar{\theta}^o)|]^2} \quad (8)$$

که در آنها، E_i و M_i به ترتیب مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای، \bar{E} و \bar{M} به ترتیب میانگین مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای، P تعداد پارامترها و N تعداد داده‌ها می‌باشند.



شکل ۱. توزیع کلاس‌های بافت خاک به ازای سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی

نتایج و بحث

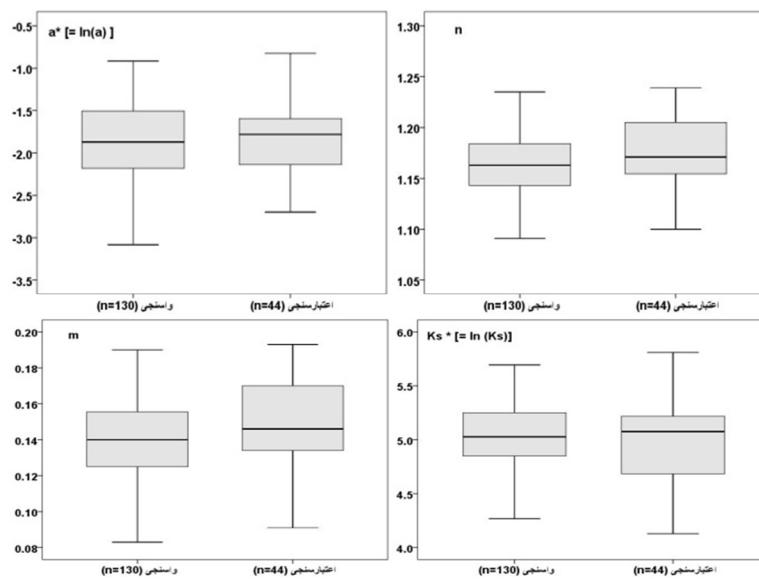
ویژگی‌های هیدرولیکی و رفتار طیفی خاک‌ها

نتایج آمار توصیفی ویژگی‌های مبنایی خاک به ازای داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۱ ارائه شده است. گستره مقدار رس و شن به ترتیب برابر با ۴۵-۱۵ و ۶۳-۱۳ درصد اندازه‌گیری شد. میانگین جرم ویژه ظاهری خاک و کربن آلی خاک به ترتیب برابر با ۱/۴۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و ۰/۶۴ درصد به دست آمد. به نظر می‌رسد این مقدار اندک کربن آلی تأثیر چندانی بر رفتار طیفی خاک‌ها نداشته باشد (Viscarrá Rossel *et al.*, 2006). به دلیل حضور کربنات‌ها pH خاک‌ها خنثی تا کمی قلیایی (۷/۰-۷/۹) بود. همچنین کلاس بافتی خاک‌ها دارای تنوع زیادی بود، به طوری که هفت کلاس بافتی خاک در منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص بود. در این میان کلاس‌های بافتی لوم و لوم رسی، بافت‌های غالب منطقه را تشکیل داده که بیانگر فراوانی خاک‌های متوسط

و ریزبافت در منطقه است (شکل ۱). مقدار ضریب آبگذری اشباع خاک‌ها نیز بین ۸ تا ۸۰۰ سانتی‌متر بر روز محاسبه شد. به جز پارامترهای α و K_s ، تمامی متغیرها در سطح ۵ درصد از توزیع نرمال پیروی کردند. پارامترهای α و K_s دارای توزیع نرمال لگاریتمی ($\alpha^* = \ln[\alpha]$ و $K_s^* = \ln(K_s)$) و به ترتیب دارای میانگین‌های برابر با $1/8 \ln[cm^{-1}]$ و $4/8 \ln[cm \cdot d^{-1}]$ بودند. مقدار متوسط پارامتر n نیز برابر با $1/17$ محاسبه شد، که تا حدودی نشان دهنده وضعیت متوسط تا ریزبافت بودن خاک‌ها است (Carsel and Parish, 1988). توزیع و گستره پارامترهای هیدرولیکی در سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی که در شکل ۲ ارائه شده است، نشان می‌دهد که به جز پارامتر K_s^* ، انطباق کاملی بین گستره داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی سایر پارامترهای هیدرولیکی وجود دارد.

جدول ۱. دامنه تغییرات ویژگی‌های مبنایی خاک به ازای سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی

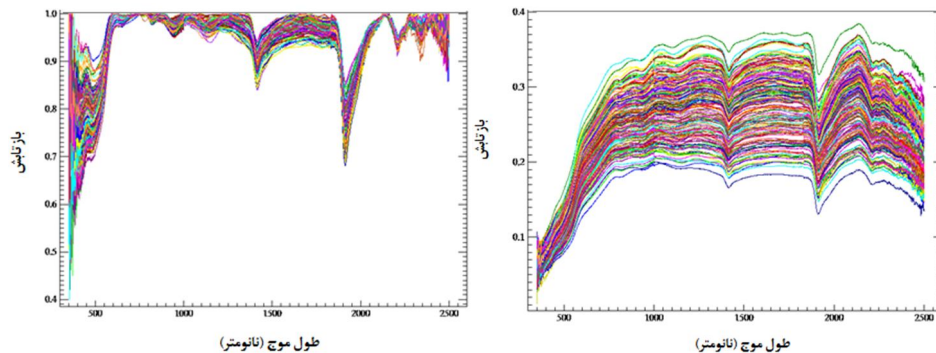
pH [-]	کربن آلی [%]	جرم ویژه ظاهری [g cm ⁻³]	شن [%]	رس [%]	
۷/۰۰	۰/۰۶	۱/۱۹	۱۳	۱۵	حداقل (واسنجی)
۷/۹۲	۱/۵۶	۱/۷۰	۶۳	۴۵	حداکثر (واسنجی)
۷/۰۰	۰/۲۳	۱/۱۹	۱۹	۱۶	حداقل (اعتبارسنجی)
۷/۸۶	۱/۹۵	۱/۷۵	۶۲	۴۰	حداکثر (اعتبارسنجی)



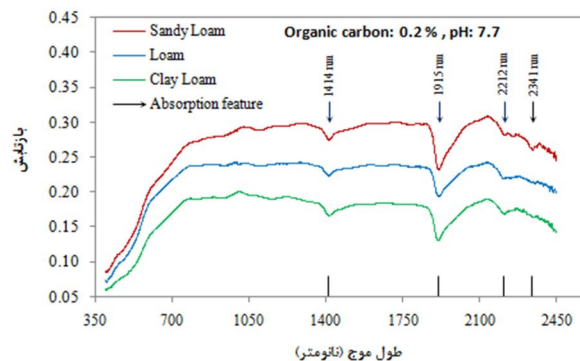
شکل ۲. پلات‌های جعبه‌ای توزیع و گستره کمی پارامترهای هیدرولیکی خاک به ازای داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی

طیفی را در حضور سه بافت مختلف خاک شامل لومی رسی، لوم و لومی شنی و به ازای یک مقدار ثابت برای کربن آلی و pH نشان داده است. بر اساس این شکل، به طور عمده در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۴۵۰-۷۰۰ نانومتر)، با افزایش مقدار رس خاک، میزان بازتاب کاهش و با افزایش درصد شن، افزایش می‌یابد. همچنین عمق مشخص جذبی در طول موج ۱۹۱۵ نانومتر از دیگر باندهای جذبی بیشتر است که نشان می‌دهد این طول موج حساسیت بالاتری به وجود گروه‌های هیدروکسیل در شبکه کانی‌های رس دارد. از طرفی، عمق این باند در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های شنی بیشتر است (Viscarra Rossel *et al.*, 2006). زیرا در شرایط یکسان، خاک‌های رسی مقدار رطوبت (گروه‌های هیدروکسیل) بیشتری را نسبت به خاک‌های شنی در خود نگه می‌دارند.

میانگین منحنی‌های خام و منحنی‌های حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی‌های خام طیفی، الگوی معمول طیفی یک خاک را نشان می‌دهند که دارای یک برآمدگی در طول موج‌های بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و سه مشخصه جذبی مهم در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵ و ۲۲۱۲ نانومتر است. این مشخصه‌های طیفی در منحنی‌های حذف پیوستار به طور مشخص‌تری مشهود است. این مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب آزاد و هیگروسکوپیک (۱۴۱۴ نانومتر)، گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رس (۱۹۱۵) و پیوندگروه‌های عاملی OH با فلزات آهن، آلومنیوم و منیزیم (۲۲۱۲ نانومتر) در شبکه کانی‌ها می‌باشد (Clark *et al.*, 1990). مقدار بازتاب طیفی خاک عمدتاً تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات (بافت خاک)، ماده آلی و pH قرار می‌گیرد. شکل ۴ تغییرات در مقدار بازتاب



شکل ۳. منحنی‌های خام بازتاب طیفی (راست) و منحنی‌های حذف پیوستار بازتاب طیفی (چپ) خاک‌های مورد مطالعه



شکل ۴. منحنی‌های خام بازتاب طیفی سه کلاس بافتی خاک شامل لومی شنی، لوم و لومی رسی به ازای مقادیر ثابت مقدار کربن آلی و pH خاک. موقعیت مشخصه‌های جذبی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۱ نانومتر با فلش نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل و همبستگی بین متغیرها

با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (R)، رابطه همبستگی بین پارامترهای هیدرولیکی خاک (α^* ، n و K_s^*) با مقادیر بازتاب طیفی خاک در هر طول موج از گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر محاسبه شد که در شکل ۵ ارائه شده است. بر پایه نتایج به دست آمده، همبستگی بالایی بین پارامترهای هیدرولیکی خاک با مقدار بازتاب طیفی در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی به دست آمد. به طوری که، پارامتر α^* بیشترین همبستگی معنی دار (سطح ۱٪) را در دو طول موج ۵۵۲ نانومتر ($R=-0/315$) و ۲۳۱۷ نانومتر ($R=0/63$) نشان داد. در حالی که پارامتر n بیشترین همبستگی را در طول موج‌های ۵۴۷ و ۲۳۰۷ نانومتر با ضریب همبستگی برابر با ۰/۲۴۲ و ۰/۵۵۸- نشان داد. ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع نیز روندی مشابه با پارامتر α^* در تمامی طول موج‌ها نشان داد. به طوری که بیشترین همبستگی ($R=-0/456$) معنی دار (سطح ۱٪) با بازتاب طیفی خاک، در طول موج ۱۹۲۷ نانومتر به دست آمد. همچنین همبستگی بالا و معنی داری بین پارامترهای هیدرولیکی و مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های جذبی (۱۴۱۴، ۱۹۱۵ و ۲۲۱۲ نانومتر) مشاهده شد (شکل ۵ الف). پارامتر n در تمامی طول موج‌ها روندی معکوس با α^* نشان داد. این وضعیت را می‌توان ایجاد روابطی مناسب با بازتاب طیفی خاک مرتبط شوند.

اشتقاق توابع انتقالی طیفی پارامتریک

در جدول ۲ روابط رگرسیونی مربوط به توابع انتقالی طیفی و نیز آماره‌های مربوط به ارزیابی دقت این توابع ارائه شده است. گستره مقدار ضریب همبستگی (R) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سری داده‌های اعتبارسنجی به ترتیب بین ۰/۳۲-۰/۸۱ و ۰/۵۵۵-۰/۲۹ به دست آمد. همچنین، مقادیر ضرایب همبستگی در سری داده‌های اعتبارسنجی اندکی بزرگ‌تر از سری داده‌های واسنجی به دست آمد، در حالی که مقدار RMSE چندان تفاوتی نداشت. اگرچه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی مربوط به یک منطقه می‌باشند، لیکن چنین حالتی معمول

به وجود همبستگی بالا و منفی بین این دو پارامتر شکل منحنی رطوبتی نسبت داد (Simunek et al., 2005). در این پژوهش، همبستگی بین توزیع اندازه ذرات خاک و مقادیر بازتاب طیفی خاکدر هر طول موج نیز محاسبه شد. بر پایه شکل ۵ ب، توزیع اندازه ذرات خاک دارای همبستگی منفی، مثبت و معنی داری با بازتاب طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی است. هر چند این همبستگی‌ها دارای روندی مشابه با همبستگی بین پارامترهای هیدرولیکی خاک و مقادیر بازتاب طیفی است، لیکن از نظر بزرگی، همبستگی بالاتری را در طول موج‌های متناظر نشان می‌دهند. همچنین، پارامتر n روندی مشابه با مقدار شن و پارامتر α^* روندی مشابه با مقدار رس را دنبال کرد. بر اساس این نتایج، همبستگی بالا و معنی دار بین پارامترهای هیدرولیکی خاک و مقادیر بازتاب طیفی مربوط به اثر مقدار رس و شن خاک بوده که به طور مستقیم بر روی میزان بازتاب خاک اثر می‌گذارند. وجود همبستگی بین ویژگی‌هایی مبنایی خاک و مقدار بازتاب طیفی توسط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Bilgili et al., 2010; Somers et al., 2010; Santra et al., 2009). این یافته‌ها نشان می‌دهد، پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌توانند از طریق

بوده و به دلیل انتخاب نمونه‌های مستقل طی فرآیند اعتبارسنجی نتایج است (Dardanne et al., 2000). همچنین، STFs در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، حالت کم برآورد را نشان دادند. به طوری که مقدار ME تخمین بین ۰/۰۰۸- تا ۰/۱۲۶- محاسبه شد. در بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، ضرایب n و K_s^* اندکی بهتر از پارامتر α^* برآورد شدند. تعداد متغیرهای تخمینگر پارامترهای هیدرولیکی بین ۲ تا ۸ متغیر به دست آمد. طول موج‌های مؤثر در گستره مرئی (۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) در محدوده نزدیک به طول موج‌های ۵۵۰ نانومتر (طول موج سبز) و ۶۸۰ نانومتر (طول موج قرمز دور) مشاهده شد و نشان دهنده آن است که تغییرپذیری در پارامترهای

بزرگی (مثبت یا منفی) ضرایب رگرسیون شناسایی نمود (جدول ۲).

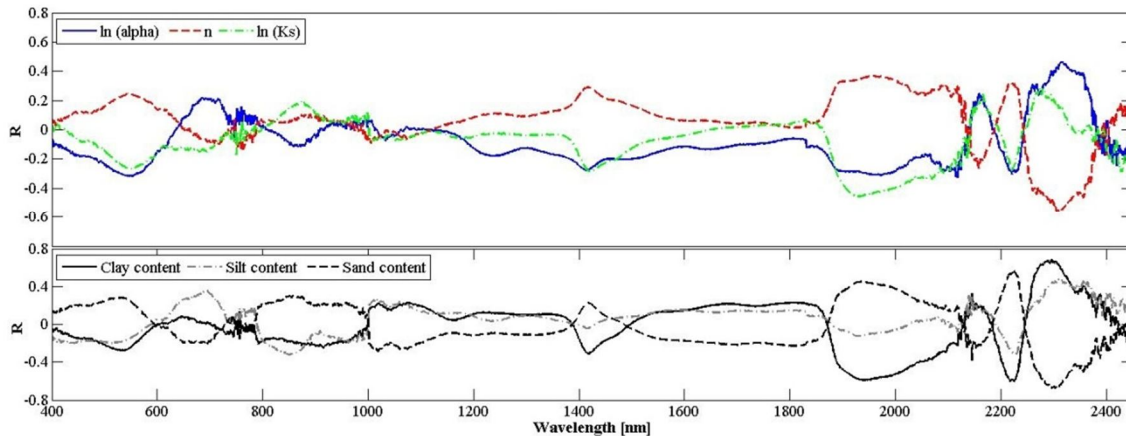
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بستگی به اندازه و فراوانی منافذ خاک و همچنین میزان بهم‌پیوستگی آنها دارد. اگرچه به‌طور معمول ارتباط زیادی بین فراوانی رس، شن و کربن آلی خاک با میزان آب‌گذری آن وجود دارد. در حقیقت این متغیرها، از مهم‌ترین تخمین‌گرها برای پیش‌بینی ضریب آب‌گذری اشباع خاک به کمک توابع انتقالی خاک به شمار می‌آیند (Weynants *et al.*, 2009). لیکن در بسیاری موارد، تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع به سهولت امکان‌پذیر نیست و حتی نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی نیز بسته به نوع روش مورد استفاده با نتایج یکسانی همراه نیست (Vereecken *et al.*, 2010). نتایج این پژوهش در مورد تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک منطبق با یافته‌های Cohen و همکاران (۲۰۰۷) و Minasny و همکاران (۲۰۰۸) است که به ترتیب مقادیر R^2 برابر با ۰/۶۲ و ۰/۴۳ را محدوده‌های ۲۵۰۰-۴۰۰۰ و ۲۵۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر به دست آورده‌اند. بر این اساس، داده‌های طیفی خاک می‌توانند به عنوان روشی غیرمستقیم برای تخمین ضریب آب‌گذری اشباع خاک مورد استفاده قرار گیرد.

در برخی پژوهش‌ها، از طول موج‌های ۵۵۰، ۵۹۶ و ۶۸۵ نانومتر که نزدیک به طول موج‌های ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد، برای برآورد مقدار رس خاک استفاده شده است (Gomez *et al.*, 2008). این طول موج‌ها ارتباط نزدیکی با رنگ خاک داشته و به نوعی اثر اکسیدهای آهن (هماتیت و گئوتایت) موجود در خاک را نشان می‌دهند (Stenberg *et al.*, 2010). طول موج‌های نزدیک به ۱۹۰۰، ۱۹۱۲، ۲۲۰۰ و ۲۲۰۶ نانومتر برای برآورد وضعیت بافتی خاک (Islam *et al.*, 2004; Ben-) و (Dor and Banin, 1995; Lagacherie *et al.*, 2008) طول موج‌های نزدیک به ۱۴۰۰، ۱۹۰۰، ۱۹۵۰ و ۲۲۰۰ و ۲۵۰۰ نانومتر نیز برای برآورد مقدار رطوبت خاک (Ben- Dor and Banin, 1995; Viscarra Rossel and

هیدرولیکی خاک تا حدودی می‌تواند از طریق رنگ خاک دنبال شود (Stenberg *et al.*, 2010). بر اساس نتایج مدل‌های رگرسیونی، مقادیر بازتاب در طول موج‌های ۵۵۲ و ۶۸۷ نانومتر می‌تواند به عنوان متغیرهای مهم تخمین‌گر پارامترهای هیدرولیکی خاک در گستره مرئی در نظر گرفته شود. طول موج‌های مؤثری نیز در گستره‌های ۱۴۵۰-۱۲۰۰ نانومتر، ۲۰۰۰-۱۹۰۰ نانومتر و ۲۴۵۰-۲۱۵۰ نانومتر مشاهده شد. به‌طوری‌که طول موج‌های ۱۴۱۷ و ۲۲۲۲ نانومتر مهم‌ترین تخمین‌گرها در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی برای تخمین پارامترهای α^* ، n و K_s^* بودند. این دو طول موج مهم، نزدیک به طول موج‌های جذبی ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر می‌باشند که همان‌طور که قبلاً اشاره شد مرتبط با گروه‌های هیدروکسیل آب هیگروسکوپیک و گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رس است (Clark, 1999; Viscarra Rossel *et al.*, 2006). به‌دلیل تأثیر بخار آب موجود در نیوار بر تضعیف نسبت سیگنال به نویز در داده‌های طیفی، این احتمال وجود دارد که مقادیر بازتاب طیفی منطبق با باندهای جذبی آب در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک به کمک طیف‌سنجی صحرایی یا به هنگام استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندان قابل استفاده نباشد. اگرچه، داده‌های ماهواره‌ای دارای باندهای فراوانی هستند که هر یک از باندها دارای عرض باندی به مراتب بیشتر از طول موج‌های جذبی اندازه‌گیری شده به روش طیف‌سنجی زمینی است. مشخصه‌های طیفی در گستره مرئی غالباً به‌دلیل وجود اکسیدهای آهن (هماتیت و گئوتایت) و در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۴۵۰-۱۲۰۰ نانومتر) به‌دلیل نوع و فراوانی کانی‌های رس، آب موجود در شبکه کانی‌ها و نیز وجود ترکیبات آلی در خاک است (Viscarra Rossel and Behrens, 2010). بر اساس نتایج حاصل از توابع انتقالی طیفی، اهمیت متغیرهای تخمین‌گر را می‌توان از روی میزان

Gaffey,) موجود در خاک بر بازتاب طیفی خاک باشند (, 1986; Gomez *et al.*, 2008).

McBratney, 1998; Dematte *et al.*, 2006) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بازتاب طیفی در طول موج‌های ۲۳۴۱ و ۲۳۷۳ نانومتر متأثر از وجود گروه‌های عاملی کربنات در کانی‌های کربناته است که به نحوی بیان کننده اثر آهک



شکل ۵. ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای هیدرولیکی (الف) و توزیع اندازه ذرات خاک (ب) با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های مختلف

نگهداشت آب در خاک در مکش‌های پایین عمدتاً در کنترل ساختمان خاک است، بنابراین به‌نظر می‌رسد داده‌های طیفی به‌طور مطلوبی نتوانسته‌اند اثر ساختمان خاک را در پیش‌بینی‌ها اعمال نمایند. مقدار متوسط RMSE تخمین نقاط رطوبتی برابر $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ محاسبه شد. بر پایه برخی پژوهش‌ها، در صورتی که مقدار RMSE توابع انتقالی خاک در تخمین نقاط رطوبتی کمتر از $0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ باشد، نتایج حاصله با دقت قابل قبولی همراه است (Nemes *et al.*, 2003). مقدار متوسط شاخص d نیز برابر 0.70 محاسبه شد که بیانگر دقت قابل قبول توابع انتقالی طیفی در پیش‌بینی نقاط رطوبتی خاک است (Khodaverdiloo *et al.*, 2011).

نتایج دقت‌آزمایی توابع انتقالی طیفی در پیش‌بینی نقاط رطوبتی خاک به ازای داده‌های اعتبارسنجی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، توابع انتقالی طیفی در پیش‌بینی مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک -3000 و -5000 سانتیمتر حالت بیش‌برآورد و در سایر مکش‌ها حالت کم‌برآورد را نشان دادند. به‌طوریکه مقدار متوسط ME برابر با $0.003 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به‌دست آمد. اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی نقاط رطوبتی در مکش‌های پایین (رطوبت‌های زیاد) بیشتر از مکش‌های بالا است. دلیل آن را می‌توان به ناتوانی داده‌های طیفی در نواحی مرطوب‌تر منحنی رطوبتی خاک نسبت داد. در حقیقت وضعیت

جدول ۲. توابع انتقالی طیفی پارامتریک به منظور تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک همراه با نتایج ارزیابی دقت به ازای داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی

توابع انتقالی طیفی پارامتریک (PSTFs)	R_{Cal}	$RMSR_{Cal}$	ME_{Cal}	R_{test}	$RMSR_{test}$	ME_{test}
$\alpha^* = -42.58 + 0.01(-4.535R_{552} + 53.4R_{687} - 6.274R_{1252} + 11.81R_{1417} - 4.94R_{1897} + 0.236R_{2222} + 19.173R_{2317} - 28.135R_{2447})$	۰/۵۸	۰/۳۶۹	۰/۰۰۰۷	۰/۵۴	۰/۴۰۹	۰/۰۰۱۴
$n = 3.739 + 0.01(-0.2R_{552} + 0.116R_{1417} - 0.385R_{1957} - 1.885R_{2157} + 0.935R_{2222} - 2.82R_{2307} + 1.623R_{2427})$	۰/۶۲	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲۷	۰/۵۸	۰/۰۲۹	-۰/۰۰۸
$K_s^* = 44.71 + 0.01(-4.784R_{552} + 52.057R_{877} + 6.891R_{1417} - 19.738R_{1932} + 18.619R_{2167} - 19.317R_{2222} - 62.094R_{2277} - 16.951R_{2432})$	۰/۵۳	۰/۴۸۶	۰/۰۴۱۶	۰/۷۶	۰/۶۱۲	-۰/۱۲۶۴

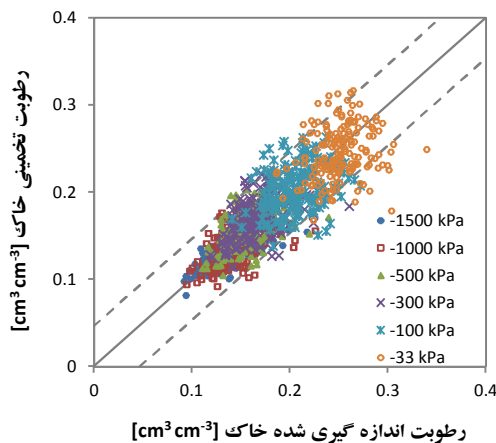
RW: درصد بازتاب به ازای طول موج W (نانومتر)، R_{Cal} ، R_{test} ، $RMSE_{Cal}$ ، $RMSE_{test}$ ، ME_{Cal} و ME_{test} : به ترتیب ضرایب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطا برای داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی

جدول ۳. نتایج اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پارامتریک در پیش‌بینی مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک معین

$\theta_{-330\text{cm}}$	$\theta_{-1000\text{ cm}}$	$\theta_{-3000\text{ cm}}$	$\theta_{-5000\text{ cm}}$	$\theta_{-10000\text{ cm}}$	$\theta_{-15000\text{ cm}}$	معیارهای ارزیابی
-۰/۰۰۶۷	-۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۴۹	-۰/۰۰۰۵	-۰/۰۰۱۷	ME [cm ³ cm ⁻³]
۰/۰۲۱۷	۰/۰۲۲۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۴۷	RMSE [cm ³ cm ⁻³]
۰/۳۹	۰/۵۷	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۷۹	d [-]

وجود عدم قطعیت و تجمع آن در حین اندازه‌گیری منحنی‌های رطوبتی و برازش توابع هیدرولیکی به نقاط مشاهده‌ای در کنار توانایی نه چندان بالای داده‌های طیفی در گنجاندن فراوانی و حجم مافذ (ساختمان) خاک می‌تواند باعث عدم دقت بالا در پیش‌بینی نقاط رطوبتی خاک در نواحی مرطوب منحنی رطوبتی شود. این یافته‌ها منطبق با نتایج Minasny و همکاران (۲۰۰۸) می‌باشد. آنها با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیفی در گستره مادون قرمز دور (۲۰۰۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر) نشان دادند که مقدار رطوبت حجمی خاک در مکش‌های بالا (۱۵۰۰- کیلوپاسکال) با دقت بالاتری ($R^2=0/51$ و $RMSE=0/05$) در مقایسه با مکش‌های پایین (۱۰- کیلوپاسکال) ($R^2=0/08$) و $RMSE=0/07$) برآورد می‌شود.

با استفاده از توابع انتقالی طیفی پارامتریک، توزیع و پراکنش مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف به ازای تمامی داده‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، در پتانسیل‌های ماتریک کم (منفی‌تر) تراکم نقاط در اطراف خط ۱:۱ بیشتر بوده و با افزایش رطوبت خاک، تراکم نقاط کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، توابع انتقالی طیفی در رطوبت‌های کم با دقت بالاتری همراه بوده‌اند. دلیل این مسأله می‌تواند ناشی از دقت پایین توابع انتقالی طیفی در تخمین پارامتر α^* در مقایسه با پارامتر n باشد. زیرا پارامتر α^* که در حقیقت عکس مکش ورود هوا به خاک است، وابستگی زیادی به ساختمان خاک و توزیع مفاذ خاک دارد. از طرف دیگر، پارامترهای شکل منحنی رطوبتی ماهیتی برازشی داشته و به‌طور غیرمستقیم از داده‌های منحنی رطوبتی استخراج شده‌اند. بنابراین



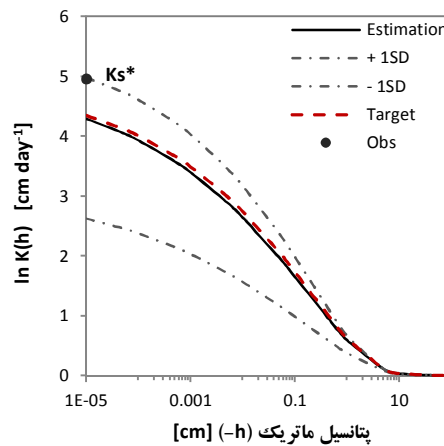
شکل ۶. پراکنش مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط توابع انتقالی طیفی پارامتریک به ازای پتانسیل‌های ماتریک معین. خطوط منقطع انحراف معیار مقادیر تخمینی را نشان می‌دهند.

برای خاک‌هایی با بافت لوم نشان داده شده است. بر اساس نتایج این شکل، انطباق نزدیکی بین مقادیر

در شکل ۷، عملکرد توابع انتقالی طیفی پارامتریک در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک

خاک هستند (همچون جرم ویژه ظاهری، رطوبت اشباع و ضریب آبگذری اشباع خاک) قادر نیستند با دقت بالایی توسط طیفسنجی در دامنه مادون قرمز دور پیش‌بینی شوند. درحالی که ویژگی‌هایی که مرتبط با بخش جامد خاک هستند (همچون رس، شن، ماده آلی) می‌توانند با دقت بالاتری برآورد شوند (Minasny *et al.*, 2008).

پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک وجود دارد. همچنین، توابع انتقالی طیفی در پیش‌بینی آبگذری اشباع و غیراشباع خاک حالت کم‌برآورد را نشان داده‌اند. بر اساس شکل ۷، توابع انتقالی طیفی توانسته‌اند ضریب آبگذری اشباع خاک را تا حدودی پیش‌بینی نمایند. پژوهش‌ها نشان داده آن دسته از ویژگی‌های خاک که مرتبط با ویژگی‌های منافذ موجود در



شکل ۷. میانگین نتایج شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی طیفی پارامتریک برای بافت لوم (**Estimation**): مقادیر پیش‌بینی شده توسط توابع انتقالی طیفی پارامتریک، **Obs**: هدایت هیدرولیکی اشباع مشاهده‌ای، **Target**: مقادیر محاسبه شده بر اساس پارامترهای برازشی به داده‌های مشاهده‌ای، خطوط منقطع نیز انحراف معیار پیش‌بینی توابع انتقالی طیفی را نشان می‌دهند).

نتیجه‌گیری
در این پژوهش، با استفاده از داده‌های بازتاب ابرطیفی خاک اندازه‌گیری شده در مقیاس آزمایشگاهی در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر) و نیز روش رگرسیون مرحله‌ای چندگانه، توابع انتقالی طیفی پارامتریک (PSTFs) به منظور تخمین پارامترهای هیدرولیکی مدل معلم-ون‌گنوختن (α^* ، n و K_s^*) اشتقاق یافت. بر اساس نتایج به دست آمده، توابع انتقالی طیفی پارامتریک دارای دقتی متوسط در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک بودند. به طوری که، میانگین ضریب همبستگی پارامترهای تخمینی برابر با ۰/۶۳ محاسبه شد. طول موج‌های مؤثر در تخمین پارامترهای هیدرولیکی شامل باندهای ۵۵۲، ۶۸۷، ۱۲۵۲، ۱۴۱۷، ۱۸۹۷، ۲۲۲۲،

۲۳۱۷ و ۲۴۴۷ نانومتر بودند. پیش‌بینی مقدار رطوبت حجمی خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف با استفاده از توابع انتقالی طیفی پارامتریک نشان داد که توابع طیفی در پتانسیل‌های ماتریک کم (منفی‌تر) با دقت بیشتری همراه هستند. یکی از عوامل عدم اطمینان در مقادیر تخمینی توابع انتقالی طیفی پارامتریک را می‌توان به ماهیت برازشی پارامترهای هیدرولیکی و به عبارت بهتر به وجود رابطه غیرخطی بین مقدار رطوبت حجمی خاک و پتانسیل ماتریک آن نسبت داد. این ارتباط غیرخطی اثری غیرمستقیم بر مقدار بازتاب طیفی خاک دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، بازتاب طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی این پتانسیل را دارا می‌باشد که به عنوان متغیرهای ورودی منحصر در توابع انتقالی خاک

Ahuja, L.R., Naney, J.W., Green, R.E. and Nielsen, D.R. 1984. Macro-porosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 699-702.

Ben-Dor, E. and Banin, A. 1995. Near infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of American Journal*, 59: 364-372.

Bilgili, A.V., van Es, H.M., Akbas, F., Durka, A. and Hively, W.D. 2010. Visible nearinfrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi arid area of Turkey. *Journal of Arid Environments*, 74: 229-238.

Brown, D.J. 2007. Using a global VNIR soil-spectral library for local soil characterization and landscape modeling in a 2nd-order Uganda watershed. *Geoderma*, 140: 444-453.

Carsel, R.F. and Parish, R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24:755-769.

Clark, R.N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz, A.N. (Ed.), *Remote Sensing for Earth Sciences. Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., Toronto, pp. 3-58.

Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A. and Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95: 12653-12680.

Cohen, M., Mylavarapu, R.S., Bogrekcı, I., Lee, W.S. and Clark, M.W. 2007. Reflectance spectroscopy for routine agronomic soil analyses. *Soil Science*, 172: 469-485.

Dardanne, P., Sinnaeve, G. and Baeten, V. 2000. Multivariate calibration and chemometrics for near infrared spectroscopy: which method?. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 8: 229-237.

Dematte, J.A.M., Sousa, A.A., Alves, M.C., Nanni, M.R., Fiorio, P.R. and Campos, R.C. 2006. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. *Geoderma*, 135: 179-195.

Gaffey, S.J. 1986. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near-infrared (0.35-2.55 μm): Calcite, aragonite and dolomite. *American Mineralogist*, 71: 151-162.

Genot, V., Colinet, G., Bock, L., Vanvyve, D., Reusen, Y. and Dardenne, P. 2011. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19: 117-138.

Ghorbani Dashtaki, Sh., Homae, M. and Khodaberdiloo, H. 2010. Derivation and

در نظر گرفته شود. اگرچه به منظور استفاده از این توابع در دیگر مناطق، به دلیل تغییرپذیری ویژگی‌های خاک نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی توابع اشتقاق یافته است.

منابع مورد استفاده

بابائیان، ا.، همایی، م. و نوروزی، ع.ا. ۱۳۹۲. اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در گستره Vis-NIR-SWIR به منظور تخمین نگهداشت آب در خاک. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۳: ۲۷-۴۱.

خداوردیلو، ح. و همایی، م. ۱۳۸۱. اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۱: ۳۶-۴۶.

فرخیان فیروزی، ا. و همایی، م. ۱۳۸۴. ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک‌های گچی. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۶(۲۴): ۱۲۹-۱۴۲.

فرخیان فیروزی، ا. و همایی، م. ۱۳۸۲. برآورد پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های گچی با استفاده از توابع انتقالی. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۶: ۵۷-۷۳.

قربانی دشتکی، ش. و همایی، م. ۱۳۸۱. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۲: ۱-۱۶.

قربانی دشتکی، ش. و همایی، م. ۱۳۸۳. برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای. *علوم کشاورزی*، ۴(۱۰): ۱۵۷-۱۶۶.

قربانی دشتکی، ش. و همایی، م. ۱۳۸۶. برآورد پارامترهای برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک با استفاده از توابع انتقالی. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱(۱): ۲۱-۳۰.

مطلبی، ا.، همایی، م. و پذیرا، ا. ۱۳۸۶. برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک‌های رسی با استفاده از توابع انتقالی نقطه‌ای. *علوم کشاورزی*، ۱۳(۲): ۳۴۹-۳۶۵.

مطلبی، ا.، همایی، م.، زارعی، ق. و محمودی، ش. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر آهک بر ویژگی‌های رطوبتی خاک‌های سری گرمسار با استفاده از توابع انتقالی. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۴(۳): ۴۲۶-۴۳۹.

نویبان، م.، لیاقت، ع. و همایی، م. ۱۳۸۲. تخمین هدایت آبی اشباع با استفاده از توابع انتقالی. *تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۲: ۱-۱۶.

- collection. Soil Science Society of America Journal, 67:1093-1102.
- 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.
- Santra, P., Sahoo, R.N., Das, B.S., Samal, R.N., Pattanaik, A.K. and Gupta, V.K. 2009. Estimation of soil hydraulic properties using proximal spectral reflectance in visible, near-infrared, and shortwave-infrared (VIS-NIR-SWIR) region. *Geoderma*, 152: 338-349.
- Savvides, A., Corstanje, R., Baxter, S.J., Rawlins, B.J. and Lark, R.M. 2010. The relationship between diffuse spectral reflectance of the soil and its cation exchange capacity is scale dependent. *Geoderma*, 154: 353-358.
- Simunek, J., Van Genuchten, M.T. and Sejna, M. 2005. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media. University of California – Riverside Research Reports, 240 pp.
- Somers, B., Gysels, V., Verstraeten, W.W., Delalieux, S. and Coppin, P. 2010. Modelling moisture-induced soil reflectance changes in cultivated sandy soils: a case study in citrus orchards. *European Journal of Soil Science*, 61: 1091-1105.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M. and Wetterlind, J. 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. In Donald L. Sparks, editor: *Advances in Agronomy*, Vol. 107, Burlington: Academic Press, 2010, pp. 163-215.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G. and van Genuchten, M.Th. 2010. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten-Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal*, 9: 795-820
- Viscarra Rossel, R.A. and Behrens, T. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158:46-54.
- Viscarra Rossel, R.A.V. 2008. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90: 72-83.
- Viscarra Rossel, R. A. and McBratney, A. B. 1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. *Geoderma*, 85: 19-39.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and Skjemstad, J.O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use Management*, 26: 68-74.
- 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*, 148:141-148.
- Homae, M. and A. Farrokhan Firouzi. 2008. Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 219-227.
- Islam, K., Singh, B., Schwenke, G. and McBratney, A. B. 2004. Evaluation of vertosol soil fertility using ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. In B. Singh (Ed.), *SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand soil conference*. Symposium 4: Emerging soil analytical techniques in the laboratory and the field. Sydney, Australia: University of Sydney.
- Janik, L.J., Forrester, S.T. and Rawson, A. 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97:179-188.
- 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*, 71:507-514.
- Khodaverdilo, H., Homae, M., van Genuchten, M.T. and Ghorbani Dashtaki, S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- Kodaira, M. and Shibusawa, S. 2013. Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. *Geoderma*, 199: 64-79.
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Madeira Netto, J. and Robbez-Masson, J.M. 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field, and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing and Environment*, 112 (3): 825-835.
- Minasny, B., Mc Bratney, A.B., Tranter, G. and Murphy, B.W. 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: 960-97.
- Mualem, Y. 1976. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522.
- Nemes, A., Schaap, M.G. and Wösten, J.H.M. 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data

- Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. *Vadoze Zone Journal*, 8(1): 86-95.
- Workman, J. 2000. *Handbook of Organic Compounds: NIR, IR, Raman, and UV-Vis Spectra Featuring Polymers and Surfactants*, Vol. 1, Academic Press, pp. 77-197.
- combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59-75.
- Wang, Q., Li, L. and Chen, X. 2012. Modeling salinity effects on soil reflectance under various moisture conditions and its inverse application: A laboratory experiment. *Geoderma*, 170:103-111.
- Weynants, M., Vereecken, H. and Javaux, M. 2009. Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions:



ISSN 2251-7480

Deriving and validating parametric spectrotransfer functions for estimating soil hydraulic properties in VIS-NIR-SWIR range

Ebrahim Babaeian¹, Mehdi Homaei^{2*} and Ali Akbar Norouzi³

- 1) Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, 14116-336, Tehran, Iran
2*) Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, 14116-336, Tehran, Iran
Corresponding author email: mhomaei@modares.ac.ir
3) Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Institute (SCWMI), Tehran, Iran

Received: 26-10-2013

Accepted: 19-03-2014

Abstract

Soil hydraulic properties are very important in hydrological cycle. The objective of this study was to explore the feasibility of estimating soil hydraulic parameters using diffused spectral reflectance data in visible, near-infrared and short-wave infra-red (350-2500 nm) ranges. Consequently, hyper-spectral reflectance of some soil samples was measured using a handheld spectroradiometer. After preprocessing the spectra, correlation between spectral data in each wavelength and Mualem van Genuchten hydraulic parameters (α^* , n and K_s^*) were explored. Using stepwise multiple regression method, parametric spectro-transfer functions (PSTFs) were derived. According to the results, the largest correlation coefficients were obtained for α^* and n at wavelengths 550 and 2300 nm, while K_s^* parameter showed maximum correlation at wavelength 1927 nm. The parametric STFs showed similar results for α^* ($R=0.54$) and n ($R=0.58$). The best results were obtained for K_s^* parameter with R values equal to 0.76. The parametric STFs provided mean RMSR values of $0.017 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for all the pressure heads. Although the performance for MvG parameters was not very high, this approach can be considered as a novel application of soil spectroscopy and might be used as a useful indirect method for estimating soil hydraulic properties.

Keywords: continuum removed spectrum; retention curve; saturated hydraulic conductivity; spectral reflectance