

اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در گستره VIS-NIR-SWIR به‌منظور تخمین نگهداشت آب در خاک**

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

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

(۲*) استاد گروه خاکشناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ایران؛

نویسنده مسئول مکاتبات: mhomaee@modares.ac.ir

(۳) استادیار؛ بخش سنجش از دور؛ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری؛ تهران؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۱۳

چکیده

توابع پارامتریک نگهداشت آب در خاک از پارامترهای مهم برای مدل‌های حفاظت آب و خاک می‌باشند. هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از اطلاعات طیفی خاک به منظور اشتقاق توابع انتقالی طیفی برای برآورد مقدار نگهداشت آب در خاک بود. از این‌رو، بازتاب ابرطیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۵۰-۳۵۰ نانومتر) با استفاده از دستگاه اسپکترورادایومتر اندازه‌گیری و پس از انجام (پیش)پردازش‌های لازم، همبستگی بین باندها با مقدار رطوبت خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک ۱۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰-، ۵۰۰۰-، ۳۰۰۰- و ۳۳۰- سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. سپس توابع انتقالی به روش‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و PLSR توأم با نمونه‌برداری مجدد (Bagging-PLSR) پی‌ریزی و تحت عنوان توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای (PSTFs) نامگذاری شدند. نتایج نشان داد توابع انتقالی طیفی توانایی قابل قبولی برای برآورد مقدار نگهداشت آب در خاک دارند. توابع انتقالی طیفی حاصل از روش PLSR دارای دقت نسبتاً بیشتری ($RMSE=0.012-0.022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) در مقایسه با توابع بدست آمده از روش Bagging-PLSR ($RMSE=0.012-0.029 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) برای برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک در هر یک از پتانسیل‌های ماتریک خاک بودند. از طرفی، در هر دو روش مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک ۱۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰- و ۵۰۰۰- با دقت بیشتری نسبت به مقدار رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۳۰۰۰-، ۱۰۰۰- و ۳۳۰- سانتی‌متر برآورد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توابع انتقالی طیفی می‌توانند به عنوان یکی از روش‌های غیر مستقیم برای مطالعه وضعیت نگهداشت آب در خاک به ویژه در مکش‌های بالاتر مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی؛ توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای؛ نگهداشت آب در خاک

مقدمه

به‌منظور مطالعه رفتار و حرکت آب در خاک، انتقال املاح و آلاینده‌ها، انتقال گرما و جابجایی گازها در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، استفاده از توابع انتقالی خاک (PTFs)^۲ است (خداوردی‌لو و همایی، ۱۳۸۱؛

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع/غیراشباع خاک) به عنوان مشخصه‌های ورودی مهم بسیاری از مدل‌ها و

** این مقاله بر گرفته از رساله دکتری گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت

مدرس می‌باشد.

^۲ PedoTransfer Functions (PTFs)

استفاده از روش‌های غیر مخرب همچون پرتونگاری، اشعه ایکس و پلاریزاسیون طیفی، استفاده از روش‌های نوین داده‌کاوی از دیگر پیشنهادات آنها می‌باشد.

طی چند دهه اخیر، مطالعاتی چند در زمینه استفاده از انعکاس طیفی^۱ خاک در دامنه‌های طیفی مرئی (VIS)، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (SWIR) (طول موج بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) برای تخمین ویژگی‌های خاک انجام شده است. اما تمرکز این تحقیقات بر مطالعه ویژگی‌های مبنایی خاک نظیر توزیع اندازه ذرات، مقدار ماده آلی و هدایت الکتریکی خاک بوده است (Henderson *et al.*, 1989; Ben-Dor and Banin, 1995a;)
Dunn *et al.*, 2002; Reeves *et al.*, 2002; Stevens *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2006; Lagacherie *et al.*, 2008; نوری و همکاران (الف)، ۱۳۹۱؛ نوری و همکاران (ب)، ۱۳۹۱). به‌طور عمده، بازتاب طیفی خاک متأثر از برهم‌کنش رطوبت، بافت، ساختمان و مقدار ماده آلی خاک با یکدیگر است. خاک شنی نسبت به خاک رسی رطوبت کمتری در خود نگه می‌دارد، بنابراین خاک‌های درشت بافت بازتاب طیفی بالاتری نسبت به خاک‌های ریز بافت دارند. تحقیقات نشان داده با استفاده از بازتاب طیفی خاک در گستره مادون قرمز نزدیک می‌توان مقدار رطوبت وزنی خاک را با دقت مناسب برآورد نمود (Chang *et al.*, 2001;)
Narayanan *et al.*, 1993). در مطالعه‌ای Narayanan و همکاران (۱۹۹۳) مقدار بازتاب طیفی خاک را در رطوبت‌های حجمی و وزنی ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم در گستره ۹۰۰-۱۱۰۰ نانومتر مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد مقدار رطوبت وزنی خاک با دقت بالاتری در مقایسه با مقدار رطوبت حجمی خاک برآورد می‌شود.

در حال حاضر تنها سه پژوهش در زمینه استفاده از انعکاس طیفی خاک و ارتباط آن با ویژگی‌های هیدرولیکی آن انجام شده است (Thine *et al.*, 2004; Janik *et al.*,)
2009; Santra *et al.*, 2007). در هیچ‌کدام از این مطالعات، توابع انتقالی طیفی ارائه نگردیده است. Thine و همکاران

قربانی دشتکی و همایی، ۱۳۸۱؛ نوایان و همکاران، ۱۳۸۲؛ فرخیان و همایی، ۱۳۸۳؛ قربانی دشتکی و همایی، ۱۳۸۳؛ فرخیان و همایی، ۱۳۸۴؛ قربانی دشتکی و همایی، ۱۳۸۶؛ مطلبی و همکاران، ۱۳۸۶؛ مطلبی و همکاران (۱۳۸۹). از جمله مشخصه‌های معمول و پرکاربرد خاک در اشتقاق PTFs می‌توان به توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک اشاره نمود (Homaei and Farrokhian Firouzi, 2008; Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2009; Zarei *et al.*, 2009; Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2010; Zarei *et al.*, 2010; Khodaverdiloo *et al.*, 2011).
اخیراً برخی محققان از متغیرهای توپوگرافی و پوشش گیاهی در ترکیب با مشخصه‌های مبنایی خاک برای توسعه و ارتقای توابع انتقالی خاک استفاده کرده‌اند (Pachepsky *et al.*, 2001; Leij *et al.*, 2004; Sharma *et al.*, 2006). آنجایی‌که هر متغیر با یک عدم قطعیت ذاتی توأم است، افزایش تعداد پارامترهای ورودی باعث تجمع عدم قطعیت‌ها و به‌دنبال آن منجر به کاهش دقت توابع انتقالی می‌شود. اخیراً Vereecken و همکاران (۲۰۱۰) مروری جامع بر نوع متغیرهای ورودی و دقت توابع انتقالی ارائه شده در چند دهه اخیر داشتند. نتایج آنها نشان داده 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، وابسته به مقیاس بودن و عدم وجود پایگاه داده یکنواخت و منسجم در مورد خاک‌های دنیا مواجه است. پیشنهادهایی که این محققان در زمینه توسعه و بهبود دقت توابع انتقالی خاک ارائه داده‌اند شامل ایجاد یک پایگاه جامع و به‌روز از داده‌های خاک (ویژگی‌های مبنایی و هیدرولیکی خاک) به‌طوری‌که اثرات مقیاس و استفاده از یک روش استاندارد اندازه‌گیری در آن لحاظ شده باشد.

^۱ Proximal Spectral Reflectance

حال حاضر، چنین رویکردی برای نخستین بار است که در دنیا مطرح می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی بخشی از حوزه آبخیز سفیدرود و زیر حوزه آبخیز زنجانرود با وسعت ۲۵۳ کیلومتر مربع می‌باشد که در طول جغرافیایی $20^{\circ} 48'$ و عرض جغرافیایی $55^{\circ} 36'$ واقع شده است. توزیع بارش در منطقه یکنواخت و متوسط سالانه آن ۳۲۷ میلی‌متر است. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی منطقه شامل زیریک و مزیک است. تیپ غالب اراضی منطقه شامل فلات و تراس‌های فوقانی (۱۳٪)، تپه‌های کم ارتفاع (۳۰٪) و دشت‌های دامنه‌ای (۵۷٪) و کاربری فعلی اراضی شامل کشاورزی آبی (۳/۲٪)، دیم (۷۱٪)، مرتع (۲۵٪) و اراضی متفرقه (۰/۸٪) است. از نظر بافت خاک، خاک‌های غالب منطقه لومی رسی و لوم بوده و در زیر گروه بزرگ Typic Calcixerepts طبقه‌بندی می‌شوند.

لذا مطابق شکل ۱، تعداد ۲۰۰ نمونه خاک در مقیاس حوزه آبخیز (داده‌های واسنجی) و ۴۰ نمونه در مقیاس مزرعه (داده‌های اعتبارسنجی) از دو عمق خاک (۱۰-۰ و ۳۰-۱۰ سانتیمتر) به صورت نمونه‌برداری مرکب در یک شعاع ۱۰ متری جمع‌آوری و پس از هوا خشک از الک ۲ میلیمتر عبور داده شد. از آنجا که تنوع بافتی خاک اثر متفاوت و قابل توجهی بر رفتار طیفی خاک دارد (Viscarra Rossel et al., 2006) و نیز خاک‌های با بافت مختلف ویژگی‌های هیدرولیکی متفاوتی دارند (Vereecken, 1995)، وجود تنوع بافتی خاک دارای اهمیت است. در شکل ۲، تنوع کلاس‌های بافتی خاک‌های منطقه و فراوانی آن‌ها نشان داده شده است.

(۲۰۰۴) با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)^۱ و برقراری ارتباط بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و انعکاس طیفی در ناحیه مادون قرمز خیلی نزدیک (VNIR)، تخریب خاک را مورد بررسی قرار دادند. همچنین Janik و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از انعکاس طیفی خاک در ناحیه مادون قرمز میانی (MIR) و روش PLSR، مقدار رطوبت وزنی خاک را تخمین زده‌اند. به‌عنوان نوآوری این پژوهش، 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 نمود. بنابراین، مشابه با توابع انتقالی خاک، می‌توان از انعکاس طیفی خاک برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده و توابع جدیدی با عنوان توابع انتقالی طیفی (STFs)^۲ تعریف کرد. برای بومی‌سازی این توابع در هر منطقه، نیاز به در اختیار داشتن پایگاه داده وسیع مشتمل بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و انعکاس طیفی مرتبط با آن‌ها است که اندازه‌گیری‌های طیفی نیز به مراتب آسان‌تر، دقیق‌تر، کم‌هزینه‌تر، غیر مخرب، تکرارپذیر و مشتمل بر یک روش استاندارد اندازه‌گیری است که اثر ساختمان خاک و مینرالوژی رس‌ها نیز در بازتاب طیفی خاک اعمال گردیده است.

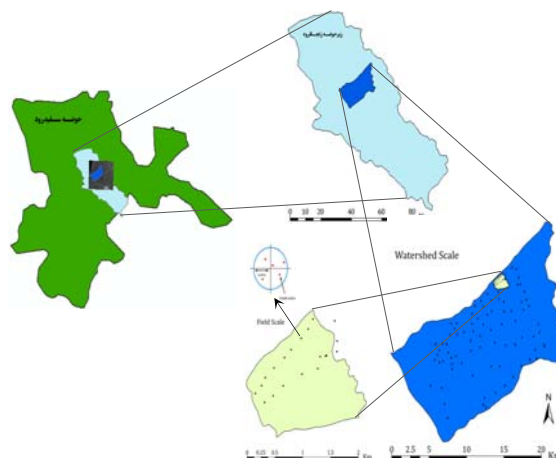
بنابراین هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از بازتاب طیفی خاک به منظور برآورد مشخصه‌های نگهداشت آب در خاک در پتانسیل‌های ماتریک مختلف و نیز استفاده از روش‌های پیشرفته محاسبات آماری به منظور اشتقاق توابع انتقالی طیفی نقطه-ای (PSTFs)^۳ بود. برای دستیابی به این هدف و نیز آن‌که توابع اشتقاق یافته بتوانند معرف تمامی کلاس‌های بافتی خاک باشند، منطقه‌ای با اقلیم خشک و نیمه خشک واقع در بخشی از زیرحوزه آبخیز زنجانرود انتخاب گردید. در

¹ Partial Least Square Regression

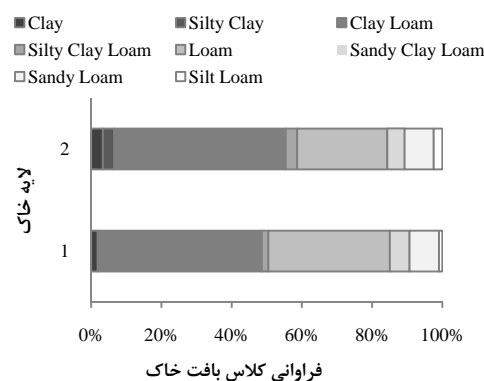
² Spectrotransfer Functions

³ Point SpectroTransfer Functions

دامنه مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) با روش‌های استاندارد و در تاریکخانه اندازه‌گیری شد. به‌منظور کاهش خطا حاصل از شرایط محیطی (رطوبت، دما، غبار) در حین طیف‌سنجی، از هر نمونه خاک ۲۵ اسکن تهیه و مجموعاً ۵۰۰۰ منحنی طیفی در مقیاس حوزه آبخیز و ۱۰۰۰ منحنی طیفی در مقیاس مزرعه ثبت و اقدام به ایجاد یک کتابخانه طیفی از خاک‌های منطقه شد. در شکل ۳، میانگین و انحراف معیار تمامی طیف‌های خاک در دو مقیاس مورد مطالعه ترسیم شده است. میانگین منحنی‌های طیفی هر یک از نمونه‌های خاک با نرم افزار ViewSpec محاسبه و در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌دلیل وجود آشفتگی‌های زیاد طیفی^۱ در طول موج‌های ۴۰۰-۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۴۰۰، این محدوده از تمامی طیف‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفت. همچنین، به‌منظور حذف هر چه بیشتر این آشفتگی‌ها در طیف‌های خاک (همچون رفتار غیرخطی باندها، نرمال‌سازی طیف‌ها، فیلتر و بارزسازی طیفی) و ارتقای کیفی داده‌ها، از الگوریتم‌های مناسب پیش‌پردازش موجود در برنامه ParLeS 3.1 استفاده شد (Viscarra Rossel, 2008).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری خاک در مقیاس مزرعه و حوزه آبخیز

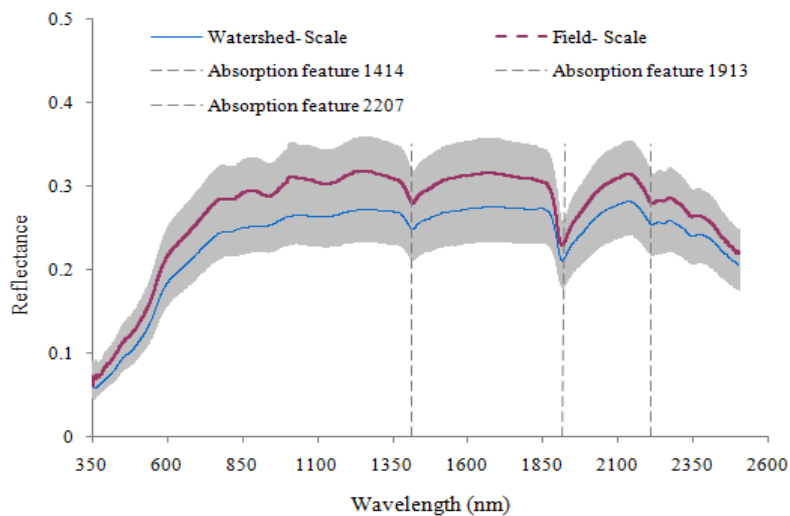


شکل ۲- توزیع فراوانی کلاس‌های بافت خاک در عمق ۱۰-۳۰ (لایه ۱) و ۱۰-۱۰۰ (لایه ۲) سانتی‌متر

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. مقدار نگهداشت آب در خاک نیز به ازای پتانسیل‌های ماتریک مشخص، به کمک دستگاه صفحات فشاری در پتانسیل‌های ماتریک -۳۳۰، -۱۰۰۰، -۳۰۰۰، -۵۰۰۰، -۱۰۰۰۰ و -۱۵۰۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (Vereecken *et al.*, 2010).

به‌منظور اندازه‌گیری بازتاب طیفی نمونه‌های خاک، از دستگاه اسپکترورادیومتر زمینی (FieldSpec@3, ASD, FR, USA) استفاده شد. نمونه‌های خاک هوا خشک، از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد و منحنی‌های طیفی آن‌ها در

^۱ Noise



شکل ۳- میانگین و انحراف معیار منحنی‌های بازتاب طیفی خاک در دو مقیاس حوزه آبخیز و مزرعه. خطوط قائم باندهای جذبی به دلیل وجود آب هیگروسکوپی و آب موجود در شبکه رس‌ها در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۳ و ۲۲۰۷ نانومتر را می‌دهند.

فاکتور مناسب اتخاذ شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Viscarra Rossel, 2008).

$$b = W(P'W)^{-1}q \quad (۳)$$

$$b_0 = \bar{y} - \bar{x}'b \quad (۴)$$

$$\hat{y}_i = b_0 + x_i'b \quad (۵)$$

که در آن، x_i باند طیفی است.

روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی توأم با نمونه‌برداری مجدد (Bagging-PLSR)

روش نمونه‌برداری مجدد مورد استفاده در این روش، روش نمونه‌گیر Bootstrap می‌باشد. در این روش به‌طور تصادفی اقدام به نمونه‌برداری از داده‌ها شده و سپس جایگزینی مجدد داده‌ها از طریق همان داده نمونه‌برداری شده صورت می‌گیرد. اگر سری داده‌های واسنجی به صورت $Z_N = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ در نظر گرفته شود که در آن $z_n = (x_n, y_n)$ و N تعداد داده‌ها باشد و نمونه‌برداری از این سری B مرتبه تکرار شود ($b = 1, 2, \dots, B$)، تعداد B سری داده Bootstrap شده (Z_N^{*b}) تشکیل خواهد شد. هر یک از سری‌های حاصل حدود ۶۳٪ داده‌ها را پوشش داده و منجر به ایجاد سری‌هایی هم‌تا و منطبق با تعداد داده‌های اولیه

می‌شود. سپس مناسب‌ترین مدل PLSR به هر یک از این

روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)^۱

در این روش، متغیر پاسخ (y) به واسطه متغیرهای پنهان به ماتریس متغیرهای تخمینگر^۲ ارتباط داده می‌شود (Martens and Naes, 1989):

$$X = t_1 p'_1 + \dots + t_a p'_a + E_a \quad (۱)$$

$$y = t_1 q_1 + \dots + t_a q_a + f_a$$

که در آن، t بردار رتبه‌ها^۴ (رابطه ۲)، p' بارگذاری‌های طیفی^۵، q بارگذاری‌های متغیرهای خاک، E و f به ترتیب خطای باقیمانده^۶ متغیرهای تخمینگر و پاسخ حاصل از اثر تخمینی فاکتور a ام ($a = 1, 2, \dots, A$) است.

$$t_a = X_{a-1} \cdot w_a \quad (۲)$$

در رابطه ۲، w_a ضریب وزنی مقیاس‌سازی شده (c : فاکتور مقیاس) است. $w_a = c X'_{a-1} y_{a-1}$

ضرایب مدل رگرسیون (b و b_0) به کمک روابط ۳ و ۴ محاسبه و در مدل تخمینگر (رابطه ۵) بر پایه تعداد

^۱ Partial Least Square Regression

^۲ Response

^۳ Predictor

^۴ Scores

^۵ Spectral Loadings

^۶ Residual

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y'_i - y_i) \quad (11)$$

که در آن، y'_i مقادیر تخمینی، y_i مقادیر مشاهداتی، \bar{y} میانگین مشاهدات، N تعداد داده‌ها و m تعداد فاکتورهای مدل می‌باشد (نوری و همکاران، ۱۳۹۱ (الف)؛ نوری و همکاران؛ ۱۳۹۱ (ب)).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و بازتاب طیفی خاک

بر اساس توزیع کلاس‌های بافتی خاک‌های منطقه، تعداد هشت کلاس بافتی خاک شناسایی شد (جدول ۲). در جدول ۱ نتایج آمار توصیفی اندازه ذرات خاک به همراه سایر ویژگی‌های و نیز مقدار رطوبت خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک ۳۳- تا ۱۵۰۰۰- سانتیمتر ارائه شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، افزون بر تغییرات زیاد درصد شن و رس، دامنه جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک نیز وسیع و میانگین آن‌ها برابر ۱/۴۵ و ۲/۷۵ گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمد. این تغییرات عمدتاً به دلیل وجود تنوع در تیپ اراضی و شیب منطقه است. مقدار متوسط کربن آلی خاک‌ها نیز برابر ۰/۶۴ درصد اندازه‌گیری شد، که به نظر می‌رسد این مقدار تأثیر چندانی بر رفتار طیفی خاک‌ها نداشته باشد (Viscarrá Rossel et al., 2006). تمامی ویژگی‌های خاک از نظر وضعیت نرمال بودن به روش کلموگروف-اسمیرنوف در سطح ۵ درصد مورد آزمون قرار گرفت. داده‌های خاک مربوط به مقیاس حوزه آبخیز به‌منظور اشتقاق توابع انتقالی طیفی (داده‌های واسنجی مدل) و داده‌های خاک در مقیاس مزرعه به‌منظور دقت‌آزمایی توابع (داده‌های اعتبارسنجی مدل) مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۳ میانگین و گستره تغییرات منحنی‌های بازتاب طیفی خاک در دامنه مرئی (VIS)، مادون قرمز

سری‌های جدید برازش داده شده و مقادیر پیش‌بینی $(\hat{f}^{*b}(y))$ بدست می‌آید. در نهایت با استفاده از رابطه ۶، مقادیر تخمینی متغیر مورد نظر محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه ۶، مقادیر تخمینی متغیر مورد نظر محاسبه می‌شود.

$$\hat{f}_{bag}(y) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{f}^{*b}(y) \quad (6)$$

بنابراین در این مطالعه، اشتقاق توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای به‌منظور برآورد میزان نگهداشت آب در خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک مشخص، به مبنای دو روش PLSR و Bagging-PLSR انجام گرفت.

دقت آزمایی

به‌منظور ارزیابی دقت در هر یک از مراحل فرآیند تخمین، از آماره‌های مختلفی استفاده شد. این آماره‌ها شامل ضریب تبیین (r^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱ (به‌منظور انتخاب تعداد مناسب فاکتورها)، نسبت انحراف دقت (RPD)^۲، انحراف معیار (SD) و میانگین انحراف خطا (MBE)^۳ می‌باشد (Verecken et al., 2010; Viscarra Rossel, 2008). بر اساس مطالعات، یکی از متداول‌ترین شاخص‌های ارزیابی دقت در مطالعات طیف‌سنجی، شاخص RPD می‌باشد (Chang et al. 2001; Russell, 2003; Zarei et al., 2009).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y'_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2} \quad (8)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \times 100\% \quad (9)$$

¹ Root Mean Square Error Cross Validation

² Ratio Performance Deviation

³ Mean Bias Error

بازتاب طیفی خاک‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در حقیقت این طول موج‌ها، طول موج‌های جذبی نام داشته و مربوط به جذب آب بر روی سطوح رس‌ها (طول موج ۱۴۱۴)، پیوندهای H-O-H ملکول‌های آب حبس شده در شبکه رس‌ها (طول موج ۱۹۱۳) و پیوندهای OH با فلزات Al، Fe و Si (طول موج ۲۲۰۷) است (Clark et al., 1990). هر چه مقدار رس خاک بیشتر باشد، عمق باندهای جذبی (فرورفتگی‌ها) بیشتر خواهد بود. وجود چنین باندهای جذبی توسط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Ben dor et al., 1999; Santra et al., 2009).

نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (SWIR) در دو مقیاس مزرعه و حوزه آبخیز ارائه شده است. منحنی میانگین طیف‌های خاک در مقیاس مزرعه بالاتر از منحنی میانگین طیفی در مقیاس حوزه آبخیز قرار گرفته است. این وضعیت می‌تواند به دلیل pH، مقدار ماده آلی و هدایت الکتریکی پایین داده‌های مزرعه نسبت به حوزه آبخیز باشد که باعث افزایش بازتاب در دامنه NIR و SWIR شده است (Santra et al., 2009) و نشان دهنده آن است که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثر متقابل پیچیده‌ای بر رفتار طیفی خاک دارند. بر پایه شکل ۳، با افزایش طول موج از دامنه مرئی، مقدار بازتاب طیفی خاک به تدریج افزایش یافته و حداکثر به حدود ۳۵ درصد می‌رسد. از دیگر طرف، در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۳ و ۲۲۰۷ نانومتر مقادیر

جدول ۱- آمار توصیفی برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و مقدار رطوبت حجمی خاک در پتانسیل‌های

ماتریک معین مورد استفاده در فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل

| ویژگی خاک | داده‌های واسنجی مدل | | | داده‌های اعتبارسنجی مدل | | |
|--|---------------------|--------|--------------|-------------------------|--------|--------------|
| | حداقل | حداکثر | انحراف معیار | حداقل | حداکثر | انحراف معیار |
| فراوانی ذرات خاک (%) | | | | | | |
| 2000 - 50 μm | ۱۳ | ۶۳ | ۰/۱۰ | ۱۶ | ۴۸ | ۰/۰۷ |
| < 2 μm | ۱۵ | ۴۵ | ۰/۰۶ | ۲۷ | ۵۰ | ۰/۰۵ |
| ρ_b (gr cm^{-3}) | ۱/۲ | ۱/۷ | ۰/۱۰ | ۱/۳ | ۱/۶ | ۰/۱۲ |
| ρ_p (gr cm^{-3}) | ۲/۶ | ۲/۹ | ۰/۰۴ | ۲/۶ | ۲/۸ | ۰/۰۵ |
| pH (-) | ۷/۰ | ۷/۹ | ۰/۱۹ | ۷/۲ | ۷/۶ | ۰/۰۷ |
| هدایت الکتریکی (dS.m^{-1}) | ۰/۲۴ | ۷/۳ | ۰/۵۲ | ۰/۴۴ | ۲/۱ | ۰/۳۳ |
| کربن آلی (%) | ۰/۰۶ | ۱/۹ | ۰/۲۶ | ۰/۰۵ | ۱/۸ | ۰/۲۳ |
| $\theta_{-330 \text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) | ۰/۱۸ | ۰/۳۴ | ۰/۰۲ | ۰/۲۴ | ۰/۳۵ | ۰/۰۲ |
| $\theta_{-1000 \text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) | ۰/۱۴ | ۰/۲۷ | ۰/۰۲ | ۰/۱۹ | ۰/۳۴ | ۰/۰۲ |
| $\theta_{-3000 \text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) | ۰/۱۲ | ۰/۲۶ | ۰/۰۲ | ۰/۱۶ | ۰/۲۲ | ۰/۰۲ |
| $\theta_{-5000 \text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) | ۰/۱۱ | ۰/۲۴ | ۰/۰۲ | ۰/۱۵ | ۰/۲۱ | ۰/۰۱ |
| $\theta_{-10000 \text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) | ۰/۰۹ | ۰/۲۳ | ۰/۰۲ | ۰/۱۳ | ۰/۲۱ | ۰/۰۱ |
| $\theta_{-15000 \text{ cm}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) | ۰/۰۹ | ۰/۲۲ | ۰/۰۲ | ۰/۱۳ | ۰/۱۸ | ۰/۰۱ |

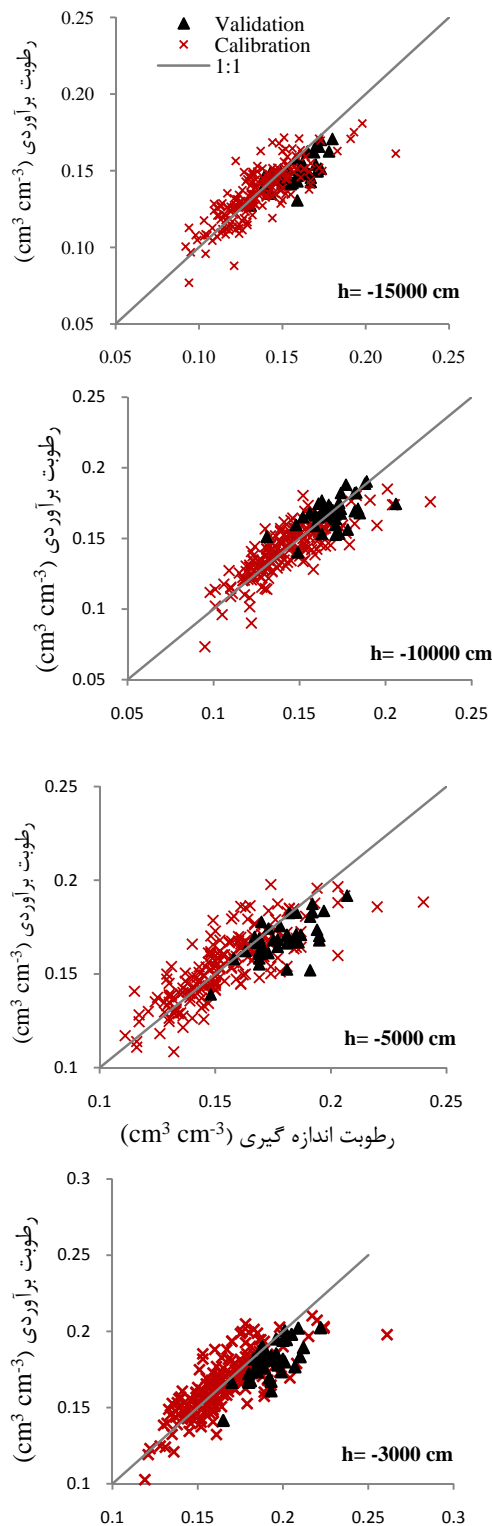
ρ_b : جرم ویژه ظاهری خاک، ρ_p : جرم ویژه حقیقی خاک، pH: واکنش خاک، θ : رطوبت حجمی خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک معین

اشتقاق توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای

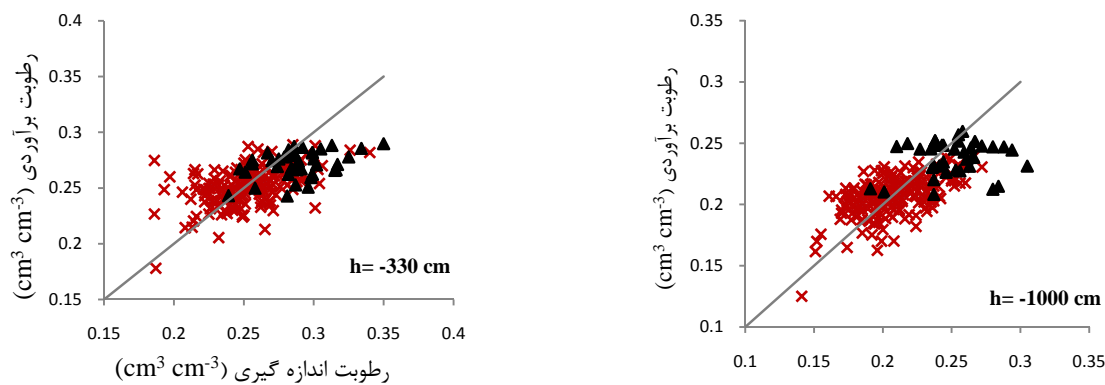
پیش از واسنجی مدل و اشتقاق توابع طیفی، اثر روش‌های مختلف پیش پردازش و تلفیق آنها بر روی نتایج واسنجی مدل مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج آماره‌های ارزیابی، حذف اثرات پخش نور محیط^۱ بر طیف‌ها و جابجایی‌های طیفی به کمک تبدیل SNV توأم با حذف روند به روش موجک^۲ و برای کاهش اثرات تصادفی آشفته‌گی‌ها و شکستگی‌های طیفی^۳ به منظور افزایش نسبت سیگنال به نویز، از فیلتر موجک^۴ استفاده شد (Viscarra Rossel, 2008).

در شکل ۴، نمودار پراکنش مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی مدل PLSR در برآورد رطوبت حجمی خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک معین ارائه شده است. بر اساس این شکل، داده‌های واسنجی (به‌ویژه در پتانسیل‌های ماتریک ۳۰۰۰-، ۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰- و ۱۵۰۰۰- سانتیمتر) از توزیع نسبتاً مطلوبی در اطراف خط ۱:۱ برخوردار است. انتخاب تعداد فاکتورهای مناسب روش PLSR برای اشتقاق توابع انتقالی طیفی با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل انجام شد. به‌طوری‌که تعداد فاکتورهای بهینه در روش PLSR بین ۷ تا ۱۴ با RMSE بین $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ و 0.12 بدست آمد. مناسبترین مدل‌های PLSR برای برآورد توابع طیفی نقطه‌ای در پتانسیل‌های ماتریک ۱۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰-، ۵۰۰۰-، ۳۰۰۰-، ۱۰۰۰- و ۳۳۰- سانتیمتر به ترتیب دارای ۱۲، ۱۰، ۱۴، ۷ و ۹ فاکتور بود. همچنین بر اساس جدول ۲، به ازای پتانسیل‌های ماتریک ۱۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰-، ۵۰۰۰-، ۳۰۰۰-، ۱۰۰۰- و ۳۳۰- سانتیمتر، مقادیر RMSE به ترتیب برابر 0.12 ، 0.12 ، 0.13 ، 0.20 و $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بدست آمد. بنابراین بیشترین دقت روش PLSR در برآورد

θ_{-15000} و کمترین دقت در برآورد θ_{-330} محاسبه شد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش تعداد فاکتورهای تخمین‌گر مدل، لزوماً منجر به افزایش دقت تخمین نمی‌شود (Sharma et al., 2006).



¹ Light scatter and baseline correction
² Standard normal variate (SNV) with Wavelet detrending
³ Noise and Smoothing
⁴ Wavelet filter



شکل ۴- نمودار دقت نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مقادیر مختلف رطوبت خاک با ازای پتانسیل های ماتریک معین (h) منتج از روش PLSR

شد. بنابراین بر اساس این شاخص و داده‌های واسنجی می‌توان گفت توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای به منظور برآورد رطوبت‌های θ_{-15000} ، θ_{-10000} ، θ_{-5000} ، θ_{-3000} از درجه دقت خوب تا متوسط برخوردار است. این نتایج با مطالعات انجام شده توسط Minasny و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد.

نتایج مطالعات نشان داده استفاده از روش Bagging-PLSR در بیشتر موارد منجر به افزایش دقت مقادیر تخمینی می‌شود (Breiman, 1996; Viscarra Rossel, 2008). بر اساس جدول ۲، تعداد بهینه فاکتورهای تخمینگر روش Bagging-PLSR نیز مشابه با روش PLSR است. مقدار RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) در روش Bagging-PLSR به ازای پتانسیل‌های ماتریک -10000 ، -15000 ، -5000 ، -3000 ، -1000 و -330 سانتیمتر به ترتیب برابر با $0/012$ ، $0/013$ ، $0/013$ ، $0/022$ ، $0/029$ و $0/023$ محاسبه شد. در حالی که مقدار RMSE داده‌های اعتبارسنجی مدل نتایج به نسبت بهتری را ارائه نموده است. مقادیر شاخص RPD به ازای داده‌های واسنجی در روش Bagging-PLSR نیز مشابه با روش PLSR و بین $1/20$ - $0/83$ محاسبه شد. مقدار رطوبت خاک در این روش، به ازای پتانسیل ماتریک -15000 سانتی‌متر با بیشترین دقت ($\text{RMSE}=0/012$ ، $r^2=0/76$) و در پتانسیل ماتریک -1000 سانتی‌متر با کمترین دقت ($\text{RMSE}=0/029$ ، $r^2=0/02$)

نتایج اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای حاصل از روش PLSR نیز نشان داد که پراکنش نقاط در اطراف خط ۱:۱ نسبتاً مناسب است (شکل ۴، مثلث‌های سیاه)، به طوری که مقادیر RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) به ازای نقاط θ_{-15000} ، θ_{-10000} ، θ_{-5000} ، θ_{-3000} ، θ_{-1000} و θ_{-330} به ترتیب برابر $0/012$ ، $0/011$ ، $0/014$ ، $0/023$ ، $0/021$ و $0/027$ محاسبه شد. مقدار ضریب تبیین (r^2) نیز به ازای پتانسیل‌های ماتریک فوق به ترتیب برابر با $0/33$ ، $0/44$ ، $0/24$ ، $0/02$ و $0/16$ بدست آمد (جدول ۲). بر اساس نتایج بدست آمده از داده‌های اعتبارسنجی، روش PLSR در برآورد مقدار رطوبت خاک به ازای تمامی پتانسیل‌های ماتریک قدری حالت کم برآورد (مقدار MBE بین $-0/001$ تا $-0/017$) را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توابع انتقالی طیفی حاصل از روش PLSR مقدار رطوبت خاک را در دامنه‌های خشک (-15000 و -10000 سانتیمتر) نسبت به نقاط با رطوبت متوسط و زیاد با دقت بیشتری برآورد می‌کند. بر اساس مطالعات انجام یافته، مقادیر $RPD > 2$ بیانگر دقت بسیار بالا، $2 - RPD = 1/4$ بیانگر دقت خوب تا متوسط و مقادیر $RPD < 1/4$ بیانگر دقت ضعیف فرآیند تخمین است (Chang et al. 2001; Russell, 2003). گستره مقادیر شاخص RPD به ازای داده‌های واسنجی در روش PLSR بین $1/13 - 1/72$ و به ازای داده‌های اعتبارسنجی بین $0/98 - 0/86$ محاسبه

بازتاب طیفی خاک در گستره مادون قرمز میانی قابلیت چندانی در پیش‌بینی میزان نگهداشت آب در خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک زیاد را ندارد (Tranter *et al.*, 2008). بنابراین بازتاب خاک در رطوبت‌های زیاد، از نظر کمی تنها برآوردی از رطوبت خاک را ارائه خواهد داد. مقدار رطوبت حجمی خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک کم (نقطه پژمردگی دائم) عمدتاً تحت تأثیر نوع و مقدار رس خاک است. به عبارت دیگر، مقدار رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک کم عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های سطوح جذبی رس‌ها است. در مطالعه‌ای Minasny و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند که مقدار رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک -15000 سانتیمتر توسط PTF هایی که تنها مقدار رس را در نظر می‌گیرند، بهتر برآورد می‌شود. بنابراین در رطوبت‌های کم (-15000 و -10000 سانتی‌متر)، بازتاب طیفی خاک در گستره مادون قرمز میانی برآوردهای بهتری را ارائه کرده است (جدول ۲). در پژوهشی دیگر Chang و همکاران (۲۰۰۱) و Ben-Dor و Banin (۱۹۹۵) مقدار رطوبت وزنی خاک را در مکش‌های 15000 و 31000 سانتیمتر با دقت بالایی برآورد نمودند، اما از نقطه نظر مدیریت آب در مزرعه، این برآوردها به دلیل آنکه حجم آب ذخیره شده در خاک را ارائه نمی‌کنند، چندان قابل اطمینان نخواهند بود.

برآورد شد (جدول ۲). اگرچه مقدار شاخص RPD به‌ازای داده‌های واسنجی در هر دو روش مقدار مطلوبی را نشان نمی‌دهد، اما مقادیر RMSE و نیز مقایسه مقدار آن با نتایج دیگر تحقیقات حاکی از دقت مناسب هر دو روش در این تحقیق دارد. در تحقیقی Minasny و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند مقدار رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک -15000 سانتیمتر با دقت بیشتری ($RMSE=0/022$ و $RPD=1/96$) در مقایسه با پتانسیل ماتریک -100 سانتیمتر ($RMSE=0/054$ و $RPD=0/99$) برآورد می‌شود.

در شکل ۵، به‌عنوان مقایسه نتایج دقت‌آزمایی روش‌های PLSR و Bagging-PLSR در برآورد رطوبت خاک به ازای پتانسیل‌های ماتریک معین با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی در مقیاس مزرعه ارائه شده است. بر اساس این نتایج، دو روش دقت مناسبی در تمامی پتانسیل‌های ماتریک به جز نقاط θ_{-1000} و θ_{-3000} دارد (جدول ۲). روش Bagging-PLSR نیز مشابه روش PLSR، در برآورد مقدار رطوبت خاک به ازای تمامی پتانسیل‌های ماتریک حالت کم برآورد (مقدار MBE بین $-0/003$ تا $-0/018$) را نشان می‌دهد (شکل ۵، جدول ۲). مقدار رطوبت حجمی خاک در پتانسیل‌های ماتریک متوسط و زیاد (مانند نقطه ظرفیت زراعی و نقاط نزدیک به اشباع) عمدتاً به ساختمان خاک (جرم ویژه ظاهری) بستگی دارد. نتایج برخی مطالعات حاکی از آن است که

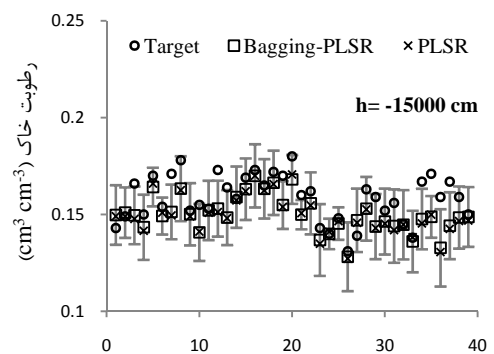
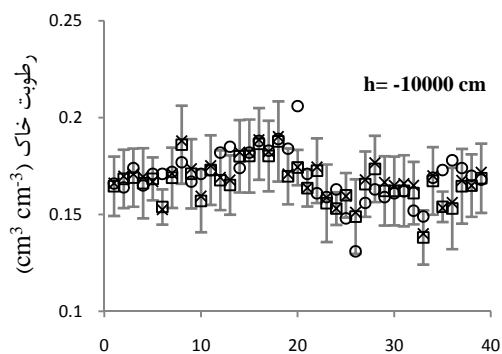
جدول ۲- نتایج آمار توصیفی و دقت‌آزمایی روش‌های PLSR و Bagging-PLSR در اشتقاق توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای

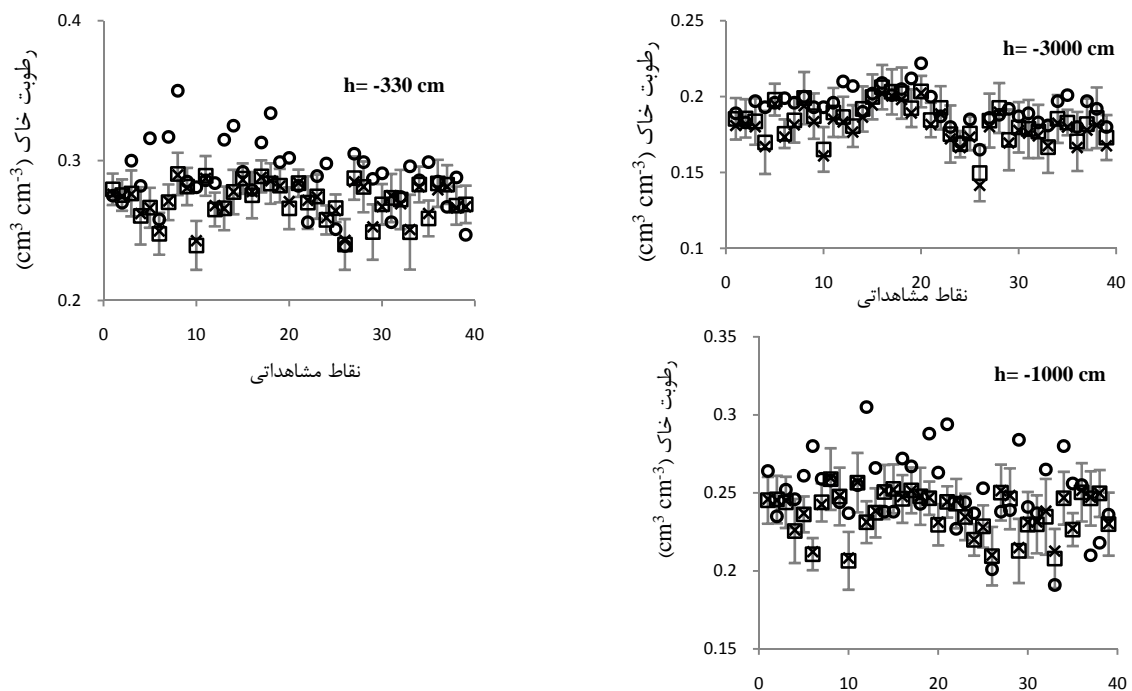
| RPD | MBE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | r^2 | تعداد فاکتورها | انحراف معیار | میانگین ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) | تعداد داده | روش اشتقاق توابع |
|------------------------------|---|--|-------|-------------------|-----------------|---|---------------|----------------------------------|
| $\theta_{-15000 \text{ cm}}$ | | | | | | | | |
| ۱/۷۲ | | ۰/۰۱۲ | ۰/۶۶ | ۱۲ | ۰/۰۱ | ۰/۱۵ | ۲۰۰ | PLSR _{Cal.} |
| ۰/۹۸ | -۰/۰۰۹ | ۰/۰۱۲ | ۰/۵۰ | | ۰/۰۱ | ۰/۱۶ | ۴۰ | PLSR _{Val.} |
| | | ۰/۰۱۲ | ۰/۶۴ | ۱۲ | ۰/۰۱ | ۰/۱۵ | ۲۰۰ | Bagging- PLSR _{Cal.} |
| ۱/۰۴ | -۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۲ | ۰/۵۳ | | ۰/۰۱ | ۰/۱۶ | ۴۰ | Bagging- PLSR _{Val.} |
| $\theta_{-10000 \text{ cm}}$ | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|-------|------|----|------|------|-----|------------------------------|
| ۱/۷۰ | | ۰/۰۱۲ | ۰/۶۵ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۰/۱۶ | ۲۰۰ | PLSR _{Cal.} |
| ۱/۱۸ | -۰/۰۰۱ | ۰/۰۱۱ | ۰/۳۳ | | ۰/۰۱ | ۰/۱۷ | ۴۰ | PLSR _{Val.} |
| | | ۰/۰۱۳ | ۰/۶۳ | ۱۰ | ۰/۰۱ | ۰/۱۶ | ۲۰۰ | Bagging-PLSR _{Cal.} |
| ۱/۲۰ | -۰/۰۰۳ | ۰/۰۱۱ | ۰/۳۷ | | ۰/۰۱ | ۰/۱۷ | ۴۰ | Bagging-PLSR _{Val.} |
| $\theta_{-5000\text{ cm}}$ | | | | | | | | |
| ۱/۶۸ | | ۰/۰۱۲ | ۰/۶۵ | ۱۴ | ۰/۰۱ | ۰/۱۷ | ۲۰۰ | PLSR _{Cal.} |
| ۰/۸۷ | -۰/۰۱۰ | ۰/۰۱۴ | ۰/۴۴ | | ۰/۰۱ | ۰/۱۸ | ۴۰ | PLSR _{Val.} |
| | | ۰/۰۱۳ | ۰/۶۳ | ۱۴ | ۰/۰۱ | ۰/۱۷ | ۲۰۰ | Bagging-PLSR _{Cal.} |
| ۰/۹۷ | -۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۲ | ۰/۴۴ | | ۰/۰۱ | ۰/۱۸ | ۴۰ | Bagging-PLSR _{Val.} |
| $\theta_{-3000\text{ cm}}$ | | | | | | | | |
| ۱/۶۲ | | ۰/۰۱۳ | ۰/۶۳ | ۱۴ | ۰/۰۱ | ۰/۱۸ | ۲۰۰ | PLSR _{Cal.} |
| ۱/۰۵ | -۰/۰۱۰ | ۰/۰۲۳ | ۰/۲۴ | | ۰/۰۲ | ۰/۱۹ | ۴۰ | PLSR _{Val.} |
| | | ۰/۰۲۲ | ۰/۲۳ | ۱۴ | ۰/۰۱ | ۰/۱۸ | ۲۰۰ | Bagging-PLSR _{Cal.} |
| ۱/۱۰ | -۰/۰۰۹ | ۰/۰۱۴ | ۰/۶۰ | | ۰/۰۲ | ۰/۱۹ | ۴۰ | Bagging-PLSR _{Val.} |
| $\theta_{-1000\text{ cm}}$ | | | | | | | | |
| ۱/۲۰ | | ۰/۰۲۰ | ۰/۳۰ | ۷ | ۰/۰۱ | ۰/۲۴ | ۲۰۰ | PLSR _{Cal.} |
| ۰/۸۴ | -۰/۰۱۲ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲ | | ۰/۰۲ | ۰/۲۵ | ۴۰ | PLSR _{Val.} |
| | | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۲ | ۷ | ۰/۰۱ | ۰/۲۴ | ۲۰۰ | Bagging-PLSR _{Cal.} |
| ۰/۸۳ | -۰/۰۱۳ | ۰/۰۲۱ | ۰/۲۷ | | ۰/۰۲ | ۰/۲۵ | ۴۰ | Bagging-PLSR _{Val.} |
| $\theta_{-330\text{ cm}}$ | | | | | | | | |
| ۱/۱۳ | | ۰/۰۲۲ | ۰/۲۴ | ۹ | ۰/۰۱ | ۰/۲۷ | ۲۰۰ | PLSR _{Cal.} |
| ۰/۸۶ | -۰/۰۱۷ | ۰/۰۲۷ | ۰/۱۶ | | ۰/۰۲ | ۰/۲۹ | ۴۰ | PLSR _{Val.} |
| | | ۰/۰۲۳ | ۰/۲۱ | ۹ | ۰/۰۱ | ۰/۲۷ | ۲۰۰ | Bagging-PLSR _{Cal.} |
| ۰/۸۴ | -۰/۰۱۸ | ۰/۰۲۸ | ۰/۱۳ | | ۰/۰۲ | ۰/۲۹ | ۴۰ | Bagging-PLSR _{Val.} |

PLSR_{Cal.}، PLSR_{Val.}، واسنجی و اعتبارسنجی مدل PLSR، Bagging-PLSR_{Cal.}، Bagging-PLSR_{Val.}، واسنجی و اعتبارسنجی مدل Bagging-PLSR.

RMSE، MBE و RPD: آماره‌های ارزیابی دقت.





شکل ۵- نمودار ارزیابی دقت نتایج اعتبارسنجی روش های PLSR و Bagging-PLSR به ازای پتانسیل های ماتریک معین، h (Target: مقادیر مطلوب، خطوط عمودی ۹۵٪ فاصله اطمینان مقادیر تخمینی روش Bagging-PLSR را نشان می دهد)

نتیجه گیری

طرفی، دقت توابع انتقالی طیفی نقطه ای بستگی به ظرفیت نگهداشت آب در خاک به ازای یک پتانسیل ماتریک معین دارد. به عبارتی، توابع انتقالی طیفی مقدار رطوبت خاک را به ازای مکش های بالا (۱۵۰۰۰- سانتی متر) با دقت بیشتری نسبت به مکش های پایین (۳۳۰- سانتی متر) تخمین می زنند.

فهرست منابع

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 نقطه ای برای برآورد منحنی رطوبتی خاک های گچی. تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۶ (۲۴): ۱۲۹-۱۴۲.

فرخیان فیروزی، ا. و همایی، م. ۱۳۸۲. برآورد پارامتریک ویژگی های هیدرولیکی خاک های گچی با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. شماره ۱۵. ص ۵۷-۷۳. کرج، ایران.

نتایج این مطالعه نشان داد با استفاده از بازتاب طیفی خاک در محدوده VIS، NIR و SWIR می توان وضعیت نگهداشت آب در خاک را مورد مطالعه قرار داد. منحنی های طیفی خاک های مختلف سه مشخصه جذب در طول موج های ۱۴۱۴، ۱۹۱۳ و ۲۲۰۷ را نشان دادند که مربوط به مقدار آب موجود در شبکه کانی های رسی خاک و رطوبت هیگروسکوبی خاک بوده و می تواند به عنوان مشخصه های منحصر به فرد در هر خاک محسوب شود. این باندها اهمیت زیادی در مطالعه وضعیت نگهداشت آب در خاک دارند. پیش پردازش داده های طیفی خاک و انتخاب مناسب ترین روش پیش پردازش، یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر دقت توابع انتقالی طیفی اشتقاق یافته است. بر اساس نتایج بدست آمده، توابع انتقالی طیفی حاصل از روش PLSR نسبت به توابع انتقالی اشتقاق یافته از روش Bagging-PLSR دقت نسبتاً بالاتری را در برآورد مقدار رطوبت خاک در تمامی پتانسیل های ماتریک داشتند. از

- نوابیان، م.، لیاقت، ع. و همایی، م. ۱۳۸۲. تخمین هدایت آبی اشباع با استفاده از توابع انتقالی. تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره ۱۶. ص ۱-۱۲. کرج، ایران.
- نوری، م.، همایی، م. و بای‌بوردی، م. ۱۳۹۱ (الف). ارزیابی پارامتریک توانایی نگهداشت خاک در حضور نفت خام در حالت سه فازی. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۲): ۱۵-۲۴.
- نوری، م.، همایی، م. و بای‌بوردی، م. ۱۳۹۱ (ب). بررسی پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور آلاینده نفت سفید. حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۱): ۳۷-۴۸.
- Ben-Dor, E., Irons, J.R. and Epema, G.F. 1999. Soil reflectance. In: Rencz, A.N. (Ed.), Remote Sensing for Earth Sciences. Manual of Remote Sensing. John Wiley and Sons, Inc., Toronto, pp. 111-188.
- 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.
- Breiman, L. 1996. Bagging predictors. Machine Learning, 24 (2): 123-140.
- Brown, D.J., Shepherd K.D., Walsh, M.G., Dewayne Mays, M. and Reinsch, T.G. 2006. Soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma, 132: 273-290.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh, C. R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. Soil Science Society of American Journal, 65: 480-490.
- 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.
- Dunne, B.W., Beecher, H.G., Batten, G.D. and Ciavarella, S. 2002. The potential of near infrared reflectance spectroscopy for soil analysis: A case study from the Riverine plain of south estearn Australia. Australian Journal of Experimental Agriculture, 42 (5): 607-614.
- Ghorbani-Dashtaki, S., Homae, M. and Khodaverdiloo, 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(1):68-74.
- Ghorbani-Dashtaki, S., Homae, M. and Mahdian, M.H. 2009. Site Dependence performance of infiltration Models. Water Resources Management, 23: 2777-2790.
- Henderson, T.L., Szilagy, A., Baumgardner, M.F., Chen, C.T. and Landgrebe, D.A. 1989. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. Soil Science Society of American Journal, 53: 1778-1784.
- Homae, M. and A. Farrokhian Firouzi. 2008. Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. Australian Journal of Soil Research, 46: 219-227.
- 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 American Journal, 71:507-514.
- Khodaverdiloo, H., Homae, M., van Genuchten, M.Th. and Ghorbani Dashtaki, S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. Journal of Hydrology, 399:356-361.
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Madeira Netto, J. and Robbez-Masson, J.M. 2008. Estimation of soil clay and cadmium carbonate using laboratory, fiel and airborne hyperspectral measurement. Remote Sensing Environment, 112(3): 825-835.
- Martens, H. and Naes, T. 1989. Multivariate calibration. John Wiley and Sons, Chihester.
- Leij, F.J., Romano, N., Palladino, M., Schaap, M.G. and Coppola, A. 2004. Topographical attributes to predict soil hydraulic properties along a hillslope
- قربانی دشتکی، ش. و همایی، م. ۱۳۸۱. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیر اشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. شماره ۱۲. ص ۱-۱۶. کرج، ایران.
- قربانی دشتکی، ش. و همایی، م. ۱۳۸۳. برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی. علوم کشاورزی، ۴ (۱۰): ۱۵۷-۱۶۶.
- قربانی دشتکی، ش. و م. همایی. ۱۳۸۶. برآورد پارامترهای برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک با استفاده از توابع انتقالی. آبیاری و زهکشی ایران، ۱ (۱): ۲۱-۳۹.
- 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.

- transect. *Water Resources Research*, 40, doi:10.1029/2002WR001641.
- Minasny, B., Mcbratney, 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: 960–971.
- Minasny, B., McBratney, A.B. and Bristow, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma*, 93: 225–253.
- Narayanan, R.M., Green, S.E. and Alexander, D.R. 1993. Mid-infrared laser reflectance of moist soils. *Applied Optics*, 32: 6043–6052.
- Pachepsky, Y., Rawls W. J. and Gimenez, D. 2001. Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. *Soil Science Society of American Journal*, 65: 460-462.
- Reeves, J., McCarty, G. and Mimmo, T. 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental Pollution*, 116: 277–284.
- Russell, C.A. 2003. Sample preparation and prediction of soil organic matter properties by near infra-red reflectance spectroscopy. *Soil Science and Plant Analysis*, 34: 1557–1572.
- Santra, P. 2009. Delineation and characterization of hydrologically similar zones based on spatial distribution of soil hydraulic properties. PhD Thesis. Indian Institute of Technology, Kharagpur.
- Sharma, S., Mohanty, B.P. and Zhu, J. 2006. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. *Soil Science Society of American Journal*, 70: 1430-1440.
- Stevens, A., Van Wesemael, B., Vandenshrick, G., Toure, S. and Tychon, B. 2006. Detection of carbon stock changes in agricultural soil using spectroscopic techniques. *Soil Science Society of American Journal*, 70: 844-850.
- Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., Rossel, R. and Murphy, B. 2008. Comparing spectral soil inference systems and mid-infrared spectroscopy predictions of soil volumetric moisture retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5): 1394-1400.
- Thine, C., Shepherd, K., Walsh, M., Coe, R. and Okwach, G. 2004. Application of GIS and remote sensing in characterization of soil hydraulic properties for soil physical quality assessment. University of Nairobi, Kenya, pp. 1-18.
- 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.
- Vereecken, H. 1995. Estimating the unsaturated hydraulic from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma*, 65:81–92.
- 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.V., Walvoort, T.D.J.J., McBratney, A.B., Janick, L.J. and Skjemstad, J.O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59–75.
- Zarei, Gh., Homae, M. and Liaghat, A.M. 2009. Modeling transient evaporation from descending shallow groundwater table based on Brooks-Corey retention function. *Water Resources Management*, 23(14): 2867-2876.
- Zarei, Gh., Homae, M., Liaghat A.M. and Hoorfar, A.H. 2010. A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *Journal of Hydrology*, 380:356-361.



Deriving and validating point spectrotransfer functions in VIS-NIR-SWIR range to estimate soil water retention

Ebrahim Babaeian¹, Mehdi Homaei^{2*} and Ali Akbar Noroozi³

1) PhD Student, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University; Tehran, Iran

2^{*}) Professor, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University; Tehran, Iran

Corresponding author email: mhomaei@modares.ac.ir

3) Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran

Received: 04-12-2012

Accepted: 05-03-2013

Abstract

Parametric soil water retention functions are important inputs for soil water conservation models. The objective of this study was to derive some spectrotransfer functions (STFs) to estimate soil water retention functions, using spectral reflectance. Consequently, proximal spectral reflectance of the soil samples within the VIS-NIR and SWIR (400-2500 nm) ranges was measured by using a handheld spectroradiometer apparatus. After (pre)processing the spectral data, the correlation between all wavelengths and soil water contents at matric potentials of -15000, -10000, -5000, -3000, -1000 and -330 cm were determined. Then, the transfer functions in the form of partial least square regression (PLSR) and bootstrap aggregation with PLSR (Bagging-PLSR) were derived. These new transfer functions were called point spectrotransfer functions (PSTFs). Results indicated that the derived PSTFs can well estimate soil water retention characteristics. The derived PLSR-based STFs provided more accuracy (RMSE=0.012 to 0.022 cm³ cm⁻³) than Bagging-PLSR based STFs (RMSE=0.012 to 0.029 cm³ cm⁻³) for estimating soil water contents at all designated matric potentials. On the other hands, performance of PSTFs for soil water contents at -15000, -10000 and -5000 cm were more reasonable than that of water contents at -3000, -1000 and -330 cm. It may be then concluded that PSTFs can be used as a reasonable indirect method for estimating soil water retention particularly at high soil water pressure heads.

Keywords: point spectrotransfer functions; soil water retention; spectral reflectance

