

ارزیابی توابع انتقالی طیفی و توابع انتقالی خاک در پیش‌بینی نگهداشت آب در خاک

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

۱) دانشجوی دکتری؛ گروه خاک‌شناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ۳۳۶۰-۱۴۱۱۵؛ ایران

۲) استاد؛ گروه خاک‌شناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران؛ ۳۳۶۰-۱۴۱۱۵؛ ایران

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

۳) استادیار پژوهشی؛ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۲۸

چکیده

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک اثری مهم بر جریان آب، انتقال املاح و گازها در محیط خاک داشته و اهمیتی بسیار در مطالعات هیدرولوژیک دارند. اگرچه اخیراً اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی به عنوان روشی کم‌هزینه، سریع و غیرمخرب در تخمین ویژگی‌های مینایی خاک مورد استفاده قرار گرفته، لیکن مطالعات بسیار اندکی در مورد برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کمک داده‌های طیفی خاک صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد داده‌های طیفی خاک در مقایسه با ویژگی‌های مینایی خاک به عنوان متغیرهای ورودی توابع انتقالی در مطالعه وضعیت نگهداشت آب در خاک بود. بدین منظور، تعداد ۱۷۴ نمونه خاک جمع‌آوری و منحنی‌های بازتاب طیفی آنها در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکترورادایومتر زمینی اندازه‌گیری شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک به همراه مقادیر رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳۰-، ۱۰۰۰-، ۳۰۰۰-، ۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰- و ۱۵۰۰۰- سانتی‌متر به روش صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. چهار سناریو شامل توابع انتقالی طیفی (STFs)، توابع انتقالی خاک (PTFs)، توابع انتقالی مرکب (SPTFs) و توابع انتقالی Rosetta مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بر پایه نتایج به‌دست آمده، همبستگی بالا و معنی‌داری در سطح ۱ درصد بین ویژگی‌های مینایی و هیدرولیکی خاک با مقادیر بازتاب طیفی به‌ویژه در گستره مادون قرمز میانی مشاهده شد. STFs در مقایسه با دیگر توابع انتقالی، دقت بیشتری ($R^2 > 0.60$)، RMSR=۰/۰۱۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، در برآورد رطوبت خاک در همه مکش‌ها به‌ویژه در بخش میانی و انتهای خشک منحنی رطوبتی داشت. از طرفی، SPTFs و PTFs دقت تقریباً یکسانی داشتند، با این تفاوت که در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی (۳۳۰- و ۱۰۰۰- سانتی‌متر)، PTFs برآوردهای نسبتاً بهتری ارائه کردند. تخمین‌های Rosetta در مقایسه با سه تابع انتقالی دیگر، دقتی کمتر در همه مکش‌ها به‌ویژه در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی داشتند. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد داده‌های طیفی خاک می‌توانند به عنوان روشی غیرمستقیم در مطالعه وضعیت نگهداشت آب در خاک مورد استفاده قرار گیرند.

کلید واژه‌ها: بازتاب طیفی خاک؛ رگرسیون مرحله‌ای چندگانه؛ منحنی حذف پیوستار؛ Rosetta

مقدمه

املاح، انتقال گرما و گازها در محیط خاک دارند. از آنجاکه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به عنوان پارامترهای ورودی مهم بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیک مطرح

ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع خاک اهمیت بسیاری در شبیه‌سازی و پیش‌بینی حرکت آب، انتقال

طی دو دهه گذشته، از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) به عنوان روشی سریع و کم‌هزینه به‌منظور برآورد برخی ویژگی‌های خاک همچون توزیع اندازه ذرات خاک (Gomez et al., 2008; Lagacherie et al., 2008; Janik et al., 2009; Lopez et al., 2013)، مقدار آهک (Lagacherie et al., 2008; Gomez et al., 2008)، کربن آلی (Nocita et al., 2013; Lopez et al., 2013)، pH (Viscarra Rossel and Behrens, 2010) و ظرفیت تبادل کاتیونی (Janik et al., 2009; Savvides et al., 2010) استفاده شده است. همچنین، روش‌های متنوع مدل‌سازی شامل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) (Viscarra Rossel and Behrens, 2010)، شبکه‌های عصبی (NN) (Daniel et al., 2003)، رگرسیون مؤلفه‌های اصلی (PCR) (Chang et al., 2001) و رگرسیون خطی و غیرخطی (MLR) (Dalal and Henry, 1986) نیز در تلفیق با اطلاعات طیفی مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، مطالعات بسیار اندکی در مورد برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از اطلاعات طیفی خاک انجام شده است. به عنوان مثال، Janik و همکاران (۲۰۰۷) از اطلاعات طیفی خاک در گستره مادون قرمز دور (۲۵۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر) و روش PLSR برای برآورد مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ۱۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال استفاده کردند. در پژوهشی مشابه، Minasny و همکاران (۲۰۰۸) از داده‌های طیفی مادون قرمز دور در تلفیق با روش PLSR، مقدار رطوبت خاک را در مکش‌های ۱، ۱۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برآورد کردند. بر اساس نتایج آنها، تخمین‌ها در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال دقت بالاتری ($RMSE=0/05$) نسبت به مکعب بر سانتیمتر مکعب، در مقایسه با مکش ۱۰ کیلوپاسکال ($RMSE=0/07$) سانتیمتر مکعب بر سانتیمتر مکعب، ($R^2=0/08$) برخوردار بودند. به دلیل آنکه سنجنده‌های ماهواره‌ای غالباً در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر اقدام به تصویربرداری از عوارض زمین می‌کنند، گستره مادون

هستند، دقت و صحت این ویژگی‌ها اثر قابل توجهی بر نتایج مدل‌ها خواهد داشت. استفاده از روش‌های مستقیم و درجا به ویژه در سطوح وسیع به دلیل صرف هزینه زیاد و زمان‌بر بودن، توجیه‌پذیر نیستند. از این رو تلاش‌های بسیاری در گذشته به عمل آمده است تا بتوان روش‌های کم‌هزینه، سریع و در عین حال دقیقی را جایگزین روش‌های مستقیم نمود. یکی از این روش‌ها، توابع انتقالی خاک (PTFs)^۱ است که در آن از روی ویژگی‌های زودیافت خاک (به ویژه توزیع اندازه ذرات خاک، جرم ویژه ظاهری و کربن آلی) اقدام به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک می‌شود. در سه دهه گذشته مطالعات بسیاری در زمینه اشتقاق و توسعه توابع انتقالی خاک در سطح دنیا و ایران انجام شده است (Vereecken et al., 1989, 1990, 1992, 2010; Schaap et al., 1998, 2001; Jarvis et al., 2002; Rawls and Pachepsky, 2002; Pachepsky et al., 2004, 2006; Jana et al., 2007; Weynants et al., 2009; Khodaverdilloo et al., 2011). خدآوردی‌لو 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).

بررسی‌های به‌عمل آمده در مورد غالب توابع انتقالی خاک نشان می‌دهد به‌رغم توسعه روش‌های مدل‌سازی (همچون شبکه‌های عصبی، k-نزدیک‌ترین همسایه، روش‌های مونت کارلو و بی‌زین و رگرسیون درختی)، هنوز توابع انتقالی با محدودیت‌هایی همچون وابستگی به نوع و میزان دقت روش‌های اندازه‌گیری، وابستگی به میزان آزمایشگر، عدم در نظر گرفتن ویژگی‌هایی همچون ساختمان و مینرالوژی رس، وابستگی زمانی توابع به دلیل وجود اثرات فرسایش و شخم، عدم کارایی بالا در دیگر مناطق، 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).

^۱ Pedotransfer functions

زودیافت خاک، ۳) اشتقاق توابع انتقالی مرکب (SPTFs)^۳ از طریق برآورد ویژگی‌های زودیافت خاک از روی داده‌های طیفی در مرحله اول و سپس استفاده از ویژگی‌های برآورد شده به عنوان ورودی توابع انتقالی خاک و ۴) استفاده از توابع انتقالی Rosetta (Schaap et al., 2001) می‌باشند. هدف از انجام این پژوهش اشتقاق و اعتبارسنجی STFs، PTFs و SPTFs به منظور برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک و ارزیابی عملکرد داده‌های طیفی در مقایسه با ویژگی‌های زودیافت خاک به منظور برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های

هیدرولیکی

نمونه‌های خاک (N=1۷۴) به صورت دست‌خورده و دست‌نخورده از بخشی از حوزه آبخیز سفیدرود جمع‌آوری و با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی، ویژگی‌های زودیافت خاک شامل توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه ظاهری و حقیقی و مقدار کربن آلی خاک اندازه‌گیری شد. میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک به روش شیرازی و بورسما محاسبه شد (Khodaverdilloo et al., 2011). همچنین، مقدار رطوبت وزنی خاک به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتیمتر با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد (Vereecken et al., 2010). به‌منظور کاهش اثر حبس هوا در خاک و منافذ صفحات، اشباع صفحات و نمونه‌های خاک به آرامی و از انتها با استفاده از آب مقطر جوشیده و سرد شده و در مدت زمان ۴۸ ساعت انجام شد. جرم ویژه ظاهری نمونه‌های خاک موجود در دستگاه صفحات فشاری نیز به روش پارافین اندازه‌گیری و سپس مقادیر وزنی رطوبت به مقادیر حجمی تبدیل شد.

قرمز دور نمی‌تواند در تخمین‌های بزرگ مقیاس‌های مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی، در این پژوهش‌ها طول موج‌های مهم که در حقیقت به عنوان متغیرهای مؤثر تخمینگر طی فرآیند تخمین مطرح هستند، به‌طور دقیق شناسایی نشده‌اند. به‌تازگی، در پژوهشی بابائیان و همکاران (۱۳۹۲) نشان دادند که با استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی و نیز روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی، می‌توان ظرفیت نگهداشت آب در خاک را برآورد کرد.

به نظر می‌رسد استفاده از اطلاعات طیفی خاک بتواند بسیاری از محدودیت‌های توابع انتقالی خاک را برطرف نماید. زیرا در رویکرد طیفی، متغیرهای ورودی توابع تنها داده‌های طیفی خاک هستند که بر خلاف داده‌های زودیافت خاک، منحصراً با یک روش استاندارد و در یک مرحله اندازه‌گیری می‌شوند. لذا خطای ناشی از تنوع روش‌های اندازه‌گیری و کاربرد به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت. همچنین، رویکرد طیفی، روشی غیرمخرب و بسیار سریع می‌باشد که در صورت توسعه آن از طریق داده‌های ماهواره‌ای، پتانسیل استفاده در مقیاس‌های بزرگ را داشته و می‌تواند تغییرپذیری زمانی خاک را نیز مدنظر قرار دهد. هرچند، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای محدود به سطح خاک است، لیکن در اراضی کشاورزی که لایه سطحی خاک در اثر شخم لایه‌ای همگنی را ایجاد کرده است، می‌تواند کارآمد باشد.

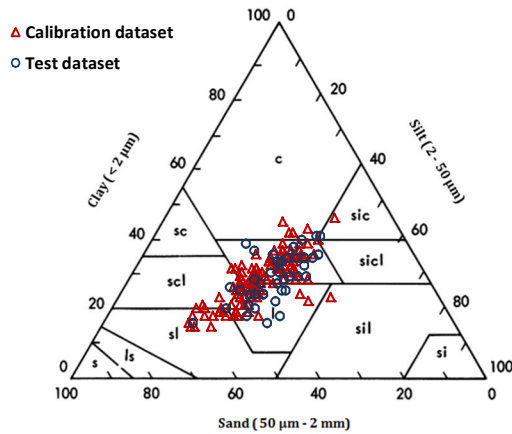
به‌منظور پاسخ دادن به این مسئله که آیا استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی می‌تواند به‌طور مؤثری باعث بهبود دقت تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شود، چهار سناریو مورد مطالعه قرار گرفت. این سناریوها شامل: ۱) اشتقاق توابع انتقالی طیفی (STFs)^۲ با کاربرد مستقیم داده‌های ابرطیفی برای برآورد نگهداشت آب در خاک، ۲) اشتقاق توابع انتقالی خاک (PTFs) با استفاده از برخی ویژگی‌های

³ Spectropedotransfer functions

² Spectrotransfer functions

درصد وجود ندارد. در شکل ۱ توزیع اندازه ذرات خاک و در جدول ۱ سایر ویژگی‌های خاک مربوط به سری داده‌های مدل‌سازی و آزمون ارائه شده است.

داده‌های خاک به دو گروه داده‌های مدل‌سازی (N=130) و آزمون (N=44) دسته‌بندی شدند. با استفاده از آزمون t-استیودنت، مقایسه میانگین هر یک از ویژگی‌های خاک در دو گروه انجام شد. نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری (p>0.19) بین داده‌های مدل‌سازی و آزمون در سطح ۵



شکل ۱. توزیع کلاس‌های بافت خاک به ازای سری داده‌های مدل‌سازی و آزمون

جدول ۱. گستره تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک به ازای سری داده‌های مدل‌سازی و آزمون

| ویژگی‌های خاک | آزمون (N=44) | | مدل‌سازی (N=130) | |
|--|--------------|--------|------------------|--------|
| | حداکثر | حدانقل | حداکثر | حدانقل |
| رس (%) | ۶/۶ | ۱۶ | ۶/۶ | ۱۵ |
| شن (%) | ۹/۱ | ۱۹ | ۱۰/۳ | ۱۳ |
| سیلت (%) | ۵/۰ | ۲۲ | ۵/۴ | ۲۱ |
| کربن آلی (%) | ۰/۳۴ | ۰/۱۹ | ۰/۲۵ | ۰/۰۶ |
| جرم ویژه ظاهری (g cm ⁻³) | ۰/۰۶ | ۰/۹۷ | ۰/۰۶ | ۰/۹۵ |
| میانگین هندسی قطر ذرات (mm ^{0.5}) | ۰/۰۵۶ | ۰/۱۱۹ | ۰/۰۶۴ | ۰/۰۹۸ |
| [cm ³ cm ⁻³] θ _{-15000 cm} | ۰/۰۰۹ | ۰/۱۷۴ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۹۴ |
| [cm ³ cm ⁻³] θ _{-10000 cm} | ۰/۰۰۸ | ۰/۱۸۲ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۹۵ |
| [cm ³ cm ⁻³] θ _{-5000 cm} | ۰/۰۱۰ | ۰/۱۸۴ | ۰/۰۲۱ | ۰/۱۱۱ |
| [cm ³ cm ⁻³] θ _{-3000 cm} | ۰/۰۰۹ | ۰/۲۰۸ | ۰/۰۲۲ | ۰/۱۱۹ |
| [cm ³ cm ⁻³] θ _{-1000 cm} | ۰/۰۱۲ | ۰/۲۶۰ | ۰/۰۲۴ | ۰/۱۴۱ |
| [cm ³ cm ⁻³] θ _{-330 cm} | ۰/۰۳۵ | ۰/۶۲۷ | ۰/۰۵۴ | ۰/۳۴۷ |

رفتار طیفی خاک و پیش‌پردازش‌های طیفی بازتاب ابر طیفی نمونه‌های خاک در دامنه مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) به کمک دستگاه اسپکترورادایومتر

برای این کار، نمونه‌های خاک هوا خشک از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و منحنی‌های طیفی آن‌ها در دامنه فوق در تاریکخانه اندازه‌گیری شد (Viscarra Rossel, 2008). به-

را به یکدیگر وصل می‌کند. این منحنی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Lagacherie et al., 2008).

$$R_{CR(\lambda_i)} = \frac{R_{\lambda_i}}{R_{CL(\lambda_i)}} \quad (1)$$

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

همبستگی بین متغیرها و اشتقاق توابع

استفاده از داده‌های ابرطیفی با تفکیک طیفی زیاد (۱ نانومتر) و گستره وسیع (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر) در مطالعه ویژگی‌های خاک معمول است (Viscarra Rossel et al., 2006a,c). در برخی مطالعات، از تمامی طول موج‌های موجود در گستره فوق برای تخمین ویژگی‌های خاک استفاده شده است (Bilgili et al., 2010; Janik et al., 2009)، در حالی‌که در برخی دیگر از پژوهش‌ها دقت بالای مقادیر تخمینی تنها به هنگام استفاده از بخشی از این گستره حاصل شده است (Lopez et al., 2013; Lagacherie et al., 2008). افزون بر این، چنین گستره وسیعی غالباً با همبستگی درونی و همراستایی چندگانه بین مقادیر بازتاب در طول موج‌های مختلف همراه است که ضروری است در توسعه توابع انتقالی اثر آن را حذف کرد. بنابراین، شناسایی طول موج‌های مؤثر در توسعه مدل‌های کارآمد تخمین‌گر دارای اهمیت است. این همبستگی درونی و همراستایی چندگانه بین ویژگی‌های خاک نیز ممکن است وجود داشته باشد. از این‌رو، به منظور شناسایی متغیرهای مؤثر تخمین‌گر در برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک، تجزیه و تحلیل همبستگی و نیز رگرسیون مرحله‌ای چندگانه مورد استفاده قرار گرفت. به‌طور کلی، چهار سناریوی مختلف در برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک مورد بررسی

منظور تهیه کتابخانه طیفی خاک‌ها از بیستولی مجهز به لنز ۸ درجه که میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتی‌متر ایجاد می‌کند، استفاده شد. از یک لامپ هالوژن ۱۵۰ وات که با محور قائم زاویه ۴۵ درجه ایجاد می‌کرد، به‌منظور تأمین منبع نور استفاده شد. به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها و واسنجی دستگاه در حین اندازه‌گیری‌ها، به ازای هر ۳ نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) که در شرایط مکانی مشابه با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک مستقر گردیده بود، انجام شد. ۲۰ تکرار برای هر نمونه خاک در نظر گرفته شد که در مجموع تعداد ۳۵۰۰ منحنی طیفی از خاک‌های منطقه ایجاد شد. با استفاده از نرم افزار ViewSpec یک میانگین به ازای تکرارهای مختلف برای هر نمونه خاک، محاسبه و در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شد. با توجه به تفکیک طیفی یک نانومتر برای هر منحنی طیفی، تعداد ۱۹۵۰ باند طیفی در گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر که دارای مقادیر بازتاب طیفی مختلفی بودند، به‌دست آمد.

پیش‌پردازش داده‌های طیفی، یکی از مهمترین مراحل آنالیز طیف‌سنجی خاک محسوب می‌شود. هدف از پیش‌پردازش داده‌های طیفی، ارتقای کیفیت طیف‌ها و استفاده کارآمد از داده‌های طیفی است. طول موج‌های بین ۴۰۰-۳۵۰ و ۲۴۵۰-۲۵۰ نانومتر دارای آشفتگی‌های زیاد طیفی^۴ بودند. این محدوده از تمامی طیف‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفت. همچنین، انواع الگوریتم‌های پیش‌پردازش بر روی داده‌های طیفی به کمک نرم‌افزار 10.3 Unscambler انجام شد. بر اساس نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی دقت نتایج حاصله، منحنی‌های حذف پیوستار و فیلتر Savitzky-Golay به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دوم، به عنوان روش‌های مناسب پیش‌پردازش شناسایی شدند. منحنی حذف پیوستار، خطی محذب و فرضی که دو انتهای یک مشخصه جذب طیفی

⁴ Noise

قطعیت متغیرهای 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 نقاط رطوبتی برآورد شده در مرحله اول و مقادیر رطوبت مشاهده‌ای، محاسبه شد.

از آنجا که توابع انتقالی مدل‌هایی تجربی محسوب می‌شوند، لازم است دقت و صحت آن‌ها در مقابل سایر ورودی‌ها که قبلاً در اشتقاق توابع مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، مورد آزمون قرار گیرد. ارزیابی دقت توابع با استفاده از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات باقیمانده (RMSR)، ضریب تبیین (R^2)، میزان انطباق (d)^۵، بهبود نسبی (RI)^۶ و درصد انحراف نسبی (RPD)^۷ انجام شد. شاخص انطباق بیان کننده درجه‌ای از دقت است که در آن مقادیر تخمینی عاری از خطا می‌باشند (Willmott, 1981). شاخص RPD که غالباً در مطالعات طیف‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به سه گستره شامل $<1/4, 2-1/4>$ ، $<2-1/4, 2>$ و $<2, >$ که به ترتیب معرف تخمین ضعیف، قابل قبول و قوی می‌باشند، طبقه‌بندی شده است (Chang et al., 2001; Chang and Laird, 2008; Viscarra Rossel, 2002). شاخص RI، نشان دهنده میزان افزایش دقت تخمین‌های حاصل از STFs، SPTFs و Rosetta PTFs در مقایسه با PTFs اشتقاقی بر اساس آماره RMSR می‌باشد. تمامی محاسبات موردنظر در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام پذیرفت. بیان ریاضی آماره‌های فوق به صورت زیر است.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i^{pred.} - \theta_i^{obs.}) \quad (2)$$

$$RMSR = \sqrt{\frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (\theta_i^{pred.} - \theta_i^{obs.})^2} \quad (3)$$

⁵ Index of agreement

⁶ Relative improvement

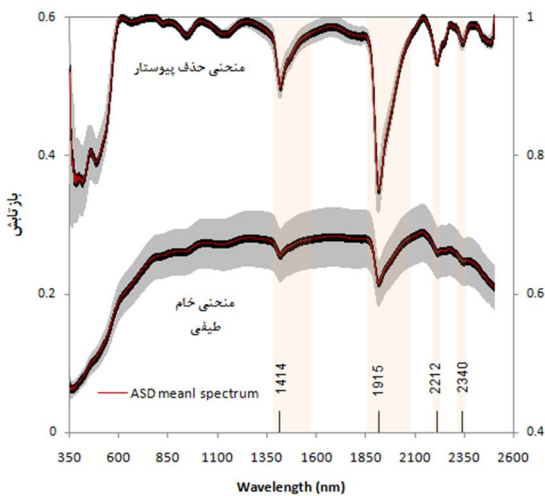
⁷ Relative percent deviation

قرار گرفت. در سناریوی اول، ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های مختلف به کمک ضریب همبستگی پیرسون بررسی و طول موج‌های معنی‌دار (در سطوح ۱ و ۵ درصد) با بالاترین ضریب همبستگی به عنوان متغیرهای ورودی رگرسیون مرحله‌ای برای اشتقاق توابع انتقالی طیفی (STFs) در نظر گرفته شدند. در سناریوی دوم، پس از محاسبه ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های خاک، از ویژگی‌های مبنایی و همبسته خاک برای اشتقاق توابع انتقالی خاک (PTFs) به روش رگرسیون مرحله‌ای چندگانه استفاده شد. سناریوی سوم مشابه با سناریوی اول و شامل دو مرحله است. در مرحله اول، همبستگی بین ویژگی‌های مبنایی خاک با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های مختلف به کمک ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. سپس طول موج‌های معنی‌دار و همبسته شناسایی و سپس برای تخمین ویژگی‌های مبنایی خاک به روش رگرسیون مرحله‌ای چندگانه مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله دوم، ویژگی‌های مبنایی حاصل از مرحله اول به عنوان ورودی توابع انتقالی خاک برای تخمین پارامترهای نگهداشت آبدار خاک مورد استفاده قرار گرفتند که تحت عنوان توابع انتقالی مرکب (SPTFs) نامگذاری شدند. در سناریوی چهارم، از توابع انتقالی پیوسته موجود در برنامه Rosetta (Schaap et al., 2001) استفاده شد که در آن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و متغیرهای توزیع اندازه ذرات خاک و جرم ویژه ظاهری به عنوان متغیرهای ورودی شبکه، اقدام به برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گونوختن (۱۹۸۰) گردید. سپس، با استفاده از مدل ون‌گونوختن مقادیر رطوبت به ازای مکش‌های مورد نظر محاسبه شد.

پیش از اشتقاق توابع، آمار توصیفی متغیرها محاسبه و وضعیت نرمال بودن هر یک از ویژگی‌های خاک به روش کلمگروف-اسمیرنوف در سطح ۵ درصد آزمون شد. متغیرهایی که دارای توزیع غیر نرمال بودند، به کمک تبدیل مناسب نرمال شدند. به منظور در نظر گرفتن عدم

گستره داده‌های مدل‌سازی و آزمون وجود دارد (جدول ۱).

در شکل ۲ میانگین منحنی‌های خام و منحنی‌های حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌ها نشان داده شده است. منحنی‌های خام طیفی دارای یک برآمدگی در طول موج-های 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 به‌طور مشخص‌تری نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داده که چنین مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب آزاد و هیگروسکوپیک (۱۴۱۴ نانومتر)، گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رس (۱۹۱۵) و پیوند گروه‌های عاملی OH با فلزات آهن، آلومینیوم و منیزیم (۲۲۱۲ نانومتر) در شبکه کانی‌های رس است (Clark et al., 1990).



شکل ۲. میانگین و انحراف معیار منحنی‌های خام و حذف پیوستار بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه. موقعیت مشخصه-های جذبی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۰ نانومتر نشان داده شده است.

تجزیه و تحلیل و همبستگی بین متغیرها

در شکل ۳ الف، ضریب همبستگی پیرسون (R) بین مقادیر بازتاب طیفی خاک در هر طول موج از گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر با مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های مختلف و نیز برخی ویژگی‌های مبنایی خاک نشان داده

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i^{pred.} - \bar{\theta}^{pred.})(\theta_i^{obs.} - \bar{\theta}^{obs.})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\theta_i^{pred.} - \bar{\theta}^{pred.})^2 \sum_{i=1}^N (\theta_i^{obs.} - \bar{\theta}^{obs.})^2}} \right]^2 \quad (۴)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (۵)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i^{obs.} - \bar{\theta}^{obs.})^2}{N-1}} \quad (۶)$$

$$\% RI = \frac{RMSR_{PTFs} - RMSR_{STFs, SPTFs, Rosetta PTFs}}{RMSR_{PTFs}} \times 100 \quad (۷)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i^{pred.} - \theta_i^{obs.})^2}{\sum_{i=1}^N [|\theta_i^{pred.} - \bar{\theta}^{obs.}| + |\theta_i^{obs.} - \bar{\theta}^{obs.}|]^2} \quad (۸)$$

که در آنها، $\theta_i^{obs.}$ و $\theta_i^{pred.}$ به ترتیب مقادیر رطوبت مشاهده‌ای و تخمینی، $\bar{\theta}^{obs.}$ و $\bar{\theta}^{pred.}$ به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، P تعداد تخمین‌گرها و N تعداد داده‌ها، SD انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای و $RMSE$ جذر میانگین مربعات خطا مقادیر تخمینی می‌باشند.

نتایج و بحث

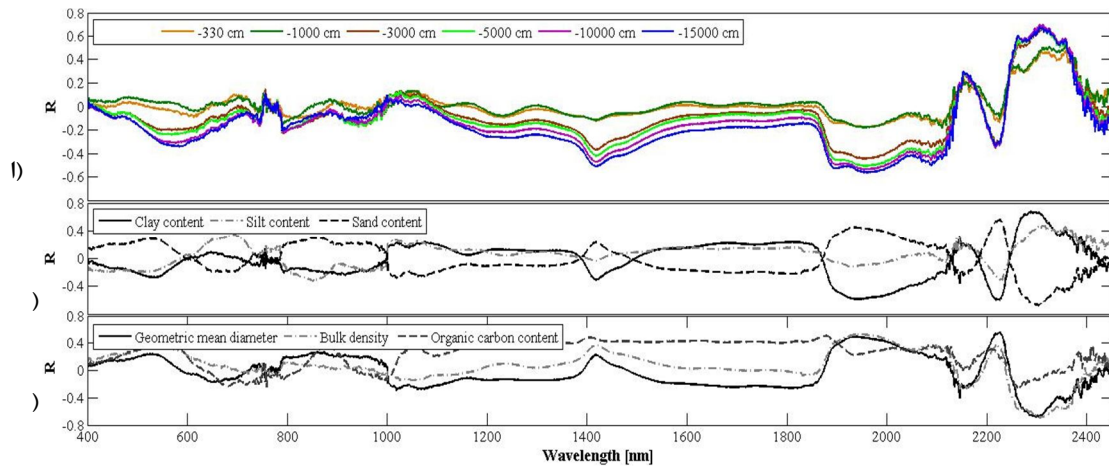
ویژگی‌های خاک و رفتار طیفی آن

در جدول ۱، نتایج آمار توصیفی ویژگی‌های مبنایی خاک و مقدار رطوبت در مکش‌های ماتریک مختلف به ازای سری داده‌های مدل‌سازی و آزمون ارائه شده است. مقدار رس و شن به ترتیب در گستره ۱۵ تا ۴۵ و ۱۳ تا ۶۳ درصد اندازه‌گیری شد. میانگین جرم ویژه ظاهری و کربن آلی خاک نیز به ترتیب برابر با ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۶۴ درصد به‌دست آمد. به دلیل حضور کربنات‌ها، pH خاک‌ها خنثی تا کمی قلیایی (۷/۹-۷/۰) بود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، از نظر کلاس بافتی منطقه مورد مطالعه دارای تنوع زیادی بوده به‌طوری‌که هفت کلاس بافتی خاک قابل تشخیص بود. این شکل بیانگر فراوانی خاک‌های متوسط و ریزبافت در منطقه است، چراکه کلاس‌های بافتی لوم و لوم رسی، بافت‌های غالب منطقه را تشکیل داده‌اند. توزیع و گستره نقاط رطوبتی خاک نشان داد انطباق کاملی بین

همبستگی معنی‌دار (سطح ادرصد) جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر در طول موج‌های ۲۳۰۷ و ۱۸۷۷ نانومتر و برابر با ۰/۶۹۲- و ۰/۵۰۵ به دست آمد. درحالی‌که کربن آلی بیشترین همبستگی را در طول موج‌های ۱۴۰۲ ($R=0/480$) و ۱۸۷۷ ($R=0/505$) نانومتر که در حقیقت طول موج‌های نزدیک به مشخصه‌های جذبی آب در خاک (۱۴۱۴ و ۱۹۱۵ نانومتر) هستند، نشان داد (شکل ۳ج). چنین همبستگی‌های بالا بین ویژگی‌های مبنایی خاک و مقادیر بازتاب طیفی توسط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (, Bilgli et al., 2010; Somers et al., 2010; Santra et al., 2009).

همچنین، در جدول ۲ ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مبنایی خاک و مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همبستگی بالا و معنی‌داری (سطح ۱ درصد) بین متغیرهای زودیافت خاک با نقاط رطوبتی خاک وجود دارد. از آنجاکه هم ویژگی‌های زودیافت خاک و هم مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های مختلف دارای همبستگی بالا و معنی‌داری بودند، این امکان می‌تواند وجود داشته باشد که در ابتدا ویژگی‌های مبنایی خاک را از روی داده‌های طیفی برآورد کرد و سپس اقدام به پیش‌بینی نقاط رطوبتی خاک از روی ویژگی‌های زودیافت خاک نمود و توابع دیگری با عنوان توابع انتقالی طیفی خاک (SPTFs) معرفی کرد.

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همبستگی بالا و معنی‌داری بین نقاط رطوبتی خاک با مقادیر بازتاب طیفی در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی وجود دارد. بالاترین ضریب همبستگی (معنی‌دار در سطح ادرصد) در مکش‌های ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر به ازای طول موج‌های ۵۸۷ (گستره مرئی)، ۱۴۱۷، ۱۹۵۷ و ۲۳۰۷ نانومتر به دست آمد. همبستگی بین مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف با توزیع اندازه ذرات، کربن آلی، جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات خاک در شکل ۳ (ب و ج) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، توزیع اندازه ذرات خاک نیز همبستگی‌های مثبت و منفی به ازای طول موج‌های مختلف نشان دادند. الگوی همبستگی مقادیر رطوبت خاک به ازای مکش‌های مختلف، مشابه با الگوی همبستگی مقادیر رس در طول موج‌های مختلف بود، در حالیکه با مقادیر شن همبستگی منفی نشان داد. چنین روندی می‌تواند ناشی از انرژی جذب سطحی بالای ذرات رس به ویژه در انتهای خشک منحنی رطوبتی باشد که باعث افزایش گنجایش رطوبتی خاک شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، همبستگی قوی بین نقاط رطوبتی خاک با مقادیر بازتاب طیفی به دلیل اثر مستقیم ذرات رس و شن بر رفتار طیفی خاک است (, Stenberg et al., 2010). به‌طور مشابه، همبستگی جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات خاک با مقادیر بازتاب طیفی خاک، روندی مشابه با شن را دنبال کرد. حداکثر



شکل ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین مشخصه‌های نگهداشت آب در خاک (الف)، توزیع اندازه ذرات خاک (ب) و کربن آلی، جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات خاک (ج) با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف

جدول ۲. ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای نگهداشت آب در خاک

| ویژگی خاک | $\theta_{-330\text{ cm}}$ | $\theta_{-1000\text{ cm}}$ | $\theta_{-3000\text{ cm}}$ | $\theta_{-5000\text{ cm}}$ | $\theta_{-10000\text{ cm}}$ | $\theta_{-15000\text{ cm}}$ |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| رس | ۰/۴۵۰** | ۰/۷۲۲** | ۰/۷۲۴** | ۰/۷۱۹** | ۰/۴۷۸** | ۰/۷۰۵** |
| شن | -۰/۴۸۸** | -۰/۶۶۳** | -۰/۶۹۶** | -۰/۷۰۹** | -۰/۵۰۰** | -۰/۶۶۲** |
| نسبت رس به شن | ۰/۵۱۴** | ۰/۷۱۴** | ۰/۷۳۴** | ۰/۷۳۸** | ۰/۴۸۴** | ۰/۷۱۰** |
| سیلت | ۰/۳۶۰** | ۰/۳۵۶** | ۰/۴۱۶** | ۰/۴۴۵** | ۰/۳۵۰** | ۰/۳۷۴** |
| کربن آلی | ۰/۱۴۲ | ۰/۱۴۴ | ۰/۱۷۳* | ۰/۲۰۱** | ۰/۲۷۲** | ۰/۱۱۲ |
| جرم ویژه ظاهری | -۰/۲۸۳** | -۰/۵۷۵** | -۰/۵۶۱** | -۰/۵۵۰** | -۰/۳۵۹** | -۰/۵۹۵** |
| میانگین هندسی قطر ذرات | -۰/۴۶۷** | -۰/۶۷۳** | -۰/۶۹۶** | -۰/۷۰۶** | -۰/۴۹۸** | -۰/۶۶۲** |

** و * به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱ و ۵ درصد.

برآورد نگهداشت آب در خاک

توابع انتقالی طیفی (STFs)

در جدول ۳، توابع انتقالی طیفی اشتقاق یافته به‌منظور برآورد رطوبت خاک در هفت مکش با استفاده از بازتاب طیفی در طول موج‌های مؤثر ارائه شده است. مقادیر R2 و RMSR توابع به ازای داده‌های مدل‌سازی به ترتیب بین ۰/۵۲ تا ۰/۷۵ و ۰/۰۱۰۳ تا ۰/۰۱۷۸ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمده است. همان‌طور مشاهده می‌شود، مقدار رطوبت خاک در انتهای خشک (مکش‌های زیاد) با دقت بیشتری در مقایسه با مکش‌های متوسط و کم، برآورد شده است. طول موج‌های مؤثر در گستره مرئی (۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) شامل طول موج‌های ۴۴۰ (طول موج آبی)، ۵۰۵ (طول موج سبز) و ۶۶۰ (طول موج قرمز) نانومتر بود. این طول موج‌ها به نوعی اثر رنگ خاک (عمدتاً به دلیل وجود اکسیدهای آهن مثل هماتیت و گنوتایت) را بر پارامترهای نگهداشت آب در خاک بیان

می‌کنند (Stenberg et al., 2010). طول موج‌های مؤثر در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی عمدتاً بین ۲۱۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر قرار داشته و شامل طول موج‌های ۲۲۵۰، ۲۳۱۰ و ۲۴۰۰ نانومتر است. این طول موج‌ها به عنوان تخمین‌گرهای مهم در برآورد تمامی پارامترهای نگهداشت آب در خاک محسوب می‌شوند. این یافته‌ها مطابق با نتایج به‌دست آمده توسط دیگر پژوهشگران است. به عنوان مثال، Minasney و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند، مقدار رطوبت خاک در انتهای خشک (۱۵۰۰ کیلوپاسکال) و انتهای مرطوب (۱۰ کیلوپاسکال) به ترتیب با R2 برابر با ۰/۵۱ و ۰/۰۵ و RMSE برابر با ۰/۰۵ و ۰/۰۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمده است. در حالی‌که در پژوهش حاضر، میانگین RMSR در تمامی نقاط رطوبتی برابر با ۰/۰۱۳ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شد که نشان می‌دهد تخمین‌ها با دقت بالاتری همراه است. دقت پایین STFs در انتهای

ناشی از وجود گروه‌های کربنات (CO_3) در خاک باشند. اگرچه لازم است به این نکته توجه شود که موقعیت چنین طول موج‌های جذبی بستگی به ترکیبات موجود در خاک داشته و ممکن است از خاکی به خاک دیگر اندکی متفاوت باشد (Stenberg et al., 2010). پژوهش‌ها نشان داده که مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های ۵۹۶، ۵۵۰ و ۶۸۵ نانومتر می‌تواند مستقیماً برای تخمین مقدار رس خاک مورد استفاده قرار گیرد، زیرا چنین طول موج‌هایی رنگ خاک را بازگو می‌کنند (Gomez et al., 2008). در مورد طول موج‌هایی که منحصرأ مربوط به شن، جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات خاک باشند، گزارشی یافت نشده است. بر اساس جدول ۳، تخمین مقدار کربن آلی خاک با استفاده از گستره وسیعی از طول موج‌ها امکان‌پذیر است. بررسی‌ها نشان داده که طول موج‌های ۱۱۰۰، ۱۶۰۰، ۱۸۰۰-۱۷۰۰، ۲۰۰۰، ۲۴۰۰-۲۲۰۰ نانومتر می‌توانند برای تخمین مقدار کربن آلی خاک مورد استفاده قرار گیرند (Dalal and Henry, 1986; Ben-Dor and Banin, 1995; Martin et al., 2002; Stenberg, 2010).

در جدول ۴، همچنین روابط رگرسیونی مربوط به SPTFs برای تخمین پارامترهای نگهداشت آب در خاک ارائه شده است. در حقیقت آن دسته از ویژگی‌های مبنایی خاک که با دقت بالایی توسط داده‌های طیفی برآورد شده‌اند، به عنوان ورودی PTFs در نظر گرفته شدند. مقادیر R^2 و RMSR تخمین نقاط رطوبتی خاک، به ترتیب بین ۰/۳۱ تا ۰/۶۴ و ۰/۱۲۷ تا ۰/۲۱۵ سانتیمتر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. در مقایسه با SPTFs، تخمین غیرمستقیم پارامترهای نگهداشت آب در خاک از طریق داده‌های طیفی (STFs) اندکی باعث کاهش دقت تخمین‌ها (۲۴ درصد افزایش در میانگین RMSR به ازای تمامی مکش‌ها) شد. این کاهش دقت می‌تواند به دلیل عدم اطمینان ذاتی موجود در اندازه‌گیری ویژگی‌های مبنایی خاک باشد که باعث کاهش دقت تخمین‌ها در SPTFs شده است. همچنین، در انتهای مرطوب (مکش

مرطوب منحنی رطوبتی می‌تواند به دلیل حساسیت پایین گستره مرئی و مادون قرمز به ساختمان خاک باشد که نتوانسته این ویژگی خاک را که اثر قابل توجهی بر نگهداشت آب در خاک در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی دارد، برآورد کند. ساختمان خاک عمدتاً در ارتباط با اندازه، فراوانی و نحوه اتصال منافذ خاک با یکدیگر است. پژوهش‌ها نشان داده آن دسته از ویژگی‌های خاک که مرتبط با منافذ خاک می‌باشند (مانند جرم ویژه ظاهری و رطوبت اشباع) نمی‌توانند برخلاف ویژگی‌هایی که بخش جامد خاک را تشکیل می‌دهند (مانند رس، شن، ماده آلی)، با دقت زیاد برآورد شوند (Mutuo et al., 2006; Minasny et al., 2008; Cecillon et al., 2009).

توابع انتقالی مرکب (SPTFs)

در جدول ۴، روابط رگرسیونی به منظور برآورد ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای نگهداشت آب در خاک با استفاده از بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مشخص ارائه شده است. بهترین تخمین‌ها برای متغیرهای کربن آلی ($R^2=0/81$, $RMSR=0/11$ درصد)، رس ($R^2=0/72$, $RMSR=3/51$ درصد)، شن ($R^2=0/70$, $RMSR=0/70$ درصد) و میانگین هندسی قطر ذرات خاک ($R^2=0/75$, $RMSR=0/32$ میلی‌متر) به دست آمد. در حالی که جرم ویژه ظاهری خاک با دقت متوسطی ($R^2=0/57$, $RMSR=0/43$ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برآورد شد.

مهمترین باندهای طیفی در تخمین مقدار رس شامل طول موج‌های ۵۶۲، ۵۸۷، ۶۱۷، ۱۸۲۷، ۲۲۲۷، ۲۳۲۷، ۲۳۴۷ و ۲۳۸۷ نانومتر بودند. طول موج‌های مجاور ۱۹۰۰ نانومتر متأثر از گروه‌های عاملی هیدروکسیل (OH) موجود در آب موجود در خاک می‌باشد، در حالی که طول موج‌های مجاور باندهای جذبی ۲۲۰۰ و ۲۳۰۰ نانومتر به دلیل وجود پیوندهای Al-OH (مانند کائولینیت) و Mg-OH (مانند ایلیت و مونت موریلونایت) موجود در کانی‌های رس خاک است. همچنین، طول موج‌های مجاور با باندهای جذبی ۲۳۳۵، ۲۱۶۰ و ۱۸۷۰ نانومتر می‌توانند

لیکن عواملی همچون وسعت دامنه ویژگی‌های خاک، نوع روش اشتقاق، روش‌های اندازه‌گیری و عدم اطمینان موجود در بین داده‌ها می‌تواند بر نتایج اثرگذار باشد (Nemes et al., 2003; Vereecken et al., 2010). در مقایسه با STFs، PTFs به ازای تمامی نقاط رطوبتی دقت پایین‌تری را نشان دادند. علت این کاهش دقت می‌تواند دامنه باریک توزیع اندازه ذرات و کربن آلی خاک باشد (جدول ۱) که باعث همبستگی متوسط این متغیرها با پارامترهای نگهداشت آب در خاک نیز شده است (جدول ۲). نتایج مشابهی در نقاط ظرفیت زراعی (مکش ۳۳۰ سانتی‌متر) و نقطه پژمردگی دائم (مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است (Khodaverdiloo et al., 2011; Tranter et al., 2008).

بر پایه نتایج آماره‌های مدل‌سازی، PTFs و SPTFs نتایج مشابهی را ارائه کردند به طوری که میانگین RMSR آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۰۱۵۴ و ۰/۰۱۵۹ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. این دقت نسبتاً پایین‌تر SPTFs نسبت به PTFs می‌تواند به دلیل خطای تخمین ویژگی‌های مبنایی خاک از روی داده‌های طیفی باشد، در حالی که در PTFs مقادیر اندازه‌گیری شده (نه تخمینی) ویژگی‌های مبنایی خاک به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است.

۳۳۰ و ۱۰۰۰ سانتی‌متر) دقت تخمین‌ها کاهش پیدا کرد، که نشان دهنده آن است که رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک بالا (مکش‌های کم) غالباً متأثر از اندازه و شکل منافذ خاک بوده در حالی که در پتانسیل‌های ماتریک کم (مکش‌های زیاد) بیشتر تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک و مینرالوژی خاک است. توابع انتقالی خاک (PTFs)

در جدول ۵، توابع انتقالی خاک که به منظور تخمین پارامترهای نگهداشت آب در خاک اشتقاق یافته است، ارائه شده است. ویژگی‌هایی همچون فراوانی رس، شن، کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک به عنوان مهمترین تخمینگرها برای برآورد نقاط رطوبتی خاک شناسایی شدند. به منظور اجتناب از هم‌راستایی چندگانه خطی بین متغیرهای رس و شن، از نسبت آنها به عنوان متغیرهای تخمینگر در PTFs استفاده شد (Khodaverdiloo et al., 2011). PTFs دقت نسبتاً متوسط در برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک نشان دادند به طوری که مقادیر R2 و RMSR تخمین به ترتیب بین ۰/۲۹ تا ۰/۶۶ و ۰/۰۱۲۶ تا ۰/۰۲۱۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. دقت پایین تخمین در انتهای مرطوب ممکن است تا حدودی به دلیل حذف اثر ساختمان خاک به دلیل عبور ذرات خاک از الک ۲ میلیمتر باشد. اگرچه برخی مطالعات دقت‌های نسبتاً بالاتری را به هنگام استفاده از PTFs در نقاط اشباع و نزدیک به آن نشان داده‌اند (Tomasella et al., 2011).

جدول ۳. مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای به منظور برآورد نگهداشت آب در خاک[‡]

| RMSR | R ² | توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای (STFs) |
|--------|----------------|---|
| ۰/۰۱۰۳ | ۰/۷۵ | $\theta_{-15000 \text{ cm}} = -4.758 + 0.01(-0.576 R_{442} + 1.317 R_{497} - 3.566 R_{592} + 3.215 R_{602} - 2.183 R_{662} + 6.806 R_{2142} - 2.231 R_{2227} + 1.784 R_{2287} - 1.246 R_{2312} + 1.635 R_{2327})$ |
| ۰/۰۱۰۵ | ۰/۷۴ | $\theta_{-10000 \text{ cm}} = -6.373 + 0.01(-0.967 R_{442} + 3.660 R_{507} - 2.389 R_{532} - 2.214 R_{662} + 6.192 R_{2142} + 2.273 R_{2152} - 1.825 R_{2202} + 1.069 R_{2307} + 0.769 R_{2327})$ |
| ۰/۰۱۰۷ | ۰/۷۴ | $\theta_{-5000 \text{ cm}} = 0.02 + 0.01(-1.181 R_{447} + 4.123 R_{507} - 2.549 R_{532} - 7.180 R_{677} + 5.385 R_{682} + 1.74 \text{ Band}_{2162} - 2.37 R_{2202} + 0.938 R_{2307} + 0.878 R_{2322} + 0.412 R_{2447})$ |
| ۰/۰۱۱۰ | ۰/۷۵ | $\theta_{-3000 \text{ cm}} = 1.569 + 0.01(-1.106 R_{437} + 1.742 R_{482} - 2.732 R_{662} - 0.337 R_{1732} - 1.563 R_{2222} + 1.621 R_{2302} + 1.205 R_{2327} - 1.162 R_{2367} + 1.002 R_{2402})$ |
| ۰/۰۱۶۷ | ۰/۵۳ | $\theta_{-1000 \text{ cm}} = -3.832 + 0.01(-0.91 R_{457} + 1.492 R_{502} - 0.615 R_{1162} + 1.69 R_{2287} + 1.152 R_{2332} + 1.406 R_{2402})$ |
| ۰/۰۱۷۸ | ۰/۵۲ | $\theta_{-330 \text{ cm}} = -0.354 + 0.01(-0.853 R_{437} + 2.369 R_{507} - 1.872 R_{572} - 2.256 R_{2187} - 1.975 R_{2257} + 3.884 R_{2307} + 1.444 R_{2422})$ |

[‡]RW: درصد بازتاب طیفی در طول موج w و θ مقدار رطوبت حجمی خاک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) در مکش‌های مختلف.

جدول ۴. مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی مرکب نقطه‌ای به منظور برآورد نگهداشت آب در خاک[‡]

| RMSR | R ² | توابع انتقالی مرکب نقطه‌ای (SPTFs) |
|------|----------------|------------------------------------|
|------|----------------|------------------------------------|

| | | |
|--------|------|--|
| ۰/۰۳۵۱ | ۰/۷۲ | $C = 3.862 + 0.01(4.646 R_{562} - 11.109 R_{587} + 9.33 R_{617} - 5.442 R_{687} + 0.704 R_{1827} - 8.99 R_{2227} + 9.249 R_{2327} - 6.26 R_{2347} + 4.167 R_{2387})$ |
| ۰/۰۵۶۵ | ۰/۷۰ | $S = -26.835 + 0.01(0.99 R_{422} - 2.902 R_{532} + 15.904 R_{722} + 4.997 R_{877} + 6.872 R_{2052} - 2.402 R_{2197} + 8.937 R_{2222} + 7.735 R_{2257} - 8.70 R_{2327} - 3.838 R_{2432})$ |
| ۰/۱۱۰۴ | ۰/۸۱ | $OC = -79.782 + 0.01(-14.52 R_{452} + 35.648 R_{477} - 19.201 R_{497} + 35.83 R_{622} - 49.013 R_{667} - 63.792 R_{677} + 95.062 R_{707} + 133.457 R_{772} - 83.374 R_{797} + 17.257 R_{1152} + 24.679 R_{1402} - 24.957 R_{1442} + 11.242 R_{1862} - 31.452 R_{2297} + 13.728 R_{2327} + 14.81 R_{2342} - 25.063 R_{2362} + 16.33 R_{2382} - 5.138 R_{2447})$ |
| ۰/۰۴۲۸ | ۰/۵۷ | $\rho_b = 5.99 + 0.01(4.925 R_{677} - 1.418 R_{1122} - 2.358 R_{2247} - 6.215 R_{2307})$ |
| ۰/۰۳۲۲ | ۰/۷۵ | $d_g^* = 21.396 + 0.01(-0.836 R_{407} + 1.312 R_{422} - 1.507 R_{537} - 2.477 R_{1917} + 4.779 R_{1952} - 23.273 R_{2137} - 19.572 R_{2032} + 21.615 R_{2037} + 4.75 R_{2227} - 6.795 R_{2327} + 3.235 R_{2342} - 2.243 R_{2432})$ |
| ۰/۰۱۳۱ | ۰/۶۱ | $\theta_{-15000 \text{ cm}} = 0.352 + 0.0184 C/S - 0.2083 \rho_b$ |
| ۰/۰۱۲۷ | ۰/۶۴ | $\theta_{-10000 \text{ cm}} = 0.189 + 0.00062 C + 0.027 C/S - 0.061 \rho_b$ |
| ۰/۰۱۳۲ | ۰/۶۲ | $\theta_{-5000 \text{ cm}} = 0.32 - 0.179 \rho_b + 0.0238 C/S + 0.0111 OC$ |
| ۰/۰۱۵۰ | ۰/۵۶ | $\theta_{-3000 \text{ cm}} = 0.152 + 0.030 C/S + 0.015 OC - 0.096 d_g^*$ |
| ۰/۰۲۰۰ | ۰/۳۴ | $\theta_{-1000 \text{ cm}} = 0.247 - 0.0014 S + 0.021 OC$ |
| ۰/۰۲۱۵ | ۰/۳۱ | $\theta_{-330 \text{ cm}} = 0.402 + 0.0161 C/S + 0.01187 OC - 0.155 \rho_b$ |

RW: درصد بازتاب طیفی در طول موج S، C، w و OC به ترتیب درصد رس، درصد شن و درصد کربن آلی خاک، ρ_b جرم ویژه ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)، d_g^ میانگین هندسی قطر ذرات خاک (میلیمتر) و θ مقدار رطوبت حجمی خاک (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) در مکش‌های مختلف می‌باشد.

جدول ۵. مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی نقطه‌ای خاک به منظور برآورد نگهداشت آب در خاک*

| RMSR | R ² | توابع انتقالی نقطه‌ای خاک (PTFs) |
|--------|----------------|---|
| ۰/۰۱۲۹ | ۰/۶۱ | $\theta_{-15000 \text{ cm}} = 0.212 + 0.025 C/S - 0.087 \rho_b$ |
| ۰/۰۱۲۸ | ۰/۶۲ | $\theta_{-10000 \text{ cm}} = 0.173 + 0.00088 C + 0.016 C/S - 0.061 \rho_b$ |
| ۰/۰۱۲۶ | ۰/۶۵ | $\theta_{-5000 \text{ cm}} = 0.186 - 0.055 \rho_b + 0.029 C/S + 0.01 OC$ |
| ۰/۰۱۲۹ | ۰/۶۶ | $\theta_{-3000 \text{ cm}} = 0.153 + 0.026 C/S + 0.013 OC - 0.078 d_g^*$ |
| ۰/۰۲۰۰ | ۰/۳۳ | $\theta_{-1000 \text{ cm}} = 0.237 - 0.00115 S + 0.021 OC$ |
| ۰/۰۲۱۷ | ۰/۲۹ | $\theta_{-330 \text{ cm}} = 0.196 + 0.030 C/S + 0.013 OC + 0.020 \rho_b$ |

S و OC به ترتیب درصد رس، درصد شن و درصد کربن آلی خاک، ρ_b جرم ویژه ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)، d_g^ میانگین هندسی قطر ذرات خاک (میلیمتر) و θ مقدار رطوبت حجمی خاک (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب) در مکش‌های مختلف می‌باشد.

دقت‌آزمایی توابع انتقالی

در مکش‌های ۱۰۰۰ و ۳۳۰ سانتی متر ($RPD < 1/4$) مشاهده شد. دقت بالای تخمین‌ها در مکش‌های بیشتر از ۳۰۰۰ سانتی متر می‌تواند به دلیل همبستگی معنی‌دار و بیشتر رطوبت خاک در این مکش‌ها با مقادیر رس و شن باشد (جدول ۲) که رس و شن نیز خود همبستگی معنی‌دار و بالایی را با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های مختلف نشان داده‌اند (شکل ۳ب). تخمین‌های ضعیف در مکش‌های کمتر از ۱۰۰۰ سانتی متر می‌تواند به دلیل انحراف معیار نسبی زیاد رطوبت خاک در این مکش‌ها در مقایسه با سایر نقاط رطوبتی (جدول ۱) (Nocita et al., 2011) و یا همبستگی پایین با ویژگی‌های مبنایی خاک

در جدول ۶، نتایج دقت‌آزمایی توابع انتقالی مختلف در برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک برای سری داده‌های آزمون بر اساس آماره‌های مختلف ارائه شده است. بر اساس نتایج، دقیق‌ترین تخمین‌ها به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک کمتر از ۳۰۰۰ سانتی متر با R^2 و d به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۶۳ و ۰/۸۷ به‌دست آمده است. بر اساس آماره RPD، بهترین تخمین‌های STFs در مکش ۱۰۰۰۰ سانتی متر ($RPD = 2/13$)، تخمین‌های متوسط در مکش‌های ۱۵۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی متر (RPD به ترتیب برابر با ۱/۸۰، ۱/۶۶ و ۱/۶۱) و تخمین‌های ضعیف

مقادیر شاخص RPD در تخمین‌های حاصل از SPTFs، PTFs و Rosetta PTFs، کمتر از مقدار آستانه ۱/۴ محاسبه شد که نشان دهنده دقت پایین برآوردها است، هرچند این آماره غالباً در مطالعات طیف‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ممکن است در مورد توابع انتقالی خاک کارایی نداشته باشد. بر اساس مقادیر آماره RI، با استفاده از SPTFs و STFs، دقت تخمین‌ها به ترتیب بین ۵/۸ تا ۳۹ درصد و ۷/۱ تا ۱۹/۴- (علامت منفی به مفهوم کاهش دقت است) درصد نسبت به PTFs بهبود یافته است (جدول ۶). این بهبود نسبی می‌تواند به این دلیل باشد که داده‌های طیفی بهتر توانسته‌اند اثر اجزای خاک را بر مقدار نگهداشت آب در خاک ارائه نمایند و تا حدودی خطای موجود در روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک را کاهش داده‌اند. مقدار متوسط RI در تخمین‌های Rosetta برابر ۰/۶۴- درصد به دست آمد که نشان می‌دهد PTFs اشتقاقی تخمین‌های نسبتاً بهتری در مقایسه با توابع Rosetta ارائه می‌کنند. این اختلاف جزئی می‌تواند به دلیل تفاوت در پارامترهای ورودی توابع انتقالی و نیز نوع روش اشتقاق توابع باشد.

شکل ۴، مقایسه‌ای از مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت حجمی خاک به ازای تمامی مکش‌ها و میزان انحراف آن‌ها از خط ۱:۱ را به ازای سری داده‌های مدل‌سازی و آزمون نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، SPTFs، PTFs، Rosetta PTFs به ترتیب با مقادیر R^2 آزمون برابر با ۰/۹۲۶، ۰/۸۸۴، ۰/۸۹۲ و ۰/۸۶۶ بهترین تخمین‌ها را ارائه کرده‌اند. همچنین، به ازای تمامی توابع انتقالی دقت تخمین‌ها در انتهای خشک بیشتر از انتهای مرطوب منحنی رطوبتی به دست آمد. توابع Rosetta در انتهای مرطوب نتایج به نسبت ضعیف‌تری را ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد جرم ویژه ظاهری خاک نتوانسته است اثر دقیق ساختمان خاک را در نگهداشت رطوبت در مکش‌های پایین نشان دهد.

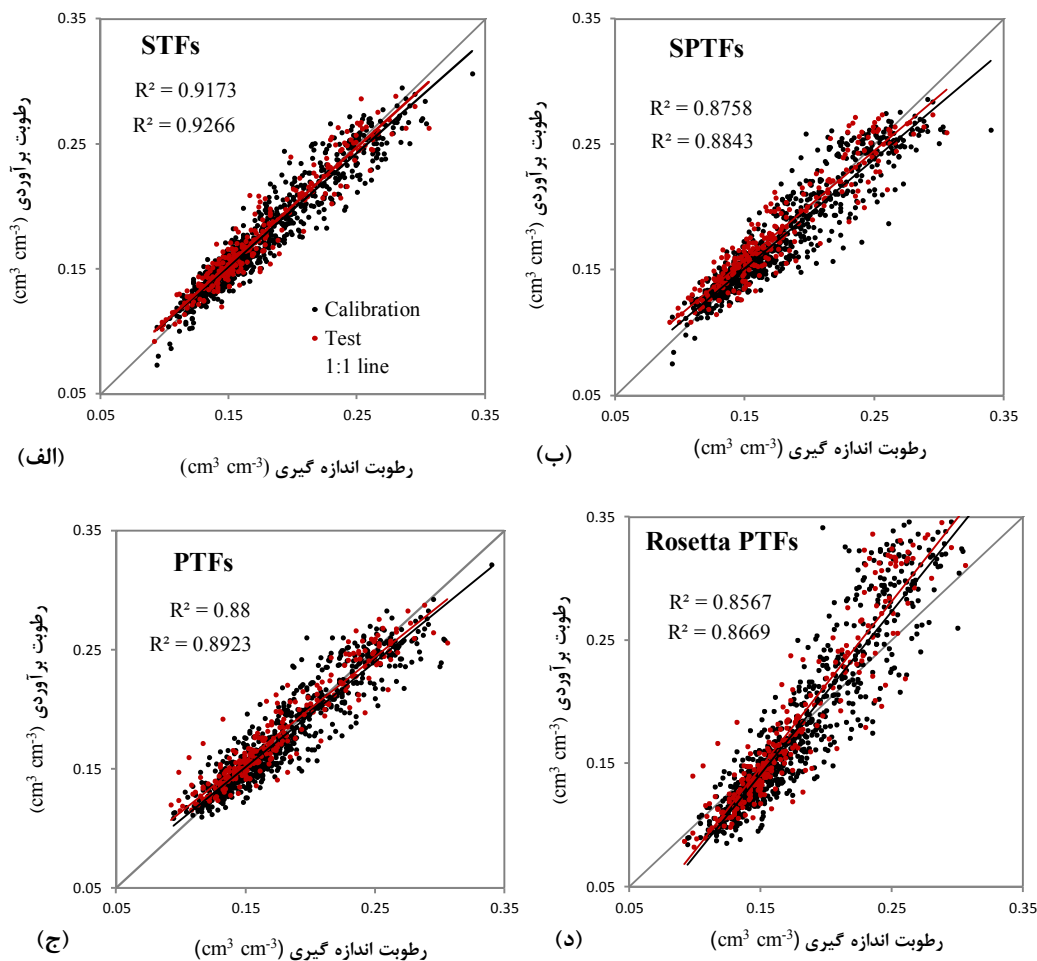
همچون مقدار رس، شن، کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک (جدول ۲) باشد. چرا که این ویژگی‌های مبنایی خاک خود با دقت بالایی توسط داده‌های طیفی برآورد شده‌اند (جدول ۳). در تایید نتایج این پژوهش، می‌توان به یافته‌های Tranter و همکاران (۲۰۰۸) اشاره نمود. آن‌ها با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز دور (۲۵۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر) نشان دادند دقت تخمین‌ها در انتهای مرطوب منحنی رطوبتی بسیار کمتر از انتهای خشک آن است که دلیل آن، همبستگی بالای رطوبت خاک با توزیع اندازه ذرات خاک در انتهای خشک منحنی رطوبتی است.

بر اساس نتایج ارزیابی دقت، مقادیر متوسط ME برای SPTFs، PTFs و اشتقاقی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۴۵ و ۰/۰۰۴۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمده است که نشان می‌دهد این توابع تا حدودی تمایل به بیش‌برآوردی رطوبت خاک در تمامی مکش‌ها دارند. مقادیر متوسط شاخص d برای تخمین‌های حاصل از SPTFs، PTFs و اشتقاقی به ترتیب برابر با ۰/۸۴، ۰/۷۲ و ۰/۷۴ محاسبه شد که نشان دهنده دقت نسبتاً بالایی توابع انتقالی در برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک است (جدول ۶ و شکل ۴ الف-د) (Willmott, 1981).

به منظور ارزیابی دقت SPTFs و PTFs اشتقاقی در این پژوهش و همچنین بررسی دقت روش شبکه‌های عصبی به عنوان یک روش اشتقاق، تخمین‌های حاصل از این توابع با نتایج حاصل از توابع Rosetta مورد مقایسه قرار گرفت. توابع Rosetta در مکش‌های بالا حالت کم‌برآورد (میانگین ME برابر با ۰/۰۰۷۴- سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) و در مکش‌های پایین حالت بیش‌برآورد (میانگین ME برابر با ۰/۰۳۰۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) نشان دادند (جدول ۶، شکل ۴د). مقادیر متوسط RMSR برای تخمین‌های SPTFs، PTFs، Rosetta PTFs و اشتقاقی به ترتیب برابر با ۰/۰۱۲۳، ۰/۰۱۶۱، ۰/۰۱۵۶ و ۰/۰۲۶۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد.

جدول ۶. دقت آزمایشی توابع انتقالی طیفی (STFs)، توابع انتقالی خاک (PTFs)، توابع انتقالی مرکب (SPTFs) و توابع Rosetta به‌منظور برآورد نگهداشت آب در خاک با استفاده از سری داده‌های آزمون (N=۴۴)

| $\theta_{-330\text{ cm}}$ | $\theta_{-1000\text{ cm}}$ | $\theta_{-3000\text{ cm}}$ | $\theta_{-5000\text{ cm}}$ | $\theta_{-10000\text{ cm}}$ | $\theta_{-15000\text{ cm}}$ | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|--|
| -۰.۰۲۱ | -۰.۰۳۷ | -۰.۰۳۱ | -۰.۰۳۴ | -۰.۰۰۷ | -۰.۰۱۸ | STFs | ME [cm ³ cm ⁻³] |
| -۰.۰۲۳ | -۰.۰۱۱ | -۰.۰۴۱ | -۰.۰۶۶ | -۰.۰۶۴ | -۰.۰۶۵ | SPTFs | |
| -۰.۰۱۴ | -۰.۰۱۴ | -۰.۰۴۳ | -۰.۰۶۳ | -۰.۰۵۱ | -۰.۰۶۳ | PTFs | |
| -۰.۰۵۱۶ | -۰.۰۹۸ | -۰.۰۰۹ | -۰.۰۵۴ | -۰.۰۱۱۶ | -۰.۰۱۱۸ | Rosetta PTFs | |
| -۰.۱۵۱ | -۰.۱۸۱ | -۰.۱۱۴ | -۰.۱۰۵ | -۰.۰۸۸ | -۰.۱۰۱ | STFs | RMSR [cm ³ cm ⁻³] RI [%] |
| ۵/۸ | ۸/۶ | ۲۲/۸ | ۲۶/۶ | ۳۹/۰ | ۲۹/۸ | SPTFs | |
| -۰.۱۹۱ | -۰.۲۰۵ | -۰.۱۴۶ | -۰.۱۳۳ | -۰.۱۴۶ | -۰.۱۴۶ | PTFs | Rosetta PTFs |
| -۱۹/۴ | -۳/۵ | ۱/۲ | ۷/۱ | -۱/۴ | -۱/۴ | PTFs | |
| -۰.۱۶۰ | -۰.۱۹۸ | -۰.۱۴۸ | -۰.۱۴۳ | -۰.۱۴۴ | -۰.۱۴۴ | PTFs | |
| -۰.۰۶۷ | -۰.۲۸۱ | -۰.۱۷۲ | -۰.۱۶۷ | -۰.۱۸۷ | -۰.۱۹۱ | PTFs | |
| -۲/۵ | -۱/۲ | -۱/۶ | -۱/۶ | -۱/۳۰ | -۱/۳۲ | STFs | d [-] |
| -۰.۷۵ | -۰.۷۰ | -۰.۸۷ | -۰.۸۹ | -۰.۹۳ | -۰.۹۰ | SPTFs | |
| -۰.۵۵ | -۰.۵۶ | -۰.۷۸ | -۰.۸۳ | -۰.۸۲ | -۰.۸۰ | PTFs | |
| -۰.۶۹ | -۰.۶۱ | -۰.۷۸ | -۰.۷۹ | -۰.۷۹ | -۰.۷۸ | Rosetta PTFs | |
| -۰.۳۷ | -۰.۵۷ | -۰.۷۸ | -۰.۷۹ | -۰.۷۶ | -۰.۷۴ | STFs | R ² |
| -۰.۳۸ | -۰.۳۹ | -۰.۶۳ | -۰.۶۷ | -۰.۷۸ | -۰.۷۰ | SPTFs | |
| -۰.۱۱ | -۰.۱۸ | -۰.۴۳ | -۰.۵۸ | -۰.۵۳ | -۰.۵۱ | PTFs | |
| -۰.۲۹ | -۰.۲۴ | -۰.۴۲ | -۰.۴۷ | -۰.۴۷ | -۰.۴۹ | Rosetta PTFs | |
| -۰.۱۸ | -۰.۱۱ | -۰.۳۹ | -۰.۴۳ | -۰.۴۸ | -۰.۴۳ | STFs | RPD |
| ۱/۲۶ | ۱/۲۶ | ۱/۶۱ | ۱/۶۶ | ۲/۱۳ | ۱/۸۰ | SPTFs | |
| ۱/۰۰ | ۱/۱۱ | ۱/۲۶ | ۱/۳۲ | ۱/۲۸ | ۱/۲۵ | PTFs | |
| ۱/۱۹ | ۱/۱۶ | ۱/۲۴ | ۱/۲۲ | ۱/۳۰ | ۱/۲۷ | Rosetta PTFs | |
| -۰.۳۳ | -۰.۸۱ | ۱/۰۷ | ۱/۰۵ | ۱/۰۰ | -۰/۹۶ | | |



شکل ۴. پراکنش مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط توابع انتقالی طیفی (الف)، توابع انتقالی مرکب (ب)، توابع انتقالی خاک (ج) و توابع Rosetta (د) به ازای تمامی پتانسیل‌های ماتریک.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از داده‌های ابر طیفی خاک در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر) برای برآورد قابلیت نگهداشت آب در خاک در مکش‌های بین ۳۳۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر بررسی و با نتایج حاصل از توابع انتقالی خاک در قالب چهار سناریو مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور از آماره‌های مختلفی برای ارزیابی دقت هر یک از سناریوها استفاده شد. براساس نتایج به‌دست آمده، SPTFs، STF و Rosetta PTFs به ترتیب بیشترین و کمترین دقت را در برآورد پارامترهای نگهداشت آب در خاک نشان دادند. همچنین، تمامی توابع انتقالی، تخمین‌های دقیق‌تری در انتهای خشک نسبت به انتهای مرطوب منحنی رطوبتی ارائه کردند. توابع انتقالی طیفی (STFs) در

مقایسه با سایر توابع، دقیق‌ترین تخمین‌ها را به ازای تمامی مکش‌ها نشان دادند. SPTFs و PTFs در بخش میانی منحنی رطوبتی نتایج مشابهی را ارائه کردند، در حالی‌که در انتهای خشک روش SPTFs و در مرطوب روش PTFs بهترین نتایج را ارائه کردند. توابع Rosetta در تمامی مکش‌ها با کمترین دقت همراه بود، به‌طوری‌که در انتهای مرطوب به مقدار زیادی به بیش‌برآوردی نتایج منتج شدند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، استفاده از داده‌های طیفی خاک می‌تواند به عنوان روشی غیرمستقیم برای برآورد وضعیت نگهداشت آب در خاک مورد استفاده قرار گیرد. البته، به دلیل ماهیت تجربی بودن توابع طیفی و تغییرپذیری ویژگی‌های خاک در سایر مناطق (همچون خاک‌های شور، خاک‌های آلی و خاک-های گچی که اثر متفاوتی بر رفتار طیفی خاک دارند)،

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

Ben-Dor, E. and Banin, A. 1995. Near infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. Soil Science Society of America 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.

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.

Chang, C.W. and Laird, D.A. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. Journal of Soil Science, 167: 110-116.

Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh, C.R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analysis of soil properties. Soil Science Society of America 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.

Dalal, R.C. and Henry, R.J. 1986. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. Soil Science Society of America Journal, 50: 120-123.

Daniel, K.W., Tripathi, N.K. and Honda, K. 2003. Artificial neural network analysis of laboratory and in situ spectra for the estimation of macronutrients in soils of Lop Buri (Thailand). Australian Journal of Soil Research, 41:47-59.

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 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 Farrokhan Firouzi, A. 2008. Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. Australian Journal of Soil Research, 46: 219-227.

لازم است این توابع توسعه یافته و STFs و SPTFs برای سایر مناطق و خاک‌های متنوع‌تر استخراج و مورد ارزیابی قرار گیرند.

فهرست منابع

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. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۳): ۲۷-۴۲.

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.

- 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.
- Nocita, M., Kooistra, L., Bachmann, M., Müller, A., Powell, M. and Weel, S. 2011. Predictions of soil surface and topsoil organic carbon content through the use of laboratory and field spectroscopy in the Albany Thicket Biome of Eastern Cape Province of South Africa. *Geoderma*, 167-168: 295-302.
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. and Lin, H.S. 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131:308-316.
- Pachepsky, Y.A. and Rawls, W.J. 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. *Developments in Soil Science*, 30, Elsevier, Amsterdam.
- Rawls, W.J. and Pachepsky, Y.A. 2002. Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. *Soil Science*, 167:423-435.
- 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.
- Schaap, M.G., Leij, F.J. and van Genuchten, M.Th. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*, 251:163-176.
- Schaap, M.G. and Leij, F.J. 1998. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil Tillage Research*, 47:37-42.
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestana, S. and Rawls, W.J. 2003. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1085-1092.
- Jana, R.B., Mohanty, B. and Springer, E.P. 2007. Multiscale pedotransfer functions for soil water retention. *Vadose Zone Journal*, 6:868-878.
- 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.
- Jarvis, N.J., Zavatiaro, L., Rajkai, K., Reynolds, W.D., Olsen, P.A., McGechan, M., Mecke, M., Mohanty, B., Leeds-Harrison, P.B. and Jacques, D. 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, 108:1-17.
- 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.
- 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.
- Lopez, L.R., Behrens, T., Schmidt, K., Stevens, A., Alexandre, J., Dematte, M. and Scholten, T. 2013. The spectrum-based learner: A new local approach for modeling soil vis-NIR spectra of complex datasets. *Geoderma*, 195: 268-279.
- Martin, P. D., Malley, D. F., Manning, G. and Fuller, L. 2002. Determination of soil organic carbon and nitrogen at the field level using near-infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Soil Science*, 82: 413-422.
- 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.
- 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.
- 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*, 67:1093-1102.

- 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., McGlynn, R. N. and McBratney, A.B. 2006a. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137: 70–82.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and Skjemstad, J.O. 2006c. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59–75.
- Weynants, M., Vereecken, H. and Javaux, M. 2009. Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. *Vadose Zone Journal*, 8(1): 86-95.
- Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2: 184–194.
- Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A.B., Viscarra 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.
- 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., Diels, J., Vanorshoven, J., Feyen, J. and Bouma, J. 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56:1371–1378.
- Vereecken, H., Maes, J. and Feyen, J. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149:1–12.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148:389–403.



ISSN 2251-7480

Assessing spectrotransfer functions and pedotransfer functions in predicting soil water retentions

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

1) Ph.D. student, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University; Tehran 14115-336; Iran

2*) Professor, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University; Tehran 14115-336; Iran, Corresponding author email: mhomaei@modares.ac.ir

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

Received: 28-08-2013

Accepted: 19-12-2013

Abstract

Soil hydraulic properties have important effects on describing water flow, solute and gaseous transports and also are important in hydrological studies. Although spectral information over visible near-infrared and shortwave infrared range, as a rapid, cost-effective and non-destructive method, has been recently applied to predict a number of soil properties, only few attempts have been conducted to predict soil hydraulic properties. The objective of this study was to assess whether inclusion of soil spectral data as a unique set of the predictors and alternative to basic soil properties would improve water retention predictions. Consequently, a number of 174 soil samples were taken and the spectral reflectances of the soils over 350 to 2500 nm range were measured, using a handheld spectroradiometer apparatus. The water retention at six matric potentials of -330, -1000, -3000, -5000, -10000 and -15000 cm were also measured by using pressure plate apparatus. Four scenarios including spectrotransfer functions (STFs), pedotransfer functions (PTFs), spectropedotransfer functions (SPTFs) and Rosetta PTFs were investigated. The transfer functions were first derived and compared with each other as well as with Rosetta PTFs afterwards. Based on the obtained results, basic soil properties and water retention parameters indicated high and significant (1% significance level) correlations with spectral reflectance values particularly in near and shortwave infrared ranges. The STFs indicated higher accuracy ($R^2 > 0.60$; $RMSR < 0.011 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) than the others especially at mid and dry end of retention curve. Although SPTFs and PTFs provided similar predictions, but PTFs were estimated narrowly better predictions at wet-end part of retention curve (-330 and -1000 cm). Weak predictions were obtained by Rosetta PTFs for all water contents particularly at the wet part of retention curve. These results suggest the efficacy of the spectral data, which can be used as an indirect method to predict soil water retention status.

Keywords: continuum removed spectrum; Rosetta; soil spectral reflectance; stepwise multiple linear regression