

برآورد پارامترهای مدل‌های فرکتالی و تجربی منحنی نگه‌داشت آب در خاک با استفاده از توابع انتقالی خاکی و طیفی

سیده ویدا حسینی^۱، مسعود داوری^{۲*}، ناصر خالق پناه^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹.....تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲)

چکیده

در چند دهه اخیر، استفاده از داده‌های طیفی خاک به‌عنوان روشی سریع، کم‌هزینه و غیرمخرب در تخمین ویژگی‌های مبنایی خاک به‌مقدار زیادی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش امکان استفاده از توابع انتقالی طیفی (STFs) و خاکی (PTFs) در برآورد پارامترهای مدل‌های فرکتالی و تجربی منحنی نگه‌داشت آب در خاک (SWRC) بررسی شد. بدین منظور، تعداد ۱۰۰ نمونه خاک سطحی جمع‌آوری و منحنی‌های بازتاب طیفی آن‌ها با استفاده از دستگاه اسپکترومتر زمینی در گستره ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین گردید. پس از انجام پیش‌پردازش‌های طیفی، با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام و بهره‌گیری از داده‌های مبنایی و طیفی خاک، روابط ریاضی به‌ترتیب تحت‌عنوان توابع انتقالی خاکی (PTFs) و طیفی (STFs) پی‌ریزی شد. با توجه به نتایج، تابع انتقالی پارامتریک (PTF) پی‌ریزی شده در برآورد بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) از دقت بسیار بالایی برخوردار بود (R^2 معادل ۰/۹۶)، حال آن‌که توابع پارامتریک اشتقاق یافته در برآورد سایر پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مورد مطالعه شامل $D_{SWRC-TW}$ ، D_{SWRC-B} ، λ_{BC} و n_{VG} دارای دقت پیش‌بینی متوسط بودند (R^2 در محدوده‌ای از ۰/۴۰ تا ۰/۵۹). نتایج همچنین نشان داد که توابع انتقالی طیفی (STFs) پیشنهادی، در برآورد D_{psd} دارای دقتی متوسط (RPD معادل ۱/۴۰) و در برآورد $D_{SWRC-TW}$ ، D_{SWRC-B} ، λ_{BC} و n_{VG} دارای دقتی ضعیف (RPD در محدوده‌ای از ۱/۱۳ تا ۱/۳۷) می‌باشند. بطورکلی نتایج این پژوهش نشان داد، برغم دقت نسبتاً کمتر توابع پارامتریک طیفی نسبت به توابع انتقالی خاک، استفاده از داده‌های طیفی خاک به‌دلیل برآورد همزمان چند پارامتر، هزینه، زمان و داده‌برداری صحرائی کمتر می‌تواند به‌عنوان روشی غیرمستقیم، سریع و نوین (بخصوص با توسعه پایگاه‌های اطلاعاتی خاکی و همچنین توسعه کتابخانه‌های طیفی) در برآورد پارامترهای مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی، تخمین، رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام، ویژگی‌های فیزیکی خاک

حسینی س.و، داوری م.، خالق پناه ن. ۱۴۰۱. برآورد پارامترهای مدل‌های فرکتالی و تجربی منحنی نگه‌داشت آب در خاک با استفاده از توابع انتقالی خاکی و طیفی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۰، شماره ۱. صفحه: ۱۱۱-۱۲۸.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان

* پست الکترونیک: m.davari@uok.ac.ir

مقدمه

منحنی نگه‌داشت آب در خاک (SWRC) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای مدل‌سازی جریان آب در محیط‌های غیراشباع می‌باشد. برغم پیشرفت‌های صورت گرفته در اندازه‌گیری مستقیم SWRC، این روش‌ها همچنان پرزحمت، بسیار زمان‌بر و گران می‌باشند (Wosten *et al.*, 2001). این در حالی است که منحنی‌های نگه‌داشت آب در خاک دارای تغییر پذیری زمانی و مکانی قابل توجهی نیز هستند که برای رفع این مشکل، نمونه‌برداری‌های فراوان و به تبع آن کارهای آزمایشگاهی زیادی باید صورت گیرد (Minasny *et al.*, 1999). لذا، با توجه به مشکلات ذکر شده در اندازه‌گیری‌های مستقیم SWRC، نیاز به روش‌هایی غیرمستقیم به منظور مدل کردن آن اجتناب ناپذیر می‌باشد. از روش‌های غیر مستقیم تخمین SWRC می‌توان به مدل‌های مبتنی بر توزیع اندازه خلل‌و فرج خاک (Arya & Paris, 1980)، توابع انتقالی (PTFs) (Wosten *et al.*, 2001)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Minasny & McBratney, 2007) و روش‌های مدل‌سازی معکوس (Mertens *et al.*, 2006) اشاره کرد. بوما (Bouma, 1989) تابع انتقالی را به صورت ترجمه اطلاعات در دسترس به اطلاعات موردنیاز تعریف کرده است. به عبارت دیگر PTFs می‌توانند خصوصیات دیرپافت (مانند خصوصیات هیدرولیکی) خاک را با استفاده از ویژگی‌های زودپافت (مانند توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن آلی و جرم ویژه ظاهری) خاک به کمک یک رابطه ریاضی مناسب پیش‌بینی کنند (Wosten *et al.*, 2001). چندین تابع انتقالی براساس توزیع اندازه ذرات خاک، جرم ویژه ظاهری و مقدار کربن آلی خاک برای پیش‌بینی SWRC توسعه یافته‌اند (Schaap *et al.*, 1998). در طول چند دهه گذشته، مدل‌های مکانسیستی و تجربی متعددی نیز برای کمی کردن SWRC پیشنهاد شده است (Brooks & Corey, 1964; Campbell, 1974; Sadikhani, 2019; van Genuchten, 1980). بایستی در نظر داشت که در اشتقاق این توابع و مدل‌های پیشنهادی، منافذ و ذرات موجود در خاک دارای هندسه ایده‌آل (استوانه، دایره، کره و خط) در نظر گرفته می‌شوند. این در حالی است که

فرض منظم بودن شکل آن‌ها، می‌تواند باعث ایجاد خطاهایی غیر قابل کنترل در مدل‌سازی و شبیه‌سازی SWRC گردد. این موضوع زمینه‌ای بر این شد که محققین علوم خاک نیز بتوانند با بهره‌گیری از هندسه فرکتالی مدل‌هایی را برای کمی کردن SWRC پیشنهاد کنند. به عنوان مثال، تایلر و ویت‌کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1990) از سنگ‌فرش سرپینسکی برای توصیف اندازه خلل‌و فرج خاک استفاده کرده و یک رابطه نمایی مشابه معادلات بروکس و کوری (Brooks & Corey, 1964) و کمپل (Campbell, 1974) ارائه کردند؛ به طوری که بعد فرکتالی حاصل از معادله آن‌ها در دامنه‌ای از ۱ تا ۲ متغیر بود. پرفکت (Perfect, 1999) براساس مدل فرکتالی اسفنج-منژر رابطه‌ای برای پیش‌بینی SWRC ارائه کرد. بعد فرکتالی تخمین زده شده توسط این مدل مقادیری کمتر از ۳ داشته و از ۲/۶ برای بافت لوم شنی تا ۲/۹ برای بافت رسی سیلتی متغیر بود. در ایران نیز کهخامقدم و سپاسخواه (Kahkhamoghdam & Sepaskhah, 2017) تابع عمومی مدل Pore-Solid Fractal (PSF) را بر اساس بعد فرکتالی با داده‌های مکش-آب خاک ارزیابی کرده و به مقایسه آن با مدل‌های بروکس و کوری و تایلر و ویت-کرافت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای خاک‌های مورد بررسی تابع تایلر و ویت‌کرافت در مقایسه با تابع PSF و تابع بروکس و کوری تطابق بهتری داشت. آن‌ها بیان کردند که در برآورد مکش ورود هوا (h_{min}) و رطوبت اشباع خاک (Θ_s) مدل‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند؛ لیکن برای محاسبه بعد فرکتال (D) استفاده از معادله تایلر و ویت‌کرافت را توصیه کردند. در پژوهش دیگری، استواری و همکاران (Ostovari *et al.*, 2017) به ارزیابی و مقایسه توابع انتقالی استواری - بیگی هرچگانی (Ostovari & Beigi Harchegni, 2013) و قنبریان علویجه - میلان (Ghanbarian-Alavijeh & Millán, 2010) (هر دو از بانک اطلاعاتی یکسانی استخراج شده بودند) در برآورد هشت نقطه از منحنی نگه‌داشت آب در خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که توابع استواری - بیگی هرچگانی در مکش‌های کم، کارایی خوبی داشته و مشابه با توابع قنبریان علویجه - میلان بود؛ در حالی که در مکش‌های زیاد و نزدیک به نقطه پژمردگی دائم، توابع استواری - بیگی هرچگانی که از بعد

انتقالی طیفی (STFs) جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی معادله معلم-وان گنوختن ایجاد کردند. آن‌ها در پژوهش خود قابلیت استفاده از STFs در قالب سه سناریو شامل داده‌های طیفی در مقیاس آزمایشگاهی (سناریو ۱)، داده‌های طیفی در مقیاس سنجنده‌ی چندطیفی Sentinel-2 (سناریو ۲) و داده‌های طیفی در مقیاس سنجنده‌ی ابرطیفی EnMAP (سناریو ۳) را بررسی کردند. با توجه به یافته‌های آن‌ها، بهترین نتایج برای برآورد پارامترهای معادله معلم-وان گنوختن برای سناریوهای ۱ و ۲ با مقادیر R^2 مشابه برای پارامترهای شکل n ، α^* و K_s^* (به ترتیب شکل لوگ نرمال α و K_s) به دست آمد. پیتاکی-کریسودونتا و همکاران (Pittaki-*Chrysodonta et al.*, 2018) با مطالعه طیف وسیعی از کلاس‌های بافتی اراضی کشاورزی دانمارک، تابع SWRC کمپل را با دو روش توابع انتقالی کلاسیک و روش طیف-سنجی در گستره Vis-NIR پیش‌بینی و مقایسه کردند. با توجه به نتایج آن‌ها، طیف سنجی Vis-NIR از مقدار رطوبت اشباع، که متأثر از ساختمان خاک است، پیش‌بینی ضعیفی ارائه کرد. این محققین جهت پیش‌بینی بهتر، مقدار رطوبت خاک در $pF=3$ را جایگزین رطوبت اشباع در معادله کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که محتوای آب خاک در $pF=3$ و پارامتر b معادله کمپل به خوبی توسط هر دو روش پیش‌بینی گردید. لئون و همکاران (Leone *et al.*, 2019) در پژوهشی در اراضی زراعی آبی جنوب ایتالیا، پتانسیل طیف‌سنجی انعکاسی Vis-NIR و روش حداقل مربعات جزئی (PLSR) را در پیش‌بینی نکه داشت آب در خاک در ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها، مدل‌های پیشنهادی در برآورد FC و PWP از دقت خیلی خوبی برخوردار بودند. اخیراً نیز حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2020) با استفاده از STFs و PTFs وضعیت نکه داشت آب در خاک را پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها بیان‌گر این موضوع بود که STFs پیشنهادی در مقایسه با PTFs در برآورد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف، دارای نتایجی معقول اما به نسبت ضعیف‌تری بودند. همان‌طور که در قبل ذکر گردید استفاده از داده‌های طیفی خاک در چند دهه اخیر، به دلیل ساده، سریع،

فراکتال اجزای بافت خاک به عنوان متغیر مستقل ورودی استفاده کرده بودند، کارایی بیشتری نسبت به توابع قنبریان علویجه - میلان داشت. در برخی از مکش‌ها نیز هر دو تابع کارایی مناسبی در برآورد رطوبت خاک نداشتند.

در دهه‌های اخیر، استفاده از تکنیک‌های دورسنجی^۱ و نزدیک‌سنجی^۲ در برآورد خصوصیات خاک به مقدار زیادی مورد توجه قرار گرفته است (Aldabaa *et al.*, 2015; Nani & Demattê, 2006). یکی از این تکنیک‌های نزدیک‌سنجی، استفاده از طیف‌سنجی انعکاسی پخشیده (Diffuse reflectance spectroscopy) با استفاده از امواج مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی است (Schneider & Young, 1997). بهره‌گیری از طیف‌سنجی انعکاسی در برآورد ویژگی‌های مبنایی خاک می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های آزمایشگاهی را برطرف کند. زیرا برخلاف روش‌های مرسوم اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه، داده‌های خاک با یک روش استاندارد و تنها در یک مرحله بدون نیاز به مواد شیمیایی گران قیمت و سمی تعیین می‌شود. لذا خطای ناشی از روش‌های مختلف اندازه‌گیری و شخص کاربر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Babaeian *et al.*, 2015 a, b). پژوهش‌های گذشته کارایی طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) را در پیش‌بینی ویژگی‌های مبنایی خاک اثبات کرده است (Viscarra Rossel *et al.*, 2009; Stenberg, 2010; Pinheiro *et al.*, 2017; Blaschek *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). این در حالی است که پژوهش‌هایی اندک (Santra *et al.*, 2009; Babaeian *et al.*, 2015 a, b; Pittaki-Chrysodonta *et al.*, 2018) راجع به استفاده از داده‌های طیفی Vis-NIR در برآورد SWRC انجام شده است. سانترا و همکاران (Santra *et al.*, 2009) برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامترهای شکل منحنی رطوبتی معادلات ون گنوختن و بروکس و کوری در شرایط نزدیک به اشباع از طیف‌سنجی انعکاسی استفاده کردند. این محققین نشان دادند تنها پارامتر α با دقت متوسطی برآورد شده و تخمین سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک از دقت پایینی برخوردار است. بابائیان و همکاران (Babaeian *et al.*, 2015b) توابع

4. Partial least squares regression
5. Field capacity
6. Permanent wilting point

1. Remote sensing
2. Proximal sensing
3. Spectrotransfer Functions

و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال از دستگاه غشاء فشاری استفاده شد. با استفاده از جعبه ابزار Solver و با روش بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا در نرم‌افزار Excel (Leon et al., 1998) برخی پارامترهای مجهول معادله‌های منحنی نکه- داشت آب در خاک (جدول ۱) شامل D_{SWRC} ، $D_{SWRC-TW}$ ، λ_{BC} ، β و n_{VG} (به ترتیب بعد فرکتال منحنی رطوبتی خاک مدل‌های تایلر و ویت‌کرافت و بیرد و همکاران، ضریب توزیع اندازه ذرات خاک در معادله بروکس و کوری، پارامتر تجربی در معادله ون‌گنوختن و شیب منحنی رطوبتی خاک در مدل کمپل) تخمین زده شدند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های طیفی خاک و پردازش‌های طیفی
بازتاب طیفی نمونه خاک‌های جمع‌آوری شده در دامنه Vis-NIR، با استفاده از دستگاه اسپکترومتر دیومتر زمینی (FieldSpec@3, ASD, FR, USA) و به کمک پیستولی مجهز به لنز ۸ درجه با میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتیمتر اندازه‌گیری شد (شکل ۱). بدین منظور نمونه‌های هوا-خشک خاک و رد شده از الک ۲ میلی‌متر داخل پتری دیش‌هایی به قطر ۱۰ سانتیمتر ریخته شده و منحنی‌های طیفی آن‌ها در دامنه ۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر در تاریک‌خانه در ۵ تکرار برای هر نمونه خاک تعیین شده و با استفاده از نرم‌افزار RS3 موجود بر روی رایانه متصل به دستگاه اسپکترومتر، ثبت گردید (Viscarra Rosset et al., 2006). همچنین، به منظور حذف آشفتگی‌های طیفی (نویز)، به ازای قرائت از هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) در شرایطی کاملاً یکسان با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک انجام شد.

با استفاده از نرم‌افزار ViewSpec Pro Version 6.0 (نرم-افزاری برای پس‌پردازش داده‌های طیفی (ASD, Inc., Boulder, CO, 2011)) برای هر نمونه خاک یک میانگین به ازای ۵ تکرار مختلف محاسبه و در تجزیه و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲). به منظور بالا بردن کیفیت داده‌ها و به دست آوردن نتایج واسنجی بهتر، روش‌های مختلف پیش‌پردازش توسط نرم‌افزار Unscrambler X 10.4 بر روی داده‌های طیفی انجام شد. استفاده از این روش‌ها به‌واقع به منظور حذف عوامل خارجی (همچون رطوبت خاک، زبری سطح خاک و

کم‌هزینه و غیرمخرب بودن آن‌ها و امکان ترکیب نتایج آن با داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، به‌عنوان روشی غیر مستقیم در تخمین ویژگی‌های مبنایی خاک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اگر فرض بر این باشد که ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نیز اثری غیرمستقیم بر رفتار طیفی خاک دارند، به‌نظر می‌رسد بتوان با بررسی داده‌های طیفی خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی و فرکتالی خاک را برآورد کرد. از این‌رو به‌دنبال مطالعه حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2020)، در این پژوهش تلاش شد امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در محدوده Vis-NIR، به‌عنوان متغیر ورودی توابع انتقالی طیفی پارامتریک، در تخمین پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی منحنی‌های نکه‌داشت آب در خاک ارزیابی گردد. افزون بر این، کارایی این توابع انتقالی طیفی پارامتریک در برآورد SWRC با توابع انتقالی خاکی پارامتریک نیز مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک
در این پژوهش، به منظور تخمین SWRC، ۱۰۰ نمونه خاک دست‌خورده به‌صورت تصادفی از عمق ۳۰-۵۰ سانتی-متری سطح خاک بخشی از اراضی کشاورزی شهرستان-های قروه-دهگلان واقع در استان کردستان جمع‌آوری گردید. نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و رد شدن از الک ۲ میلی‌متری به دو بخش تقسیم شدند: از بخش اول نمونه‌ها برای مطالعه‌های طیف‌سنجی و از بخش دوم آنها برای تجزیه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. ویژگی‌های زود یافت خاک شامل توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری و الک، جرم ویژه ظاهری و حقیقی به ترتیب به روش کلوخه و پیکنومتر، مقدار کربن آلی به روش والکلی-بلاک و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Sparks et al., 1996; Dane & Topp, 2002). مقدار میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات (به-ترتیب d_g و σ_g) با استفاده از روابط ارائه شده توسط (Shirazi & Boersma, 1984) محاسبه شدند. برای تعیین منحنی نکه‌داشت آب در خاک در مکش‌های ماتریک ۱۰، ۳۳، ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال از دستگاه صفحات فشاری و در مکش‌های ماتریک ۵۰۰، ۱۰۰۰

ابتدایی و انتهایی طیفها (محدوده بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ و ۲۴۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) از تمامی طیفها حذف شده و در مدل سازی نیز مورد استفاده قرار نگرفت (Viscarra et al., 2009).

بقایای آلی درشت) و همچنین حذف هرچه بیشتر برخی آشفته‌گی‌ها در طیفهای خاک (همچون رفتار غیرخطی باندها، نرمال سازی طیفها، فیلتر و بارزسازی طیفی) می- باشد (Stenberg, 2010; Rezghi et al., 2020, Davari et al., 2021). به دلیل آشفته‌گی‌های زیاد طیفی، دو بخش

جدول ۱- بیان ریاضی برخی از مدل‌های تجربی و فرکتالی SWRC مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Mathematical expression of some experimental and fractal SWRC models used in this research

Model name	Function	Unknown parameters
Tyler and Wheatcraft, 1990	$\theta_i = \phi \left(\frac{h_i}{h_{\min}} \right)^{D-3} \quad h_{\min} \leq h_i$	h_{\min} و D
Bird et al., (2000)	$\theta_i = (\phi - \beta) + \beta \left(\frac{h_i}{h_{\min}} \right)^{D-3} \quad h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max}$	β و h_{\min} ، D
Brooks and Corey (1964)	$\theta_i = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h_i)^{-\lambda} \quad \alpha h_i > 1$ $\theta_i = \theta_s \quad \alpha h_i \leq 1$	θ_r , α , λ
van Genuchten (1980)	$\theta_i = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha h_i)^n \right]^{-m} \quad \alpha h_i > 1$ $\theta_i = \theta_s \quad \alpha h_i \leq 1$	θ_r , α , n , m
Campbell (1974)	$\theta_i = \theta_s \left(\frac{h_e}{h} \right)^b \quad h_e \leq h$	h_e , b

ϕ : تخلخل کل خاک (cm^3/cm^3)، θ_s : رطوبت حجمی اشباع خاک (cm^3/cm^3)، θ_r : رطوبت حجمی باقیمانده خاک (cm^3/cm^3)، θ_i : رطوبت حجمی خاک (cm^3/cm^3) در پتانسیل ماتریک اعمال شده به خاک (cm)، D : بعد فرکتالی SWRC، h_{\min} و h_{\max} (cm): پتانسیل ماتریک اعمالی که در آن به ترتیب کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین منافذ اشباع خاک از آب تخلیه می‌شوند، β : معادل $\frac{P}{P+S}$ بوده که در آن P و S به ترتیب فاز حفره و فاز ذرات جامد خاک می‌باشد، α : عکس پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک ($1/\text{cm}$)، λ : ضریب توزیع اندازه منافذ خاک، α ، n و m پارامترهای تجربی معادله ون‌گنوختن بوده که بر شکل منحنی رطوبتی خاک تأثیر می‌گذارند ($1/\text{cm}$) α عکس پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک، n فاکتور شیب منحنی است که شیب را در اطراف نقطه عطف منحنی تغییر می‌دهد و ضریب ثابت m نیز معادل $1 - 1/n$ می‌باشد، h_e (cm): پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک و b : شیب منحنی نگاه‌داشت آب در خاک

ϕ : total soil porosity (cm^3/cm^3), θ_s : saturated water content (cm^3/cm^3), θ_r : residual water content (cm^3/cm^3), θ_i : volumetric soil water content (cm^3/cm^3) at matric potential of soil ($h_i(\text{cm})$), D : fractal dimension of SWRC, h_{\min} and h_{\max} (cm): soil matric potential at which the smallest and largest saturated pores desaturate, respectively, β : equivalent to $\frac{P}{P+S}$ in which P and S are the phase and solid phases, respectively, α : inverse of the air-entry suction ($1/\text{cm}$), λ : pore size distribution index, α , n and m are the experimental parameters of the van Genuchten equation that affect the shape of the soil water retention curve, (α ($1/\text{cm}$) is inverse of the air-entry suction, n is the curve shape parameter that changes the curve slope around the turning point, and the constant coefficient m is equal to $1-1/n$), h_e (cm): air entry water potential and b : slope of the soil water retention curve



شکل ۱- تصویری از وسایل اندازه‌گیری انعکاس طیفی خاک در تاریک خانه، دستگاه FieldSpec@3 و ابزارهای آن و نمونه خاک آماده شده در پتری‌دیش

Figure 1. Illustration of the soil spectral reflectance measuring device in the darkroom, FieldSpec@3 apparatus and its accessories, and soil sample prepared in petri dish

واریانس (VIF^4) (کمتر از مقدار بحرانی ۵) و آزمون کولموگروف - اسمیرنوف استفاده شد. شایان ذکر است که داده‌های غیرنرمال در این پژوهش با استفاده از تبدیل مناسب نرمال شدند.

شاخص‌های ارزیابی توابع انتقالی پیشنهادی

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی، از آماره‌هایی همچون میانگین خطا (ME^5)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^6$)، ضریب تبیین (R^2)، ضریب همبستگی (r^7) و درصد انحراف نسبی (RPD) استفاده شد. شاخص RPD که اغلب در مطالعات طیف‌سنجی استفاده می‌شود از نسبت انحراف معیار (SD) به ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) تعیین می‌شود. این شاخص به سه گستره $1/4 <$ ، $2-1/4$ و $2 >$ که به ترتیب معرف برآورد ضعیف، قابل قبول و قوی می‌باشند، طبقه‌بندی می‌شود (Chang & Laird, 2002; Janik et al., 2007; Amirabedi et al., 2019). کمتر بودن RMSE نشان‌دهنده دقیق بودن مدل است (Liu et al., 2008).

در این پژوهش برای ارزیابی همبستگی بین پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مورد مطالعه با برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و یا مقادیر جذب طیفی خاک از ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲، توصیف آماری برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده در دو سری داده‌های مدل‌سازی و اعتبارسنجی آورده شده است. با توجه به نتایج، در منطقه مورد مطالعه فراوانی خاک‌های با بافت ریز و متوسط زیاد می‌باشد، زیرا که بافت‌های رس و لوم رسی، کلاس‌های بافتی غالب منطقه را تشکیل می‌دهند. مقدار متوسط کربن آلی خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه نیز برابر $0/81$ درصد اندازه‌گیری شد و به نظر می‌رسد این مقدار کربن آلی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر رفتار طیفی خاک‌ها نداشته باشد (Viscarra Rossel et al., 2006).

پس از ثبت طیف‌ها و میانگین‌گیری از تکرارهای مختلف برای هر نمونه، مقادیر انعکاس طیفی (R) با بهره‌گیری از رابطه $A = \text{Log}(1/R)$ به جذب (A) تبدیل شد. از روش‌های مختلف پیش‌پردازش شامل فیلتر میانه، نرمال‌سازی بر اساس میانگین، متغیر نرمال استاندارد (SNV)، تصحیح پخشیده چندگانه (MSC)، مشتق اول و یا مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزکی و گلای (SG) استفاده شد (Esbensen, 2006). با توجه به نتایج حاصل از روش اعتبارسنجی متقابل، منحنی‌های جذب و فیلتر SG به صورت تابع چندجمله‌ای درجه اول، به عنوان مناسب‌ترین روش پیش‌پردازش داده‌های طیفی انتخاب شدند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (مقادیر حداکثر (MAX)، حداقل (MIN) و انحراف معیار (SD))، توسط نرم افزار SPSS ۲۳ محاسبه شد. سپس ارتباط بین مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج با پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی، با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، مورد ارزیابی قرار گرفت. بخشی از داده‌ها (۷۰٪ داده‌ها به صورت تصادفی) به منظور واسنجی و اشتقاق مدل‌های رگرسیونی و بخش دیگر آن‌ها (۳۰٪) به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اشتقاق مدل‌های برآوردی، از روش رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام (SMLR) در نرم افزار SPSS ۲۳ استفاده شد. ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی منحنی نگه‌داشت آب در خاک بر داده‌های اندازه‌گیری شده به عنوان متغیرهای وابسته و داده‌های طیفی خاک به عنوان متغیرهای مستقل مدل چندگانه در نظر گرفته شدند. جهت بررسی مفروضات رگرسیون که شامل فرض استقلال خطاها (تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده)، عدم همراستایی چندگانه و نرمال بودن توزیع داده‌ها می‌باشد، به ترتیب از آزمون دوربین-واتسون (مقدار این آماره بین $2/5 - 1/5$)، فاکتور عامل تورم

6. Mean error
7. Root-mean-square error
8. Coefficient of determination
9. Correlation coefficient
1 . Ratio of performance deviation 0

1. Standard normal variate
2. Multiplicative signal correction
3. Savitzky - Golay
4. Stepwise multiple linear regression
5. Variance Inflation Factor

جدول ۲- توصیف آماری برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی نگه‌داشت آب در خاک در دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی

Table 2. Statistical description of some soil basic properties and parameters obtained from fitting measured data to fractal and experimental SWRC models in two calibration and validation datasets

Properties	Calibration				Validation			
	Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
Clay (%)	35.79	20.00	51.78	8.00	35.74	19.50	58.49	9.32
Silt (%)	36.41	24.81	50.12	5.207	38.40	23.31	47.43	5.69
Sand (%)	27.78	9.47	51.39	10.49	25.85	4.03	51.86	11.78
d_g (mm)	0.027	0.006	0.082	0.018	0.026	0.004	0.092	0.020
δ_g (mm)	14.60	9.31	20.13	2.39	13.57	6.78	19.09	2.61
Bd (g/cm^3)	1.61	1.28	2.05	0.159	1.59	1.40	1.97	0.118
PD (g/cm^3)	2.68	2.50	2.80	0.058	2.68	2.55	2.81	0.055
P (%)	39.72	23.89	51.35	5.89	40.6	24.48	46.82	4.70
OC (%)	0.79	0.26	1.36	0.27	0.82	0.15	1.25	0.27
CCE (%)	25.41	0.12	60.25	17.87	26.44	0.125	59.75	17.05
D_{psd}	2.83	2.73	2.88	0.037	2.83	2.75	2.91	0.039
$D_{SWRC-TW}$	2.69	2.54	2.79	0.050	2.69	2.53	2.84	0.055
D_{SWRC-B}	2.55	2.10	2.92	0.184	2.44	0.72	2.99	0.37
λ_{BC}	0.30	0.19	0.59	0.084	0.30	0.11	0.53	0.081
n_{vG}	1.30	1.19	1.56	0.080	1.30	1.11	1.50	0.080
b_C	0.23	0.16	0.41	0.051	0.23	0.09	0.38	0.053

Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، d_g : میانگین هندسی قطر ذرات، δ_g : انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، Bd: جرم ویژه ظاهری خاک، Pd: جرم ویژه حقیقی خاک، P: تخلخل کل خاک، OC: کربن آلی خاک، CCE: کربنات کلسیم معادل خاک، D_{psd} : بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک، $D_{SWRC-TW}$: بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در مدل تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰)، D_{SWRC-B} : بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در مدل فرکتالی بیرد و همکاران (۲۰۰۰)، n_{vG} : پارامتر تجربی لحاظ شده در معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰)، λ_{BC} : ضریب توزیع اندازه منافذ خاک در معادله بروکس و کوری (۱۹۶۴) و b_C : شیب منحنی نگه‌داشت آب در خاک در معادله‌ی کمپل (۱۹۷۴).

d_g : geometric mean diameter of particles, δ_g : geometric standard deviation of soil particles, Bd: bulk density, PD: particle density, P: total porosity, OC: organic carbon, CCE: calcium carbonate equivalent, D_{psd} : fractal dimension of the soil particle size distribution, $D_{SWRC-TW}$: fractal dimension of SWRC in Tyler and Wheatcraft model (1990), D_{SWRC-B} : fractal dimension of SWRC in Bird *et al.* equation (2000), n_{vG} : experimental parameter in the van Genuchten equation (1980), λ_{BC} : the soil pore size distribution coefficient in Brooks and Corey equation (1964) and b_C : the slope of the soil moisture retention curve in Campbell's equation (1974).

Tyler & Wheatcraft, (Sposito, 1991)، تایلر و ویت‌کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1990) همچنین کراوچنکو و ژانگ (Kravchenko & Zhang, 1998) گزارش کرده‌اند که بعد فرکتال خاک می‌تواند در دامنه‌ای از ۲ تا ۳ متغیر باشد. تغییر در مقدار بعد فرکتال تخمینی به نوع کلاس بافتی خاک وابسته است؛ به‌گونه‌ای که خاک‌های با کلاس بافتی درشت در مقایسه با خاک‌های دارای کلاس بافتی ریز دارای بعد فرکتال کوچک‌تری می‌باشند. یافته‌های حاصل از این پژوهش نیز نشان می‌دهد که مقدار D_{psd} و D_{SWRC} در سنگین‌بافت‌ها در مقایسه با سبک و متوسط‌بافت‌ها بیشتر است (داده‌ها

مقدار کربنات کلسیم معادل، بازه‌ای گسترده از ۰/۱۲ تا ۶۰/۲۵ درصد را در برگرفته که بیان‌گر ماهیت کربناتی-بودن برخی از خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. کمینه بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) معادل ۲/۷۳ و بیشینه آن نیز معادل ۲/۸۸ می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مقادیر مربوط به بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک (D_{SWRC}) در مدل تایلر و ویت‌کرافت (TW) از ۲/۵۴ تا ۲/۷۹ متغیر است. در مدل فرکتالی بیرد و همکاران (B) نیز مقادیر مربوط به D_{SWRC} از ۲/۱۰ تا ۲/۹۲ می‌باشند. ریو و اسپوزیتو (Rieu &

تبعیت می‌کند، حال آن‌که با افزایش درصد شن مقدار $D_{SWRC-TW}$ دارای روندی نزولی می‌باشد. این موضوع می‌تواند افزایش D_{psd} و $D_{SWRC-TW}$ را به تبع افزایش درصد رس خاک و یا کاهش مقدار آن‌ها را به تبع افزایش درصد شن در کلاس‌های بافتی مختلف تبیین نماید.

تجزیه و تحلیل منحنی‌های بازتاب طیفی خاک‌های

مورد مطالعه

در شکل (۲) میانگین منحنی‌های خام بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این شکل، منحنی‌های خام طیفی، الگوی معمول طیفی یک خاک را نشان می‌دهند که دارای یک برآمدگی در طول موج‌های بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و چهار مشخصه جذبی مهم در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۹، ۲۲۱۲ و ۲۳۴۱ نانومتر می‌باشند. پژوهش‌ها اثبات کرده‌اند که این مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب آزاد و هیگروسکوپیک بر روی سطوح (۱۴۱۴ نانومتر)، پیوندهای H-O-H مولکول‌های آب حبس‌شده در شبکه کانی‌های رس (۱۹۱۹ نانومتر)، پیوند گروه‌های عاملی OH با فلزات آلومینیوم، آهن، منیزیم و سیلیس موجود در شبکه کانی‌های رسی (۲۲۱۰ نانومتر) و گروه‌های CO_3 موجود در کانی‌های کربناته خاک (۲۳۴۱ نانومتر) است (Clark et al., 1990; Gomez et al., 2008). همچنین عمق مشخص جذبی در طول موج ۱۹۱۹ نانومتر از دیگر باندهای جذبی بیشتر است که نشان می‌دهد این طول موج حساسیت زیادی به وجود گروه‌های هیدروکسیل در شبکه کانی‌های رس دارد. از طرفی، عمق این باند در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های شنی بیشتر است (Viscarra Rossel et al., 2006)، زیرا در شرایط یکسان خاک‌های رسی مقدار رطوبت (گروه‌های هیدروکسیل) بیشتری را نسبت به خاک‌های شنی در خود نگه می‌دارند. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مقدار بازتاب طیفی خاک عمدتاً تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات (بافت خاک)، ماده آلی و pH قرار می‌گیرد (Stenberg, 2010). به طور عمده در گستره مادون قرمز نزدیک و میانی (۲۴۵۰۰-۷۰۰ نانومتر)، با افزایش مقدار رس خاک، میزان بازتاب کاهش و با افزایش درصد شن نیز، مقدار آن افزایش می‌یابد (Pinheiro et al., 2017).

ارائه نشده است). شایان ذکر است که پارامترهای مجهول مدل‌های تجربی و فرکتالی SWRC با برازش این مدل‌ها به داده‌های اندازه‌گیری شده به دست آمد. برای مدل تجربی بروکس-کوری (BC) مقادیر پارامتر شکل λ از ۰/۱۹ (در سنگین بافت‌ها) تا ۰/۵۹ (در سبک بافت‌ها) متغیر می‌باشد. پارامتر شکل b در مدل کمپل (C) نیز روندی مشابه داشته و مقادیری از ۰/۱۶ تا ۰/۴۱ را در بر می‌گیرد. برای پارامتر تجربی معادله‌ی ون گنوختن (vG) نیز مقادیر n از ۱/۱۸ تا ۱/۵۵ متغیر بوده و از سنگین-بافت‌ها به سمت سبک بافت‌ها افزایش می‌یابد.

ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای فرکتالی و

هیدرولیکی مورد مطالعه با برخی ویژگی‌های مبنایی

خاک

در جدول (۳) ضریب همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای هیدرولیکی حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC مورد مطالعه بر داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه گردیده است. نتایج نشان داد که D_{psd} با درصد رس دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r=0/97$) است و این بدین معنی است که با افزایش درصد رس مقدار D_{psd} افزایش می‌یابد. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهد D_{psd} با درصد شن، میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی آن‌ها در سطح یک درصد دارای همبستگی منفی معنی‌دار بوده و این نتایج بیان‌گر کاهش D_{psd} با افزایش قطر ذرات اولیه تشکیل دهنده خاک می‌باشد. این نتایج با یافته‌های حاصل از پژوهش‌های سو و همکاران (Su et al., 2004)، هوانگ و همکاران (Huang et al., 2006)، قنبریان علویجه و همکاران (Ghanbarian-Alavijeh et al., 2011)، بیات و همکاران (Bayat et al., 2013)، فاضلی سنگانی و پیلهور شهری (Fazeli Sangani & Pilehvar, 2013)، شاهری (Shahri, 2013) و داوری و همکاران (Davari et al., 2019) هم‌خوانی دارد. بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در مدل TW ($D_{SWRC-TW}$) بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با D_{psd} و درصد رس (به ترتیب دارای $r=0/68$ و $r=0/66$) و بیشترین همبستگی منفی و معنی‌دار را با میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) ($r=-0/76$) و درصد شن ($r=-0/73$) داشت. این بدین معنی است که با افزایش درصد رس مقدار $D_{SWRC-TW}$ از روندی صعودی

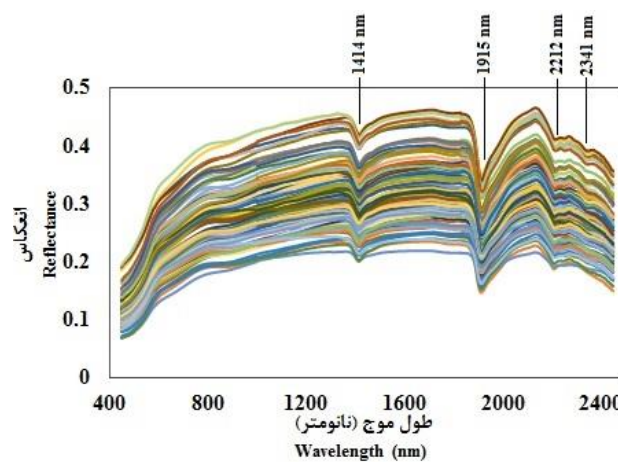
جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های مبنایی خاک و پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های SWRC فرکتالی و تجربی بر داده‌های اندازه‌گیری شده

Table 3. Pearson's correlation coefficient between some soil basic properties and parameters obtained from fitting measured data to fractal and experimental SWRC models

	Clay	Silt	Sand	dg	δ_g	CCE	D_{psd}	$D_{SWRC-TW}$	D_{SWRC-B}	n_{vG}	λ_{BC}
Clay	1										
Silt	0.21*	1									
Sand	-0.87**	-0.65**	1								
d_g	-0.86**	-0.56**	0.94**	1							
δ_g	-0.59**	-0.76**	0.83**	0.60**	1						
CCE	0.11	0.26**	-0.22*	-0.24*	-0.15	1					
D_{psd}	0.97**	0.18	-0.84**	-0.88**	-0.47**	0.15	1				
$D_{SWRC-TW}$	0.66**	0.44**	-0.73**	-0.76**	-0.50**	0.31**	0.68**	1			
D_{SWRC-B}	0.48**	0.14	-0.44**	-0.52**	-0.17	0.16	0.54**	0.67**	1		
n_{vG}	-0.55**	-0.44**	0.64**	0.76**	0.33**	-0.21*	-0.60**	-0.84**	-0.69**	1	
λ_{BC}	-0.52**	-0.39**	0.60**	0.72**	0.29**	-0.22*	-0.58**	-0.85**	-0.72**	0.98**	1
b_C	-0.69**	-0.33**	0.70**	0.77**	0.40**	-0.25**	-0.73**	-0.90**	-0.72**	0.89**	0.88**

* and **: Significant at 5% and 1% probability level, respectively

* و **: به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح خطای ۵ و ۱ درصد



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

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

باعث کاهش مقدار آن می‌شود (Babaeian *et al.*, 2015). (a, b)

تجزیه و تحلیل و ارزیابی ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مورد مطالعه با مقادیر جذب طیفی خاک

در شکل (۳) ضریب همبستگی پیرسون (r) بین پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر جذب طیفی در هر

با توجه به شکل (۲)، مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌های زیر ۷۰۰ نانومتر (Vis) کم (دارای بیشینه ۰/۳۷) و در گستره مادون قرمز نزدیک (NIR)، زیاد (دارای بیشینه ۰/۴۷) می‌باشند. فهمیده و همکاران (Fahmideh *et al.*, 2019) در پژوهش خود در حوزه آبخیز زریبار مریوان در استان کردستان، بیشینه مقدار بازتاب را برابر ۰/۵۲ و کمینه مقدار آن را برابر ۰/۰۲ به دست آوردند. به طور معمول، کربنات کلسیم باعث افزایش مقدار بازتاب از خاک و کربن آلی و رطوبت خاک

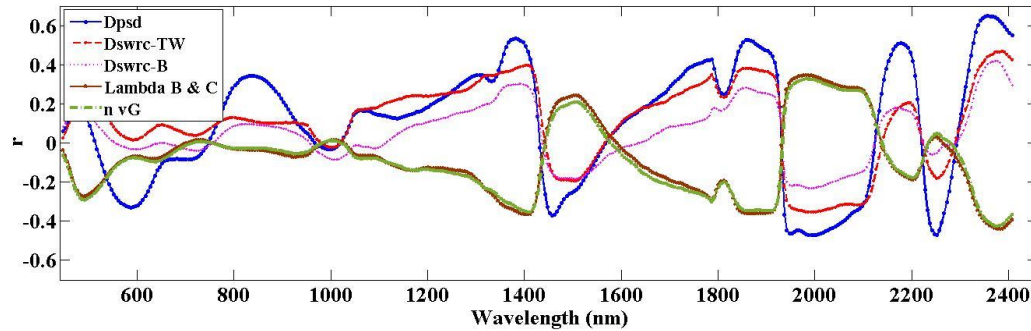
توابع انتقالی خاک (PTFs)

در جدول (۴) توابع انتقالی پارامتریک پیشنهادی (PTFs) جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی مورد-مطالعه با استفاده داده‌های زودیاقت خاکی، همراه با آماره‌های ارزیابی آن‌ها ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تابع پارامتریک اشتقاق یافته برای کمی-کردن (D_{psd}) از دقت بسیار بالایی ($R^2=0/95$) برخوردار است. این بدین معنی است که مدل پیشنهادی توانسته در منطقه مورد مطالعه، $0/95$ تغییرات D_{psd} را با بهره-گیری از دو پارامتر ورودی رس و انحراف معیار هندسی قطر ذرات توجیه کند. لازم به ذکر است که RMSE معادل $0/09$ نیز نشان دهنده دقیق بودن این مدل است. قنبریان علویجه و همکاران (Ghanbarian-Alavijeh *et al.*, 2011) و هوانگ و ژانگ (Huang & Zhang, 2005) نیز بین بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک و درصد رس رابطه‌ای نمایی با همبستگی بالا بدست آوردند. با توجه به نتایج، توابع پارامتریک اشتقاق یافته برای بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در مدل‌های TW (D_{SWRC}-TW)، پارامتر n معادله vG، پارامتر λ معادله BC و پارامتر b معادله C دارای دقت پیش‌بینی متوسط ($0/62$ - $R^2=0/51$) می‌باشند.

این نتایج حاکی از آن است که توابع اشتقاقی توانسته بیش از نصف تغییرات پارامترهای ذکر شده را تبیین کند. مقدار آماره RMSE نیز بیان‌گر دقیق و مناسب بودن توابع پیشنهادی در برآورد این متغیرها می‌باشد. همچنین با توجه نتایج، توابع اشتقاقی در برآورد D_{SWRC-B} از دقت کمتری برخوردار هست ($R^2=0/47$ و $RMSE=0/129$). همان‌گونه که جدول (۴) نشان می‌دهد در توابع تخمین‌گر بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در مدل‌های TW (D_{SWRC}-TW)، پارامترهای میانگین هندسی قطر ذرات (d_g) و کرنات کلسیم معادل (CCE) به‌عنوان مهمترین متغیرها وارد شده‌اند. فاضلی سنگانی و همکاران (Fazeli Sangani & Pilehvar Shahri, 2013) نیز از d_g و D_{psd} برای برآورد $D_{SWRC-TW}$ استفاده کردند.

طول موج، از گستره $2450-400$ نانومتر، ارائه شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد بین بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) و همچنین پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی خاک، همبستگی بالایی وجود دارد. با توجه به این شکل، در بین پارامترهای مطالعه شده، D_{psd} بالاترین همبستگی معنی‌دار معادل $0/65$ و $0/47$ ($p<0/01$) را به‌ترتیب با طول موج‌های 2357 و 1992 نانومتر نشان داد. شایان ذکر است که بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در مدل‌های TW (D_{SWRC}-TW) و B (D_{SWRC}-B)، ضریب توزیع اندازه منافذ خاک (λ) در معادله تجربی BC، پارامتر تجربی n لحاظ شده در معادله vG و پارامتر شیب منحنی نگه‌داشت آب در خاک (b) در مدل C نیز دارای بیشینه ضریب همبستگی معنی‌دار در طول موج‌هایی در گستره $1997-1972$ (به‌ترتیب $-0/36$ و $-0/33$) r_n و r_{λ} $r_{D_{SWRC-TW}}$ $r_{D_{SWRC-B}}$ $-0/41$ و $0/47$ (به‌ترتیب $-0/41$ و $0/42$) r_n r_{λ} $r_{D_{SWRC-TW}}$ $r_{D_{SWRC-B}}$ $-0/51$ می‌باشند. بابائیان و همکاران (Babaeian *et al.*, 2015a) نیز بین میزان بازتاب طیفی خاک در گستره $2350-1905$ نانومتر و پارامترهای n_{vG} و λ_{BC} همبستگی بالایی گزارش کردند. طول موج‌های مجاور 1900 نانومتر متأثر از گروه‌های عاملی هیدروکسیل (OH) موجود در آب خاک می‌باشد، حال آن‌که طول موج‌های مجاور باندهای جذبی 2200 و 2300 نانومتر به‌دلیل وجود پیوندهای Al-OH (همچون کائولینیت) و Mg-OH (همچون مونت‌موریلونیت و ایلیت) موجود در کانی‌های رسی خاک می‌باشد. هرچند بایستی یادآور شد که موقعیت چنین طول موج‌های جذبی در خاک بستگی به ترکیبات موجود در آن داشته و ممکن است از خاکی به خاک دیگر اندک مقداری متفاوت باشد (Stenberg, 2010).

مدل‌سازی پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی حاصل از برازش مدل‌های SWRC مورد مطالعه بر داده‌های اندازه‌گیری شده



شکل ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک، پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و

تجربی SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف

Figure 3. Pearson's correlation coefficient between fractal dimension of the soil particle size distribution, parameters obtained from fitting measured data to fractal and experimental SWRC models with spectral reflectance of soil at different wavelengths

نتایج این جدول نشان می‌دهد، ضریب تبیین (R^2) توابع انتقالی پارامتریک پیشنهادی برای برآورد پارامترهای فرکتالی و تجربی مدل‌های SWRC مورد مطالعه، از ۰/۳۲ تا ۰/۹۶ متغیر است. این بدین معنی است که این توابع در برآورد پارامترهای مذکور از دقت پیش‌بینی متوسط و بالایی برخوردار می‌باشند. با توجه به نتایج، از بین تمامی پارامترهای مطالعه شده، مقادیر آماره‌های R^2 داده‌های آزمون برای بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) بیشترین مقدار و برای بعد فرکتال منحنی نگه‌داشت آب در خاک در معادله‌ی فرکتالی B (D_{SWRC-B})، کمترین مقدار می‌باشد. مقادیر آماره میانگین خطا (ME) در جدول ۴ بیان‌گر این است که همچون مرحله مدل‌سازی، توابع اشتقاق یافته برای پیش‌بینی تمامی پارامترهای ذکر شده دارای حالت بیش‌برآوردی می‌باشند. در شکل (۴)، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی توابع انتقالی پارامتریک اشتقاق یافته در برآورد پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مدل‌های SWRC مورد مطالعه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است.

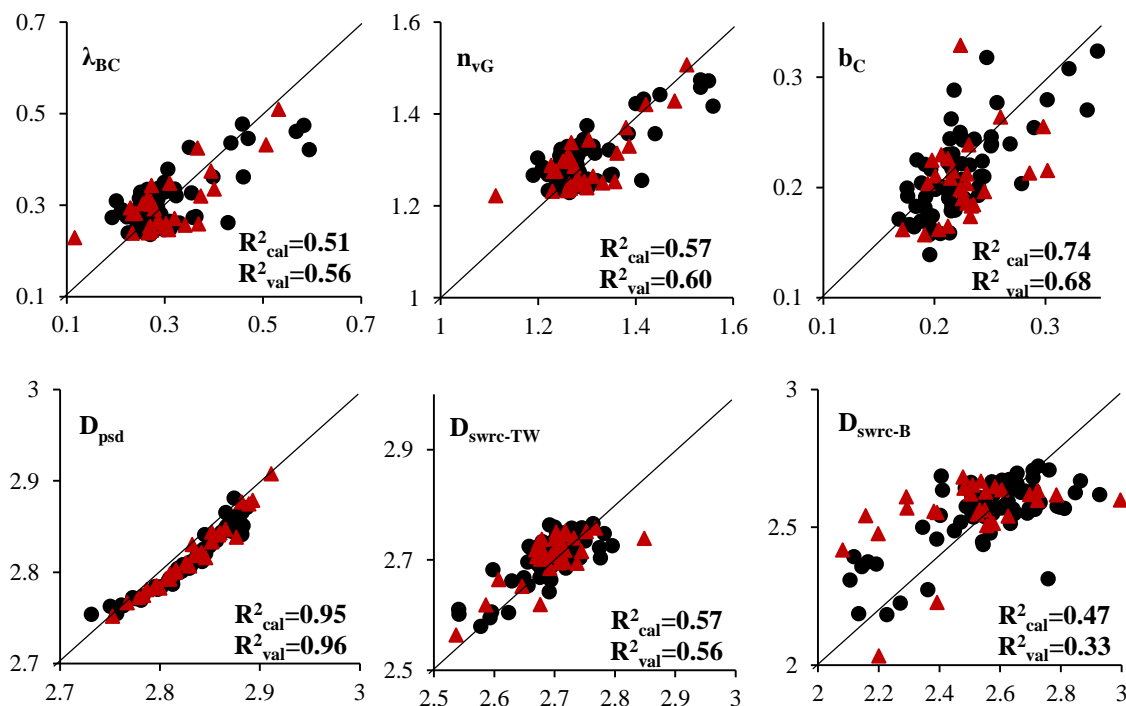
نتایج حاصل از این شکل و آماره‌های ارائه‌شده در جدول (۳) برای هر دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی بیان‌گر آن است که تابع پیشنهادی برای برآورد بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) از دقت تخمین نسبتاً بالایی ($R^2 = 0/96$ و $RMSE = 0/009$) برخوردار است. با توجه به نتایج، توابع انتقالی پارامتریک در برآورد متغیرهای مورد مطالعه ($D_{SWRC-TW}$ ، D_{SWRC-B} ، λ_{BC} ، n_{vG} ، bc) دارای دقت تخمین خوب و متوسطی می‌باشند ($R^2 = 0/40$ - $0/230$ و $RMSE = 0/037$ -

شایان ذکر است که در برآورد D_{SWRC-B} نیز افزون بر d_g درصد شن و مقدار کربن آلی خاک لحاظ شده است. با توجه به نتایج، در برآورد λ_{BC} ، n_{vG} و bc پارامتر d_g مهمترین متغیر لحاظ شده در توابع پیشنهادی است. همایی و فرخیان فیروزی (Homaei & Farrokhan, 2008) مهمترین پارامتر ورودی جهت برآورد n_{vG} را متغیر d_g گزارش کرده‌اند. قربانی دشتکی و همایی (Khodaverdiloo *et al.*, 2011) نیز پارامتر σ_g را به تابع پیشنهادی تخمین‌گر n_{vG} وارد کرده‌اند. ارزیابی آماره ME نیز نشان می‌دهد که همه توابع انتقالی پارامتریک پیشنهادی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی لحاظ شده در مدل‌های SWRC مورد مطالعه دارای اندکی بیش‌برآوردی می‌باشند (جدول ۳). بطور کلی نتایج جدول (۴) بیان‌گر دقت نسبتاً متوسط پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی لحاظ شده در مدل‌های SWRC بود. این موضوع را شاید بتوان به خطای برازش مدل‌های نگه‌داشت آب در خاک به داده‌های اندازه‌گیری شده، گستره‌ی نچندان وسیع پارامترهای هیدرولیکی خاک‌های منطقه مورد مطالعه و وابستگی درونی پارامترهای هیدرولیکی خاک نسبت داد (Van den Berg *et al.*, 1997). ترانتر و همکاران (Tranter *et al.*, 2008) نیز نتایج مشابهی در زمینه دقت تخمین توابع انتقالی پارامتریک در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک گزارش کرده‌اند. در جدول (۴) همچنین نتایج اعتبارسنجی توابع انتقالی پیشنهادی در برآورد پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC بر داده‌های آزمون، بر اساس آماره‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که

جدول ۴- توابع انتقالی پارامتریک اشتقاق یافته به منظور برآورد پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی حاصل از برازش مدل‌های SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده (اعداد داخل پرانتز آماره‌های مربوط به اعتبارسنجی این توابع می‌باشد (N=30))

Table 4. Derived parametric pedotransfer functions for estimating parameters obtained from fitting measured data to fractal and experimental SWRC models (Numbers in parentheses are the statistics obtained from validation of these pedotransfer functions (N = 30))

PTFs	R ²	RMSE	ME
$D_{psd} = 2.624 + 0.005 \text{ Clay} + 0.002 \sigma_g$	0.95 (0.96)	0.009 (0.009)	0.00007 (0.00007)
$D_{swrc-TW} = 2.729 - 1.838 d_g + 0.001 \text{ CCE}$	0.57 (0.56)	0.035 (0.038)	0.001 (0.002)
$D_{swrc-B} = 2.581 - 5.720 d_g + 0.019 \text{ OC}$	0.47 (0.32)	0.129 (0.331)	0.016 (0.110)
$\lambda_{BC} = 0.214 + 3.184 d_g$	0.51 (0.56)	0.058 (0.054)	0.003 (0.003)
$n_{vG} = 1.207 + 3.236 d_g$	0.57 (0.60)	0.053 (0.049)	0.003 (0.002)
$b_C = 0.212 + 2.008 d_g - 0.001 \text{ CCE} - 0.017 \text{ OC}$	0.62 (0.48)	0.034 (0.04)	0.001 (0.002)



شکل ۴- نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی (▲) و اعتبارسنجی (●) توابع انتقالی خاکی پارامتریک اشتقاق یافته در برآورد پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مدل‌های SWRC

Figure 4. 1:1 distribution diagram of calibration (●) and validation (▲) values of derived parametric pedotransfer functions in estimating fractal and hydraulic parameters of SWRC models

توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) که دارای دقت قابل قبولی بوده ($RPD = 1/55$)، مابقی توابع پیشنهاد شده در برآورد پارامترهای λ_{BC} ، n_{vG} و b_C ، $D_{swrc-TW}$ ، D_{swrc-B} پیش‌بینی متوسط تا ضعیفی داشتند (RPD بین ۱/۱۹ تا ۱/۳۶). در مجموع این نتایج بیان‌گر آن است که بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) در مقایسه با دیگر پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مورد مطالعه با دقت نسبتاً بالاتری برآورد شده است. با توجه به نتایج، تعداد متغیرهای تخمین‌گر پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی

توابع انتقالی طیفی (STFs) توابع انتقالی طیفی پارامتریک (PSTFs) اشتقاق یافته به منظور برآورد پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از داده‌های طیفی خاک در طول موج‌های مؤثر، در جدول (۵) آورده شده است. محدوده R^2 و RMSE برای مجموعه داده‌های واسنجی به ترتیب بین ۰/۵۷-۰/۲۹ و ۰/۱۴۹-۰/۰۲۴ به دست آمد. با توجه به آماره RPD، به جز تابع اشتقاق یافته برای برآورد بعد فرکتال

اندازه‌گیری شده آزمون، بر اساس آماره‌های مختلف نیز ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، باتوجه به آماره R^2 (در محدوده‌ای بین ۰/۴۸ - ۰/۲۷) و $RMSE$ (در محدوده‌ای بین ۰/۳۵۲ - ۰/۰۳۳) بدست آمده، این توابع در برآورد پارامترهای مذکور از دقت پیش‌بینی متوسطی برخوردار هستند. این در حالی است که با توجه به آماره RPD (در محدوده‌ای بین ۱/۳۷ - ۱/۰۶)، توابع اشتقاق یافته پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مورد مطالعه دارای برآوردهایی نسبتاً ضعیف هستند. مقدار آماره RPD داده‌های آزمون برای شیب منحنی نگاه‌داشت آب در خاک در معادله‌ی کمپل (bc) بیشترین و برای بعد فرکتال منحنی نگاه‌داشت آب در خاک در معادله‌ی فرکتالی بیرد (D_{SWRC-B}) کمترین مقدار می‌باشد. نتایج آماره ME ارائه شده در جدول (۵) نیز بیان‌گر آن است که همه توابع انتقالی طیفی اشتقاق یافته در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی ذکر شده دارای بیش‌برآوردی می‌باشند.

در شکل (۵) نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پارامتریک در برآورد متغیرهای مورد مطالعه در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل و جدول (۵) مشاهده می‌شود توابع انتقالی طیفی پیشنهادی با استفاده از داده‌های طیفی، در برآورد D_{psd} دارای دقتی متوسط ($RMSE = ۰/۰۲۹$ و $RPD = ۱/۴۰$) و در برآورد $D_{SWRC-TW}$ ، D_{SWRC-B} ، λ_{BC} ، n_{VG} و bc دارای دقتی ضعیف ($RMSE = ۰/۰۴۲$ - $۰/۲۵۱$ و $RPD = ۱/۱۳$ - $۱/۳۷$) می‌باشند. مقایسه نتایج حاصل از $PTFs$ و $STFs$ در برآورد پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه نشان می‌دهد که $PTFs$ در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی خاک در مقایسه با $STFs$ از دقت بالاتری برخوردار هستند. با توجه به نتایج، متوسط مقدار $RMSE$ برای $STFs$ برآوردگر پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی مورد مطالعه ۱/۵۰ برابر بیشتر از $PTFs$ بوده که این خود تأییدی بر کارایی بیشتر $PTFs$ در برآورد این پارامترها است.

بین ۲ تا ۴ به‌دست آمد. طول‌موج‌های مؤثر نیز در گستره مرئی (۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر)، در محدوده نزدیک به طول موج سبز (۵۵۰ نانومتر) مشاهده شد. در این گستره مقادیر جذب در طول‌موج‌های ۵۰۷ و ۵۱۲ نانومتر می‌توانند به‌عنوان مهمترین متغیرهای تخمین‌گر پارامترهای هیدرولیکی در نظر گرفته شوند. در برخی از پژوهش‌ها از طول‌موج‌های ۵۵۰، ۵۹۶ و ۶۸۵ نانومتر برای برآورد مقدار رس خاک استفاده شده است (Gomez et al., 2008). این طول‌موج‌ها رابطه نزدیکی با اکسیدهای آهن (گئوتیت و هماتیت) داشته و به‌نوعی اثر رنگ خاک را نشان می‌دهند. این موضوع بیان‌گر آن است که تغییرپذیری در پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی خاک را می‌توان تا حدودی از طریق رنگ خاک دنبال کرد (Stenberg, 2010). بابائیان و همکاران (Babaeian et al., 2015a) نیز مقدار بازتاب در طول‌موج‌های ۵۵۲ و ۶۸۷ نانومتر را به‌عنوان متغیرهای مهم تخمین‌گر پارامترهای هیدرولیکی در گستره مرئی گزارش کرده‌اند. طول‌موج‌های مؤثر دیگری نیز در گستره‌های ۱۳۵۰ - ۱۲۰۰، ۱۷۰۰ - ۱۶۰۰ و ۲۴۵۰ - ۲۳۰۰ نانومتر مشاهده شد. این گستره‌های طول‌موجی نزدیک به طول‌موج‌های جذبی ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۳۰۰ نانومتر بوده که به‌ترتیب مرتبط با گروه‌های هیدروکسیل آب هیگروسکوپیک، گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه‌های رس و کربنات‌ها می‌باشند (Viscarra Rossel et al., 2006). بابائیان و همکاران (Babaeian et al., 2015a) نیز طول‌موج‌های ۲۲۵۰، ۲۳۱۰ و ۲۴۰۰ نانومتر را به‌عنوان مهمترین تخمین‌گرها در برآورد پارامترهای نگاه‌داشت آب در خاک گزارش کرده‌اند.

نتایج حاصل از جدول (۵) همچنین نشان می‌دهد که $PSTFs$ در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی خاک دارای بیش‌برآوردی می‌باشند، به‌گونه‌ای که مقدار ME تخمین بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۲۲ محاسبه شد. در جدول (۵) همچنین، نتایج اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پارامتریک در برآورد پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های فرکتالی و تجربی $SWRC$ بر سری داده‌های

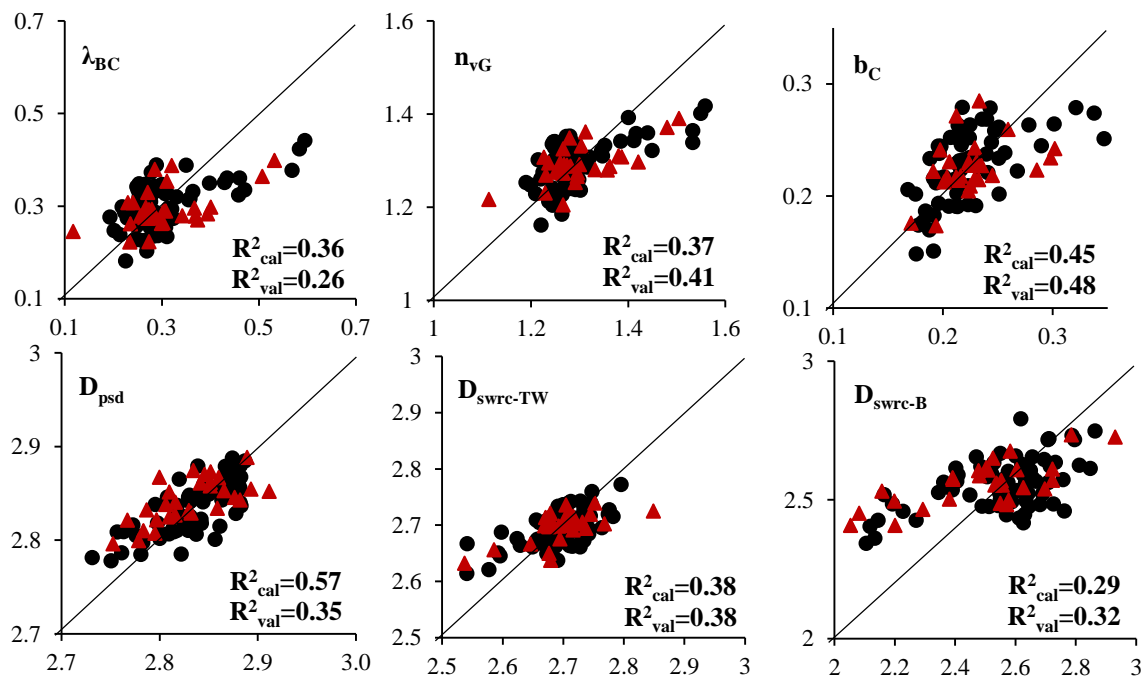
جدول ۵- توابع انتقالی طیفی پارامتریک (PSTFs) اشتقاق یافته به منظور برآورد پارامترهای هیدرولیکی و فرکتالی حاصل از برازش مدل‌های SWRC بر داده‌های اندازه‌گیری شده (اعداد داخل پرانتز آماره‌های مربوط به اعتبارسنجی این توابع طیفی می‌باشد (N=30))

Table 5. Derived parametric spectrotransfer functions (PSTFs) for estimating parameters obtained from fitting measured data to fractal and experimental SWRC models (Numbers in parentheses are the statistics obtained from validation of these spectrotransfer functions (N = 30))

PSTFs	R ²	RPD	RMSE	ME
$D_{psd} = 2.831 + 64.401A_{2342} + 133.304A_{1232} - 87.701A_{1322} + 7.352 A_{497}$	0.57 (0.35)	1.55 (1.24)	0.024 (0.033)	0.0006 (0.001)
$D_{swrc-TW} = 2.717 + 62.936A_{2402} + 19.428A_{507} + 126.476A_{1637}$	0.38 (0.38)	1.28 (1.27)	0.039 (0.044)	0.002 (0.002)
$D_{swrc-B} = 2.659 + 179.535A_{2372} + 47.414A_{507}$	0.29 (0.31)	1.19 (1.06)	0.149 (0.352)	0.022 (0.124)
$\lambda_{BC} = 0.287 - 103.016A_{2402} - 29.748A_{512} - 168.545 A_{1667}$	0.37 (0.27)	1.27 (1.17)	0.066 (0.069)	0.004 (0.005)
$n_{vG} = 1.192 - 91.707A_{2387} - 28.421A_{512} - 211.635A_{1672}$	0.38 (0.41)	1.28 (1.30)	0.063 (0.060)	0.004 (0.004)
$b_C = 0.196 - 68.721A_{2392} - 19.987A_{507} - 112.648A_{1667}$	0.45 (0.48)	1.36 (1.37)	0.045 (0.044)	0.001 (0.001)

AW: Percent absorption per W wavelength (nm)

AW: درصد جذب به ازای طول موج W (نانومتر)



شکل ۵- نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی (●) و اعتبارسنجی (▲) توابع انتقالی طیفی پارامتریک اشتقاق یافته در برآورد پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مدل‌های SWRC

Figure 5. 1:1 distribution diagram of calibration (●) and validation (▲) values of derived parametric spectrotransfer functions in estimating fractal and hydraulic parameters of SWRC models

هیدرولیکی و فرکتالی مورد مطالعه با برخی از ویژگی‌های مبنایی خاک و همچنین داده‌های جذب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف همبستگی نسبتاً قوی و معنی‌داری دیده شد؛ لذا توابعی تحت عنوان توابع انتقالی خاکی (PTFs) و توابع انتقالی طیفی (STFs) برای برآورد این

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در گستره مرئی-مادون قرمز نزدیک (۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر)، جهت تخمین برخی پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی خاک بررسی شد. از آن‌جا که بین پارامترهای

بایستی در نظر داشت که به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی های خاکی در مناطق مختلف و ماهیت تجربی توابع انتقالی طیفی و همچنین توابع انتقالی خاکی، ضروری است این توابع انتقالی با استفاده از اطلاعات موجود در سایر کتابخانه های طیفی و خاک های دیگر مناطق کشور مورد ارزیابی و آزمون قرار گیرند. شایان ذکر است که داده های طیفی در صورت توسعه طیف سنجی زمینی از طریق تصاویر ماهواره ای، پتانسیل استفاده در مقیاس های بزرگ را داشته و می تواند امکان کمی کردن تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی های هیدرولیکی خاک و همچنین دیگر ویژگی های مینایی خاک را نیز فراهم کنند. برغم این که اغلب داده های ماهواره ای محدود به سطح خاک هستند، اما به دلیل یکنواخت شدن لایه سطحی خاک اراضی زراعی در اثر عملیات خاک ورزی، می تواند گزینه ای کارآمد باشد. افزون بر این، پیشنهاد می شود امکان استفاده از داده های طیفی خاک در برآورد پارامترهای مدل های فرکتالی و تجربی منحنی نگه داشت آب در خاک با بهره گیری از دیگر روش های داده کاوی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

پارامترها پی ریزی شد. با توجه به نتایج به دست آمده از آماره های ارزیابی، تابع انتقالی پارامتریک (PTF) برآوردکننده بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک (D_{psd}) دقت بسیار بالایی داشت، حال آن که توابع انتقالی پارامتریک اشتقاق یافته در برآورد سایر پارامترهای فرکتالی و هیدرولیکی مورد مطالعه شامل $D_{SWRC-TW}$ ، D_{SWRC-B} ، λ_{BC} ، n_{VG} و b_C دارای پیش بینی متوسط بودند. نتایج همچنین نشان دادند که توابع انتقالی طیفی (STFs) پیشنهادی، در برآورد D_{psd} دارای دقتی متوسط و در برآورد $D_{SWRC-TW}$ ، D_{SWRC-B} ، λ_{BC} ، n_{VG} و b_C از دقت ضعیفی برخوردار هستند. بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داد در صورت عدم دسترسی به PTF ها و داده های ورودی آنها، می توان از STFs جهت برآوردهایی کلی از پارامترهای مدل های فرکتالی و تجربی منحنی نگه داشت آب در خاک استفاده کرد. هرچند به نظر می رسد بتوان دقت تخمین توابع انتقالی طیفی را با توسعه پایگاه های اطلاعاتی خاکی و همچنین ایجاد و توسعه کتابخانه های طیفی افزایش داده و علاوه بر این بسیاری از محدودیت های توابع انتقالی خاکی را نیز برطرف کرد. اما

References

- Aldabaa A.A.A., Weindorf D.C., Chakraborty S., Sharma A., and Li B. 2015. Combination of proximal and remote sensing methods for rapid soil salinity quantification. *Geoderma*, 239: 34-46.
- Amirabedi H., Asghari Sh., Mesri Gandoshmin T., Balandeh N., and Johari E. 2019. Estimating the soil saturated hydraulic conductivity in Ardabil Plain soils using artificial neural networks and regression models. *Applied Soil Research*, 7(4):124-136. (In Persian)
- Arya L.M., and Paris J.F. 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1023-1030.
- Babaeian E., Homae M., Montzka C., Vereecken H., and Norouzi A.A. 2015a. Towards retrieving soil hydraulic properties by hyperspectral remote sensing. *Vadose Zone Journal*. 14(3): 1-17.
- Babaeian E., Homae M., Vereecken H., Montzka C., Norouzi, A.A., and van Genuchten M.T. 2015b. A comparative study of multiple approaches for predicting the soil-water retention curve: hyperspectral information vs. basic soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 1043-1058.
- Bayat H., Neyshaburi M.R., Mohammadi K., Nariman-Zadeh N., Irannejad M., and Gregory A.S. 2013. Combination of artificial neural network and fractal theory to predict soil water retention curve. *Computers and Electronics in Agriculture*, 92: 92-103.
- Bird N.R.A., Perrier E., and Rieu M. 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science*, 51: 55-63.
- Blaschek M., Roudier P., Poggio M., and Hedley C.B. 2019. Prediction of soil available water holding capacity from visible near infrared reflectance spectra. *Scientific Reports*, 9:12833.
- Bouma J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in soil science*, 177-213.
- Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University. Hydrology Papers, 3: 1-27
- Campbell G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117: 311-314.
- Chang C.W., and Laird D.A. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. *Soil Science*, 167(2): 110-116.

- Clark R.N., King T.V., Klejwa M., Swayze G.A., and Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8): 12653-12680.
- Dane J.H., and Topp, C.G. 2002. Methods of Soil Analysis Part 4: Physical Methods. SSSA Book Series. Soil Science Society of America, Madison, WI. 1692p.
- Davari M., Karimi S.A., Bahrami H.A., Hossaini M.T., and Fahmideh S. 2021. Simultaneous prediction of several soil properties related to engineering uses based on laboratory Vis-NIR reflectance spectroscopy. *Catena*, 197, 104987.
- Davari M., Zalvae Z., and Mahmoodi M.A. 2019. A comparison between empirical and fractal models fitted to the measured soil moisture characteristic curve data. *Iranian journal of Soil and Water Research*, 50(4): 862-847. (In Persian)
- Esbensen K.H. 2006. Multivariate Data Analysis. CAMO Software AS. 5th Ed. 589p.
- Fahmideh S., Davari M., Mosaddeghi M.R., and Sharifi Z. 2019. Performance evaluation of reflectance spectroscopy for estimation of soil organic carbon content in Zrebar lake watershed, Kurdistan province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(6): 59-78. (In Persian)
- Fazeli Sangani M., and Pilehvar Shahri A.R. 2013. Estimation of soil water retention curve by using fractal dimension of soil particle size distribution. *Watershed Management Research*, 26, 2(99): 126-132. (In Persian)
- Ghanbarian-Alavijeh B., and Millán H. 2010. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve. *International Agrophysics*, 24(3): 243-251.
- Ghanbarian-Alavijeh B., Millan H., and Huang G. 2011. A review of fractal, prefractal and pore-solid-fractal models for parameterizing the soil water retention curve. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(1): 1-14.
- Gomez C., Lagacherie P., and Coulouma G. 2008. Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148(2): 141-148.
- Hamilton L.C. 1990. Modern data analysis. A First Course in Applied Statistics. Brooks/Cole Publishing Co. Pacific Grove, CA, USA. 684p.
- Homaee M., and Farrokhian Firouzi A., 2008. Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. *Soil Research*, 46(3): 219-227.
- Huang G., and Zhang R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127(1): 52-61.
- Huang G.H., Zhang, R.D., and Huang Q.Z. 2006. Modeling soil water retention curve with a fractal method. *Pedosphere*, 16(2): 137-146
- Janik L.J., Merry R.H., Forrester S.T., Lanyon D.M., and Rawson A. 2007. Rapid prediction of soil water retention using mid infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*. 71(2): 507-514.
- Kahkhamoghadam P., and Sepaskhah A.R. 2017. Evaluation three fractal model to determine soil water retention curve. *Irrigation & Water Engineering*, 7(26): 28-45. (In Persian)
- Khodaverdiloo H., Homaee M., van Genuchten M. Th., and Ghorbani Dashtaki S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- Kravchenko A., and Zhang R. 1998. Estimating the soil water retention from particle-size distribution: a Fractal approach. *Soil Science*, 163(3): 171-179.
- Leon L., Allan W., Fylstra D., Lasdon L., Watson J., and Warren A. 1998. Design and use of the Microsoft excel solver, Interfaces (Providence), 28(5): 29-55.
- Leone A.P., Leone G., Leone N., Galeone C., Grilli E., Orefice N., and Ancona V. 2019. Capability of diffuse reflectance spectroscopy to predict soil water retention and related soil properties in an irrigated lowland district of southern Italy. *Water*, 11, 1712.
- Liu X., Xu J., Zhang M., Si B., and Zhao K. 2008. Spatial variability of soil available Zn and Cu in paddy rice fields of China. *Environmental Geology*, 55(7): 1569-1576.
- Mertens J., Stenger R. and Barkle G.F. 2006. Multi objective inverse modeling for soil parameter estimation and model verification. *Vadose Zone Journal*, 5: 917-933.
- Minasny B., and McBratney A.B. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand clay content. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4): 1105-1110.
- Minasny B., McBratney A.B., and Bristow K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer function for water-retention curves. *Geoderma*, 93: 225-253.

- Ostovari Y., and Beigi Harchegni H. 2013. Pedotransfer functions for estimating soil volumetric moisture content based on soil fractal dimension. *Journal of Water and soil*, 27(3): 630-641.
- Ostovari Y., Faryabi A., and Moosavi A.A. 2017. Assessment and comparison of two sets of pedotransfer functions for prediction of some points of soil moisture characteristic curve. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(2): 233-243. (In Persian)
- Perfect E. 1999. Estimating soil mass fractal dimensions from water retention curves. *Geoderma*, 88(3): 221-231.
- Pinheiro É.F., Ceddia M., Clingensmith C., Grunwald S., and Vasques G. 2017. Prediction of soil physical and chemical properties by visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy in the Central Amazon. *Remote Sensing*, 9, 293.
- Pittaki-Chrysodonta Z., Moldrup P., Knadel M., Iversen B.V., Hermansen C., Greve M. H., and de Jonge L.W. 2018. Predicting the campbell soil water retention function: comparing visible–near-infrared spectroscopy with classical pedotransfer function. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 1-12.
- Rezghi Z., Homae M., and Noroozi A. 2020. Quantitative estimation of soil texture components using spectroscopy in the visible-near infrared region. *Watershed Engineering and Management*, 11(4): 1033-1043. (In Persian)
- Rieu M., and Sposito G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. theory. *Soil Science Society of America Journal*, 55(5): 1231-1238.
- Sadikhani M. R. 2019. Prediction of cation exchange capacity using fractal dimension of soil particle size distribution. *Applied Soil Research*, 7 (2):56-66. (In Persian)
- 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.
- Schaap M.G., Leij F.J., and van Genuchten M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62:847–855.
- Schneider W.E., and Young R. 1997. Spectroradiometry Methods. In: DeCusatis C. (Ed.), *Handbook of Applied Photometry*. American Institute of Physics, pp. 239-288.
- Shirazi M.A., and Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 142-147.
- Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., and Loeppert R.H. 1996. *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical methods*. SSSA Book Series. *Soil Science Society of America*, Madison, WI. 1390p.
- Stenberg B. 2010. Effects of soil sample pretreatments and standardised rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. *Geoderma*, 158: 15-22.
- Su Y.Z., Zhao H.L., Zhao W.Z., and Zhang T.H. 2004. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma*, 122(1): 43-49.
- Tranter G., Minasny B., McBratney A.B., Rossel R.A., and Murphy B.W. 2008. Comparing spectral soil inference systems and mid-infrared spectroscopic predictions of soil moisture retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5): 1394-1400.
- Tyler S.W., and Wheatcraft S.W. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*, 26: 1047-1054.
- Van den Berg M., Klamt E., Van Reeuwijk L.P., and Sombroek W.G. 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78(3-4): 161-180.
- Van Genuchten M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.
- ViewSpec Pro™ User Manual, 2008. ASD Document 600555 Rev.A, Boulder, CO 80301.
- Viscarra Rossel R. V., Cattle S.R., Ortega A., and Fouad Y. 2009. In situ measurements of soil color, mineral composition and clay content by vis–NIR spectroscopy. *Geoderma*, 150(3–4): 253–266.
- Viscarra Rossel R., McGlynn R., and McBratney A. 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137: 70-82.
- Wosten J.H.M., Pachepsky Y.A., and Rawls W.J. 2001. Pedotransfer function: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150.
- Zhang Z., Ding J., Wang J., and Ge X. 2020. Prediction of soil organic matter in northwestern China using fractional-order derivative spectroscopy and modified normalized difference indices. *Catena*, 185, 104257.

Parameter Estimation of Fractal and Experimental Models of Soil Water Retention Curve Using Pedotransfer and Spectrotransfer Functions

Seyedeh Vida Hosseini¹, Masoud Davari^{2*}, Naser Khaleghpanah³

(Received: October 2020 Accepted: April 2021)

Abstract

Over the last decades, soil spectral data as a rapid, low-cost, and non-destructive method has been widely applied to estimate basic soil properties. In this study, the feasibility of using spectrotransfer functions (STFs) and pedotransfer functions (PTFs) was explored to estimate the parameters of fractal and experimental models of Soil Water Retention Curve (SWRC). For this purpose, a number of 100 soil samples were collected and their spectral reflectance over 350-2500 nm region were measured using a handheld spectroradiometer apparatus. Some soil physical properties and parameters obtained from fitting fractal and experimental models of SWRC to the measured data were determined. After spectral preprocessing, stepwise multiple linear regression was applied to derive PTFs and STFs using basic soil properties and soil spectral reflectance as input, respectively. According to the results, the parametric PTFs had high accuracy in estimating the fractal dimension of the soil particle size distribution (D_{psd}) ($R^2 = 0.96$), while the derived parametric functions had moderate predictive accuracy in estimating other studied fractal and hydraulic parameters including $D_{SWRC-TW}$, D_{SWRC-B} , λ_{BC} , n_{VG} and b_C ($R^2 = 0.40 - 0.59$). The results also showed that the proposed spectral transfer functions (STFs) had moderately accuracy in estimating D_{psd} (RPD = 1.40) and had poor accuracy in estimating $D_{SWRC-TW}$, D_{SWRC-B} , λ_{BC} , n_{VG} and b_C (RPD = 1.13 – 1.37). Overall, the results of this study showed that despite of the relatively lower accuracy of spectral parametric functions compared to pedotransfer functions, the use of soil spectral data due to simultaneous estimation of several parameters, lower cost, less time and field data (especially with development of soil information databases and spectral libraries), can be used as an indirect, rapid and novel method in estimating parameters of fractal and experimental models of SWRC.

Key words: Spectral Reflectance, Estimation, Stepwise Multiple Linear Regression, Soil Physical Properties.

Hosseini S.V., Davari M. and Khaleghpanah N. 2022. Parameter estimation of fractal and experimental models of soil water retention curve using pedotransfer and spectrotransfer functions. *Applied Soil Research*, 10(1): 111-128.

1- MSc Graduate, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan

2-Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan

3-Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan

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