نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۶، ص. ۸۱۰-۷۹۷

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 3, Jul.-Agu. 2017, p. 797-810

پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در برآورد فرسایش‌پذیری خاک در گستره VIS-NIR-SWIR

یاسر استواری[۱] – شجاع قربانی‌دشتکی[۲*] – حسینعلی بهرامی[۳] – مهدی نادری[۴] – مژگان عباسی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹

چکیده

استفاده از انعکاس طیفی خاک در دامنه ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و توابع طیفی حاصل از آن به عنوان روشی سریع، کم‌مخرب و تاحدی کم‌هزینه در برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک مرسوم شده است، ولیکن تاکنون از این روش در برآورد فرسایش‌پذیری استفاده نشده است. لذا هدف از این مطالعه، پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای خاک و مقایسه آن با توابع انتقالی خاک و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در برآورد فرسایش‌پذیری است. برای این منظور فرسایش‌پذیری با استفاده از ۴۰ کرت استاندارد در بالادست سد سیوند و با استفاده از باران طبیعی و منحنی‌های بازتاب طیفی با استفاده از دستگاه اسپکترومتر زمینی و در شرایط نور طبیعی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد میانگین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده (۰/۰۱۴t h MJ^{-1} mm^{-1}) حدود ۲/۱۸ برابر کمتر از میانگین فرسایش‌پذیری برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسیمت (۰/۰۳۰ mm^{-1}t h MJ^{-1}) بود. بر خلاف رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت که در آن کربنات کلسیم معادل در نظر گرفته نشده است، در تابع انتقالی پی‌ریزی شده این ویژگی به عنوان متغیر موثر وارد مدل شد. با بررسی همبستگی بین فرسایش‌پذیری و بازتاب‌های طیفی، طیف‌های مرئی (۵۳۲، ۶۲۲)، مادون قرمز کوتاه (۱۴۴۲۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) جهت پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای انتخاب شدند. بر اساس آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE و ME، توابع انتقالی خاک کارآیی بالاتری نسبت به توابع انتقالی طیفی و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت در برآورد فرسایش‌پذیری داشت. تابع انتقالی طیفی نقطه‌ای با داشتن مقداری اریبی در تخمین‌ها کارآیی بالاتری نسبت به رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت در برآورد فرسایش‌پذیری داشت.

واژه‌های کلیدی: انعکاس طیفی، سد سیوند، رادیواسپکترومتر، فرسایندگی باران، USLE

مقدمه

فرسایش خاک و پیامدهای ناشی از آن با تشدید بهره‌برداری انسان از طبیعت در قرن اخیر، اثرات منفی خود را بر اکوسیستم وارد نموده است (۱۳). در بیشتر حوضه‌های آبخیز کشور آمار و اطلاعات کافی در زمینه فرسایش وجود ندارد، لذا جهت کمی‌سازی و برآورد مقدار فرسایش خاک می‌بایست از مدل‌های ارائه شده برآورد فرسایش خاک استفاد کرد. مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک بوده است (۱۱ و ۱۳). فرسایش‌پذیری خاک (Soil Erodibility) یکی از فاکتورهای مهم در مدل‌های خانواده USLE بوده که میزان حساسیت خاک به جدا شدن و انتقال توسط عوامل فرسایش دهنده (قطره‌های باران و رواناب) را بیان می‌کند (۷). این عامل نسبت فرسایش خاک (A) به ازای واحد شاخص فرسایندگی باران (R) است که در کرت استاندارد اندازه‌گیری می‌شود:

$$K = \frac{A}{R} \qquad (۱)$$

در واحد متریک A بر حسب $t\ ha^{-1}\ y^{-1}$ ، R بر حسب MJ mm $ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ و K برحسب $mm^{-1}\ t\ ha\ MJ^{-1}$است (۱۱ و ۱۳)

فرسایش‌پذیری را می‌توان به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری کرد مانند تونل‌های بادی آزمایشگاهی، دستگاه شبیه‌ساز باران و بهترین روش که اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری در طبیعت و با استفاده از باران‌های طبیعی است. با این حال اندازه‌گیری این عامل در طبیعت و بخصوص در مقیاس‌های بزرگ بسیار دشوار، وقت‌گیر و هزینه‌بر است، لذا محققین همواره به دنبال یافتن و ارائه روابطی جهت برآورد این پارامتر با استفاده از ویژگی‌ها قابل اندازه‌گیری و زودیافت خاک به کمک توابع انتقالی خاک (Pedotransfer Function: PTFs) بوده و هستند. یکی از معروفترین و پرکاربردترین توابع ارائه شده در برآورد

۱، ۲ و ۴ – به ترتیب فارغ التحصیل دکتری، استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(*– نویسنده مسئول: Email: ghorbani-sh@agr.sku.ac.ir)
۳– دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ترتیبت مدرس
۵– استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد
DOI: 10.22067/jsw.v31i3.52932

فرسایش‌پذیری خاک رابطه ویشمایر و اسمیت (۲۴) است:

$$K = 2.1 \times \left((100 - C) \times (fS + Si)\right)^{1.14} \times 10 \quad (۲)$$

که در این معادله OM درصد ماده‌آلی (درصد)، S کلاس ساختمان خاک، P کلاس نفوذپذیری پرفیل خاک (cm^{-1})، C درصد رس خاک، fS درصد شن ریز خاک و Si درصد سیلت خاک است.

باید در نظر داشت که توابع انتقالی همیشه موفق عمل نمی‌کنند زیرا که این توابع از داده‌های منطقه‌ی خاصی استخراج شده‌اند و احتمالاً در همان محدوده‌ی جغرافیایی مفید خواهند بود (۶ و ۱۲). همچنین در حوضه‌هایی با مساحت‌های زیاد به دلیل حجم بالای نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های زودیافت خاک به‌ویژه در مطالعات و طرح‌های حفاظت خاک استفاده از توابع انتقالی زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود. لذا به منظور غلبه بر مشکلات ذکر شده توابع انتقالی خاک، امروزه استفاده از انعکاس باندهای طیفی خاک در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی (۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) جهت برآورد برخی از ویژگی‌های خاک مرسوم شده است.بر این اساس، مشابه با توابع انتقالی خاک می‌توان از انعکاس طیفی خاک برای تخمین فرسایش‌پذیری خاک استفاده و توابع جدیدی تحت عنوان توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای (PSTFs:Point SpectroTransfer Functions) پی‌ریزی نمود. اینگونه بنظر می‌رسد که استفاده از طیف سنجی بتواند بسیاری از محدودیت‌های توابع انتقالی خاک را مرتفع نماید. زیرا در رویکرد طیفی، متغیرهای ورودی در توسعه توابع تنها داده‌های طیفی خاک هستند که برخلاف ویژگی‌های زود یافت خاک، منحصراً با یک روش استاندارد اندازه‌گیری می‌شوند (۴).

اگرچه در دو دهه اخیر طیف سنجی در برآورد ویژگی‌های خاک استفاده شده است ولی تاکنون مطالعه مدونی در خصوص برآورد فرسایش‌پذیری با استفاده از این تکنیک صورت نگرفته است. تین و همکاران (۱۸) ارتباط بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و انعکاس طیفی در ناحیه مادون قرمز نزدیک (NIR) را با استفاده از توابع انتقالی طیفی خاک بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که توابع انتقالی طیفی خاک کارآیی بالای در برآورد رطوبت خاک دارد. گومز و همکاران (۷) میزان کربن آلی خاک (SOC) منطقه نارابری استرالیا را با طیف‌سنجی در محدوده مرئی-مادون قرمز نزدیک (VIS-NIR) و روش حداقل مربعات جزئی (PLS: Partial Least Squares) تخمین زدند. نتایج دقت بالای روش طیف‌سنجی در برآورد SOC را نشان داد. وندرام و همکاران (۲۱) پتانسیل طیفی در محدوده NIR را برای تخمین برخی از ویژگی‌ها خاک منطقه کرادو برزیل ارزیابی و گزارش کردند که طیف‌سنجی برای ویژگی‌های اصلی ترکیبات خاک (مواد آلی و رس) دقت قابل قبولی دارد. اسمید و همکاران (۱۵) با استفاده از رادیواسپکترومتر زمینی و انعکاس طیفی در ناحیه مادون قرمز نزدیک (NIR) به تعیین مقدار فرسایش خاک حوضه تاگوس اسپانیا اقدام کردند. در این پژوهش میزان فرسایش خاک بر اساس تفاوت ویژگی‌ها طیفی تعیین شد. بدین‌گونه که با تغییر در ویژگی‌ها فیزیکی و شیمیایی و مورفولوژیکی خاک، انعکاس طیفی و درجه درخشندگی خاک نیز تغییر می‌کند. لذا با تجزیه و تحلیل میزان انعکاس طیفی خاک میزان فرسایش خاک تعیین شد.

می‌توان بیان داشت که استفاده از روش طیف سنجی در برآورد ویژگی‌های خاک بسیار مفید و کاربردی است. زیرا که طیف سنجی روشی غیر مخرب، سریع و کم هزینه است و برخلاف روش‌های آزمایشگاهی به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی خطری برای محیط زیست ندارد. هچنین در طیف سنجی اندازه‌گیری طیفی ثابت بوده و همگان از یک روش ثابت در ثبت انعکاس های طیفی استفاده می‌کنند. بعلاوه اندازه‌گیری طیفی را به دلیل سهولت و نداشتن هزینه بارها و بارها تکرار کرد تا از صحت اندازه‌گیری مطمئن شد. لذا در این پژوهش سعی شد تا کارآیی طیف سنجی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک ارزیابی شود. حوضه آبخیز سیمکان از مناطق مهم کشاورزی استان فارس تلقی می‌گردد. بنابراین برآورد میزان حساسیت خاک به فرسایش و یا همان فرسایش‌پذیری در این منطقه بسیار مهم و حائز اهمیت خواهد بود. از آنجائیکه تاکنون کارآیی معادله ویشمایر و اسمیت (۲۴) در منطقه مورد مطالعه مورد آزمون قرار نگرفته و نیز هیچگونه توابع انتقالی و طیفی نقطه‌ای در برآورد فرسایش‌پذیری پی‌ریزی نشده است، لذا این پژوهش با هدف تخمین فرسایش‌پذیری خاک به روش‌های (۱) پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای (PSTFs) در برآورد فرسایش‌پذیری با کاربرد مستقیم داده‌های طیفی؛ (۲) پی‌ریزی توابع انتقالی خاک (PTFs) با استفاده از برخی ویژگی‌های زودیافت خاک؛ و (۳) استفاده از معادله ویشمایر و اسمیت (۲۴) انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به وسعت ۳۵۰ کیلومتر مربع بین ″۳۹ ′۵۶ °۵۲ تا ″۴۸ ′۳۹ °۵۳ طول شرقی و ″ ۱۷ ′ ۰۸ °۳۰ تا ″ ۳۴ ′ ۳۳ °۳۰ عرض شمالی در استان فارس، شهرستان پاسارگاد و در بالا دست سد سیوند واقع است (شکل ۱). متوسط دمای سالانه ۱۱/۸ درجه سانتی‌گراد ، متوسط بارندگی سالانه ۳۰۸/۶ میلیمتر و متوسط تبخیر و تعرق سالانه به روش پنمن مانتیث ۱۱۹۰/۴ میلیمتر برآورد شده است.

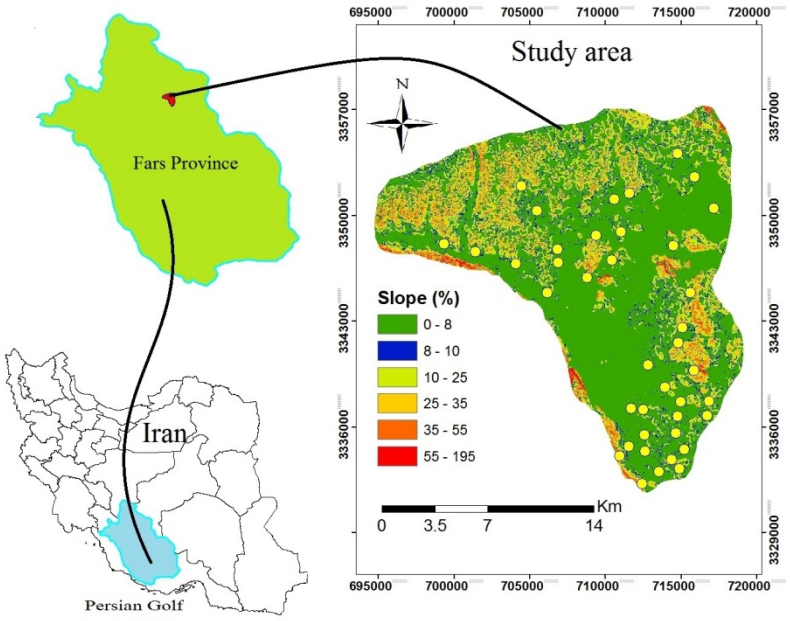
اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری خاک

فرسایش‌پذیری خاک به طور مستقیم از تقسیم مقدار هدر رفت خاک به مقدار شاخص فرسایندگی باران در ۴۰ کرت محاسبه شد. فرسایندگی باران (Soil Erosivity) از رابطه‌ی اصلاح شده فورنیه توسعه یافته توسط آرنولدوس (۳) محاسبه گردید (معادلات ۳ و ۴):

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{p} \quad (۳)$$

$$R = 0.264 MFI^{1.50} \quad (۴)$$

که در معادلات ۳ و۴ MFI شاخص اصلاح شده فورنیه، R شاخص فرسایندگی باران (MJ mm ha^{-1} h^{-1} ya^{-1})، p_i بارندگی ماهانه (mm) و p بارندگی سالانه (mm) است. در مطالعه حاضر از داده‌های بارش ۸ ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳) ایستگاه باران‌سنجی مادر سلیمان که در مرکز منطقه مورد مطالعه قرار دارد جهت محاسبه شاخص فرسایندگی باران استفاده شد.



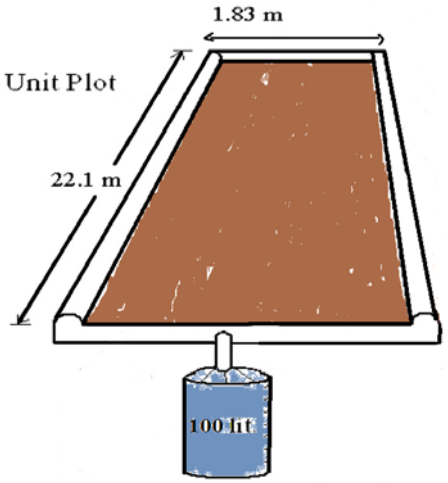
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان فارس و ایران. دایره‌ای زرد کرت‌های ایجاد شده در شیب ۸ – ۱۰درصد

Figure 1- Location of study area in Fras Province and Iran. The yellow points are the location of standard plots in 8-10% slopes.

با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model (DEM: نقشه شیب منطقه استخراج شد. سپس ۴۰ نقطه قابل دسترس و با پراکنش خوب در شیب‌های ۸–۱۰درصد برای احداث کرت‌ها انتخاب شد (شکل ۱). در این مطالعه کرت‌های استاندارد با پشته‌های خاکی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و لایه‌ای نایلونی در میان پشته‌ها ایجاد گردید. جهت جلوگیری از ورود رواناب از بالادست و خروج رواناب از درون کرت، بالا و پائین کرت‌ها با ورقه‌های گالوانیزه با پهنای ۳۰ سانتی‌متر به گونه‌ای که ۱۰ سانتی‌متر آن در خاک فرو رود محصور شد (۲۰). سیستم جمع‌کننده رواناب شامل لوله انتقال رسوب و تانکر ۱۰۰ لیتری در انتهای هر کرت نصب گردید. جهت جلوگیری از رویش علف‌های هرز در کرت‌ها در طول سال از علف‌کش استفاده شد (۲۰). شکل ۲ کرت استاندارد و سیستم جمع کننده رسوب را نشان می‌دهد (۲۰).

از هر کرت تعداد ۳ نمونه خاک سطحی از ۲ عمق ۵–۰ و ۲۵–۵ سانتی‌متری برداشت و پس از مخلوط کردن یک نمونه مرکب ایجاد و در هر نمونه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به شرح زیر اندازه‌گیری شد: بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۰)، واکنش نمونه‌های خاک به وسیلهpH متر در گل اشباع با نسبت ۵ به ۱، قابلیت هدایت الکتریکی به وسیله هدایت سنج در گل اشباع با نسبت ۵ به ۱، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک ۲ نرمال (۲۰) و درصدکربن آلی خاک به روش اکسایش‌تر (۲۳) تعیین شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در حالت مرطوب با الک‌هایی در اندازه قطرهای مختلف تعیین گردید (۲۰). نفوذپذیری خاک بر اساس سرعت نهایی نفوذ آب با استفاده از روش استوانه دوگانه در هر کرت با ۳ تکرار در فصل خشک سال (جهت کاهش اثر رطوبت پیشین بر سرعت نفوذ) اندازه‌گیری شد (۲۰). پس از رخدادهای

بارندگی منجر به ایجاد رواناب، یک نمونه ۱/۵ لیتری از رواناب موجود در تانکر نصب شده در انتهای کرت (پس از بهم زدن کافی) گرفته و پس از گذراندن از صافی مقدار رسوب موجود در نمونه توزین شد. در نهایت مقدار رسوب هر نمونه بر اساس مقدار رواناب جمع شده در تانکر به کل کرت نسبت داده شد.



شکل ۲- یک الگویی از کرت‌های استاندارد و سیستم جمع‌کننده رسوب (۲۰)

Figure.2 A sample design of standard plots and deposit collecting system (20)

طیف سنجی

بازتاب طیفی نمونه‌های خاک در دامنه مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) با استفاده از دستگاه اسپکترورادیومتر (FieldSpec®3, ASD, FR, USA) اندازه‌گیری شد. دستگاه شامل دستگاه طیف‌سنجی به ابعاد ۱۳×۲۹×۳۵ سانتی‌متر، حسگر فیبر نوری با میدان دید ۲۵ درجه، یک نوت‌بوک که برای نمایش و ذخیره داده‌های طیفی به همراه نرم‌افزار ویژه پردازش داده-های طیفی و صفحه سفید مبنا از جنس تفلون به شکل لوح صفحه فشرده که برای کالیبراسیون دستگاه است (۴). برای این منظور، نمونه‌های خاک هوا خشک شده از الک ۲ میلیمتری عبور و منحنی-های طیفی در دامنه فوق در محیط در شرایط نور طبیعی (خورشید) اندازه‌گیری شدند. جهت جلوگیری از انعکاس دیگر پدیده‌ها بر روی انعکاس‌های خاک، ۵۰ گرم از نمونه خاک خشک-الک شده در ظرف شیشه‌ای دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر ریخته شد و ظرف شیشه‌ای بر روی پارچه‌ای سیاه قرار در زیر تفنگ اندازه‌گیری طیفی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های طیفی به کمک پیستول مجهز به لنز ۸ درجه که میدان دیدی به قطر ۴/۲ سانتی‌متر بر روی نمونه خاک ایجاد می‌کند، انجام شد. همچنین به منظور ثبت اندازه‌گیری‌ها به صورت مقدار بازتابش و حذف آشفتگی‌های طیفی، به ازای هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰درصد) مشابه با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک انجام شد (۴).

بر اساس پیشنهاد بابائیان و همکاران (۴)، برای هر نمونه خاک ۲۰ تکرار در نظر گرفته شد و میانگین آن‌ها برای مراحل بعد در نظر گرفته شد. داده‌های طیفی با استفاده از نرم افزار ViewSpec به صورت منحنی بازتاب‌های طیفی استخراج گردید. نمودارهای طیفی خاک‌های مورد مطالعه در طول موج‌های بین ۱۳۵۰-۱۳۷۰ نانومتر و۱۸۲۰تا ۱۸۹۰ نانومتر دارای آشفتگی شدید بودند. ازآنجائیکه طیف سنجی در محیط بازصورت پذیرفت این آشفتگی‌ها به میزان رطوبت موجود در هوا نسبت داده شد (۴) و این بخش‌ها از منحنی‌های طیفی حذف گردیدند. با استفاده از نرم‌افزار Unschambler 10.3 انواع روش‌های پیش‌پردازشی روی داده‌های طیفی انجام شد (۴). روش‌های محتلف پیش‌پردازش بر روی داده‌های طیفی انجام شد و بر اساس روش اعتبارسنجی متقابل و دقت نتایج، از منحنی‌ها حذف پیوستار و فیلتر Savitzky-Golay به صورت تابع چند جمله ای درجه دوم استفاده شد.

همبستگی بین متغیرها و پی‌ریزی توابع انتقالی و طیفی نقطه‌ای

قبل از پی‌ریزی توابع انتقالی، پس از تجزیه و تحلیل‌های آماری نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگرف-اسمیرنف بررسی شد. متغیرهایی که دارای توزیع غیر نرمال بودند به کمک تبدیل مناسب نرمال شدند. برای جلوگیری از هم‌راستایی چندگانه به دلیل همبستگی بین باندهای طیفی با یکدیگر و نیز همبستگی بین ویژگی‌های خاک با یکدیگر از روش رگرسیون چندگانه گام به گام به جلو استفاده شد. جهت بررسی هم‌راستایی از آزمون تورم واریانس

(Variance inflation index) استفاده شد.

در این پژوهش داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش ۳۰ تایی (داده‌های صحت‌سنجی) و ۱۰ تایی (اعتبارسنجی) تقسیم گردیدند. به طور کلی سه سناریو متفاوت برای برآورد فرسایش‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. در سناریو اول، ارتباط بین فرسایش‌پذیری با مقادیر بازتاب‌های طیفی در طول موج‌های مختلف با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی و طول موج‌های معنی‌دار و با بالاترین ضریب همبستگی به عنوان متغیرهای ورودی جهت پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در نظر گرفته شدند. سناریو دوم، با در نظر داشتن ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های زودیافت خاک و فرسایش‌پذیری توابع انتقالی خاک پی‌ریزی شدند. در سناریو سوم با استفاده از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) فرسایش‌پذیری برآورد و با مقادیر حاصل از توابع انتقالی خاک و توابع طیفی نقطه‌ای مقایسه گردیدند. تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل مقایسه میانگین، همبستگی داده‌ها و ایجاد توابع انتقالی طیفی و نقطه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Statistica 8.0 (۱۶) انجام شد.

ارزیابی و کارآیی مدل‌ها

جهت ارزیابی کارآیی مدل‌ها و روش‌های مختلف در برآورد فاکتور فرسایش‌پذیری از معیارهای R^2 ضریب تعیین (Coefficient of Determination)، میانگین خطا (Mean error: ME)، میانگین مربعات خطا (Root mean square error: RMSE) استفاده شد (۱).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O_i}\right)\left(P_i - \overline{P_i}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O_i}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(P_i - \overline{P_i}\right)^2} \quad (۵)$$

$$ME = \sum\left(\frac{\left(P_i - O_i\right)}{n}\right) \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - O_i\right)^2}{n}\right)} \quad (۷)$$

که در این معادلات Pi و Oi به ترتیب مقایدر برآورد شده و اندازه‌گیری شده پارامتر و n تعداد داده‌ها است. آماره RMSE بیانگر مقدار خطا است (۱).

نتایج و بحث

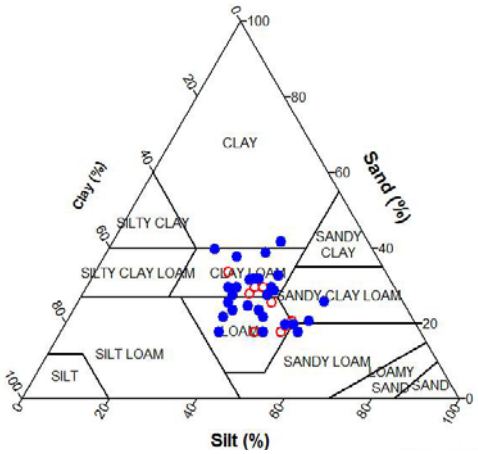
شکل۳ توزیع اندازه ذرات نمونه‌های خاک را در مثلث بافت خاک در مجموعه داده صحت سنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. نمونه‌های خاک در دو مجموعه داده در سه کلاس لوم، لوم رسی و لوم رسی شنی قرار دارند. جدول ۱ خلاصه آماری مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) و ویژگی‌ها فیزیکوشیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه را در دو مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت سنجی نشان می‌دهد. خاک‌های منطقه مورد مطالعه در سه گروه اریدی سول، گروه انتی‌سول و اینسپتی‌سول بودند.

به طور کلی میانگین ویژگی‌های زودیافت و نیز مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده فرسایش‌پذیری در مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت سنجی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p>0/05$). محتوای رس با میانگین ۲۷/۳درصد از ۱۷/۹ تا ۴۱/۹درصد متغیر بود. درصد شن از ۲۴/۱ تا ۵۶/۰درصد و با میانگین ۴۰/۴درصد متغیر بود. خاک‌های منطقه دارای مقدار متوسط ماده‌آلی ۳/۱۳درصد بودند. نفوذپذیری بر اساس مقدار نفوذ نهایی در کلاس‌های ۳ و ۴ قرار داشت (۱۳) و از ۰/۸ تا ۳/۴ سانتی‌متر بر ساعت متغیر بود. اگرچه خاک‌ها دارای مقادیر بالایی آهک (متوسط ۴۵/۲درصد) بودند، با این حال خاکدانه‌ها در کلاس پایداری متوسط قرار داشتند. میانگین فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر اسمیت (۲۴) $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ۰/۰۳۰ و از ۰/۰۱۵ تا $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ۰/۰۴۷ متغیر بود (جدول ۱).

میانگین مقدار شاخص فرسایندگی باران بدست آمده از معادله اصلاح شده فورنیه حاصل از داده‌های بارش ۸ ساله ایستگاه مادر سلیمان $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}ya^{-1}$ ۲۵۵/۷ و از حداقل ۵۶/۹ تا حداکثر $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}ya^{-1}$ ۷۲۳/۰ متغیر بود. کولی و همکاران (۱۱) و ایروم و همکاران (۹) همبستگی بالایی را بین شاخص فورینه اصلاح شده و شاخص فرسایندگی باران گزارش کردند. هیو و همکاران (۸) و الکزاکیس و همکاران (۲) نیز شاخص فورنیه اصلاح شده برای محاسبه فرسایندگی باران استفاده کردند. از آنجائی‌که در منطقه مورد مطالعه تنها یک ایستگاه باران‌سنجی وجود دارد، لذا از مقدار میانگین شاخص فرسایندگی باران جهت محاسبات بعدی استفاده گردید.

در طول دروه یکساله مطالعه حاضر (مهر ۹۳ تا مهر ۹۴) ۸ رخداد بارندگی صورت پذیرفت که تنها ۴ مورد منجر به تولید رواناب و ایجاد رسوب گردید. میانگین مقدار هدر رفت سالانه خاک در کرت‌های استاندارد $t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ ۵/۸۵ و از حداقل ۱/۴۳۸ تا $t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ ۶/۳۸۲ متغیر بود. لذا با توجه با مقدار هدر رفت خاک و میانگین شاخص فرسایندگی سالانه باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}ya^{-1}$ ۲۵۵/۷) مقدار فرسایش‌پذیری محاسبه شد. حداقل، حداکثر و میانگین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده به ترتیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۲۵ و $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۱۴ بود. مقایسه میانگین فرسایش‌پذیری برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسیمت (۲۴) ($t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۳۰) با میانگین مقدار اندازه‌گیری شده ($t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۱۴) مبین آن است که مقدار اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری از ۱/۰۸ تا ۳/۵۷ با میانگین ۲/۱۸ برابر به طور معنی‌داری کوچکتر از مقدار فرسایش‌پذیری برآورد شده است ($p<0/05$). در مطالعه واعظی و همکاران (۱۹) نیز

فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) از ۴/۴۰ تا ۱۷/۶۴ برابر بزرگتر از مقدار اندازه‌گیری شده این شاخص بود. نتایج نشان داد از آنجائیکه که رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) برای مناطقی با شدت بارندگی $63\ mm\ h^{-1}$ و به صورت مداوم و خاک‌های با آهک فقیر در آمریکا توسعه یافته است، در بیشتر مناطق کشور ما کارآیی خوبی ندارد، زیرا شدت بارندگی بسیار کمتر از $63\ mm\ h^{-1}$ است و مقدار بالای آهک در خاک‌ها باعث خاکدانه‌سازی بهتر و مقاومت خاکدانه‌ها در مقابل فرسایش شده است (۱۳).



شکل ۳- توزیع کلاس بافت خاک. نقاط توپر داده‌های صحت سنجی و نقاط توخالی داده‌های اعتبارسنجی را نشان می‌دهد

Figure.3 – Distrabuation of soil textural classes. Filled and empty circle show calibrating and validating dad sets, respectively

جدول ۱- خلاصه ویژگی‌ها فیزیکوشیمیایی خاک. (A) و (B) به ترتیب مجموعه داده صحت سنجی و اعتبارسنجی هستند

Table 1- Descriptive statistics of soils physicochemical properties. (A) and (B) are calibrating and validating dad sets, respectively

		میانگین Mean		حداقل Minimum		حداکثر Maximum		انحراف معیار Standard diviation	
	واحد	A	B	A	B	A	B	A	B
$CaCO_3$	(%)	44.1	46.5	11.5	33.5	62.5	66.5	12.5	10.7
MWD	(mm)	1.50	1.6	0.8	1.13	2.54	2.35	0.57	0.45
PE	(cm h^{-1})	1.95	2.41	0.85	1.8	3.40	2.9	0.5	0.36
VFS	(%)	17.2	17.0	7.4	1.2	27.4	29.5	5.3	10.5
OM	(%)	3.1	3.2	2.1	1.8	3.8	3.6	0.54	0.55
Cl	(%)	27.3	24.8	17.9	17.9	41.9	33.9	6.8	5.6
Si	(%)	32.3	32.4	18.0	19.2	46.0	38.0	6.4	3.5
Sa	(%)	41.4	42.8	24.1	30.1	56.0	51.1	7.6	6.6
Measured K	t h MJ^{-1}	0.014	0.015	0.006	0.011	0.025	0.020	0.004	0.003
Estimated K	t h MJ^{-1}	0.030	0.031	0.015	0.016	0.048	0.042	0.007	0.009

Sa: ; Si: Silt; Cl: Clay; FS: Fine sand; OM: Organic matter; VFS: Very find sand; PE: Permeability; MWD: Water aggregate stability , CaCO3: Calcium carbonate

جدول ۲ همبستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده با ویژگی‌های زودیافت خاک را نشان می‌دهد. اجزای رس و شن ریز خاک هیچگونه همبستگی با فرسایش‌پذیری خاک نداشتند (جدول ۲). فرسایش‌پذیری بیشترین ضریب همبستگی منفی و معنی‌دار (r=-۰/۷۷) را با نفوذپذیری خاک دارد. یو و همکاران (۲۵) و واعظی و همکاران (۲۰) نیز همبستگی بالا و منفی نفوپذیری با فرسایش‌پذیری را گزارش کردند.

ماده‌آلی با تأثیر مثبت بر خاکدانه‌سازی، مقدار نفوذپذیری خاک افزایش و در نتیجه فرسایش‌پذیری کاهش می‌یابد (همبستگی منفی معنی‌دار بین ماده‌آلی و فرسایش‌پذیری بیانگر این نکته است جدول ۲). سانتز و همکاران (۱۴) و تجادا و گنزالس (۱۷) نیز اثر معنی‌دار ماده‌آلی و ذرات شن در کاهش مقدار فرسایش‌پذیری خاک را گزارش کرده بودند. محتوای کربنات کلسیم معادل با فرسایش‌پذیری همبستگی معنی‌دار منفی دارد (جدول ۲). کربنات کلسیم معادل با

علاوه بر افزایش مقاومت خاک به جدا شدن ذرات توسط قطره باران و رواناب، با داشتن اثر معنی‌دار بر خاک‌دانه سازی مقدار نفوذپذیری را افزایش و به دنبال آن رواناب کاهش می‌یابد. چنانچه گفته شد در توسعه‌ی رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) تنها پنج خصوصیت فیزیکی خاک (اجزای بافت خاک، درصد ماده‌آلی، ساختمان خاک و کلاس نفوذپذیری خاک) در نظر گرفته شده است، درحالی‌که در مطالعه حاضر خصوصیتی مانند محتوای کربنات کلسیم معادل تأثیر بسزا و معنی‌داری بر مقدار فرسایش‌پذیری خاک دارد.

.جدول ۲ – همبستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های زودیافت خاک

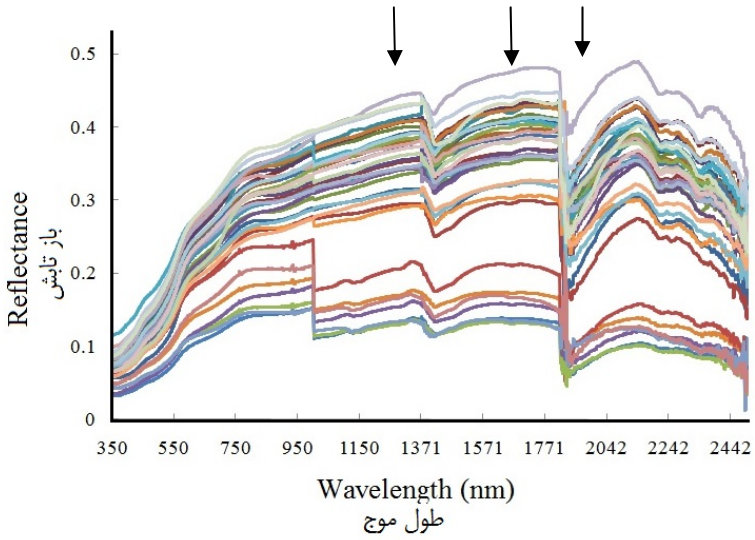
Table 2 -Correlation matrix between measuted and soil erodibility soil properties

	Cl	Si	Sa	OM	$CaCO_3$	FS	MWD	PE	VFS
Si	-0.29	1.00							
Sa	-0.67***	-0.52**	1.00						
OM	-0.08	-0.21	0.23	1.00					
$CaCO_3$	-0. 21	-0.49*	0.56**	0.51**	1.00				
FS	0.02	0.20	-0.18	-0.14	-0.23	1.00			
MWD	0.05	-0.29	0.18	0.58**	0.36*	-0.45**	1.00		
PE	-0.18	-0.42**	0.49**	0.54**	0.51**	-0.24	0.37*	1.00	
VFS	-0.42	0.03	0.35*	-0.23	0.26	0.06	-0.31	-0.28	1.00
K	-0.25	0.47**	-0.32*	-0.60***	-0.52**	0.30	-0.58**	-0.77***	0.43**

Sa: Sand; Si: Silt; Cl: Clay; FS: Find sand; OM: Organic matter; VFS: Very find sand; PE: Permeability; MWD: Water aggregate stability ; $CaCO_3$: Calcium carbonate; ***:Correlation significant at p<0.001; **:Correlation significant at p<0.01; *: Correlation significant at p<0.05

بازتاب خاک‌ها در بخش مرئی-مادون قرمز طیف اکترومغناطیس

شکل ۴ منحنی‌های بازتاب طیفی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. منحنی‌های طیفی دارای یک برآمدگی در طول موج‌های ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و سه مشخصه جذبی مهم در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵ و ۲۲۱۲ نانومتر است (شکل ۴). بررسی‌ها نشان داده است که چنین مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب آزاد و هیگروسکوپیک (طول موج ۱۴۱۴ نانومتر)، گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه‌های کانی‌های رس (طول موج ۱۹۱۵ نانومتر) و پیوند گروه‌های عاملی OH با فلزات آهن، آلومنیوم و منیزیم (طول موج‌های ۲۲۱۲ نانومتر) در شبکه‌های کانی‌های رس است (۲۲).



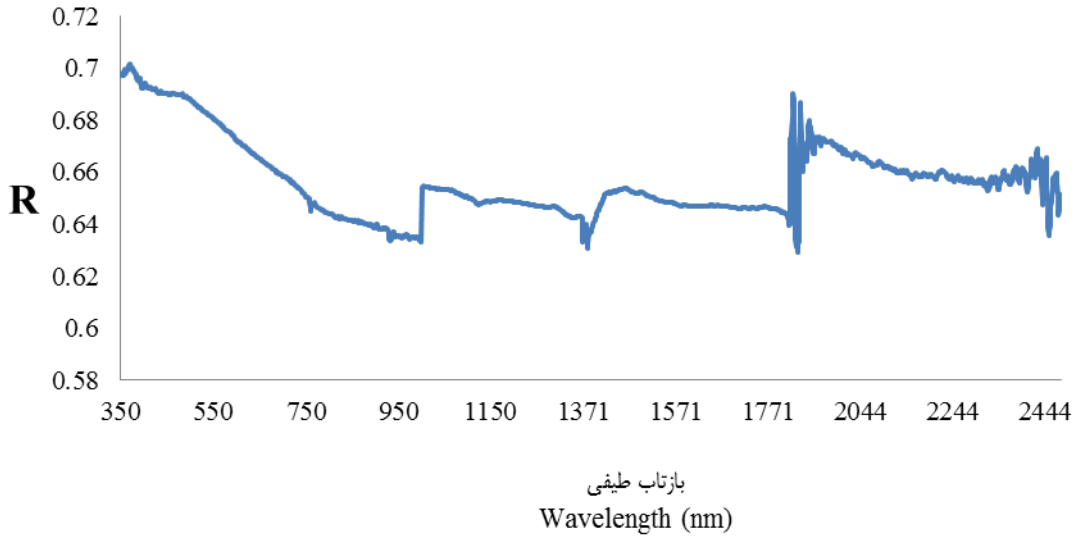
شکل ٤ – منحنی‌های اصلاح شده طیفی

Figure 4- Adjusted soils spectra

جهت انتخاب طیف‌ها در پی‌ریزی توابع طیفی نقطه‌ای خاک ابتدا همبستگی پیرسون بین همه باندها (۳۵۰ تا ۳۴۵۰ نانومتر) تعیین و طیف‌هایی که دارای بیشترین همبستگی با فرسایش‌پذیری خاک بودند انتخاب شدند. بابائیان و همکاران (۴) نیز جهت پی‌ریزی توابع

انتقالی طیفی نقطه‌ای در برآورد نقاط منحنی رطوبتی با بررسی همبستگی بین این نقاط و همه طیف‌های گستره طیفی، برخی از طیف‌ها را که بیشترین همبستگی با نقاط منحنی رطوبتی خاک داشتند را به عنوان متغیر مستقل در روش گام به گام استفاده کردند. در شکل ۵ رابطه‌ی ضریب همبستگی پیرسون (R) بین مقادیر بازتاب طیفی خاک در هر طول موج از گستره ۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر با مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، همبستگی معنی‌دار بین مقدار فرسایش‌پذیری خاک با بازتاب طیفی در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی وجود دارد. بالاترین ضریب همبستگی (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) با مقدار فرسایش‌پذیری خاک به ازای طول موج‌های گستره مرئی (۵۳۲، ۶۲۲ نانومتر)، مادون قرمز کوتاه (۱۴۴۲، ۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) به دست آمد.

نقاط جذبی دیده شده در طیف حدود ۱۴۰۰ نانومتر و دامنه مرئی به دلیل حضور گروه O-H و H-O-H موجود در ماده‌آلی می‌باشد. بر اساس بابائیان و همکاران (۴) در ناحیه حدود ۱۴۰۰ کرین (ماده آلی) بیشترین جذب را دارد. با توجه به همبستگی بین ماده‌آلی و فرسایش‌پذیری (جدول۲) و نیز اثر این ویژگی بر فرسایش‌پذیری خاک، همبستگی بین فرسایش‌پذیری و باند ۱۴۴۲ نانومتر قابل توجیه است. می‌توان وجود همبستگی بالای فرسایش‌پذیری با باندهای مادون قرمز کوتاه (۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) را به علت وجود کربنات کلسیم معادل در خاک ارتباط داد (همبستگی معنی‌دار کربنات کلسیم معادل با فرسایش‌پذیری مبین این نکته است، جدول ۲). زیراکه کربنات کلسیم معادل دارای ویژگی‌ها جذبی در دامنه ۲۲۰۰ تا ۲۳۵۰ دارد (۱۰). بر اساس مطالعه خیامیام و همکاران (۱۰) و ویسکارا-راسل و همکاران (۲۲) کربنات کلسیم معادل در طیف ۲۳۳۸ نانومتر بیشترین مقدار جذب را داشت. بر اساس مطالعه کلارک و همکاران (۵) نیز کربنات کلسیم دارای نقاط جذبی مشخص در دامنه ۲۳۰۰-۲۳۵۰ نانومتر است.



شکل ۵ - ضریب همبستگی پیرسون (R) بین مقادیر بازتاب طیفی خاک با مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده.

Figure 5- Prison coefficient correlation (R) between reflectancevalues and measured erodibility

$$K = 0.0245 - 0.0037PE - 0.0018MWD - 7.3\times10^{-5}CaCO_3 + 1.56\times10^{-4}VFS \qquad R^2=0.84, \quad (۸)$$

برآورد فرسایش‌پذیری خاک

توابع انتقالی خاک

از میان ویژگی‌ها زودیافت خاک، تنها ضرایب چهار ویژگی نفوذپذیری، پایداری خاکدانه، کربنات کلسیم معادل و شن خیلی ریز در برآورد فرسایش‌پذیری خاک معنی‌دار شد ($p<0.05$). رابطه‌ی پی‌ریزی شده بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های زودیافت خاک در مجموعه داده‌های صحت سنجی به صورت زیر بدست آمد:

جائیکه VFS شن خیلی ریز (%)، MWD پایداری خاکدانه، $CaCO_3$ کربنات کلسیم معادل (%)، PE نفوذپذیری ($cm\ h^{-1}$) و K فرسایش‌پذیری ($t\ h\ MJ^{-1}$) است. بر اساس تجزیه واریانس، نفوذپذیری خاک مهمترین ویژگی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک بود (مقدار پارامتر ضریبی استاندارد شده (β) برای نفوذپذیری بیشتر از سایر پارامترهای ورودی بود که با توجه به همبستگی بالای فرسایش‌پذیری با نفوذپذیری ($r=-0.77$) قابل توجیه است). در

مطالعه واعظی و همکاران (۲۰) نیز نفوذپذیری مهمترین عامل در برآورد فرسایش‌پذیری بود. در مطالعه حاضر برخلاف مطالعه ویشمایر و اسمیت (۲۴) ماده آلی به عنوان پارامتر ورودی مدل انتخاب نگردید در حالیکه کربنات کلسیم معادل دارای ضریب معنی‌داری شده و در مدل وارد شد که می توان به اهمیت این ویژگی در برآورد فرسایش‌پذیری پی‌برد. در مطالعه واعظی و همکاران (۲۰) نیز از ماده آلی در مدل رگرسیونی خطی استفاده نگردید. در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل بارندگی کم و پوشش ضعیف گیاهی ماده آلی به صورت درصدی ناچیز در خاک وجود دارد و به این دلیل به عنوان پارامتر ورودی مدل معنی‌دار نشد.

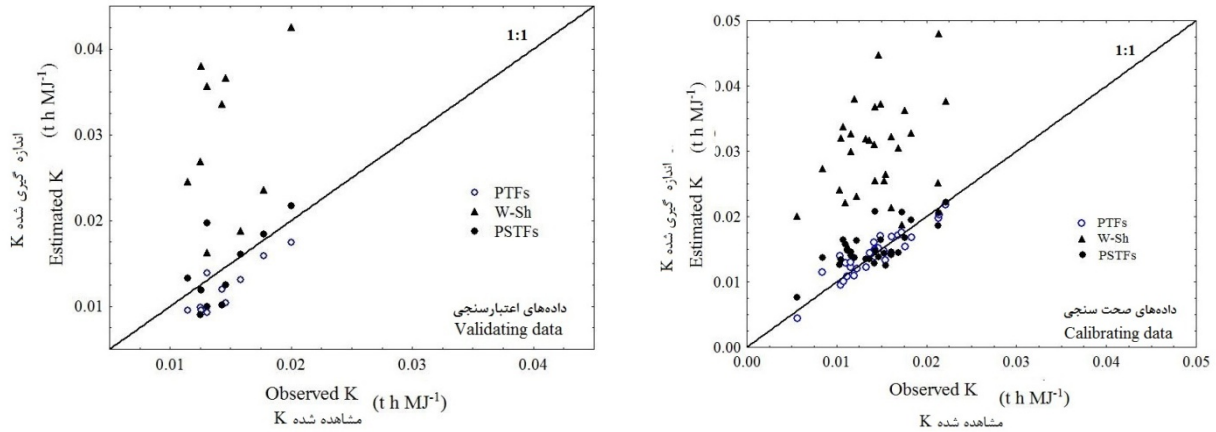
توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای خاک

جهت پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای، طیف‌های انتخاب شده شامل گستره مرئی (۵۳۲، ۶۲۲)، مادون قرمز نزدیک (۸۷۷ نانومتر)، مادون قرمز کوتاه (۱۴۴۲ نانومتر۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) بودند که با استفاده از روش گام به گام ارزیابی شدند. توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای پی‌ریزی شده در برآورد فرسایش‌پذیری با استفاده از بازتاب‌های طیفی به صورت معادله ۸ ارائه شد:

که در این معادله R_X بازتاب طیفی در طول موج مشخص و K مقدار فرسایش‌پذیری خاک است. چنانچه قبلاً گفته شد در این باندها مواد آلی و بخصوص کربنات کلسیم معادل خاک دارای بازتاب قابل تشخیص است. لذا با توجه به همبستگی فرسایش‌پذیری با این دو ویژگی خاک، معنی‌دار شدن این طیف‌ها قابل قبول است با این حال ۴۷ درصد از واریانس توجیه نشده است. شکل ۶ مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده فرسایش‌پذیری با استفاده از توابع انتقالی، توابع طیفی نقطه‌ای و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در دو مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت سنجی را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل ۶ می‌توان دید در هر دو مجموعه صحت‌سنجی و اعتبارسنجی توابع انتقالی خاک (PTFs) و توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای خاک (PSTFs) از کارآیی بهتری نسبت به رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت برخوردار هست (پراکندگی نقاط حول خطوط ۱:۱ در هر دو مجموعه داده برای PTFs و PSTFs بیشتر از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت است). هرچند باید توجه داشت که توابع انتقالی خاک کارآیی بهتری نسبت به توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای دارد. زیراکه به نظر می‌رسد در هر دو مجموعه داده توابع انتقالی طیفی خاک (PSTFs) دارای بیش‌برآوردی ناچیزی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک دارد.

رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در هر دو مجموعه داده صحت‌سنجی و اعتبارسنجی دارای بیش‌برآوردی شدیدی است. در مطالعه واعظی و همکاران (۲۰) نیز بیش‌برآوردی بالای رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در برآورد فرسایش‌پذیری گزارش شده است. جدول ۳ آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE و MEتوابع انتقالی خاک، توابع انتقالی طیفی خاک و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در برآورد فرسایش‌پذیری را نشان می‌دهد.

$$K = 0.0019 - 0.0161R_{532} - 0.0183R_{622} - 0.020R_{1442} 0.0299R_{2227} + 0.0273R_{2327} - 0.0387R_{2343} \qquad R^2=0.53 \quad (۹)$$



شکل ٦- مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده فرسایش‌پذیری با استفاده از توابع انتقالی (PTFs)، توابع طیفی نقطه‌ای (PSTFs) و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (٢٤) (W-Sh)در دو مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت سنجی. دایره توپر توابع انتقالی طیفی خاک، مثلث ویشمایر و اسمیت و دایره توخالی توابع انتقالی خاک

Figure 6- Measured K versus estimated K by PTFs and Wishmier and Smith (W-Sh) in both calibrating and validating data sets. Fill circular is PSTFs, Triangle is Wishmaier and Smith and empty circular is PTFs.

مقدار ضریب تعیین در مجموعه داده‌ی صحت سنجی از ۰/۸۴ برای توابع انتقالی خاک تا ۰/۱۵ برای رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) تغییر دارد. توابع انتقالی طیفی نقطه‌ی با داشتن ضریب تعیین ۰/۵۳ دارای کارآیی قابل قبولی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک است. آماره RMSE بیانگر مقدار خطا است، هرچه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد کارآیی بالاتر مدل را نشان می‌دهد. مقدار آماره‌ی RMSE توابع انتقالی خاک در برآورد فرسایش‌پذیری $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۰۱۴، در توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۰۲۸ و در رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۱۷ بود. آماره ME نشان‌دهنده وجود اریبی است و هر اندازه آماره ME به صفر نزدیک‌تر باشد پیش‌بینی از اریبی کمتری برخوردار است (۱). بر اساس این آماره توابع انتقالی خاک کمترین اریبی ($ME = ۰/۰۰۰۰ t\ h\ MJ^{-1}$) و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) بیشترین اریبی ($ME = ۰/۰۱۵۱ t\ h\ MJ^{-1}$) را در برآورد فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهند (جدول۳). با توجه به آماره‌ای ارزیابی در مجموعه داده صحت سنجی توابع انتقالی خاک دارای کارآیی بهتری نسبت به توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در برآورد فرسایش‌پذیری خاک دارد.

در داده‌های اعتبارسنجی نیز توابع انتقالی خاک با داشتن آماره‌های ارزیابی R^2=۰/۷۸ ، RMSE برابر $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۰۲۷ و برابر $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۰۰۱− ME کارآیی بهتری را نسبت به توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای خاک و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در برآورد فرسایش‌پذیری خاک نشان داد. همچنین توابع انتقالی طیفی خاک (R^2=۰/۴۸ ، $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۰۳۰ = RMSE و $t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۰۰۳− =ME) نیز از کارآیی مطلوب و قابل قبولی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک برخوردار بود. رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در مجموعه داده اعتبارسنجی نیز همانند داده صحت‌سنجی کارآیی خوبی نداشته و کمترین مقدار ضریب تعیین و بیشترین خطا و اریبی (بیش‌برآورد) را داشت. توابع انتقالی طیفی خاک گرچه نسبت به ویشمایر و اسمیت کارآیی بهتری دارد ولی رابطه کاملا اریب است.

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE و MEتوابع انتقالی خاک، توابع انتقالی طیفی خاک و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲٤) در برآورد فرسایش‌پذیری

Table 4. Statistical indices of R^2, RMSE and ME for the PTFs, SPTFs and and Wischmeier-Smith (1978) for predicting K

	R^2	RMSE($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)	ME ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)
	دادههای صحت سنجی Calibrating data		
توابع انتقالی خاک (PTFs) Pedotransfer Function	0.84	0.0014	0.0000
توابع انتقالی طیفی (PSTFs) SpectroTransfer Functions	0.53	0.0028	0.0011
رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت Wishmier and Smith	0.15	0.017	0.0153
	دادههای اعتبارسنجیValidating data		
توابع انتقالی خاک (PTFs) Pedotransfer Function	0.78	0.0027	-0.0001
توابع انتقالی طیفی (PSTFs) SpectroTransfer Functions	0.48	0.0030	-0.0003
رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت	0.11	0.021	0.0193

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اهمیت برآورد فرسایش‌پذیری خاک، هدف از این پژوهش پی‌ریزی توابع انتقالی با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک و پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای با استفاده از بازتاب‌های طیفی در دامنه VIS-NIR بود. نتایج نشان داد میانگین فرسایش‌پذیری برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسیمت (۲۴) ($t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۳۰) به میزان دو برابر بیشتر از میانگین مقدار اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری ($t\ h\ MJ^{-1}$ ۰/۰۱۴) با استفاده از کرت‌های استاندارد بود. فرسایش‌پذیری بیشترین همبستگی (r =−۰/۷۷) را نفوپذیری خاک داشت درحالیکه اجزای رس و شن ریز خاک هیچگونه همبستگی با فرسایش‌پذیری خاک نشان ندادند. در توابع انتقالی پی‌ریزی شده تنها ضرایب چهار ویژگی نفوذپذیری، پایداری خاکدانه، کربنات کلسیم معادل و شن خیلی ریز معنی‌دار شده و در معادله وارد شد. در این مطالعه همبستگی خوب و معنی‌داری بین مقدار فرسایش‌پذیری خاک با بازتاب طیفی در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و کوتاه وجود داشت. بر اساس همبستگی بین فرسایش‌پذیری

و بازتاب‌های طیفی، طیف‌های گستره مرئی (۵۳۲، ۶۲۲ نانومتر)، مادون قرمز کوتاه (۱۴۴۲ نانومتر۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) جهت پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی‌نقطه‌ای انتخاب شدند. به طور کلی و بر اساس آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE و ME، توابع انتقالی خاک در هر دو مجموعه داده صحت سنجی و اعتبارسنجی از کارآیی بالاتری نسبت به توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در برآورد فرسایش‌پذیری برخوردار بود. با توجه به تعداد محدود کرت‌های استاندارد در مطالعه حاضر پیشنهاد می‌شود کارآیی توابع انتقالی طیفی خاک در برآورد فرسایش‌پذیری را با استفاده از تعداد بیشتری داده مورد آزمون قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه شهرکرد جهت تأمین منابع مالی این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

1. Abbasi Y., Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A.M., and Shorafa M. 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. Pedosphere, 21(2): 230-237.
2. Alexakis D., Diofantos G., and Hadjimitsis A. 2013. Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus. Atmospheric Research, 1-13.
3. Arnoldus J.M.J. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. Food. Agric. Org., Soils Bull, 34: 39–51.
4. Babaeian E., Homaee M., and Norouzi A.A. 2014. Deriving and validating parametric spectrotransfer functions for estimating soil hydraulic properties in VIS-NIR-SWIR range. Soil and Water resource conservation, 3(3) : 21-36. (in Persian with English abstract)
5. Clark R.N., King T.V.V., Klejwa M., Swayze G.A., and Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectros- copy of minerals, Journal of Geophysics Research , 95: 12.
6. Ghorbani-Dashtaki S., Homaee 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.
7. Gomez C., Rossel V., and McBratney B. 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. Geoderma, 146 : 403–411.
8. Hui L., Xiaoling C., Lim C., and Xiaobin C. 2010.Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi Province, China, using USLE, GIS, and RS. Journal of Earth Science, 2(6): 941–953.
9. Irvem A., Topalog˘l.F., and Uygur V. 2007. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey. Journal of Hydrology , 336: 30– 37.
10. Khayamim F., Wetterlind J., Khademi H., Robertson J., Canod A., and Stenberg B.2015. Using visible and near infrared spectroscopy to estimate carbonates and gypsum in soils in arid and subhumid regions of Isfahan, Iran. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 23: 155–165
11. Kouli M., Soupios P., and Vallianatos F .2009. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. Environment Geology, 57:483–497.
12. Ostovari Y., Asgari K., Cornelis W., and Beigi-Harchegani H. 2015. Simple methods for estimating field capacity using Mamdani inference system and regression tree. Archives of Agronomy and Soil Science. http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2014.957687.
13. Refahi H. 2005. Water erosion and conservation. Tehran University, 680 pages.
14. Santos F.L., Reis J.L., Martins O.C., Castanheira N.L., and Serralheiro R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. Biosystems Engineering, 86:355–364.
15. Schmid T., and Palacios-Orueta A. Chabrillat S. BendorE and Plaza A. 2012. Spectral characteristic of land surface composition to determination soil erosion within semiarid rained cultivated areas. IGARSS, 2012: 7082-7084.
16. StatSoft .2007.STATISTICA(data analysis software system). Version 8. www.statsoft.com.
17. Tejada M., and Gonzalez J.L. 2006. The relationships between erodibility and erosion in a soil tratedwith two organic amendments. Soil and Tillage Research, 91: 186–198.
18. Thine C., Shephered K., Walsh M., Coe R. and Okwach G. 2004. Application of GIS and remote sensing in

characterization of soil hydraulic properties for soil physical quality assessment. University of Nairobi, Kenya, pp:1-18.

19. Vaezi A., Bahrami H.A., Sadeghi S.H., and Mahdian M. H. 2010. Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. Journal of Agricuthre Science Technology, 12: 241-252.
20. Vaezi A.R, Sadeghi S.H.R, Bahrami H.A, and Mahdian M.H. 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. Geomorphology, 97 : 414–423.
21. Vendramea P.R.S., March R.L., Brunetc D., and Becquerc T. 2012. The potential of NIR spectroscopy to predict soil texture and mineralogy in Cerrado Latosols. European Journal of Soil Science, 1-11.
22. Visscara-Rossel R., Walvoortb D.J.J., McBratneya A.B., Janikc L.J., and Skjemstadc J.O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, 131 : 59–75.
23. Walky A. and Black I.A. 1934. An examination of Degtgareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. Experimental. Soil Science Society of America Journal, 79: 459-465.
24. WischmeierW.H., and Smith, D.D .1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA, Agriculture Handbook No. 537, Washington, DC
25. Yu D.S., Shi X. Z., and Weindorf D.C. 2006. Relationship between permeability and erodibility of cultivated Acrisols and Cambisols in subtropical China. Pedosphere 16: 304–311.

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 3, Jul.-Agu. 2017, p. 797-810

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۶، ص. ۸۱۰-۷۹۷

Developing Point Spectro Transfer Functions in Soil Erodibility Prediction in VIS-NIR-SWIR Rang

Y. Ostovari[1] - Sh. Ghorbani-Dashtaki*[2]- H-A. Bahrami[3]- M. Naderi[4], M. Abbasi[5]

Received: 27-01-2016
Accepted: 19-12-2016

Introduction: Soil erodibility (K factor) is generally considered as soil sensitivity to erosion and is highly affected by different climatic, physical, hydrological, chemical, mineralogical and biological properties. This factor can be directly determined as the mean rate of soil loss from standard plots divided by erosivity factor. Since measuring the erodibility factor in the field especially watershed scale is time-consuming and costly, this factor is commonly estimated by pedotransfer functions (PTFs) using readily available soil properties. Wischmeier and Smith (1978) developed an equation using multiple linear regressions (MLR) to estimate erodibility factor of the USA using some readily available soil properties. This equation has been used to estimate K based on soil properties in many studies. As using PTFs in large sales is limited due to cost and time of collecting samples, recently soil spectroscopy technique has been widely used to predict certain soil properties using Point SpectroTransfer Functions (PSTFs). PSTFs use the correlation between soil spectra in Vis-NIR (350-2500 nm) and certain soil properties. The objective of this study was to develop PSTFs and PTFs for soil erodibility factor prediction in the Simakan watershed Fars, Iran.

Materials and Methods: The Semikan watershed, which mainly has calcareous soil with more than 40% lime (total carbonates), is located in the central of Fars province, between 30°06'-30°18'N and 53°05'-53°18'E (WGS′ 1984, zone 39°N) with an area of about 350 km^2. For this study, 40 standard plots, which are 22.1×1.83 m with a uniform ploughed slope of 9% in the upslope/downslope direction, were installed in the slopes of 8-10% and the deposit of each plot was collected after rainfall. From each plot three samples were sampled and some physicochemical properties including soil texture, organic matter, water aggregate stability, soil permeability, pH, EC were analyzed Spectra of the air-dried and sieved soil samples were recorded in the Vis-NIR-SWIR (350 to 2500 nm) range at 1.4- to 2-nm sampling intervals in a standard and controlled dark laboratory environment using a portable spectroradiometer apparatus (FieldSpec 3, Analytical Spectral Device, ASD Inc.). Some bands which had the highest correlation with K factor were chosen as input parameter for developing PSTFs. A stepwise multiple linear regression method was used for developing PTFs and SPTFs. R2, RMSE and ME were used for comparing PTFs and SPTFs.

Results and Discussion: The K values varied from 0.005 to 0.023 t h MJ^{-1} mm^{-1} with an average standard deviation of 0.014 and of 0.003 t h MJ^{-1} mm^{-1}, respectively. The K estimated by Wischmeier and Smith (1978) equation varied from 0.015 to 0.045 t h MJ^{-1} mm^{-1} with an average of 0.030 t h MJ^{-1} mm^{-1}. There was a significant difference ($p<0.001$) between measured soil erodibility factor and those estimated based on Wischmeier and Smith (1978) in the studied area. A comparison between measured and estimated K values revealed that the measured soil erodibility factor values were from 1.08 to 3.57 with average 2.18 times smaller than the estimated values. The K had positive significant correlation with silt content ($r= 0.47$, $p<0.01$) and very fine sand content ($r=0.43$, $p<0.01$). The results indicated that $CaCO_3$ had negative effect on the K factor because Ca^{2+} affects flocculation and aggregate stability, and hence decreases erodibility factor. This parameter had, therefore, a significant coefficient in developed PTFs, while it was not considered as input parameter in Wischmeier and Smith (1978) equation. Based on correlation between band reflectance and K factor some band including B_{532}, B_{622}, B_{1442}, B_{2227}, B_{2327} and B_{2343} were selected for developing PSTFs. PTFs with $R^2= 0.84$, RMSE= 0.0014 t h MJ^{-1} mm^{-1} and ME= 0.000 t h MJ^{-1} mm^{-1} were the best method to predict K. After PTFs,

1, 2 and 4- Ph.D. Educated, Professor and Associate Professor of Soil Science Department, College of Agriculture Shahrekord University, Iran
(*- Corresponding Author Email: ghorbani-sh@agr.sku.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Tarbiat-Modares University
5- Assistant Professor , Department of Forestry, College of Natural Resource and Earth Science, Shahrekord University

SPTFs with R^2= 0.53, RMSE= 0.0028 t h MJ^{-1} mm^{-1} and ME= 0.0011 t h MJ^{-1} mm^{-1} were the second best method to estimate K.
Conclusions: The results showed that the annual average of soil loss was 7.90 t h^{-1} ya^{-1} and measured K factor was 0.014 t h MJ^{-1} mm^{-1}. Organic matter (r=-0.60) and permeability (r= -0.77) had high significant correlation with the K factor. Although the content of lime was not considered in Wischmeier-Smith and RUSLE model, we found that this soil property decreased K significantly due to its strong effects on aggregate stability and soil permeability. Overall, PTFs and SPTFs had better accuracy than Wischmeier-Smith function to predict K factor. Wischmeier-Smith function showed an overestimation to predict K factor particularly for higher values of K.

Keywords: Spectral Reflection, Simakan Dam, Radiospectrometer, Rainfall Erosivity, USLE