

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 دیرپافت 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 ($0/014 t h MJ^{-1} mm^{-1}$) حدود ۲/۱۸ برابر کمتر از میانگین فرسایش‌پذیری برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت ($0/030 t h MJ^{-1} mm^{-1}$) 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 ، ME و RMSE، توابع انتقالی خاک کارایی 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 کارایی بالاتری نسبت به رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت در برآورد فرسایش‌پذیری داشت.

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

مقدمه

جدا شدن و انتقال توسط عوامل فرسایش دهنده (قطره‌های باران و رواناب) را بیان می‌کند (Y). این عامل نسبت فرسایش خاک (A) به ازای واحد شاخص فرسایش‌پذیری باران (R) است که در کرت استاندارد اندازه‌گیری می‌شود:

$$K = \frac{A}{R} \quad (1)$$

در واحد متریک A بر حسب $t ha^{-1} y^{-1}$ ، R بر حسب $MJ mm^{-1} t ha^{-1} h^{-1}$ 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 زودپافت خاک به کمک توابع انتقالی خاک (Pedotransfer Function: PTFs) بوده و هستند. یکی از معروفترین و پرکاربردترین توابع ارائه شده در برآورد

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 استفاده 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

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 تربیت مدرس

۵- استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد
DOI: 10.22067/jsw.v31i3.52932

فرسایش پذیری خاک رابطه ویشمایر و اسمیت (۲۴) است:

$$K = 2.1 \times ((100 - C) \times (fS + Si))^{1.14} \times 10 \quad (2)$$

که در این معادله OM درصد ماده آلی (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 نمی کنند زیرا که این توابع از داده های منطقه ای خاصی استخراج شده اند و احتمالاً در همان محدوده ای جغرافیایی مفید خواهند بود (۶ و ۱۲). همچنین در حوضه هایی با مساحت های زیاد به دلیل حجم بالای نمونه برداری جهت اندازه گیری ویژگی های زود یافت خاک به ویژه در مطالعات و طرح های حفاظت خاک استفاده از توابع انتقالی زمان بر 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 ویژگی های خاک مرسوم شده است. بر این اساس، مشابه با توابع انتقالی خاک می توان از انعکاس طیفی خاک برای تخمین فرسایش پذیری خاک استفاده و توابع جدیدی تحت عنوان توابع انتقالی طیفی نقطه ای (PSTFs: Point SpectroTransfer Functions) پی ریزی نمود. اینگونه بنظر می رسد که استفاده از طیف سنجی بتواند بسیاری از محدودیت های توابع انتقالی خاک را مرتفع نماید. زیرا در رویکرد طیفی، متغیرهای ورودی در توسعه توابع تنها داده های طیفی خاک هستند که برخلاف ویژگی های زود یافت خاک، منحصرأ با یک روش استاندارد اندازه گیری می شوند (۴).

اگرچه در دو دهه اخیر طیف سنجی در برآورد ویژگی های خاک استفاده شده است ولی تاکنون مطالعه مدونی در خصوص برآورد فرسایش پذیری با استفاده از این تکنیک صورت نگرفته است. تین و همکاران (۱۸) ارتباط بین ویژگی های هیدرولیکی خاک و انعکاس طیفی در ناحیه مادون قرمز نزدیک (NIR) را با استفاده از توابع انتقالی طیفی خاک بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که توابع انتقالی طیفی خاک کارایی بالای در برآورد رطوبت خاک دارد. گومز و همکاران (۷) میزان کربن آلی خاک (SOC) منطقه نارابری استرالیا را با طیف سنجی در محدوده مرئی-مادون قرمز نزدیک (VIS-NIR) و روش حداقل مربعات جزئی (PLS: Partial Least Squares) تخمین زدند. نتایج دقت بالای روش طیف سنجی در برآورد SOC را نشان داد. وندرام و همکاران (۲۱) پتانسیل طیفی در محدوده NIR را برای تخمین برخی از ویژگی ها خاک منطقه کرادو برزیل ارزیابی و گزارش کردند که طیف سنجی برای ویژگی های 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 ویژگی ها طیفی تعیین شد. بدین گونه که با تغییر در ویژگی ها فیزیکی و شیمیایی و مورفولوژیکی خاک، انعکاس طیفی و درجه درخشندگی خاک نیز تغییر می کند. لذا با تجزیه و تحلیل میزان انعکاس طیفی خاک میزان فرسایش خاک تعیین شد.

می توان بیان داشت که استفاده از روش طیف سنجی در برآورد ویژگی های خاک بسیار مفید و کاربردی است. زیرا که طیف سنجی روشی غیر مخرب، سریع و کم هزینه است و برخلاف روش های آزمایشگاهی به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی خطری برای محیط زیست ندارد. همچنین در طیف سنجی اندازه گیری طیفی ثابت بوده و همگان از یک روش ثابت در ثبت انعکاس های طیفی استفاده می کنند. بعلاوه اندازه گیری طیفی را به دلیل سهولت و نداشتن هزینه بارها و بارها تکرار کرد تا از صحت اندازه گیری مطمئن شد. لذا در این پژوهش سعی شد تا کارایی طیف سنجی در برآورد فرسایش پذیری خاک ارزیابی شود. حوضه آبخیز سیمکان از مناطق مهم کشاورزی استان فارس تلقی می گردد. بنابراین برآورد میزان حساسیت خاک به فرسایش و یا همان فرسایش پذیری در این منطقه بسیار مهم و حائز اهمیت خواهد بود. از آنجائیکه تاکنون کارایی معادله ویشمایر و اسمیت (۲۴) در منطقه مورد مطالعه مورد آزمون قرار نگرفته و نیز هیچگونه توابع انتقالی و طیفی نقطه ای در برآورد فرسایش پذیری پی ریزی نشده است، لذا این پژوهش با هدف تخمین فرسایش پذیری خاک به روش های (۱) پی ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه ای (PSTFs) در برآورد فرسایش پذیری با کاربرد مستقیم داده های طیفی؛ (۲) پی ریزی توابع انتقالی خاک (PTFs) با استفاده از برخی ویژگی های زود یافت خاک؛ و (۳) استفاده از معادله ویشمایر و اسمیت (۲۴) انجام شد.

مواد و روش ها

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 سانتی گراد، متوسط بارندگی سالانه ۳۰۸/۶ میلیمتر و متوسط تبخیر و تعرق سالانه به روش پنمن مانیتیت ۱۱۹۰/۴ میلیمتر برآورد شده است.

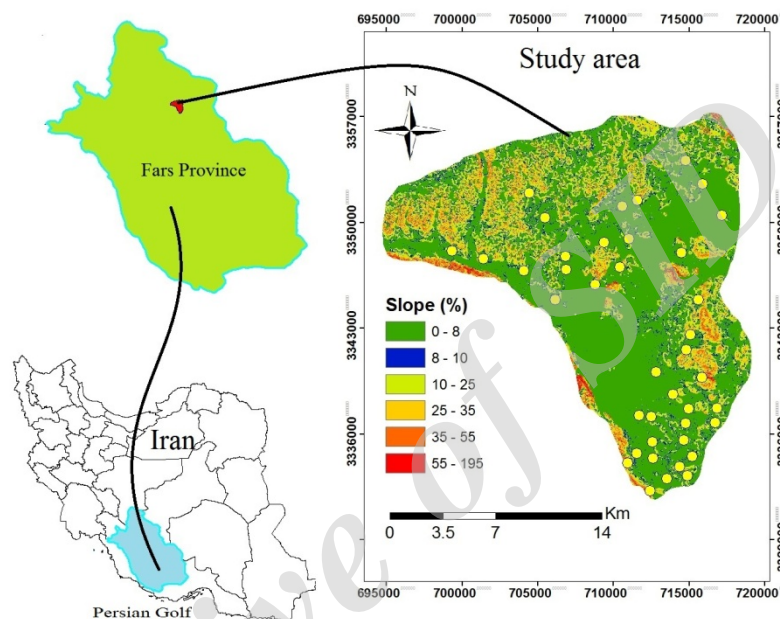
اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری خاک

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

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{p} \quad (3)$$

$$R = 0.264MFI^{1.50} \quad (4)$$

که در معادلات ۳ و ۴ MFI شاخص اصلاح شده فورنیه، R شاخص فرسایش‌پذیری باران ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ya}^{-1}$)، 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 فرسایش‌پذیری باران استفاده شد.



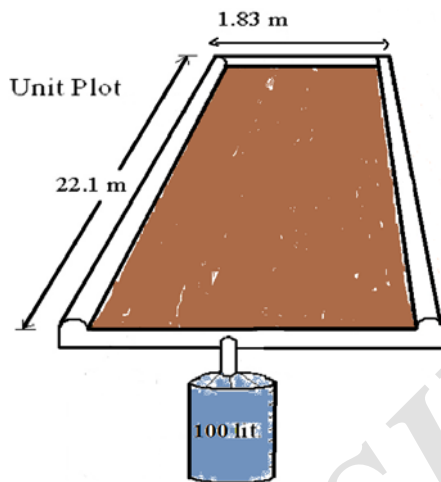
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان فارس و ایران. دایره‌های زرد کرت‌های ایجاد شده در شیب ۸-۱۰ درصد
Figure 1- Location of study area in Fars Province and Iran. The yellow points are the location of standard plots in 8-10% slopes.

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 وسیله pH 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 درصد کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (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

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 ۸-۱۰ درصد 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 جمع‌کننده رسوب را نشان می‌دهد (۲۰).

نهایت مقدار رسوب هر نمونه بر اساس مقدار رواناب جمع شده در تانکر به کل کرت نسبت داده شد.

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.



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

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 و ۱۸۲۰ تا ۱۸۹۰ نانومتر دارای آشفتگی شدید بودند. از آنجائیکه طیف سنجی در محیط باز صورت 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 10.3 Unsampler انواع روش‌های پیش‌پردازشی روی داده‌های طیفی انجام شد (۴). روش‌های مختلف 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 جمله‌ای 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 کولموگروف-اسمیرنوف 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

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 داده‌های طیفی و صفحه سفید مینا 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 منحنی‌اندازه‌گیری 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 ۱۰۰ درصد) 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

ویشمایر و اسمیت (۲۴) و ویژگی‌ها فیزیکوشیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه را در دو مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. خاک‌های منطقه مورد مطالعه در سه گروه آریدی سول، گروه اتی‌سول و اینسپتی‌سول بودند.

به طور کلی میانگین ویژگی‌های زودیافت و نیز مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده فرسایش‌پذیری در مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت‌سنجی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p > 0.05$). محتوای رس با میانگین ۲۷/۳ درصد از ۱۷/۹ تا ۴۱/۹ درصد متغیر بود. درصد شن از ۲۴/۱ تا ۵۶/۰ درصد و با میانگین ۴۰/۴ درصد متغیر بود. خاک‌های منطقه دارای مقدار متوسط ماده‌آلی ۳/۱۳ درصد 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 ۴۵/۲ درصد) بودند، با این حال خاکدانه‌ها در کلاس پایداری متوسط قرار داشتند. میانگین فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر اسمیت (۲۴) $0.030 t h MJ^{-1} mm^{-1}$ و از 0.015 تا 0.047 متغیر بود (جدول ۱).

میانگین مقدار شاخص فرسایش‌پذیری باران بدست آمده از معادله اصلاح شده فورنیه حاصل از داده‌های بارش ۸ ساله ایستگاه مادر سلیمان $255/7 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ya^{-1}$ و از حداقل ۵۶/۹ تا حداکثر $723/0 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ya^{-1}$ متغیر بود. کولی و همکاران (۱۱) و ایروم و همکاران (۹) همبستگی بالایی را بین شاخص فورنیه اصلاح شده و شاخص فرسایش‌پذیری باران گزارش کردند. هیو و همکاران (۸) و الکزاکیس و همکاران (۲) نیز شاخص فورنیه اصلاح شده برای محاسبه فرسایش‌پذیری باران استفاده کردند. از آنجائی که در منطقه مورد مطالعه تنها یک ایستگاه باران‌سنجی وجود دارد، لذا از مقدار میانگین شاخص فرسایش‌پذیری باران جهت محاسبات بعدی استفاده گردید.

در طول دوره 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 $1/438 t ha^{-1} ya^{-1}$ و از حداقل $5/85 t ha^{-1} ya^{-1}$ تا $6/382 t ha^{-1} ya^{-1}$ متغیر بود. لذا با توجه با مقدار هدر رفت خاک و میانگین شاخص فرسایش‌پذیری محاسبه شد. حداقل، حداکثر و میانگین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده به ترتیب 0.005 ، 0.025 و $0.14 MJ^{-1} t h$ بود. مقایسه میانگین فرسایش‌پذیری برآورد شده حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) ($0.030 t h MJ^{-1}$) با میانگین مقدار اندازه‌گیری شده ($0.014 t h MJ^{-1}$) مبین آن است که مقدار اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری از $1/0.8$ تا $3/57$ با میانگین $2/18$ برابر به طور معنی‌داری کوچکتر از مقدار فرسایش‌پذیری برآورد شده است ($p < 0.05$). در مطالعه واعظی و همکاران (۱۹) نیز

(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 کارایی مدل‌ها

جهت ارزیابی کارایی 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).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (5)$$

$$ME = \sum \left(\frac{P_i - O_i}{n} \right) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)} \quad (7)$$

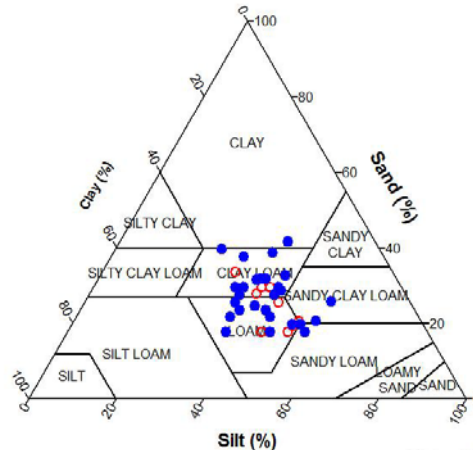
که در این معادلات O_i و P_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده پارامتر و n تعداد داده‌ها است. آماره RMSE بیانگر مقدار خطا است (۱).

نتایج و بحث

شکل ۳ توزیع اندازه ذرات نمونه‌های خاک را در مثلث بافت خاک در مجموعه داده صحت‌سنجی 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

با آهک فقیر در آمریکا توسعه یافته است، در بیشتر مناطق کشور ما کارایی 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).

فرسایش‌پذیری حاصل از رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) از $4/40$ تا $17/64$ 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



شکل ۳- توزیع کلاس بافت خاک. نقاط توپر داده‌های صحت‌سنجی 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 فیزیکی‌وشیمیایی خاک. (A) و (B) به ترتیب مجموعه داده صحت‌سنجی و اعتبارسنجی هستند

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

	واحد	میانگین Mean		حداقل Minimum		حداکثر Maximum		انحراف معیار Standard diviation	
		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

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

جدول ۲ همبستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده با ویژگی‌های زود یافت 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 (-0.77) را با نفوذپذیری خاک دارد. یو و همکاران (۲۵) و واعظی و همکاران (۲۰) نیز همبستگی بالا و منفی نفوذپذیری با فرسایش‌پذیری را گزارش کردند.

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.

علاوه بر افزایش مقاومت خاک به جدا شدن ذرات توسط قطره باران و رواناب، با داشتن اثر معنی‌دار بر خاک‌دانه‌سازی 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

جدول ۲ - همبستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های زودبافت خاک

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

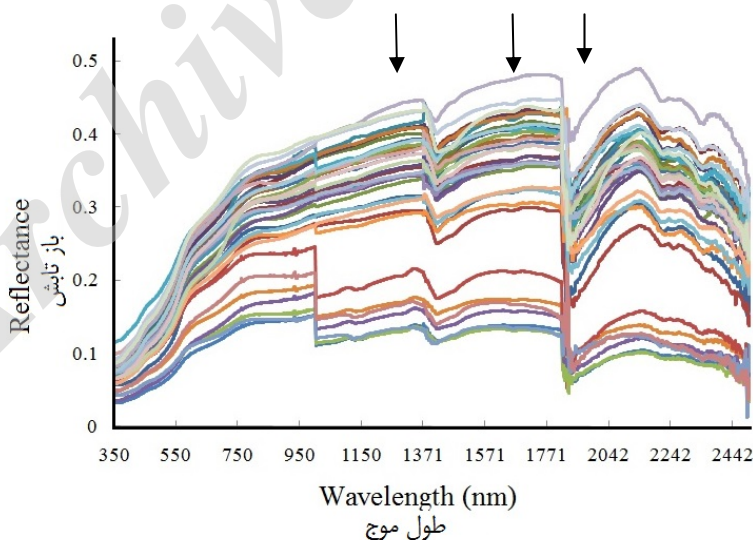
	Cl	Si	Sa	OM	CaCO ₃	FS	MWD	PE	VFS
Si	-0.29	1.00							
Sa	-0.67***	-0.52**	1.00						
OM	-0.08	-0.21	0.23	1.00					
CaCO ₃	-0.21	-0.49*	0.56**	0.51**	1.00				
FS	0.02	0.20	-0.18	-0.14	-0.23	1.00			
MWD	0.05	-0.29	0.18	0.58**	0.36*	-0.45**	1.00		
PE	-0.18	-0.42**	0.49**	0.54**	0.51**	-0.24	0.37*	1.00	
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; CaCO₃: Calcium carbonate; ***:Correlation significant at $p < 0.001$; **:Correlation significant at $p < 0.01$; *: Correlation significant at $p < 0.05$

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، آلومینیوم و منیزیم (طول موج‌های ۲۲۱۲ نانومتر) در شبکه‌های کانی‌های رس است (۲۲).

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



شکل ۴ - منحنی‌های اصلاح شده طیفی

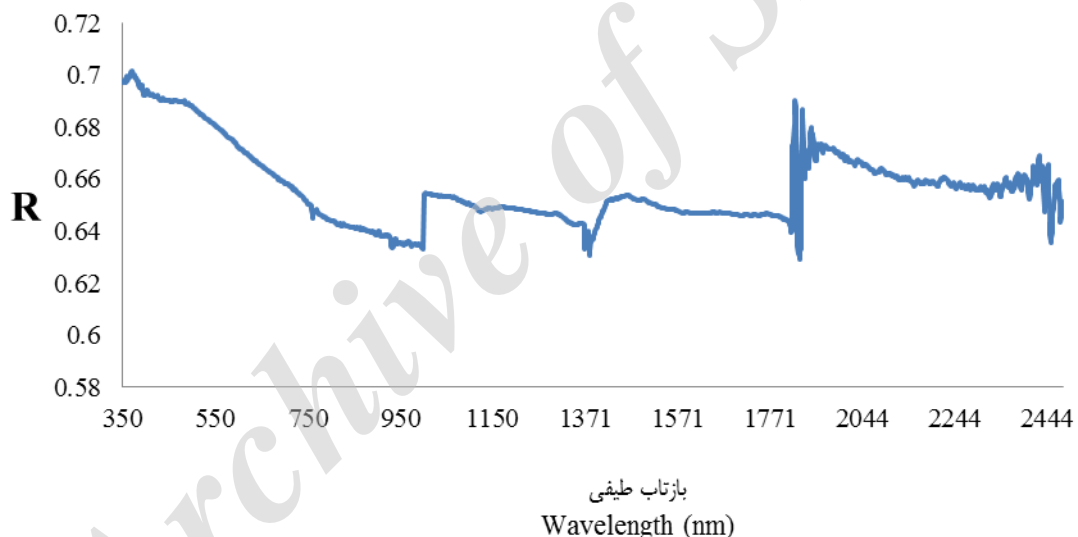
Figure 4- Adjusted soils spectra

طیف‌هایی که دارای بیشترین همبستگی با فرسایش‌پذیری خاک بودند انتخاب شدند. بابائیان و همکاران (۴) نیز جهت پی‌ریزی توابع

جهت انتخاب طیف‌ها در پی‌ریزی توابع طیفی نقطه‌ای خاک ابتدا همبستگی پیرسون بین همه باندها (۳۵۰ تا ۳۴۵۰ نانومتر) تعیین و

اساس بابائیان و همکاران (۴) در ناحیه حدود ۱۴۰۰ کربن (ماده آلی) بیشترین جذب را دارد. با توجه به همبستگی بین ماده آلی و فرسایش پذیری (جدول ۲) و نیز اثر این ویژگی بر فرسایش پذیری خاک، همبستگی بین فرسایش پذیری و باند ۱۴۴۲ نانومتر قابل توجه است. می توان وجود همبستگی بالای فرسایش پذیری با باندهای مادون قرمز کوتاه (۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) را به علت وجود کربنات کلسیم معادل در خاک ارتباط داد (همبستگی معنی دار کربنات کلسیم معادل با فرسایش پذیری مبین این نکته است، جدول ۲). زیرا که 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 ۲۳۵۰-۲۳۰۰ نانومتر است.

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 رابطه ضریب همبستگی پیرسون (R) بین مقادیر بازتاب طیفی خاک در هر طول موج از گستره ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر با مقدار فرسایش پذیری اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، همبستگی معنی دار بین مقدار فرسایش پذیری خاک با بازتاب طیفی در گستره مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی وجود دارد. بالاترین ضریب همبستگی (معنی دار در سطح ۵ درصد) با مقدار فرسایش پذیری خاک به ازای طول موج‌های گستره مرئی (۵۳۲، ۶۲۲ نانومتر)، مادون قرمز کوتاه (۱۴۴۲، ۲۲۲۷ و ۲۳۲۷ 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 ماده آلی می‌باشد. بر



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

Figure 5- Pearson coefficient correlation (R) between reflectance values and measured erodibility

$$K = 0.0245 - 0.0037PE - 0.0018MWD - 7.3 \times 10^{-5} CaCO_3 + 1.56 \times 10^{-4} VFS \quad R^2 = 0.84, (A)$$

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

برآورد فرسایش پذیری 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 فرسایش پذیری خاک معنی دار شد ($p < 0.05$). رابطه‌ی پی‌ریزی شده بین فرسایش پذیری و ویژگی‌های زودیافت خاک در مجموعه داده‌های صحت سنجی به صورت زیر بدست آمد:

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 صحت‌سنجی 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 کارایی 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 کارایی بهتری نسبت به توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای دارد. زیرا که 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 ME توابع انتقالی خاک، توابع انتقالی طیفی خاک و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در برآورد فرسایش‌پذیری را نشان می‌دهد.

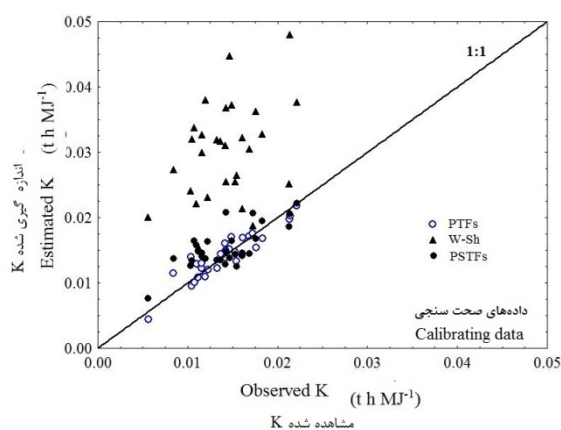
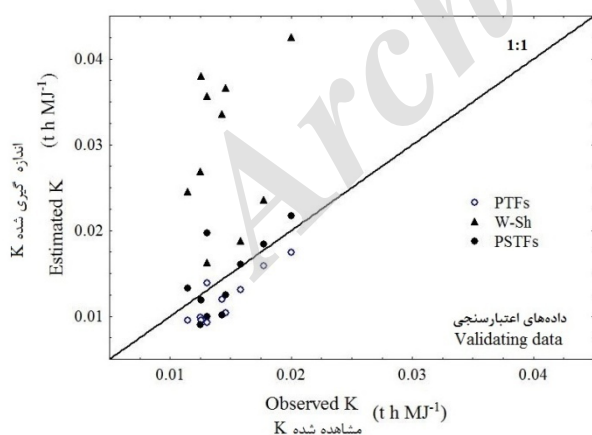
مطالعه واعظی و همکاران (۲۰) نیز نفوذپذیری مهمترین عامل در برآورد فرسایش‌پذیری بود. در مطالعه حاضر برخلاف مطالعه ویشمایر و اسمیت (۲۴) ماده آلی به عنوان پارامتر ورودی مدل انتخاب نگردید در حالیکه کرنات کلسیم معادل دارای ضریب معنی‌داری شده و در مدل وارد شد که می‌توان به اهمیت این ویژگی در برآورد فرسایش‌پذیری 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 نانومتر، ۲۲۲۷، ۲۳۲۷ و ۲۳۴۳ نانومتر) بودند که با استفاده از روش گام به گام ارزیابی شدند. تابع 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 کرنات کلسیم معادل خاک دارای بازتاب قابل تشخیص است. لذا با توجه به همبستگی فرسایش‌پذیری با این دو

$$K = 0.0019 - 0.0161R_{532} - 0.0183R_{622} - 0.020R_{1442} + 0.0299R_{2227} + 0.0273R_{2327} - 0.0387R_{2343} \quad R^2=0.53(9)$$



شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده فرسایش‌پذیری با استفاده از توابع انتقالی (PTFs)، توابع طیفی نقطه‌ای (PSTFs) و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) (W-Sh) در دو مجموعه داده اعتبارسنجی و صحت‌سنجی. 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 Wishmaier 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.

خاک دارای کارایی 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 $R^2=0.78$ ، RMSE برابر $0.027 \text{ t h MJ}^{-1}$ و برابر $ME = -0.001 \text{ t h MJ}^{-1}$ کارایی 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 $R^2=0.48$ ، $RMSE = 0.030 \text{ t h MJ}^{-1}$ و $ME = -0.003$ (نیز از کارایی مطلوب و قابل قبولی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک برخوردار بود. رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) در مجموعه داده اعتبارسنجی نیز همانند داده صحت‌سنجی کارایی خوبی نداشته و کمترین مقدار ضریب تعیین و بیشترین خطا و اریبی (بیش‌برآورد) را داشت. تابع انتقالی طیفی خاک گرچه نسبت به ویشمایر و اسمیت کارایی بهتری دارد ولی رابطه کاملاً اریب است.

مقدار ضریب تعیین در مجموعه داده‌ی صحت‌سنجی از 0.84 برای توابع انتقالی خاک تا 0.15 برای رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) تغییر دارد. توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای با داشتن ضریب تعیین 0.53 دارای کارایی قابل قبولی در برآورد فرسایش‌پذیری خاک است. آماره RMSE بیانگر مقدار خطا است، هرچه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد کارایی بالاتر مدل را نشان می‌دهد. مقدار آماره‌ی RMSE توابع انتقالی خاک در برآورد فرسایش‌پذیری $0.027 \text{ t h MJ}^{-1}$ و در $0.030 \text{ t h MJ}^{-1}$ ، در توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای $0.028 \text{ t h MJ}^{-1}$ و در رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت $0.021 \text{ t h MJ}^{-1}$ 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 ($ME = -0.001 \text{ t h MJ}^{-1}$) و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) بیشترین اریبی ($ME = -0.003 \text{ t h MJ}^{-1}$) را در برآورد فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهند (جدول ۳). با توجه به آماره‌های ارزیابی در مجموعه داده صحت‌سنجی توابع انتقالی

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE و ME توابع انتقالی خاک، توابع انتقالی طیفی خاک و رابطه‌ی ویشمایر و اسمیت (۲۴) 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 ($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)	ME ($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
داده‌های صحت‌سنجی 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 اعتبارسنجی Validating 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

بود. فرسایش‌پذیری بیشترین همبستگی ($r = -0.77$) را نفوذپذیری 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

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 اسمیت (۲۴) ($0.030 \text{ t h MJ}^{-1}$) به میزان دو برابر بیشتر از میانگین مقدار اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری ($0.014 \text{ t h MJ}^{-1}$) با استفاده از کرت‌های استاندارد

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.

و بازتاب‌های طیفی، طیف‌های گستره مرئی (۵۳۲، ۶۲۲ نانومتر)، مادون قرمز کوتاه (۱۴۴۲ نانومتر، ۲۳۲۷، ۲۳۴۳ نانومتر) جهت پی‌ریزی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای 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 کارایی 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 کارایی

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., Homae 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 spectroscopy of minerals, *Journal of Geophysics Research*, 95: 12.
6. Ghorbani-Dashtaki S., Homae M., and Khodaberdiloo H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of Soil data. *Soil Use Management*, 26: 68-74.
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., Topaloglu F., and Uygun 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. Chabrilat S. Bendoric 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 treated with two organic amendments. *Soil and Tillage Research*, 91: 186-198.
18. Thine C., Shepherd K., Walsh M., Coe R. and Okwach G. 2004. Application of GIS and remote sensing in

- characterization of soil hydraulic properties for soil physical quality assessment. University of Nairobi, Kenya, pp:1-18.
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 Agriculture 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., Brunet 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 Degtareff 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. Wischmeier W.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.

Archive of SID

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

Y. Ostovari¹ - Sh. Ghorbani-Dashtaki^{*2} - H-A. Bahrami³ - M. Naderi⁴, M. Abbasi⁵

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 km². 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 CaCO₃ had negative effect on the K factor because Ca²⁺ 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 B₅₃₂, B₆₂₂, B₁₄₄₂, B₂₂₂₇, B₂₃₂₇ and B₂₃₄₃ were selected for developing PSTFs. PTFs with R²= 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 $R^2= 0.53$, $RMSE= 0.0028 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ and $ME= 0.0011 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ were the second best method to estimate K.

Conclusions: The results showed that the annual average of soil loss was $7.90 \text{ t h}^{-1} \text{ ya}^{-1}$ and measured K factor was $0.014 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. 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

Archive of SID