

برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با روش طیف‌سنجی در مناطق مستعد تولید ریزگرد در خوزستان

منصور چترنور، احمد لندی¹، علی اکبر نوروزی و حسینعلی بهرامی

دانش آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران؛ m.chatrenor@gmail.com
استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران و عضو مرکز پژوهشی منطقه‌ای ریزگردها، دانشگاه
شهید چمران اهواز، اهواز، ایران؛ landi@scu.ac.ir

دانشیار، هیئت علمی پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران؛
noroozi.aa@gmail.com

دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛ bahramih@modares.ac.ir

دریافت: 99/8/10 پذیرش: 99/12/23

چکیده

سرعت آستانه فرسایش یک عامل مهم در ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک یک منطقه به شمار می‌رود که اندازه‌گیری آن زمان‌بر و پرهزینه است. استفاده از طیف بازتابی خاک در برآورد سرعت آستانه فرسایش، سبب کاهش هزینه و افزایش سرعت عمل می‌شود. هدف از این پژوهش مقایسه کارایی و دقت مدل‌های رگرسیونی حداقل مربعات جزئی (PLSR)، ماشین بردار پشتیبان (SVR) و شبکه عصبی (ANN) در برآورد سرعت آستانه فرسایش در مناطق مستعد تولید گرد و غبار استان خوزستان است. برای این منظور ابتدا تعداد 91 نمونه خاک از قسمت‌های مرکزی و جنوبی مناطق مستعد تولید ریزگرد استان جمع‌آوری شد و سرعت آستانه فرسایش با استفاده از تونل باد تعیین گردید. در ادامه طیف بازتابی نمونه‌های خاک با دستگاه طیف‌سنج به دست آمد. روش‌های پیش‌پردازش بر روی طیف اصلی اجرا شد و مدل‌سازی با استفاده از سه مدل SVR، PLSR و ANN انجام گرفت. نتایج نشان داد که میانگین سرعت آستانه فرسایش در منطقه 9/7 متر بر ثانیه و حداقل آن 5/25 متر بر ثانیه به دست آمد، همچنین سرعت آستانه همبستگی معنی‌داری با سدیم محلول ($r = -0/58$) و نسبت جذب سدیمی ($r = -0/48$) در سطح احتمال 5 درصد نشان داد. مدل ANN در پیش‌پردازش مشتق دوم بهترین دقت برآورد ($PRD = 2/52$) و مدل SVR در طیف اصلی ($PRD = 0/56$) کمترین دقت برآورد را داشت. در پایان طول موج کلیدی سرعت آستانه فرسایش منطقه در محدوده‌های 1850 و 1930 نانومتر به دست آمد. با توجه به همبستگی بین بازتاب خاک با سرعت آستانه فرسایش ($r = 0/76$)، از این روش می‌توان برای ارزیابی فرسایش‌پذیری مناطق مستعد تولید ریزگرد استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش‌پذیری، طول موج کلیدی، پیش‌پردازش، ماشین بردار پشتیبان

¹ نویسنده مسئول، آدرس: اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک

(شائو و لیو، 2000؛ دانگ و همکاران، 2003 کورنیلس و همکاران، 2004؛ بوری و همکاران، 2013). در پژوهشی عظیم زاده و همکاران (1381) ارتباط بین شاخص فرسایش پذیری را با بافت، درصد سنگریزه، ماده آلی، آهک، گچ، میانگین قطر ذرات، شوری، نسبت سدیم جذب سطحی بررسی نموده و مشاهده کردند که نسبت سدیم جذب سطحی، میانگین قطر ذرات و گچ مهم‌ترین عوامل در شاخص فرسایش پذیری بادی خاک هستند. لیو و همکاران (2014) نشان دادند الگوی توزیع رسوبات تحت تأثیر پوشش گیاهی، شرایط سطحی و عوامل دیگر بوده و فرآیندهای هیدرولوژی و مواد مادری در تغییرات اندازه ذرات در تپه‌های شنی تأثیر می‌گذارند. نتایج مطالعه محمود آبادی و همکاران (1390) بر روی توزیع اندازه ذرات نشان داد در فرایند جدا شدن و انتقال، ذرات ریزتر اثر بیش‌تری دارند. همچنین در سرعت کم باد، تعلیق و خزش اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. محمود آبادی و همکاران (1391) توزیع اندازه ذرات خاک را بر شدت فرسایش بادی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش افزایش یافته و با افزایش اندازه ذرات شدت فرسایش به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر کولازو و بوشیزو (2010) پایداری خاک دانه‌های خشک و فرسایش پذیر بادی را در محیط نیمه‌خشک بررسی کردند و مشاهده کردند که بافت و ماده آلی تحت تأثیر عوامل مدیریتی نقش مهمی دارند. برای تعیین سرعت آستانه فرسایش از تونل باد و نمونه‌برداری نقطه‌ای استفاده می‌شود که بیانگر شدت فرسایش پذیری در همان محل نمونه‌برداری شده است و با تغییر در ویژگی‌های خاک، با فرض یکسان بودن سایر عوامل اقلیمی و مدیریتی نیز میزان فرسایش پذیری نیز متفاوت خواهد بود. از طرفی هرچه محیط مطالعاتی بزرگ‌تر باشد شدت تغییرات نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین ارتباط فرسایش پذیری با بازتاب خاک و استفاده از روش طیف‌سنجی در برآورد این ویژگی، قابلیت تعیین میزان حساسیت پذیری سایر نقاط با رفتار طیفی مشابه که اندازه‌گیری آزمایشگاهی انجام نشده است را خواهد داشت.

در مورد تعیین سرعت آستانه فرسایش با استفاده از روش طیف‌سنجی پژوهش‌های محدودی انجام شده است از جمله لی و همکاران (2015) از مدل PLSR برای برآورد سرعت آستانه فرسایش با روش طیف‌سنجی استفاده کردند و 17 طول موج کلیدی را از طریق آزمون

بر اساس اعلام سازمان بهداشت جهانی یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی منطقه‌ی غرب آسیا توفان‌های ریزگرد است که اثرات زیان‌باری بر سیستم حمل‌ونقل و بروز بیماری‌هایی مانند آلرژی، بیماری‌های تنفسی و عفونت‌های چشمی را سبب شده است (سازمان بهداشت جهانی، 2005). فرسایش بادی به طور کلی تحت تأثیر سه عامل محیطی سرعت باد، خصوصیات خاک (از جمله بافت، ماده آلی، رطوبت خاک) و سطح بدون پوشش گیاه، رطوبت، سنگ و برف تشدید می‌شود (شائو و همکاران، 2008؛ یونگ و همکاران، 2014). به طور کلی فرسایش خاک یعنی جداسازی و انتقال ذرات تشکیل‌دهنده در اثر عامل فرساینده (مورگان، 2009) که اثرات زیان‌باری را بر محیط‌زیست، تخریب اراضی و کاهش حاصلخیزی خاک دارد. سرعت آستانه فرسایش به قابلیت و مقاومت خاک در برابر عامل فرسایش دهنده مربوط می‌شود. در صورت کمتر بودن این پارامتر سبب جداسازی ذرات خاک می‌گردد. از ویژگی‌های خاک‌شناسی موثر بر فرسایش بادی می‌توان به بافت، کربنات کلسیم، شوری، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار رطوبت، نیروی پیوستگی بین ذرات خاک، رس و ماده آلی اشاره کرد. ویژگی‌های اشاره‌شده با تغییر زمان، دینامیک خاک (میکروتوپوگرافی، پوسته خاک، چگالی ظاهری خاک و توزیع اندازه خاک دانه‌ها) مدیریت و اقلیم تغییر می‌کنند (زوبیک و همکاران، 1991). در مناطق خشک به دلیل رطوبت نسبی پایین، بارندگی کم و توزیع نامناسب بارش، تبخیر زیاد، تغییرات شدید حرارتی، شوری و قلیائیت، تراکم کم پوشش گیاهی، حساسیت خاک سطحی به فرسایش بیشتر بوده و از طرفی وجود بادهای فرساینده باعث فرسایش بادی شده (زوبیک و ون پلت، 2015) که زمینه‌ساز پدیده گرد و غبار خواهد بود. در سال‌های اخیر در کشور ایران و به ویژه استان خوزستان با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و خاک شور و سدیمی در برخی از مناطق، پتانسیل بالایی برای فرسایش خاک و تولید گرد و غبار داشته است.

از مهم‌ترین شاخص‌های فرسایش خاک یک منطقه سرعت آستانه فرسایش بادی است که با استفاده از تونل باد تعیین می‌شود. در دهه‌های اخیر از انواع تونل‌های باد برای بررسی فرسایش‌پذیری در اراضی زارعی (فیستر و ریز، 2009) و تعیین اثر زبری و پوشش سطحی (تان و همکاران، 2013) استفاده شده است. تمرکز پژوهش‌ها در این زمینه بر روی توزیع اندازه ذرات، شدت باد و شرایط مختلف سطحی و پوشش گیاهی بوده است

تنفسی هستیم که نیازمند توجه ویژه است. برای ارزیابی پدیده گرد و غبار در این منطقه روش‌های مختلفی استفاده شده است معمولاً از روش سنجش از دور و برآورد ویژگی‌های خاک با این روش استفاده شده است. همچنین در پژوهش‌های تونل باد نیز اغلب تمرکز بر روی نقطه مطالعاتی بوده است که استفاده از روش طیف‌سنجی و رفتار بازتاب خاک می‌تواند به عنوان تکمیل‌کننده و در کنار سایر روش‌ها در ارزیابی وضعیت فرسایش پذیری خاک مورد استفاده قرار گیرد. در بحث طیف‌سنجی تمرکز پژوهش‌ها در برآورد سایر ویژگی‌های خاک بوده و در مورد سرعت آستانه فرسایش بادی پژوهش محدودی انجام شده است. بنابراین در صورت استفاده از انواع روش‌های پیش‌پردازش و مدل‌های قوی‌تر، این انتظار وجود دارد نتایج دقیق‌تر جهت مدیریت مناطق مستعد تولید گرد و غبار حاصل گردد. بنابراین اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: 1- بررسی ارتباط بین سرعت آستانه فرسایش با ویژگی‌های خاک در منطقه مطالعاتی، 2- مقایسه کارایی و دقت روش‌های PLSR، ماشین بردار پشتیبان (SVR) و شبکه عصبی (ANN) در برآورد سرعت آستانه فرسایش با روش طیف‌سنجی، 3- مقایسه کارایی انواع روش‌های پیش‌پردازش شامل: فیلتر ساویتزکی و گلای، فیلتر ساویتزکی و گلای به همراه مشتق اول (FD-SG)، فیلتر ساویتزکی و گلای به همراه مشتق دوم (SD-SG)، روش نرمال‌سازی استاندارد (SNV) و روش حذف پیوستار (CR) در بهبود دقت مدل‌های رگرسیونی و تعیین طول موج‌های کلیدی سرعت آستانه فرسایش است.

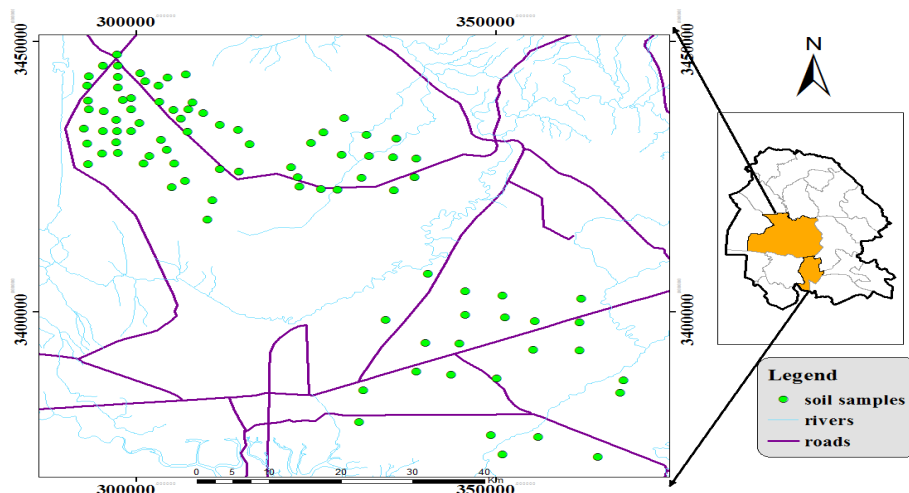
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری

این پژوهش در استان خوزستان و در حد فاصل عرض جغرافیایی (30° 30') و (31° 10') شمالی و طول جغرافیایی (48° 45') و (49° 50') شرقی انجام شد. این منطقه مطالعاتی شامل قسمت‌هایی از کانون جنوب و جنوب شرقی اهواز، بندر امام خمینی - حمیدیه و محدوده ماهشهر - هندیجان است و مساحت 121636 هکتار است (شکل 1).

همبستگی شناسایی کردند و بیان کردند که سه محدوده 1400، 1900 و 2200 نانومتر همبستگی بالایی را با سرعت آستانه فرسایش خاک داشته است. تمرکز اغلب پژوهش‌های طیف‌سنجی در مورد سایر ویژگی‌های خاک بوده است. کورسیو و همکاران (2013) از بازتاب خاک برای برآورد بافت استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مدل PLSR دقت قابل قبولی را در برآورد درصد ذرات رس، شن و سیلت با ضریب تعیین به ترتیب 0/87، 0/80 و 0/60 داشته است. داتو و همکاران (2014) از روش طیف بینی مرئی و مادون‌قرمز نزدیک و میانی SWIR برای برآورد بافت خاک استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که برای شن و ماسه ضرایب تعیین بین 0/72 و 0/77 متغیر بود و مشخص شد که روش طیف‌سنجی دقت قابل قبولی در شناسایی بافت خاک منطقه دارد. وانگ و همکاران (2018) از تصاویر ابر طیفی برای تعیین شوری در خاک‌های چین استفاده کردند. این پژوهشگران با استفاده از دو مدل (PLSR) و جنگل تصادفی (RF) مشاهده کردند که برآورد شوری خاک مدل RF عملکرد بهتری (RPD = 4/57 و R² = 0/93) و (RPD > 2/5) را نسبت به مدل PLSR نشان داده است. سدیل و همکاران (2019) به منظور ارزیابی کربن آلی و نیتروژن کل خاک‌های مرتعی در آلمان از روش طیف‌سنجی استفاده کردند، و کربن آلی و نیتروژن کل را به ترتیب با دقت خوب (RPD = 1/7 و R² = 0/65) و دقت عالی (RPD = 2/7 و R² = 0/87) برآورد کردند. چترنور و همکاران (1398) به منظور مدل‌سازی رفتار طیفی بافت خاک در کانون‌های گرد و غبار استان خوزستان از روش‌های پیش‌پردازش و مدل جنگل تصادفی استفاده کردند و نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد مدل جنگل تصادفی دقت برآورد قابل قبولی را در روش حذف پیوستار برای درصد رس (RPD_{CAL} = 1/98)، درصد سیلت (RPD_{CAL} = 1/65) و همچنین روش مشتق دوم برای درصد شن (RPD_{CAL} = 1/97)، داشته است.

حدود 9 درصد از مساحت دشت خوزستان، معادل 349254 هکتار مستعد تولید گرد و غبار است که سبب کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و همچنین ضرر اقتصادی در منطقه شده است (حیدریان و همکاران، 1394). از طرف دیگر شاهد افزایش میزان بیماری‌های



شکل 1- موقعیت کانون‌های گرد و غبار در استان خوزستان، کشور ایران و محل‌های نمونه‌برداری (نقاط سبز رنگ)

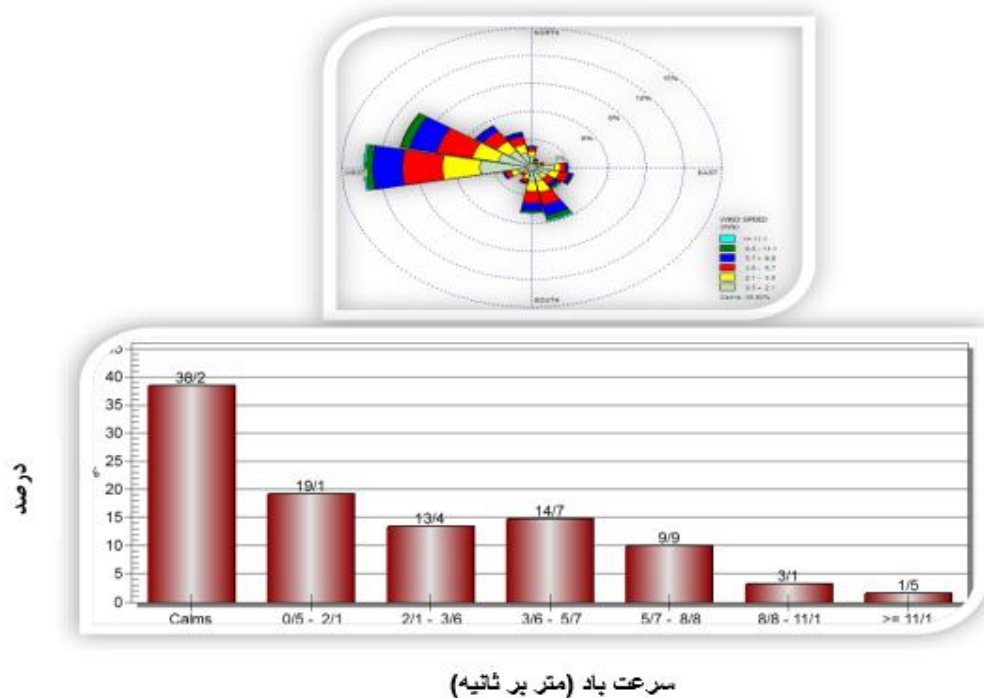
جهت و سرعت باد

در شکل 3 جهت و شدت باد در ایستگاه سینوپتیک اهواز ارائه شده است. میانگین جهت حداکثر باد غالب در منطقه بین 180 تا 270 درجه است. مشاهده گردید که در تعداد روزهایی که همراه با بیش‌ترین طوفان ریزگردی است، میانگین حداکثر جهت باد در استان 208 درجه است؛ این رقم نشان‌دهنده منشأ بودن بادهای از کشور عراق و عربستان به طور مشترک است. به طور میانگین حداکثر سرعت باد برای شهرستان‌های آبادان، اهواز، امیدیه، دزفول و مسجدسلیمان که به این منطقه نیز می‌رسد به ترتیب 21/1، 21/2، 19/2، 33/8، 15/7 متر بر ثانیه است که بر اساس توافق سازمان جهانی هواشناسی (World Metrology Organization) هرگاه در ایستگاهی سرعت باد از 15 متر بر ثانیه تجاوز کند و دید افقی به کمتر از یک کیلومتر برسد، طوفان گرد و غبار گزارش می‌شود (مهرابی و همکاران، 1394). قابل ذکر است که این بادهای را بیشتر در فصل زمستان شروع به وزیدن کرده و در صورتی که در یک دوره مانند سال‌های 1396 و 1397، میزان بارندگی و رطوبت خاک کمتر شود، گرد و غبار تولید می‌شود. شکل 2 منطقه‌ای واقع در جنوب شرق اهواز را نشان می‌دهد که به شدت مستعد فرسایش بوده و بلورهای نمک در سطح خاک تشکیل می‌شود.

از نظر زمین‌شناسی در گروه دشت‌های رسوبی و زمین‌های پست و شور قرار دارد. میانگین بلندمدت بارش و دما در منطقه به ترتیب 218 میلی‌متر و 26 سانتی‌گراد است. شوری اراضی به دلایل املاح انتقال‌یافته از اراضی بالادست و صعود موینگی بوده که در سال‌های اخیر با کاهش بارندگی، شوری خاک بیشتر شده است. (چترنور و همکاران، 1398، 1399). این مناطق در سال‌های اخیر به شدت فرسایش پذیر بوده، به طوری که در 8 بهمن 1397 طوفان ریزگردی با غلظت 66 برابر حد مجاز تولید گردید و شهرهای اطراف را در بر گرفت، شکل 2 قسمتی از خاک کانون جنوب شرقی اهواز را نشان می‌دهد. به منظور نمونه‌برداری از نظر کارشناسان پژوهشکده آبخیزداری و حفاظت خاک و پژوهش‌های نوروزی و همکاران (1394) و حیدریان و همکاران (1394) استفاده کرده و تعداد 91 نمونه از مناطق فرسایش‌پذیر در 5 سانتیمتری سطح خاک جمع‌آوری گردید. در ادامه مراحل هوا خشک کردن نمونه‌ها، کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری انجام شد.



شکل 2- منطقه دارای فرسایش پذیری شدید در جنوب شرق اهواز



شکل 3- گلباد و نمودار سرعت باد در ایستگاه اهواز (سازمان هواشناسی)

هدایت الکتریکی (EC) از مخلوط 5:1 خاک و آب با دستگاه شوری سنج DDS-11A (زنگ و همکاران، 2018)، گچ خاک با روش عصاره گیری با آب (بوشر و سابق، 2007)، کربن آلی با روش والکلی و بلاک (والکلی و بلاک، 1934) و بافت خاک با روش هیدرومتر و قرائت دو زمانه اندازه‌گیری شد. برای تعیین سرعت آستانه فرسایش مقداری از خاک هر نمونه به صورت جداگانه در سینی‌های با ابعاد 30×50×40 سانتیمتر منتقل شد و سطح آن تسطیح گردید. به منظور شبیه‌سازی شرایط منطقه

اندازه‌گیری آزمایشگاهی

انواعی از ویژگی‌های خاک در پژوهش‌های فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده از جمله می‌توان به ماده آلی، بافت و کربنات کلسیم (چپیل و همکاران، 1954)، بافت خاک (لیو و همکاران، 1998)، املاح خاک و بقایای گیاهی (بوکر و همکاران، 2007) اشاره کرد. بنابراین در این پژوهش ویژگی‌های شوری، گچ، کربن آلی و بافت خاک برای اندازه‌گیری انتخاب شدند و میزان همبستگی سرعت آستانه فرسایش با این ویژگی‌ها بررسی شد.

سینی‌های تونل در این آزمایش 30×50×40 سانتی متر بود. این دستگاه توانایی ایجاد جریان باد تا سرعت 22 متر بر ثانیه را دارد. آزمایش تونل باد برای نمونه‌های خاک، با افزایش سرعت باد از صفر تا 21 متر بر ثانیه انجام گرفت و برای هر نمونه خاک سرعت آستانه فرسایش تعیین شد (بلناپ و همکاران، 2007).

شکل 4 سینی خاک پس از اعمال تیمار رطوبتی 4 ماهه و شکل 5 تونل باد آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

مطالعاتی، تنش رطوبتی چهار ماهه بر روی سینی‌های خاک انجام شد. به این صورت که آبیاری نمونه‌ها با روش بارانی با آب‌پاش دستی انجام گرفت. عمل اشباع و خشک شدن خاک به مدت چهار ماه تکرار گردید و سپس به مدت 1 ماه در شرایط خشک نگهداری شدند. در این پژوهش از دستگاه تونل باد دارای مشخصات موتور جت فن، یکنواخت کننده توزیع هوا، بدنه و کیسه‌ای در انتها برای جمع‌آوری مقدار رسوب تولیدی استفاده گردید. ابعاد بدنه دستگاه 70×70×900 سانتی متر و ابعاد



شکل 4- خاک درون سینی‌ها پس از تیمار رطوبتی چهار ماهه



شکل 5- دستگاه تونل باد

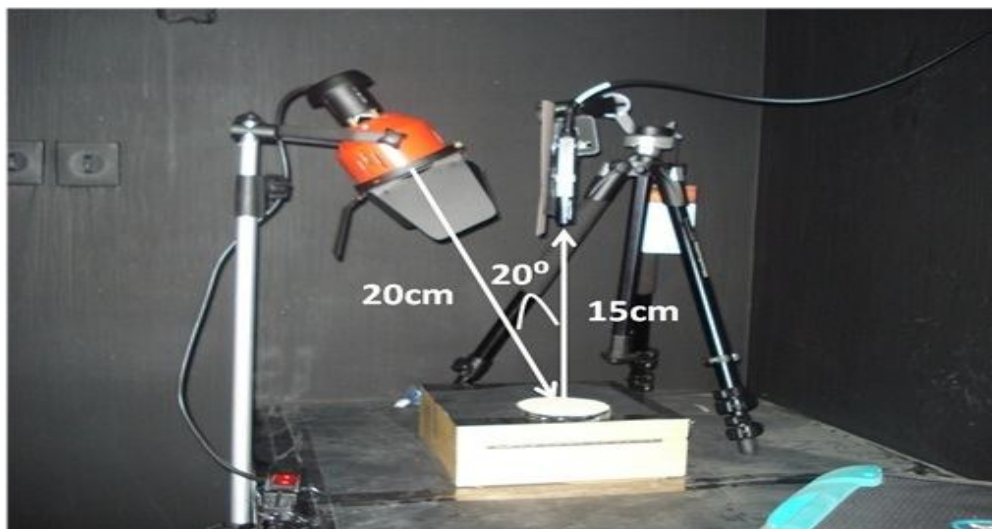
طیف اصلی نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد. به منظور طیف‌سنجی، در ابتدا مقداری از نمونه خاک الک شده به

طیف‌سنجی

شکل 6 نمایی از دستگاه طیف‌سنج و شکل 7

درجه نسبت به عمود به نمونه تابانده شد و بازتاب خاک از طریق گیرنده دستگاه ثبت گردید. برای حذف اثر توزیع اندازه ذرات بر روی طیف و تعدیل طیف نمونه خاک، پتری دیش 90 درجه چرخانده و اسکن نمونه‌های خاک در چهار موقعیت انجام شد.

پتری دیشی با قطر 10 سانتیمتر و ضخامت 1 سانتیمتر منتقل گردید. در یک اتاقک تاریک بازتاب طیفی نمونه‌های خاک با استفاده از طیف‌سنج آزمایشگاهی ثبت گردید. به این صورت که نمونه خاک در فاصله 20 سانتیمتری از لامپ دستگاه قرار گرفت. نور با زاویه 20



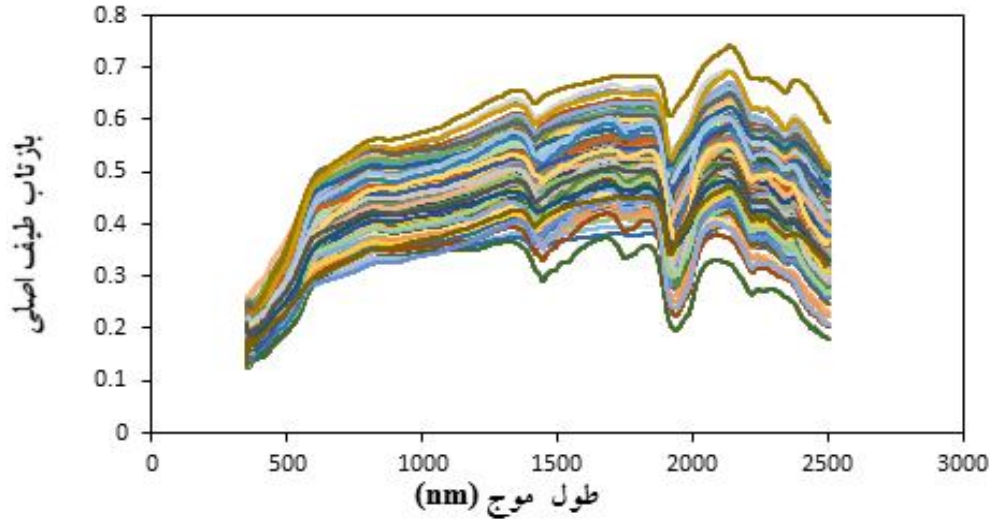
شکل 6- محل و زاویه قرارگیری نمونه خاک نسبت به دستگاه طیف‌سنج

مشتق دوم (SD-SG)، روش واریانس استاندارد به همراه فیلتر Savitzky-Golay (Savitzky and Golay, 1964) و در ادامه روش حذف پیوستار اجرا شد. شرح کامل روش‌های پیش‌پردازش در پژوهش (رنین و همکاران، 2009) ارائه شده است.

در مجموع برای هر نمونه چهار بازتاب به دست آمد، سپس میانگین‌گیری شده و با استفاده از نرم‌افزار Viewspect به داده‌های با قالب ACSII تبدیل گردید. در نهایت از نرم‌افزار 2015 Matlab و The UnscramblerX 10.2 برای پیش‌پردازش و مدل‌سازی استفاده شد. به دلیل وجود خطا و آشفتگی طیفی¹ در بازتاب خاک‌ها، طیف اصلی باید با روش‌های پیش‌پردازش اصلاح شود. هدف اصلی از پیش‌پردازش، حذف آشفتگی طیفی، ارتقاء کیفی داده‌ها و استفاده بهینه از داده‌های طیفی برای برآورد خصوصیات خاک است (فرن و همکاران، 2009). برای انجام پیش‌پردازش، ابتدا دو بخش‌داری آشفتگی طیفی به ترتیب در محدوده بین 350 تا 450 و 2450-2500 نانومتر حذف گردید. به علاوه دو وقفه حاصل از تغییر آشکارساز² در محدوده 1000 و 1830 نانومتر نیز حذف شد (روسل و همکاران، 2009). در ادامه پیش‌پردازش‌هایی بر روی طیف اصلی انجام گرفت که شامل: فیلتر Savitzky-Golay (به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دوم و نیز تعداد 23 نقطه هموارساز)، فیلتر Savitzky-Golay به همراه مشتق اول (FD-SG)،

¹ Noise

² Detector



شکل 7- نمودار طیف بازتابی اصلی

$$|\xi|_{\varepsilon} = \begin{cases} 0 \\ \xi - \varepsilon \end{cases}$$

$$\text{if } |\xi| \leq \varepsilon$$

otherwise

$$\text{Minimize: } \frac{1}{2}(w \cdot w) + C \sum_{i=1}^N (\xi_i^+ + \xi_i^-) \quad (\text{رابطه 2})$$

$$\text{constraints: } \begin{cases} wx_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^+ \\ y_i - wx_i + b \leq \varepsilon + \xi_i^- \\ \xi_i^+ \geq 0, \xi_i^- \geq 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه 2})$$

$$i=1,2,3,\dots,N$$

در این روابط w وزن بردار x ، b مقدار بایاس،

ξ_i^+ و ξ_i^- متغیرهای کمبود و C ثابت گنجایش که خطای مربوط به فاصله از ε را کنترل می‌کند.

مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) یک مدل با عناصر پیوسته و پاسخ‌های پویا است (کودیل، 1987). مدل شبکه‌های عصبی معمولاً در لایه‌ها سازمان‌دهی می‌شوند. لایه‌ها از تعدادی گره‌های پیوسته و تابعی فعال تشکیل شده است (محمد و همکاران، 2018). الگوریتم پس انتشار یک الگوریتم بسیار رایج است که برای آموزش شبکه MLP مورد استفاده قرار می‌گیرد (دموس و بل، 1998). در رابطه 4 $\Delta w_{ij}(n)$ و $\Delta w_{ij}(n-1)$ به ترتیب افزایش وزن بین گره‌های i ام و j ام، E خطا، و α ضریب مومنتم و ضریب یادگیری

مدل‌سازی

برای مدل‌سازی طیفی از سه مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، ماشین بردار پشتیبان (SVR) و شبکه عصبی (ANN) استفاده شد. مدل PLSR از مدل‌های رایج در روش طیف‌سنجی بوده و توانایی برآورد یک متغیر (متغیر وابسته) با استفاده از یک یا چند متغیر (متغیر مستقل) را دارد (وانگ و همکاران، 2014). در پژوهش‌های (سجستریم و همکاران 1983) و جی و همکاران (2016) در مورد این مدل توضیحاتی کاملی ارائه شده است. روش ماشین بردار پشتیبان (SVR) بر اساس نظریه مفاهیم آماری¹ استوار است و جواب کلی را با کمینه کردن خطای ساختاری تعیین می‌کند (واپنک و واپنک، 1988). مجموعه توابع به منظور پیش‌بینی تعیین می‌شود و $F(x)$ به گونه‌ای تعیین می‌شود که x بیش‌ترین حاشیه را از مقادیر آموزشی y داشته باشد. در این روش منحنی با ضخامت ε ، با کمترین خطای برآورد به داده‌ها برازش داده می‌شود (سمولا و سکولافت، 2004). مقدار انحراف از رابطه 2 تعیین شده و با وارد کردن متغیرهای کمبود و اصل کمینه‌سازی و بهینه‌سازی خطای ساختاری²، رابطه 3 برقرار می‌شود.

(رابطه 1)

$$f(x) = w \cdot x + b$$

¹ Statistical learning theory

² Structural Risk Minimization

در روابط (6) و (7): \hat{y}_{ij} مقدار برآورد شده در j تکرار و i نمونه ($j=1$) y_i مقدار اندازه‌گیری شده در نمونه i تعداد نمونه‌ها در مراحل واسنجی ($n=61$) و اعتبارسنجی ($n=30$)، m تعداد تکرار و \bar{y} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است. در رابطه 8 SD انحراف معیار نمونه است و از رابطه 9 محاسبه می‌شود. آماره RPD عملکرد مدل را ارزیابی می‌کند. مقادیر کمتر از 1/4، بین 1/4-2 و بیشتر از 2 به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد ضعیف، قابل قبول و عالی در مدل‌سازی است (چانگ و همکاران، 2001).

نتایج و بحث

مشخصات آماری ویژگی‌های خاک

نتایج تجزیه آماری سرعت آستانه فرسایش بادی و سایر ویژگی‌های خاک در جدول (1) آورده شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (1) بیش‌ترین سرعت آستانه فرسایش منطقه 15/5 متر بر ثانیه و کمترین آن 5/2 متر بر ثانیه است. آمار سازمان هواشناسی نشان می‌دهد هنگامی که سرعت باد به بیشتر از 6 متر بر ثانیه برسد، عامل تولید گرد و غبار در منطقه خواهد بود (سازمان هواشناسی کشور، 1397) و با توجه به اینکه میانگین سرعت آستانه فرسایش به دست آمده در این پژوهش 9/7 متر بر ثانیه بوده و اغلب نقاط نمونه‌برداری سرعت بالاتری از حد آستانه داشته‌اند، بیانگر تأیید نتایج این پژوهش است. شوری نمونه‌های خاک از 1/6 تا 96/55 دسی زیمنس بر متر است. که نشان می‌دهد در بعضی از نمونه‌ها به شدت تحت تأثیر صعود موینگی بوده و نمک به سطح خاک رسیده است. در شکل (2) شواهدی از وجود غلظت بالای نمک در سطح خاک این مناطق به فراوانی مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که غلظت سدیم خاک تا 762 میلی اکوی والان در 100 گرم خاک می‌رسد و در مناطق شور، سدیم هم غلظت بالایی دارد. این نتیجه در جدول (2) نیز با همبستگی معنادار (0/58) شوری با سدیم محلول قابل درک است.

مقدار آن‌ها بین 0 تا 1) است. خروجی هر نرون توسط رابطه 5 تعریف می‌شود: با توجه به حجم زیاد داده‌ها، در این پژوهش پس از آزمایش تعداد لایه‌ها و بررسی نتایج، تعداد لایه بهینه 50 انتخاب گردید. (رابطه 4)

$$\Delta w_{ij}(n) = -\varepsilon \times \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \alpha \times \Delta w_{ij}(n-1) \quad (\text{رابطه 5})$$

$$y = f(u) = f\left(\sum_{i=1}^n p_i W_{j,i} + b_j\right)$$

W_{ji} مقدار وزن اتصال بین نرون j ام لایه مذکور با نرون i ام لایه قبل، b_j وزن مربوط به بایاس Bias برای نرون j ام، P_i مقدار خروجی از نرون i ام لایه قبل، a مقدار خروجی از نرون j ام، f تابع آستانه نرون j ام است. عملیات کد نویسی در نرم‌افزار Matlab 2015 انجام گرفت. ویژگی سرعت آستانه فرسایش نمونه‌های خاک به عنوان متغیر وابسته و طیف بازتابی آن‌ها به عنوان متغیر مستقل به مدل شبکه عصبی معرفی گردید. با اجرای مدل، مقادیر سرعت آستانه برآورد شده به دست آمد و ارزیابی دقت مدل با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده انجام شد. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی دقت مدل‌ها از سه شاخص آماری ضریب تعیین R^2 ، ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE^2)$ ، و نسبت عملکرد به انحراف RPD^3 استفاده شده است (چانگ و همکاران، 2001؛ جی و همکاران، 2016). (رابطه 6)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y_{ij} - \bar{y}_{ij})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2}} \quad (\text{رابطه 7})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\hat{y}_{ij} - y_i)^2}{mn}} \quad (\text{رابطه 8})$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE}$$

1. The Coefficients of Determination

2. Root Mean Square Error

3. Ratio of Performance to Deviation

جدول 1- نتایج تجزیه آماری ویژگی های خاک

ویژگی خاک	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
TFV (m/s)	5/25	15/5	9/7	3/63	0/26
EC (ds/m)	1/6	96/55	33/58	19/02	0/55
Na ⁺ (meq/100g)	12	762	230	160/39	0/62
SAR	6	68/96	2/52	11/23	0/39
Clay (%)	19	72/2	35/3	13/5	0/43
Sand (%)	17	66/5	34/4	13/2	0/36
Silt (%)	10/8	40/2	26/8	7/01	0/27
OC (%)	0/59	1/26	0/56	0/23	0/38
Gypsum (meq/100)	7	41	25/2	7/3	0/29

TFV: سرعت آستانه فرسایش، SAR: نسبت جذب سدیمی

نسبت جذب سدیمی (SAR) همبستگی معنی‌دار (-0/48) در سطح 5 درصد با سرعت آستانه فرسایش داشته‌اند که بیانگر این است که در اغلب نقاطی که سرعت آستانه کمتر و فرسایش پذیر تر هستند، شوری، سدیم محلول و نسبت جذب سدیمی بیشتری وجود دارد.

نتایج ارائه شده در جدول (2) همبستگی پیرسون بین سرعت آستانه فرسایش با شوری، سدیم محلول، درصد رس، نسبت جذب سدیم، گچ و ماده آلی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در بین ویژگی‌های ذکر شده، شوری همبستگی (-0/52)، سدیم محلول (0/58)، و

جدول 2- همبستگی پیرسون بین سرعت آستانه فرسایش با ویژگی‌های خاک (n=91)

ویژگی خاک	TFV (m/s)	EC (ds/m)	Na(meq/l)	Clay (%)	SAR	Gypsum	OC	Sand	Silt
TFV (m/s)	1	-0/45*	-0/58*	-0/40	-0/48*	-0/35	0/25	0/37	-0/28
EC (ds/m)	-0/52*	1	0/71*	0/55*	0/63*	0/21	0/39	0/40	-0/23
Na(meq/l)	-0/58*	0/71*	1	0/51*	0/68*	0/25	0/34	0/35	-0/27
Clay (%)	-0/40	0/55*	0/51*	1	0/40	0/18	-0/28	0/42*	-0/34
SAR	-0/48*	0/63*	0/68*	0/40	1	0/20	-0/36	0/31	-0/28
Gypsum	-0/35	0/21	0/25	0/18	0/20	1	-0/17	0/27	-0/30
OC	0/25	0/39	0/34	-0/28	-0/36	-0/17	1	0/30	-0/19
Sand	0/37	0/40	0/35	0/52*	0/31	0/27	0/30	1	0/31
Silt	-0/28	-0/23	-0/27	-0/34	-0/28	-0/30	-0/19	0/31	1

TFV: سرعت آستانه فرسایش،

*: معنی‌داری در سطح 5 درصد

(2003) بافت و ماده آلی و عوامل مدیریتی و در پژوهش زوبیک، 1991 بافت خاک، کربنات کلسیم، شوری، ظرفیت تبادل کاتیونی، رطوبت، رس و ماده آلی همبستگی بالایی را با فرسایش پذیری خاک داشته‌اند. همچنین در پژوهش زوبیک و ون پلت (2014) شوری و قلیائیت و پوشش سطحی همبستگی بالایی را با فرسایش پذیری خاک نشان داده‌اند. نتایج مدل‌سازی و برآورد سرعت آستانه

در پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه فرسایش پذیری، عوامل متعددی بر روی فرسایش‌پذیری خاک اثرگذار بوده‌اند، از جمله اینکه لیو و همکاران (1998) بیان کرد که ذرات با قطر 0/09 میلی‌متر در برابر فرسایش بادی مستعد تر هستند. مطالعه محمود آبادی و همکاران (1391) نشان داد که با افزایش اندازه ذرات، شدت فرسایش به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. همچنین در پژوهش گولازو و بوشیزو (2010) و زوبیک و همکاران،

گروه اعتبارسنجی به این صورت بود که مدل ANN در روش مشتق دوم ($R^2 = 0/87$ ، $RMSE = 1/61$ و $PRD = 2/52$) بهترین دقت برآورد و مدل SVR در روش طیف اصلی ($R^2 = 0/37$ ، $RMSE = 2/16$ و $PRD = 0/56$) کمترین دقت برآورد را داشته است. همچنین مقایسه انواع روش‌های پیش‌پردازش در این گروه نشان داد که در مدل PLSR روش طیف اصلی ($R^2 = 1/72$ و $PRD = 1/26$) در مدل SVR روش SNV ($R^2 = 0/58$ ، $RMSE = 1/96$ و $PRD = 0/92$) در روش مشتق دوم ($R^2 = 0/87$)، در مدل SVR روش ANN ($R^2 = 0/87$) بهترین دقت برآورد را داشته است.

فرسایش با سه مدل PLSR، SVR و ANN در جدول (3) آورده شده است. مقایسه عملکرد کلی مدل‌ها در گروه واسنجی نشان داد که مدل ANN بهترین دقت برآورد را در روش مشتق دوم ($R^2 = 0/87$ ، $RMSE = 1/61$ و $PRD = 2/52$) و مدل PLSR کمترین دقت را در روش واریانس استاندارد نرمال ($R^2 = 0/63$ ، $RMSE = 1/58$ و $PRD = 1/32$)، نتایج ارزیابی دقت روش‌های پیش‌پردازش نیز به این صورت است که روش مشتق دوم در هر سه مدل PLSR ($R^2 = 0/89$ ، $RMSE = 1/32$ و $PRD = 2/89$)، SVR ($R^2 = 0/89$ ، $RMSE = 1/32$ و $PRD = 1/24$)، ANN ($R^2 = 0/84$ ، $RMSE = 0/51$ و $PRD = 5/08$) و PLSR ($R^2 = 0/96$) بهترین دقت برآورد را نشان داده است. نتایج

جدول 3- نتایج آماری برآورد سرعت آستانه فرسایش در سه مدل PLSR، ANN و SVR

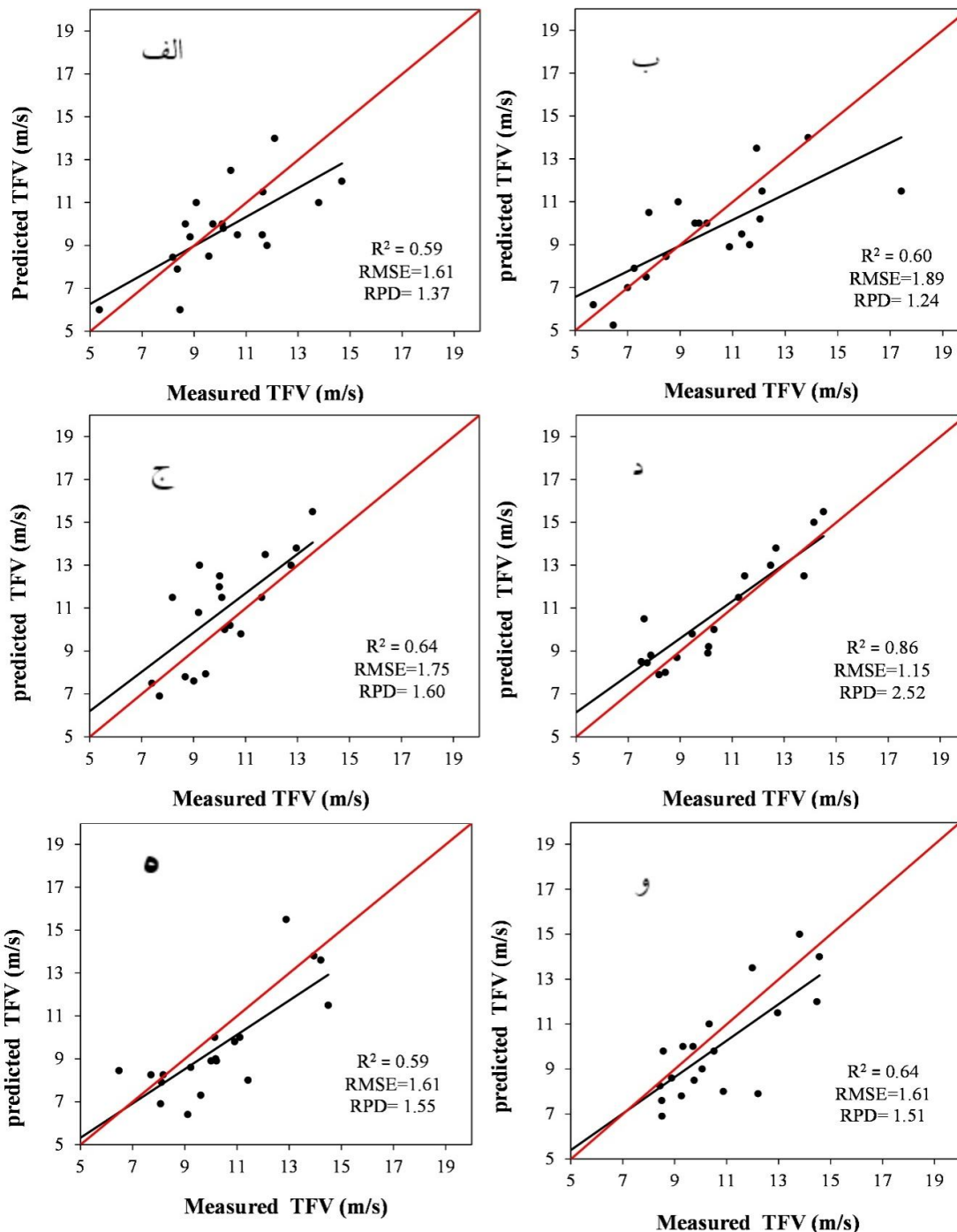
معیارهای ارزیابی			روش‌های مدل‌سازی و پیش‌پردازش				
اعتبارسنجی (30 داده)			واسنجی (61 داده)			پیش‌پردازش	ویژگی خاک
PRD	RMSE	R ²	PRD	RMSE	R ²		
1/26	1/72	0/58	1/43	1/5	0/67	Row	PLSR
1/27	1/71	0/59	1/43	1/5	0/67	SG	
1/17	1/79	0/55	1/35	1/56	0/64	FD-SG	
1/13	1/89	0/5	2/89	0/86	0/89	SD-SG	
1/25	1/68	0/6	1/32	1/58	0/63	SNV	
1/09	1/87	0/51	1/21	1/67	0/59	CR	SVR
0/56	2/16	0/37	0/62	1/96	0/54	Row	
0/57	2/18	0/38	0/62	1/96	0/54	SG	
0/9	1/91	0/48	1/2	1/44	0/75	FD-SG	
0/74	2/22	0/3	1/24	1/32	0/84	SD-SG	
0/92	1/96	0/45	1/09	1/66	0/61	SNV	ANN
0/86	2/0	0/42	1/12	1/54	0/7	CR	
1/37	1/61	0/59	2/71	1/04	0/87	Row	
1/24	1/89	0/61	2/29	1/19	0/81	SG	
1/60	1/75	0/65	2/43	1/07	0/83	FD-SG	
2/52	1/61	0/87	5/08	0/51	0/96	SD-SG	
1/56	1/61	0/59	2/05	1/30	0/76	SNV	
1/51	1/61	0/64	1/81	1/51	0/70	CR	

فرسایش نشان دادند و دقت برآورد روش‌های پیش‌پردازش نسبت به طیف اصلی تفاوت‌هایی را داشت که نشان‌دهنده اثر روش پیش‌پردازش در تغییر برآورد مدل است. شکل 8 مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده سرعت آستانه فرسایش در مرحله اعتبارسنجی با در مدل ANN و انواع روش‌های پیش‌پردازش آورده شده است. نتایج شکل 7 نشان داد که شیب مدل برآورد داده‌ها برای مدل ANN و در طیف اصلی و پیش‌پردازش‌های ، FD-SG، SD-SG، SNV و CR توزیع نسبتاً مناسبی

در برآورد سرعت آستانه فرسایش در مدل PLSR مشاهده شد که فقط مشتق دوم سبب افزایش دقت برآورد طیف اصلی شد و 4 روش دیگر دقت برآورد کمتری داشتند. در مدل SVR روش‌های پیش‌پردازش سبب افزایش دقت برآورد طیف اصلی و طیف صاف شده با روش SG شدند، با این وجود تمامی آن‌ها عملکرد برآورد ضعیفی داشتند ($PRD < 1/4$). همچنین مشاهده شد که روش‌های پیش‌پردازش در سه مدل دامنه دقت گسترده‌ای از عالی تا ضعیف را در برآورد سرعت آستانه

می‌دهد. همچنین در طیف اصلی و روش SG، داده‌ها پراکندگی بیشتری نسبت به خط 1:1 داشته‌اند.

را در اطراف خط (1:1) نشان داده است. با این وجود در نمودار d که مربوط به روش مشتق دوم است به دلیل دقت بالاتر این روش و توزیع داده‌ها در اطراف این خط برتری نسبی این روش را نسبت به سایر طیف‌ها نشان



شکل 8- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده سرعت آستانه فرسایش در مرحله اعتبارسنجی با مدل ANN
 الف: طیف اصلی (ROW)، ب: فیلتر ساویتزی گولای (SG)، ج: مشتق اول همراه با فیلتر ساویتزی گولای (FD-SG)، د: مشتق
 دوم همراه با فیلتر ساویتزی گولای (SD-SG)، ه: روش واریانس نرمال استاندارد (SNV)، و: حذف پیوستار (CR)

پژوهش وانگ و همکاران (2018) مدل شبکه عصبی عملکرد کلی بهتری داشته است که نشان از غالب بودن رابطه‌ی غیرخطی در این پژوهش است.

همبستگی بین طیف خاک با سرعت آستانه فرسایش در هر طول موج در شکل (9) ارائه شده است. مشاهده شد که همبستگی مثبت و منفی بین این ویژگی با بازتاب خاک وجود دارد. نتایج طیف اصلی نشان داد که بیش‌ترین همبستگی مثبت ($r=0/43$) در طول موج‌های 1940-1952 نانومتر و بیش‌ترین همبستگی منفی ($r=0/3-$) در طول موج‌های 420-426 نانومتر وجود دارد. نتایج همبستگی طیف پیش‌پردازش شده با روش ساویتری و گولای مشابه طیف اصلی بود. برای پیش‌پردازش مشتق اول همبستگی قوی مثبت ($r=0/65$) در محدوده طول موج 1820 و 2350 نانومتر و همبستگی قوی منفی در 1930 نانومتر مشاهده گردید. در روش مشتق دوم همبستگی‌هایی در محدوده طول موج‌های 1460، 1478، 1483 نانومتر و همچنین در محدوده طول موج‌های 1850 و 1930 مشاهده شد درحالی‌که بیش‌ترین همبستگی منفی ($r=0/76$) در محدوده طول موج 1930 نانومتر مشاهده شد. در روش SNV بیش‌ترین همبستگی مثبت ($r=0/61$) در طول موج 1980 نانومتر و همبستگی قوی منفی ($r=0/73$) در طول موج 1362 نانومتر مشاهده شد. در روش SNV همبستگی‌های قوی مثبت و منفی در محدوده طول موج‌های 1410، 1800، 1900، 2120، 2238 نانومتر وجود داشت درحالی‌که بیش‌ترین همبستگی ($r=0/62$) در محدوده 1830 نانومتر مشاهده شد. در روش حذف پیوستار (CR) نیز همبستگی‌های قوی در محدوده‌های 1800، 2000، 2300 و 2400 نانومتر مشاهده گردید.

بر اساس نتایج مدل‌سازی سرعت آستانه فرسایش در جدول (3)، روش مشتق دوم در مدل ANN بهترین دقت برآورد ($PRD=2/52$ و $RMSE=1/61$)، ($R^2=0/87$) را در گروه اعتبارسنجی نشان داد. بنابراین با توجه به این نتیجه‌گیری این روش، محدوده‌های 1850 و 1930 نانومتر را به عنوان طول موج کلیدی برای سرعت آستانه فرسایش در منطقه مطالعاتی تعیین گردید. محدوده تعیین‌شده (1850 و 1930 نانومتر) با محدوده شوری و عناصر محلول در پژوهش (وانگ و همکاران، 2018؛ پو و همکاران، 2003) و چترنور و همکاران (1398) محدوده 1900 نانومتر تشابه دارد. در مشاهدات میدانی مشخص شد که مناطقی دارای خاک شور، سدیمی داشتند، به دلیل نقش سدیم در تورم و تخریب خاک‌دانه، مقاومت کمی در برابر نیروی محرک باد وجود داشت و مستعد فرسایش و تولید ریزگرد بودند. لی و همکاران (2015) نیز با مدل

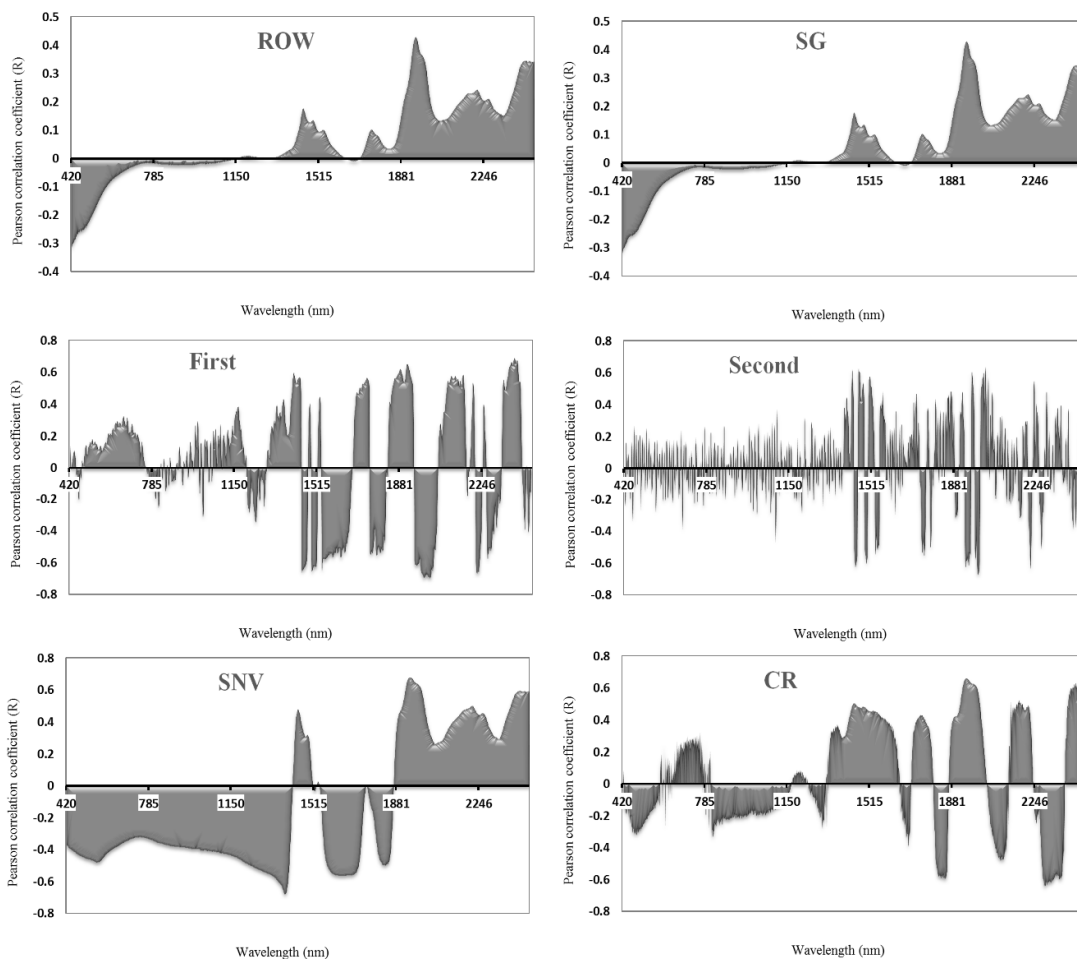
با توجه به اینکه از نمونه‌های مستقل جهت برآورد خصوصیات خاک استفاده شد، روند نتایج در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی تفاوت‌هایی را نشان داد که این نتیجه قابل انتظار است. مشاهده‌شده که اگر دقت مرحله واسنجی کمتر از اعتبارسنجی باشد از کیفیت برآوردها کاسته می‌شود (Dardenne et al., 2000). نتایج پژوهش حاضر حاکی از بیشتر بودن دقت مرحله واسنجی بود. با توجه به غالب بودن دقت واسنجی نسبت به اعتبارسنجی، از نتایج مرحله واسنجی نیز می‌توان جهت مقایسه مدل‌ها استفاده شود، با این وجود روند نتایج در مرحله اعتبارسنجی تا حدودی در واسنجی تکرار شده است.

Nocita et al (2014) برای خصوصیتی از قبیل نیتروژن و عناصر محلول که بدون مؤلفه‌های مولکولی فعال در محدوده مرئی - مادون قرمز هستند، نتایج مدل‌سازی عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌هایی با پاسخ مستقیم طیفی قرار می‌گیرد، در صورتی که این ویژگی‌ها با ویژگی‌های دارای محدوده فعال طیفی مانند شوری و گچ و کربنات کلسیم همبستگی داشته باشند، امکان برآورد آن‌ها با استفاده با محدوده‌های طیفی فعال وجود دارد. در این پژوهش نیز با توجه به همبستگی معنی‌دار سرعت آستانه فرسایش با سدیم و نسبت جذب سدیمی، در بروز طول موج کلیدی آن اثرگذار هستند.

در پژوهش حاضر مشتق‌گیری سبب افزایش دقت برآورد مدل گردید. این نتیجه با یافته‌های ریوز و همکاران (2002) مبنی بر توانایی روش مشتق‌گیری در حذف اثر اندازه ذرات و پراکنش نوری و افزایش دقت برآورد و همچنین نتایج مطالعه وانگ و همکاران (2018) مبنی بر اینکه در مدل‌سازی شوری بهترین دقت برآورد در مشتق مرتبه 1/5 رخ می‌دهد مطابقت دارد. همچنین در پژوهش حاضر روش حذف پیوستار با وجود اینکه دقت قابل قبولی در برآورد ویژگی‌های خاک به ویژه در مدل ANN نشان داده است، اما نسبت به مشتقات دقت کمتری داشته است. دلیل آن را می‌توان به بارز کردن ویژگی‌های جذبی و در نتیجه افزایش دقت برآورد نسبت داد (ناوار و همکاران، 2014 و اسکوس و همکاران، 2008). در پژوهشی دیگر ناوار و همکاران (2016) با روش‌های پیش‌پردازش حذف پیوستار، مشتق اول و مشتق دوم دقت قابل قبولی ($R^2>0/50$) را برای کربن آلی به دست آوردند. در صورتی که رابطه خطی بین خصوصیات خاک و طیف بازتابی غالب باشد مدل PLSR عملکرد بهتری دارد (راسل و بهرونز، 2010). اما هنگامی که رابطه غیرخطی حاکم باشد عملکرد مدل‌های غیرخطی در برآورد ویژگی‌های خاک بهتر است. در پژوهش حاضر و

نتایج پژوهش حاضر بالی و همکاران (2015) در محدوده 1900 نانومتر مطابقت دارد.

PLSR 17 طول موج کلیدی را از طریق آزمون همبستگی شناسایی کردند و بیان کردند که سه محدوده 1400، 1900 و 2200 همبستگی بالایی را با طیف خاک داشته‌اند.



شکل 9. نمودار همبستگی الگوی تغییرات بازتاب طیفی ناشی از تغییرات مقدار سرعت آستانه فرسایش خاک در طول موج‌های مختلف: طیف اصلی (ROW)، فیلتر ساویتری گولای، مشتق اول همراه با فیلتر ساویتری گولای (FD-SG)، مشتق دوم همراه با فیلتر ساویتری گولای (SD-SG)، واریانس نرمال استاندارد (SNV) و حذف پیوستار (CR)

کرد که می‌توان به انواعی از گروه‌های عاملی نسبت داد. میزان بازتاب خاک با توجه به نوع خاک و میزان تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت است. با افزایش مواد آلی کاهش بازتاب و با تا حدودی گچ میزان آن افزایش می‌یابد و در خاک‌هایی که میزان ماده آلی بیشتر از 2 را دارند می‌تواند نقش پوششی در مورد نشان دادن خصوصیات خاک از خود نشان دهند (استونر و بومگادرنر، 1981) که محدوده بروز این ویژگی‌ها در پژوهش‌های مختلف شناسایی شده است. در پژوهش استنبرگ (2010) محدوده‌های 1100، 1600، 1700 - 1800، 2000 و 2200 - 2400 نانومتر را به طول موج کلیدی کربن آلی خاک و نیتروژن کل نسبت دادند.

شناسایی ویژگی‌های خاک در روش طیف‌سنجی بر اساس کشش و ارتعاش گروه‌های عاملی آزاد و پیوندی خاک است. محدوده‌های فعال طیفی در طول موج‌های 460، 550 و 740 بر اثر کشش و ارتعاش گروه‌های عاملی C-H و N-H است (خویمی و جانسی، 2013). خصوصیات جذبی در طول موج‌های 1400، 1900 و 2200 نانومتر در اثر گروه‌های عاملی O-H آب آزاد است (شی و همکاران، 2014) و ناحیه طیفی 1900 و 2200 نانومتر به علت کشش و ارتعاش ناشی از گروه‌های عاملی Al-OH و Mg-OH است (وانگ و همکاران، 2014) در پژوهش حاضر نیز محدوده‌های 1400، 1900 و 2200 محدوده‌های فعال طیفی بروز پیدا

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش باهدف برآورد سرعت آستانه فرسایش با روش طیف‌سنجی در مناطق مستعد تولید گرد و غبار استان خوزستان انجام گرفت. طیف بازتابی خاک با روش SG ، $SD-SG$ ، $FD-SG$ ، SNV و CR پیش‌پردازش گردید و در ادامه با اجرای سه مدل رگرسیونی $PLSR$ ، SVR و $PLS-ANN$ ، سرعت آستانه فرسایش با استفاده از طیف‌های بازتابی برآورد گردید. نتایج نشان داد که سرعت آستانه فرسایش همبستگی معنی‌داری را با سدیم محلول و درصد جذب سدیمی خاک در سطح احتمال 5 درصد داشت و مناطق شور و سدیمی کمترین سرعت آستانه و بیش‌ترین حساسیت را نسبت به باد فرساینده نشان دادند. مدل ANN در روش مشتق دوم بهترین دقت برآورد و مدل SVR در طیف اصلی کمترین دقت برآورد را داشت که حاکی از غلبه رفتار غیرخطی بین ویژگی‌های خاک و بازتاب آن‌ها است. بر اساس نتایج مرحله مدل‌سازی، محدوده‌های 1850 و 1930 نانومتر به عنوان طول موج کلیدی سرعت آستانه فرسایش در منطقه مطالعاتی به دست آمد که در این محدوده مشابه با محدوده شوری و عناصر محلول در خاک است. این طول موج‌ها در شناسایی باندها و مطالعات سنجش از دور قابلیت استفاده دارد. استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی - مادون‌قرمز نزدیک، یک روش مفید برای تکمیل روش‌های تجزیه و تحلیل سنتی خاک و کاهش تعداد نمونه‌ها به ویژه کانون‌های تولید ریزگرد استان خوزستان که دارای وسعت زیاد هستند، خواهد بود.

کربنات‌ها جذب‌های متعددی به علت فراتون و هماوند پیوندهای CO_3 در محدوده 2335 و 2500 نانومتر و برخی جذب‌های ضعیف در محدوده‌های 2160، 1990 و 1870 نانومتر دارند (کلارک و همکاران، 1980). همچنین عوارض جذبی مشابهی در مورد گچ خالص در باندهای 1200، 1400-1600، 1750، 1945، 2100-2200 و 2400 توسط هاریسون (2012) گزارش شده است. همچنین شوری در صورتی که بلورهای سفید رنگ نمک در سطح خاک نمایان شود سبب افزایش بازتاب و اثر بر مدل‌سازی و طول موج کلیدی خواهد شد. خو و همکاران (2016) مشاهده کرد که طول موج‌های 540، 570، 1430، 1460، 1740، 1870، 1940، 2010، 2350 و 2410 نانومتر با شوری خاک همبستگی دارد و 4 طول موج 540، 1740، 2010 و 2350 نانومتر به شوری خاک حساسیت بیشتری دارند. همچنین با استفاده از روش پیش‌پردازش مشتق دوم طول موج‌های کلیدی را برای شوری در محدوده 440، 2270، 2010، 1900، 1870، 1740، 1430 و 1390 نانومتر شناسایی کردند. با افزایش غلظت نمک خاک ویژگی‌های جذبی در 1400 و 1900 نانومتر افزایش و در 1451 و 1952 کاهش می‌یابد. همچنین در طول موج‌های 1300، 1400 و 1900 نانومتر بازده کلی با افزایش غلظت نمک خاک افزایش می‌یابد (فریفته و همکاران، 2007) طول موج‌های کلیدی در پژوهش حاضر با نتایج این پژوهش‌ها تشابه دارد.

فهرست منابع:

1. چترنور، م.، لندی، ا.، فرخیان فیروزی، ا.، نوروژی، ع. ا. و بهرامی، ح. 1398. استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک در مدل‌سازی شوری خاک اراضی مستعد تولید ریزگرد استان خوزستان. تحقیقات آب و خاک ایران، 50(8)، 1962-1951.
2. چترنور، م.، لندی، ا.، فرخیان فیروزی، ا.، نوروژی، ع. ا. و بهرامی، ح. 1399. مدل‌سازی رفتار طیفی بافت خاک در کانون‌های ریزگرد استان خوزستان با استفاده از تصاویر ابر طیفی و مدل جنگل تصادفی. زمین شناسی کاربردی پیشرفته، 49(4)، 466-479.
3. چترنور، م.، لندی، ا.، فرخیان فیروزی، ا.، نوروژی، ع. ا. و بهرامی، ح. 1399. کاربرد طیف‌سنجی مرئی - مادون‌قرمز در کمی سازی میزان گچ خاک در کانون‌های مستعد تولید ریزگرد استان خوزستان. مجله تحقیقات کاربردی، 8(3)، 13-1.
4. چترنور، م.، لندی، ا.، فرخیان فیروزی، ا.، نوروژی، ع. ا. و بهرامی، ح. 1399. بررسی ویژگی‌های جذبی کربن آلی خاک با روش طیف سنجی آزمایشگاهی در مناطق مستعد تولید ریزگرد استان خوزستان. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، 10(10)، 81-65.

5. عظیم زاده، ح. ر. اختصاصی، م. م.، ر. حاتمی، م. اخوان قالیباف، م. 1381. مطالعه تأثیرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در شاخص فرسایش پذیری بادی خاک و ارائه مدل جهت پیشگویی آن در دشت یزد- اردکان سال نهم شماره اول.
6. محمود آبادی، م.، دهقانی، ف. و عظیم‌زاده، ح. ر. 1390. مطالعه اثر توزیع اندازه ذرات خاک بر شدت فرسایش بادی. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. 1(1): 81-98.
7. محمود آبادی، م. و زمانی، س. 1391. بررسی تأثیر سرعت باد و توزیع اندازه ذرات خاک بر مکانیسم‌های حمل رسوب ناشی از فرسایش بادی. مهندسی و مدیریت آبخیز. 4(3): 141-151.
8. مهربانی، ش.، سلطانی، س.، و جعفری، ر. 1394. بررسی رابطه بین پارامترهای اقلیمی و وقوع ریزگردها (مطالعه موردی: استان خوزستان). علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، 19(71).
9. نوروزی، ع. ا. 1395. ارزیابی و مقایسه عملکرد روش های آشکار سازی در شناسایی پهنه های فرسایش بادی با استفاده از تصاویر لندست 8، مرکز و شمال غرب استان خوزستان. مجله پژوهش های فرسایش محیطی. جلد 7. شماره 1. ص: 89-104.
10. Azimzadeh, H. R. Ekhtesasi, M.R., Hatami, H., Akhavan. M., 2002. Wind erosion: erodibility relation to soil physical and chemical properties in Iran central plain (Yazd-Ardakan plain - case study). Iran. Journal of Agric. Sci. Natur. Resour.
11. Bashour, I.I. and Sayegh, A.H. 2007. *Methods of analysis for soils of arid and semi-arid regions*: FAO.
12. Belnap, J., Phillips, S.L., Herrick, J. and Johansen, J. 2007. Wind erodibility of soils at Fort Irwin, California (Mojave Desert), USA, before and after trampling disturbance: implications for land management. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32 (1): 78-84
13. Breshears, D.D., Whicker, J.J., Johansen, M.P. and Pinder, J.E. 2003. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: Quantifying dominance of horizontal wind-driven transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(11): 1189-1209.
14. Caudill, M. (1987). Neural networks primer, part I. *AI expert*, 2(12): 46-52
15. Chang, C.-W., Laird, D.A., Mausbach, M.J. and Hurburgh, C.R. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65 (2) 480-490
16. 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
17. Colazo, J.C. and Buschiazzo, D.E. 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159 (1): 228-236
18. Cornelis, W.M., Gabriels, D. and Hartmann, R. 2004. A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 68 (4): 1154-1161.
19. Curcio, D., Ciralo, G., D'Asaro, F. and Minacapilli, M. 2013. Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. *Procedia Environmental Sciences*, 19: 494-503.
20. Dardenne, P., Sinnaeve, G. and Baeten, V. 2000. Multivariate calibration and chemometrics for near infrared spectroscopy: which method? *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 8(4): 229-237.
21. Demuth, H. and Beale, M. 1998. Neural network toolbox: For use with MATLAB, Natick, MA: The Math Works. Inc.. *OpenURL*.

22. Dong, Z., Liu, X. and Wang, X. 2002. Wind initiation thresholds of the moistened sands. *Geophysical Research Letters*, 29. (12)
23. Dotto, A.C., Dalmolin, R.S.D., Pedron, F.d.A., Caten, A.t. and Ruiz, L.F.C. 2014. Digital mapping of soil properties: particle size and soil organic matter by diffuse reflectance spectroscopy. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38 (6): 1663-1671.
24. Farifteh, J., Van der Meer, F., Atzberger, C. and Carranza, E. 2007. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). *Remote Sensing of Environment*, 110 (1): 59-78.
25. Fearn, T., Riccioli, C., Garrido-Varo, A. and Guerrero-Ginel, J.E. 2009. On the geometry of SNV and MSC. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 96 (1): 22-26.
26. Fister, W. and Ries, J.B. 2009. Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel. *Journal of Arid Environments*, 73 (11) (1004-996)
27. Harrison, T.N. 2012. Experimental VNIR reflectance spectroscopy of gypsum dehydration: Investigating the gypsum to bassanite transition. *American Mineralogist*, 97(4): 598-609.
28. Ji, W., Adamchuk, V.I., Biswas, A., Dhawale, N.M., Sudarsan, B., Zhang, Y., Rossel, R.A.V. and Shi, Z. 2016. Assessment of soil properties in situ using a prototype portable MIR spectrometer in two agricultural fields. *biosystems engineering*, 152: 14-27.
29. Li, J., Flagge, C., Okin, G.S., Painter, T.H., Dintwe, K. and Belnap, J. 2015. On the prediction of threshold friction velocity of wind erosion using soil reflectance spectroscopy. *Aeolian Research*, 19: 129- 136
30. Liu, B., Qu, J., Ning, D., Gao, Y., Zu, R. and An, Z. 2014. Grain-size study of aeolian sediments found east of Kumtagh Desert. *Aeolian Research*, 13: 1-6
31. Liu, L., Wang, J., Li, X., Liu, Y., Ta, W. and Peng, H. 1998. Determination of erodible particles on cultivated soils by wind tunnel simulation. *Chinese Science Bulletin*, 43(19): 1646-1651.
32. Mahmoudabadi. M., Zamani. S., 2012. Effect of wind speed and soil particle size distribution on sediment transport mechanisms due to wind erosion. *Iran Journal of Watershed Engineering and Management*, 6, 141-145.
33. Mahmoodabadi. M., Dehghani. F., Azimzadeh. H.R., 2011. Effect of soil particle size distribution on wind erosion rate. *Search Results. Electronic Iran journal of soil management and sustainable*. Page(s) 81 To 97.
34. Mohamed, E., Saleh, A., Belal, A. and Gad, A.A. 2018. Application of near-infrared reflectance for quantitative assessment of soil properties. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1): 1-14.
35. Morgan, R.P.C. 2009. *Soil erosion and conservation*: John Wiley & Sons.
36. Nawar, S., Buddenbaum, H., Hill, J. and Kozak, J. (2014). Modeling and mapping of soil salinity with reflectance spectroscopy and landsat data using two quantitative methods (PLSR and MARS). *Remote Sensing*, 6(11): 10813-10834.
37. Nawar, S., Buddenbaum, H., Hill, J., Kozak, J. and Mouazen, A.M. 2016. Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Soil and Tillage Research*, 155: 510-522.

38. Nocita, M., Stevens, A., Toth, G., Panagos, P., van Wesemael, B. and Montanarella, L. 2014. Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 68: 337-347.
39. Pu, R., Ge, S., Kelly, N. and Gong, P. 2003. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 24(9): 1799-1810.
40. Reeves III, J., McCarty, G. and Mimmo, T. 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental pollution*, 116: S277-S284.
41. Rinnan, Å., Van Den Berg, F. and Engelsen, S.B. 2009. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28(10): 1201-1222.
42. Rossel, R.V. and Behrens, T. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158(1-2): 45-54.
43. Rossel, R.V., Cattle, S.R., Ortega, A. and Fouad, Y. 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 150(3-4): 253-266
44. Savitzky, A. and Golay, M.J. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627-1639
45. Seidel, M., Hutengs, C., Ludwig, B., Thiele-Bruhn, S. and Vohland, M. 2019. Strategies for the efficient estimation of soil organic carbon at the field scale with vis-NIR spectroscopy: Spectral libraries and spiking vs. local calibrations. *Geoderma*, 354: 113856.
46. Shao, Y. and Lu, H. 2000. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D17): 22437-22443.
47. Sjöström, M., Wold, S., Lindberg, W., Persson, J.-Å. and Martens, H. 1986. A multivariate calibration problem in analytical chemistry solved by partial least-squares models in latent variables. *Analytica Chimica Acta*, 150: 61-70.
48. Smola, A.J. and Schölkopf, B. 2004. A tutorial on support vector regression. *Statistics and computing*, 14(3): 199-222.
49. 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(1): 15-22.
50. Stoner, E.R. and Baumgardner, M. 1981. Characteristic Variations in Reflectance of Surface Soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6): 1161-1165
51. Suter-Burri, K., Gromke, C., Leonard, K.C. and Graf, F. 2013. Spatial patterns of aeolian sediment deposition in vegetation canopies: Observations from wind tunnel experiments using colored sand. *Aeolian Research*, 8: 65-73.
52. Tan, L., Zhang, W., Liu, B., An, Z. and Li, J. 2013. Simulation of wind velocity reduction effect of gravel beds in a mobile wind tunnel atop the Mogao Grottoes of Dunhuang, China. *Engineering Geology*, 159: 67-75.
53. Vapnik, V. and Vapnik, V. 1998. Statistical learning theory Wiley. *New York*: 156-160.
54. Vasques, G., Grunwald, S. and Sickman, J. 2008. Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. *Geoderma*, 146(1-2): 14-25.
55. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for

- determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
56. Wang, J., Ding, J., Abulimiti, A. and Cai, L. 2018. Quantitative estimation of soil salinity by means of different modeling methods and visible-near infrared (VIS-NIR) spectroscopy, Ebinur Lake Wetland, Northwest China. *PeerJ*, 6: e4703.
 57. Wang, J., Li, Z., Qin, X., Yang, X., Gao, Z. and Qin, Q. 2014. *Hyperspectral predicting model of soil salinity in Tianjin coastal area using partial least square regression*. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International.
 58. Xu, C., Zeng, W., Huang, J., Wu, J. and van Leeuwen, W. 2016. Prediction of soil moisture content and soil salt concentration from hyperspectral laboratory and field data. *Remote Sensing*, 8(1): 42.
 59. Zeng, W., Zhang, D., Fang, Y., Wu, J. and Huang, J. 2018. Comparison of partial least square regression, support vector machine, and deep-learning techniques for estimating soil salinity from hyperspectral data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(2): 022204.
 60. Zhu, B.-Q., Yu, J.-J., Rioual, P. and Ren, X.-Z. 2014. Particle size variation of aeolian dune deposits in the lower reaches of the Heihe River basin, China. *Sedimentary Geology*, 301: 54-69.
 61. Zobeck, T. and Van Pelt, R. (2015). Wind erosion. Publications from USDA-ARS/UNL Faculty. Paper 1409.
 62. Zobeck, T.M. 1991. Soil properties affecting wind erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(2): 112-118.
 63. Zobeck, T.M., Sterk, G., Funk, R., Rajot, J.L., Stout, J.E. and Van Pelt, R.S. 2003. Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(11): 1136-188.

Estimation of Wind Erosion Threshold Friction Velocity in Areas Prone to Dust Production by Spectroscopy in Khuzestan

M. Chatrenour, A. Landi¹, A. A. Noroozi, and H. A Bahrami

PhD Graduate, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; E-mail: m.chatrenor@gmail.com

Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, and Dust Research Center, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; E-mail: landi@scu.ac.ir

Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran; E-mail: noroozi.aa@gmail.com

Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; E-mail: bahramih@modares.ac.ir

Received: October, 2020 and Accepted: March, 2021

Abstract

Threshold friction speed is an important factor for assessing the soil erodibility, but its measurement is time consuming and costly. Estimating threshold friction velocity by use of soil reflectance increases operating speed and reduces cost. The aim of this study was to compare the efficiency and accuracy of partial least squares regression (PLSR), support vector regression (SVR) and artificial neural network (ANN) regression models in estimating the threshold friction velocity in dust-prone areas of Khuzestan Province. For this purpose, 91 soil samples were collected from the central and southern parts of dust-prone areas of the province and the threshold friction velocity was determined using wind tunnels. Then, the reflectance spectra of soil samples were obtained with a spectrometer. Pre-processing methods were performed on the main spectrum and modeling was performed using PLSR, SVR and ANN models. The results showed that the threshold friction velocity in the region was 9.7 m/s and the minimum was 5.25 m/s. Also, the threshold friction velocity was significantly ($p < 0.05$) correlated with dissolved sodium ($r = -0.58$) and sodium adsorption ratio ($R = -0.48$). The ANN model had the best estimation accuracy in the second derivative preprocessing ($PRD = 2.52$) and the SVR model had the lowest estimation accuracy in the main spectrum ($PRD = 0.56$). Finally, the key wavelength of the threshold friction velocity was in the range of 1850 and 1930 nm. Because of the soil reflectance correlation with threshold friction velocity ($r = 0.76$), the spectroscopy method can be used to assess the soil erodibility in areas prone to dust production.

Keywords: Erodibility, Key Wavelength, Preprocessing, Support Vector Machine

¹ Corresponding author: Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.