

تعیین فرسایش پذیری بادی در بخشی از اراضی شرق دریاچه ارومیه و بررسی ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بیژن راعی^{۱*}، عباس احمدی^۲، محمدرضا نیشابوری^۳، محمدعلی قربانی^۴، فرخ اسدزاده^۵

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷)

چکیده

در سال‌های اخیر، بخش زیادی از عرصه آبی دریاچه ارومیه خشک و بستری از رسوبات ریزدانه شور در سطح زمین به وجود آمده که بسیار مستعد فرسایش بادی می‌باشند. این پژوهش به منظور بررسی فرسایش پذیری بادی و رابطه آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در بخشی از اراضی شرق دریاچه ارومیه انجام شد. در مجموع ۹۶ نمونه خاک از منطقه‌ای با مساحت ۴۱۴۰۰۰ هکتار از عمق ۵ سانتی‌متری خاک با استفاده از روش تصادفی نظارت شده جمع‌آوری گردید. فرسایش پذیری بادی نمونه‌ها با استفاده از تونل بادی تحت پنج سرعت باد مختلف (۹/۵، ۱۱، ۱۲/۵، ۱۴/۱ و ۱۵ متر بر ثانیه) تعیین و در نهایت رابطه آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرسایش پذیری بادی در خاک‌های منطقه در محدوده ۰/۷۶-۴۹/۹۸ $(m s^{-1})/(gr m^{-2} min^{-1})$ متغیر بوده و با میانگین ۱۰/۲۱ و ضریب تغییرات ۹۴/۵ درصد از دامنه‌ی تغییرات نسبتاً بالایی در منطقه برخوردار است. فرسایش پذیری بادی با ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها از جمله میانگین اندازه قطر خاکدانه‌ها، فراوانی ذرات ثانویه ۲-۴/۷۵، ۲-۱/۷ و ۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر ارتباط معنی‌دار دارد ($p < 0/001$). نتایج نشان داد که در مقایسه با تمامی ویژگی‌های خاک‌ها، فراوانی جزء فرسایش پذیر (خاکدانه‌های کوچکتر از ۰/۸۵ میلی‌متر) دارای مناسب‌ترین ارتباط با $(R^2 = 0/755, p < 0/001)$ با فرسایش پذیری خاک‌ها بوده و با افزایش این جزء، مقدار فرسایش پذیری به شکل نمایی افزایش می‌یابد. این شاخص با توجه به سادگی و سهولت تعیین آن، می‌تواند به عنوان بخشی از عامل خاک در مدل‌های رایج پیش‌بینی فرسایش بادی از قبیل WEQ و RWEQ در منطقه مورد استفاده قرار گرفته و باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان برای تخمین فرسایش پذیری خاک‌ها گردد.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، جزء فرسایش پذیر، روش تصادفی نظارت شده، فرسایش بادی

راعی ب.، احمدی ع.، نیشابوری م.ر.، قربانی م.ع.، اسدزاده ف. ۱۳۹۹. تعیین فرسایش پذیری بادی در بخشی از اراضی شرق دریاچه ارومیه و بررسی ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۲. صفحه: ۸۲-۹۸.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز (مکاتبه کننده)

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۵- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

* پست الکترونیک: bijanraei@yahoo.com

مقدمه

فرسایش بادی یکی از مشکلات اصلی در نواحی خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که دارای پیامدهای مخرب زیست محیطی فراوانی است (Zamani & Mahmoodabadi, 2013). فرسایش بادی توسط اثرات متقابل پیچیده بین اقلیم، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی کنترل می‌شود (Baas, 2007). گسترش مدل‌های مختلف به منظور نمایش این روابط پیچیده و اثرات متقابل آن‌ها، هسته مرکزی تکامل فهم ما از فرآیندهای فرسایش بادی در مقیاس‌های زمانی و مکانی می‌باشد (Raupach & Lu, 2004). در طول ۵۰ سال گذشته مدل‌های زیادی برای ارزیابی خطر فرسایش بادی به منظور تعیین کمیت هدر رفت خاک و انتشار گرد و غبار گسترش یافته‌اند (Zobeck *et al.*, 2003). تمامی این مدل‌ها به اجزایی نیاز دارند که حساسیت اراضی نسبت به فرسایش بادی را نشان دهد (Webb *et al.*, 2009). بنابراین فرسایش‌پذیری یکی از پارامترهای اساسی در مدل‌سازی فرسایش بادی می‌باشد. فرسایش‌پذیری شاخصی است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری خاک در مقابل نیروی فرساینده باد می‌باشد (Chepil, 1942) و در واقع یک اندازه‌گیری از پتانسیل هدررفت خاک از یک سطح بدون سله، بدون پناه، صاف، لخت و وسیع است (Mandakh *et al.*, 2016). تحت یک شرایط آب و هوایی معین، فرسایش‌پذیری یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده فرسایش بادی می‌باشد و حساسیت اراضی نسبت به فرسایش بادی به میزان زیادی به تغییرات در فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه وابسته است (Hassan & Mustafa, 2011). از این رو موفقیت در اجرای مدل‌های فرسایش بادی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر دقت این مدل‌ها در نمایش فرسایش‌پذیری بادی خاک می‌باشد و در نتیجه نیاز به روش‌های مناسب و دقیق برای ارزیابی و مدل‌سازی فرسایش‌پذیری بادی خاک همواره وجود دارد (Webb & Strong, 2011).

فرسایش‌پذیری یک مفهوم پیچیده می‌باشد که عوامل زیادی از قبیل ویژگی‌های خاک، موقعیت توپوگرافی، میزان شیب، مدیریت خاک و فعالیت‌های انسانی بر آن اثرگذار است (Song *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007). مطالعاتی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته، حاکی

از آن است که فرسایش‌پذیری به‌طور ویژه تحت تاثیر ویژگی‌های خاک از قبیل توزیع اندازه ذرات، پایداری ساختمان، میزان مواد آلی، نوع رس‌های معدنی و ترکیبات شیمیایی سازنده می‌باشد (Black & Chanasyk, 1989; Mustafa & Medani, 2004). بر اساس تحقیقات نگیسی و همکاران (Négyesi *et al.*, 2016) اندازه و پایداری خاکدانه‌های خاک از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش‌پذیری بادی می‌باشند. پاستور و همکاران (Pasztor *et al.*, 2016) نیز از بافت خاک به‌عنوان یک عامل بسیار مهم و موثر بر فرسایش‌پذیری بادی خاک عنوان نمودند. بر اساس یافته‌های کولازو و بوچیازو (Colazo & Buschiazzo, 2010) خاک‌های شنی به‌طور ذاتی فرسایش‌پذیرتر از خاک‌های ریزبافت هستند زیرا با توجه به مقدار کم سیلت و رس در این خاک‌ها آن‌ها از توانایی تشکیل سله فیزیکی و یا تشکیل خاکدانه برخوردار نمی‌باشند. محمودآبادی و حیدرپور (Mahmoodabadi & Heidarpour, 2014) کربن آلی خاک را به‌عنوان یک جزء بسیار مهم خاک معرفی نمودند که از طریق تأثیر بر تشکیل خاکدانه‌ها می‌تواند موجب کاهش فرسایش‌پذیری بادی خاک شود. پیچیدگی بیان فرسایش‌پذیری خاک در مدل‌های فرسایش بادی زاینده این حقیقت است که فرسایش‌پذیری بادی خاک در محیط‌های مختلف به واسطه‌ی فاکتورهای متنوعی کنترل شده و شدت تأثیرگذاری این فاکتورها در طول زمان و مکان نیز دائماً تغییر می‌کند (Zobeck, 1991). بنابراین تعیین مناطق مستعد به فرسایش بادی و راه‌کارهای کنترل و جلوگیری از فرسایش بادی در یک منطقه، زمانی موثرتر خواهد بود که اطلاعات کافی در خصوص عوامل موثر بر فرسایش‌پذیری بادی در دسترس باشد.

دریاچه ارومیه با وسعتی در حدود ۲۳۸۸ کیلومتر مربع، بزرگترین آب‌گیر فلات ایران می‌باشد که در حال حاضر گستره و ارتفاع آب در آن به پائین‌ترین حد خود رسیده است به‌گونه‌ای که در مقایسه با سال ۱۳۸۱ حدود ۴ متر کاهش یافته است (Dastranj *et al.*, 2018). در طول دو دهه اخیر، بحران خشک شدن دریاچه ارومیه سبب بروز مشکلات زیست محیطی متعددی شده است که این مشکلات با تشدید خشک شدن دریاچه در سال‌های اخیر بسیار چشم‌گیر شده و موجب بروز

واحدهای همگن تعیین و سپس با توجه به مساحت واحدهای همگن به هر واحد به صورت تصادفی تعدادی نمونه اختصاص داده شد. مزیت این روش از نمونه برداری نسبت به روش نمونه برداری تصادفی، توزیع متناسب نمونه‌ها در منطقه با در نظر گرفتن اطلاعات اولیه تغییرات مکانی ویژگی‌های تعیین کننده ویژگی‌های خاک از قبیل پوشش گیاهی و شیب منطقه می‌باشد (Crepin & Johnson, 1993). نمونه برداری از منطقه در خرداد ماه ۱۳۹۶ انجام و نمونه‌های خاک با مراجعه به محل جغرافیایی نقاط تعیین شده، با استفاده از یک بیل چهارگوش از سطح خاک تا عمق ۵ سانتی متری خاک جمع‌آوری شدند (Hassan & Mustafa, 2011; Fryrear et al., 1994; Lopez et al., 2007). نمونه‌های جمع‌آوری شده از منطقه پس از انتقال به آزمایشگاه، هواخشک شده و از الک ۸ میلی متری عبور داده شدند. برای هر نقطه حدود ۲۰ کیلوگرم از نمونه خاک برای اندازه‌گیری فرسایش پذیری بادی در تونل باد جداسازی گردید. تصاویر گلباد مربوط به چهار ایستگاه هواشناسی شهرهای تبریز، ایلخچی، شبستر و عجبشیر در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج گلبادها اغلب بادهای منطقه از سمت شمال غربی وزیده می‌شوند (با فراوانی ۱۵ الی ۴۰ درصد) و سرعت آن‌ها به طور میانگین در محدوده ۱۵ الی ۳۵ کیلومتر بر ساعت (در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین) می‌باشد.

بخشی از نمونه‌های خاک، از الک ۲ میلی متری عبور داده شده و به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از قبیل توزیع اندازه ذرات اولیه (درصد ذرات شن، سیلت، رس، شن خیلی ریز، شن ریز، شن متوسط، شن درشت و شن خیلی درشت که به ترتیب دارای اندازه ۲-۰/۰۵، ۰/۰۵-۰/۰۲، ۰/۰۲-۰/۰۰۵، ۰/۰۰۵-۰/۰۰۲، ۰/۰۰۲-۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱-۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۵-۰/۰۰۰۲۵، ۰/۰۰۰۲۵-۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۱-۰/۰۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۰۵-۰/۰۰۰۰۰۵ میلی متری می‌باشند) (Gee & Or, 2002)، جزء فرسایش پذیر خاک EF^2 ؛ که عبارت از درصد خاکدانه‌های کوچکتر از ۰/۸۵ میلی متر در خاک هواخشک است (Lopez et al., 2007)، توزیع اندازه ذرات ثانویه به روش الک خشک توسط سری الک‌های

خسارات زیست محیطی جبران ناپذیری در اطراف آن گردیده است. یکی از مهم‌ترین این مشکلات، بیرون آمدن بستر دریاچه از زیر آب می‌باشد به گونه ای که مساحت آبی دریاچه از ۵۳۶۶ کیلومتر مربع در سال ۱۳۵۵ به ۲۳۸۸ کیلومتر مربع در سال ۱۳۹۶ رسیده است (Dastranj et al., 2018)، که با توجه به مستعد بودن بسیاری از نقاط بستر خشک شده‌ی دریاچه به فرسایش بادی، شناسایی این نقاط و مطالعات علمی در بررسی و کنترل فرسایش بادی ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین این مطالعه با هدف بررسی رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با فرسایش پذیری بادی در اراضی شرق دریاچه ارومیه انجام شده و هدف از آن تعیین ویژگی‌هایی از خاک بوده است که از بیش‌ترین تأثیر در تعیین فرسایش پذیری منطقه مورد مطالعه برخوردار هستند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در بخش شرقی پیرامون دریاچه ارومیه و در محدوده‌ی جغرافیایی $26^{\circ} 45'$ تا $46^{\circ} 14'$ طول شرقی و $37^{\circ} 22'$ تا $38^{\circ} 20'$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱) این محدوده از غرب شهر تبریز و ایلخچی شروع شده و با امتداد تا ساحل شرقی دریاچه ارومیه، محدوده‌ی شهرستان‌های عجبشیر و آذرشهر در جنوب و شبستر و بندرشرفخانه در شمال را نیز شامل شده و مساحتی برابر با ۴۱۴۰۰۰ هکتار را در بر می‌گیرد. این منطقه براساس میانگین دمای $12/8$ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی $230/7$ میلی‌متر در سال با توجه به روش طبقه‌بندی آمبرژه^۱ دارای آب و هوای سرد و خشک بوده و یکی از مناطق مستعد فرسایش بادی به شمار می‌رود (Barzegar et al., 2015).

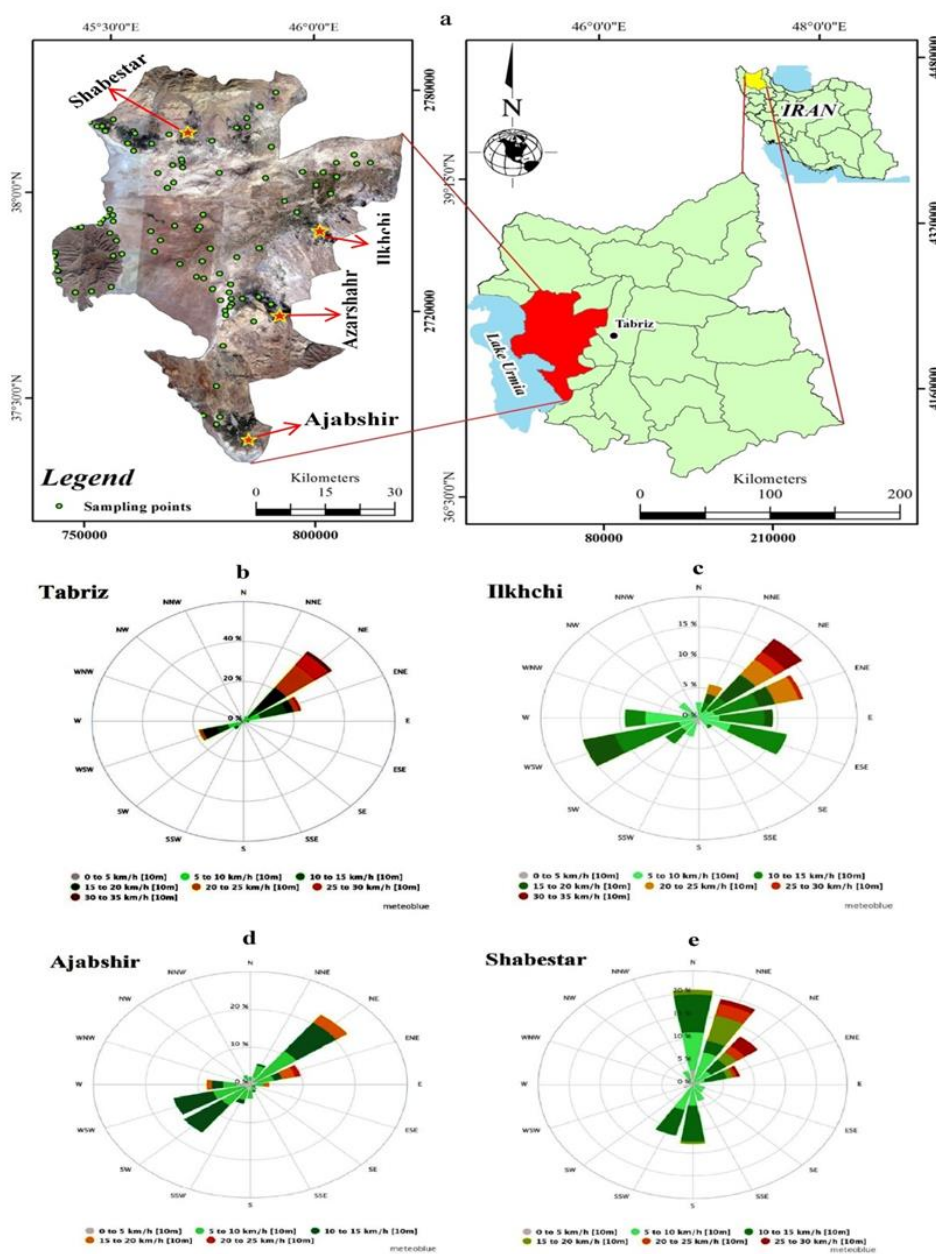
به منظور تعیین فرسایش پذیری بادی خاک‌های منطقه، ۹۶ نمونه خاک در محدوده‌ی مورد بررسی جمع‌آوری شد. الگوی پراکندگی نقاط نمونه برداری بر مبنای روش تصادفی نظارت شده تعیین شد (شکل ۱). در این روش ابتدا براساس نقشه‌های پایه شیب و کاربری اراضی

2. Erodible Fraction

1. Emberger climate method

قطر ذرات (Mean Weight Diameter) در حالت خشک (Nimmo & Perkins, 2002) و نسبت جذب سدیم با (Sodium Adsorption Ratio) (Sparks, 2003) با استفاده از روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین شدند.

۲-۷۵۰۴ و ۱/۲-۷، ۱-۱/۷، ۰/۱-۸۵، ۰/۰-۵/۸۵ میلی‌متری (Kemper & Rosenau, 1986)، کربن آلی با استفاده از روش والکلی-بلاک (Nelson & Sommers,)، کربنات کلسیم معادل (Nelson, 1982)، هدایت الکتریکی (Sparks & Bartlet, 1996)، میانگین وزنی



شکل ۱- (a) محدوده‌ی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری؛ (b, c, d, e) گلباد ایستگاه‌های موجود در محدوده‌ی مطالعاتی مربوط به شهرهای تبریز، ایلخچی، عجبشیر و شبستر

Figure 1. a) Sampling points and location of the study area; b,c,d and e) Wind Rose of Weather Sites of Tabriz, Ilkhchi, Ajabshir and Shabestar.

تعیین فرسایش‌پذیری بادی خاک در تونل باد

در این مطالعه آزمایش‌های مربوط به تعیین فرسایش‌پذیری بادی نمونه‌های خاک با استفاده از یک دستگاه تونل بادی مدار باز صورت گرفت (شکل ۲). این تونل متشکل از سه قسمت شامل، بخش مولد باد که توانایی تولید حداکثر سرعتی معادل ۱۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از سطح را دارد (شامل موتور، پروانه‌های ایجاد باد، بخش تنظیم کننده سرعت باد)، دیفیوژر یا پخش کننده سرعت باد که در فاصله ۱۶۰ سانتی‌متری از قسمت مولد باد قرار گرفته و باعث ایجاد باد یکنواخت و پایدار می‌گردد؛ و در نهایت محفظه آزمایش است. محفظه آزمایش در این تونل شامل یک تونل با عرض ۵۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و طول ۳۷۰ سانتی‌متر است که سینی‌های آزمایش با ابعاد ۳۰×۴۰×۳ سانتی‌متر در این قسمت جای‌گذاری می‌گردند.

به‌منظور اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی، ابتدا نمونه‌های خاک در سینی آزمایش قرار گرفته و سطح آن‌ها به وسیله یک صفحه چوبی به آرامی و بدون ایجاد فشردگی، صاف گردید. پس از جای‌گذاری سینی آزمایش در تونل بادی، به‌منظور تعیین سرعت آستانه فرسایش ذرات، سرعت باد به تدریج و به آرامی تا جایی افزایش یافت که ذرات از منطقه آزمایش به صورت معنی‌دار شروع به حرکت نمایند. حرکت معنی‌دار ذرات در واقع به حرکتی گفته می‌شود که ذرات به طور یکنواخت و در زمان‌های متفاوت از نقاط مختلف سطح خاک در منطقه آزمایش شروع به حرکت نمایند (Lavelle and Mofjeld, 1987).

سرعت باد در تونل با استفاده از دستگاه سرعت سنج HOT-WIRE-1341 در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک اندازه‌گیری شد. پس از تعیین سرعت آستانه مربوط به هر نمونه خاک، به منظور اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی، هر نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در معرض ۵ سرعت مختلف (سرعت‌های ۹/۵، ۱۱، ۱۲/۵، ۱۴/۱ و ۱۵ متر بر ثانیه) که بالاتر از سرعت آستانه بادی مربوط به نمونه بوده است، قرار داده شده و شدت فرسایش خاک ($\text{gr m}^{-2} \text{min}^{-1}$) تحت هر یک از سرعت‌های باد محاسبه گردید. در نهایت فرسایش‌پذیری بادی هر نمونه از طریق محاسبه شیب خط نمودار شدت

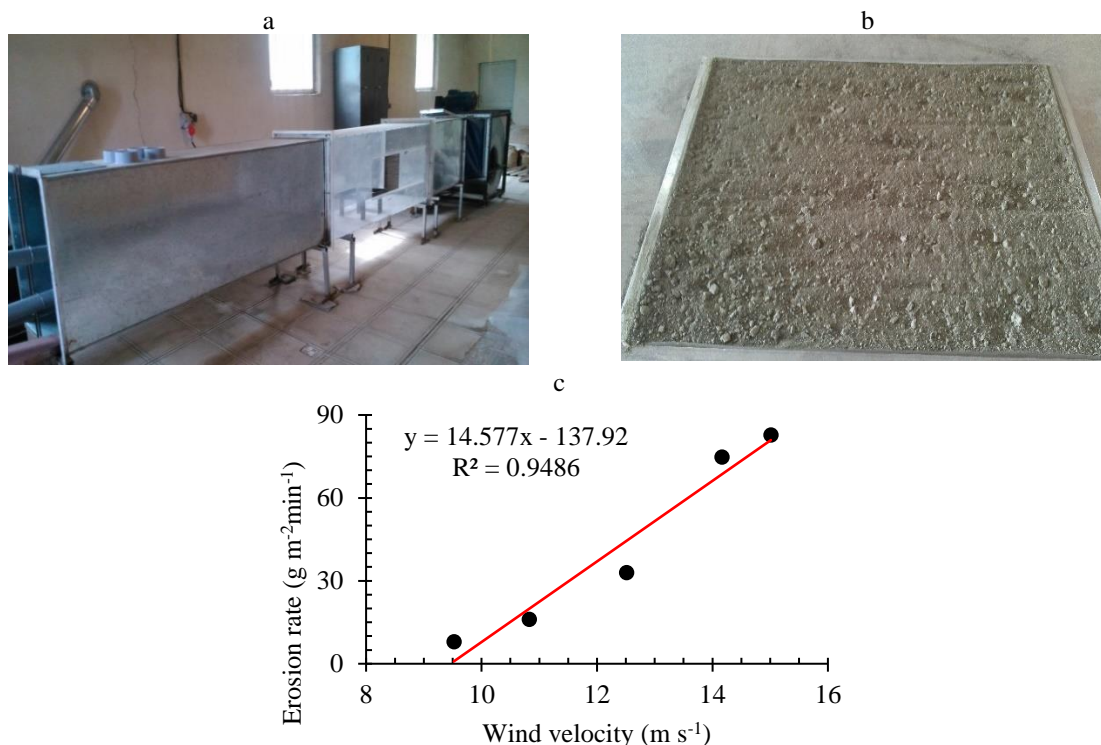
فرسایش در مقابل سرعت باد تعیین شد (شکل ۲) (Zamani & Mahmoodabadi, 2013). در مجموع برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری تمامی نمونه‌های خاک، ۴۸۰ آزمایش در تونل بادی انجام شد.

برای بررسی اثر بافت خاک بر فرسایش‌پذیری بادی در منطقه، نمونه‌های جمع‌آوری شده به سه گروه خاک‌های با بافت سبک (شامل کلاس‌های بافتی شنی، شنی لومی، لوم شنی)، خاک‌های با بافت متوسط (شامل کلاس‌های بافتی لوم، لوم سیلتی، سیلتی و لوم) و خاک‌های با بافت سنگین (شامل کلاس‌های بافتی رسی شنی، رسی سیلتی، لومی رسی، لوم رسی شنی و رسی) تقسیم‌بندی شد (Hillel, 2004) و اثر کلاس بافت خاک بر فرسایش‌پذیری مورد مقایسه آماری قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی اثر شوری بر فرسایش‌پذیری، نمونه‌های خاک بر اساس pH، EC و SAR به سه کلاس خاک‌های شور، خاک‌های شور و سدیمی و خاک‌های غیرشور و غیرسدیمی تقسیم شدند. در این پژوهش به منظور بررسی اثر کلاس بافت خاک و کلاس شوری خاک بر فرسایش‌پذیری بادی خاک، تجزیه واریانس بر مبنای طرح کاملاً تصادفی با داده‌های نامتعادل با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون توکی-کرامر انجام شد. به‌منظور بررسی شروط همگنی واریانس بین تیمارهای مختلف و نرمال بودن باقیمانده داده‌ها از آزمون‌های شاپیرو-ویلک^۱، کولموگوروف-اسمیرنوف^۲ و بارتلت^۳ استفاده شد. برای ترسیم کلیه نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

1- Shapiro-Wilk test

2- Kolmogorov-Smirnov test

3- Bartlett test



شکل ۲- a) تونل باد، b) نمونه خاک آماده شده در سینی آزمایش تونل باد، c) اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی به عنوان شیب خط رابطه بین شدت فرسایش بادی و سرعت باد

Figure 2. a) Prepared soil sample in test tray of wind tunnel, b) Wind Tunnel, b) Soil wind erodibility calculated as the line slope of wind velocity versus erosion rate for each point.

را دارا بودند. بررسی ارتباط مقادیر ذرات اولیه با مقدار فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد که محتوای شن، سیلت و رس خاک دارای رابطه معنی‌دار با مقدار فرسایش‌پذیری بود، به طوری که با افزایش مقدار شن در خاک‌ها فرسایش‌پذیری افزایش و با افزایش سیلت و رس مقدار فرسایش‌پذیری کاهش یافت. البته بایستی توجه نمود که فرسایش‌پذیری بادی و تأثیرپذیری آن از اندازه ذرات، فرآیند پیچیده‌ای بوده و نمی‌بایست انتظار داشت که تقسیم ذرات اولیه به سه بخش (شن، سیلت و رس) بتواند تمام تغییرات در فرسایش‌پذیری خاک‌ها را تبیین نماید. به نظر می‌رسد این امر حاکی از تأثیر غیرمستقیم ذرات اولیه بر فرسایش‌پذیری باشد (شکل ۳). به طوری که می‌توان عنوان نمود اثرگذاری اصلی بافت خاک بر فرسایش‌پذیری بادی در منطقه مورد مطالعه به صورت غیرمستقیم و از طریق تأثیر بر توزیع اندازه ذرات ثانویه بوده است، که این تأثیرگذاری ممکن است در تقابل با عوامل دیگر و اثرات متقابل آن‌ها تشدید و یا کاهش یابد.

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های خاک

توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اکثر ویژگی‌های مورد نظر از تغییرات بالایی در منطقه مورد مطالعه برخوردار است و این امر می‌تواند تضمین‌کننده انعکاس اثر تغییرات این ویژگی‌های خاک بر فرسایش‌پذیری بادی باشد. به‌منظور بررسی ارتباط فرسایش‌پذیری با ویژگی‌های خاک، در ادامه این ویژگی‌ها به دو گروه شیمیایی و فیزیکی خاک تقسیم شده و اثر آن‌ها بر فرسایش‌پذیری مورد تحلیل قرار گرفت.

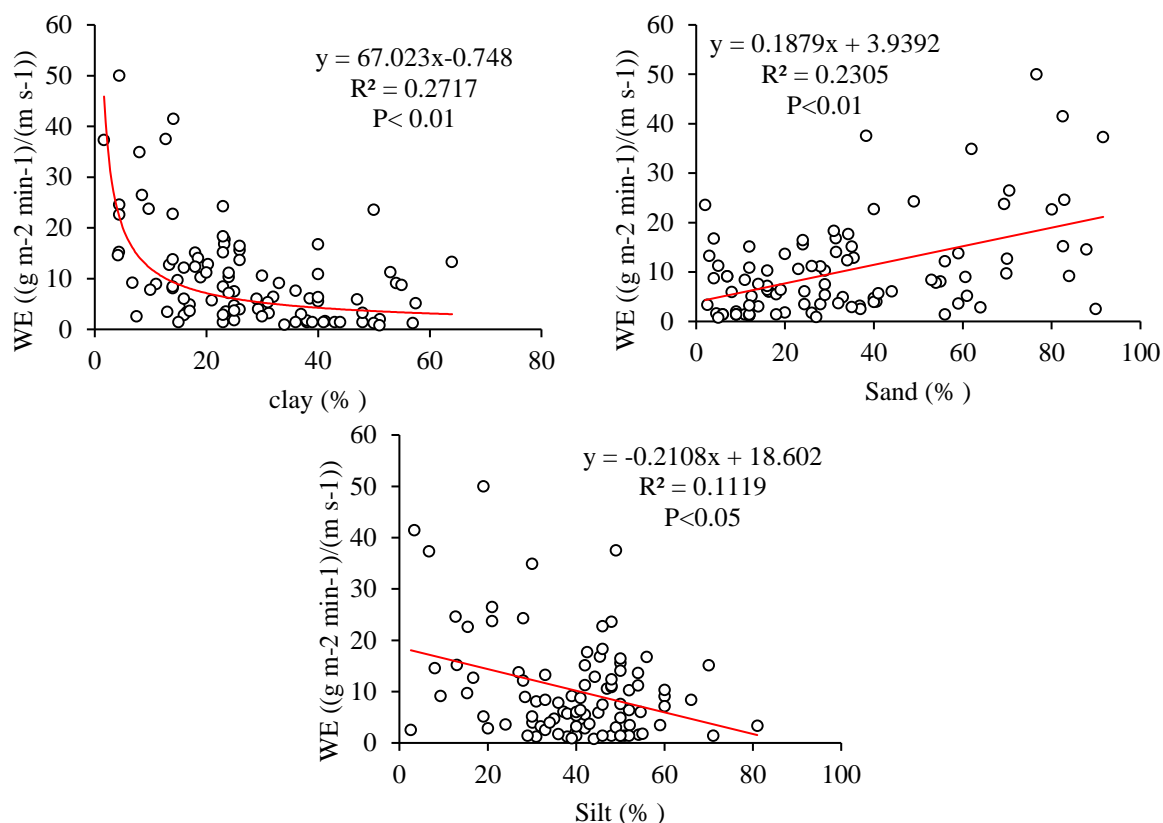
ویژگی‌های فیزیکی خاک

اثر کلاس بافت خاک بر فرسایش‌پذیری

رابطه بین ذرات اولیه رس، شن و سیلت خاک با فرسایش‌پذیری بادی نمونه‌های خاک در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج ذرات رس، شن و سیلت خاک به‌ترتیب توانایی تبیین ۲۷، ۲۳ و ۱۱ درصد از تغییرات فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک
Table 2. Descriptive statistics of soil physicochemical properties

Variable description	symbol	max	min	mean	Standard Deviation	CV (%)	
Wind erodibility ((gr m ⁻² min ⁻¹)/(m s ⁻¹))	WE	49.98	0.76	10.23	9.7	95	
Primary particles size distributions (%)	Clay	CL	64	1.66	26.78	14.68	55
	Silt	SI	81	2.6	39.67	15.39	39
	Sand	SA	91.61	2	33.53	24.78	74
	very fine sand	VFS	39.5	0.21	10.39	6.74	65
	fine sand	FS	35.5	0.18	9.01	8.96	99
	medium sand	MS	27.68	0.12	6.31	7.15	113
	coarse sand	CS	24.22	0	3.93	5.12	130
	very coarse sand	VCS	14.6	0	2.04	3.08	151
	Erodible fraction (%)	EF	90.93	16.41	53.53	17.03	32
	Secondary particles size distributions (%)	4.75-8.0 mm	SPS ₁	26.74	1	8.61	5.46
2-4.75 mm		SPS ₂	40.9	2.82	18.61	8.88	48
1.7-2.0 mm		SPS ₃	9.26	0.78	4.00	1.60	40
1-1.7 mm		SPS ₄	25.15	2.78	13.41	4.34	32
0.85-1.0 mm		SPS ₅	3.4	0.34	1.8	0.63	35
0.5-0.85 mm		SPS ₆	33.39	5.55	16.13	5.69	35
0.25-0.5 mm		SPS ₇	33.59	4.35	15.14	6.67	44
0.1-0.25 mm		SPS ₈	37.12	1.76	11.9	7.53	63
0.053-0.1 mm		SPS ₉	23.85	0.59	6.93	4.89	71
0-0.053 mm		SPS ₁₀	12.58	0.4	3.38	2.62	78
Organic carbon (%)	OC	4.38	0.097	0.97	0.73	75	
Equivalent calcium carbonate (%)	ECC	49	7.6	23.54	7.49	32	
EC saturated extract (ms m ⁻¹)	EC _{sa}	200	0.62	42.39	57.46	136	
EC 1:5 extract (ms m ⁻¹)	EC _{1:5}	53.8	0.09	6.97	10.74	154	
pH	pH	9.11	7.01	8.28	0.49	6	
Air dried soil moisture (%)	SM	7.3	0.59	2.73	1.66	61	
Ca ²⁺ (mmol l ⁻¹)	Ca	203	0.87	30.88	40.44	131	
Mg ²⁺ (mmol l ⁻¹)	Mg	245.83	0.87	42.94	61.76	144	
Na ⁺ (mmol l ⁻¹)	Na	3396.5	1.69	473.88	743.85	157	
Sodium Adsorption Ratio	SAR	631.62	0.42	43.3	77.86	180	
Bulk density (gr cm ⁻³)	Bd	1.74	0.85	1.33	0.17	13	
Mean Weight Diameter (mm)	MWD	2.27	0.41	1.23	0.40	32	



شکل ۳- رابطه درصد ذرات اولیه خاک با فرسایش‌پذیری بادی

Figure 3. The relationship between the percentage of primary soil particles and wind erodibility

پس از آن، در خاک‌های با بافت متوسط و سنگین به ترتیب فرسایش‌پذیری کاهش می‌یابد. میانگین مقادیر فرسایش‌پذیری برای این سه کلاس بافتی در نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب برابر با ۱۶/۱، ۸/۴۱ و ۳/۸۲ (gr $m^{-2} min^{-1}$)/(m s^{-1}) می‌باشد. بر این اساس می‌توان استنباط نمود که کلاس بافت خاک یکی از عوامل اثرگذار بر توزیع اندازه ذرات ثانویه خاک می‌باشد و با سنگین‌تر شدن بافت خاک، ذرات اولیه در نتیجه عوامل سیمانی گرد هم آمده و سبب تشکیل ذرات ثانویه می‌شوند که در نتیجه اندازه خاکدانه‌ها و کلوخه‌ها بزرگ‌تر شده و این امر منجر به ایجاد ذرات بزرگ‌تر و مقاوم به فرسایش بادی شده است و در نتیجه فرسایش-پذیری خاک کاهش یافته است.

بر اساس نتایج حسن و مصطفی (Hassan & Mustafa, 2011) نیز بافت خاک یکی از اثرگذارترین ویژگی‌های خاک بر فرسایش‌پذیری می‌باشد و در نتایج آن‌ها درصد ذرات رس همبستگی منفی بالایی با فرسایش‌پذیری خاک نشان داد. فریریر (Fryrear *et al.*, 1994) متوجه شد که با افزایش شن (در دامنه ۹۳/۶-۵/۵ درصد) و

به‌منظور بررسی این موضوع با توجه به پراکندگی و تنوع کلاس‌های بافت خاک در منطقه، خاک‌ها بر اساس کلاس بافت به سه دسته خاک‌های با بافت سبک (۱۹ نمونه)، خاک‌های با بافت متوسط (۳۴ نمونه) و خاک‌های با بافت سنگین (۳۸ نمونه) تقسیم و اثر کلاس بافت خاک بر فرسایش‌پذیری مورد مقایسه آماری قرار گرفت (شکل ۴). در این قسمت تعداد ۵ نمونه خاک (که دارای کلاس بافتی سبک بوده‌اند) به دلیل وجود سنگریزه فراوان و جلوگیری از ایجاد خطا از آنالیز آماری حذف گردیدند و همچنین شروط همگنی واریانس بین تیمارهای مختلف و نرمال بودن باقیمانده داده‌ها بررسی و پس از تبدیل لگاریتمی این شرایط حاصل گردید (shapiro-wilk=۰/۰۸۶، Bartlet test=۰/۲۰۶). خلاصه تجزیه واریانس اثر کلاس بافت خاک بر فرسایش‌پذیری بادی در جدول شماره ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج، اثر کلاس بافت خاک بر فرسایش‌پذیری بادی معنی‌دار است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، فرسایش‌پذیری خاک‌های با کلاس بافتی سبک بیش‌ترین مقدار بوده و

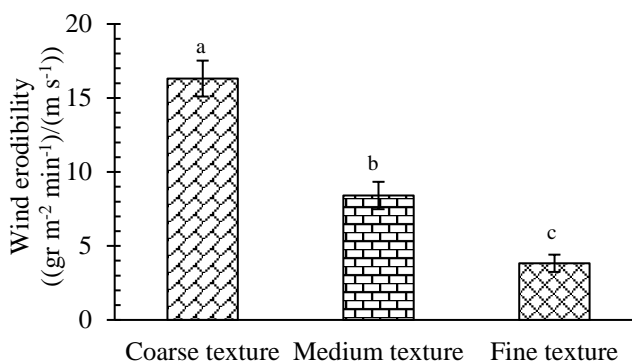
و افزایش درصد شن سبب افزایش فرسایش پذیری خاک می‌گردد. نهتانی و همکاران (Nohtani *et al.*, 2014) فرسایش پذیری خاک منطقه هورالعظیم خوزستان را بررسی نمودند و با توجه به فرسایش پذیری بالای آن منطقه، دلیل اصلی این امر را وجود فراوانی بالای خاک-هایی با بافت سبک اعلام نمودند.

سیلت (در دامنه ۰/۵-۷۰/۳ درصد) جزء فرسایش پذیر خاک (EF) نیز افزایش می‌یابد و خاک‌های با بافت درشت شنی تقریباً دو برابر خاک‌های ریزبافت رسی یا سیلتی جزء فرسایش پذیر دارند. نتایج تحقیقات ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2006) و نهتانی و همکاران (Nohtani *et al.*, 2014) نشان داد که کاهش درصد رس

جدول شماره ۲- خلاصه جدول تجزیه واریانس اثر کلاس بافت خاک بر فرسایش پذیری بادی خاک

Table 2. Summary of variance analysis of the effect of soil texture class on soil wind erodibility

Source	Df	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Treatment	2	5.38	2.69	20.39	<0.0001
Error	88	11.63	0.13		
Corrected Total	90	17.02			



شکل ۴- اثر کلاس بافت خاک بر میانگین فرسایش پذیری بادی خاک

Figure 4. The effect of soil texture on mean soil wind erodibility

ذرات در مقابل نیروی باد برای به حرکت درآمدن این ذرات می‌باشد. البته کلاس‌های اندازه‌های دیگر مانند ذرات ثانویه ۴/۷۵-۸، ۱-۱/۷ و ۰/۸۵-۱ میلی‌متری نیز جزو ذرات مقاوم در مقابل حرکت در اثر نیروی باد هستند اما با توجه به ضریب تبیین کم آن‌ها، از تأثیرگذاری کم‌تری در تعیین فرسایش پذیری خاک منطقه مورد مطالعه برخوردار بودند.

فراوانی ذرات ۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متری دارای رابطه خطی مستقیم ($R^2 = 0/66$ ، $p < 0/001$) با فرسایش پذیری بادی بوده و با افزایش مقدار این ذرات، فرسایش پذیری بادی نیز افزایش می‌یابد. فراوانی این ذرات در خاک‌های منطقه نیز نسبتاً بالا و در محدوده ۱/۷۶ تا ۳۷/۱۲ درصد متغیر بوده و مقدار میانگین و ضریب تغییرات این کلاس اندازه‌ی در نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۱۱/۹ و ۶۳ درصد می‌باشد. به نظر می‌رسد که اندازه این ذرات از یک سو نه آنقدر بزرگ است که بتوانند در مقابل سرعت جریان باد مقاومت کنند و نه آنقدر کوچک است

توزیع اندازه ذرات ثانویه

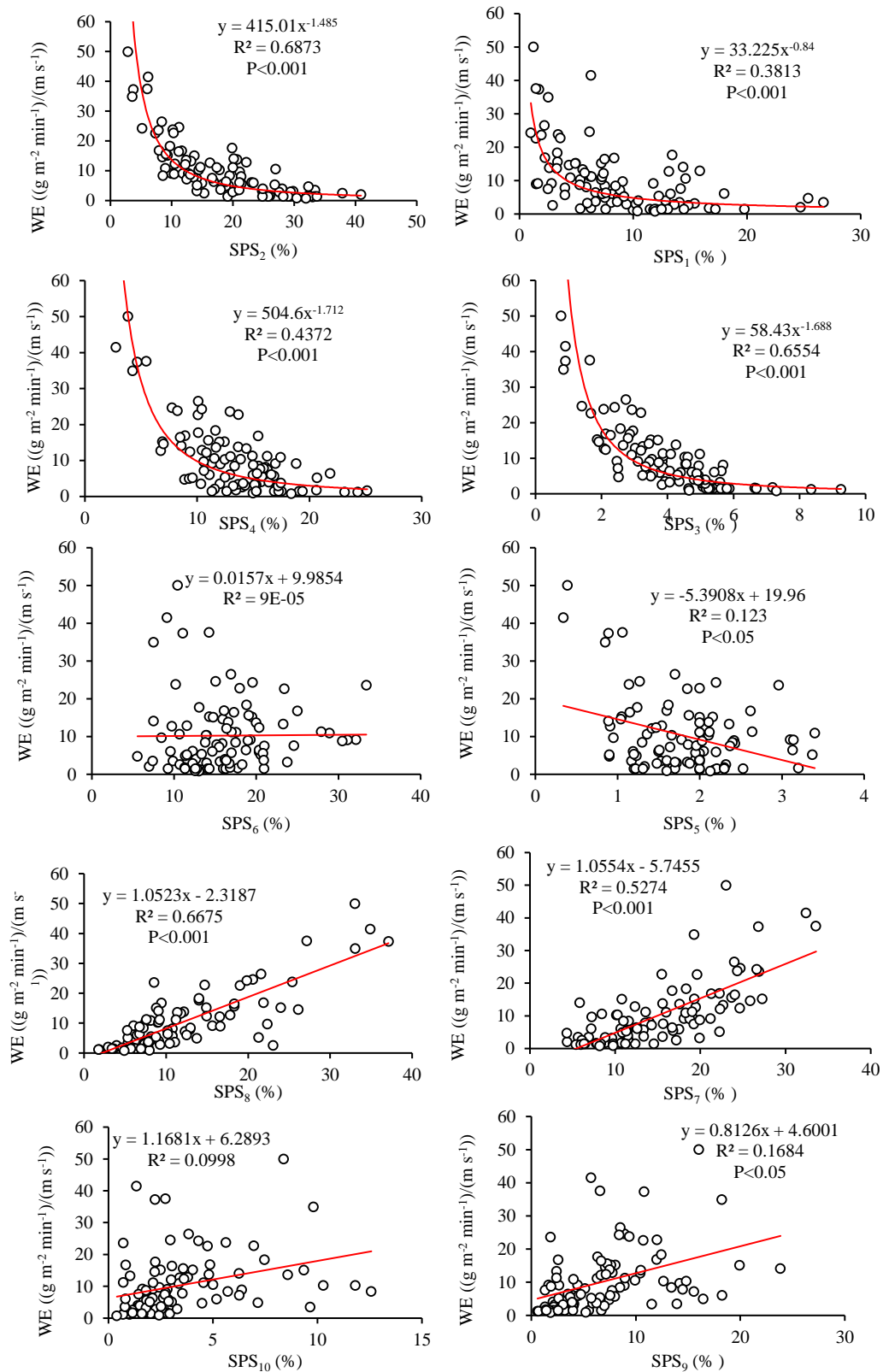
ارتباط بین فراوانی کلاس‌های مختلف اندازه‌ی ذرات ثانویه با فرسایش پذیری خاک در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ در بین کلاس‌های مختلف ذرات ثانویه، کلاس‌های اندازه‌ی ۲-۴/۷۵، ۲-۱/۷ و ۰/۲۵-۱ میلی‌متری رابطه قوی‌تری با فرسایش پذیری بادی خاک از خود نشان دادند، به گونه‌ای که این ذرات به ترتیب توانایی تبیین ۶۹، ۶۵ و ۶۷ درصد از تغییرات فرسایش پذیری بادی خاک‌های منطقه را دارا بودند ($p < 0/001$). در منطقه مورد مطالعه با افزایش مقدار ذرات ثانویه ۲-۴/۷۵ و ۲-۱/۷ میلی‌متری، مقدار فرسایش پذیری بادی خاک به شکل توانی کاهش یافته و در نمونه‌هایی که فراوانی ذرات با کلاس اندازه‌ی ۴/۷۵-۲ میلی‌متری به بیش از ۱۰ درصد و فراوانی ذرات ۲-۱/۷ میلی‌متری به بیش از ۲ درصد می‌رسد، فرسایش پذیری بادی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد دلیل این امر مقاومت بالای این

فرسایش بادی (از قبیل WEQ و RWEQ) به‌عنوان عامل فرسایش‌پذیری خاک به کار گرفته شده است. با توجه به نتایج این پژوهش نیز در مناطق وسیعی از اراضی شرق دریاچه ارومیه شاخص جزء فرسایش‌پذیر رابطه قوی با فرسایش‌پذیری داشته و می‌توان از جزء فرسایش‌پذیر به عنوان شاخصی برای نشان دادن حساسیت خاک در مقابل فرسایش بادی در این منطقه استفاده نمود.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (در حالت خشک) نیز رابطه بسیار مطلوبی ($R^2 = 0.74$, $p < 0.001$) با فرسایش‌پذیری بادی خاک‌ها نشان داد. با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، فرسایش‌پذیری بادی به صورت نمایی کاهش می‌یابد و به‌ویژه در خاک‌های با میانگین وزنی قطر بیش از یک میلی‌متر مقدار فرسایش‌پذیری به کم‌ترین حد خود می‌رسد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در واقع شاخصی از اندازه و همچنین مقاومت ذرات ثانویه خاک در مقابل تنش مکانیکی می‌باشد، از این رو افزایش مقدار کمی آن به نوعی بیانگر افزایش اندازه و مقاومت ذرات خاک بوده که فرسایش‌پذیری خاک را تحت تاثیر قرار داده و آن را کاهش می‌دهد (Zamani & Mahmoodabadi, 2012). میانگین، حداکثر و حداقل مقدار MWD خشک در نمونه‌های خاک به ترتیب برابر ۱/۲۳، ۲/۲۷ و ۰/۴۱ میلی‌متر بود و حداکثر مقدار فرسایش‌پذیری بادی اندازه‌گیری‌شده (۴۹/۹۸) در نمونه خاک با کم‌ترین مقدار MWD (۰/۴۱ میلی‌متر) مشاهده شد. از سوی دیگر در نمونه‌ی خاک با بیش‌ترین مقدار MWD (۲/۲۷ میلی‌متر) نیز مقدار فرسایش‌پذیری خاک اندک و برابر با ۲ بود که نشان می‌دهد افزایش ۵/۵ برابری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها سبب کاهش تقریباً ۲۵ برابری فرسایش‌پذیری بادی شده است. در این زمینه زمانی و محمودآبادی (Zamani & Mahmoodabadi, 2012) با بررسی فرسایش‌پذیری بادی در سه نوع خاک با MWDهای متفاوت نشان دادند که با افزایش مقدار MWD مقدار فرسایش‌پذیری بادی خاک کاهش یافت.

که بتوانند در جان‌پناه ذرات درشت‌تر قرار گیرند. از این رو این ذرات به راحتی توسط جریان باد منتقل می‌شوند و افزایش فراوانی آن‌ها در نمونه‌ای خاک سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار فرسایش‌پذیری خاک‌ها می‌گردد. میرزامصطفی و همکاران (Mirzamostafa *et al.*, 1998) محاسبات جداگانه‌ای برای تعیین اندازه ذرات مربوط به هر یک از فرآیندهای تعلیق و جهش در فرسایش بادی انجام دادند. آنان قطر کوچکتر از ۰/۱ میلی‌متر را به عنوان ذرات حساس به تعلیق و قطر بین ۰/۱-۱/۸۴ میلی‌متر را به عنوان قطر ذرات جهشی مشخص نمودند. نتایج مطالعه چاندلر و همکاران (Chandler *et al.*, 2005) نیز حاکی از این بود که فراوانی ذرات در محدوده‌های ۰/۴۲-۰/۸۴ و ۰/۱-۰/۸۴ میلی‌متری دارای ارتباط معنی‌داری با مقدار فرسایش اندازه‌گیری شده در تونل باد است.

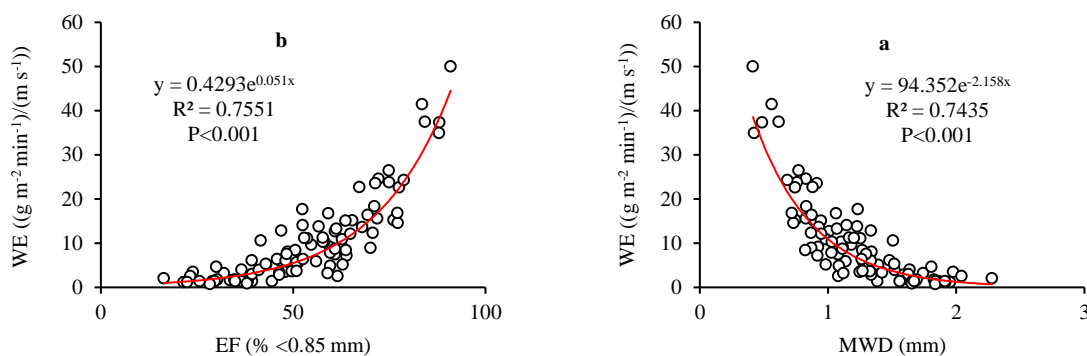
شاخص جزء فرسایش‌پذیر خاک نیز از رابطه بسیار خوبی با فرسایش‌پذیری بادی برخوردار بوده است و این شاخص توانایی تبیین ۷۵ درصد از تغییرات فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد مطالعه را دارا بود ($p < 0.001$) به طوری که با افزایش مقدار جزء فرسایش‌پذیر در خاک‌ها فرسایش‌پذیری بادی نیز به طور نمایی افزایش می‌یابد (شکل ۶). این شاخص در منطقه مورد مطالعه در دامنه ۱۶/۴۱ تا ۹۰/۹۳ درصد متغیر بوده و میانگین و ضریب تغییرات آن به ترتیب ۵۳/۵۳ و ۳۲ درصد می‌باشد. رابطه بین جزء فرسایش‌پذیر با مقدار فرسایش‌پذیری به روشنی نشان می‌دهد که در خاک‌هایی که مقدار این جزء به بیش از ۴۰ درصد می‌رسد، فرسایش‌پذیری بادی به سرعت تشدید می‌شود. شاخص جزء فرسایش‌پذیر یکی از پرکاربردترین شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی می‌باشد که اولین بار توسط چیپیل در سال ۱۹۵۰ معرفی شده است و پس از آن از این شاخص به طور وسیعی در مطالعات مربوط به فرسایش بادی استفاده می‌گردد (Fryrear *et al.*, 1994; Lopez *et al.*, 2007; Hassan & Mustafa, 2011; Rakkar *et al.*, 2019; Asensio *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). این شاخص در برخی از مدل‌های مربوط به



شکل ۵- رابطه کلاس‌های اندازه‌ای مختلف ذرات ثانویه خاک با فرسایش پذیری بادی خاک.

SPS₁, SPS₂, SPS₃, SPS₄, SPS₅, SPS₆, SPS₆, SPS₇, SPS₈, SPS₉ و SPS₁₀ به ترتیب کلاس‌های اندازه ای ۸-۴/۷۵، ۷-۲/۴، ۶-۴/۷۵، ۵-۲/۴، ۴-۱/۷، ۳-۱/۷، ۲-۱/۷، ۱-۰/۸۵، ۰/۸۵-۰/۵ میلی متری می‌باشند.

Figure 5. The relationship of secondary soil particle size classes with soil wind erodibility. SPS₁, SPS₂, SPS₃, SPS₄, SPS₅, SPS₆, SPS₆, SPS₇, SPS₈, SPS₉ and SPS₁₀ are size classes of 4.75-8, 2-4.75, 1.7-2, 1-1.7, 0.85-1, 0.5-0.85, 0.25-0.5, 0.1-0.25, 0.053-0.1 and 0-0.053 respectively.



شکل ۶- رابطه جزء فرسایش‌پذیر (a) و میانگین وزنی قطر (b) با فرسایش‌پذیری بادی

Figure 6. The relationship of erodible fraction (a) and mean weight diameter (b) with soil wind erodibility

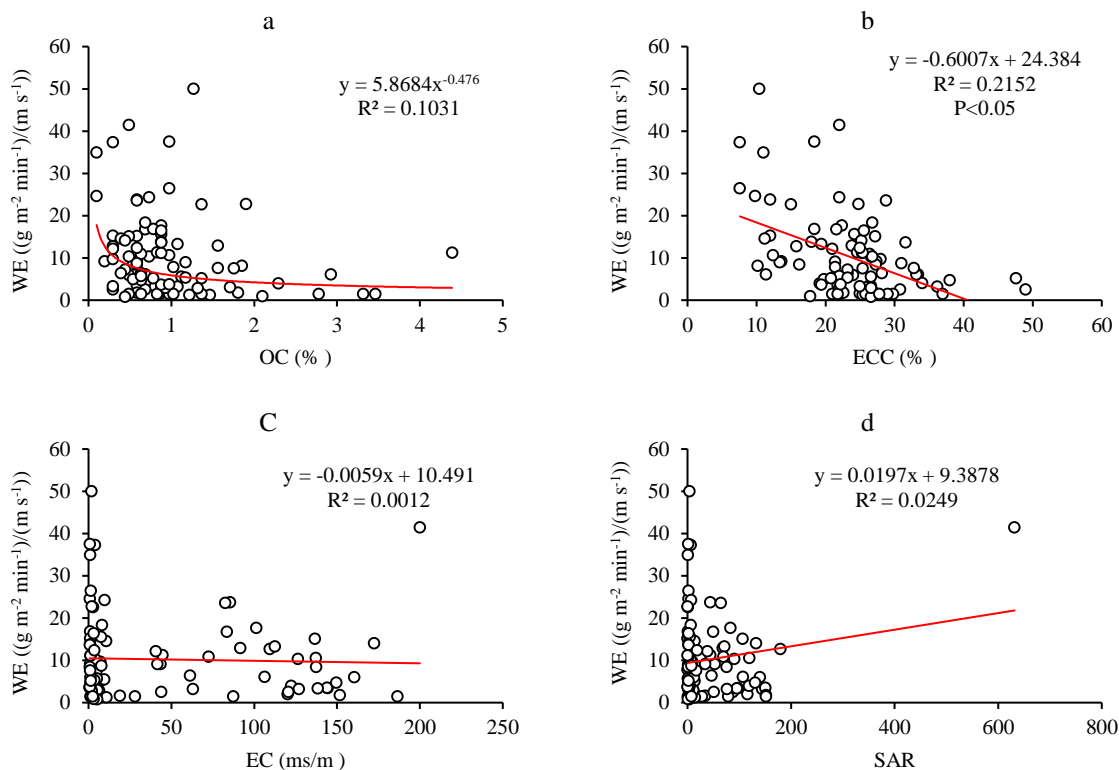
رابطه بین نسبت جذب سدیم و همچنین هدایت الکتریکی خاک با فرسایش‌پذیری در شکل ۷ (بخش c و d) نشان داده شده است. در مطالعه حاضر نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی خاک رابطه معنی‌داری با فرسایش‌پذیری بادی خاک نداشتند، به طوری که نسبت جذب سدیم تنها توانایی تبیین ۲ درصد از تغییرات فرسایش‌پذیری منطقه را دارا بود و هدایت الکتریکی نیز هیچ رابطه‌ای با فرسایش‌پذیری از خود نشان نداد.

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر شوری بر فرسایش‌پذیری، نمونه‌های خاک بر اساس pH، EC و SAR به سه کلاس خاک‌های سدیمی (۷ نمونه)، خاک‌های شور و سدیمی (۳۶ نمونه) و خاک‌های غیرشور و غیرسدیمی (۵۳ نمونه) تقسیم شدند. شروط همگنی واریانس بین تیمارهای مختلف و نرمال بودن باقیمانده داده‌ها بررسی و پس از تبدیل لگاریتمی این شرایط حاصل گردید (Bartlett test=۰/۵۸، Kolmogorov-Smirnov=۰/۱۲).

نتایج تجزیه واریانس اثر کلاس شوری خاک بر فرسایش‌پذیری بادی در جدول شماره ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج (شکل ۸)، شور و سدیمی بودن خاک اثر معنی‌داری بر فرسایش‌پذیری نداشت ولی با این حال به‌رغم معنی‌دار نبودن اختلاف، خاک‌های سدیمی از میانگین فرسایش‌پذیری کم‌تری نسبت به خاک‌های شور و سدیمی و خاک‌های غیرشور و غیرسدیمی (اسیدیته قلیایی) برخوردار بودند. به نظر می‌رسد که پتانسیل خاک‌های سدیمی در پراکنده نمودن خاکدانه‌ها و قابلیت تشکیل سله و ایجاد کلوخه‌هایی با سختی بیش‌تر از دلایل افزایش نسبی فرسایش‌پذیری در این خاک‌ها باشد.

ویژگی‌های شیمیایی خاک

به‌منظور بررسی ارتباط برخی از ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های خاک با فرسایش‌پذیری بادی، تغییرات مقدار نسبت جذب سدیم، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل در مقابل تغییرات مقدار فرسایش‌پذیری ترسیم شد (شکل ۷). براساس نتایج، ویژگی‌های شیمیایی در خاک‌های منطقه ارتباط چندانی معنی‌داری با فرسایش‌پذیری خاک ندارند. کربن آلی در خاک‌ها در محدوده ۰/۰۹ تا ۴/۳۸ درصد متغیر بوده و میانگین و ضریب تغییرات برای این ویژگی‌های ۰/۹۷ و ۷۵ درصد است. با توجه پراکندگی نسبتاً بالای کربن آلی انتظار بر این بود که اثر این ویژگی بر فرسایش‌پذیری منعکس گردد. با این حال کربن آلی تنها توانایی تبیین ۱۰ درصد از تغییرات فرسایش‌پذیری را دارا بود و رابطه بین کربن آلی و فرسایش‌پذیری ضعیف است. مقدار کربنات کلسیم معادل نیز از تغییرات و پراکندگی نسبتاً مناسبی برخوردار بوده و میانگین، حداکثر و حداقل مقدار آن به ترتیب برابر ۲۳/۵، ۴۹ و ۷/۶ درصد بود. رابطه فرسایش‌پذیری بادی خاک و کربنات کلسیم معادل نیز در شکل ۷ (بخش b) ارائه شده است. اگرچه از لحاظ آماری این رابطه معنی‌دار بوده است ($p < 0.05$) اما رابطه بین آن‌ها ضعیف و کربنات کلسیم توانایی تبیین تنها ۲۱ درصد از تغییرات فرسایش‌پذیری را دارا بود. خاک‌های نمونه‌برداری شده از منطقه از تنوع بالایی به لحاظ شوری و سدیمی بودن خاک‌ها برخوردار بوده‌اند به گونه‌ای که حدود نیمی از نمونه‌ها در رده خاک‌های شور و یا خاک‌های شور و سدیمی قرار داشتند. که این امر امکان بررسی اثر شوری و سدیمی بودن خاک‌ها بر فرسایش‌پذیری فراهم نمود.



شکل ۷- رابطه فرسایش پذیری بادی خاک با (a) کربن آلی خاک، (b) کربنات کلسیم معادل خاک، (c) هدایت الکتریکی خاک اشباع و (d) نسبت جذب سدیم

Figure 7. The relationship of soil wind erodibility with a) Organic carbon, b) Equivalent calcium carbonate, c) Electrical conductivity and d) Sodium adsorption ratio.

برخلاف ویژگی‌های فیزیکی که رابطه مناسبی با فرسایش‌پذیری بادی داشتند، ویژگی‌های شیمیایی خاک از قبیل نسبت جذب سدیم، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و کربن آلی رابطه مناسبی با فرسایش‌پذیری بادی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه نداشتند. در صورتی که با توجه به نقش ویژه شوری در هم‌آوری ذرات و از طرفی اثر SAR در پراکنش ذرات و همچنین نقش کربن آلی و کربنات کلسیم به عنوان مواد سیمانی و اتصال دهنده ذرات، انتظار بر این بوده است که این ویژگی‌های شیمیایی نیز اثرگذاری بالایی بر فرسایش‌پذیری منطقه مورد مطالعه داشته باشند. با توجه به بررسی‌های میدانی که در زمان نمونه‌برداری انجام شد، در منطقه مورد مطالعه کاربری‌های اراضی مختلفی از قبیل اراضی زراعی، باغی و مرتعی و همچنین اراضی دست نخورده وجود داشت و همچنین تقریباً در ۴۰ درصد از مناطق نمونه برداری سله سطحی (با درجات سختی متفاوت) در سطح خاک مشاهده گردید. با در نظر گرفتن اثرات متقابل پیچیده بین عملیات کشاورزی (که در اراضی زراعی و باغی صورت می‌گیرد)،

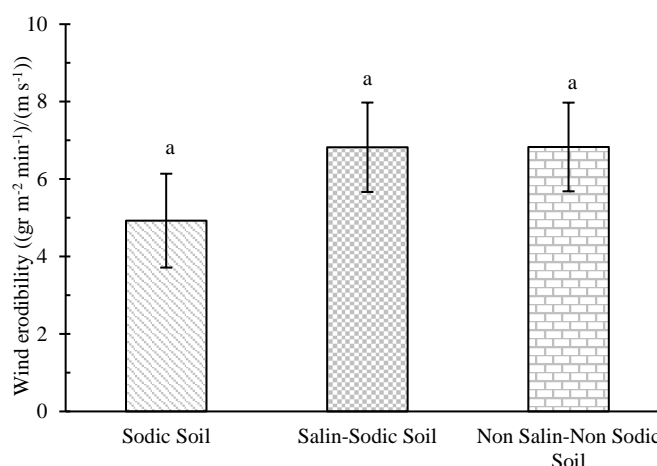
نهتانی و همکاران (Nohtani *et al.*, 2014) به بررسی اثر شوری بر فرسایش‌پذیری بادی در منطقه زهک زابل پرداختند و نتایج آن‌ها حاکی از اثر مثبت شوری خاک بر کاهش فرسایش‌پذیری بادی بوده است. نتایج پژوهش‌های هادی‌دهج و همکاران (Hadi-dehej *et al.*, 2011) و لایلز و شرن (Layles & Schrandt, 1971) نیز نشان داد که خاک‌های با شوری بیشتر دارای فرسایش‌پذیری کم‌تری نسبت به خاک‌های غیرشور می‌باشند. در مقابل، نتایج عظیم‌زاده و اختصاصی (Azimzadeh & Ekhtesasi, 2004) و همکاران (Ekhtesasi *et al.*, 2003) و میریان و همکاران (Mirian *et al.*, 2014) حکایت از افزایش فرسایش‌پذیری بادی با افزایش شوری خاک دارد. بر اساس پژوهش قربانیان و همکاران (Qorbanian *et al.*, 2016) رابطه بین هدایت الکتریکی و شاخص‌های ساختمان خاک معنی‌داری بوده و با افزایش هدایت الکتریکی میزان خاکدانه‌های بزرگ‌تر افزایش یافته و فرسایش‌پذیری بادی کاهش می‌یابد.

عوامل مذکور منجر به کم‌رنگ شدن نقش ویژگی‌های شیمیایی در تعیین فرسایش‌پذیری بادی خاک گردیده است.

سله سطحی، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل و بافت خاک به‌نظر می‌رسد که در منطقه مورد مطالعه اثر متقابل بین

جدول شماره ۳- خلاصه جدول تجزیه واریانس اثر کلاس شوری خاک بر فرسایش‌پذیری بادی خاک

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Treatment	2	0.13	0.065	0.34	0.71
Error	93	17.76	0.19		
Corrected Total	95	17.89			



شکل ۸- اثر کلاس شوری و سدیمی بودن خاک بر میانگین فرسایش‌پذیری بادی خاک

Figure 8. The effect of soil salinity and sodic on soil wind erodibility

فرسایش بادی از قبیل WEQ^۱ و RWEQ^۲ در منطقه، مورد استفاده قرار گیرد. این امر به‌ویژه با توجه به سهولت، سرعت بالا و هزینه اندک اندازه‌گیری این شاخص، اهمیت دوچندانی خواهد داشت. با این حال با توجه به محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی در آزمایشگاه، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی با استفاده از تول‌های بادی صحرایی اثر عواملی مانند سله سطحی و زبری خاک نیز مورد توجه قرار گیرند تا درک صحیحی از تغییرات فرسایش‌پذیری خاک‌های با ویژگی‌های مختلف در منطقه به‌دست آید.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق به روشنی بیانگر نقش موثر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها در تغییر مقدار فرسایش‌پذیری خاک‌های شرق دریاچه ارومیه است. یافته‌های این پژوهش، تأثیر قابل توجه افزایش میانگین اندازه قطر خاکدانه‌ها بر کاهش فرسایش‌پذیری خاک‌ها را تأیید می‌نماید. افزایش برخی از کلاس‌های اندازه‌ای ذرات مانند ۲-۴/۷۵ و ۱/۷-۲ میلی‌متری موجب کاهش شدید فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه شد. همچنین نتایج بیانگر این واقعیت بود که افزایش ذرات در دامنه اندازه-ای ۰/۱-۰/۲۵ میلی‌متر سبب افزایش فرسایش‌پذیری خاک‌ها می‌گردد. در بین شاخص‌های مختلف مرتبط با اندازه ذرات ثانویه، شاخص جزء فرسایش‌پذیر رابطه بسیار مطلوبی با فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان داد و بر این اساس می‌تواند به‌عنوان بخشی از عامل خاک در مدل‌های رایج پیش‌بینی

1. Wind Erosion Equation

2. Revised Wind Erosion Equation

References

- Asensio C., Weber J., Lozano F.J. and Mielnik L. 2019. Laser-scanner used in a wind tunnel to quantify soil erosion. *International Agrophysics*, 33 (2): 227-232.
- Azimzadeh H.R., Ekhtesasi M.R. 2004. Threshold velocity relation to soil physical and chemical properties in Iranian central plain (case study: Yazd- Ardakan plain). *Journal of the Iranian Natural Research*, 57 (2): 1-11.
- Baas A.C. 2007. Complex systems in aeolian geomorphology. *Geomorphology*, 91: 311-331.
- Barzegar R., Asghari Moghadam A. and baghban h.. 2015. A supervised committee machine artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from tabriz plain aquifer, iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(3): 883-899.
- Black J.M.W. and Chanasyk D.S. 1989. The wind erodibility of some Alberta soils after seeding: Aggregation in addition to field parameter. *Canadian Journal of Soil Science*, 69: 835-847.
- Chandler D.G., Saxton K.E. and Busacca, A.J. 2005. Predicting wind erodibility of loessial soils in the Pacific Northwest by particle sizing. *Arid Land Research and Management*, 19(1): 13-27.
- Chepil W.S. 1942. Relation of wind erosion to water stable and dry clod structure of soil. *Soil Science*, 55: 275-287.
- Colazo J.C. and Buschiazzo D.E., 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159: 228-236.
- Crepin J. and Johnson R.L. 1993. Soil sampling for environmental assessment. In soil sampling and methods of analysis, Carter M.R. (Ed.), *Canadian Society of Soil Science*, Lewis, pp.5-18.
- Dastranj H., Tavakoli F. and Soltanpour A. 2018. Investigating the water level and volume variations of Lake Urmia using satellite images and satellite altimetry. *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data*, 27(107): 149-163. (In Persian)
- Ekhtesasi M.R., Akhavan Ghalibaf M., Azimzadeh H.R. and Emtehani M.H. 2003. Effects of salts on Erodibility of soil by wind. *Iranian journal natural research*, 56 (1,2): 17-28.
- Fryrear D.W., Krammes C.A., Williamson D.L. and Zobeck T.M. 1994. Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49: 183-88.
- Gee G.W. and Or D. 2002. Particle size analysis. In: Dane J.H. and Topp G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America*. Madison (WI), p. 255-293.
- Hadi-dehej M., Hakinzadeh M.A. and Ekhtesasi M.R. 2011. The study of effects of type of salinity on wind erodibility of soils. *Thesis submitted for the degree of M.Sc. Yazd University*. (In Persian)
- Hassan A.A. and Mustafa M.A. 2011. Assessment and Mapping of Wind Erodibility of Aridisols and Entisols in the River Nile State, Sudan. *The 5th Annual Conference - Agricultural and Veterinary Research - February 2014. University of Khartoum*.
- Hillel, D., 2004. Introduction to environmental soil physics. Elsevier Academic Press, San Diego, CA. 494p.
- Kemper W.D. and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A, (Ed.), *Methods of Soil Analysis. ASA and SSSA*, Madison (WI), pp. 425-442.
- Lavelle J.W. and Mofjeld H.O. 1987. Do critical stress for incipient motion and erosion really exist?. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113: 370-390.
- Layles L. and Schrandt R.L. 1971. Wind erodibility as influence by rainfall and salinity. *Soil Science*, 114: 367-372.
- Liu L.Y., Li X.L., Shi P.J., Gao S.Y., Wang J.H., Ta W.Q., Song Y., Liu M.X., Wang Z. and Xiao B.L. 2007. Wind erodibility of major soils in the farming-pastoral ecotone of China. *Journal of Arid Environments*, 68: 611-623.
- Lopez M.V., de Dios Herrero J.M., Hevia G.G., Gracia R. and Buschiazzo D.E. 2007. Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma*, 139: 407-411.
- Mahmoodabadi M. and Heydarpour E. 2014. Sequestration of organic carbon influenced by the application of straw residue and farmyard manure in two different soils. *International Agrophysic*, 28 (2): 169-176.
- Mandakh N., Tsogtbaatar J., Dash D. and Khudulmur S. 2016. Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 26: 473-483.

- Mirian I., Pahlavanrvi A. and Khalili Moghaddam B. 2014. Investigation on Relation Between Wind Erodibility and Soil Physical and Chemical Properties in Hourolazim- Wetland Khuzestan. *The Thesis Submitted for the Degree of M.Sc. University of Zabol*. (In persain). 104p.
- Mirzamostafa N., Stone L. R., Hagen L.J. and Skidmore E.L. 1998. Soil aggregate and texture effects on suspension components from wind erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5): 1351-1361.
- Mustafa M.A. and Medani G.H. 2004. Wind erodibility of soils from Khartoum State. *University of Khartoum Journal of Agricultural Sciences*, 11: 149-164.
- Négyesi G., Lóki J., Buró B. and Szabó, S. 2016. Effect of soil parameters on the threshold wind velocity and maximum eroded mass in a dry environment. *Arabian Journal of Geoscience*, 9 (11): 1-10.
- Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum. P. 181- 197. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. (2nd ed.)*. Agron. Mongor. 9. ASA and SSSA, Madison (WI), pp. 181-197.
- Nelson D.W. and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A.L., Miller R.H. and Keeney D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, part 2. ASA and SSSA, Madison (WI)*, pp. 539–579.
- Nimmo J.R. and Perkins K.S. 2002. Aggregate stability and size distribution. In: Dane, J.H. and Topp G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison (WI)*, pp. 317–328.
- Nohtani M., Pahlavan ravi A., Dehviri A., Jahantigh M. and Hashemi Z. 2014. Effect of Soil Physical and Chemical characteristic on Soil Erodibility by Wind and its Zoning. (Zahak as a Case Study). *The Thesis Submitted for the Degree of M.Sc. University of Zabol*. 150p. (In persian)
- Pasztor L., Négyesi G., Laborczi A. and Kovacs T. 2016. Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 2421–2432.
- Qorbanian R., Ahmadi A., Jafarzadeh A.A., and Neishabouri M.R. 2016. Development of Pedotransfer functions for estimation of soil inherent wind erodibility (A case study: Dasht-e – Tabriz). *Thesis is approved for degree of Master of Science. University of Tabriz*. 81p. (In Persian)
- Rakkar M.K., Blanco-Canqui H. and Tatarko J. 2019. Predicting soil wind erosion potential under different corn residue management scenarios in the central Great Plains. *Geoderma*, 353: 25-34.
- Raupach M.R. and Lu H. 2004. Representation of land-surface processes in aeolian transport models. *Environmental Modelling and Software*, 19: 93–112.
- Song Y., Liu L., Yan P. and Cao T. 2005. A review of soil erodibility in water and wind erosion research. *Journal of Geographical Sciences*, 15: 167-176.
- Sparks, D.L., 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, London, UK. 390p.
- Sparks D. and Bartels J. 1996. *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*. Soil Science Society of America Book Series. Madison, Wisconsin. USA. pp1390.
- Wang R., Li Q., Zhou N., Chang CH., Gou ZH. and Li J. 2019. Effect of wind speed on aggregate size distribution of windblown sediment. *Aeolian Research*, 36: 1-8.
- Webb N.P. and Strong C.L. 2011. Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Research*, 3: 165-179.
- Webb N.P. and McGowan H.A. 2009. Approaches to modelling land erodibility by wind. *Progress in Physical Geography*, 33(5): 587–613.
- Zamani S. and Mahmoodabadi M. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59 (12): 1743-1753.
- Zhao H.L., Yi X.Y., Zhou R.L., Zhao X.Y., Zhang T.H. and Drake S., 2006. Wind Erosion and Sand Accumulation Effects on Soil Properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. *Catena*, 65: 71 – 79.
- Zobeck T.M., 1991. Soil properties affecting wind erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46: 112–118.
- 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: 1163-1188.

Determination of Soil Wind Erodibility in Eastern Urmia Lake and its Relationship with Soil Physicochemical Properties

Bijan Raei^{1*}, Abbas Ahmadi², Mohammad Reza Neyshaburi³, Mohammad Ali Ghorbani⁴, Farrokh Asadzadeh⁵

(Received: May 2019 Accepted: August 2019)

Abstract

In recent years, vast areas of Urmia Lake have dried up and that's why, saline sediments appeared on the surface of the earth, which are very susceptible to erosion. This study was conducted to investigation of wind erosion and its relationship with soil physicochemical properties in eastern land of Urmia Lake. In this research, 96 soil samples were collected from an area of 414000 hectares at a depth of 5 cm based on stratified random sampling method. To measure the wind erodibility, the samples were exposed to 5 different wind velocities (9.5, 11, 12.5, 14.1 and 15 m s⁻¹ at the height of 20 cm) in wind tunnel and finally, its relationship with soil physicochemical properties was investigated. Based on results, soil wind erodibility varied within the range of 76.69-9.98, and with a mean of 10.21 and a coefficient of variation of 94.5% have a relatively high variation in studied area. Wind erosion is significantly affected by soil physical properties, including mean weight diameter, the percent of the size classes 2-4.75, 1.7-2 and 0.1-0.25 mm of soil secondary particles (P<0.001). Based on the results, the erodible fraction (secondary particles smaller than 0.85 mm) had the most appropriate relationship with soil wind erodibility (R²= 0.75, P<0.001) and by increasing it, the soil wind erodibility increased exponentially. Considering the less costly and time-consuming in measuring erodible fraction and also less costly and time-consuming compared with measurement of soil wind erodibility in the field and wind tunnel, this index can be used as a part of soil factor in wind erosion prediction models such as WEQ and RWEQ in the studied area.

Keywords: Erodible Fraction, Stratified random sampling method, Wind Erosion, Wind tunnel

Raei B., Ahmadi A., Neyshaburi M.R., Ghorbani M.A. and Asadzadeh F. 2020. Determination of soil wind erodibility in eastern Urmia Lake and its relationship with soil physicochemical properties. *Applied Soil Research*, 8(2):82-98.

1. PhD Student, Department of Soil Science, faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2. Assistant Professor, Department of Soil Science, faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3. Professor, Department of Soil Science, faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4. Professor, Department of Water Engineering, faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

5. Associate Professor, Department of Soil Science, faculty of agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding Author Email: Bijanraei@yahoo.com