

ارزیابی دقت روش‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی (مطالعه موردی: منطقه‌ی جزینک، دشت سیستان)

منیژه ارباب: کارشناس ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل.

احمد پهلوانروی: دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل.

حسین پیری صحراگرد*: استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل.

میثم امیری: مربی، گروه پژوهشی مدیریت منابع آب، پژوهشکده‌ی تالاب بین‌المللی هامون، دانشگاه زابل.

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۵

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۴)

چکیده

آگاهی از تغییرات مکانی سرعت آستانه فرسایش بادی با بهره‌گیری از روش‌های دقیق و کم‌هزینه اهمیت زیادی در فعالیت‌های بیابان‌زدایی دارد. پژوهش حاضر با هدف مقایسه‌ی دقت روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ و کوکریجینگ) و روش پرسپترون چندلایه در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی و شناخت متغیرهای دارای اهمیت بیشتر در بخش جزینک دشت سیستان انجام شد. برای این منظور، علاوه بر اندازه‌گیری سرعت آستانه فرسایش بادی با روش تونل باد در ۶۰ نقطه از خاک سطحی، نمونه‌برداری از آن نیز در همین نقاط انجام شد. بعد از اندازه‌گیری خصوصیات خاک در آزمایشگاه و بررسی نرمال بودن داده‌ها، سرعت آستانه با روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ برآورد شد. سپس اعتبارسنجی نتایج حاصل از این روش‌ها نیز با استفاده از روش ارزیابی متقاطع انجام شد. برای اجرای مدل پرسپترون چندلایه، بعد از استانداردسازی داده‌ها و تعیین معماری مدل به‌روش آزمون و خطا، مدل اجرا شد. سپس نتایج حاصل با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین، ارزیابی شد. نتایج نشان داد که از بین روش‌های زمین‌آمار، روش درون‌یابی کوکریجینگ با متغیر کمکی سیلت در مقایسه با روش کریجینگ در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی، دقت بیشتری دارد ($R^2 = 0.60$ و $RMSE = 0.45$). علاوه بر این، سرعت آستانه فرسایش بادی در قسمت‌های شمالی بیش از بخش‌های جنوبی و غربی منطقه‌ی مورد مطالعه است و متغیرهای مرتبط با بافت خاک (درصد رس، سیلت و ماسه)، اسیدیته، شوری، درصد ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و درصد سنگریزه‌ی خاک سطحی، سهم عمده‌ای در تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه دارد. ارزیابی کلی دقت مدل‌های مورد استفاده نیز نشان داد که دقیق‌ترین برآورد از سرعت آستانه فرسایش بادی، توسط مدل پرسپترون چندلایه با سه لایه مخفی و سه نرون در هر لایه انجام شده است ($R^2 = 0.98$ و $RMSE = 0.07$). واژگان کلیدی: دشت سیستان، زمین‌آمار، سرعت آستانه فرسایش بادی، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه

فرسایش بادی یا فرسایش خاک به وسیله باد، فرایندی فیزیکی است که به دلیل برداشت لایه‌ی سطحی و کاهش حاصلخیزی خاک، به عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای تخریب خاک در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی مطرح است (Liu et al, 2011 & Ekhtesasi and Sepehr, 2008). یکی از مهم‌ترین خصوصیات بادهای فرسایش‌دهنده‌ی سطح خاک، سرعت آستانه یا رسیدن سرعت باد به حدی است که در آن خاک حرکت می‌کند و با حمل ذرات آن، گرد و غبار تولید می‌شود. به دلیل نقش این ویژگی در فرسایش خاک، این خصوصیت یکی از اجزای مهم در بسیاری از معادلات نظری و مدل‌های عددی است (Stout and Zobeck, 1996). علاوه بر این در مدیریت مناطق بیابانی، آگاهی از سرعت آستانه فرسایش بادی برای استقرار بادشکن‌ها به عنوان یکی از اصول مبارزه‌ی بیولوژیکی و مکانیکی با فرسایش بادی، اهمیت قابل توجهی دارد (Karimzadeh, 2005)؛ به عبارت دیگر، سرعت آستانه فرسایش بادی از مبانی مهم کنترل باد و حفاظت خاک در مناطق بیابانی و یکی از مهم‌ترین خصوصیات مورد استفاده در مطالعات منابع طبیعی به خصوص مطالعات فرسایش بادی است (Refahi, 2005). همچنین فهم دقیق از خصوصیات سرعت آستانه فرسایش و در نتیجه برآورد دقیق آن، می‌تواند پایه‌ای برای توسعه‌ی مدل‌های دقیق جابه‌جایی در رسوبات بادی مفید باشد (Webb et al, 2016).

از روش‌های مورد استفاده در برآورد سرعت آستانه فرسایش، می‌توان به روش تونل باد (ثابت و قابل حمل)، روابط تجربی و تله‌های رسوب‌گیر اشاره کرد (Refahi, 2005). از بین روش‌های مورد اشاره، استفاده از دستگاه سنجش فرسایش بادی (تونل باد) بر روش‌های دیگر ارجح است؛ این امر به دلیل ویژگی‌های این روش همچون دقت بالا و عدم ایجاد تغییر در ساختار طبیعی خاک است (Ahmadi and Ekhtesasi, 1994). اما سخت‌بودن استفاده از این دستگاه در شرایط صحرائی و لزوم صرف زمان و هزینه‌ی زیاد، استفاده از آن را با مشکل مواجه می‌سازد؛ از این‌رو، به دلیل محدودیت‌ها و مشکلات مرتبط با اندازه‌گیری مستقیم این خصوصیت، مدل‌سازی این ویژگی مهم با استفاده از خصوصیات زودیافت خاک ضروری به نظر می‌رسد. عوامل متعددی همچون پوشش سنگفرش بیابان، مقادیر مختلف رطوبت اولیه‌ی خاک، سرعت باد، خصوصیات مرتبط با بافت خاک و اندازه‌ی خاکدانه‌ها، شوری و مقدار گچ خاک از جمله عواملی است که می‌تواند بر سرعت آستانه فرسایش بادی تأثیرگذار باشد (Azimzadeh and Fotouhi, 2012 & Mahmoodabadi and Rajabpour, 2017). به دلیل سخت بودن اندازه‌گیری مستقیم این خصوصیت، وجود ناهمگنی در طبیعت و نقطه‌ای بودن مقادیر سرعت آستانه حاصل از روش‌های تجربی، مدل‌سازی مقادیر این گونه خصوصیات در نقاط فاقد داده امری اجتناب‌ناپذیر است (Azimzadeh et al, 2001 & Mohammadi, 2001 & Saremi naeini et al, 2007). علاوه بر این، در صورتی که مدل‌سازی این خصوصیت به تخمین دقیقی از متغیر وابسته منجر شود، می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه و زمان، در زمینه‌ی اتخاذ راهکارهای صحیح مدیریت خاک در پروژه‌های کنترل فرسایش بادی نیز مفید باشد (Kumar et al, 2008).

به دلیل محدودیت‌هایی همچون انتخاب تعداد نمونه‌ی مناسب، استفاده از روش‌های کلاسیک برای این قبیل خصوصیات با محدودیت‌هایی همراه است و استفاده از روش‌هایی مانند روش‌های زمین‌آمار — که فرض اصلی آنها وابسته بودن نمونه‌های هم‌جوار به فاصله‌ی معینی از یکدیگر است — می‌تواند مفید باشد (Habashi, 2007). در زمین-

آمار، ساختار مکانی یا ارتباط مکانی بین مقدار یک کمیت در بین نمونه‌های برداشت‌شده با استفاده از قالب‌های ریاضی بیان می‌شود (Hasani Pak, 2010). علاوه بر این، در روش‌های زمین آماری که از متغیر کمکی بهره می‌گیرد، هم از همبستگی بین متغیر اصلی و کمکی و هم از ارتباط فضایی آنها برای تخمین استفاده می‌شود. کارآیی هر یک از این روش‌ها براساس ماهیت داده‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه تغییر می‌کند (Mc Brathney et al, 2003). علاوه بر این روش‌ها، در سال‌های اخیر روش‌های هوش مصنوعی مانند مدل‌های پرسپترون چندلایه به دلیل قابلیت‌های ویژه‌ای مانند تشخیص الگو، سهولت تفسیرپذیری، دقت طبقه‌بندی بالا، توانایی تشخیص برهم‌کنش‌های پیچیده بین متغیرها، کشف روابط نهفته بین داده‌ها و ارائه مدل‌های پیش‌بینی دقیق، بیشتر قابل توجه قرار گرفته‌اند (Chen, 1997 & Basheer and Hajmeer, 2000). انتخاب تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها در هر یک مدل‌ها، از موارد بسیار مهم در استفاده از روش‌های هوش مصنوعی است؛ در صورت انتخاب نادرست تعداد لایه‌ها و نرون‌ها، شبکه برای حل مسائل غیرخطی و پیچیده با مشکل مواجه می‌شود و اگر تعداد لایه‌ها و نرون‌ها زیاد باشد علاوه بر افزایش زمان آموزش شبکه، دقت مدل نیز کاهش خواهد یافت (Dehbashian and Zahiri, 2009).

Saremi Naeini و همکاران (۲۰۰۷) با بهره‌گیری از زمین‌آمار و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، پهنه‌بندی سرعت آستانه فرسایش بادی را به کمک داده‌های حاصل از دستگاه سنجش فرسایش بادی در محدوده‌ی شهر یزد انجام دادند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد که روش کریجینگ با مدل کروی، ساختار فضایی مناسب‌تر و مقادیر خطای کمتر دارد؛ بنابراین، در تهیه‌ی نقشه هم‌سرعت آستانه فرسایش در منطقه‌ی مورد مطالعه از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین، مطالعه‌ی تأثیر سنگفرش بیابانی بر سرعت آستانه فرسایش بادی در مهریز یزد با استفاده از روش‌های تجربی، معادلات انتقالی و کریجینگ معمولی نیز نشان داد که کریجینگ معمولی، روش دقیقی برای برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی است و افزایش درصد پوشش سنگفرش به افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی منجر خواهد شد (Amin and Azimzadeh, 2015). روش کریجینگ یکی از روش‌های درونیابی با دقت بالاست که بهترین تخمین نا اریب و با کمترین مقدار واریانس را فراهم می‌کند (Jianbing et al, 2008). محاسبه‌ی مقدار خطای هر برآورد به منظور تعیین تعداد داده‌ی مناسب برای کاهش خطا، از مزیت‌های مهم روش کریجینگ است (Zare Chahouki et al, 2010). روش کوکریجینگ نیز مانند روش کریجینگ است؛ با این تفاوت که روش کوکریجینگ با در نظر گرفتن رابطه‌ی فضایی بین متغیر اصلی و متغیر دیگری - که با متغیر اصلی همبستگی خوبی داشته باشد - مقادیر مجهول را برآورد می‌کند (Myers, 1994).

مطالعه‌ی نقش مقدار رطوبت اولیه‌ی خاک و سرعت باد بر سرعت آستانه و شدت فرسایش بادی با استفاده از تونل باد آزمایشگاهی نیز نشان داد که سرعت آستانه فرسایش بادی متأثر از رطوبت اولیه‌ی خاک است و با افزایش این پارامتر، سرعت آستانه فرسایش بادی به صورت توانی افزایش می‌یابد (Mahmoodabadi and Rajabpour, 2017)؛ هر چند روابط لگاریتمی و مستقیم نیز بین سرعت آستانه فرسایش بادی و رطوبت سطحی خاک در شبیه‌سازی آزمایشگاهی گزارش شده است (Han et al, 2009). مطالعه‌ی سرعت آستانه فرسایش بادی به عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در فرسایش خاک در آرژانتین، بیانگر آن است که سرعت آستانه فرسایش بادی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است و بالا بودن مقادیر رطوبت هوا به افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی منجر می‌شود (Laura et al, 2009).

بر این، تحلیل داده‌های سرعت باد با استفاده از روش زمین‌آمار در ژاپن نیز نشان داد که این روش قادر است با برآزش مناسب‌ترین تابع به داده‌های در دسترس، برآورد دقیقی را از سرعت باد در منطقه ارائه دهد (Shoji, 2006). مطالعات مشابه نیز نشان داده‌است که روش شبکه عصبی مصنوعی از دقت قابل قبولی برای تحلیل داده‌های مربوط به خصوصیات باد، فرسایش خاک و مدل‌سازی پارامترهای مرتبط برخوردار است (Gholamalizadeh Ahangar et al, 2015 & Pourkhosrovani et al, 2011 & Sagbas and Karamanlioglu, 2003).

با توجه به افزایش شدت و تداوم وزش بادهای فرساینده به‌ویژه بادهای یکصد و بیست روزه، رطوبت کم خاک به دلیل وقوع خشکسالی و ریزدانه بودن ذرات خاک، منطقه‌ی سیستم استعدادهای بالایی برای فرسایش‌پذیری بادی دارد. به دلیل وجود این پتانسیل، در سال‌های اخیر خسارات اقتصادی - اجتماعی جبران‌ناپذیری به منابع و زیرساخت‌های این منطقه وارد شده‌است (Miri et al, 2009 & Solouki et al, 2008 & Esmaili et al, 2006). بدیهی است که برآورد دقیق این پارامتر به‌عنوان شاخص مؤثر در طراحی بادشکن‌های درختی و کنترل فرسایش بادی می‌تواند ضمن شناسایی نقاط بحرانی، امکان اقدامات مکانیکی یا بیولوژیکی موردنیاز را برای مبارزه با فرسایش بادی در این مناطق فراهم سازد؛ از این رو، شناسایی روش‌های مدل‌سازی دقیق برای برآورد مقادیر این خصوصیت در نقاط فاقد داده، از اولویت‌های پژوهشی منطقه‌ی سیستم است. با توجه به اینکه منطقه‌ی مورد بررسی با چاه نیمه‌ها - که تنها منبع تأمین آب شرب زابل و زاهدان است - مجاورت دارد، در صورت دست‌یافتن به نتایج دقیق امکان اتخاذ راهکارهای مدیریتی منطبق با شرایط منطقه برای جلوگیری از کاهش حجم مفید چاه نیمه‌ها فراهم خواهد شد. با توجه به نکات ذکر شده، پژوهش حاضر با هدف مقایسه‌ی دقت روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ و کوکریجینگ) و روش پرسپترون چندلایه از گروه شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی و انتخاب روش‌های دقیق‌تر برای این منظور، برای استفاده در طرح‌های کنترل فرسایش بادی و شناخت متغیرهای تأثیرگذار در سرعت آستانه فرسایش بادی در بخش جزینک، واقع شده در دشت سیستم انجام شد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

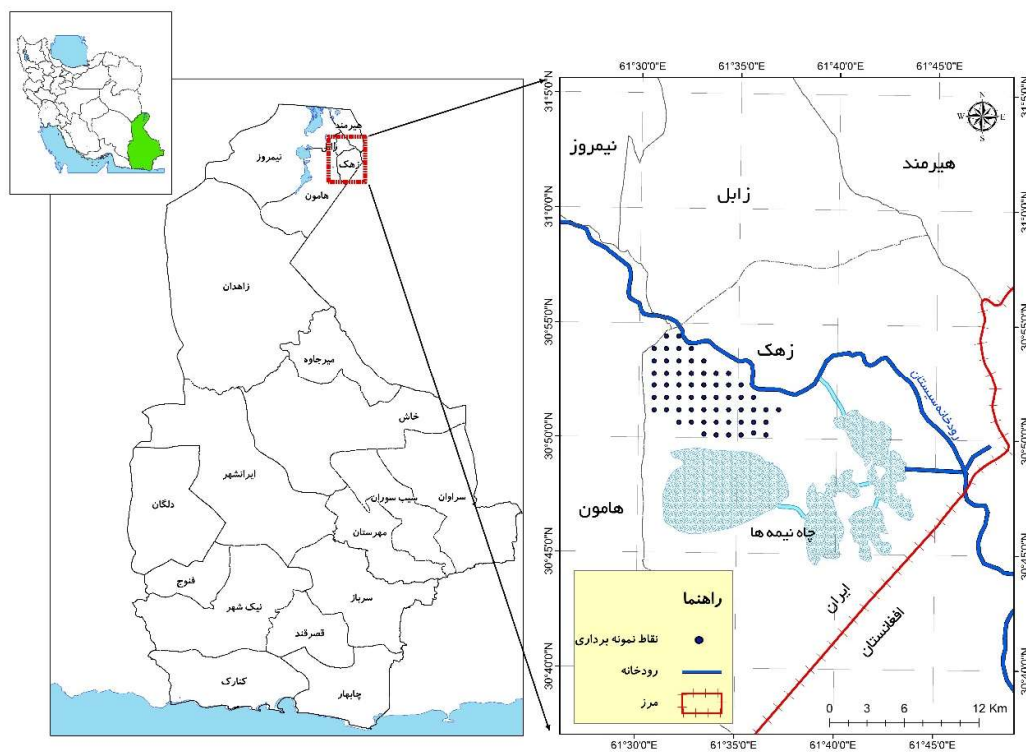
منطقه‌ی سیستم با وسعت ۱۵۱۹۷ کیلومترمربع (معادل ۸/۱ مساحت استان) و ارتفاع متوسط ۴۷۸ متر از سطح دریا، در جنوب شرق ایران و قسمت شمالی استان سیستان و بلوچستان واقع شده‌است. اقلیم این منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن، گرم و خشک و میانگین بارش سالانه‌ی آن ۵۷ میلی‌متر است. دمای این منطقه نیز از ۹- تا ۴۹ درجه‌ی سانتیگراد متغیر است (Piri and Ansari, 2013). بادهای محلی مختلفی در منطقه‌ی سیستم می‌وزد که مهم‌ترین آنها بادهای ۱۲۰ روزه است که سرعت آن به ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت نیز می‌رسد و جهت غالب این بادهای شمال و شمال غرب است (Miri et al, 2009). میانگین سرعت باد در مناطق مختلف دشت سیستم با یکدیگر متفاوت است؛ به گونه‌ای که این مقدار در مناطق شمالی دشت سیستم به حدود ۶/۷ و در اطراف زهک در قسمت جنوب شرقی سیستم به ۵/۶ متر بر ثانیه می‌رسد (Abbasi et al, 2018). محدوده‌ی مورد مطالعه با وسعت ۶۰ کیلومترمربع، بین رودخانه‌ی سیستم و مخزن چهارم چاه‌نیمه - که آب شرب زابل و زاهدان از آن تأمین می‌شود - قرار دارد. این محدوده در شمال شهر جزینک و در حدود جغرافیایی ۳۰° ۴۹' ۴۳" تا ۳۰° ۵۲' ۴۹" عرض شمالی و ۶۱° ۳۷' ۰۵" تا ۶۱° ۳۰' ۲۲" طول شرقی واقع شده‌است (شکل ۱). پرشدن مخازن چاه‌نیمه و کاهش حجم مفید آنها به وسیله‌ی رسوبات ناشی از فرسایش بادی، دلیل

اصلی انتخاب این منطقه برای بررسی سرعت آستانه فرسایش بود تا با برآورد سرعت این آستانه در سطح این محدوده، اقدامات مکانیکی یا بیولوژیکی مناسب با هدف مبارزه با فرسایش بادی در این منطقه انجام شود.

۳- مواد و روش

۳-۱- نمونه‌برداری و آزمایش‌های خاک

پس از تعیین حدود منطقه‌ی بررسی با استفاده از نرم‌افزار Google Earth، به‌منظور شناخت بیشتر از شرایط منطقه و کنترل مرزها، بازدید میدانی از منطقه‌ی مورد مطالعه انجام شد. سپس نقشه‌ی محدوده منطقه‌ی مورد مطالعه به محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی انتقال یافت. در مرحله‌ی بعد با هدف تعیین مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری، شبکه‌بندی منظم با ابعاد $1\text{km} \times 1\text{km}$ و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.1 انجام شد. پس از مشخص‌شدن مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری (گره‌های موجود در شبکه نمونه‌برداری)، این نقاط با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی در عرصه مشخص شد و علاوه بر اندازه‌گیری سرعت آستانه فرسایش بادی با روش تونل باد، نمونه‌برداری از خاک سطحی (عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متری) نیز در همین نقاط انجام شد. پس از نمونه‌برداری از خاک، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شد و برای اندازه‌گیری خصوصیات خاک، ابتدا نمونه‌ها در معرض هوا خشک سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. در مرحله‌ی بعد، خصوصیات خاک موردنظر (بافت خاک، اسیدیته، هدایت الکتریکی حاصل از عصاره‌ی گل اشباع، درصد کربن‌آلی، وزن مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، درصد سنگریزه، درصد ذرات بزرگ‌تر از 0.075mm ، رطوبت خاک و ساختمان خاک) با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه در سیستان و استان سیستان و بلوچستان

۳-۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از کمی کردن خصوصیات خاک موردنظر در آزمایشگاه و بررسی نرمال بودن داده‌ها، برای برآورد مقادیر سرعت آستانه فرسایش بادی در نقاط فاقد داده از روش‌های زمین‌آماري کوریجینگ و کوکریجینگ در نرم‌افزار GS+ استفاده شد. به‌منظور بررسی صحت فرضیات و روش‌ها در زمین‌آمار، اعتبارسنجی نتایج حاصل ضروری است. بدین‌منظور بعد از برازش مدل به تغییرنما و تعیین پارامترهای آن، کنترل اعتبار تغییرنما برای متغیرهای مورد بررسی با استفاده از روش ارزیابی متقاطع و در نظر گرفتن سه پارامتر آماری جذر میانگین مربعات خطا^۱ و میانگین مطلق خطا^۲ و ضریب تعیین (R^2) انجام شد (روابط ۱، ۲ و ۳). معیار جذر میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا، دقت مدل را بر اساس تفاضل بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده ارزیابی می‌کند و هر چه مقدار آن کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد (Kisi, 2006). همچنین ضریب تعیین میزان همبستگی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و مقادیر واقعی است. مقدار این ضریب بین صفر و یک قرار داشته و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد (Yadav and Sharma, 2010). علاوه بر این به‌منظور انتخاب متغیر کمکی در روش کوکریجینگ، ضریب همبستگی بین خصوصیات خاک و سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از نرم‌افزار Minitab تعیین شد و متغیری که بالاترین ضریب همبستگی را با سرعت آستانه فرسایش بادی داشت، به‌عنوان متغیر کمکی در نظر گرفته شد.

$$RMSE \text{ رابطه‌ی (۱)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{N}}$$

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |(Z'(x_i) - Z(x_i))| \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 * \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \right] \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در روابط (۱) و (۳)، N تعداد نقاط، Y_i مقدار تخمین زده شده و X_i مقدار واقعی است. در رابطه‌ی (۲) نیز $Z(x_i)$ مقدار واقعی متغیر، $Z(x_i)^O$ مقدار برآورد شده به‌وسیله‌ی مدل، $Z(x_i)^{-}$ میانگین مقادیر واقعی و n تعداد نقاط مطالعاتی است.

به‌منظور افزایش دقت و سرعت در آموزش شبکه عصبی، ابتدا داده‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۴) استاندارد شد؛ به‌گونه‌ای که تمامی داده‌ها بین صفر و یک قرار گرفت. در این رابطه، Z داده‌ی استاندارد شده، X_i داده‌ی مورد استفاده و X_{min} و X_{max} به‌ترتیب بیشترین و کمترین داده در هر یک از متغیرهاست (Bayati and Njafi, 2013).

$$Z = \frac{(X_i - X_{min})}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

سپس از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۱ با الگوریتم یادگیری لوبز-مارکوارت و تابع فعال‌سازی گوسین، برای پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی استفاده شد. از ۶۰ داده‌ی سرعت آستانه فرسایش بادی، ۶۵ درصد برای آموزش شبکه (۳۹ داده)، ۲۰ درصد برای آزمون (۱۲ داده) و در نهایت ۱۵ درصد (۹ داده) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای تعیین معماری مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، تعداد زیادی شبکه با ساختار مختلف و با تغییر پارامترهای قابل تنظیم (تابع انتقال، قانون یادگیری، تعداد لایه میانی، تعداد نرون لایه میانی) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2008a ساخته و اجرا شد. سپس شبکه بهینه با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین، مشخص شد. در پژوهش حاضر، لایه‌ی ورودی شامل ۱۲ نرون (خصوصیات خاک) بود. همچنین تعداد لایه پنهان و تعداد نرون‌های این لایه نیز به روش آزمون و خطا تعیین شد؛ بدین‌منظور، شبکه‌های مختلف با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه پنهان (۱ تا ۵ نرون) اجرا و معیارهای مربوط به خطای آنها محاسبه شد. در نهایت، شبکه‌ای که کمترین میزان خطا را داشت، به‌عنوان شبکه‌ی بهینه انتخاب شد.

۴- یافته‌ها (نتایج)

۴-۱- آمار توصیفی خصوصیات خاک

با هدف بررسی نحوه‌ی توزیع داده‌ها، آماره‌های توصیفی هر یک از خصوصیات خاک (میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، مقادیر حداکثر و حداقل، چولگی و کشیدگی) و سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از نرم‌افزار Minitab محاسبه شد (جدول ۱). براساس نتایج، داده‌های سرعت آستانه فرسایش بادی، ماده‌آلی، ساختمان خاک، درصد شن و درصد سیلت، از توزیع نرمال برخوردار هستند و با توجه به قرار گرفتن ضریب چولگی همه‌ی متغیرها بین ۱- و ۱+، نتایج نرمال بودن تأیید می‌شود. ضریب تغییرات، معیاری از تغییرپذیری نسبی است و بالا بودن مقدار این معیار در متغیرهای شوری و مقدار سنگریزه‌ی خاک، نشان می‌دهد که این خصوصیات در مقایسه با دیگر خصوصیات مورد بررسی تغییرات بیشتری دارد؛ در مقابل با توجه به میزان ضریب تغییرات، کمترین تغییرات هم به اسیدیته، وزن مخصوص ظاهری و سرعت آستانه فرسایش بادی بازمی‌گردد. افزون بر این، نتایج نشان داد که سرعت آستانه فرسایش بادی، بیشترین مقادیر همبستگی را با خصوصیات درصد سیلت، شن و ذرات بزرگ‌تر از ۰/۸۴ میلی‌متر دارد (به‌ترتیب ۰/۷۵، ۰/۶۲ و ۰/۴۳) (جدول ۲).

^۲ Multi-Layer Perceptron =MLP

جدول ۱: آمار توصیفی خصوصیات خاک مورد بررسی به همراه سرعت آستانه فرسایش بادی و ضریب همبستگی بین خصوصیات خاک و سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه‌ی جزینک.

متغیر	واحد	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	چولگی	کشیده‌گی	ضریب تغییرات	ضریب همبستگی
اسیدیت	log	۸/۳۳	۷/۴۸	۱۰/۱	۰/۴۴	۱/۴۴	۴/۷۷	۰/۰۵	۰/۳۴
هدایت الکتریکی	ds/m	۱۹/۷۸	۰/۱۳	۷۸/۸	۲۶/۰۳	۱/۲۹	۰/۱۱	۱/۳۱	۰/۳۲
وزن مخصوص ظاهری	gr/cm ³	۱/۳۱	۰/۵۳	۱/۵۸	۰/۱۸	۲/۳۸	۷/۸۲	۰/۱۳	۰/۰۶
رطوبت قابل دسترس	(%)	۳/۵۳	۰/۶۳	۸/۶	۱/۷۷	۰/۸۳	۰/۹۹	۰/۵۵	۰/۲۵
ماده آلی	(%)	۱	۰/۲۶	۱/۶	۰/۲۶	۰/۲۵	۱/۰۲	۰/۲۶	۰/۲۲
ذرات < ۰/۸۴	(%)	۶/۰۶	۰/۲۱	۰/۳	۶/۰۹	۱/۹۹	۴/۴۵	۱	۰/۴۳
سنگریزه	(%)	۰/۴۱	۰	۱۱/۹	۱/۹۲	۵	۲۵/۹	۴/۶۶	۰/۲۴
ساختمان	-	۱/۸	۰/۱	۰/۳	۰/۷	۰/۳	۱/۱	۰/۴	۰/۳۷
شن	(%)	۵۱/۹	۷/۸۰	۸۸/۴	۲۰/۸	۰/۲۷	۰/۸۹	۰/۴	۰/۶۲
سیلت	(%)	۲۶/۳۰	۱/۶۰	۶۳/۲۸	۲۶/۱۵	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۷۵
رس	(%)	۲۱/۷	۸	۴۸/۵	۹/۹۲	۱/۰۶	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۱۵
میانگین وزنی قطر	mm	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۱۳	۱/۴۲	۱/۶۴	۰/۴۷	۰/۲۳
سرعت آستانه	m/s	۳/۶	۲/۲	۴/۹	۰/۷۲	۰/۳۶	۰/۶۷	۰/۲	-

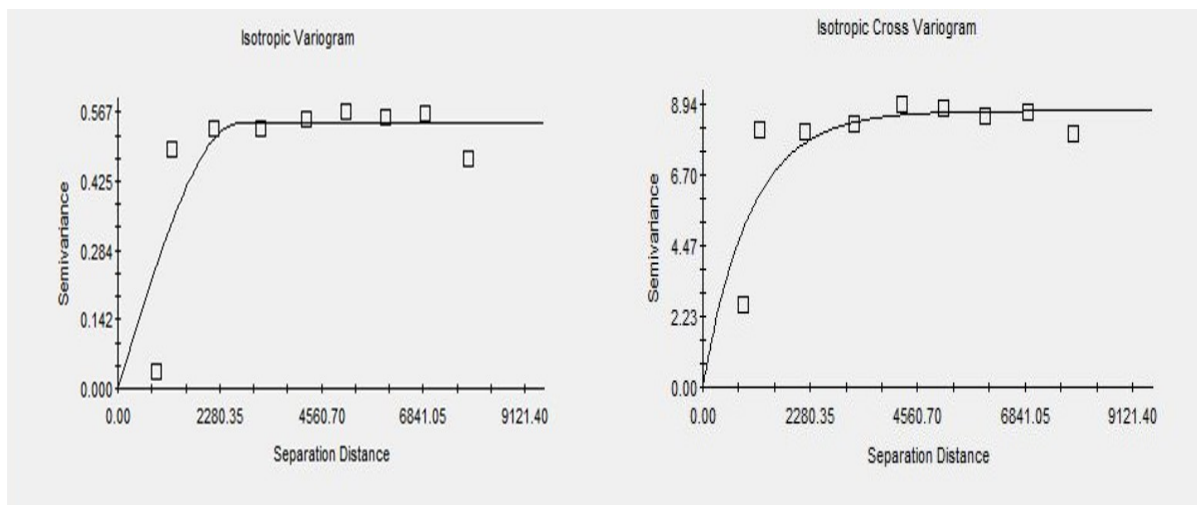
۲-۴- ارزیابی کلی عملکرد روش‌های مورد استفاده

۴-۲-۱- زمین‌آمار

به منظور بررسی تغییرپذیری سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از زمین‌آمار، انواع مدل‌های تغییر نمای کروی، نمایی، گوسی و خطی بر روی تغییرنمای تجربی برازش داده شد. با توجه به نتایج حاصل از مدل تغییر نمای برازش داده شده بر مدل تغییرنمای تجربی و پارامترهای اعتبارسنجی شده‌ی آنها، در روش درونیابی کریجینگ، مدل تغییر نمای کروی و در روش کوکریجینگ، مدل نمایی مناسب‌ترین مدل برای برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی است (جدول ۲). دقیق‌ترین مدل نیم تغییرنمای برازش داده شده بر مدل تغییر نمای تجربی حاصل از دو روش زمین‌آمار مورد استفاده در شکل (۲) ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو روش درونیابی مورد استفاده نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر معیارهای انتخاب مدل (خطا و اریبی کمتر)، روش درونیابی کوکریجینگ با متغیر کمکی سیلت توانسته است براساس مدل برازش شده برای این متغیرها، برآورد دقیق‌تری را انجام دهد.

جدول ۲: اجزای مربوط به پارامترهای تغییرنما و معیارهای انتخاب مدل برای متغیر سرعت آستانه فرسایش بادی حاصل از روش‌های درونیابی در منطقه‌ی جزینک.

روش درونیابی	متغیرهای مورد بررسی	مدل تغییرنما	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنه تأثیر (متر)	ساختار مکانی (درصد)	کلاس وابستگی مکانی	RMSE	MAE
کریجینگ	سرعت آستانه	کروی	۰/۰۰۱	۰/۵۴	۲۷۱۰	۰/۹۹	قوی	۰/۷۱	۰/۵۶
کوکریجینگ	سرعت آستانه و سیلت	نمایی	۰/۰۱	۸/۷۴	۱۰۱۰	۰/۹۹	قوی	۰/۴۵	۰/۳۷



شکل ۲: مدل تغییرنمای برازش داده‌شده (خط) بر مدل تغییرنمای تجربی (نقطه) برای سرعت آستانه فرسایش بادی حاصل از روش کریجینگ (سمت چپ) و کوکریجینگ (سمت راست) در منطقه‌ی جزینک.

۴-۲-۲- مدل پرسپترون چند لایه

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت داده‌ها، بهترین ترکیب داده‌های ورودی برای دقیق‌ترین مدل شبکه عصبی شامل متغیرهای درصد رس، سیلت، ماسه، اسیدیته، شوری، ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و سنگریزه بود؛ زیرا استفاده از این متغیرها به‌عنوان ورودی مدل به کمترین میزان خطا (مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۵) منجر شد و در نتیجه دقیق‌ترین برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی را در پی داشت (جدول ۳)؛ به عبارت دیگر، استفاده از این ترکیب بهینه در تحلیل شبکه عصبی، کاهش مقدار خطا و افزایش در مقدار ضریب تشخیص را به همراه داشته است (ضریب تشخیص ۰/۹۸). افزون بر این، بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل‌های پرسپترون چندلایه، کمترین مقدار خطا و در نتیجه دقیق‌ترین مدل پیش‌بینی با استفاده از تابع انتقال گووسی و قانون آموزش لونبرگ مارکوارت حاصل شد. همچنین تعداد لایه پنهان بهینه نیز پس از اجرای مدل‌ها با یک تا پنج لایه پنهان و محاسبه معیارهای مربوط به خطای آنها، سه لایه تعیین شد؛ زیرا با افزایش تعداد لایه پنهان تا سه لایه مقدار خطا کاهش یافت، اما با افزایش بیشتر در تعداد لایه‌های پنهان، خطای شبکه افزایش و ضریب تعیین کاهش یافت؛ بنابراین شبکه‌ی پرسپترون چندلایه با سه لایه مخفی و سه نرون در هر لایه‌ی مخفی، از بیشترین دقت برای تخمین سرعت آستانه فرسایش بادی برخوردار بود و به‌عنوان بهترین ساختار در نظر گرفته شد (جدول ۴).

جدول ۳: آنالیز حساسیت داده‌های ورودی به مدل پرسپترون چندلایه در منطقه‌ی جزینک.

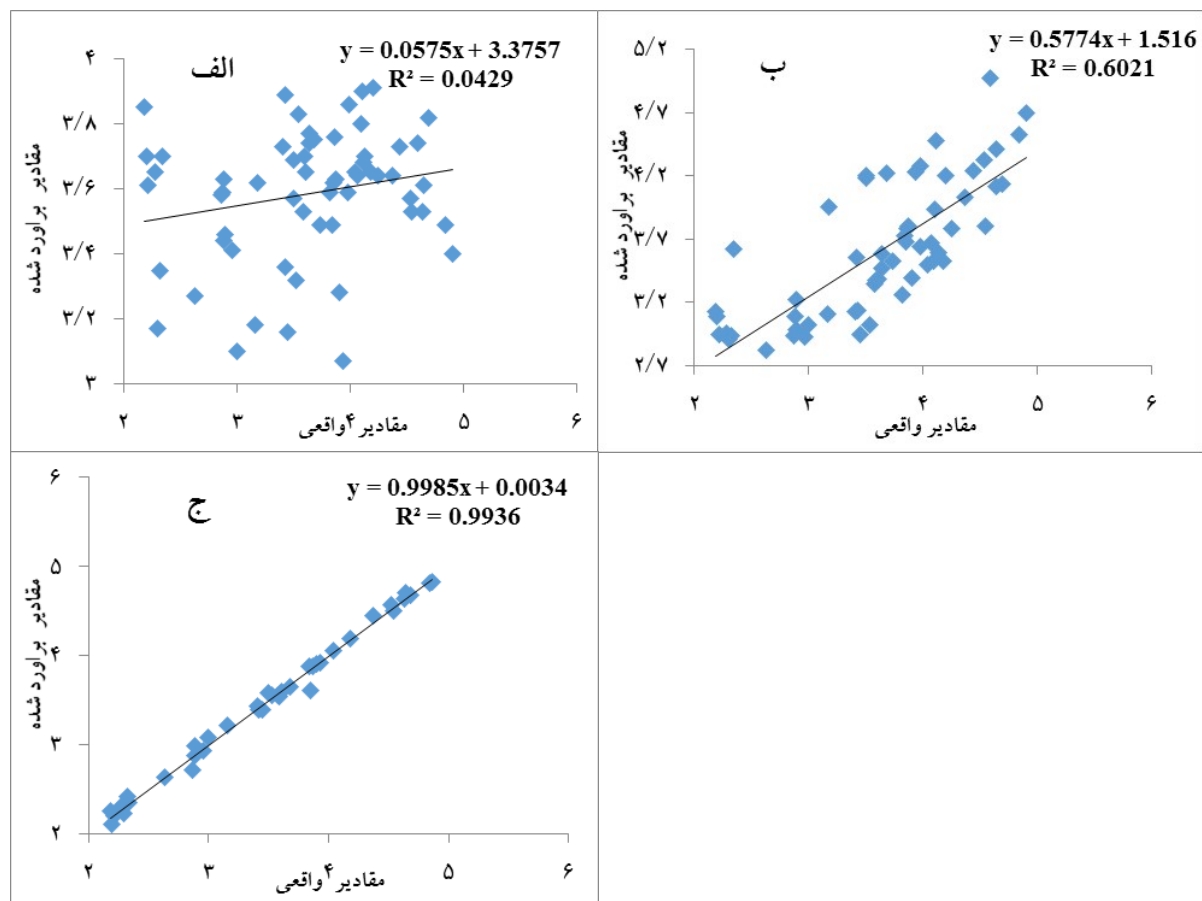
متغیر	RMSE	MAE	R	R ²
رس، سیلت	۰/۵۵	۰/۴۴	۰/۷۵	۰/۴۶
رس، سیلت، شن	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۸۴	۰/۶
رس، سیلت، شن، اسیدپته	۰/۴۱	۰/۳۱	۰/۹	۰/۷۳
رس، سیلت، شن، اسیدپته، شوری	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۷۸	۰/۶۱
رس، سیلت، شن، اسیدپته، شوری، ماده‌آلی	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۹۷
میانگین وزنی قطر، رس، سیلت، شن، اسیدپته، شوری، ماده‌آلی	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۶
میانگین وزنی قطر، رس، سیلت، شن، اسیدپته، شوری، ماده‌آلی، سنگریزه	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۸
رس، سیلت، اسیدپته، ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر، سنگریزه، ذرات < ۰/۸۴	۰/۴۵	۰/۳۱	۰/۸۴	۰/۶۷
رس، سیلت، شوری، ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر، ذرات < ۰/۸۴، رطوبت	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۹۷
رس، سیلت، شوری، ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر، ذرات < ۰/۸۴، رطوبت	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۹۹	۰/۹۸
سیلت، شن، ذرات < ۰/۸۴، میانگین وزنی قطر	۰/۴۹	۰/۴	۰/۷۷	۰/۵۴
وزن مخصوص ظاهری، سیلت، شوری، ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر، سنگریزه	۰/۴	۰/۳۱	۰/۸۸	۰/۶۸
سیلت، شن، ساختمان	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۸۱	۰/۵۸
رس، سیلت، شوری، ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر، سنگریزه، رطوبت	۰/۵۹	۰/۳۸	۰/۷۳	۰/۵

جدول ۴: نتیجه‌ی ارزیابی مدل‌های پرسپترون چندلایه در برآورد میزان سرعت آستانه فرسایش بادی در مرحله‌ی اعتبارسنجی در منطقه‌ی جزینک.

نوع مدل	تعداد لایه پنهان	تعداد نرون لایه پنهان	تابع انتقال	قانون آموزش	RMSE	MAE	ضریب تبیین (R ²)
MLP ₁	۳	۱	Gaussian	LM	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۹۸
MLP ₂	۳	۲	Gaussian	LM	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۹۶
MLP ₃	۳	۴	Gaussian	LM	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۹۸
MLP ₄	۳	۳	Gaussian	LM	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۹۸
MLP ₅	۳	۵	Gaussian	LM	۰/۱۶	۰/۰۹	۰/۹۴

مقایسه، اختلاف و پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی تونل باد و داده‌های برآورد شده‌ی حاصل از روش کریجینگ نشان می‌دهد که در این روش، مقادیر پیش‌بینی شده‌ی سرعت آستانه فرسایش بادی با داده‌های واقعی اختلاف زیادی دارد؛ به عبارت دیگر، این روش در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه‌ی مورد مطالعه در مقایسه با دو روش دیگر، دقت کمتری دارد (ضریب تعیین ۰/۰۴). این در حالی است که نتایج حاصل از مدل کوکریجینگ نشان می‌دهد که بین مقادیر واقعی و تخمینی اختلاف کمتری وجود دارد (ضریب تعیین ۰/۰۶). به بیان دیگر، میزان تطابق داده‌های برآورد شده‌ی حاصل از روش کوکریجینگ، با داده‌های واقعی در مقایسه با روش کریجینگ بالاتر بوده‌است. انحراف کم داده‌های سرعت آستانه اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده با روش کوکریجینگ نیز این مورد را تأیید می‌کند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که میزان تطابق بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی مربوط به سرعت آستانه فرسایش بادی از یکدیگر متفاوت است و روش کوکریجینگ توانسته در مقایسه با روش کریجینگ، سرعت آستانه فرسایش بادی را با دقت بالاتری برآورد کند. از سوی دیگر، مقایسه‌ی داده‌های واقعی سرعت آستانه فرسایش بادی و داده‌های برآورد شده در مدل پرسپترون چندلایه نیز نشان داد که در این مدل بین داده‌های واقعی و برآورد شده، اختلاف اندکی وجود دارد. این یافته نشان می‌دهد که مدل پرسپترون چندلایه

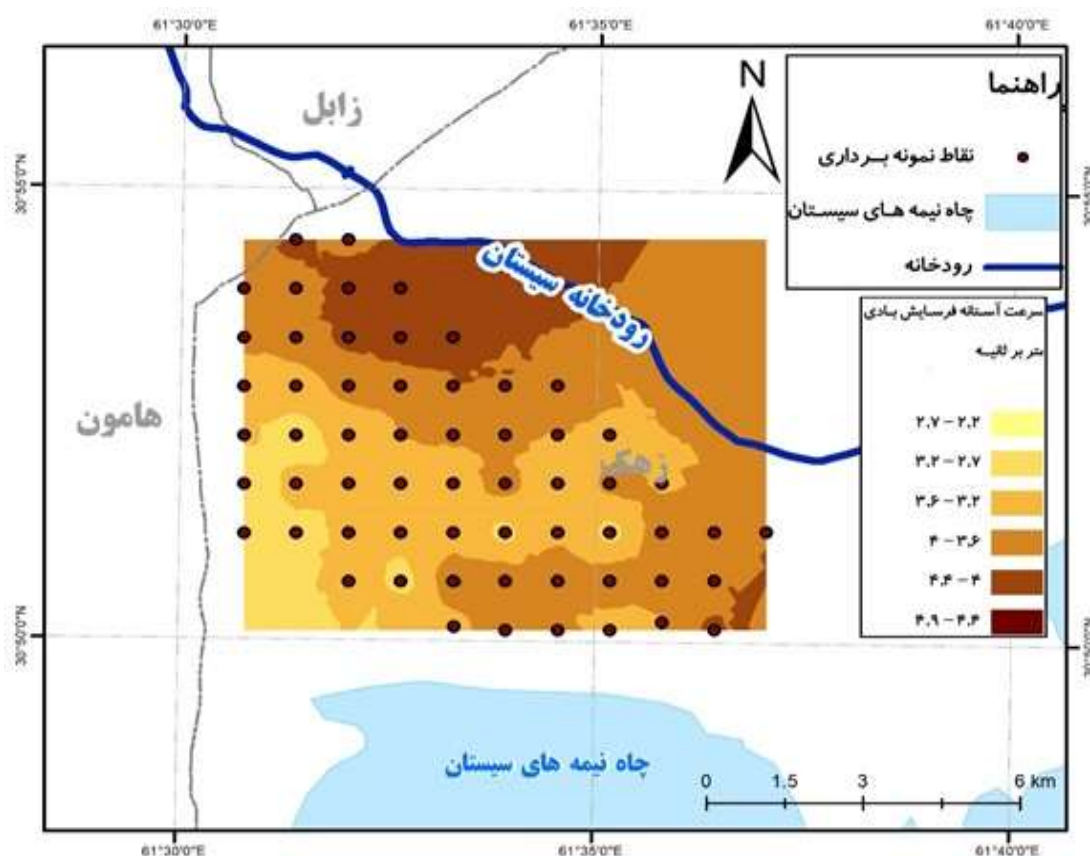
در مقایسه با روش‌های زمین‌آماري مورد استفاده در این پژوهش، توانسته‌است سرعت آستانه فرسایش بادی را با بالاترین دقت و کمترین میزان خطا برآورد کند؛ به عبارت دیگر از بین سه روش مورد استفاده، مدل پرسپترون چندلایه دقیق‌ترین برآورد را از سرعت آستانه فرسایش بادی بیان کرده‌است (ضریب تعیین ۰/۹۸ و مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۰۷) (شکل ۳). مدل کوکریجینگ و کریجینگ نیز از نظر دقت برآورد، به ترتیب رتبه‌های دوم و سوم را به خود اختصاص داد (جدول ۵). نقشه‌ی پهنه‌بندی سرعت آستانه فرسایش بادی نیز نشان می‌دهد که مقادیر سرعت آستانه در بخش‌های مختلف منطقه‌ی مورد مطالعه از یکدیگر متفاوت و دامنه‌ی تغییرات سرعت آستانه از ۲/۲ تا ۴/۹ متر بر ثانیه متغیر است. به طور کلی، مقدار سرعت آستانه فرسایش در قسمت‌های شمالی بیش از قسمت‌های جنوبی و غربی منطقه‌ی مورد مطالعه است (شکل ۴).



شکل ۳: مقایسه‌ی بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورده‌ی سرعت آستانه فرسایش بادی با روش کریجینگ (الف)، کوکریجینگ (ب) و پرسپترون چندلایه (ج) در منطقه‌ی جزینک.

جدول ۵: ارزیابی کلی دقت روش‌های مورد استفاده برای برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه‌ی جزینک.

روش برآورد	R^2	RMSE
کریجینگ	۰/۰۴	۰/۷۱
کوکریجینگ	۰/۶۰	۰/۴۵
شبکه عصبی مصنوعی	۰/۹۸	۰/۰۷



شکل ۴: نقشه‌ی پهنه‌بندی سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه‌ی جزینک.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مقایسه‌ی دقت روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و روش شبکه عصبی مصنوعی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی و شناخت متغیرهای تأثیرگذار بر این خصوصیت در منطقه‌ی جزینک واقع شده در دشت سیستان انجام شد. برای این منظور پس از اجرای مدل‌ها، دقت هر یک از روش‌های مورد استفاده با استفاده از ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا بررسی شد. مقایسه‌ی کلی مدل‌ها نشان داد که از سه روش مورد استفاده، مدل پرسپترون چندلایه از گروه شبکه‌های عصبی مصنوعی با سه لایه مخفی و سه نرون در هر لایه مخفی با توجه به آماره‌های مدنظر، بهترین عملکرد پیش‌بینی و دقیق‌ترین برآورد را از سرعت آستانه فرسایش بادی داشته‌است ($RMSE=0/07$ و $R^2=0/98$). افزون بر این، نتایج نشان داد که در بین روش‌های زمین‌آمار مورد استفاده در این

پژوهش، روش کوکریجینگ در مقایسه با روش کریجینگ توانست سرعت آستانه فرسایش بادی را با خطای کمتر و دقت بالاتری برآورد کند ($R^2=0/60$ و $RMSE=0/45$).

همچنین در روش کریجینگ، مدل تغییرنمای کروی کمترین خطا را در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی داشت؛ در حالی که در روش کوکریجینگ، مدل نمایی دارای کمترین خطا و در نتیجه بیشترین دقت برآورد بود. همسو با یافته‌ی پژوهش حاضر گزارش شده‌است که واریوگرام‌های کروی و نمایی، از رایج‌ترین و معمول‌ترین واریوگرام‌های دارای سقف است که در زمین‌آمار از آن استفاده می‌شود (Mohammadi, 2001). محققان دیگری نیز نتایج مشابهی را در مورد مدل‌های بهینه‌ی تغییرنما برای مطالعه‌ی سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار گزارش دادند (Azim Zadeh et al, 2001 & Saremi Naeini et al, 2007). برای اجرای درون‌یابی به روش کوکریجینگ، از بین ویژگی‌های خاک بررسی شده از متغیر درصد سیلت به عنوان متغیر کمکی استفاده شد؛ این امر بدین دلیل بود که متغیر سیلت از بالاترین همبستگی با سرعت آستانه فرسایش برخوردار بود. به طور کلی با افزایش فرسایش بادی در کاربری‌های مختلف، بافت خاک به سمت سیلتی شدن پیش می‌رود؛ به گونه‌ای که می‌توان گفت درصد سیلت بیشترین همبستگی را با سرعت آستانه فرسایش بادی دارد (Solouki et al, 2008). در واقع، بهره‌گیری از یک متغیر کمکی و استفاده از کوواریانس بین دو متغیر برای درون‌یابی، روش کوکریجینگ را قادر می‌سازد که با دقت بالایی به درون‌یابی پردازد (Lark et al, 2014). علاوه بر این، قابلیت‌هایی همچون افزایش توان پردازش داده‌ها، مشکلات مربوط به اندازه‌گیری برخی از متغیرها، همچنین وجود همبستگی بین متغیرهای اندازه‌گیری شده و در دسترس بودن نرم‌افزارهای متنوع، امکان استفاده از این روش تخمین را در مطالعات مختلف زیست‌محیطی افزایش داده‌است (Amini et al, 2002). برتری عملکرد روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ، در مطالعه‌ی Behnia و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده‌است.

تحلیل حساسیت انجام شده در روش شبکه عصبی مصنوعی به منظور تشخیص ترکیب بهینه‌ی متغیرهای ورودی نیز نشان داد که انتخاب مجموعه متغیرهای میانگین وزنی قطر، رس، سیلت، شن، اسیدیت، شوری، ماده آلی و سنگریزه به عنوان ترکیب متغیرهای ورودی، به دقیق‌ترین برآورد از سرعت آستانه فرسایش بادی منجر می‌شود؛ به بیان دیگر، این مجموعه متغیرها به دلیل اهمیت بالاتر در مقدار سرعت آستانه فرسایش بادی، تأثیر بیشتری در عملکرد پیش‌بینی مدل شبکه مصنوعی در منطقه سیستان دارند (بیشترین ضریب تعیین و کمترین میزان خطا و اریبی). همسو با یافته‌ی پژوهش حاضر، گزارش شده که خصوصیات پوسته‌ی خاک بر مقدار سرعت آستانه فرسایش بادی تأثیرگذار است و مقدار این آستانه در خاک‌هایی با خصوصیات مختلف از یکدیگر متفاوت است (Webb et al, 2016)؛ بنابراین، حذف متغیرهای ورودی اضافی در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌ی جمع‌آوری داده‌ها، افزایش دقت مدل‌ها را نیز به همراه داشته باشد (Faghih, 2010 & Abtin et al, 2016). در تأیید یافته‌های پژوهش حاضر، در مورد عملکرد روش‌های مورد استفاده گزارش شده‌است که در مجموع، استفاده از روش‌های زمین‌آمار به لحاظ همبستگی داده‌ها و شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل استفاده از جفت الگوهای ورودی و خروجی، به عنوان ابرازی قدرتمند در مطالعات مختلف مرتبط با منابع طبیعی از اهمیت خاصی برخوردار است؛ مانند پیش‌بینی سرعت باد، طبقه-

بندی تغییرپذیری مکانی و تهیه نقشه‌ی پیش‌بینی پراکنش گونه‌های مختلف گیاهی (Hosseini et al, 1997 & Piri, 2016 & Abtin et al, 2015 & Sahragard and Zare Chahouki).

بررسی تغییرپذیری سرعت آستانه فرسایش بادی نیز بیانگر است که مقادیر سرعت آستانه فرسایش بادی در بخش‌های مختلف منطقه‌ی مورد مطالعه از یکدیگر متفاوت است. متفاوت بودن خصوصیات خاک و در نتیجه وقوع تغییرات با ساختار مشخص و تدریجی در قسمت‌های مختلف خاک یک منطقه، می‌تواند دلیل تغییرپذیری سرعت آستانه فرسایش بادی باشد (Freeman and Moisen, 2007). از سوی دیگر، بیشترین و کمترین و سرعت آستانه فرسایش بادی به ترتیب به قسمت‌های شمالی و جنوبی منطقه‌ی مورد مطالعه اختصاص دارد. وجود پوشش گیاهی بیشتر (درصد پوشش گیاهی قسمت‌های شمالی منطقه حدود ۳۵ درصد است؛ در حالی که این میزان در قسمت‌های جنوبی به حدود ده درصد کاهش می‌یابد) و درشت بودن بافت خاک در قسمت‌های شمالی منطقه سرعت آستانه فرسایش بادی را در این قسمت از منطقه‌ی مورد مطالعه افزایش داده است. همسو با یافته‌ی این پژوهش گزارش شده است که درشت بودن بافت خاک و وجود سنگریزه در سطح آن، می‌تواند با افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی تا حدود زیادی فرسایش‌پذیری خاک را کاهش دهد (Azimzadeh and Fotouhi, 2012).

بر اساس نتایج پژوهش حاضر از بین روش‌های زمین‌آمار مورد استفاده، روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی، دقت بالاتری دارد؛ به عبارت دیگر، به دلیل امکان استفاده از داده‌های کمکی در مطالعات مکانی، استفاده از روش کوکریجینگ در برآورد سرعت آستانه قابل اعتمادتر است و کاربرد آن برای این گونه اهداف توصیه می‌شود. مقایسه‌ی کلی دقت سه روش مورد استفاده نیز نشان داد که مدل پرسپترون چندلایه، دقیق‌ترین روش در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه‌ی مورد مطالعه است؛ این امر به قابلیت‌های ویژه‌ی این روش مانند کشف الگو و توانایی تشخیص روابط پیچیده‌ی بین متغیرها بازمی‌گردد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی سرعت آستانه فرسایش بادی و فرسایش‌پذیری بادی خاک برای کل دشت سیستان، پس از کمی‌سازی روابط بین شرایط سطح خاک و میزان برداشت رسوبات به‌وسیله‌ی باد، از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی به‌ویژه روش پرسپترون چندلایه استفاده شود. باید به این نکته نیز توجه داشت که به دلیل وجود انواع مختلف روش‌های مدل‌سازی هوش مصنوعی و اهمیت قابل توجه مقادیر این پارامتر در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مبارزه با فرسایش بادی، اجرای مطالعات مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف هوش مصنوعی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بررسی اهمیت متغیرهای تأثیرگذار نیز بیانگر آن است که متغیرهای مرتبط با بافت خاک (درصد رس، سیلت و ماسه)، اسیدیته، شوری، درصد ماده‌آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و درصد سنگریزه‌ی خاک سطحی، در دقت مدل‌های پیش‌بینی و در نتیجه تعیین سرعت آستانه فرسایش در منطقه سهم عمده‌ای دارد. در مجموع می‌توان گفت که از طریق توسعه‌ی پوشش گیاهی با استفاده از گونه‌های بومی در قسمت‌های جنوبی و غربی منطقه‌ی مورد بررسی، می‌توان علاوه بر افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی در این مناطق، میزان فرسایش‌پذیری بادی خاک و تبعات ناشی از آن را کاهش داد.

۶- سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل (شماره گزنت: ۲۴-۹۵۱۷-GR-UOZ) انجام شده‌است؛ بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه زابل سپاس‌گزاری می‌شود.

منابع

1. Abbasi, H. R.; Gohardoust, A.; Khaksarian, F.; & M. Ganjali, 2018. Morphologic characteristics of aeolian deposits and erosive winds in Sistan plain, *Desert Management*, 10, 28 - 42. (In Persian)
2. Abtin, A.; Piri Sahragard, H.; Pahlavanravi, A.; & J. Piri, 2016. Comparing the accuracy of regression and artificial intelligence methods in estimating daily wind speed in the Sistan region, *Desert Management*, 8, 84-95. (In Persian)
3. Ahmadi, H., & M. R. Ekhtesasi, (1994). Determining the wind erosion threshold velocity by using two methods sediment stuck trap and using of wind erosion meter device erosion in Yazd-Ardakan plain. Proceedings of the fourth congress of soil science of Iran. College of Agriculture. Isfahan University of Technology 4. (In Persian)
4. Amin, P., & H. R. Azimzadeh., (2015). The effect of desert pavement on soil wind erodibility and wind erosion threshold velocity (Case Study: Ebrahimabad basin of Mehriz (Yazd). *Quantitative Geomorphological Research*. 4(2), 90-104.
5. Amini, M.; Khademi, H.; & N. Fathian pour, 2002. A comparison of kriging and co-kriging techniques in estimating Cl⁻ concentration in soil, *Iranian journal of Agriculture Science*, 33(4), 741-748. (In Persian)
6. Azimzadeh, H. R., & F. Fotouhi., (2012). The study on the effects of desert pavement on wind erodibility (Case study: Yazd- Ardakan plain). *Iranian Journal of Range and Desert Reseach*. 20(4), 695-705.
7. Azimzadeh, H. R.; Ekhtesasi, M. R.; & M. Hatami, 2001. Study the effect of physical and chemical properties of soil on wind erosion index and providing the model to predicting it in Yazd-Ardakan plain, *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources of Gorgan*, 1, 20-24. (In Persian)
8. Azimzadeh, H. R., & M. R. Ekhtesasi., (2004). Threshold velocity relation to soil physical and chemical properties in Iranian central plain (case study: Yazd- Ardakan plain). *Iranian journal of natural resources*. 57(2), 1-11. (In Persian)
9. Bayati, H., & A. Njafi., (2013). Performance comparison artificial neural networks with regression analysis in trees trunk volume estimation. *Forest and Wood Products*. 66(2), 177-191. (In Persian)
10. Behnia, N.; Erfanifard, S. F.; Fallah Shamsi, S. R.; & S. A. A. Moosavi, 2016. Efficiency of co-kriging method to map the biometric characteristics of wild Pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) woodlands in Fars province, *Journal of Zagros Forests Researches*, 2(2), 27-46. (In Persian)
11. Dehbashian, M., & S. H. Zahiri., (2009). Training the artificial neural network MLP in data classification using the GSA method. *Iranian journal of electrical engineering and computer engineering*. 4, 267-274. (In Persian)
12. Esmaili, O.; Tajrishy, M.; & P. Daneshkar Arasteh, 2006. Results of the 50 year ground-based measurements in comparison with satellite remote sensing of two prominent dust emission sources located in Iran. Remote sensing of clouds and the atmosphere XI, edited by James R. Slusser, Klaus Schafer, Adolfo comeron. PP: 636209-636209.

13. Faghih, H., 2010. Evaluating Artificial Neural Network and its Optimization Using Genetic Algorithm in Estimation of Monthly Precipitation Data (Case Study: Kurdistan Region). , *Journal of Water and Soil Science*, 14(51), 27-44. (In Persian)
14. Freeman, E. A., & G. G. Moisen., (2007). Evaluating kriging as a tool to improve moderate resolution maps of forest biomass. *Environmental monitoring and assessment*. 128, 395-410.
15. Gholamali zadeh ahangar, A.; Sarani, F.; Hashemi, M.; & A. Shaabani, 2003. Comparison of linear regression, geostatistical and artificial neural network in the modeling of organic carbon in dry lands of Sistan plain, *Journal of soil and water (Agricultural Science and Technology)*, 28(6), 11250-11260.
16. Habashi, H., 2007. Relationship soil properties and spatial pattern of trees and groups of trees in mixed Beech in the Shastkalate mixed Fagetum o Gorgan, PhD thesis of Forestry, Tarbiat Modarres University, 139 Pp. (In Persian)
17. Han, Q.; Jianjang, Q.; Kecun, Z.; Ruiping, Z.; Kinghe, N.; & L. Kongtai, 2009. Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China, *Geomorphology*, 104, 230-237.
18. Hasani Pak, A. A., 2010. Geostatistics. Tehran University Press, 314 p. (In Persian)
19. Hosseini, E.; Gallichand, J.; & J. Caron, 1997. Comparison of several interpolation for smoothing hydraulic conductivity data in south west of Iran, *American society of association executives*, 36(6), 1687-1693.
20. Jianbing, W.; Boucher, A.; & T. Zhang, 2008. A SGeMS code for pattern simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM, *Computers and Geosciences*, 4(12), 1863 - 1876.
21. Karim zadeh, H. R., 2005. Quantification the wind-eroded sediments in east region of Isfahan, *Journal of Forest and Rangeland*, 70, 45-54. (In Persian)
22. Kisi, O., 2006. Daily pan evaporation modelling using a neuro-fuzzy computing technique, *Journal of Hydrology*, 329, 636-646.
23. Kumar, M.; Bandyopadhyay, A.; Raghuwanshi, N. S.; & R. Singh, 2008. Comparative study of conventional and artificial neural network-based ET0 estimation models, *Journal irrigation science*, 26(6), 531-545.
24. Lark, R. M.; Ander, E. L.; Cave, M. R.; Knights, K. V.; Glennon, M. M.; & R. P. Scanlon, 2014. Mapping trace element deficiency by co-kriging from regional geochemical soil data: A case study on cobalt for grazing sheep in Ireland, *Geoderma*, 226, 64-78.
25. Laura, A. D., & E. B. Daniel., (2009). Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions, *Land Degradation and Development*, 20(1), 14-21.
26. Liu, L.; Shi, P.; Xia Hu, X.; Liu, T.; Guo, L.; Zhang, X.; Yan, Y.; Lv, Y.; Sun, B.; Zhang, G.; Zhang, X.; Zhang, W.; Yang, Y.; Wang, J.; & Y. Xiong, 2011. Natural factors influencing blown sand hazards in Beijing, *International Journal of Disaster Risk Science*, 2, 23-31.
27. Mahmoodabadi, M., & H. Rajabpour., (2017). Study on the effect of initial soil moisture content on wind erosion rate using a laboratory wind tunnel, *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(2), 167-183.
28. Mc Brathney, A. B.; Santos, M. L. M.; & B. Minasny, 2003. On digital soil mapping, *Geoderm*, 117 (1-2) , 3-52.
29. Miri, A.; Ahmadi, H.; Ekhtesasi, M. R.; Panjekeh, N.; & A. Ghanbari, 2009. Environmental and socio economic impacts of dust storms in Sistan region, Iran, *International journal of environmental studies*, 66, 343-355.
30. Mohammadi, J., 2001. Review of the geostatistical principles and its application in soil science, *Journal of Soil and Water*, 15, 99-121. (In Persian)
31. Myers, D. E., 1994. Spatial interpolation: an overview, *Geoderma*, 62(1), 17-28.

32. Piri Sahragard, H., & M. A. Zare Chahouki., (2015). An evaluation of predictive habitat models performance of plant species in Hoze soltan rangelands of Qom province. *Ecological Modeling*. 309-310, 64-71.
33. Piri, H., & H. Ansari., (2013). Study of Sistan plain drought and its impact on wetlands international Hamoon. *Scientific journal of wetlands*. 15, 63-74. (In Persian)
34. PourKhosravani, M.; Vali, A.; & T. Mahmoudi, 2015. Comparative analysis of artificial neural networks and statistical models to estimate the volume of Nebkha sediments, *Quantitative geomorphology researches*, 3(4), 17-29. (In Persian)
35. Refahi, H., 2005. Wind erosion and controlling it. Fourth Edition, Tehran. Publishing and printing of Tehran University. (In Persian)
36. Sagbas, A., & T. Karamanlioglu., (2011). The application of artificial neural networks in the estimation of wind speed: A case study. In proceedings of the 6th international advanced technologies symposium (IATS'11), May 16-18, Elazig, Turkey, PP, 16-18.
37. Saremi Naeini, M. A.; Zareiyan jahromi, M.; Ekhtesasi, M. R.; & A. Mohammadian behbahani, 2007. Zoning wind erosion threshold velocity values using geostatistics, Proceedings of the tenth congress of soil sciences of Iran, 1136-1137. (In Persian)
38. Shoji, T., 2006. Statistical and geostatistical analysis of wind: a case study of direction statistics, *Computers & geosciences*, 32(8), 1025-1039.
39. Solouki, H. R.; Khamechian, M.; Hafezi Moghadas, N.; & S. K. Alavipanah, 2008. Study of wind erosion in Sistan plain and its impact on engineering properties of soils, *Journal of geological society of engineering of Iran*, 2, 13-26. (In Persian)
40. Stout, J. E., & T. M. Zobeck., (1996). Establishing the threshold condition for soil movement in wind-eroding fields. Proceedings of the international conference on air pollution from agricultural operations, MidWest Plan Service C-3, Fe 7-9, Kansas City.
41. Webb, N. P.; Galloza, M. S.; Zobeck, T. M.; & J. E. Herrick, 2016. Threshold wind velocity dynamics as a driver of aeolian sediment mass flux, *Aeolian Research*, 20, 45-58.
42. Yadav, D., & N. Veena Sharma., (2010). Artificial neural network based hydroelectric generation modelling. International. *Journal of Applied EnginearingReaserch*. 1(3), 343-359.
43. Zare Chahouki, M. A.; Zare Ernani, M.; Zare Chahouki, A.; & L. Khalasi Ahvazi, 2010. Application of spatial statistical methods in predictive models of plant species habitat, *Journal of Arid Biom Scientific and Research*, 1(1), 13-23. (In Persian)

Accuracy Assessment of Geo-Statistics and Artificial Neural Networks Methods to Estimate Threshold Wind Velocity: A Case of Jazinak Region, Sistan Plain

Manijeh Arbab: MS.c in Desertification, Range and Watershed Department, Faculty of Water & Soil, University of Zabol, Zabol

Ahmad Pahlavanravi: Associate professor, Range and Watershed Department, Faculty of Water & Soil, University of Zabol, Zabol

Hossein Piri Sahragard¹: Assistant professor, Range and Watershed Department, Faculty of Water & Soil, University of Zabol, Zabol

Meysam Amiri: MS.c, Hamoun Wetland international institute, University of Zabol, Zabol

Article History (Received: 15. 6. 2018

Accepted: 2019/02/14)

Extended abstract

1- Introduction

Threshold wind velocity is a major influencing variable in transportation of soil particles and dust production. It is considered as an important component in many theoretical equations and numerical models due to its importance in wind erosion studies (Stout & Zobeck, 1996). The wind tunnel method (fixed and portable), empirical relationships and sediment traps are the common methods to estimate the threshold wind velocity (Refahi, 2005). Estimation of this variable can assist researchers to recognize critical points, in addition to providing suitable activities to prevent depletion of limited resources in desert region. This study aimed at comparing the accuracy of geo-statistical techniques (Kriging and Co-kriging) and artificial neural network model, estimating the threshold of wind velocity, selecting more accurate methods to be used in wind erosion combating projects, as well as identifying more important variables in threshold wind velocity in the Sistan region.

2- Methodology

The study site with an area of 60 km² lies within 30° 49' 43" to 30° 54' 49" N latitude and 61° 30' 22" to 61° 37' 05" E between Sistan river and Fourth Chah-Nimeh reservoir which supplies drinking water of Zabol and Zahedan cities. Threshold wind velocity was measured using wind tunnel in 60 points of the topsoil. Soil sampling was done at the same points. Soil dataset was checked for normal distribution, then threshold wind velocity estimation and validation of obtained results, were respectively done by using the Kriging and Co-kriging and cross validation methods. The multi-layered perceptron model was implemented and obtained results were evaluated using root mean squared error statistics and coefficient of determination, after data standardization and determining the model architecture using trial and error method.

3- Results

Based on the results, among the geo-statistic methods, co- kriging interpolation method with spherical variogram model in comparison with kriging method was determined as an optimal model for the estimation of the threshold wind velocity ($R^2= 0.60$ and $RMSE= 0.45$). Study of the importance of effective variables also indicated that the variables related to soil texture (clay, silt, sand percents), acidity, salinity, organic matter percent, average weight of particles diameter and the percentage of surface soil gravel were the main contributors to the accuracy of predictive models and hence determining the threshold wind velocity in the study area. The overall assessment of the models used showed that the lower error rate and therefore, the more precise estimation of thresholds

¹ Corresponding Author: hopyry@uoz.ac.ir

wind velocity erosion in the present study, were carried out by multi-layer perceptron model with three layers and three neurons per layer which utilizes Gaussian' transfer function and Levenberg-Marquardt training rule.

4- Discussion & Conclusions

According to the results, the Co-kriging method enabled to perform interpolation with high precision because it utilizes an auxiliary variable and uses covariance between two variables for interpolation (Lark et al., 2014). Furthermore, some capabilities such as increasing data processing power, problems related to measuring some variables, as well as, the correlation between measured variables and the availability of various software tools has increased the usage of this estimation method in various environmental studies (Amini et al., 2002). Performance superiority of the Co-kriging method compared to the Kriging method, has also been reported by Behnia et al. (2016). Likewise, a set of soil characteristics has the greatest effect on the threshold wind velocity in the Sistan region. In line with this findings, it has been reported that the soil crust properties affect the threshold wind velocity; as a result, the threshold value varies in soils with different characteristics (Webb et al., 2016). According to the findings of this research, it is stated that due to utilization of the pair of input and output patterns, artificial neural networks are as powerful tool in various studies related to natural resources. In general, it can be said that through the development of vegetation using native species in the southern and western parts of the study area can increase the threshold of wind erosion in these areas in addition to reducing soil erodibility and its consequences.

Key Words: Sistan plain, Geostatic, Threshold wind velocity, artificial neural networks.