

نقشه برداری رقومی پایداری خاکدانه‌ها و تأثیر عملیات حفاظت خاک روی

آنها در منطقه چاهماری بهبهان

- ❖ **منیژه رضوی حسین آباد؛** دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.
- ❖ **علیرضا امیریان چکان؛** استادیار گروه مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.
- ❖ **محمد فرجی*؛** استادیار دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان، ایران.
- ❖ **جمال موسویان؛** کارشناس ارشد اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خوزستان، اهواز، ایران.

چکیده

یکی از روش‌های مناسب جهت بررسی تأثیر عملیات حفاظت خاک و مدل‌سازی فرسایش آبی خاک، بررسی پایداری خاکدانه‌ها و تغییرات مکانی آن است. تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها و تغییرات مکانی آنها در یک منطقه تحت عملیات درخت‌کاری و کنتورفارو و منطقه‌ای مشابه و مجاور آن به عنوان منطقه شاهد در منطقه چاهماری بهبهان در استان خوزستان انجام شد. تعداد ۱۵۰ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری برداشته شد و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک خشک (MWD_d) و الک تر (MWD_w) تعیین گردید. برای تهیه نقشه توزیع مکانی MWD از تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) استفاده گردید. برای این منظور، متغیرهای محیطی دارای ارتباط با MWD از تصویر سنجنده لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج و به منظور برقراری ارتباط بین این متغیرها و MWD از مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و درخت رگرسیون (RT) استفاده گردید. نتایج نشان داد اقدامات کنترلی انجام شده در منطقه روی MWD_d تأثیر معنی‌داری روی MWD_w تأثیر معنی‌داری نداشت. آنالیز همبستگی نشان داد بین پارامترهای استخراج شده از DEM با MWD_w همبستگی معنی‌داری وجود نداشت ولی بین برخی پارامترهای استخراج شده از DEM با MWD_d همبستگی معنی‌داری وجود داشت. همچنین همبستگی MWD_d و MWD_w با اکثر پارامترهای تصویر ماهواره‌ای معنی‌دار بود. کارایی مدل‌های ANN و RT در تخمین MWD_w نسبتاً بالا و تا حدودی مشابه ولی در تخمین MWD_d کارایی ANN بالاتر از RT بود. به طور کلی نتایج نشان داد روش‌های نقشه‌برداری رقومی رویکردی مناسب برای تخمین و پهنه‌بندی MWD می‌باشند.

کلید واژگان: درخت رگرسیون، شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل‌سازی مکانی، نقشه‌برداری رقومی خاک.

۱. مقدمه

فرسایش خاک یکی از مشکلات جدی خاک در ایران است [۱۴]. در اکثر کشورهای دنیا و از جمله ایران برای مبارزه با فرسایش آبی اقدامات حفاظتی مختلفی انجام می‌شود که اطلاع از میزان مؤثر بودن این اقدامات در مدیریت فرسایش خاک و انجام اقدامات بعدی بسیار مهم و مفید است. برای این منظور می‌توان میزان فرسایش آبی خاک را مدتی بعد از اجرای عملیات حفاظت خاک اندازه‌گیری نمود و میزان آن را با فرسایش مناطق مناطق مجاور و یا با فرسایش همان منطقه قبل از اجرای طرح مقایسه نمود. اندازه‌گیری مستقیم فرسایش آبی خاک کاری پرهزینه و وقت‌گیر است. بنابراین و به عنوان یک راهکار جایگزین، می‌توان تغییرات خواصی از خاک که اندازه‌گیری آن‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر است و دارای ارتباط نزدیکی با فرسایش‌پذیری خاک هستند را بعد از اجرای عملیات حفاظتی بررسی نمود. خصوصیات آبی از خاک مثل سرعت و ظرفیت نفوذ آب، بافت و ساختمان، درصد شن، درصد شن ریز، سیلت و کربنات کلسیم و متغیرهای اقلیمی و زیست محیطی مختلف مانند زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، پستی و بلندی، شبکه زهکشی طبیعی و شرایط آب و هوایی در فرسایش‌پذیری خاک مؤثرند [۸]. پایداری خاکدانه‌ها نیز از عوامل بسیار مهم در فرسایش و تولید رسوب است [۳۹، ۴۲] که به عوامل متعددی از جمله بافت، ساختمان، ماده آلی و کربنات کلسیم خاک بستگی دارد. پایداری خاکدانه‌ها را می‌توان توانایی خاکدانه‌ها به مقاومت در برابر فروپاشی، زمانی که تحت تنش نیروی‌های مخرب قرار می‌گیرند، تعریف کرد [۲۲].

برای کاهش و کنترل فرسایش خاک و درک بهتر تأثیر عملیات حفاظت خاک، نیاز به داده‌های کمی، پیوسته و قابل اعتماد از پایداری خاکدانه‌ها است. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) به دست آمده به روش‌های الک خشک و تر شاخص‌هایی جهت ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها هستند [۱۵]. به دست آوردن تعداد زیاد داده از این شاخص‌ها

کاری وقت‌گیر و پرهزینه است. از طرفی اغلب نقشه‌های سنتی خاک به دلایلی از جمله کوچک بودن مقیاس و نشان ندادن تغییرات مکانی درون واحدها، از کیفیت مناسبی برای پایش و بررسی فرسایش خاک و پایداری خاکدانه‌ها برخوردار نیستند. نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) رویکردی ارزان و مناسب برای برطرف کردن مشکلات نقشه‌های سنتی خاک می‌باشد. در این رویکرد که بر اساس رابطه اسکورپن (SCORPAN) می‌باشد [۳۴] ویژگی‌ها و کلاس‌های خاک بر اساس همبستگی آن‌ها با داده‌های کمکی به دست آمده از منابعی مانند تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع، با استفاده از مدل‌های تجربی به صورت کمی تخمین زده می‌شوند [۲۶].

در مطالعات متعددی از روش‌های سنتی برای تخمین و مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها استفاده شده است ولی در مطالعات کمی از روش‌های DSM برای مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها استفاده شده است. در مطالعه انجام شده در خاک‌های جنگلی استان گیلان از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت برآورد پایداری خاکدانه‌ها استفاده شد و نتایج نشان داد مدل با متغیرهای ورودی pH، جرم مخصوص حقیقی، سیلت و مقاومت مکانیکی خاک بهترین مدل برای برآورد GMD بود [۲]. در بررسی عملکرد سیستم‌های فازی عصبی، مدل شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چندگانه و مدل خطی تعمیم یافته در پیش‌بینی پایداری خاکدانه‌ها در یک حوضه کوهستانی در جنوب غرب ایران مشخص شد که مدل‌های شبکه عصبی و مدل فازی عصبی عملکرد بهتری نسبت به روش رگرسیونی در برآورد پایداری خاکدانه‌ها داشتند [۸]. در بررسی انجام شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره جهت تخمین پایداری خاکدانه‌های بزرگتر از ۲۵/ میلی‌متر در کاربرهای مختلف در استان سیستان و بلوچستان، مشخص گردید نوع کاربری و نوع و مقدار کاتیون‌های فاز تبادل و محلول خاک سهم بیشتری را در تغییرپذیری شاخص پایداری خاکدانه‌ها داشتند [۴۰]. در

تحت عملیات کنترل فرسایش خاک در منطقه چاه‌ماری بهبهان استان خوزستان انجام شد. همچنین تأثیر عملیات اجرا شده در منطقه برای کنترل فرسایش خاک روی پایداری خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

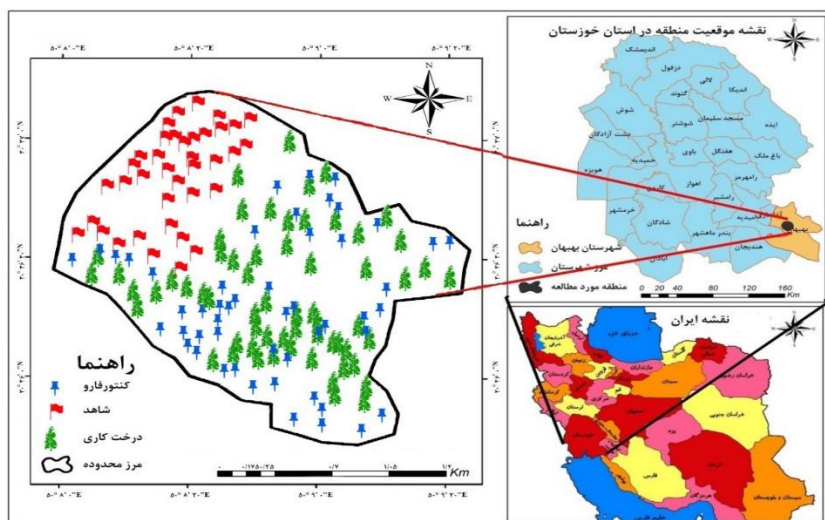
۲. روش‌شناسی

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه چاه‌ماری با مساحتی معادل ۱۳۵۰ هکتاری در ۱۵ کیلومتری غرب بهبهان در استان خوزستان، بین بین طول شرقی ۱۰' ۵۰° تا ۵' ۵۰° و عرض شمالی ۳۷' ۳۰° تا ۳۴' ۳۰° قرار دارد (شکل ۱). منطقه به صورت تپه ماهوری بوده و حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۴۹۰ متر و حداقل ارتفاع ۳۷۰ متر و شیب عمومی منطقه بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است. متوسط بارندگی سالیانه ۳۳۵ میلی‌متر، حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق سالیانه منطقه به ترتیب ۵۰/۵ و ۲- و میانگین دمای سالیانه ۲۴/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. گیاهان منطقه با توجه به خصوصیات مرفولوژیکی و ژنتیکی در فرم‌های زیستی درختچه‌ها و درختان، بوته‌های، گندم‌بیان، علفی‌ها و بقولات مشخص شده‌اند. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌شناسی زاگرس چین خورده قرار گرفته است و سازند منطقه بختیاری می‌باشد.

بررسی انجام شده در منطقه دهدز استان خوزستان، ارتباط بالای پارامترهای استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با پایداری خاکدانه‌ها گزارش گردید [۲۸]. نتایج ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در منطقه جنوب غرب آمریکا اثبات شد که پایداری خاکدانه‌ها مقاومت خاک را در مقابل فشارهای خارجی، به خصوص هنگامی که خاک مرطوب می‌باشد، افزایش می‌دهد و مانع از تخریب و هدررفت خاک می‌شود [۳۶]. در مطالعه‌ای پایداری خاکدانه‌ها در فلات چین مورد بررسی قرار گرفت و دریافتند که مواد آلی خاک هم در ایجاد و پیدایش و هم در پایداری خاکدانه‌ها اثر مثبت دارند [۱۲].

با وجود اینکه مطالعات نسبتاً زیادی روی پایداری خاکدانه‌ها در ایران و کشورهای مختلف دنیا انجام شده است، ولی تأثیر عملیات کنترل فرسایش خاک بر توزیع مکانی پایداری خاکدانه‌ها و استفاده از روش‌های نقشه برداری رقومی برای این منظور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در استان خوزستان هم که شرایط اقلیمی و نوع سازندهای زمین‌شناسی آن باعث حساسیت بیشتر خاک‌ها به فرسایش گردیده است، مطالعات کمی با استفاده از روش‌های DSM در مناطق اجرای طرح‌های کنترل فرسایش انجام گرفته است. بنابراین این تحقیق با هدف بررسی کارایی روش‌های نقشه برداری رقومی خاک در تخمین و مدل‌سازی مکانی پایداری خاکدانه‌ها در مناطق



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و عملیات حفاظت خاک

$$\sum_{i=1}^n \bar{x}_w = MWD$$

معادله ۱

در این رابطه \bar{x} میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک، W_i نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک، و n تعداد الک‌ها است.

۴،۲. نقشه‌برداری رقومی و مدل‌سازی پایداری

خاکدانه‌ها

در نقشه‌برداری رقومی خاک علاوه بر داده‌های خاک به داده‌های کمکی که از منابع دیگر استخراج می‌شوند و با خواص خاک مرتبط هستند نیز نیاز است [۳۴]. این داده‌های کمکی در واقع نماینده فاکتورهای خاکسازي مثل توپوگرافی، موجودات زنده، مواد مادری و اقلیم هستند. در منطقه مورد مطالعه به منظور تهیه نقشه پیوسته پایداری خاکدانه‌ها، داده‌های کمکی از دو منبع یعنی داده‌های سنجش از دور و مدل رقومی ارتفاع استخراج گردیدند. داده‌ها و اطلاعات استخراج شده از تصاویر سنجش از دور، می‌توانند بیانگر کاربری اراضی، نوع و تراکم پوشش گیاهی و مواد مادری باشند. ویژگی‌های زمین که از مدل رقومی ارتفاع به دست آمد و روی پایداری خاکدانه‌ها مؤثر هستند، بیانگر سطوح فرسایشی یا رسوبی و محل‌های تجمع آب و مواد هستند که می‌توانند به طور مستقیم و غیرمستقیم با خواص خاک مرتبط باشند [۴۱].

در این تحقیق پارامترهای زمین‌نما، از قبیل موقعیت میانی شیب، ارتفاع، مساحت اصلاح شده حوضه، شاخص خیزی، شیب، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، عمق دره و شیب حوضه از DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. از نرم افزار ساگا (SAGA) برای محاسبه و استخراج این متغیرها استفاده گردید [۲۱]. همچنین در این بررسی با استفاده از تصویر استخراج شده از سنجده (OLI) لندست ۸ با قدرت تفکیک ۳۰ متر باندهای طیفی

۲،۲. نمونه‌برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی

به منظور نقشه‌برداری رقومی پایداری خاکدانه‌ها و بررسی تأثیر عملیات کنترل فرسایش روی پایداری خاکدانه‌ها، یک منطقه که عملیات کنترل فرسایش خاک شامل کنتور فارو و درخت‌کاری حدود ۱۵ سال پیش توسط اداره منابع طبیعی در آن اجرا شده بود و منطقه‌ای در مجاور آن با زمین‌شناسی و توپوگرافی نسبتاً مشابه به عنوان شاهد در نظر گرفته شد (شکل ۱). تعداد ۱۵۰ نمونه خاک دست نخورده از عمق ۵-۰ سانتی‌متر به صورت تصادفی برداشت شد. به طور هم‌زمان موقعیت نقاط با دستگاه GPS ثبت گردید. نمونه‌های خاک در هوای آزاد خشک و به آزمایشگاه انتقال داده شدند و برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بخشی از نمونه‌ها کوبیده شد و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. برای تعیین بافت خاک از روش هیدرومتر و برای جداسازی اجزاء شن از الک استفاده شد. جرم مخصوص ظاهری (pb) به روش کلوخه اندازه‌گیری گردید. از روش والکلی بلاک برای اندازه‌گیری میزان ماده آلی استفاده شد. مقدار آهک خاک بر اساس مقدار مواد خنثی شونده (TNV) از واکنش خنثی-سازی با اسید کلریدریک و سپس تیتراسیون با سود (NaOH) اندازه‌گیری گردید [۱۷]. در این تحقیق EC خاک‌ها با استفاده از دستگاه EC متر در عصاره یک به پنج و pH گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر اندازه‌گیری گردید [۳۷].

۳،۲. اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها

برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها به روش روش الک تر و الک خشک عمل گردید. در نهایت با استفاده از رابطه (۱) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها برای هر دو روش الک‌تر و خشک به دست آمد.

۵.۲. تجزیه و تحلیل‌های آماری و اعتبارسنجی

مدل‌ها

جهت ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیون درختی و شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین پایداری خاکدانه‌ها از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید (به ترتیب روابط ۲، ۳ و ۴). جهت بررسی تأثیر عملیات اصلاحی و حفاظتی بر پایداری خاکدانه‌ها و مقایسه پایداری خاکدانه‌ها در منطقه شاهد با منطقه تحت عملیات حفاظت خاک، از آنالیز واریانس یک طرفه، آزمون دانکن و آزمون t استفاده گردید.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{z}_i - \bar{z}_i]^2}{\sum_{i=1}^n [z_i - \bar{z}_i]^2} \quad \text{معادله ۲}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{z}_i - z_i| \quad \text{معادله ۳}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i)^2} \quad \text{معادله ۴}$$

در این روابط \hat{z}_i و z_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی هستند، \bar{z}_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است و n تعداد مشاهدات است.

۳. نتایج

همبستگی بین پایداری خاکدانه‌ها با خواص خاک: ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص پایداری خاکدانه‌ها با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است. پایداری خاکدانه‌ها در حالت تر دارای همبستگی معنی‌دار با ماده آلی، سیلت، نفوذپذیری و سیلت+شن ریز بود و در حالت خشک با شن، رس، ماده آلی، سیلت، نفوذپذیری، سیلت+شن ریز و EC دارای همبستگی معنی‌دار بود. این نتایج بیانگر آن است که نسبت به ویژگی‌های

تصویر (B1, B2, B3, B4, B5, B7) و شاخص‌های مختلف مثل NDVI و شاخص کرنات (B3/B2) محاسبه گردید. جهت برقراری ارتباط بین متغیرهای کمکی و پایداری خاکدانه‌ها از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و درخت رگرسیون (RT) استفاده شد. مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی یک روش ناپارامتری است که اولین بار توسط بریمن معرفی گردید [۹]. این روش‌ها از ساختار درخت مانند قدرتمندی برای پیدا کردن روابط بین ورودی‌ها و متغیر هدف استفاده می‌کنند. درختان تصمیم‌گیری در این ساختار از گره‌ها و برگ‌ها تشکیل شده‌اند. داده‌های آموزشی در گره‌ها طوری تقسیم می‌شوند که درون گره‌ها تا حد امکان همگن ولی تفاوت بین گره‌ها تا حد امکان زیاد باشد. تقسیم‌بندی داده‌ها در هر گره بر اساس قواعدی است که از ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر هدف به دست می‌آید. در نهایت بر اساس این روابط، تصمیم‌نهایی که همان پیش‌بینی متغیر مورد نظر است در گره‌های انتهایی که همان برگ‌ها هستند، گرفته می‌شود. علاوه بر درخت رگرسیون، در این تحقیق از پرسپترون چند لایه که یکی از شناخته‌ترین انواع شبکه عصبی مصنوعی است، استفاده شد. شبکه پرسپترون شامل یک یا چند لایه پنهانی، یک لایه ورودی و یک لایه خروجی است. هر لایه ممکن است از نرون‌های مختلفی تشکیل شده باشد که این موضوع به نوع کار آن‌ها بستگی دارد [۳۰]. در این تحقیق از شبکه‌ای با یک لایه مخفی با تابع فعال سازی سیگموئید و یک لایه خروجی با تابع فعال‌سازی خطی مورد استفاده قرار گرفت. ورودی‌های هر دو مدل مورد استفاده متغیرهای محیطی کمکی استخراج شده از DEM و تصویر ماهواره‌ای و خروجی آن‌ها MWD بود. در نهایت با وارد کردن متغیرهای محیطی استخراج شده از همه پیکسل‌های منطقه به مدل‌های پیش‌بینی کننده، نقشه پیوسته پایداری خاکدانه‌ها با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه گردید. در این تحقیق مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار JMP انجام گرفت.

دارد. همچنین نتایج نشان داد پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک ارتباط بیشتری با خواص خاک داشت.

فیزیکی، خواص شیمیایی تأثیر کمتری بر پایداری خاکدانه‌ها داشته‌اند که با نتایج برخی مطالعات دیگر [۳۲] مطابقت

جدول ۱. ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص پایداری خاکدانه‌ها و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

	EC	pH	سیلت+شن ریز	نفوذپذیری	سیلت	ماده آلی	آهک	رس	شن
MWD _w	-۰/۰۴۶	۰/۰۱۵	۰/۱۹۴*	۰/۲۸۰**	۰/۲۶۹**	۰/۲۷۴**	۰/۱۴۱	-۰/۲۵۷	۰/۱۷۹*
MWD _d	-۰/۲۶۱**	-۰/۰۲۷	۰/۲۲۷**	۰/۲۲۹**	-۰/۲۹۴**	۰/۲۳۳**	۰/۰۸۱	-۰/۳۶۳**	۰/۴۱۹**

* و ** به ترتیب تفاوت معنی دار در سطح ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهد.

MWD_d و MWD_w به ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به دست آمده به دو روش الک تر و خشک است.

متغیرهای استخراج شده از DEM، فقط پنج متغیر جهت شیب، فاصله عمودی تا شبکه کانال، عمق دره، موقعیت نسبی شیب و مساحت اصلاح شده حوضه با پایداری خاکدانه‌ها همبستگی داشتند. همچنین نتایج بیانگر این است که هیچ کدام از این متغیرهای کمکی با پایداری خاکدانه‌ها در حالت تر همبستگی نداشتند.

۱.۳. همبستگی بین پایداری خاکدانه‌ها با

متغیرهای کمکی

نتایج همبستگی بین برخی پارامترهای به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع با پایداری خاکدانه‌ها به دست آمده از به دو روش تر و خشک در جدول (۲) نشان داده شده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که با وجود تعداد زیاد

جدول ۲. ضریب همبستگی بین پارامترهای به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و پایداری خاکدانه‌ها

MWD _d	MWD _w	پارامترهای سرزمین
-۱/۹۸*	۱/۰۸۷	جهت شیب
۲/۲۲**	۱/۰۰۹	فاصله عمودی تا شبکه کانال
۲/۹۱**	۱/۰۱۹	عمق دره
۲/۴۵**	۱/۰۴۰	موقعیت نسبی شیب
۲/۲۸**	-۱/۰۴۹	مساحت اصلاح شده

* و ** به ترتیب تفاوت معنی دار در سطح ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهد.

MWD_d و MWD_w به ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به دست آمده به دو روش الک تر و خشک است.

با پایداری خاکدانه‌ها به دست آمده به دو روش همبستگی معنی داری دارند. تنها استثنا همبستگی بین باند ۱۱ و MWD_d است، که معنی دار نشده است.

همبستگی بین متغیرهای استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای با پایداری خاکدانه‌ها در دو حالت تر و خشک در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد همه متغیرهای کمکی به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای

جدول ۳. ضریب همبستگی بین شاخص‌های به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و پایداری خاکدانه‌ها

MWD _d	MWD _w	داده‌های ماهواره‌ای
/۱۸۱*	/۱۹۷*	باند ۶
/۹۸۵**	/۱۹۸*	باند ۷
/۰۷۱	/۱۶۸*	باند ۱۱
/۱۸۹*	/۱۵۶*	شاخص کانی‌های رس
/۲۲۳**	/۲۳۹**	شاخص گچ
/۲۲۵**	/۲۰۲*	شاخص شوری
-/۲۲۵**	-/۲۰۲*	شاخص نرمال شده پوشش گیاهی
-/۲۲۵**	-/۲۰۲*	شاخص پوشش گیاهی خاک تعدیل شده
-/۲۲۷**	-/۱۸۵*	شاخص پوشش گیاهی نسبی
/۲۲۵**	-/۲۲۰**	شاخص نرمال شده شوری

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهد.

MWD_d و MWD_w به ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به دست آمده به دو روش الکترونیک و خشک است.

۲.۳. شاخص پایداری خاکدانه‌ها

آماره‌های توصیفی پایداری خاکدانه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. MWD_w با میانگین ۱/۰۱ میلی‌متر از ۰/۴ تا ۱/۶۷ میلی‌متر متغیر است. این مقادیر برای MWD_d خیلی بیشتر است؛ به طوری که میانگین آن ۵/۴۶ میلی‌متر

و دامنه تغییرات آن از ۱/۲۲ تا ۸/۵۵ میلی‌متر متغیر است. میانگین آن‌ها در حالت تر در حد پایداری متوسط و در حالت خشک در حد خیلی پایدار بود. ضریب تغییرات و انحراف معیار بیانگر تغییرات بیشتر MWD_d نسبت به MWD_w می‌باشد. مقادیر چولگی بیانگر انحراف نسبتاً کم توزیع داده‌های MWD_w و MWD_d از توزیع نرمال است.

جدول ۴. پارامترهای آماری مربوط به شاخص پایداری خاکدانه‌ها

ویژگی	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار (mm)	چولگی	میانگین (mm)	حداکثر (mm)	حداقل (mm)
MWD _w	۲۳	۰/۲۴	-۵۳۴	۱/۰۱	۱/۶۷	۰/۴۰
MWD _d	۲۵	۱/۴۱	-۳۵۴	۵/۴۶	۸/۵۵	۱/۲۲

MWD_d و MWD_w به ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به دست آمده به دو روش الکترونیک و خشک است

۳.۳. تأثیر عملیات اصلاحی و حفاظتی روی

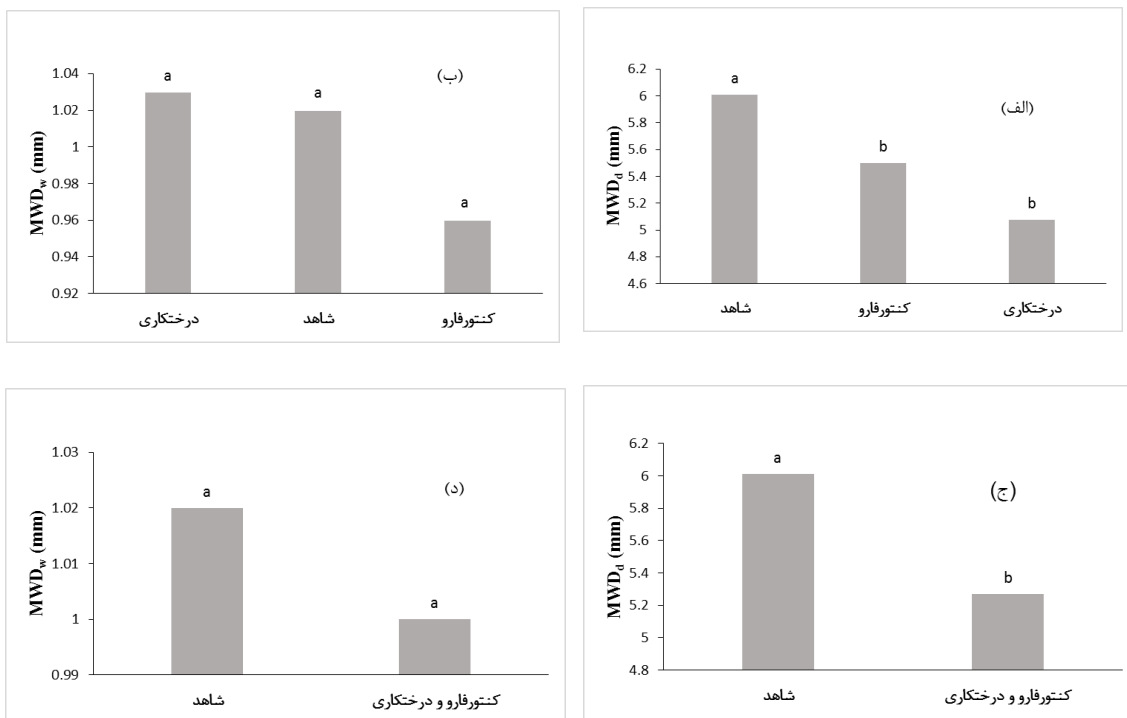
شاخص پایداری خاکدانه‌ها

نتایج آزمون تجزیه واریانس یک طرفه نشان داد که بین سه تیمار مختلف (شاهد، درخت کاری و کنتور فارو) از نظر MWD_w تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی از نظر مقدار MWD_d تفاوت معنی‌داری وجود داشت (شکل ۲). برای مشخص کردن این که این تفاوت بین چه

تیمارهایی وجود دارد از آزمون دانکن استفاده شد. نتایج آزمون دانکن نشان داد MWD_d در منطقه شاهد با منطقه درخت کاری و کنتور فارو اختلاف معنی‌داری داشت ولی بین دو منطقه درخت کاری و کنتور فارو این تفاوت معنی‌دار نبود. همچنین نتایج نشان داد بین سه تیمار مورد بررسی اختلاف معنی‌داری از نظر MWD_w وجود نداشت (شکل ۲). با در نظر گرفتن عملیات درخت کاری و

عملیات حفاظت خاک اختلاف معنی داری وجود داشت. ولی این تفاوت از نظر MWD_w معنی دار نبود (شکل ۲).

کنترفارو به عنوان یک تیمار، از آزمون t برای بررسی تأثیر این تیمار روی پایداری خاکدانه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد بین MWD_d در منطقه شاهد با منطقه اجرای

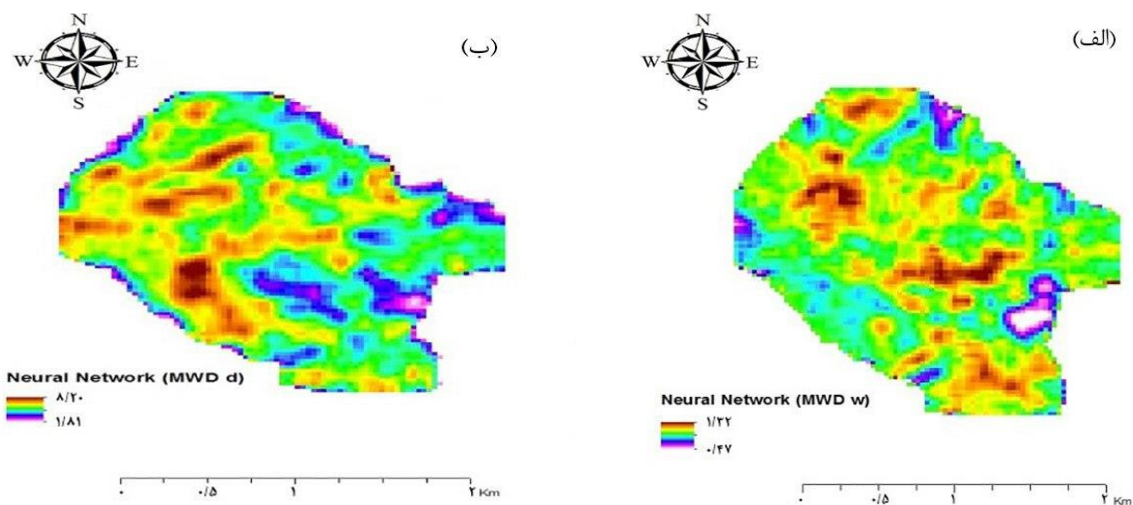


شکل ۲. مقایسه میانگین پایداری خاکدانه‌ها (MWD) در منطقه عملیات درخت کاری و کنتر فارو با منطقه شاهد با استفاده از آزمون دانکن در حالت خشک (الف) و در حالت تر (ب)، مقایسه میانگین MWD در مناطق تحت عملیات حفاظتی (کنتر فارو و درخت کاری) با مناطق بدون عملیات حفاظتی (شاهد) با استفاده از آزمون t در حالت خشک (ج) و در حالت تر (د).

منطقه دیده می‌شود. مقادیر کم و متوسط MWD_w بیشتر در قسمت‌های جنوب شرقی و جنوب غربی دیده می‌شود. بر اساس شکل (۳ ب)، بیشترین پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک در بخش‌های غربی و جنوب غربی منطقه و کمترین مقادیر آن مربوط به بخش‌های شرقی منطقه است. مقادیر متوسط بیشتر در مناطق شمالی دیده می‌شوند.

۴.۳. مدل سازی مکانی پایداری خاکدانه‌ها

با توجه به کارایی بهتر مدل شبکه عصبی مصنوعی، فقط نتایج پهنه‌بندی توزیع مکانی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از این مدل ارائه شده است (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهد که توزیع مکانی MWD_w از روند منظمی پیروی نمی‌کند و بیشترین مقادیر آن در قسمت‌های مرکزی



شکل ۳. نقشه توزیع مکانی پایداری خاکدانه‌ها (MWD) در حالت تر (الف) و در حالت خشک (ب)

خاکدانه‌ها در حالت تر (MWD_w) بر اساس هر سه معیار آمار دارای کارایی و دقت نزدیک به هم هستند. در تخمین پایدار خاکدانه‌ها در حالت خشک (MWD_d) تفاوت عملکرد مدل‌ها بیشتر و آماره‌های اعتبارسنجی مدل‌ها بیانگر کارایی بهتر مدل شبکه عصبی مصنوعی است. همچنین مقادیر میانگین خطا نشان می‌دهد درخت تخمین منجر به تخمین‌ها اریب MWD_d از گردیده است.

۵.۳. ارزیابی مدل‌ها

به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها اقدام به مقایسه مدل‌های مورد استفاده بر اساس $RMSE$ ، R^2 و ME گردید. نتایج مقایسه مدل‌ها برای پیش‌بینی پایداری خاکدانه‌ها در جدول (۵) آمده است. هر چه $RMSE$ کمتر و R^2 بیشتر باشد کارایی مدل بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد مدل درخت تصمیم و مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی پایداری

جدول ۵. نتایج ارزیابی کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی و درخت تصمیم

مدل	پارامتر	R^2	RMSE	ME
شبکه عصبی مصنوعی	MWD_w	۰/۵۹	۰/۱۲	-۰/۰۰۰۹
درخت رگرسیون	MWD_w	۰/۵۸	۰/۱۵	-۰/۰۰۰۰۱
شبکه عصبی مصنوعی	MWD_d	۰/۷۹	۰/۷۰	۰/۰۰۸
درخت رگرسیون	MWD_d	۰/۶۸	۰/۷۹	-۱/۲۴

ارتباط بیشتر پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک با خواص خاک (جدول ۱) می‌تواند به این دلیل باشد که به علت کم بودن ماده آلی منطقه و در نتیجه ضعیف بودن ساختمان خاک، خیس شدن خاکدانه‌ها تقریباً باعث تخریب کامل آن‌ها می‌شود و خاکدانه زیادی باقی نمی‌ماند تا توزیع آن‌ها

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۴. همبستگی بین MWD با خاک و متغیرهای

محیطی

خشک). رس می‌تواند به عنوان یک عامل پیوندی تأثیر مثبتی روی پایداری خاکدانه‌ها داشته باشد؛ هر چند که این تأثیر به مقدار و نوع رس بستگی دارد. در بررسی انجام شده روی ارتباط خواص خاک با پایداری خاکدانه‌ها، رابطه معنی‌داری بین درصد رس و پایداری خاکدانه‌ها به دست نیامد [۱۳] که با نتایج تحقیق حاضر برای پایداری در حالت خشک مطابقت ندارد. همچنین در تحقیق دیگری مشخص شد که با افزایش مقدار رس خاک پایداری خاکدانه‌ها به روش ال‌ک‌تر افزایش می‌یابد که بر خلاف نتایج این پژوهش است [۳۸]. این تفاوت‌ها می‌تواند مربوط به تأثیر سایر عوامل یا نوع رس باشد. همچنین در تحقیقی که روی خاک‌های بریتانیا انجام شد، ابراز شد که بین ذرات اولیه خاک (رس، سیلت، شن) و پایداری خاکدانه‌ها رابطه معنی‌داری وجود نداشت ولی ماده آلی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پایداری خاکدانه‌ها بود [۱۰]. در پژوهشی رابطه مثبتی بین پایداری خاکدانه‌ها و شن‌ریز نشان داده شد که بنا به نتایج پژوهش بیان شد هم‌بستگی بالای بین پایداری خاکدانه‌ها با شن‌ریز ممکن است بیشتر یک نمونه از وضعیت پایداری خاکدانه‌ها باشد [۲۳]. نفوذپذیری خاک با پایداری خاکدانه‌ها در دو حالت تر و خشک ارتباط مثبت و معنی‌داری را نشان داد. این می‌تواند به همبستگی رطوبت خاک به میزان نفوذپذیری و در نتیجه افزایش رشد گیاهان و ماده آلی در اثر افزایش رطوبت خاک باشد. به طور کلی ارتباط خواص خاک با پایداری خاکدانه‌ها در هر منطقه ممکن است با مناطق دیگر متفاوت باشد و این ارتباط به شرایط حاکم بر هر منطقه از جمله اقلیم، موجودات زنده، فعالیت انسان، مقدار و کیفیت ماده آلی و زمین‌شناسی بستگی دارد. به عنوان نمونه، ژو و همکاران با بررسی خود در نیو ساوت ولز استرالیا نشان دادند هم مقدار و هم کیفیت بقایای گیاه‌های روی تعداد و مقاومت خاکدانه‌ها تأثیر می‌گذارد [۴۴].

بررسی همبستگی بین متغیرهای محیطی و پایداری خاکدانه‌ها نشان دهنده اهمیت بیشتر داده‌ها و شاخص‌های به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای نسبت به متغیرهای به

با خواص خاک ارتباطی داشته باشند. در خصوص تأثیر خواص خاک بر پایداری خاکدانه‌ها مطالعات متعددی انجام گرفته است و بسته به شرایط مختلف، نتایج مختلفی به دست آمده است. در تحقیق حاضر ماده آلی مهم‌ترین ویژگی شیمیایی خاک بود که بر پایداری خاکدانه‌ها مؤثر و دارای رابطه مثبت با آن بود. یکی از دلایل اصلی این نتیجه نقش ماده آلی به عنوان یک عامل پیوندی مهم در اتصال ذرات خاک و تشکیل خاکدانه‌ها است [۴، ۲۰]. همچنین ماده آلی با ایجاد پوششی آب‌گریز در پیرامون خاکدانه‌ها باعث افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تنش ناشی از خیس شدن و کاهش سرعت نفوذ آب به داخل آن‌ها می‌شود [۳۷]. یافته‌های به دست آمده از [۳۳، ۱۶] مبنی بر تأثیر مثبت ماده آلی بر پایداری خاکدانه‌ها، با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت دارند. شوری خاک با پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک ارتباط معنی‌داری داشت. این به این دلیل است که املاح خاک می‌توانند به عنوان عامل پیوندی عمل کنند و باعث بهبود ساختمان خاک شوند. آهک با وجود اینکه یک عامل پیوندی است و می‌تواند باعث افزایش پایداری ساختمان خاک گردد، ولی تأثیری در پایداری ساختمان خاک نداشت که می‌تواند به دلیل تغییرات کم آن در منطقه باشد. معمولاً اگر تغییرات یک فاکتور در یک منطقه کم باشد، تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار نخواهند بود. در تحقیق انجام شده در تونس عدم وابستگی شاخص-های پایداری خاکدانه‌ها به برخی خواص خاک را دامنه کم تغییرات خواص خاک گزارش نمودند [۵]. این موضوع در مورد pH نیز صادق است، هر چند که pH معمولاً عامل مهمی در پایداری ساختمان خاک نیست. از عوامل دیگر که ممکن است دلیل عدم وابستگی پایداری خاکدانه‌ها به آهک باشد این است که برخی ترکیباتی که اثر خاکدانه‌سازی بیشتری نسبت به کربنات دارند (نظیر سزکوئی اکسیدها و مواد آلی) اثر سیمان‌کنندگی آهک را خنثی می‌کنند [۶]. نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی نشان داد ارتباط اجزاء بافت خاک با پایداری خاکدانه‌ها مثبت و معنی‌دار بود (به جز ارتباط بین رس و پایداری در حالت

موقعیت نسبی شیب (جدول ۲) می‌تواند روی میزان رواناب دریافتی و در نتیجه رطوبت خاک تأثیرگذار باشد. ارتباط کم تعداد زیادی از پارامترهای استخراج شده از DEM با پایداری خاکدانه‌ها شاید به دلیل تغییرات زیاد و کوتاه دامنه توپوگرافی در منطقه و در نتیجه عدم توانایی کامل این متغیرها در نشان داده این تغییرات به دلیل محدودیت مقیاس باشد. در یک بررسی مشخص شد که اندازه پیکسل مدل رقومی ارتفاع بر ترکیب پارامترهای زمینی تبیین‌کننده پایداری خاکدانه‌ها و همچنین مقدار آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۲۸]. در تحقیقی محققان همبستگی کمی بین پایداری خاکدانه‌ها با ویژگی‌های توپوگرافی به دست آوردند [۱۱]. در تحقیقی دیگر همبستگی معنی‌داری بین برخی پارامترهای استخراج شده از DEM مثل انحنای کل، انحنای سطح و انحنای نیمرخ به دست آوردند ولی همبستگی با شیب معنی‌دار نبود [۲۵].

۲.۴. شاخص پایداری خاکدانه‌ها

با توجه به دامنه تغییرات MWD (جدول ۴) و بر اساس تقسیم‌بندی انجام شده توسط لی بیسونایس (Le Bissonais, 1996)، خاکدانه‌ها در حالت تر از ناپایدار تا پایدار و در حالت خشک از پایداری متوسط تا خیلی پایدار متغیر بودند [۳۱]. نتایج نشان داد میانگین MWD_d حدود ۵ برابر MWD_w بود که با توجه به شکسته شدن خاکدانه‌های درشت در آب و پایداری کم خاکدانه‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک در مقابل آب، این نتایج طبیعی هستند. پایداری کم خاکدانه‌ها در آب در مطالعات دیگر هم گزارش شده است [۱]. در پژوهشی دیگر که روی پایداری ساختمان خاک با بافت لومی رسی و مقدار کربن آلی کمتر از ۱ درصد انجام شد، مقدار MWD_w حدود ۰/۵ میلی‌متر به دست آمد [۲۷، ۱۹] که خیلی نزدیک به مقدار به دست آمده در این تحقیق است (۰/۴ میلی‌متر). بر اساس تقسیم‌بندی ارائه شده توسط ویلدینگ (Wilding, 1985) تغییرپذیری MWD_d و MWD_w در خاک‌های منطقه در حد متوسط (۱۵ تا ۳۵ درصد) می‌باشد که می‌تواند مربوط به

دست آمده از DEM در تخمین و مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها بود. داده‌های به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده ویژگی‌ها و عوارض سطح زمین به خصوص عوامل خاکسازي موجودات زنده (کاربری و پوشش گیاهی) و مواد مادری هستند. تأثیر زیاد پوشش گیاهی و کاربری اراضی روی ماده آلی خاک و همبستگی بالای ماده آلی با پایداری خاکدانه‌ها، می‌تواند دلیل اصلی کارایی بیشتر متغیرهای به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در توصیف تغییرات پایداری خاکدانه‌ها در منطقه باشد (جدول ۳). چگونگی تأثیر ماده آلی بر پایداری خاکدانه‌ها در بخش‌های قبلی بحث شده است. با توجه به یکسان بودن مواد مادری در منطقه، این عوامل که تا حدودی از داده‌های به دست آمده از سنجش از دور قابل شناسایی است تأثیر زیادی در تغییرات پایداری خاکدانه‌ها در منطقه نداشت. متغیرهای استخراج شده از DEM بیانگر وضعیت فرسایش، رسوبگذاری، تجمع آب و مواد و یا پخش آن‌ها می‌باشد. همچنین برخی از آن‌ها مثل جهت شیب و ارتفاع می‌توانند روی دما و رطوبت خاک تأثیر بگذارند. در نتیجه، این متغیرها با تأثیر روی مقدار رطوبت خاک، رشد گیاهان، فعالیت موجودات زنده و اندازه ذرات خاک، تأثیر زیادی در وضعیت خاکدانه‌ها در خاک دارند. به عنوان نمونه در نیمکره شمالی و در کشوری مثل ایران به طور کلی شیب‌های شمالی مرطوب‌تر از شیب‌های جنوبی هستند و در نتیجه پوشش گیاهی و ماده آلی خاک بیشتر است. این تفاوت پوشش گیاهی، ماده آلی و فعالیت بیولوژیکی در شیب‌های جنوبی و شمالی می‌تواند باعث تفاوت در پایداری خاکدانه‌ها گردد. سطح حوضه برای یک پیکسل بیانگر سطح کل پیکسل‌هایی است که رواناب آن‌ها به پیکسل مورد نظر تخلیه می‌شود و مساحت حوضه اصلاح شده که از متغیرهای دارای همبستگی با پایداری خاکدانه‌ها بود (جدول ۲) در واقع همان سطح در واحد عرض خطوط تراز است. بنابراین سطح حوضه (یا سطح اصلاح شده حوضه) می‌تواند روی مقدار رطوبت دریافتی توسط هر سلول و در نهایت روی خواص خاک تأثیرگذار باشد. پارامتری مثل

هم می‌تواند باعث نرم‌تر بودن خاک این منطقه نسبت به منطقه شاهد گردد. با وجود اینکه در منطقه شاهد در حالت خشک خاکدانه‌ها درشت‌تر هستند، ولی به دلیل پایداری خیلی که آن‌ها در آب، مقاومت کمی به فرسایش آبی دارند. می‌توان گفت بالاتر بودن پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک الزاماً دلیلی بر بالاتر بودن مقاومت آن‌ها به فرسایش آبی نمی‌شود. در بررسی انجام شده در منطقه چشمه علی استان چهارمحال بختیاری تفاوت معنی‌داری در مقدار MWD_w برای چهار کاربری مورد بررسی به دست آمد [۴۴] که بیانگر تأثیر زیاد نوع استفاده از اراضی روی پایداری خاکدانه‌ها است. همچنین در بررسی انجام شده در استان البرز بیان شد که عملیات قرق اثرات مثبتی بر خصوصیات خاک از جمله ماده آلی داشت [۳۵] و در نتیجه، این خصوصیات می‌توانند در پایداری خاکدانه‌ها مؤثر باشند. در خاک‌های لسی جنگلی شمال کشور مشخص شد که جنگل تراشی و متعاقب آن کشت و کار باعث شده مقدار MWD از $۱/۴۹$ میلی‌متر به $۰/۸۸$ میلی‌متر کاهش یابد. علت این مسئله را نیز به هدر رفت ماده آلی و تخریب خاکدانه‌ها مرتبط دانسته‌اند [۲۹].

۴،۴. کارایی روش‌های مدل‌سازی

نتایج اعتبار سنجی هر دو مدل درخت تصمیم و شبکه عصبی مصنوعی بیانگر کارایی نسبتاً بالای این دو مدل به خصوص در مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک بود (جدول ۵). دلیل بالاتر بودن کارایی مدل ANN را می‌توان به قابلیت آن در پیدا کردن روابط پیچیده و غیر خطی بین داده‌ها ارتباط داد. گل محمدی و همکاران کارایی بالای مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی فرسایش‌پذیری خاک‌های در منطقه دهگلان را نشان دادند [۱۸]. همچنین محمودآبادی و همکاران کارایی بالاتر مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین برخی خواص خاک نسبت به مدل‌های رگرسیون چند متغیره و برنامه‌ریزی بیان ژن را گزارش نمودند [۳۲]. در تحقیقی دیگر کارایی خوب ANNs در مدل‌سازی ماده آلی که از عوامل مهم تأثیر گذار در پایداری خاکدانه است، را نشان

تغییرات متوسط فاکتورهای مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها در منطقه باشد [۴۳].

۳،۴. تأثیر عملیات اصلاحی و حفاظتی روی

شاخص پایداری خاکدانه‌ها

نتایج نشان داد که اقدامات حفاظتی (درخت‌کاری و کنتر فارو) تأثیر معنی‌داری روی پایداری خاکدانه‌ها در حالت تر نداشت ولی تأثیر آن‌ها در پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک معنی‌دار بود (شکل ۲). همچنین عدم وجود روند خاصی در توزیع تغییرات مکانی پایداری خاکدانه‌ها در حالت تر که در شکل (۳ الف) هم نشان داده شده است نشان دهنده این است که عملیات کنترل فرسایش خاک در منطقه تأثیر مشخصی روی پایداری خاکدانه‌ها در حالت تر نداشته است. بررسی‌های صحرائی در زمان نمونه‌برداری نشان داد که به دلایل مختلف پوشش گیاهی استقرار یافته از تراکم مناسبی برای افزایش کافی ماده آلی به خاک برخوردار نبود که نتیجه آن تأثیر کم عملیات حفاظت خاک انجام شده روی پایداری خاکدانه‌ها بود. همچنین عدم قرق منطقه و عدم مراقبت کافی از گونه‌های کشت شده باعث افزایش قابل توجه ماده آلی و به تبع آن پایداری خاکدانه‌ها نگردیده است. هر چند که دمای زیاد و بارندگی کم منطقه هم می‌توانند عوامل دیگر مؤثر بر کاهش رشد گیاهان و در نتیجه کاهش افزایش ماده آلی به خاک باشند. بنابراین و با توجه به اینکه ماده آلی یک عامل پیوندی مهم برای تشکیل خاکدانه‌های پایدار است، کم بودن آن در منطقه عامل اصلی تفاوت کم پایداری خاکدانه‌ها در منطقه تحت عملیات حفاظتی است. بر خلاف انتظار، پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک در منطقه شاهد به طور معنی‌داری بیشتر از منطقه تحت عملیات کنترلی بود (شکل ۲). در شکل (۳ ب) هم بالاتر بودن پایداری خاکدانه‌ها در قسمت‌های غربی منطقه که بیشتر شامل منطقه شاهد می‌باشد نشان داده شده است. این تفاوت می‌تواند به دلیل سخت و توده‌ای بودن خاک در منطقه شاهد باشد. هر چند که ماده آلی در منطقه تحت عملیات حفاظتی زیاد نیست ولی مقدار کم

ارزیابی مقاومت خاک‌ها به فرسایش نباشد. زیرا با وجود اینکه خاک‌های فاقد عملیات حفاظتی به دلیل سخت و توده‌ای بودن پایداری بیشتری در حالت خشک از خود نشان می‌دهند، ولی این خاک‌ها به دلیل ساختمان ضعیف در مقابل فرسایش آبی بسیار حساس هستند.

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از روش‌های نقشه‌برداری رقومی می‌تواند رویکرد مناسب و به صرفه‌ای برای مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه مدیریت و پایش بهتر فرسایش آبی به‌خصوص در سطح وسیع باشد. داده‌های رقومی محیطی با کیفیت و دقت بیشتر (اندازهٔ پیکسل کوچکتر) و به دست آمده از منابع متنوع‌تر می‌تواند منجر به نتایج بهتری گردد. همچنین اگر تحقیقات مشابهی در سطح وسیع‌تر، در مناطقی با اقلیم، زمین‌شناسی، کاربری و توپوگرافی متنوع‌تر به‌خصوص در مناطق بالادست سدها و بندها انجام شود، می‌تواند در مدیریت و کنترل فرسایش آب بسیار مؤثر باشد.

دادند [۳]. در مطالعه‌ای که روی ۲۳ نمونه خاک با بافت‌های مختلف در استان‌های چهارمحال بختیاری و اصفهان انجام شد، مشخص گردید شبکه‌های عصبی مصنوعی در ارزیابی ساختمان و پایداری خاکدانه‌ها عملکرد بهتری نسبت به توابع انتقالی رگرسیونی دارند [۲۴]. علاوه بر موارد ذکر شده، در مطالعات دیگری هم کارایی بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها گزارش شده است [۷، ۴۰].

به طور کلی نتایج نشان داد عملیات کنترل فرسایش خاک الزاماً باعث بهبود پایداری خاکدانه‌ها نمی‌شود و برای به دست آوردن نتیجهٔ مطلوب باید این اقدامات همراه با مراقب و پایش مداوم انجام گیرند. برای این منظور می‌توان مناطق تحت این عملیات را قرق نمود تا از تخریب پوشش گیاهی کاسته شود. همچنین نتایج نشان داد پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک شاید معیار مناسبی برای ارزیابی اثرات عملیات حفاظتی روی ساختمان خاک و

References

- [1] Akbari, S. and Vaezi, A.R. (2015). Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid region, northwest of Zanjan. *Water and Soil Science*, 25 (2), 65-77.
- [2] Alijanpour Shalmani, A., Shabanpour, M., Asadi, H. and Bagheri, F. (2011). Estimation of soil aggregate stability in forest's soils of Guilan province by artificial neural networks and regression pedotransfer functions. *Water and Soil Science*, 21(3), 153-162.
- [3] Amirian, A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., Kumar, S., Khordehbin, S. and Yusefi Khanghah, S. (2017). Spatial 3D distribution of soil organic carbon under different land use types. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 131-148.
- [4] Angers, D.A. (1998). Water-stable aggregation of Quebec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil and Tillage Research*, 47(1-2), 91-96.
- [5] Annabi, M., Raclot, D., Bahri, H., Bailly, J.S., Gomez, C. and Le Bissonais, Y. (2017). Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. *Catena*, 153, 157-167.
- [6] Armin, M., Madian, M.H., Ahmadi, H., Rohipour, H., Salajegheh, A. and Ghorbaniakhabiri, V. (2014). Investigation on spatial variability of aggregate stability and the factors affecting soil aggregation using kriging geostatistics method (Case study: A part of Taleghan watershed). *Watershed Management Research*, 27(3), 107-122.
- [7] Bardsirizadeh, S., Esfandiarpour Borojeni, A., Abaszadeh Dehji, P. and Besalatpour, A.A. (2017). Effect of the physical fractions of organic matter on soil aggregate stabilities in three various land uses of forest, range, and agricultural lands. *J. of Soil Management and Sustainable Production*, 7(2), 47-65.
- [8] Besalatpour, A.A., Ayoubi, S., Hajabbasi, M.A., Mosaddeghi, M. and Schulin, R. (2013). Estimating wet soil aggregate stability from easily available properties in a highly mountainous watershed. *Catena*, 111, 72-79.

- [9] Breiman, L., Friedman, J.H., Olshan, R.A. and Stone, C.J. (1984). Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, CA.
- [10] Chaney, K. and Swift, R.S. (1984). The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil science*, 35(2), 223-230.
- [11] Chaplot, V. and Cooper, M. (2015). Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils. *Geoderma*, 243-244, 205-213.
- [12] Cheng, M., Xiang, Y., Xue, Z., An, S. and Darboux, F. (2015). Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 124, 77-84.
- [13] Curtin, D., Campbell, C.A., Zentner, R.P. and Lafond, G.P. (1994). Long-term management and clay dispersibility in two Haploborolls in Saskatchewan. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 962-967.
- [14] Erfanian, M., Ghaharmani, P. and Saadat, H. (2015). Assessment of soil erosion risk using a fuzzy model in Gharnaveh watershed, Golestan province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 23(7), 23-52.
- [15] Eynard, A., Schumacher, T.E., Lindstrom, M.J. and Malo, D.D. (2004). Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1360-1365.
- [16] Fullen, M.A. and Booth, C.A. (2006). Grass ley set-aside and soil organic matter dynamics on sandy soils in Shropshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 31(5), 570-578.
- [17] Goh, T.B., Arnaud, R.J.St. and Mermut, A.R. (1993). Carbonates. in: Cartner, M.R. (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Pub., Boca Raton, Canada, 177-185.
- [18] Golmohamadi, F., Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrhajdi, R. and Davari, M. (2017). Digital mapping of soil erodibility (Case study: Dehgolan, Kurdistan province). *J. of Water and Soil Conservation*, 24(6), 87-103.
- [19] Hajabasi, M.A. and Hemmat, A. (2000). Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 56, 205-212.
- [20] Hajabasi, M.A., Besalatpour, A. and Melali, A.R. (2007). Effect of conversion of rangelands to agricultural lands on some physical and chemical characteristics of southern and southwestern soils of Isfahan. ***Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)***, 11(42), 525-534.
- [21] Hengl, T., Rossiter, D.G. and Stein, A. (2003). Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Soil Research*, 41(8), 1403-1422.
- [22] Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., Hajabasi, M.A. and Sabzalian, M.R. (2015). Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils. *Geoderma*, 249, 87-99.
- [23] Igwe, C.A., Akanmigbo, F.O.R. and Mbagwu, J.S.C. (1995). Physical properties of soils of Southeastern Nigeria and the role of some aggregating agents in their stability. *Soil Sci.* 160, 431- 441.
- [24] Jahangard, M. (2002). Testing an artificial neural network for predicting soil water retention characteristics from soil physical and chemical properties. In 17th World Congress of Soil Science, Bangkok (Thailand), 14-21.
- [25] Jakšik, O., Kodešová, R., Kubiš, A., Stehlíková, I., Drábek, O. and Kapicka, A. (2015). Soil aggregate stability within morphologically diverse areas. *Catena*, 127, 287-299.
- [26] Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York.
- [27] Kemper W.D. and Rosenau K. (1986). Size distribution of aggregates. In: Klute, A. (ed), *Methods of Soil Analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, WI. P. 425-442.
- [28] Khenifer, J., Khademolrasol, A., Aamerikhah, H. (2018). Estimation of the stability of aggregates using early detection characteristics of topography and soil. *The First National Conference on Sustainable Development in Agricultural Sciences and Natural Resources with a Focus on Environmental Culture*. Tehran, Iran, pp. 1-6.
- [29] Khormali, F., Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasarao, C. and Wani, S.P. (2009). Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province. *Iran. Agriculture, ecosystems & environment*, 134(3-4), 178-189.
- [30] Kia, M. (2009). *Neural Networks in Matlab*. Kian Rayan Sabz Publication, Tehran, 408.
- [31] Le Bissonais. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47,425-431.
- [32] Mahmoodabadi E., Karimi A., Haghnia GH.H. and Sepehr A. (2018). Assessing performance of Multivariate Linear Regression (MLR), Artificial Neural Network (ANN) and Gene Expression Programming (GEP) in estimating soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(2), 23-44.
- [33] Marques, M.J., García-Muñoz, S., Muñoz-Organero, G. and Bienes, R. (2010). Soil conservation beneath grass cover in hillside vineyards under Mediterranean climatic conditions (Madrid, Spain). *Land Degradation & Development*, 21(2), 122-131.
- [34] McBratney, A.B., Santos, M.M. and Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.

- [35] Moghiminejad, F., Jafari, M., Zare Chahouki, M.A., Ghasemi Arian, Y. and Kohandel, A. (2014). Comparison of soil physical and chemical properties between the sites of enclosure and grazing (Case study: Nazarabad-Karaj). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 21(4), 642-650.
- [36] Nichols, K.A. and Toro, M. (2011). A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil and Tillage Research*, 111(2), 99-104.
- [37] Quirk, J.P. and Murray, R.S. (1991). Towards a model for soil structural behavior. *Soil Research*, 29(6), 829-867.
- [38] Rasiyah, V. and Kay, B.D. (1994). Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 935-942.
- [39] Rouhipour, H., Farzaneh, H. and Asadi, H. (2004). The effect of aggregate stability indices on soil erodibility factors using rainfall simulator. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 11(3), 235-254.
- [40] Shabani, A., Gholamalizadeh, A. and Golshahi, S. (2017). Predicting aggregate stability using soil properties in different land use. *Journal of Agricultural Engineering*, 39(2), 117-131.
- [41] Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F. and Malone, B.P. (2014). Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15-28.
- [42] Vrieling, A., Sterk, G. and Beaulieu, N. (2002). Erosion risk mapping: a methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(3), 158-163.
- [43] Wilding, L.P. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. In: Nielsen DR, Bouma J (eds) *Soil spatial variability*. Pudoc, Wageningen, 166-194.
- [44] Zhu, Z., Angers, D.A., Field, D.J. and Minany, B. (2017). Using ultrasonic energy to elucidate the effects of decomposing plant residues on soil aggregation. *Soil and Tillage Research*, 167, 1-8.