



ارزیابی جامع تخریب خاک در اراضی کشاورزی نیمه خشک با استفاده از شاخص سلامت خاک

فرخ اسدزاده^{۱*}، کمال خسروی اقدام^۲، فرخ اسالار رضاپور^۳

۱- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه f.asadzadeh@urmia.ac.ir

۲- دانش آموخته گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

چکیده

تخریب خاک یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم است که بهره‌وری کشاورزی، پایداری اکوسیستم‌ها و امنیت غذایی بلندمدت را تهدید می‌کند. این پژوهش چارچوبی جامع برای ارزیابی منطقه‌ای تخریب خاک در اراضی کشاورزی نیمه خشک ارائه می‌دهد. نمونه‌های خاک از ۳۹۳ زمین کشاورزی و ۱۹۹ مرتع جمع‌آوری شدند. شاخص سلامت خاک با استفاده از رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها و بر اساس شاخص‌های نماینده عملکرد خاک استخراج شد. صدک نودم مقادیر شاخص سلامت خاک در مراتع به عنوان معیار شرایط نزدیک به سلامت طبیعی خاک در نظر گرفته شده و شدت تخریب خاک‌های کشاورزی بر اساس آن کمی‌سازی شد. برای پیش‌بینی توزیع مکانی تخریب خاک، از سه مدل جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. تحلیل نقاط داغ نشان داد که خاک‌های اینسپتی‌سول بیشترین میزان و خاک‌های کمترین میزان تخریب را دارند. این الگوها ارتباط نزدیکی با تغییرات کربن آلی خاک و چگالی ظاهری داشتند. مدل جنگل تصادفی عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داد ($R^2=0/81$, $RMSE=0/064$). تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی و عوامل توپوگرافی از مهم‌ترین شاخص‌های بیانگر تخریب خاک در اراضی کشاورزی هستند. این چارچوب می‌تواند راهنمای مدیران زمین و سیاست‌گذاران در طراحی راهبردهای هدفمند حفاظت از خاک باشد.

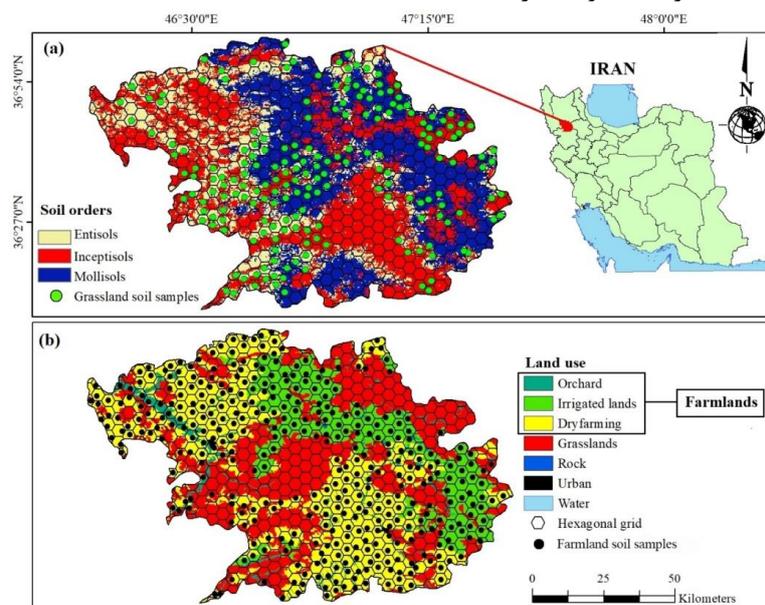
واژگان کلیدی: تحلیل نقاط داغ، نقشه‌برداری رقومی خاک، تخریب خاک، پوشش گیاهی

مقدمه

تخریب خاک یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک است که پایداری اکوسیستم‌ها، بهره‌وری کشاورزی و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (Liu et al., 2021). شمال غرب ایران نمونه‌ای بارز از این مناطق است که در آن اثرات توأم ژئومورفولوژی، تغییرپذیری اقلیمی و بهره‌برداری ناپایدار از زمین موجب تشدید تخریب اراضی می‌شود. شرایط اقلیمی سخت، پوشش گیاهی کم، بارش‌های نامنظم و فعالیت‌های انسانی مانند شخم مکرر و چرای بیش از حد، باعث فرسایش، شورشدگی، کاهش ماده آلی و در نهایت تخریب خاک می‌شوند (Sadeghi and Hazbavi, 2022). برای درک بهتر پویایی و شدت این فرآیندها، شاخص سلامت خاک به عنوان ابزاری جامع برای ارزیابی توان عملکردی و زیستی خاک اهمیت ویژه‌ای دارد (Temerdek-Ivan et al., 2025). این مطالعه رویکردی نوآورانه ارائه می‌دهد که نقشه‌برداری رقومی خاک با وضوح بالا را با مجموعه داده‌های میدانی جامع ترکیب می‌کند و هدف آن برآورد گستره و شدت تخریب خاک در بخشی از اراضی جنوب استان آذربایجان غربی و شناسایی نقاط داغ و سرد تخریب خاک است. نتایج این پژوهش می‌تواند به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی هدفمند کمک کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه در شمال غرب ایران با مساحتی حدود ۷۱۵۰ کیلومتر مربع قرار دارد و از نظر فیزیوگرافیکی شامل کوهستان‌ها، شیب‌های تپه‌ای، فلات‌ها، تراس‌ها، دشت‌های پیرکوهی و اراضی آبرفتی کم‌ارتفاع با دامنه ارتفاع ۱۳۱۰ تا ۳۲۷۰ متر از سطح دریا است. متوسط بارش سالانه در این منطقه بین ۳۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر و کاربری‌های زمین شامل باغات، اراضی آبیاری‌شده، کشاورزی دیم، مراتع، مناطق شهری و منابع آبی است. نمونه‌برداری خاک از منطقه به صورت سیستماتیک با تقسیم منطقه به ۵۹۲ سلول شش‌ضلعی انجام شد و از هر سلول یک نمونه جمع‌آوری شد که شامل ۱۹۹ نمونه از مراتع و ۳۹۳ نمونه از اراضی کشاورزی بود (شکل ۱). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل pH، هدایت الکتریکی، ماده آلی، بافت خاک، چگالی ظاهری، رطوبت اشباع، کربنات کلسیم، ظرفیت تبادل کاتیونی و فسفر و پتاسیم قابل دسترس اندازه‌گیری شد و شاخص فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از معادله ویشمایر-اسمیت (Wischmeier and Smith, 1978) محاسبه گردید.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه در ایران و شبکه نمونه‌برداری خاک مراتع (a) و اراضی کشاورزی (b)

برای توسعه شاخص سلامت خاک (SHI) از رویکرد مجموعه داده حداقل (MDS) استفاده شد. مراحل شامل شناسایی شاخص‌های کلیدی، نرمال‌سازی داده‌ها، تعیین وزن هر شاخص و ادغام وزن‌ها برای محاسبه SHI بود. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده و شناسایی متغیرهای تأثیرگذار به کار گرفته شد. شاخص تخریب خاک در هر نقطه از اختلاف شاخص سلامت در منطقه مرجع و نقطه مورد نظر به دست آمد. برای تعیین شاخص سلامت، ابتدا مقادیر SHI نمونه‌های جمع‌آوری شده از مراتع استخراج شد و نمونه‌ها بر اساس رده‌های خاک در مراتع و اراضی کشاورزی دسته‌بندی گردید. برای هر رده خاک، صدک ۹۰ مقادیر SHI از نمونه‌های مرتعی به عنوان مقدار مرجع در نظر گرفته شد (Zhang et al., 2019). توزیع مکانی تخریب خاک نیز در اراضی کشاورزی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) ارزیابی شد. متغیرهای محیطی شامل شاخص‌های اقلیمی، توپوگرافی و عوامل تشکیل‌دهنده خاک استخراج و با داده‌های ماهواره‌ای ۳۰ متری پردازش شده در Google Earth Engine مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌ها به صورت تصادفی به ۷۵٪ آموزش و ۲۵٪ آزمون تقسیم شدند و عملکرد مدل‌ها با R^2 ، RMSE و MSE ارزیابی شد. برای شناسایی الگوهای مکانی تخریب خاک، تحلیل نقاط داغ با استفاده از ابزار Optimized Hot Spot Analysis در ArcGIS 10.8 انجام شد و خوشه‌های آماری با مقادیر بالا (hot spots) و پایین (cold spots) با استفاده از آماره Getis-Ord Gi شناسایی شدند.

نتایج و بحث

آمار توصیفی (جدول ۱) نشان داد که ویژگی‌های خاک در منطقه مطالعه تغییرپذیری قابل توجهی دارند (جدول ۱). بافت خاک با ضریب تغییرات متوسط تا زیاد در رس ($CV = 41.8\%$) و شن ($CV = 32\%$) تغییرات نسبتاً زیادی دارد. چگالی ظاهری خاک نسبتاً یکنواخت بود اما میانگین بالای آن می‌تواند نشانه فشردگی اولیه باشد. هدایت الکتریکی خاک بسیار متغیر است که حاکی از تغییرات قابل توجه شوری خاک است. کربن آلی و نیتروژن کل خاک تغییرپذیری بالایی داشتند که می‌تواند نشان‌دهنده تخریب زیستی و کاهش مواد مغذی در برخی مناطق باشد (Iwasaki et al., 2024).

جدول ۱- آمار توصیفی برخی از ویژگی‌های خاک

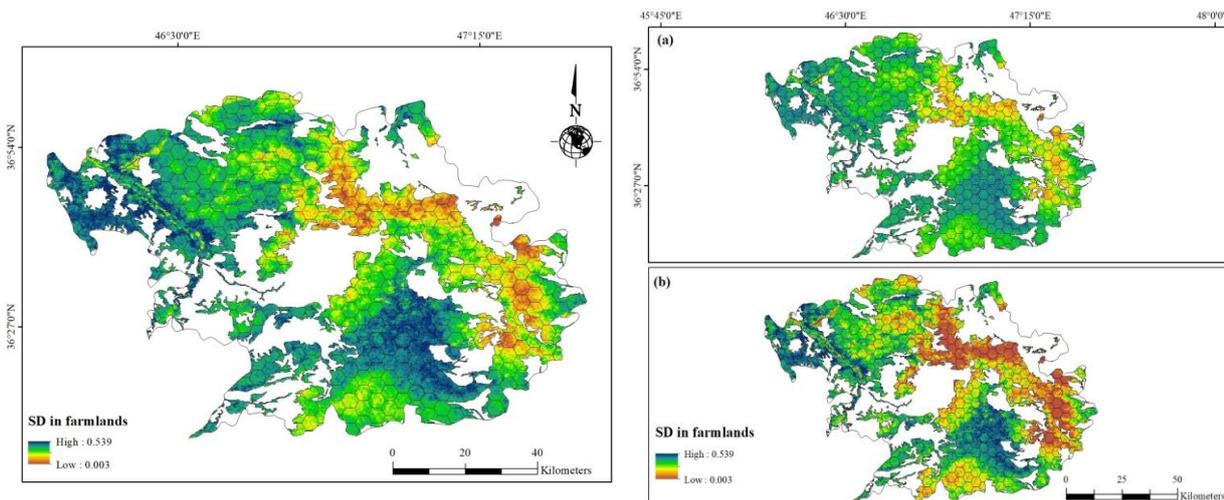
ویژگی	حداقل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات (%)
رس (%)	۳/۰۰	۴۷/۰۰	۲۱/۷۶	۴۱/۷۹
سیلت (%)	۲/۰۰	۶۶/۰۰	۳۵/۹۱	۲۳/۸۸
چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	۱/۰۹	۱/۵۸	۱/۳۷	۴/۱۲
هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	۰/۱۱	۷/۲۶	۰/۶۸	۸۹/۲۲
pH	۷/۲۹	۸/۲۸	۷/۸۱	۱/۹۶
ماده آلی (%)	۰/۰۴	۳/۴۶	۰/۹۸	۴۹/۴۸

پس از انجام آنالیز PCA و بر اساس تحلیل جامع بارهای عاملی و همبستگی میان متغیرها در این مؤلفه‌ها، شش متغیر شامل درصد سیلت، SOC، pH، پتاسیم قابل جذب، ظرفیت تبادل کاتیونی و عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) به‌عنوان مجموعه داده حداقل برای ارزیابی کیفیت خاک انتخاب شدند.

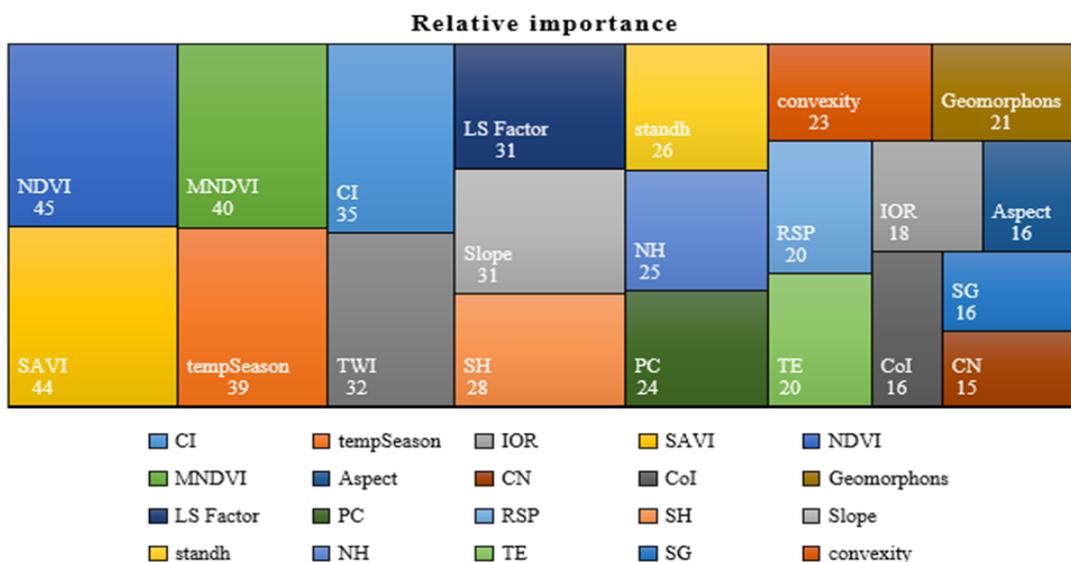
ارزیابی صدک نودم شاخص SHI-MDS در سه رده خاکی انتی‌سول‌ها، اینسپتی‌سول‌ها و مالی‌سول‌ها به ترتیب مقادیر ۰/۷۱، ۰/۶۶ و ۰/۷۸ را نشان داد. این گرادیان افزایش تخریب خاک از مالی‌سول به اینسپتی‌سول‌ها را می‌توان با تفاوت در ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، بلوغ خاک، توسعه پروفیل، بافت، ساختار فیزیکی و محتوای کربن آلی توضیح داد. افزون بر این، فعالیت‌های کشاورزی فشرده احتمال تخریب خاک را به‌ویژه در اینسپتی‌سول‌های کمتر توسعه‌یافته تشدید می‌کند (Ma et al., 2024). برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی سه مدل یادگیری ماشین شامل RF (جنگل تصادفی)، ANN (شبکه عصبی مصنوعی) و SVM (ماشین بردار پشتیبان) در برآورد متغیر هدف، شاخص‌های MSE، RMSE و R² برای هر دو مجموعه داده‌ی آموزشی و آزمایشی محاسبه شدند. در مجموعه داده‌ی آموزش و داده‌های آزمون، مدل RF بالاترین دقت را نشان داد، به طوری که مقدار MSE برابر با ۰/۰۰۴، مقدار RMSE برابر با ۰/۰۶۴ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۱ بدست آمد.

شکل ۲ توزیع مکانی تخریب خاک را در بخشی از اراضی کشاورزی شمال‌غرب ایران نشان می‌دهد. مقدار SD بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۵۳۹ متغیر است؛ مقادیر بالاتر نشان‌دهنده تخریب شدیدتر و مقادیر پایین‌تر بیانگر وضعیت بهتر خاک هستند. در نقشه، نواحی با رنگ آبی تیره بیشترین شدت تخریب را دارند، در حالی که مناطق نارنجی و زرد نشان‌دهنده سطوح پایین‌تر تخریب‌اند. الگوی فضایی بیانگر آن است که بیشترین میزان تخریب در بخش‌های جنوبی و شمال‌غربی منطقه، عمدتاً در خاک‌های نوع اینسپتی‌سول‌ها رخ داده است. در مقابل، مناطق شرقی، شمال‌شرقی و بخش‌هایی از شمال منطقه که عمدتاً مالی‌سول‌ها را شامل می‌شوند، کمترین مقدار SD را دارند. در مجموع، این الگو نشان می‌دهد که نوع خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت تخریب اراضی کشاورزی دارد. شکل ۲ همچنین نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی شدت SD در اراضی کشاورزی را بر اساس حدود پایین (۰/۵) و بالا (۰/۹۵) از بازه اطمینان ۰/۹۰ نشان می‌دهد. در این نقشه‌ها، رنگ نارنجی مناطق با تخریب کمتر و رنگ آبی تیره نواحی با تخریب شدیدتر را نمایش می‌دهد. الگوی فضایی این نقشه‌ها با نقشه اصلی تطابق بالایی دارد و بیانگر آن است که نواحی دارای تخریب بیشتر، معمولاً دارای عدم قطعیت پیش‌بینی بالاتری هستند. این رابطه فضایی بین شدت تخریب و بازه عدم قطعیت، نشان می‌دهد که در مناطق با تخریب شدید، نیاز به افزایش دقت مدل و مطالعات میدانی دقیق‌تر وجود دارد.

شکل ۳ سهم نسبی متغیرهای محیطی در پیش‌بینی شدت SD توسط مدل RF را نشان می‌دهد. شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی بیشترین نقش را داشتند؛ به‌ویژه NDVI (۴۵٪)، SAVI (۴۴٪) و MNDVI (۴۰٪) که نشان‌دهنده سبزی‌نگی و فعالیت فیزیولوژیکی گیاهان هستند. این شاخص‌ها با کاهش رواناب، بهبود ساختار خاک و کنترل فرسایش بادی و آبی، در پایداری خاک نقش مهمی دارند. شاخص TWI نیز با اهمیت ۳۲٪ تأکید می‌کند که رطوبت خاک و پوشش گیاهی به‌طور مشترک بر فرآیند تخریب اثرگذارند. عوامل توپوگرافی مانند شیب و LS-Factor هر یک ۳۱٪ سهم داشتند (Cuo et al., 2022).



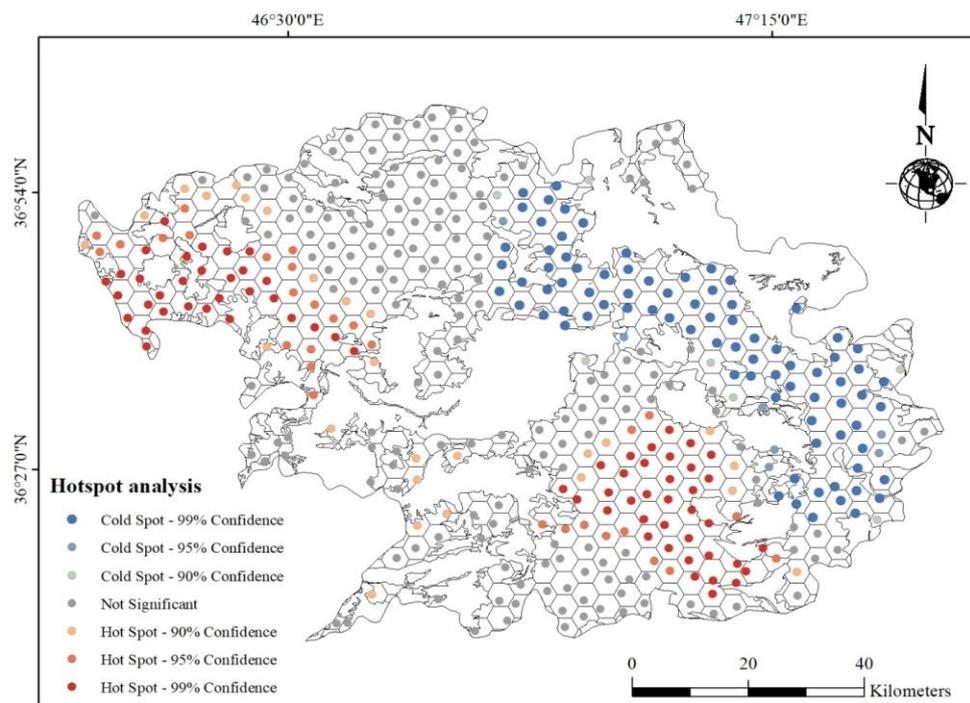
شکل ۲- توزیع مکانی شاخص SD براساس مدل RF (سمت چپ) و نقشه‌های عدم‌قطعیت حدود پایین (a) و بالا (b)



شکل ۳- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در برآورد تخریب خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی

نتایج تحلیل نقاط داغ با استفاده از آماره Getis-Ord Gi_i الگوی مکانی مشخصی از شدت SD را در منطقه نشان می‌دهد. نقاط داغ در بخش‌های جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی با سطوح اطمینان ۹۵، ۹۰ و ۹۹ درصد شناسایی شدند و بیانگر تمرکز بالای شاخص‌های تخریب در این نواحی هستند. این مناطق (به رنگ قرمز و نارنجی) بیشترین شدت تخریب را دارند. در مقابل، مناطق شمالی و شمال‌شرقی (به رنگ آبی) به‌عنوان نقاط سرد، شرایط پایدارتر و تخریب کمتر را نشان می‌دهند. بخش‌های مرکزی و پراکنده فاقد الگوی مکانی معنادار بوده و به‌عنوان مناطق بدون خوشه‌بندی آماری طبقه‌بندی شدند (شکل ۴).

این تحلیل، وزن‌های فضایی بر اساس شبکه نمونه‌برداری شش‌ضلعی (~۱۲ کیلومتر مربع برای هر سلول) تعریف شد و سلول‌های مجاور با مرز مشترک به‌عنوان همسایه در نظر گرفته شدند. آزمون فواصل بزرگ‌تر نیز نتایج مشابهی را نشان داد.



شکل ۴- نقشه نقاط داغ و نقاط سرد تخریب خاک

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از ترکیبی نوآورانه از تحلیل‌های میدانی، روش‌های آماری چندمتغیره، مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های سنجنش از دور، ارزیابی دقیقی و مکانی تخریب خاک را ارائه می‌دهد. شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI و SAVI همراه با عوامل توپوگرافی (شیب، عامل LS و TWI) به‌عنوان مؤثرترین پیش‌بین‌های شدت تخریب شناسایی شدند و اهمیت حیاتی تثبیت شیب و پوشش گیاهی در کاهش فرسایش و حفظ عملکرد خاک را نشان می‌دهند. تفاوت‌های قابل توجه در سطح تخریب میان رده‌های خاکی مالی‌سول‌ها، اینسپتی‌سول‌ها و انتی‌سول‌ها با کاهش کربن آلی خاک و افزایش تراکم مرتبط است، که به‌طور مشترک موجب تخریب ساختار خاک، تغییرات رطوبتی و کاهش حاصلخیزی می‌شوند. این امر بر ضرورت تدوین راهبردهای ویژه کاهش تخریب تأکید دارد که به آسیب‌پذیری‌های خاص هر نوع خاک پاسخ دهند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام سنجنش از دور پیشرفته با الگوریتم‌های یادگیری ماشین امکان پایش با دقت بالا و به‌صورت لحظه‌ای الگوهای تخریب خاک را فراهم می‌کند و زمینه را برای مداخلات هدفمند و مدیریت پایدار اراضی کشاورزی تسهیل می‌نماید. تلاش‌های آینده باید بر افزایش محتوای SOC از طریق شخم حفاظتی و افزودن مواد آلی، بهینه‌سازی مدیریت آب برای کاهش شوری و تراکم، و بازسازی پوشش گیاهی برای بهبود تاب‌آوری خاک متمرکز شود. علاوه بر این، تقویت ظرفیت‌ها و ایجاد چارچوب‌های سیاستی پاسخگو به تغییرات اقلیمی و کاربری زمین برای مقابله مؤثر با تخریب خاک و تضمین تولید پایدار اکوسیستم‌ها ضروری است. به طور کلی، این رویکرد یک پایه محکم برای معکوس کردن روند تخریب خاک و ترویج کشاورزی پایدار در شرایط محیطی روزافزون نامطلوب فراهم می‌کند.

Reference

Cuo, L., Zhang, Y., Li, N. (2022). Historical and Future Vegetation Changes in the Degraded Frozen Soil and the Entire Tibetan Plateau and Climate Drivers. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 127(11), e2022JG006987.

- Iwasaki, K., Shimoda, S., Nakata, Y., Hayamizu, M., Nanko, K., Torita, H. (2024). Remote sensing of soil ridge height to visualize windbreak effectiveness in wind erosion control: A strategy for sustainable agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 219, 108778.
- Liu, B., Ma, R., Fan, H. (2021). Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 206, 104810.
- Ma, R., Tian, Z., Zhao, Y., Wu, Y., Liang, Y. (2024). Response of soil quality degradation to cultivation and soil erosion: A case study in a Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research* 242, 106159.
- Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z. (2022). Land Degradation in Iran. In: R. Li, T.L. Napier, S.A. El-Swaify, M. Sabir, E. Rienzi (Eds.), *Global Degradation of Soil and Water Resources: Regional Assessment and Strategies*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 287-314.
- Temerdek-Ivan, K., Benedek, J., Török, I., Holobâcă, I.-H., Alexe, M. (2025). Determination of Land Degradation in Romania at a Local Scale Using Advanced Analytical Techniques. *Land Degradation & Development* 36(5), 1614-1627.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 39(2), 285-291.
- Zhang, Y., Xu, X., Li, Z., Liu, M., Xu, C., Zhang, R., Luo, W. (2019). Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China. *Science of The Total Environment* 650, 2657-2665.

Comprehensive Assessment of Soil Degradation in Semi-Arid Region Using the Soil Health Index

Farrokh Asadzadeh¹, kamal Khosravi-Aqdam², Salar Rezapour³

1. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
*f.asadzadeh@urmia.ac.ir
2. Graduate of the Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

Soil degradation poses a serious threat to agricultural productivity, ecosystem stability, and long-term food security, particularly in semi-arid regions. This study proposes an integrated framework for regional-scale assessment of soil degradation in agricultural lands. Soil samples collected from 393 croplands and 199 rangelands were used to develop a Soil Health Index (SHI) based on the Minimum Data Set approach. The 90th percentile of SHI values in rangelands was considered the reference condition representing near-natural soil health, against which the degradation intensity of croplands was quantified. Three machine learning models- Random Forest (RF), Artificial Neural Network (ANN), and Support Vector Machine (SVM)- were applied to predict the spatial distribution of soil degradation. The Random Forest model showed the best performance ($R^2 = 0.81$, RMSE = 0.064). Hotspot analysis revealed that Inceptisols were most degraded, closely linked to declines in soil organic carbon and increases in bulk density. Vegetation indices and topographic variables were identified as the most influential predictors. The proposed framework offers a robust tool to support targeted soil conservation and land management strategies in vulnerable agricultural ecosystems.

Keywords: Hotspot analysis, Digital soil mapping, Soil degradation, Vegetation cover