



پژوهش‌های آبخیزداری

۱۵۰

شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵

دوره ۳۹، شماره ۱

- ارزیابی اثرات شاخص‌های پیوند از دور بر غلظت PM2.5 با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در استان سیستان و بلوچستان
ابوالفضل داوری، رسول مهدوی نجف‌آبادی، مرضیه رضایی، ام‌البنین بذرافشان، علیرضا شهریاری..... ۱
- ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکتری بر محتوای ماده آلی و نیتروژن بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی
سائمه صادقی گجوتی، حسین خیرفام، سعید نجفی..... ۲۶
- برآورد احتمال رخداد آلودگی نترات آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم تقویت شیب شدید
مهدی هاشمی، علی دسترنج..... ۴۵
- تحلیل پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر استان سیستان و بلوچستان
مرتضی صابری، محمدرضا دهمرده قلعه نو، رسول خطیبی..... ۶۴
- پایش آب‌های سطحی سیلاب با استفاده از قطبش‌های مختلف و شاخص‌های طیفی آب مبتنی بر سنجش از دور در آبخیز کرخه
زینب حزباوی، مرضیه قشمشمی..... ۸۴
- کاربست رویکرد پنج‌حلقه‌ای در مدیریت پایدار آبخیز افین خراسان جنوبی
رضا چمنی، معصومه هواسی، رضا یاقوتی، سیدحمیدرضا صادقی..... ۱۰۸
- طبقه‌بندی کاربری‌های کشاورزی با کاربرد تلفیقی فنون پیشرفته سنجش از دور، مدل‌سازی جی‌آی‌اس و صحت‌سنجی‌های میدانی در آبخیزهای استان فارس
مجتبی پاک پرور، سید مسعود سلیمان پور، محمدمهدی قاسمی، محمدهادی جرعه نوش، سارا کوشافر، حسین صحرایان..... ۱۲۶

نشریه علمی "پژوهش‌های آبخیزداری"

صاحب امتیاز: سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵

درجه علمی پژوهشی این نشریه به استناد نامه شماره ۳/۱۸/۱۹۲۹۱۶ به تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۲ مورد تأیید وزارت علوم، تحقیقات و فناوری قرار گرفته است. همچنین این نشریه دارای پروانه انتشار به شماره ۱۶۱۹۹ مورخ ۱۴۰۰/۰۴/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی می‌باشد.

مدیر مسئول: ابوالفتح مرادی، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
سردبیر: علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اعضای هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

امیر حمزه حقی آبی، استاد گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
داور خلیلی، استاد بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
محمدتقی دستورانی، استاد گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
محمد زارع، استاد بخش علوم زمین دانشکده علوم دانشگاه شیراز
سیدمسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
مجید صوفی، دانشیار بازنشسته بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
سیدیوسف عرفانی فرد، دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران
عطا الله کاویان، استاد گروه آبخیزداری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری
علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
مدیر داخلی: سید مسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
ویراستار و کارشناس اداری: مریم عنایتی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
کارشناس آماری: لادن جوکار، مربی بازنشسته مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی شیراز، ایران
صفحه آرا: پارسا حقیقی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

این نشریه در پایگاه‌های استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ISSN ۲۰۳۸-۲۹۸۱ به نشانی <https://isc.gov.ir>، نظام نمایه سازی

مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (RICeST) به نشانی <https://ricest.ac.ir> ایران ژورنال www.sid.ir

و www.magiran.com نمایه می‌شود.

نشریه در رد ویرایش نوشته‌ها و یا خلاصه کردن آنها آزاد است.

استفاده از تصویرهای نشریه با ارجاع به نشریه آزاد است.

نشانی: شیراز بلوار، مدرس خیابان جانبازان نبش استاد مردانی غربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، دفتر نشریه پژوهش‌های آبخیزداری

صندوق پستی: ۶۱۷-۷۱۵۵۵

دورنگار: ۰۷۱) ۳۷۲۰۶۳۷۶

رایانامه: wmrj@areeo.ac.ir

کدپستی: ۶۳۵۱۱-۷۱۵۵۸

تلفن: ۰۷۱) ۳۷۲۰۴۹۵۹ داخلی - ۲۲۴

تارنما: <http://wmrj.areeo.ir>



مرکز تحقیقات، آموزش، اطلاع‌رسانی و منابع علمی ندس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش، اطلاع‌رسانی و منابع علمی ندس

شماره ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵

فهرست

ارزیابی اثرات شاخص‌های پیوند از دور بر غلظت PM2.5 با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در استان سیستان و بلوچستان

ابوالفضل داوری، رسول مهدوی نجف‌آبادی، مرضیه رضایی، ام‌البنین بذرافشان، علیرضا شهریاری..... ۱

ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکتری بر محتوای ماده آلی و نیتروژن بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی

صائمه صادقی گجوتی، حسین خیرفام، سعید نجفی..... ۲۶

برآورد احتمال رخداد آلودگی نترات آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم تقویت شیب شدید

مهدی هاشمی، علی دسترنج..... ۴۵

تحلیل پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر استان سیستان و بلوچستان

مرتضی صابری، محمدرضا دهمرده قلعه نو، رسول خطیبی..... ۶۴

پایش آب‌های سطحی سیلاب با استفاده از قطبش‌های مختلف و شاخص‌های طیفی آب مبتنی بر سنجش از دور در آبخیز کرخه

زینب حزباوی، مرضیه قشمشمی..... ۸۴

کاربست رویکرد پنج‌حلقه‌ای در مدیریت پایدار آبخیز افین خراسان جنوبی

رضا چمنی، معصومه هواسی، رضا یاقوتی، سیدحمیدرضا صادقی..... ۱۰۸

طبقه‌بندی کاربری‌های کشاورزی با کاربرد تلفیقی فنون پیشرفته سنجش از دور، مدل‌سازی جی‌آی‌اس و صحت-سنجی‌های میدانی در آبخیزهای استان فارس

مجتبی پاک پرور، سید مسعود سلیمان پور، محمدمهدی قاسمی، محمدهادی جرعه نوش، سارا کوشافر،

حسین صحراپیان..... ۱۲۶



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آ. مخمرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی اثرات شاخص‌های پیوند از دور بر غلظت PM2.5 با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در استان سیستان و بلوچستان

- ابوالفضل داوری^۱، رسول مهدوی نجف‌آبادی^{۲*}، مرضیه رضایی^۳، ام‌البنین بذرافشان^۴، علیرضا شهریار^۵
- ۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
 - ۲- دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
 - ۳- استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
 - ۴- دانشیار گروه فضای سبز، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

در سال‌های گذشته، آلودگی هوا، به‌ویژه افزایش غلظت ذرات معلق PM2.5، به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی مطرح‌شده است. استان سیستان و بلوچستان به‌دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه و قرارگیری در مسیر بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، همراه با کاهش بارندگی‌های سالانه، شرایط مساعدی برای شکل‌گیری و تشدید پدیده گرد و غبار دارد. در این راستا، پدیده‌های پیوند از دور (S) بر تغییرات اقلیمی و به تبع آن بر کیفیت هوا نقش مهمی دارند. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثرات شاخص‌های پیوند از دور بر تغییرات غلظت PM2.5 در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین بود. از این‌رو، داده‌های هواشناسی و غلظت PM2.5 در دو دهه از ایستگاه‌های زاهدان و خاش جمع‌آوری و با شاخص‌های پیوند از دور تلفیق شدند. سپس، با به‌کارگیری روش‌های تحلیل همبستگی و انتخاب ویژگی، پنج مدل یادگیری ماشین ارزیابی شدند و بهترین مدل برای برآورد غلظت ذرات معلق PM2.5 شناسایی شدند. نتایج این پژوهش، هم به درک بهتر روابط پیچیده میان نوسانات اقلیمی و کیفیت هوا منجر شد و هم با ارائه یک چارچوب تحلیلی دقیق، ابزار کاربردی برای سیاست‌گذاران در مدیریت آلودگی هوا فراهم آورد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: ra_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir

استناد: داوری، ا.، مهدوی‌نجف‌آبادی، ر.، رضایی، م.، بذرافشان، ا.، شهریار، ع.ر. ۱۴۰۵. ارزیابی اثرات شاخص‌های پیوند از دور بر غلظت PM2.5 با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در استان سیستان و بلوچستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۱-۲۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.369570.1624

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱ تا ۲۵.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

در این پژوهش از یک چارچوب تحلیلی چندمرحله‌ای جامع بهره‌گرفته شد و داده‌های هواشناسی و غلظت ذرات PM2.5 از ایستگاه‌های زاهدان و خاش در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ جمع‌آوری شد و با داده‌های شاخص پیوند از دور مرکز پیش‌بینی اقلیم NOAA تکمیل شد. پس از پیش‌پردازش دقیق داده‌ها که شامل بررسی کیفیت داده‌ها (بررسی اندازه‌های غیرممکن یا ناهنجار PM2.5 و اصلاح یا حذف اندازه‌های مشکوک)، همزمان‌سازی زمانی داده‌ها (تطبیق داده‌های PM2.5 و شاخص‌های پیوند از دور بر اساس تاریخ برای اطمینان از همزمانی اندازه‌های مستقل و وابسته) و جایگزینی داده‌های مفقود (با استفاده از نزدیک‌ترین اندازه معتبر، میانگین‌گیری زمانی و درون‌یابی‌های آماری برای حفظ توزیع اصلی داده‌ها) بود، یک رویکرد تحلیلی دوگانه اجرا شد. ابتدا از تحلیل همبستگی پیرسون برای سنجش روابط خطی میان شاخص‌های پیوند از دور و سطوح PM2.5 استفاده شد. سپس، با کاربرد الگوریتم Boruta موثرترین ویژگی‌ها با تأخیرهای زمانی صفر تا ۶ ماهه شناسایی شد. پنج مدل پیشرفته یادگیری ماشین شامل Bagged CART، LightGBM، Gradient Boosting، Random Forest و XGBoost ارزیابی شدند که ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۳۰٪ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. ارزیابی عملکرد با سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و ضریب تبیین (R^2) انجام شد و برای تفسیرپذیری مدل‌ها، چهار روش پیشرفته شامل اهمیت ویژگی‌های جایگشتی (PFI)، اندازه‌های SHAP مبتنی بر تئوری بازی‌ها، تحلیل حساسیت Sobol و نمودارهای وابستگی جزئی (PDP) به کار گرفته شد. کلیه تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار R (نسخه ۴،۲،۰) انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که اثر شاخص‌های پیوند از دور بر غلظت ذرات PM2.5 در ایستگاه‌های زاهدان و خاش معنادار بود. در ایستگاه زاهدان، بیشترین همبستگی مثبت مربوط به شاخص PDO (۰/۱۵۸) با تأخیر ۵ ماهه) و شاخص AMO (۰/۲۱۲) با تأخیر صفر ماهه) بود. از سوی دیگر، بیشترین همبستگی منفی مربوط به شاخص AMM (۰/۳۳۶) با تأخیر ۲ ماهه) و شاخص WHWP (۰/۴۲۰) با تأخیر ۴ ماهه) بود. در ایستگاه خاش، بیشترین همبستگی مثبت مربوط به شاخص PDO (۰/۱۵۹) با تأخیر ۲ ماهه) و بیشترین همبستگی منفی مربوط به WHWP (۰/۳۸۵) با تأخیر ۴ ماهه) بود. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها با روش Boruta نشان داد بیشترین نقش پیش‌بینی‌کننده PM2.5 مربوط به شاخص WHWP با میانگین اهمیت ۱۳/۶۳ با تأخیر ۶ ماهه در زاهدان و با میانگین اهمیت ۱۰/۵۱ با تأخیر ۵ ماهه در خاش بود. در ارزیابی مدل‌ها، XGBoost به‌عنوان برترین مدل با دقت استثنایی ($R^2=0/989$) در زاهدان و ($R^2=0/993$) در خاش) و حداقل خطا ($MAPE=2/36-3/07$) در زاهدان و ($MAPE=1/5-1/8$) در خاش) شناخته شد. نتایج تحلیل‌های حساسیت نشان داد بیشترین اثر مربوط به شاخص AMM (با امتیاز اهمیت ۶۸۵ در زاهدان و ۵۶۱ در خاش) بود. از سوی دیگر، با زمان‌های تأخیر خاص، رفتار شاخص‌های WHWP و AMO غیرخطی و پیچیده بود. به‌طور کلی نتایج بیانگر اثرات قابل توجه نوسانات اقیانوسی-جوی (با ضریب‌های همبستگی میان ۰/۱۵ تا ۰/۴۲) و امتیازهای اهمیت متغیر میان ۵/۶ تا ۱۳/۶) بر کیفیت هوای منطقه بود. دقت عملکرد مدل XGBoost در پیش‌بینی بلندمدت PM2.5 در منطقه مطالعه‌شده بسیار زیاد بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین همبستگی مثبت با غلظت PM2.5 در ایستگاه زاهدان مربوط به شاخص‌های PDO و AMO بود و بیشترین همبستگی منفی مربوط به شاخص‌های AMM و WHWP بود. مدل XGBoost به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی با بیشترین دقت و کمترین خطا شناخته شد. همچنین، نتایج تحلیل‌های SHAP و PDP نشان داد که اثرات شاخص‌های AMM و WHWP بر غلظت PM2.5 پیچیده و غیرخطی است و تأخیر زمانی نیز بسیار مهم است. در ایستگاه خاش نیز مهم‌ترین نقش در پیش‌بینی PM2.5 مربوط به شاخص‌های AMM، AMO، PDO و WHWP بود که بیانگر اثرات قابل توجه نوسانات اقلیمی بر کیفیت هوا است. این یافته‌ها بیانگر

اهمیت روابط غیرخطی و آستانه‌های بحرانی در مدل‌سازی کیفیت هوا بود. بر پایه نتایج این پژوهش، به‌منظور تصمیم‌ها و اقدامات پیشگیرانه پیشنهاد می‌شود شاخص‌های پیوند از دور در پیش‌بینی دوره‌های با غلظت زیاد ذرات معلق، پیوسته پایش شوند. همچنین، پیشنهاد می‌شود بر اساس تفاوت‌های مشاهده‌شده میان دو ایستگاه (زاهدان و خاش)، به ویژگی‌های محلی و منطقه‌ای در مدل‌سازی کیفیت هوا بیشتر توجه شود.

واژگان کلیدی

ارزش SHAP، پیوند از دور، تحلیل حساسیت Sobol، PM2.5، همبستگی پیرسون

مقدمه

پستی‌بلندی وجود دارد. از این رو، الگوهای مختلف توزیع گرد و غبار و مسیرهای حمل و نقل معمولاً در رویدادهای بزرگ گرد و غبار که از این منطقه منشأ می‌گیرند، مشاهده می‌شود (پروسپرو و همکاران ۲۰۰۲). ایران به دلیل قرارگیری در کمربند گرد و غبار جهانی، به طور قابل توجهی تحت تأثیر طوفان‌های گرد و غبار است و شرایط آب و هوایی بیش از نیمی از کشور خشک و نیمه‌خشک است (شمسی‌پور و صفرراد ۲۰۱۲). استان سیستان و بلوچستان، در جنوب شرقی ایران، به دلیل آب و هوای خشک و ویژگی‌های جغرافیایی منحصر به فرد، شرایط مساعدی برای پدیده طوفان‌های گرد و غبار دارد (جهان‌تیغ و همکاران ۲۰۲۳). این پدیده‌ها فقط بر کیفیت هوا و سلامت عمومی اثرگذار نیستند بلکه چالش‌های مهمی برای کشاورزی، زیرساخت‌ها و اقتصادهای محلی ایجاد می‌کنند. با توجه به اینکه تغییرات اقلیمی مانند تغییرات سرعت باد، بارش، دما و الگوهای رطوبت، سبب تشدید شرایط طوفان گرد و غبار می‌شود، درک عامل‌هایی که در ایجاد طوفان‌های گرد و غبار نقش دارند، ضروری‌تر از گذشته به نظر می‌رسد (زانگ و همکاران ۲۰۱۹). در میان این عامل‌ها، نقش پیوند از دور (الگوهای آب و هوایی در مقیاس بزرگ که تغییرات آب و هوایی را در مناطق دوردست به هم مرتبط می‌کنند) بر شرایط محلی مهم و اثرگذار است (مارتینز-آلوارادو و همکاران ۲۰۰۹). با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در پژوهش‌های هواشناسی، پیش‌بینی دقیق طوفان‌های گرد و غبار همچنان به‌عنوان یک چالش بزرگ باقی‌مانده است. مدل‌های

طوفان گرد و غبار از پدیده‌های طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌آید که عمدتاً در فصل‌های گرم سال رخ می‌دهند. چرخه گرد و غبار به جنبه‌های بسیاری از اقلیم زمین ارتباط دارد و بر آن اثرگذار است. آئروسول‌های گرد و غبار می‌توانند بر اقلیم‌های منطقه‌ای و حتی جهانی اثرات قابل توجهی داشته باشند. به‌عنوان مثال، آئروسول‌های گرد و غبار ممکن است با کاهش تضاد حرارتی زمین-اقیانوس، گردش‌های موسمی آسیا را تعدیل کنند (لی و همکاران ۲۰۱۶) و بر بارش، ویژگی‌های ابر و بودجه انرژی زمین اثرگذار باشند و به‌عنوان هسته‌های تراکم عمل کنند (کریمین و همکاران ۲۰۱۳). گرد و غبار می‌تواند مسافت‌های طولانی را طی کند و بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی جهانی اثرگذار باشد (ریزولو و همکاران ۲۰۱۷). کمربند گرد و غبار، که به منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک اشاره دارد که از سواحل غربی شمال آفریقا تا شرق آسیا کشیده شده است (واشنگتن و همکاران ۲۰۰۳)، به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع آئروسول گرد و غبار معدنی در زمین شناخته شده است. این کمربند شامل بسیاری از بیابان‌های بزرگ جهان است که خطرات قابل توجهی را برای جمعیت‌های انسانی ایجاد می‌کند، به طوری که تنوع طوفان‌های گرد و غبار در درجه اول به‌وسیله فرآیندهای طبیعی از جمله بارندگی و قدرت باد هدایت می‌شود تا فعالیت‌های انسانی (میدلتون ۲۰۱۹). به دلیل گستردگی زیاد آن، کمربند گرد و غبار در چندین منطقه اقلیمی با فرآیندها و الگوهای جوی متفاوت، انواع پوشش گیاهی و ویژگی‌های

شناسایی کردند. پیرا و همکاران (۲۰۲۴) نیز افزایش صد درصدی AOD پس از رویدادهای ال نینو در آمازون را گزارش کردند. نتایج پژوهش‌های پیشین در ایران نشان داده‌اند که پدیده گرد و غبار تحت تأثیر نوسانات اقلیمی و شاخص‌های پیوند از دور است. خسروی و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی خشکسالی‌های متناوب در سیستان و بلوچستان نشان دادند که شاخص‌های PDO، MEI، POL و WHWP با اثرگذاری بر امواج جوی، موقعیت رودها و الگوهای فشار سطحی، در تداوم خشکسالی و کاهش بارش نقش مهمی دارند و بیش از ۷۰٪ از تغییرات اقلیمی سالانه استان را می‌توان با این شاخص‌ها تبیین کرد. در پژوهشی امیدوار و همکاران (۲۰۲۴) گرد و غبار استان کرمان را بررسی و گزارش کردند که بیشترین فراوانی روزهای گرد و غباری در فصل بهار و کمترین در پاییز رخ داد و با شاخص‌های AO، AMO، PDO و NINO می‌توان حدود ۲۵٪ از تغییرات روزهای گرد و غبار را توضیح داد. نتایج پژوهش وطن‌پرست و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داد که شاخص‌های ENSO، IOD و QBO با اثرگذاری بر شدت و جهت باد، زمینه‌ساز بلند شدن ذرات گرد و غبار و رخداد طوفان‌های غباری در نیمه غربی ایران بود و بیشترین اثر بر افزایش فراوانی گرد و غبار بلندمدت مربوط به فاز سرد ENSO همراه با فاز منفی QBO بود. نتایج پژوهش‌های مروری درباره منشأ و مسیر ریزگردها در ایران بیانگر آن است که منابع داخلی در دشتهای خشک شرق و جنوب‌شرق کشور (به‌ویژه سیستان و بلوچستان)، غرب و جنوب‌غرب ایران (خوزستان، ایلام، کرمانشاه) و منابع خارجی در جنوب‌غربی افغانستان، عراق، عربستان و شمال آفریقا هستند (آرامی و همکاران ۲۰۱۸). نتایج تمام این پژوهش‌ها تأکید دارند که گرد و غبار در ایران پدیده‌ای چندعاملی است که باید با رویکرد جامع بررسی و مدل‌سازی شود. یادگیری ماشین به‌عنوان یک راهکار امیدوارکننده برای بهبود پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار مطرح‌شده است، زیرا، با تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های گسترده و شناسایی الگوهای پیچیده‌ای که

سنتی معمولاً از رویکردهای خطی استفاده می‌کنند که نمی‌توانند تعاملات پیچیده و غیرخطی میان عامل‌های مختلف آب و هوایی و شرایط محلی را نشان دهند. افزون بر این، بسیاری از پژوهش‌های موجود عمدتاً بر متغیرهای منطقه‌ای مانند رطوبت خاک و الگوهای باد متمرکز است (علی‌زاده چوباری و همکاران ۲۰۱۴) و اثرات بالقوه پیوند از دور و نوسانات جوی در مقیاس بزرگ نادیده گرفته می‌شود. این شکاف در پژوهش‌ها، اثربخشی راهبردهای پیش‌بینی گرد و غبار و مدیریت آن را به شدت محدود می‌کند. از این‌رو، به توسعه مدل‌های جدید و جامع‌تری نیاز مبرمی است تا بتوان اثرات همه جانبه این پدیده را بررسی کرد. نتایج پژوهش‌های پرشماری نشان‌دهنده است که پدیده‌های پیوند از دور به‌ویژه الینو-نوسان جنوبی (ENSO) بر رخداد و شدت طوفان‌های گرد و غبار در مناطق مختلف جهان به‌طور قابل توجهی اثرگذار است. در ایران نتایج پژوهش اکبری و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که همبستگی شاخص‌های ENSO و MEI با فراوانی گرد و غبارهای فرامنطقه‌ای معنادار بود. انصاری قوجقار و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص ONI دریافتند که اثر فاز گرم ENSO بر استان‌های خوزستان و سیستان و بلوچستان متفاوت بود و باعث افزایش طوفان‌های گرد و غبار شد. وطن‌پرست قلعه‌جوق و همکاران (۲۰۲۴) نیز اثر همزمان ENSO، IOD و QBO را بر گرد و غبار در غرب ایران بررسی کردند و دریافتند که بیشترین اثر بر افزایش گرد و غبار مربوط به فاز سرد ENSO همراه با فاز منفی QBO بود. مائو و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط میان فاز منفی نوسان شمالگان (AO) و افزایش طوفان‌های گرد و غبار در شمال چین را گزارش کردند در حالی که لیو و همکاران (۲۰۲۰) کاهش گرد و غبار در شمال چین را با تقویت قطب شمال مرتبط دانستند. پایوس و همکاران (۲۰۲۲) در بورنئو دریافتند که ژرفای نوری آئروسول (AOD) در طول رویدادهای ال نینو افزایش یافت. بین و همکاران (۲۰۲۲) الگوهای متفاوت اثر ENSO بر گرد و غبار در زیرمنطقه‌های مختلف کمربند گرد و غبار را

و بلوچستان، در جنوب شرقی ایران هستند و با توجه به موقعیت جغرافیایی، تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاصی بوده که بر زندگی ساکنان و محیط طبیعی آن‌ها اثرگذار است. زاهدان به‌عنوان مرکز استان با آب و هوای بسیار گرم و خشک، تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد دارد (رزمجویی و حلییان ۲۰۱۱). از سوی دیگر، خاش که در فاصله‌ای نه‌چندان دور از زاهدان است، به‌دلیل موقعیت بلندتری در مقایسه با زاهدان آب و هوای ملایم‌تری دارد، اما همچنان با چالش‌هایی مانند کمبود منابع آبی و پدیده گرد و غبار روبه‌رو است (زینالی و اصغری ۲۰۱۸). افزون بر این، وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان که یکی از ویژگی‌های اقلیمی برجسته این منطقه به‌شمار می‌آید، تأثیر بسزایی بر کیفیت زندگی مردم و فعالیت‌های اقتصادی دارد (علی‌صوفی و همکاران ۲۰۲۳).

روش پژوهش

در این پژوهش، داده‌های لازم از منابع چندگانه شامل ایستگاه‌های هواشناسی همدید محلی، محصولات سنجنش از دور سنجنده MODIS نصب‌شده روی ماهواره‌های Terra و Aqua، و شاخص‌های پیوند از دور بر اساس مبانی اقلیمی مرتبط با الگوهای اقیانوسی و جوی اثرگذار بر جنوب شرق ایران انتخاب شدند. شاخص‌هایی مانند AMO، PDO، AMM و WHWP به‌دلیل ارتباط فیزیکی‌شان با تغییرات دمای سطح دریا، شدت بادهای مونسونی، و انتقال توده‌های گرد و غبار استفاده شدند. داده‌های شاخص‌ها از پایگاه معتبر NOAA برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ استخراج شد. مراحل پردازش داده‌ها شامل بررسی کیفیت داده‌ها (بررسی اندازه‌های غیرممکن یا ناهنجار PM2.5 و اصلاح یا حذف اندازه‌های مشکوک)، همزمان‌سازی زمانی داده‌ها (تطبیق داده‌های PM2.5 و شاخص‌های پیوند از دور بر اساس تاریخ برای اطمینان از همزمانی اندازه‌های مستقل و وابسته) و جایگزینی داده‌های مفقود (با استفاده از نزدیک‌ترین اندازه معتبر، میانگین‌گیری زمانی و درون‌یابی‌های آماری برای حفظ توزیع اصلی داده‌ها) انجام شد و تحلیل روابط خطی میان شاخص‌های پیوند از دور و

ممکن است با روش‌های سنتی قابل مشاهده نباشند، می‌توان کارایی را افزایش داد (الشمیری و همکاران ۲۰۲۲). با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان ویژگی‌های ورودی مختلف، از جمله شاخص‌های پیوند از دور، داده‌های هواشناسی و تصویرهای ماهواره‌ای را پردازش کرد و مدل‌های پیش‌بینی کارآمدتری ایجاد کرد. با بهره‌گیری از توانایی‌های یادگیری ماشین، پژوهشگران قادر خواهند بود مدل‌هایی را توسعه دهند که هم پدیده طوفان‌های گرد و غبار را پیش‌بینی می‌کند و هم تأثیرات آب و هوایی را ارزیابی می‌کند. هدف این پژوهش، پیش‌بینی اثرات شاخص‌های پیوند از دور بر تغییرات غلظت ذرات معلق PM2.5 در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین بود. در این پژوهش داده‌های هواشناسی و آلودگی هوا جمع‌آوری شد و سپس با شاخص‌های اقلیمی جهانی تلفیق شدند. افزون بر این پنج مدل یادگیری ماشین ارزیابی شد و دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی بلندمدت کیفیت هوا شناسایی شد. در این پژوهش سعی شد تا هم روابط پیچیده میان نوسانات اقلیمی و آلودگی هوا تحلیل شود و هم با ارائه یک چارچوب تحلیلی دقیق، ابزار علمی کارآمدی برای سیاست‌گذاران در مدیریت و کاهش آلودگی هوا فراهم آید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

استان سیستان و بلوچستان، دومین استان پهناور کشور و در جنوب شرقی ایران و در همسایگی استان‌های خراسان جنوبی، کرمان و هرمزگان است. این استان از شرق با افغانستان و پاکستان مرز مشترک داشته و از جنوب به دریای عمان متصل است که در این بخش، بندر راهبردی چابهار به‌عنوان تنها پایانه اقیانوسی ایران می‌باشد (احسانی ۲۰۱۹). از دیدگاه مختصات جغرافیایی، سیستان میان عرض‌های ۲۵° ۳' تا ۲۸° ۳۱' شمالی و طول‌های ۵۸° ۴۷' تا ۶۳° ۱۹' شرقی گسترده شده است موقعیت راهبردی در مرزهای شرقی ایران دارد (جهان‌تیغ و همکاران ۲۰۲۳). زاهدان و خاش، دو شهر مهم استان سیستان

غلظت ذرات PM2.5 با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (هائو و همکاران ۲۰۲۲).

$$r_{ij} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

x_i و y_i : اندازه‌های مربوط به دو متغیر بررسی شده، \bar{x} و \bar{y} : میانگین این اندازه‌ها و Σ نماد جمع برای تمام داده‌ها است.

ضریب همبستگی پیرسون که با نماد r نمایش داده می‌شود، یک شاخص آماری برای اندازه‌گیری شدت و جهت رابطه خطی میان دو متغیر کمی است که اندازه آن میان ۱+ (همبستگی مثبت کامل) تا ۱- (همبستگی منفی کامل) متغیر است و اندازه صفر نشان‌دهنده نبود رابطه خطی است (شوبر و همکاران ۲۰۱۸). در فرآیند انتخاب ویژگی، از روش Boruta به‌عنوان یک روش انتخاب ویژگی مبتنی بر جنگل تصادفی استفاده شد که می‌توان با تکیه بر آزمون فرضیه آماری، ویژگی‌های معنادار را از مجموعه داده‌ها استخراج کرد (کورسا و همکاران ۲۰۱۰). فرآیند Boruta شامل ایجاد نسخه‌های تصادفی از هر ویژگی (ویژگی‌های سایه)، اجرای الگوریتم جنگل تصادفی و اندازه‌گیری اهمیت هر ویژگی واقعی و ویژگی‌های سایه است. ویژگی‌هایی که اهمیت‌شان به‌طور معناداری بیشتر از اهمیت ویژگی‌های سایه باشد، در دسته تأییدشده، و آن‌هایی که کمتر باشند در دسته ردشده گذاشته می‌شوند، در حالی که ویژگی‌های نامشخص در وضعیت آزمایشی باقی می‌مانند و در تکرارهای جایگشتی بعدی بررسی می‌شوند (کورسا و رودنیسکی ۲۰۱۰). در این پژوهش، این فرآیند در چندین تکرار اجرا شد تا صحت انتخاب ویژگی‌ها مشخص شود. همچنین این فرآیند برای شاخص‌های پیوند از دور در تأخیرهای زمانی صفر تا شش ماهه اعمال شد تا مشخص شود کدام شاخص‌ها و در چه بازه زمانی بیشترین اثر را بر پیش‌بینی PM2.5 دارند. همزمان، رویکردهای مبتنی بر سنج‌های اهمیت ویژگی نیز به‌کار گرفته شد تا اثرگذارترین متغیرهای

پیش‌بینی برای مدل‌سازی غلظت ذرات PM2.5 شناسایی شوند. در گام بعدی، پنج مدل مختلف یادگیری ماشین شامل Bagged CART، Random Forest، Gradient Boosting، LightGBM و XGBoost پیاده‌سازی شدند. برای این مدل‌ها پس از دریافت داده‌های پیش‌پردازش شده و ویژگی‌های انتخابی، فرآیند آموزش انجام شد و سنج‌های هر یک با روش‌های بهینه‌سازی نظام‌مند تنظیم شد تا بیشترین سطح کارایی پیش‌بینی به‌دست آمد. برای بهینه‌سازی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، سنج‌های مهم هر مدل با استفاده از اعتبارسنجی متقابل تعیین شدند. برای مدل Random Forest، تعداد درختان ۵۰۰ و تعداد ویژگی‌های انتخابی در هر تقسیم (mtry) برابر با ۲ و ۳ و ۴ انتخاب شد. در Bagged CART نیز تعداد درختان ۵۰۰ و ژرفای درخت‌ها به‌گونه‌ای تعیین شد که از بیش‌برازش جلوگیری شود. برای مدل‌های Gradient Boosting و XGBoost، تعداد درختان ۳۰۰، نرخ یادگیری ۰/۰۵ و ژرفای درخت ۴ در نظر گرفته شد، و در LightGBM تعداد درختان ۵۰۰، نرخ یادگیری ۰/۰۵ و ژرفای درخت ۵ انتخاب شد. تمام این سنج‌ها با اعتبارسنجی متقابل پنج برابر بهینه‌سازی شدند تا بهترین تعادل میان دقت و قابلیت تعمیم مدل‌ها فراهم شود. ورودی‌های مدل شامل شاخص‌های پیوند از دور بودند که برای مدل‌سازی PM2.5 استفاده شدند. در فرآیند ارزیابی مدل‌ها، ابتدا داده‌ها به‌طور تصادفی به دو بخش آموزشی (۷۰٪) و آزمایشی (۳۰٪) تقسیم شدند (غلامی و همکاران ۲۰۱۸). سپس، عملکرد مدل‌های توسعه‌یافته با سه شاخص RMSE، MAPE و R2 ارزیابی شد. با این معیارها به‌شکل جامع توانایی پیش‌بینی مدل‌ها در شرایط مختلف سنجش شد (الشماری و همکاران ۲۰۲۴). معیارهای ارزیابی با استفاده از رابطه‌های ۲ تا ۴ محاسبه شد (شارما و همکاران ۲۰۲۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

این روش‌ها به شکل جامع در محیط نرم‌افزار R با استفاده از کتابخانه‌های تخصصی پیاده‌سازی شدند تا امکان شناسایی دقیق مهم‌ترین عامل‌های اثرگذار بر غلظت PM2.5، درک روابط غیرخطی میان متغیرها، ارزیابی تعاملات پیچیده میان عامل‌های مختلف، و سرانجام ارائه نتایج قابل تفسیر و معتبر از عملکرد مدل‌ها فراهم آید. روند نمای مراحل انجام پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است. با این رویکرد تفسیرپذیری می‌توان هم اعتبار نتایج را افزایش داد و هم اطلاعات ارزشمندی برای تصمیم‌گیری‌های زیست‌محیطی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با کیفیت هوا ارائه داد. در مرحله پایانی، خروجی‌های پیش‌بینی تمام مدل‌ها با دقت تحلیل و ارزیابی شد.

نتایج و بحث

تحلیل همبستگی شاخص‌های پیوند از دور در تأخیرهای مختلف با PM2.5 در ایستگاه‌های زاهدان و خاش همبستگی میان شاخص‌های پیوند از دور و غلظت ذرات PM2.5 در ایستگاه‌های زاهدان و خاش در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲، نتایج تحلیل همبستگی در ایستگاه زاهدان نشان داد بیشترین همبستگی مثبت با غلظت PM2.5 مربوط به شاخص PDO (۰/۱۵۸) با تأخیر ۵ ماهه) و شاخص AMO (۰/۲۱۲) با تأخیر صفر ماهه) بود. از سوی دیگر، بیشترین همبستگی منفی با غلظت PM2.5 مربوط به شاخص AMM (-۰/۳۳۶) با تأخیر ۲ ماهه) و شاخص WHWP (-۰/۴۲۰) با تأخیر ۴ ماهه) بود. در ایستگاه خاش نیز بیشترین همبستگی مثبت با غلظت PM2.5 مربوط به شاخص PDO (۰/۱۵۹) با تأخیر ۲ ماهه) و بیشترین همبستگی منفی با غلظت PM2.5 مربوط به شاخص WHWP (-۰/۳۸۵) با تأخیر ۴ ماهه) بود. این یافته‌ها بیانگر آن است که اثر نوسانات اقیانوسی-جوی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی بر تغییرات غلظت ذرات PM2.5 در منطقه مطالعه شده معنادار بود. از این رو، از الگوهای همبستگی مشاهده شده با تأخیرهای مختلف ماهانه می‌توان در پیش‌بینی بلندمدت کیفیت هوا و شناسایی عامل‌های

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

\hat{y}_i : اندازه پیش‌بینی شده، y_i : ارزش واقعی برای i امین داده، n : تعداد مشاهده‌ها و \bar{y} : اندازه میانگین متغیر وابسته است.

در این پژوهش، به منظور افزایش تفسیرپذیری مدل‌های یادگیری ماشین، از چهار روش SHAP، Sobol، PFI و PDP استفاده شد. روش SHAP بر اساس الگوریتم TreeSHAP در مدل XGBoost پیاده‌سازی شد و اهمیت هر ویژگی با ۱۰۰۰ تکرار نمونه‌برداری محاسبه شد. با استفاده از رابطه ۵ ارزش Shapley محاسبه شد (لاندرگ و لی ۲۰۱۷).

$$\Phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(M-|S|-1)!}{M!} \Delta f(S, i) \quad (5)$$

اندازه Φ_i اندازه SHAP برای ویژگی i ، N : مجموعه تمام ویژگی‌ها، S : زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها به جز i ، M : تعداد کل ویژگی‌ها، $\Delta f(S, i)$: تغییر در پیش‌بینی مدل وقتی ویژگی i به مجموعه S اضافه شود.

تحلیل حساسیت Sobol با استفاده از روش Monte Carlo و ۱۰^۴ نمونه برای برآورد سهم نسبی و تعاملی متغیرها انجام شد. با استفاده از رابطه ۶ شاخص سوبول مرتبه اول S_i محاسبه شد. با استفاده از رابطه ۷ شاخص کل سوبول S_{T_i} تعیین شد (هوما و سالتی ۱۹۹۶).

$$S_i = \frac{V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (6)$$

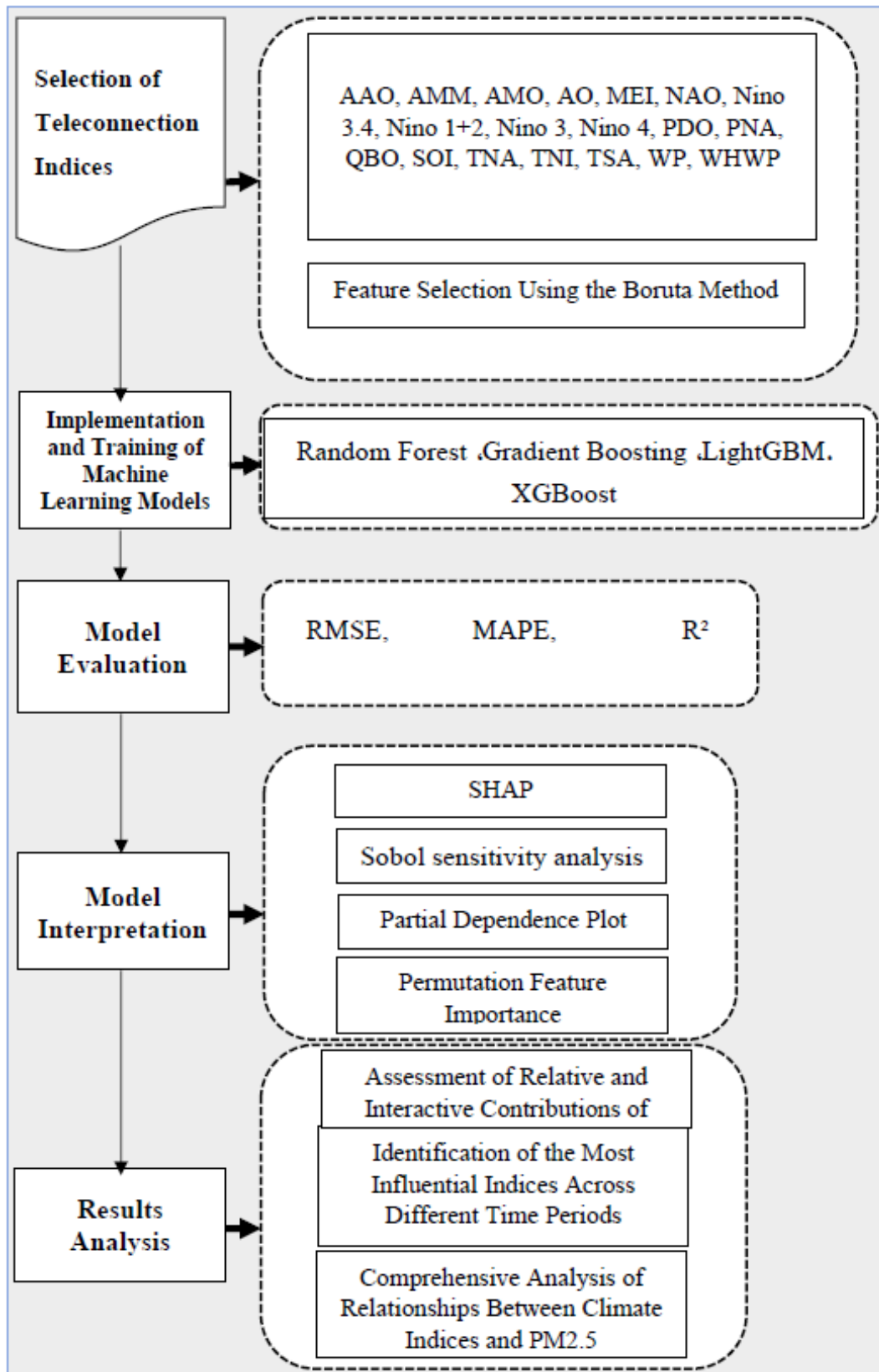
$$S_{T_i} = \frac{E_{X_i}(V_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (Y) = 1 - \frac{V_{X_{\sim i}}(E_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (7)$$

$V(Y)$: پراکنش کل خروجی مدل، $E_{X_{\sim i}}$: امید ریاضی نسبت به تمام متغیرها به جز متغیر i ، V_{X_i} : پراکنش نسبت به متغیر i ، $(Y|X_{\sim i})$: خروجی مدل به شرط متغیر i ، X_i ویژگی مد نظر است.

روش PFI با جایگشت تصادفی ویژگی‌ها و اندازه‌گیری کاهش عملکرد مدل (RMSE) به کار گرفته شد. در پایان، نمودارهای PDP برای نمایش روابط غیرخطی میان شاخص‌های انتخاب شده و PM2.5 رسم شد.

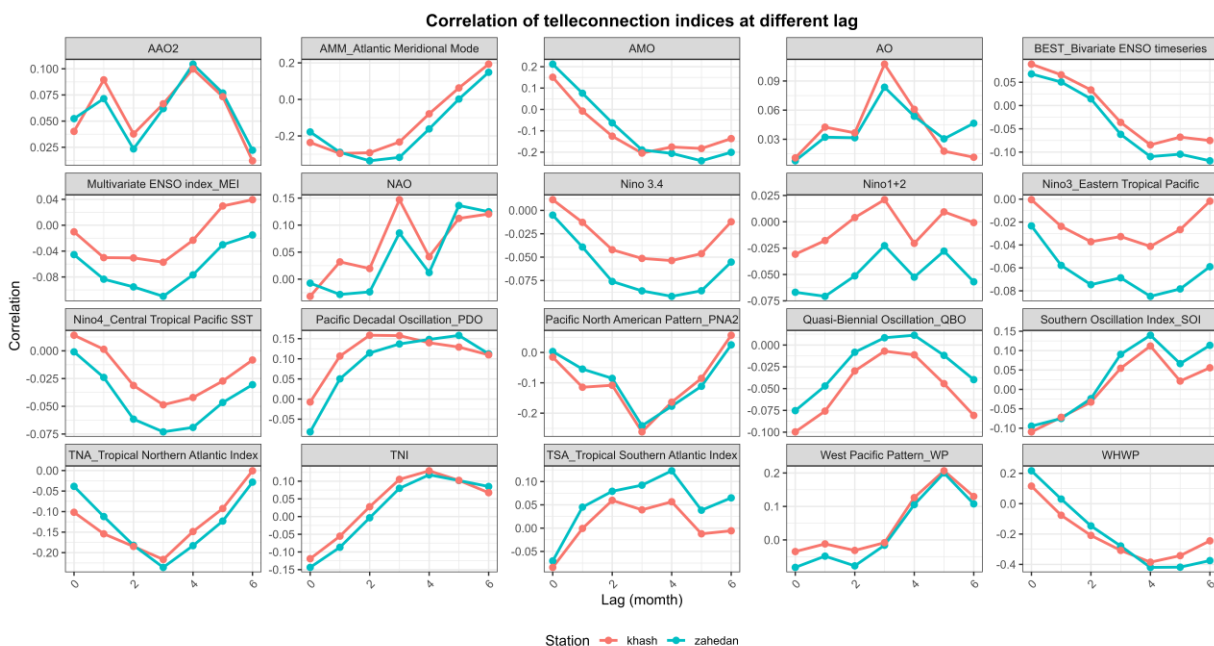
۴ Partial Dependence Plot (PDP)

مهم اثرگذار بر تغییرات غلظت ذرات معلق استفاده کرد.



شکل ۱- روند نمای مراحل پژوهش.

Figure 1- Flowchart of the research methodology steps.



شکل ۲- همبستگی شاخص‌های پیوند از دور با تأخیرهای مختلف با PM2.5 در ایستگاه‌های زاهدان و خاش.

Figure 2- Correlation of Teleconnections Indices at Different Lags with PM2.5 at the Zahedan and Khash Stations.

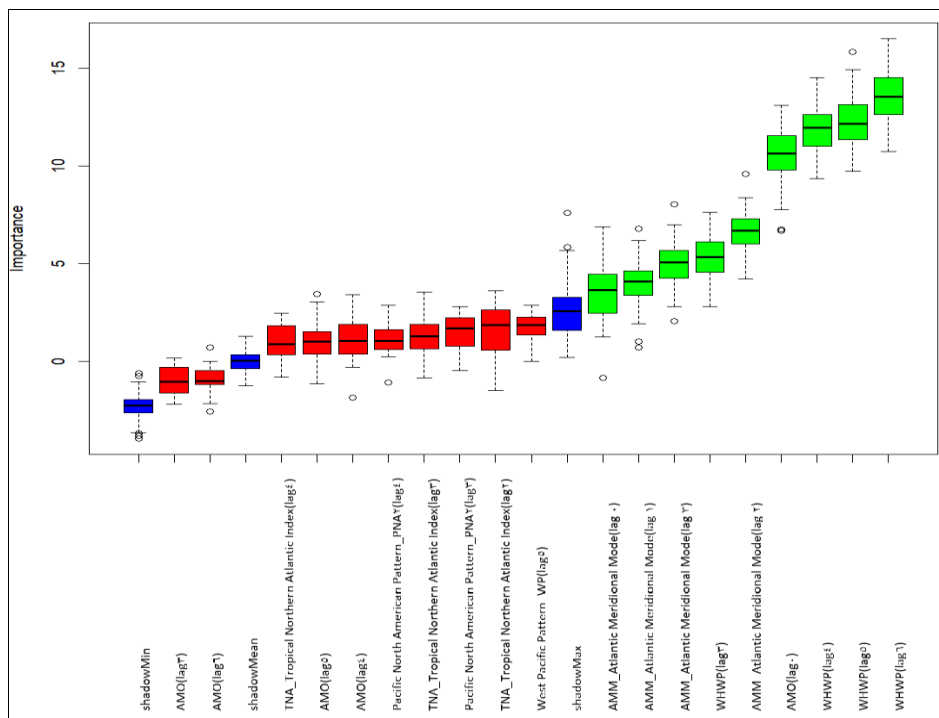
۰/۹۹ برای TNA با تأخیر ۴ ماهه) رد شدند. شاخص‌های WHWP و AMM با تأخیرهای خاص، در پیش‌بینی PM2.5 در ایستگاه زاهدان نقش مهمی داشتند. در حالی که AMO فقط با تأخیر صفر ماهه اثرگذار بود و دیگر شاخص‌ها تأثیر کم‌تری نشان دادند یا با برخی تأخیرها کاملاً بی‌اثر بودند. بیشترین تأثیر بر غلظت PM2.5 مربوط به شاخص WHWP (به‌ویژه با تأخیرهای بیشتر ۴ تا ۶ ماهه) بود که می‌تواند به دلیل اثرات ناهنجاری‌های دمایی در آبخیز اقیانوس اطلس غربی بر گردش عمومی جو و تغییر در موقعیت جت جنب‌حاره‌ای جنوب ایران باشد. این تغییرات سبب تعدیل شدت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان و مسیر انتقال گرد و غبار از بستر هامون می‌شوند. از سوی دیگر، شاخص AMM بیانگر ناهمسانی‌های دمای سطح دریا در اقیانوس اطلس شمالی بود که بر الگوهای همرفت استوایی و در نتیجه بر الگوهای فشار در جنوب غرب آسیا اثرگذار بود و موجب افزایش ناپایداری‌های جوی و خیزش گرد و غبار در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (تأخیرهای ۰ تا ۳ ماهه) شد. شاخص

تحلیل انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه زاهدان

نتایج انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه زاهدان در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان‌دهنده اهمیت متفاوت شاخص‌های پیوند از دور در پیش‌بینی PM2.5 بود. شاخص AMO فقط با تأخیر صفر ماهه و با میانگین اهمیت ۱۰/۵۷ و میانه ۱۰/۶۴ به‌عنوان ویژگی تأییدشده شناسایی شد، در حالی که با تأخیرهای ۳ تا ۶ ماهه رد شد. شاخص WHWP با تأخیرهای ۳ تا ۶ ماهه با بیشترین اهمیت تأیید شد، به‌ویژه با تأخیر ۶ ماهه با میانگین اهمیت ۱۳/۶۳ و میانه ۱۳/۵۵ بیشترین اهمیت را نشان داد. AMM با تأخیرهای ۰ تا ۳ ماهه، میانگین اهمیت میان ۳/۵۷ تا ۶/۶۴ را نشان داد و با بیشترین میانگین اهمیت با تأخیر ۲ ماهه ۶/۶۴ تأیید شد. از سوی دیگر، شاخص‌های Pacific North American Pattern (PNA) با تأخیرهای ۳ و ۴ ماهه، TNA با تأخیرهای ۲ تا ۴ ماهه، و West Pacific (WP) با تأخیر ۵ ماهه به دلیل اهمیت کم (به‌طور مثال میانگین اهمیت

یک از شاخص‌های اقلیمی نامبرده، با سازوکاری خاص بر انتقال جرم، تغییر الگوهای باد و نوسانات فشار، نقش متمایزی در مهار غلظت PM2.5 در منطقه سیستان اثرگذار بودند.

AMO نیز با تغییرات بلندمدت در دمای سطح اقیانوس اطلس شمالی بر وضعیت بارشی ایران و نواحی مجاور اثرگذار بود و با تأخیر صفر ماهه با افزایش رطوبت نسبی و کاهش موقت غلظت ذرات معلق، همبستگی مثبت ضعیفی نشان داد. از این رو، هر



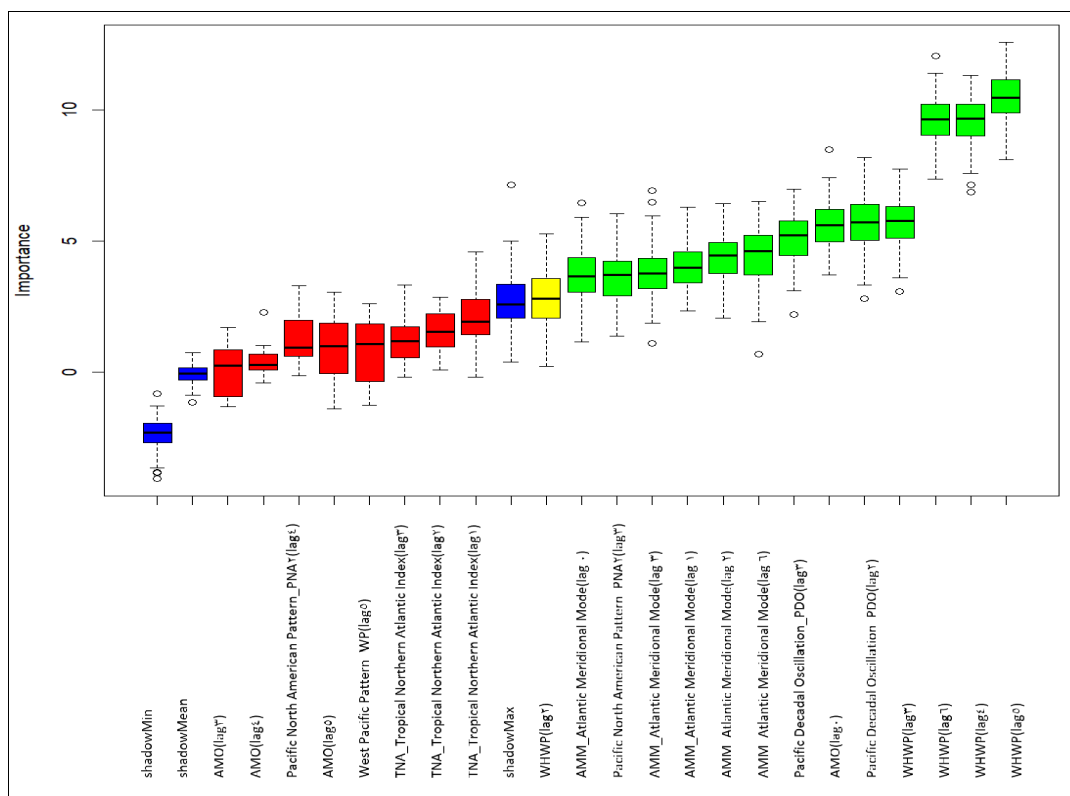
شکل ۳- انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه زاهدان.

Figure 3- Feature selection with Boruta method at Zahedan Station.

شاخص‌های PDO با تأخیرهای ۲ و ۳ ماهه با میانگین اهمیت ۵/۶۶ و ۵/۱۲ و شاخص PNA با تأخیر ۳ ماهه با میانگین اهمیت ۳/۶۲ نیز به‌عنوان ویژگی‌های تأییدشده شناخته شدند. شاخص WHWP با تأخیرهای ۲ تا ۶ ماهه تأیید شد. بیشترین میانگین اهمیت این شاخص با تأخیر ۵ ماهه با میانگین ۱۰/۵۱ و میانه ۱۰/۴۶ بود. از سوی دیگر، شاخص‌های TNA با تمام تأخیرها (۱، ۲ و ۳ ماهه) و WP با تأخیر ۵ ماهه به‌دلیل اهمیت کم (به‌طور مثال شاخص WP با میانگین اهمیت ۰/۷۷ با تأخیر ۵ ماهه) رد شدند. این نتایج بیانگر نقش مهم شاخص‌های AMO، PDO، AMM و WHWP در PM2.5 در ایستگاه خاش بود، در حالی که اثر دیگر شاخص‌ها کمتر بود.

تحلیل انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه خاش

نتایج انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه خاش در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج این شکل بیانگر اهمیت قابل توجه شاخص‌های پیوند از دور در پیش‌بینی PM2.5 بود. شاخص‌های AMM با تمام تأخیرهای بررسی‌شده (به جز تأخیرهای ۴ و ۵ ماهه) به‌عنوان ویژگی‌های تأییدشده شناسایی شد که بیشترین میانگین اهمیت این شاخص با تأخیر ۶ ماهه و میانگین ۴/۴۵ و میانه ۴/۶۲ بود. شاخص AMO فقط با تأخیر صفر ماهه با میانگین اهمیت ۵/۶۱ و میانه ۵/۶۱ به‌عنوان ویژگی تأییدشده انتخاب شد، در حالی که با تأخیرهای ۳، ۴ و ۵ ماهه رد شد.

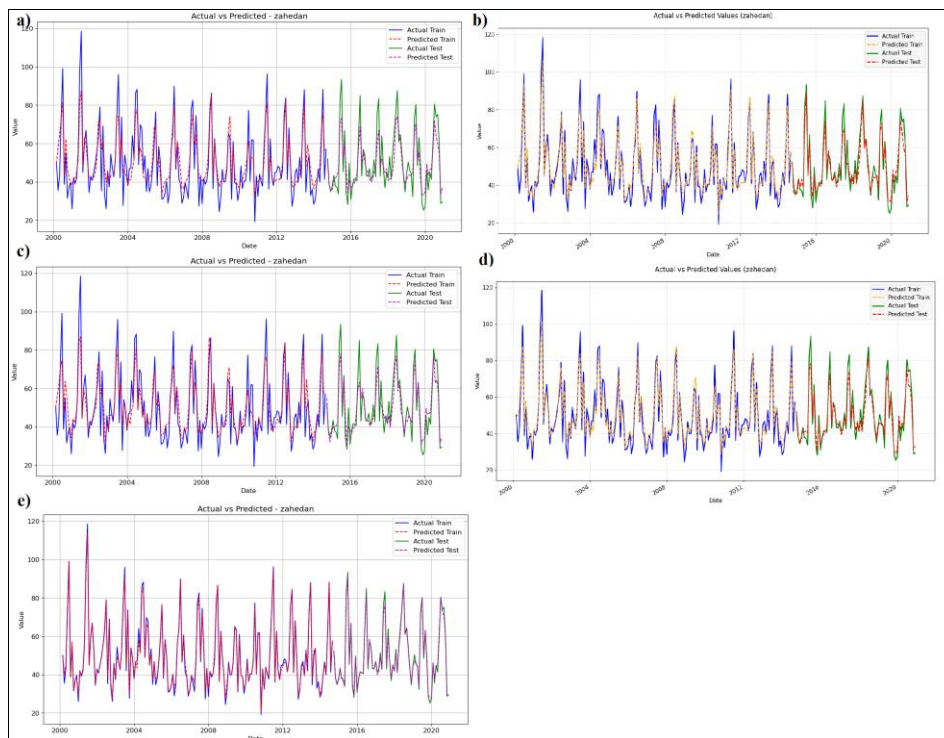


شکل ۴- انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه خاش.

Figure 4-Feature selection with Boruta method at Khash Station.

بیش‌برآورد بود. عملکرد مدل Gradient Boosting در پیش‌بینی روند کلی خوب بود، اما در اندازه‌های حدی دچار خطا شد. عملکرد مدل Random Forest در سال‌های مختلف متغیر بود. به‌طور مثال دقت آن در ۲۰۱۴ خوب بود اما در ۲۰۱۵ برای اندازه‌های زیاد خطای بیشتری داشت. به‌طور کلی پایدارترین عملکرد با کمترین انحراف مربوط به مدل XGBoost بود، اگرچه در اندازه‌های بیش از ۷۰ کم‌برآورد بود. الگوی مشترک در تمام مدل‌ها آن بود که دقت آنها در پیش‌بینی اندازه‌های متوسط (۴۰-۷۰) در مقایسه با اندازه‌های حدی، زیاد بود و تمام مدل‌ها روند کلی تغییرات PM2.5 را با دقت‌های متفاوتی پیش‌بینی کردند. این موضوع بیانگر امکان استفاده از آنها با در نظر گرفتن محدودیت‌هایشان در سامانه‌های پایش کیفیت هوا است.

پیش‌بینی PM2.5 با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در ایستگاه زاهدان مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری ماشین (Gradient Boosting, LightGBM, Bagged CART) در پیش‌بینی شاخص PM2.5 در ایستگاه زاهدان استان سیستان و بلوچستان در شکل ۵ نشان‌داده شده است. نتایج عملکرد مدل‌های مختلف در پیش‌بینی غلظت PM2.5 در ایستگاه زاهدان نشان داد که هر مدل نقاط قوت و ضعف ویژه‌ای دارد. دقت عملکرد مدل Bagged CART در پیش‌بینی اندازه‌های کم (۳۰-۵۰ میکروگرم بر مترمکعب) خوب بود (اختلاف کمتر از ۵ واحد)، اما در اندازه‌های زیاد (بیش از ۸۰) کم‌برآورد بود. عملکرد مدل LightGBM در بخش آموزش قابل قبول بود، اما در داده‌های آزمون به‌ویژه در اندازه‌های زیاد کم‌برآورد بود و در اندازه‌های کم



شکل ۵- پیش‌بینی PM2.5 با مدل‌های (a) Bagged CART (b) Gradient Boosting (c) Random Forest (d) LightGBM (e) XGBoost در ایستگاه زاهدان.

Figure 5- PM2.5 prediction with a) Bagged CART b) Gradient Boosting c) Random Forest d) LightGBM e) XGBoost models at Zahedan Station.

نتایج ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی برای ایستگاه زاهدان در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان داد که بهترین عملکرد با اختلاف قابل توجه با دیگر مدل‌ها بر اساس تمام معیارهای ارزیابی شده مربوط به مدل XGBoost بود. در هر دو مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی ضریب تبیین این مدل ۰/۹۸۹ بود و کمترین اندازه خطای مربعات میانگین (RMSE) و کمترین درصد خطای مطلق میانگین (MAPE=۰/۳۰۷-۲/۳۶) مربوط به مدل XGBoost بود که این موضوع بیانگر دقت استثنایی و قابلیت تعمیم‌پذیری فوق‌العاده این مدل بود. مدل Random Forest (MAPE=۰/۹۱۶-۰/۹۰۷) و $R^2=۰/۷۶۶-۰/۷۸۷$ و $MAPE=۰/۱۵/۲۱-۱۲/۱۸$ و $R^2=۰/۸۲۹-۰/۷۶۰$ و $MAPE=۰/۱۴/۱۳$ و $R^2=۰/۸۲۹-۰/۷۶۰$ و $MAPE=۰/۱۰/۵۶$ به‌عنوان ضعیف‌ترین مدل شناخته شد و به‌رغم عملکرد نسبتاً مطلوب در داده‌های آزمایشی، برای استفاده عملی در ایستگاه زاهدان مناسب نیست. این نتایج هم بیانگر برتری مطلق مدل XGBoost در ایستگاه زاهدان بود و هم برخلاف برخی ایستگاه‌های دیگر، تفاوت محسوسی میان عملکرد Random Forest و Gradient Boosting مشاهده نشد. از این رو، می‌توان از هر دو مدل به‌عنوان گزینه‌های جایگزین مناسب بهره برد، هرچند نتایج آنها به اندازه مدل XGBoost دقت و پایداری ندارند.

در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان داد که بهترین عملکرد با اختلاف قابل توجه با دیگر مدل‌ها بر اساس تمام معیارهای ارزیابی شده مربوط به مدل XGBoost بود. در هر دو مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی ضریب تبیین این مدل ۰/۹۸۹ بود و کمترین اندازه خطای مربعات میانگین (RMSE) و کمترین درصد خطای مطلق میانگین (MAPE=۰/۳۰۷-۲/۳۶) مربوط به مدل XGBoost بود که این موضوع بیانگر دقت استثنایی و قابلیت تعمیم‌پذیری فوق‌العاده این مدل بود. مدل Random Forest (MAPE=۰/۹۱۶-۰/۹۰۷) و $R^2=۰/۷۶۶-۰/۷۸۷$ و $MAPE=۰/۱۵/۲۱-۱۲/۱۸$ و $R^2=۰/۸۲۹-۰/۷۶۰$ و $MAPE=۰/۱۰/۵۶$ به‌عنوان ضعیف‌ترین مدل شناخته شد و به‌رغم عملکرد نسبتاً مطلوب در داده‌های آزمایشی، برای استفاده عملی در ایستگاه زاهدان مناسب نیست. این نتایج هم بیانگر برتری مطلق مدل XGBoost در ایستگاه زاهدان بود و هم برخلاف برخی ایستگاه‌های دیگر، تفاوت محسوسی میان عملکرد Random Forest و Gradient Boosting مشاهده نشد. از این رو، می‌توان از هر دو مدل به‌عنوان گزینه‌های جایگزین مناسب بهره برد، هرچند نتایج آنها به اندازه مدل XGBoost دقت و پایداری ندارند.

جدول ۱- مقایسه مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی PM_{2.5} در ایستگاه زاهدان.

Table 1- Comparison of machine learning models for PM_{2.5} prediction at Zahedan Station.

Model	RMSE		MAPE		R ²	
	Train	Test	Train	Test	Train	Test
Bagged CART	8.556	7.584	15.211	12.180	0.766	0.787
LightGBM	8.657	6.794	14.130	10.560	0.760	0.829
Gradient Boosting	5.493	5.097	9.548	8.187	0.904	0.904
Random Forest	5.395	4.769	9.678	7.256	0.907	0.916
XGBoost	1.896	1.724	3.073	2.355	0.989	0.989

پیش‌بینی PM_{2.5} با استفاده از مدل‌های یادگیری

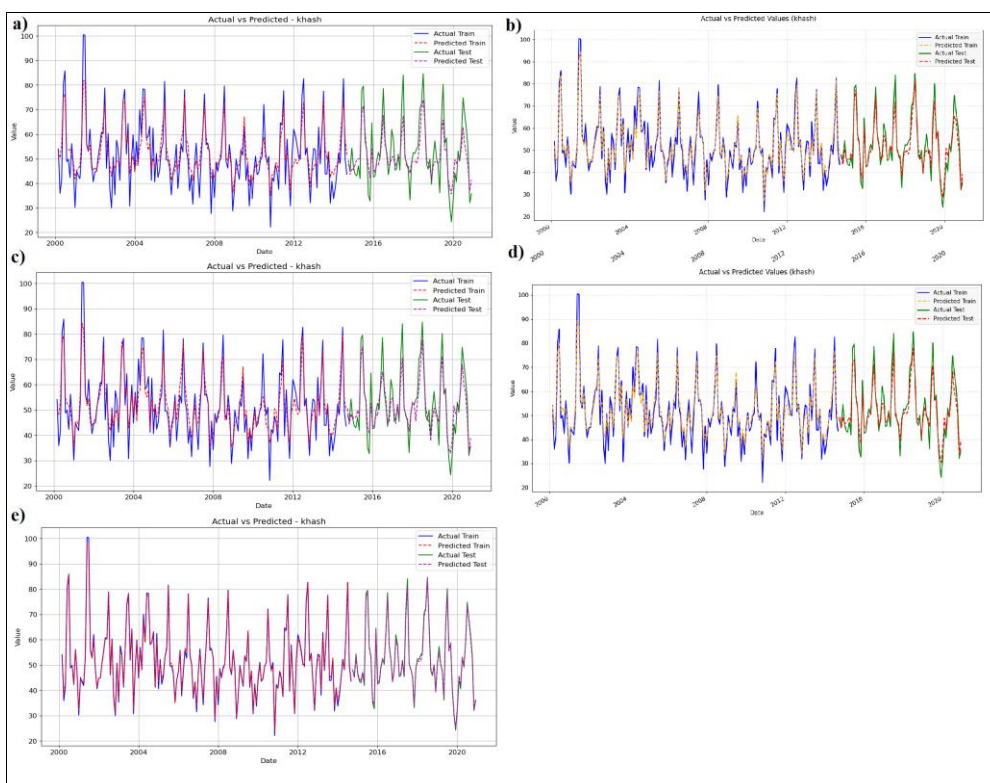
ماشین در ایستگاه خاش

نتایج عملکرد پنج مدل یادگیری ماشین (Bagged CART, Gradient Boosting, LightGBM, Random Forest

در پیش‌بینی غلظت PM_{2.5} در ایستگاه خاش در شکل ۶ نشان داده شده است. این نتایج بیانگر آن بود که دقت و کارایی این مدل‌ها با یکدیگر متفاوت بود. عملکرد مدل

Bagged CART در پیش‌بینی روند کلی تغییرات

نسبتاً خوب بود اما در تغییرات کوتاه‌مدت و سال‌های گذشته (۲۰۱۶-۲۰۲۰) دچار خطا شد. عملکرد مدل LightGBM در پیش‌بینی اندازه‌های متوسط (۴۰-۷۰ میکروگرم بر مترمکعب) با اختلاف کمتر از ۵ واحد بهتر بود و دقت آن در پیش‌بینی نوسانات کوتاه‌مدت مناسب بود.



شکل ۶- پیش‌بینی PM_{2.5} با مدل‌های (a) Bagged CART (b) Gradient Boosting (c) Random Forest (d) LightGBM (e) XGBoost در ایستگاه خاش.

Figure 6- AOD prediction with a) Bagged CART b) Gradient Boosting c) Random Forest d) LightGBM e) XGBoost models at Khash Station.

کمترین اندازه خطا ($RMSE=1/1$) و $1/5-$ $(MAPE=1/18)$ در مقایسه با دیگر مدل‌ها به‌عنوان برترین مدل شناخته شد. عملکرد مدل Gradient Boosting ($R^2=0/915$ و $MAPE=1/618-6/0$) و مدل Random Forest ($R^2=0/900-0/894$ و $MAPE=6/5-$) قابل قبول بود هرچند ضعیف‌تر از مدل XGBoost بودند. اگرچه عملکرد مدل LightGBM در مقایسه با دو مدل قبلی ضعیف‌تر ($R^2=0/832-0/810$ و $MAPE=9/9-8/3$) بود، اما همچنان از مدل Bagged CART ($0/733-$ $R^2=0/755$ و $MAPE=1/116-1/8$) که نتایج ضعیف‌تری را ثبت کرده بود، به‌مراتب بهتر بود. بر پایه نتایج این پژوهش بهترین عملکرد در پیش‌بینی بر اساس تمام معیارهای ارزیابی شده مربوط به مدل XGBoost در ایستگاه خاش بود. در حالی که مدل‌های Gradient Boosting و Random Forest گزینه‌های مناسبی برای شرایطی با محدودیت محاسباتی بودند. مدل Bagged CART به‌دلیل عملکرد ضعیف در تمام معیارها، گزینه مناسبی برای ایستگاه خاش نبود. نتایج ارزیابی مدل‌ها در این مرحله نیز بیانگر برتری الگوریتم‌های boosting به‌ویژه XGBoost در حل مسائل پیش‌بینی بود.

عملکرد مدل Gradient Boosting در یادگیری الگوهای داده‌های آموزشی خوب بود اما در مواجهه با اندازه‌های حدی در داده‌های آزمون دچار خطا شد. دقت مدل Random Forest در پیش‌بینی اندازه‌های متوسط خوب بود اما در اندازه‌های بسیار زیاد کم‌برآورد بود. بهترین عملکرد و بیشترین دقت در هر دو بخش آموزش و آزمون در میان تمام مدل‌ها مربوط به مدل XGBoost بود، به‌طوری که برای اندازه‌های اندازه‌های زیاد نتایج این مدل بسیار دقیق بود. الگوی مشترک در تمام مدل‌ها آن بود که دقت آنها در پیش‌بینی اندازه‌های متوسط در مقایسه با اندازه‌های حدی، بیشتر بود. بیشترین دقت و کمترین خطا در پیش‌بینی تغییرات ماهانه و فصلی مربوط به مدل XGBoost بود. از این رو این مدل به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی کیفیت هوا در منطقه خاش شناخته شد. نتایج ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی برای ایستگاه خاش در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد هم در داده‌های آموزشی ($R^2=0/993$) و هم در داده‌های آزمایشی ($R^2=0/994$) مربوط به مدل XGBoost بود. دقت زیاد این مدل نتیجه پیش‌پردازش کامل داده‌ها و انتخاب ویژگی بهینه با Boruta بود. این مدل با

جدول ۲- مقایسه مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی $PM_{2.5}$ در ایستگاه خاش.

Table 2- Comparison of machine learning models for $PM_{2.5}$ prediction at Khash Station.

Model	RMSE		MAPE		R^2	
	Train	Test	Train	Test	Train	Test
Bagged CART	6.720	6.798	11.617	10.783	0.755	0.733
LightGBM	5.905	5.386	9.915	8.266	0.810	0.832
Gradient Boosting	3.963	3.937	6.751	6.007	0.915	0.911
Random Forest	4.420	4.163	7.542	6.463	0.894	0.900
XGBoost	1.099	1.020	1.786	1.489	0.993	0.994

مقایسه روش‌های تحلیل اهمیت و حساسیت متغیرها

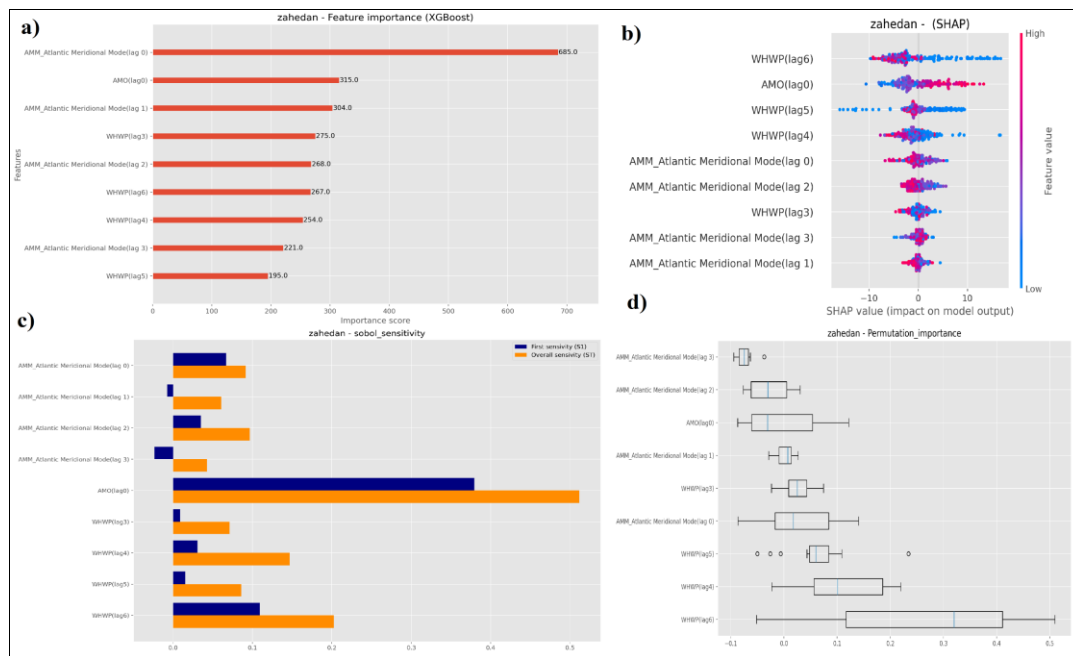
در پیش‌بینی مدل در ایستگاه زاهدان

AMM و AMO در پیش‌بینی کیفیت هوا اثرگذار و پیچیده بود. بر اساس نتایج تحلیل اهمیت ویژگی‌های XGBoost، شاخص AMM در حالت بدون تأخیر با امتیاز اهمیت ۶۸۵ به‌عنوان اثرگذارترین عامل

تحلیل جامع شاخص‌های اقلیمی اثرگذار بر پیش‌بینی $PM_{2.5}$ در ایستگاه زاهدان با استفاده از روش‌های مختلف تفسیر مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج تحلیل بیانگر آن بود که نقش شاخص‌های

نشان داد نقش شاخص‌های مرتبط با اقیانوس اطلس (AMM و AMO) در مقایسه با شاخص‌های اقیانوس آرام (WHWP) در پیش‌بینی PM_{2.5} اثرگذارتر و مهم‌تر بود. اگرچه نقش WHWP با تأخیرهای مختلف در مدل قابل توجه بود. از این رو، می‌توان گفت در ایستگاه زاهدان روند پیش‌بینی PM_{2.5} تحت تأثیر تعامل پیچیده‌ای از الگوهای اقلیمی هر دو اقیانوس اطلس و آرام است، با این حال در تمام روش‌های تحلیل شاخص‌های مرتبط با اقیانوس اطلس اثرگذارتر و پایدارتر بودند.

شناسایی شد، در حالی که شاخص AMO در حالت بدون تأخیر (۳۱۵) و شاخص AMM با تأخیر ۱ (۳۰۴) در رتبه‌های بعدی بودند. نتایج تحلیل SHAP نشان داد بیشترین اثر مثبت بر غلظت PM_{2.5} مربوط به WHWP با تأخیر ۶ بود و اثر AMO در حالت بدون تأخیر نیز افزایشی بود. نتایج تحلیل حساسیت Sobol بیانگر آن بود که بیشترین حساسیت در حالت بدون تأخیر مربوط به AMO بود و WHWP با تأخیر ۶ در رتبه بعدی بود. بر اساس نتایج تحلیل اهمیت جایگشت اثرگذارترین متغیر WHWP با تأخیر ۶ شناسایی شد. در ایستگاه زاهدان این یافته‌ها



شکل ۷- (a) نمودار اهمیت ویژگی (b) تغییرات شاخص‌های اقلیمی با روش SHAP (c) تحلیل حساسیت شاخص‌ها با روش Sobol (d) تحلیل اهمیت جایگشت شاخص‌ها در ایستگاه زاهدان

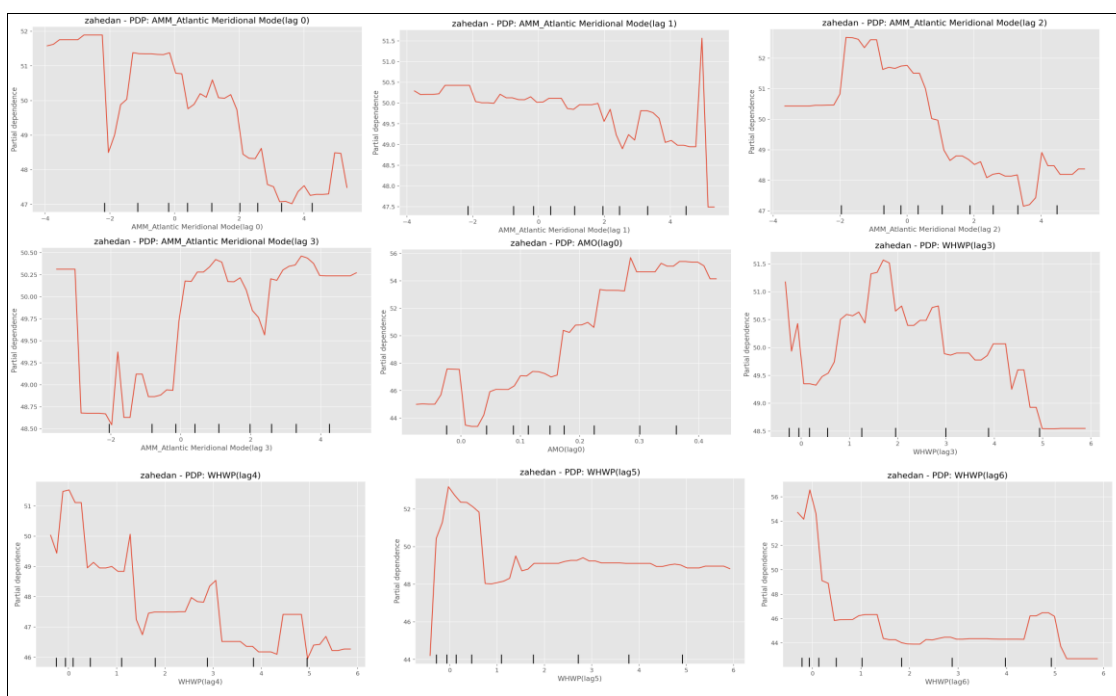
Figure 7- a) Feature importance diagram b) Changes in climatic indicators using the SHAP method c) Sensitivity analysis of indicators using the Sobol method d) Analysis of the importance of permutation of indicators at Zahedan Station.

غیرخطی و شدید بود و در محدوده‌های خاصی از اندازه‌ها سبب تغییرات ناگهانی در پیش‌بینی‌های مدل شد که احتمالاً ناشی از آستانه‌های بحرانی در سامانه‌های اقلیمی منطقه است. از سوی دیگر، اثرات شاخص AMM (با تأخیرهای ۱ و ۳) تدریجی‌تر و پایدارتر بود که نشان‌دهنده شیوه‌های متفاوت اثرگذاری این شاخص بر کیفیت هوا بود، به طوری که

تحلیل وابستگی جزئی (PDP) شاخص‌های اقلیمی بر پیش‌بینی PM_{2.5} در ایستگاه زاهدان در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج این تحلیل نشان داد رابطه شاخص AMO (با تأخیر صفر) با غلظت PM_{2.5} رابطه صعودی و یکنواخت بود و افزایش آن مستقیماً منجر به افزایش آلودگی شد، در حالی که رابطه شاخص‌های WHWP به‌ویژه در تأخیرهای ۳ و ۴

خروجی مدل مانند AMO خطی و مستقیم است، در حالی که اثرات برخی دیگر مانند WHWP محدوددهای خاصی از اندازه‌ها، ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی است. این موضوع بیانگر اهمیت تعاملات پیچیده اقلیمی و آستانه‌های بحرانی در مدل‌سازی کیفیت هوا است.

در برخی شرایط افزایش AMM منجر به کاهش PM2.5 شد که دلیل آن تغییرات الگوهای گردشی جو است. این یافته‌ها بیانگر آن است که با بهره‌گیری از مدل XGBoost می‌توان روابط غیرخطی و چند بعدی میان شاخص‌های اقلیمی و غلظت PM2.5 را شناسایی کرد، به طوری که اثر برخی شاخص‌ها بر



شکل ۸- بررسی عملکرد مدل در برابر تغییرات شاخص‌های اقلیمی با استفاده از تحلیل PDP در ایستگاه زاهدان.
Figure 8- Investigating the behavior of the model against changes in climatic indicators using PDP analysis at Khash Station.

مقایسه روش‌های تحلیل اهمیت و حساسیت متغیرها

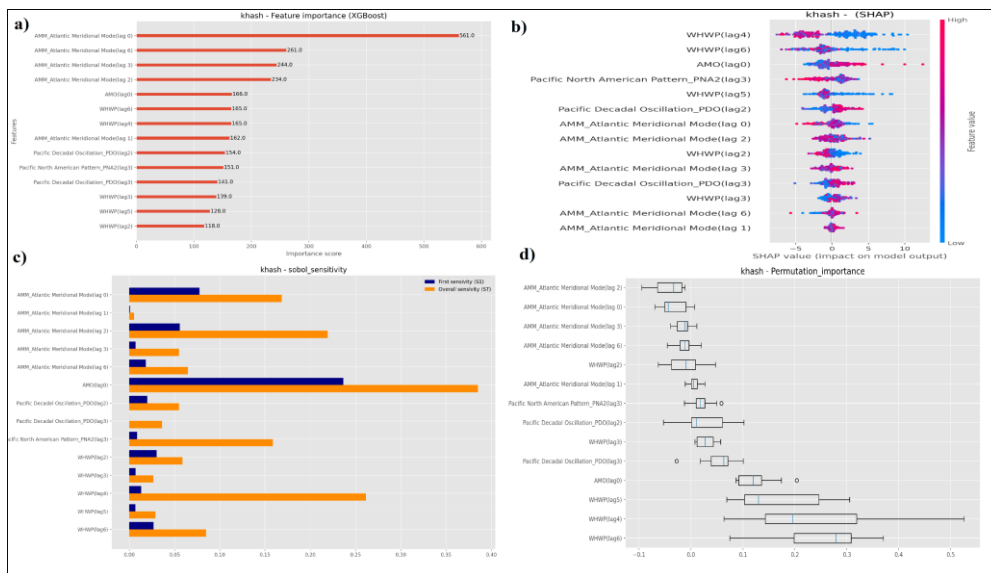
بر پیش‌بینی مدل در ایستگاه خاش

(امتیاز ۲۴۴) نیز قابل توجه بود. نتایج تحلیل SHAP نشان داد بیشترین اثر مثبت مربوط به WHWP با تأخیر ۴ و ۶ بود، در حالی که اثر AMO با تأخیر صفر بر غلظت PM2.5 نیز افزایشی بود. نتایج تحلیل حساسیت Sobol نشان داد بیشترین حساسیت مربوط به AMO با تأخیر صفر بود و در رتبه بعدی WHWP با تأخیر ۴ بود. بر اساس نتایج تحلیل PFI شاخص WHWP با تأخیر ۴ (امتیاز اهمیت ۰/۵) به‌عنوان اثرگذارترین متغیر شناسایی شد که حذف آن

تحلیل جامع شاخص‌های اقلیمی اثرگذار بر پیش‌بینی PM2.5 در ایستگاه خاش با استفاده از روش‌های مختلف تفسیر مدل در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که نقش شاخص‌های AMM و WHWP در پیش‌بینی کیفیت هوا مهم و پیچیده بود. بر اساس تحلیل اهمیت ویژگی‌های XGBoost، شاخص AMM با تأخیر صفر و امتیاز اهمیت ۵۶۱ به‌عنوان اثرگذارترین عامل شناسایی شد، در حالی که اثر شاخص AMM با تأخیر ۶ (امتیاز ۲۶۱) و تأخیر ۳

WHWP) اثرگذارتر و پایدارتر بودند. می‌توان گفت این نتایج مبنای علمی مناسبی برای انتخاب بهینه متغیرهای ورودی در توسعه مدل‌های پیش‌بینی کیفیت هوا در منطقه مطالعه شده است.

سبب بیشترین کاهش دقت مدل می‌شود. یافته‌ها نشان داد پیش‌بینی $PM_{2.5}$ در خاش تحت تأثیر تعامل پیچیده‌ای از الگوهای اقلیمی هر دو اقیانوس اطلس و آرام است، با این حال در تمام روش‌های تحلیل شاخص‌های مرتبط با اقیانوس آرام (به‌ویژه

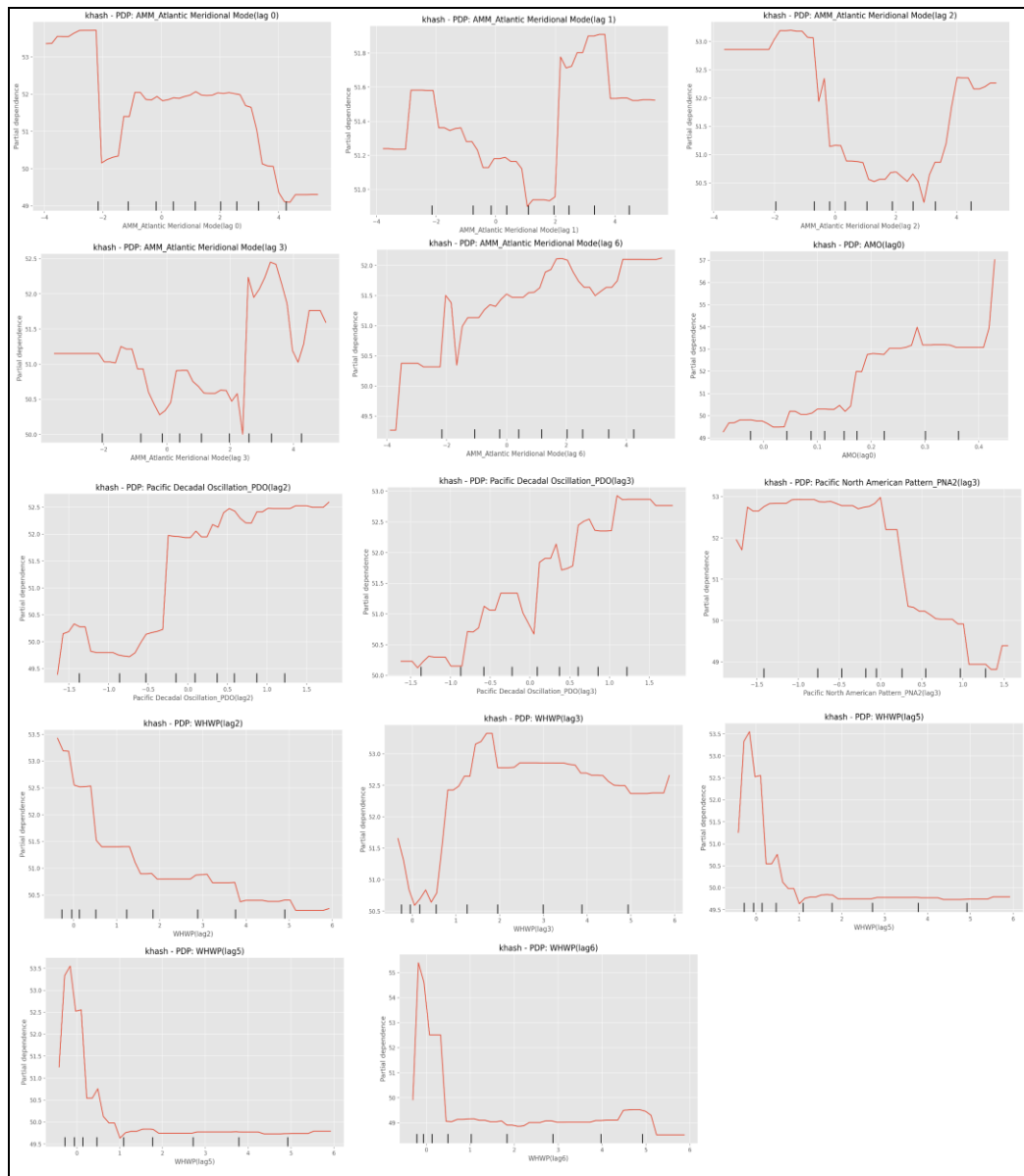


شکل ۹- a) نمودار اهمیت ویژگی (b) تغییرات شاخص‌های اقلیمی با روش SHAP (c) تحلیل حساسیت شاخص‌ها با روش Sobol (d) تحلیل اهمیت جایگشت شاخص‌ها در ایستگاه خاش.

Figure 9- a) Feature importance diagram b) Changes in climatic indicators using the SHAP method c) Sensitivity analysis of indicators using the Sobol method d) Analysis of the importance of permutation of indicators at Khash Station.

بر پیش‌بینی‌ها، کاهشی غیرمنتظره‌ای بود. اثر شاخص WHWP بر غلظت $PM_{2.5}$ نیز با تأخیرهای متفاوت، متغیر بود. به طوری که اثر این شاخص با تأخیر ۵ ناگهان کاهشی و با تأخیر ۳ ابتدا افزایشی و سپس کاهشی بود. این موضوع گویای روابط پیچیده و وابسته به اندازه این شاخص‌ها است و سرانجام می‌توان نتیجه گرفت عملکرد مدل XGBoost در شناسایی و مدل‌سازی این روابط غیرخطی چندبعدی میان شاخص‌های اقلیمی و آلودگی هوا در منطقه خاش بسیار زیاد بود.

تحلیل نمودارهای PDP برای ایستگاه خاش در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان داد اثرات شاخص‌های اقلیمی مختلف بر پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ پیچیده و غیرخطی بود، به طوری که شاخص AMM بدون تأخیر ابتدا با افزایش اندازه‌های منفی سبب افزایش $PM_{2.5}$ شد اما پس از نقطه بحرانی روند معکوس شد، در حالی که با تأخیر ۱ این الگو با حساسیت متفاوتی تکرار شد و با تأخیرهای ۲، ۳ و ۶ اثری متفاوت و شدید مشاهده شد که بیانگر حساسیت مدل به اندازه‌های خاصی از این شاخص بود. از سوی دیگر، رابطه شاخص AMO در حالت بدون تأخیر با غلظت $PM_{2.5}$ مثبت و یکنواخت بود. در حالی که اثر شاخص‌های PDO با تأخیرهای ۲ و ۳ عموماً افزایشی بود و اثر PNA با تأخیر ۳ در برخی اندازه‌های خاص



شکل ۱۰- بررسی عملکرد مدل در برابر تغییرات شاخص‌های اقلیمی با استفاده از تحلیل PDP در ایستگاه خاش.
Figure 10- Investigating the behavior of the model against changes in climatic indicators using PDP analysis at the Khash Station.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

(۲۰۱۳) مبنی بر گزارش همبستگی منفی AMO با کاهش گرد و غبار آفریقا، متناقض است. در حالی که در زاهدان اثر شاخص‌های AMM و WHWP منفی بود. نتایج روش Boruta بیانگر نقش مهم شاخص‌های WHWP و AMM با تأخیرهای خاص در پیش‌بینی PM2.5 بود. در این راستا، بیشترین اثر شاخص WHWP با تأخیرهای زیاد ۴ تا ۶ ماهه بود. نتایج بررسی اثرات متفاوت شاخص‌های اقلیمی با تأخیرهای

نتایج این پژوهش نشان داد روابط میان شاخص‌های پیوند از دور و غلظت PM2.5 در ایستگاه‌های زاهدان و خاش، پیچیده و معنادار بود که با تحلیل‌های جامع همبستگی، ویژگی‌ها انتخاب و مدل‌سازی شدند. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد بیشترین اثر مثبت بر غلظت PM2.5 در زاهدان مربوط به شاخص‌های PDO و AMO بود که با یافته‌های شائو و همکاران

مناطق متفاوت باشد. افزون بر این، کیفیت داده‌ها تحت تأثیر منابع آلاینده محلی و نویز اندازه‌گیری بود. تغییرات ساختاری محیطی و اقلیمی در دو دهه موجب یکنواخت نبودن مدل‌سازی می‌شود، و شاخص‌های اقلیمی استفاده‌شده محدود به شاخص‌های رایج بودند در حالی که ممکن است شاخص‌های دیگر اثرگذار باشند. با این حال، نتایج این پژوهش با ارائه چارچوب تحلیلی دقیق و تفسیر شاخص‌ها، مبنای علمی قابل اعتمادی برای مدیریت پیش‌بینی‌شده آلودگی هوا در استان سیستان و بلوچستان فراهم آورد که می‌تواند الگویی برای دیگر مناطق مشابه باشد. از این رو، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران برای مدیریت آلودگی هوا از یافته‌های کاربردی و عملی مهم این پژوهش بهره ببرند. در این راستا، بر پایه نتایج این پژوهش، به منظور زمینه‌سازی برای برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه پیشنهاد می‌شود شاخص‌های پیوند از دور برای پیش‌بینی دوره‌های با غلظت زیاد ذرات معلق، پیوسته پایش شوند. افزون بر این پیشنهاد می‌شود طراحی سیاست‌های مدیریت منابع آب و زمین مانند تثبیت کانون‌های گرد و غبار و مهار برداشت خاک بر اساس پیش‌بینی‌های بلندمدت شاخص‌های اقلیمی انجام شود. در این راستا، پیشنهاد می‌شود تصمیم‌گیرندگان با بهره‌گیری از قابلیت‌های مدل‌های یادگیری ماشین مانند XGBoost همراه با تحلیل‌های حساسیت اثرات غیرخطی شاخص‌ها بر پیش‌بینی PM_{2.5} بررسی کنند. از سوی دیگر، با برنامه‌های اطلاع‌رسانی عمومی درباره دوره‌های پر گرد و غبار و با بهره‌گیری از نتایج پیش‌بینی شاخص‌های پیوند از دور و غلظت PM_{2.5} می‌توان آسیب‌های سلامت انسانی را کاهش داد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان مسئول این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

مختلف، با یافته‌های انصاری قوجقار و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. بر اساس نتایج مدل‌سازی مدل XGBoost با بیشترین دقت و کمترین خطا در شناسایی روابط غیرخطی میان شاخص‌های اقلیمی و غلظت PM_{2.5} به‌عنوان برترین مدل شناسایی شد. این یافته با نتایج پن و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. نتایج تحلیل‌های SHAP، Sobol و PDP در زاهدان نشان داد که اثر شاخص‌های مرتبط با اقیانوس اطلس (AMM و AMO) بسیار زیاد بود، در حالی که اثرات غیرخطی شاخص‌هایی مانند WHWP در محدوده‌های خاصی از اندازه‌های منجر به تغییرات ناگهانی در پیش‌بینی‌ها شد.

در ایستگاه خاش بیشترین همبستگی مثبت و منفی به ترتیب مربوط به شاخص PDO (۰/۱۵۹) با تأخیر ۲ ماهه) و شاخص WHWP (۰/۳۸۵) با تأخیر ۴ ماهه) بود که نشان‌دهنده اثرات قابل توجه نوسانات اقیانوسی بر کیفیت هوا بود. نتایج تحلیل اهمیت ویژگی‌ها با روش Boruta در ایستگاه خاش نشان داد که نقش شاخص‌های AMM، AMO، PDO و WHWP در پیش‌بینی غلظت PM_{2.5} مهم بود، به طوری که بیشترین اثر مربوط به شاخص WHWP با تأخیر ۵ ماهه بود، در حالی که شاخص‌های TNA و WP به دلیل اهمیت کم رد شدند. این یافته‌ها با نتایج گونگ و همکاران (۲۰۰۶) مبنی بر اهمیت شاخص PDO مطابقت دارد. بر اساس نتایج مدل‌سازی مدل XGBoost به‌عنوان برترین مدل شناسایی شد. نتایج تحلیل‌های PDP نشان داد که اثرات شاخص‌های اقلیمی بر غلظت PM_{2.5} غیرخطی و پیچیده بود، به طوری که اثرات AMM با تأخیرهای مختلف متغیر بود و اثرات شاخص WHWP با تأخیر ۵ ماهه بر غلظت PM_{2.5} کاهشی و ناگهانی بود. این یافته‌ها بیانگر اهمیت نقش روابط غیرخطی و آستانه‌های بحرانی در مدل‌سازی کیفیت هوا است. نتایج بررسی روابط غیرخطی شاخص‌های اقلیمی و اثرات آن‌ها بر PM_{2.5} در این پژوهش با یافته‌های پایوس و همکاران (۲۰۲۲) و بین و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. این پژوهش در دو ایستگاه در استان سیستان و بلوچستان انجام شد و نتایج ممکن است در دیگر

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله
 نویسنده دوم: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج
 نویسنده سوم: مشاوره، بازبینی متن مقاله
 نویسنده چهارم: مشاوره، بازبینی متن مقاله
 نویسنده پنجم: مشاوره، بازبینی متن مقاله

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، به‌وسیله مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

فهرست منابع

- Ahsani N. 2019. Investigation and presentation of innovative strategies regarding the relationship between the role of shopping tourism and attracting tourists (domestic and international) for the development and advancement of the tourism industry of Chabahar Port, Iran. *Journal of Tourism and Sustainable Development Research*. 2(1): 27–39. (In Persian).
<https://www.magiran.com/p1978191>
- Akbari M, Saligheh M, Fili A. 2016. Investigation of ENSO Phases Impact on Dust Storms in Khuzestan Province. 5th National Conference on Air and Noise Pollution Management. Tehran, Iran, 1–2 February 2017. (In Persian).
- Alisofi M, Asghari Lafmejani S, Heidary Mokarrar H, Pirani M. 2024. Analysis of the effects of 120-day winds and dust storms on the livability of rural settlements (Case study: Hirmand County). *Journal of Geographical Research on Desert Areas*. 11(2): 133–148. <https://www.magiran.com/p2745858>
- Alizadeh-Choobari O, Zavar-Reza P, Sturman A. 2014. The wind of 120 days and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric Research*. 143: 328–341. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.02.001>
- Alshammari RK, Alrwais O, Aksoy MS. 2022. Machine learning applications to dust storms: A meta-analysis. *Aerosol and Air Quality Research*. 22(12): 220183. 1–12. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220183>
- Creamean JM, Suski KJ, Rosenfeld D, Cazorla A, DeMott PJ, Sullivan RC, Prather KA. 2013. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western US. *Science*. 339(6127): 1572–1578. <https://doi.org/10.1126/science.1227279>
- Gong SL, Zhang XY, Zhao TL, Zhang XB, Barrie LA, McKendry IG, Zhao CS. 2006. A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-Pacific transport. Part II: Interannual variability and climate connections. *Journal of Climate*. 19(1): 104–122. <https://doi.org/10.1175/JCLI3606.1>
- Hao N, Sun P, He W, Yang L, Qiu Y, Chen Y, Zhao W. 2022. Water resources allocation in the Tingjiang River Basin: construction of an interval-fuzzy two-stage chance-constraints model and its assessment through Pearson correlation. *Water*. 14(18): 2928. <https://doi.org/10.3390/w14182928>
- Liu J, Wu D, Liu G, Mao R, Chen S, Ji M, Wang X. 2020. Impact of Arctic amplification on declining spring dust events in East Asia. *Climate Dynamics*. 54: 1913–1935. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05094-4>
- Mao R, Ho CH, Shao Y, Gong DY, Kim J. 2011. Influence of Arctic Oscillation on dust activity over northeast Asia. *Atmospheric Environment*. 45(2): 326–337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.10.020>
- Martinez-Alvarado O, Montabone L, Lewis SR, Moroz IM, Read PL. 2009. Transient teleconnection event at the onset of a planet-encircling dust storm on Mars. *Annales Geophysicae*. 27(9): 3663–3676. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3663-2009>
- Pan B. 2018. Application of XGBoost algorithm in hourly PM2.5 concentration prediction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 113: 012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012127>
- Payus C, Anuar SI, Nurashilah F, Sentian J. 2022. Induced impact of El Niño-Southern oscillation and haze events on aerosol optical

- depth (AOD) in the tropical climate of Borneo Island. Mediterranean Geosciences Union. pp. 171-173. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13810-2_41
- Pereira AG, Palácios R, Santos PC, Pereira RV S, Cirino G, Imbiriba B. 2024. Relationship between El Niño-Southern oscillation and atmospheric aerosols in the Legal Amazon. *Climate*. 12(2): 13. <https://doi.org/10.3390/cli12020013>
- Prospero JM, Ginoux P, Torres O, Nicholson S E, Gill TE. 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*. 40(1): 2-1. <https://doi.org/10.1029/2000RG000095>
- Rizzolo JA, Barbosa CG, Borillo GC, Godoi A F, Souza RA, Andreoli RV, Godoi RH. 2017. Soluble iron nutrients in Saharan dust over the central Amazon rainforest. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 17(4): 2673-2687. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2673-2017>
- Shao Y, Klose M, Wyrwoll KH. 2013. Recent global dust trend and connections to climate forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 118(19): 11-107. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50836>
- Sharma DK, Chatterjee M, Kaur G, Vavilala S. 2022. Deep learning applications for disease diagnosis. *Deep Learning for Medical Applications with Unique Data*. pp. 31-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96172-9.00002-3>
- Washington R, Todd M, Middleton NJ, Goudie AS. 2003. Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations. *Annals of the Association of American Geographers*. 93(2): 297-313. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302003>
- Alshammari RK, Alrwais O, Aksoy MS. 2024. Machine learning forecast of dust storm frequency in Saudi Arabia using multiple features. *Atmosphere* 15(5):520, 1-27. <https://doi.org/10.3390/atmos15050520>
- Ansari Ghojghar M, Pourgholam-Amiji M, Araghinejad S, Babaeian I, Liaghat A, Salajegheh A. 2021. The Effect of warm phase of ENSO phenomenon on the formation of dust storms in Khuzestan and Sistan and Baluchestan Provinces. *Journal of Range and Watershed Management*. 74(2): 257-271. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2020.310647.1533>. (In Persian).
- Arami SA, Ownegh M, Mohammadian Behbahani A, Akbari M, Zarasvandi A. 2018. Statistical analysis of spatio-temporal pattern of dust storms in West and Southwest of Iran. *Water and Soil Conservation*. 25(1): 61-83. <https://www.magiran.com/p1834445>
- Gholamy A, Kreinovich V, Kosheleva O. 2018. Why 70/30 or 80/20 Relation Between Training and Testing Sets: A Pedagogical Explanation. *Departmental Technical Reports (Computer Science), UTEP-CS-18-09, The University of Texas at El Paso. Departmental Technical Reports (CS) 1209*. 18 pages.
- Homma T, Saltelli A. 1996. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering and System Safety*. 52(1):1-17. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(96\)00002-6](https://doi.org/10.1016/0951-8320(96)00002-6)
- Jahantigh M, Jahantigh M, Iranmanesh F. 2023. Identification of storms and centers of dust production in southeast of Iran (Case study: Sistan Region). *Environmental Erosion Researches* 13(3): 67-92. <https://www.magiran.com/p2631887>
- Jahantigh M, Jahantigh M, Iranmanesh F. Identification of Storms and Centers of Dust Production in Southeast of Iran (Case Study: Sistan Region). 2023. *Journal of Environmental Erosion Research*. 13 (3):67-92. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1402.13.3.4.0>. (In Persian).
- Khosravi M. 2004. A survey on the relations of the Northern Hemisphere large scale circulation patterns with Sistan and Baluchestan annual droughts. *Geography and Development Iranian Journal*. 2(3): 167-188. <https://www.magiran.com/p266992>
- Kursa MB, Jankowski A, Rudnicki WR. 2010. Boruta—a system for feature selection. *Fundamenta Informaticae*. 101(4): 271-285. <https://doi.org/10.3233/FI-2010-288>
- Kursa MB, Rudnicki WR. 2010. Feature selection with the Boruta package. *Journal of Statistical Software*. 36(1): 1-13. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i11>
- Lundberg SM, Lee SI. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 4765-4774.30. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>
- Middleton N. 2019. Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*. 9(6):261, 1-12. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060261>
- Omidvar K, Javidnia M, Mohammadi Ravari F. 2024. Examining of relationship

- between dust storms and teleconnection indicators in different seasons during the statistical period of 1988-2017 in Kerman Province. *Nivar*. 48(126): 1-17. <https://www.magiran.com/p2801868>
- Razmjooei F, Halabian AH. 2011. Recognition and Analysis of Zahedan Weather Types. *Geographic Space*. 11(34): 210_231. <https://www.magiran.com/p882159>
- Schober P, Boer C, Schwarte LA. 2018. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia* 126(5): 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000002864>
- Shamsipour A, Safarrad T. 2012. Satellite and synoptic analysis of dust storm in western half of Iran (Case Study: July 2009). *Physical Geography Research*. 44(1): 111-126. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2012.24737>
- Vatanparast Galeh Juq F, Salahi B, Zeinali B, 2024. Simultaneous analysis of ENSO, IOD, and QBO cycles on dust storm oscillations in western Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 13(39): 109-126. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.45793.1966>
- Vatanparast Galeh Juq F, Salahi B, Zeinali B. 2024. Simultaneous analysis of ENSO, IOD, and QBO cycles on dust storm oscillations in western Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 13(39): 109-126. <https://www.magiran.com/p2706950>
- Zeinali B, Asghari S. 2018. Evaluation of some indicators to identify and monitor dust storm (Case study: dust storms 10 August 2008 East the Iran). *Journal of Geography and Planning*. 22(65): 73-91. <https://www.magiran.com/p1907936>
- Zhang C, GAO R, Wu J, Yang Z. 2019. Combating climate change, desertification and sandstorms: A collaborative approach. In Annual report on China's response to climate change (2017): Implementing the Paris Agreement. Springer Nature Singapore. pp. 145-153). https://doi.org/10.1007/978-981-13-9660-1_13.



Assessment of the Teleconnection Effects on PM_{2.5} Concentration using Machine Learning Models in the Sistan and Baluchestan Province

Abolfazl Davari ¹, Rasool Mahdavi Najafabadi ^{2*}, Marzieh Rezai ³, Ommolbanin Bazrafshan ⁴, Ali Reza Shahriary ⁵

1- Ph.D. Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2 and 3- Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

4- Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

5- Associate Professor, Department of Green Space, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

In recent years, air pollution, especially the increase in the concentration of PM_{2.5} particles matter, has been raised as one of the significant environmental challenges. Due to its specific geographical location, which is located in the path of the 120-day Sistan winds, along with the decrease in annual rainfall, Sistan and Baluchestan province provides favorable conditions for the formation and intensification of dust phenomena. In this regard, teleconnections play an important role in climate change and, consequently, in air quality. The main objective of this research is to evaluate the impact of teleconnection indices on PM_{2.5} concentrations in Sistan and Baluchestan Province using advanced machine learning models. Therefore, meteorological data and PM_{2.5} concentrations were collected from Zahedan and Khash stations over two decades and combined with teleconnection indices. Then, using correlation analysis and feature selection methods, five machine learning models were evaluated to identify the best model for long-term estimating PM_{2.5} particulate matter concentrations was identified. The results of this research both led to a better understanding of the complex relationships between climate variability and air quality, by provided a detailed analytical framework, provided a practical tool for policymakers in air pollution management.

Materials and Methods

This study used a comprehensive multi-stage analytical framework, and meteorological data and PM_{2.5} particle concentration were collected from Zahedan and Khash stations during the period

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** ra_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir

Citation: Davari, A., Mahdavi Najafabadi, R., Rezai, M., Bazrafshan, O., Shahriary, A.R. 2026. Assessment of the Teleconnection Effects on PM_{2.5} Concentration using Machine Learning Models in the Sistan and Baluchestan Province. *Watershed Management Research*. 39(1): 1-25.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.369570.1624

Received: 11 September 2025, **Received in revised form:** 06 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 1-25.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



2000 to 2021 and supplemented with teleconnection index data from the NOAA Climate Prediction Center. After careful data preprocessing, which included quality control (checking for impossible or anomalous PM_{2.5} measurements and correcting or removing suspicious measurements), data temporal synchronization (matching PM_{2.5} data and remote linkage indices based on history to ensure the synchronization of independent and dependent measurements), and missing data replacement (using the nearest valid measurement, temporal averaging, and statistical interpolations to preserve the original data distribution), a dual analytical approach was implemented. First, Pearson correlation analysis was used to measure linear relationships between teleconnection index and PM_{2.5} levels. Then the Boruta algorithm identified the most effective features at time lags of 0 to 6 months. Five advanced machine learning models including Bagged CART, LightGBM, Gradient Boosting, Random Forest, and XGBoost were evaluated, with 70% of the data used for model training and the rest for validation. Performance evaluation was performed using three criteria: root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and coefficient of determination (R^2), and for interpretability of the models, four advanced techniques were used, including permutation feature importance (PFI), SHAP values based on game theory, Sobol sensitivity analysis, and partial dependency diagrams (PDP). All analyses were performed in the R software environment (4.2.0).

Results and Discussion

The results showed that the effect of teleconnection indices on PM_{2.5} particles concentrations at Zahedan and Khash stations was significant. At Zahedan station, the highest positive correlation was related to the PDO index (0.158 with a 5-month lag) and the AMO index (0.212 with a 0-month lag). On the other hand, the highest negative correlation was related to the AMM index (0.336 with a 2-month lag) and the WHWP index effect (-0.420 with a 4-month lag). At Khash station, the highest positive correlation was related to the PDO index (0.159 with a 2-month lag) and the highest negative correlation was related to WHWP (-0.385 with a 4-month lag). Analysis of the importance of features using the Boruta method showed that the greatest predictive role of PM_{2.5} was related to the WHWP index with an average importance of 13.63 with a 6-month lag in Zahedan and with an average importance of 10.51 at 5-month lag in Khash. In the evaluation of the models, XGBoost was identified as the best model with exceptional accuracy ($R^2=0.989$ in Zahedan and $R^2=0.993-0.994$ in Khash) and minimal error (MAPE=2.36-3.07 in Zahedan and MAPE=1.5-1.8 in Khash). The results of sensitivity analyses showed that the greatest effect was related to the AMM index (with a significance score of 685 in Zahedan and 561 in Khash). On the other hand, with certain lag times, the behavior of the WHWP and AMO indices were nonlinear and complex. Overall, the results indicate significant effects of ocean-atmosphere oscillations (with correlation coefficients ranging from 0.15 to 0.42 and significance scores ranging from 5.6 to 13.6) on regional air quality. The performance of the XGBoost model in long-term PM_{2.5} forecasting in the study region was very accurate.

Conclusion and Suggestions

The results of this study showed that the highest positive correlation with PM_{2.5} concentrations at Zahedan station was related to PDO and AMO indices, and the highest negative correlation was related to AMM and WHWP indices. The XGBoost model was identified as the best prediction model, which had high accuracy with the lowest error. Also, the results of SHAP and PDP analyses showed that the effects of the AMM and WHWP indices on PM_{2.5} concentrations were complex and nonlinear, and the time lag in these effects was very important. At Khash station, the AMM, AMO, PDO and WHWP indices also played an important role in predicting PM_{2.5} and indicated the significant effects of climate fluctuations on air quality. These findings indicate the importance of nonlinear relationships and critical thresholds in air quality modeling. Based on the results of this study, it is suggested that remote sensing indices be continuously monitored to predict periods of high particulate matter concentrations for the purpose of preventive decisions and actions. Also, it is suggested that, based on the differences observed between the two stations (Zahedan and Khash), more attention be paid to local and regional characteristics in air quality modeling.

Keywords: Pearson correlation, PM2.5, Shapley value, Sobol sensitivity analysis, teleconnections

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be made available upon reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Conducting software analyses, writing the initial draft of the article.

Author 2: Guidance, conceptualization, editing and reviewing the article, reviewing the results.

Author 3: Consulting, reviewing the article text

Author 4: Consulting, reviewing the article text.

Author 5: Consulting, reviewing the article text.

ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکتری بر محتوای ماده آلی و نیتروژن بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی

صائمه صادقی گجوتی^۱، حسین خیرفام^{۲*}، سعید نجفی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

بوم‌سازگان‌های سالم برای توسعه پایدار بسیار مهم هستند و به‌عنوان پایه و اساس امنیت غذایی و تنوع زیستی بوده و منابع و خدمات ضروری برای بقاء و رفاه را فراهم می‌آورند. ضعف در اجرای طرح توسعه پایدار باعث افزایش بهره‌برداری از منابع و ناپایداری بوم‌سازگان‌ها، به‌ویژه در مدیریت آب و خاک می‌شود. افزون بر این، شیوه‌های ناپایدار منجر به شکل‌گیری مناظر جدید و شکننده شده است. خشکی دائمی یا دوره‌ای (فصلی) تالاب‌ها به‌دلیل مصرف ناپایدار آب، از جمله پیامدهای منفی بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب است که بستر آن‌ها را به منابع تولید گرد و غبار تبدیل می‌کند. به‌رغم تلاش‌های گسترده برای تثبیت و افزایش پایداری بسترها، ماندگاری و عملکرد راهکاری مرسوم برای مهار فرسایش بادی در این بسترها به‌دلیل آبیگری دوره‌ای تالاب‌ها، با چالش مواجه شده است. اخیراً، رویکرد تلقیح سیانوباکترها با هدف تثبیت بسترهای حساس به فرسایش مورد توجه قرار گرفته اما کارایی آن تحت شرایط خشکی-آبیگری تالاب‌ها بررسی نشده است. افزون‌براین، اندازه‌گیری مستقیم فرسایش بادی ناشی از اقدامات تثبیت بسترها، استفاده از شاخص‌های تعیین‌کننده حساسیت به فرسایش خاک از قبیل محتوای ماده آلی و نیتروژن کل از مؤلفه‌های غنای پوسته زیستی خاک نیز، مرسوم است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکترهای بومی بر محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک تحت شرایط خشکی کامل و خشکی-آبیگری اجرا شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: h.kheirfam@urmia.ac.ir

استناد: صادقی‌گجوتی، ص، خیرفام، ح، نجفی، س، ۱۴۰۵. ارزیابی اثرات تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکتری بر محتوای ماده آلی و نیتروژن بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۴۴-۲۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370375.1629

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۲۶ تا ۴۴.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، تالاب بین‌المللی قویی باباعلی در استان آذربایجان غربی در شمال غرب ایران، انتخاب شد. این تالاب ۵۰۰ هکتاری که به کنوانسیون رامسر معروف است. تالاب نامبرده به دلیل کاهش بارندگی و استفاده ناپایدار از آب در بالادست، به‌طور فصلی تحت تناوب خشکی و آبیگری است. نمونه‌های حجمی از خاک بستر خشک‌شده تالاب تهیه شد و برای آماده‌سازی درون سینی‌های کوچک فرسایشی انتقال یافتند. هم‌زمان، سیانوباکترهای بومی و مؤثر در حفاظت خاک بستر خشک‌شده تالاب، استخراج، شناسایی، خالص‌سازی و ازدیاد شدند. از سیانوباکترهای به‌دست آمده (*Oscillatoria sp.* و *Nostoc sp.*) چهار غلظت صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تهیه شد. سپس، سیانوباکترهای تهیه‌شده بر اساس تیمارهای تعریف‌شده در چهار تکرار روی سینی‌های آماده‌شده آب-تلقیحی شدند. ژرفای نفوذ مایه تلقیح حداقل یک سانتی‌متر بود. سپس، سینی‌های تیمارشده در دو شرایط خشکی کامل (نشان‌دهنده تالاب خشک‌شده دائمی) به‌مدت ۱۳۴ روز و خشکی-آبیگری (نشان‌دهنده تالاب فصلی با تجربه تناوب خشکی در فصول گرم سال و آبیگری در فصول بارشی سال) به‌طور ۶۰ روز خشکی، ۶۰ روز غرقابی و ۱۴ روز خشکی (مجموعاً ۱۳۴ روز) قرار گرفتند. در مجموع ۳۲ آزمایش (۱۶ آزمایش در شرایط خشکی کامل و ۱۶ آزمایش در شرایط خشکی-آبیگری) انجام شد. این پژوهش در قالب طرح آزمایشی کامل تصادفی و از تیر تا آبان ماه سال ۱۴۰۱ انجام شد. پس از پایان آزمایش، اندازه‌های ماده آلی و نیتروژن کل خاک به‌ترتیب با استفاده از روش‌های والکلی-بلک و کج‌لدال اندازه‌گیری شد. در پایان، تحلیل آماری نتایج با استفاده از تجزیه پراکنش یک و دوطرفه و آزمون تی مستقل انجام شد.

نتایج و بحث

یافته‌ها نشان داد که اثرات تیمارهای تلقیح سیانوباکترها (غلظت صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) روی محتوای نیتروژن در هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبیگری در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر، معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. اثرات تیمارهای تلقیح روی محتوای نیتروژن تحت شرایط خشکی-آبیگری در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر نیز معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. تأثیرپذیری محتوای ماده آلی خاک از تیمارهای تلقیح در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر و تحت هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبیگری معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) بود. محتوای نیتروژن با تلقیح غلظت‌های متوسط سیانوباکتر (۳ گرم بر مترمربع) و زیاد (۶ گرم بر مترمربع) تحت شرایط خشکی به‌ترتیب ۲۶ و ۳۹٪ و تحت شرایط خشکی-آبیگری به‌ترتیب ۲۸ و ۴۴٪ افزایش یافت. ماده آلی نیز با تلقیح ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تحت شرایط خشکی کامل به‌ترتیب ۶۵ و ۷۲٪ و با تلقیح ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تحت شرایط خشکی-آبیگری به‌ترتیب ۴۹، ۵۴ و ۶۳٪ افزایش یافت. اثرات متقابل شرایط رطوبتی (خشکی کامل و خشکی-آبیگری) و تلقیح سیانوباکترها بر محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک معنی‌دار نبود (در سطح احتمال پنج درصد). عملکرد تلقیح غلظت کم سیانوباکترها (۱/۵ گرم بر مترمربع) در بهبود مؤلفه‌های بررسی‌شده قابل قبول نبود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد اثرات آبیگری طبیعی سالانه تالاب بر بهبود محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک و به‌بیان دیگر بر گسترش پوسته زیستی خاک در بسترهای خشک، مثبت نبود. از این‌رو، اجرای اقدامات دیگری مانند تلقیح سیانوباکترها برای بهبود مواد آلی و نیتروژن به‌عنوان مؤلفه‌های پایداری خاک ضروری است. یافته‌ها نشان داد که هنگامی که سیانوباکتری‌ها در شرایط خشکی-آبیگری به خاک تلقیح شدند، هم زنده ماندند و هم رشد کردند و همانند شرایط خشکی کامل، اندازه‌های ماده آلی و نیتروژن را افزایش دادند. در حالی‌که، تلقیح سیانوباکترها برای بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک در برابر عامل‌های فرساینده اثرگذار است، نگرانی‌هایی هم برای اثرات منفی آنها بر تالاب‌ها به‌عنوان یک گونه مهاجم، به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ، وجود دارد که مستلزم بررسی بیشتر است. تلقیح سیانوباکتری‌ها، به‌ویژه با غلظت حداقل ۳ گرم بر مترمربع، روشی سریع و سازگار با محیط زیست برای تثبیت بستر

تالاب‌های خشک، به‌ویژه برای تالاب‌هایی با شرایط آبیگری و خشکی متناوب، است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های تکمیلی در مقیاس صحرایی با شرایط تناوب خشکی و خشکی-آبیگری طبیعی همراه با اندازه‌گیری میدانی فرسایش بادی انجام شود.

واژگان کلیدی

بوم‌سازگان‌های خشک و نیمه‌خشک، پایداری خاک، تلفیح خاک، مدیریت منابع آب و خاک، ویژگی‌های خاک

مقدمه

گسترش و پایداری متوازن مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی امکان دستیابی به توسعه پایدار در راستای اجرای برنامه‌های هفده‌گانه تعریف‌شده سازمان ملل در افق سال ۲۰۳۰ را فراهم می‌آورد (کیسترا و همکاران ۲۰۱۸، ویزر و همکاران ۲۰۱۹). در این راستا، دستیابی به پایداری متوازن در هر سه مؤلفه نامبرده وابسته به خاک پویا و سالم است که در نتیجه منجر به تأمین امنیت غذایی و زیستی در جوامع می‌شود (ویزر و همکاران ۲۰۱۹). به‌رغم برنامه‌ریزی‌ها در مقیاس جهانی برای دستیابی به توسعه پایدار، ضعف در اجرای برنامه‌های هفده‌گانه، منجر به افزایش و حتی تشدید فعالیت‌ها و بهره‌برداری‌های غیراصولی انسانی به‌ویژه در منابع آب و خاک شده است که اخیراً منجر به پیدایش بوم‌سازگان‌ها و زمین‌ریخت‌های نوپدید و ناپایدار شده است (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). خشکی تالاب‌ها از جمله نمایه‌ها و اثرات بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب است که بسترهای رسوبی و خشک‌شده آن‌ها را به‌عنوان یک بستر فرسایش‌پذیر و منشأ تولید ریزگرد محلی تبدیل کرده است (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰). همگام با تغییرات اقلیمی، اتکای بیش از حد اقتصاد روستایی به بخش کشاورزی، برخوردار نبودن از برنامه راهبردی در مدیریت منابع آب و خاک، نبودن هماهنگی مؤثر در نهادهای تخصصی بهره‌بردار از منابع آب و خاک، تغییرات فزاینده کاربری زمین، گسترش کمی زمین‌های کشاورزی، تغییر الگوی کشت و مدیریت ناسازگار و غیراصولی منجر به کاهش منابع آب در سطح آبخیزها شده است (حسن‌زاده و همکاران

۲۰۱۲). کاهش ورود آب به آبخیزها به‌دلیل تغییرات اقلیمی از یک سو و افزایش مصرف منابع آب در بالادست به‌ویژه برای اهداف کشاورزی ناسازگار از سوی دیگر، منجر به کاهش حبابه بوم‌شناختی رودها و به‌ویژه تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی در فصول گرم سال شده است که نهایتاً منجر به خشکی آن‌ها در طول یا بخش زیادی از سال می‌شود (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). ورود رسوبات ریزدانه مواد انحلالی ناشی از اقدامات کشاورزی به تالاب‌ها در طول سال‌های گذشته منجر به ایجاد پهنه گسترده‌ای از کفه‌های با دانه‌بندی بسیار ریز رسوبی پس از خشکی تالاب‌ها می‌شود (خیرفام ۲۰۲۲). لایه رسوبی ژرف که حاوی رسوبات ریزدانه و مواد انحلالی است به‌سبب ابعاد ریز و وزن کم، پایداری قابل توجهی ندارد و منجر به کاهش آستانه برداشت رسوبات سطحی به‌وسیله نیروی باد در فصول خشک سال می‌شود (دانگ و همکاران ۲۰۱۸). بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها که بعضاً حاوی ترکیبات مختلفی از نمک‌ها و بقایای کودهای شیمیایی و سموم کشاورزی است، در فصول گرم سال به‌دلیل هم‌زمانی بادهای شدید و فرساینده شرایط برای تشکیل کانون‌های ریزگرد محلی را فراهم می‌آورند (احمدی بیرگانی و همکاران ۲۰۱۸). از سوی دیگر، همسایگی مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی و مرتعی با تالاب‌ها از یک سو و تشدید فرسایش بادی و برداشت و انتقال ریزگردهای خاک و عناصر سمی از بسترهای خشک‌شده آن‌ها از سوی دیگر منجر به ایجاد تهدیدهای زیستی برای جوامع انسانی، زمین‌های کشاورزی و دیگر گونه‌های گیاهی و

خاک بسترها در برابر فرسایش، کاهش می‌یابد (بلنپ و همکاران ۲۰۱۴). در این راستا، محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک از مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین‌کننده سلامت و پایداری خاک در برابر عامل‌های نابودگر است (تیلور و همکاران ۲۰۱۰) که به‌عنوان شاخصی برای غنای پوسته زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز استفاده می‌شود (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). از این رو، تلقیح مستقیم ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکترها به خاک‌های در معرض نابودی یکی از راهکارهای سریع، زیستی و اثرگذار در احیاء و گسترش پوسته‌های زیستی است که کاربرد آن مورد توجه است (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰، خیرفام و روحی ۲۰۲۰، ۲۰۲۲). هرچند، موفقیت و قابلیت فرآیند تلقیح سیانوباکترها به‌عنوان ریزموجودات خودتغذیه و فتوسنتزکننده برای بهبود محتوای ماده آلی و نیتروژن به‌عنوان مؤلفه‌های پایداری خاک و غنای پوسته زیستی با هدف مهار فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید شده است؛ با این حال، اثربخشی آن‌ها در شرایط تناوب خشکی (خشکی تالاب‌ها در فصول گرم) و آبیگری (آبیگری تالاب‌ها در فصول سرد) برای اهداف تلقیح، زیست‌پوسته‌سازی و بهبود مؤلفه‌های ماده آلی و نیتروژن خاک بررسی نشده است. از این رو، این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی تلقیح غلظت‌های مختلف زیست‌توده سیانوباکترها برای بهبود ماده آلی و نیتروژن خاک در راستای دستیابی به بسترهای مقاوم به فرسایش در بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها با تناوب شرایط خشکی و آبیگری در مقیاس سینی‌های کوچک آزمایشگاهی و در شرایط محیطی مهارنشده، اجرا شد. در این راستا، ارزیابی رویکرد نوین تلقیح سیانوباکترها در بهبود مؤلفه‌های مهم پایداری خاک تالاب‌های خشک‌شده به‌ویژه با تناوب خشکی-آبیگری (به‌بیان دیگر یک بوم‌سازگان ترکیبی خشکی-آبی) تحت شرایط و ویژگی‌های دوگانه و پیچیده و هم‌چنین تلقیح غلظت‌های مختلف سیانوباکترها با هدف دستیابی به یک سطح تلقیح بهینه، از جنبه‌های تمایز و نوآوری این پژوهش در

جانوری مناطق پیرامون می‌شود (ایمانی‌فر و محبی ۲۰۰۷). در راستای مهار فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اقدامات پرشمار زیست‌مهندسی مانند نهال‌کاری، بوته‌کاری و ساخت بادشکن انجام شده است (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). با این حال، به‌سبب افزایش نزولات جوی و کاهش مصرف آب در فصول سرد سال، ورود جریان‌های آبی به بسترهای تالاب‌ها دوباره شروع می‌شود که این رخداد منجر به پوشش بسترها به‌وسیله آب می‌شود. از این رو، امکان انجام اقدامات زیست‌مهندسی در بسترهای تالاب‌ها به‌دلیل ویرانی آن‌ها وجود ندارد. با این حال، به‌سبب پهنه گسترده بسترهای خشک‌شده تالاب‌ها در فصول خشک سال و نزدیکی این مناطق به زمین‌های کشاورزی و مسکونی، اجرای اقدامات مدیریتی و فنی برای مهار فرسایش بادی و کاهش ریزگردها اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، اخیراً ایجاد پوسته‌های زیستی مقاوم و پویا در بسترهای کاملاً خشک‌شده دریاچه‌ها با رویکرد زیستی تلقیح ریزموجودات خاک‌زی به‌ویژه سیانوباکترها مطرح شده است (خیرفام و روحی ۲۰۲۰) که یافته‌ها نیز بیانگر موفقیت این رویکرد است (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰). پوسته‌های زیستی خاک غالباً محل تجمع ریزموجودات خاک‌زی است که دامنه گسترش آن‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک گزارش شده است (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). ریزموجودات پوسته‌های زیستی غالباً از باکتری‌ها و سیانوباکترها تشکیل شده‌اند. این ریزموجودات با گسترش رشته‌ها و ترشحات پلی‌ساکاریدی خود هم محتوای عناصر غذایی خاک را بهبود می‌دهند و هم با اتصال ذرات خاک سبب افزایش پایداری خاک‌دانه‌های سطحی بسترها در برابر عامل‌های فرساینده به‌ویژه نیروی باد می‌شوند (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). با این حال، به‌دلیل سرعت زیاد نابودی از یک سو و سرعت کم زیاد ریزموجودات خاک‌زی به‌دلیل شرایط نامساعد محیطی از سوی دیگر، گسترش پوسته‌های زیستی محدود و کند (تا ۵۰ سال) است که در نتیجه اثرگذاری این پوسته‌ها در بهبود مؤلفه‌های پایداری

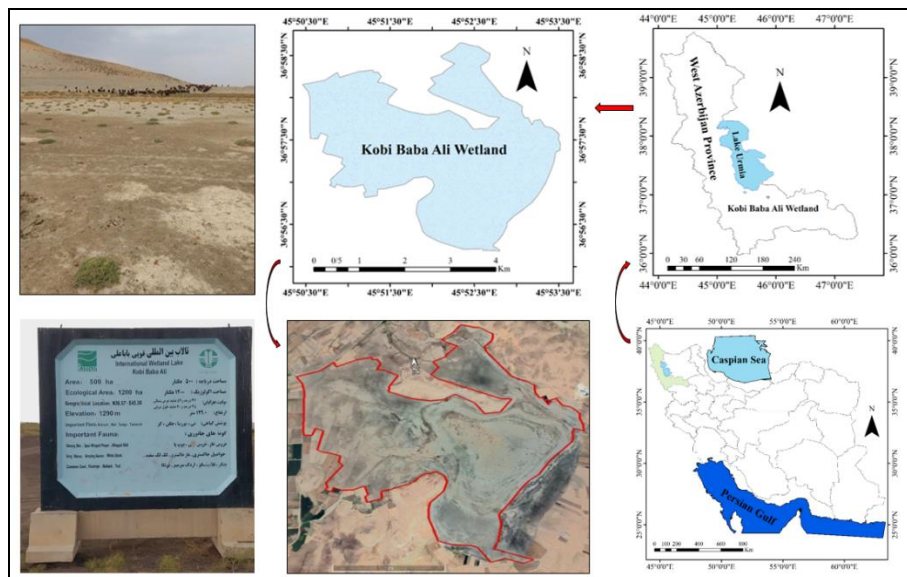
منطقه مطالعه شده به ترتیب ۶۲، ۲۸ و ۱۰٪ بود که بر پایه طبقه‌بندی USDA، بافت آن سیلتی-لومی بود. این نوع بافت در شرایط تردد و برهم‌خوردگی حساسیت زیادی به فرسایش بادی دارد. به دلیل تراکم زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در پیرامون این تالاب و اثرات سوء ریزگردها در سال‌های گذشته، اجرای راهکارهای مهار و تثبیت بسترهای حساس به فرسایش ضروری است. هرچند در پیرامون بسترهای خشک‌شده تالاب به شکل بسیار محدود و پراکنده گونه‌های گیاهی با غالبیت نی (*Phragmites australis*)، علف بویا (*Agrostis stolonifera*)، جگن (*Carex L.*) و گز (*Tamarix L.*) مشاهده شدند اما نقش به‌سزایی در تثبیت بسترهای خشک‌شده در برابر فرسایش بادی ندارند. از این رو، بسترهای خشک‌شده تالاب قویی با باغلی به دلیل خشکی و آبیگری متناوب به‌عنوان منطقه پژوهشی انتخاب شد.

مقایسه با دیگر پژوهش‌ها بود که کم‌تر به آن توجه شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

برای انجام این پژوهش، خاک بسترهای خشک‌شده تالاب بین‌المللی قویی با باغلی استان آذربایجان غربی در ۳۳ کیلومتری شهر مهاباد برای بررسی، انتخاب شد (شکل ۱). این تالاب با مساحت ۵۰۰ هکتاری در کنوانسیون رامسر به ثبت رسیده است. در سال‌های گذشته به دلیل کاهش بارش‌ها و به‌ویژه بهره‌برداری‌های غیراصولی از منابع، آب ورودی آب آبخیز بالادست به شدت کاهش یافته است. این تالاب از اواخر خرداد ماه تا اواسط آبان خشک است. از این رو، بسترهای خشک‌شده آن به دلیل همزمانی با تشدید و تعدد بادهای فرساینده در بازه زمانی نامبرده در معرض فرسایش بادی بوده و منشاء برداشت ریزگرد می‌باشد. درصد سیلت، شن و رس خاک



شکل ۱- موقعیت تالاب قویی با باغلی در شمال غرب ایران.

Figure 1- Location of the Kobi Baba Ali wetland, northwest of Iran.

روش پژوهش

جداسازی و ازدیاد سیانوباکترها

لوله‌های پلی‌وینیل کلرید به قطر پنج سانتی‌متر برای کشت و استخراج سیانوباکترهای بومی، نمونه‌برداری شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). هم‌چنین، از ژرفای

در این پژوهش، از ژرفای صفر تا دو سانتی‌متری خاک بسترهای خشک‌شده منطقه مطالعه‌شده، با استفاده از

غلظت صفر (شاهد یا بدون تلقیح)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر لیتر (معادل گرم بر مترمربع به دلیل تلقیح یک لیتر در مترمربع) از زیست‌توده سیانوباکتریایی به‌عنوان تیمارهای تلقیح استفاده شد (اصغری و همکاران ۲۰۲۲). احتمال اثرات سوء محیط زیستی تلقیح سیانوباکترها از نگرانی‌های رویکرد تلقیح ریزموجودات خاک‌زی است که برخلاف سیانوباکترهای آبی (جلبک‌های سبز-آبی)، تاکنون گزارشی از اثرات سوء محیط زیستی و بیماری‌زایی سیانوباکترهای خاک‌زی به‌ویژه جنس‌های بررسی‌شده در این پژوهش (*Oscillatoria sp.* و *Nostoc sp.*) مشاهده‌نشده است (صادقی و همکاران، ۲۰۲۰).

آماده‌سازی خاک و سینی‌های آزمایش

در این پژوهش از سینی‌های استاندارد آزمایشی با ابعاد طول، عرض و ژرفای ۵۰ در ۳۰ در ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد (سامر و همکاران ۲۰۱۸). همچنین، از چهار تیمار زیست‌توده با اندازه‌های صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از تلقیح سیانوباکترها و با چهار تکرار در دو گروه تیمارهای گروه خشک و تیمارهای گروه خشکی-آبگیری (مجموعاً ۳۲ آزمایش) استفاده شد. از آنجایی‌که، تلقیح ۱/۵ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در بسیاری از پژوهش‌های پیشین مشابه به‌عنوان کمترین غلظت برای دستیابی به بهبود مؤلفه‌های خاک استفاده‌شده است (صادقی و همکاران ۲۰۲۰)، در این پژوهش نیز کمترین سطح تلقیح، ۱/۵ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در نظر گرفته شد. از سوی دیگر، به دلیل اثرگذاری ناچیز حداقل غلظت تلقیح روی برخی مؤلفه‌های پایداری خاک در پژوهش‌های پیشین، در این پژوهش سعی شد تا غلظت‌های متوسط (۳ گرم بر مترمربع) و زیاد (۶ گرم بر مترمربع) از سیانوباکترها نیز با هدف اطمینان از اثرگذاری معنی‌دار و همچنین دستیابی به سطح تلقیح بهینه از نظر اثربخشی و حتی هزینه‌کرد و امکان‌پذیری تولید، ارزیابی شود. در این راستا، در پژوهش‌های داک (۲۰۱۶) و رونچرو-راموس و همکاران (۲۰۱۹) به‌ترتیب از ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها با هدف بهبود برخی مؤلفه‌های خاک استفاده‌شده است. به‌منظور انجام آزمایش و بر اساس

صفر تا ۱۰ سانتی‌متری سطح خاک نمونه‌های حجمی برای تلقیح تیمارهای پژوهشی برداشت شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). نمونه‌های برداشت‌شده برای استفاده در فرآیند کشت و استخراج سیانوباکترها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی به آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه انتقال یافت و تا شروع آزمایش در دمای چهار درجه سانتیگراد نگهداری شد. سپس، هوا خشک شدند (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). برای جداسازی و شناسایی سیانوباکترها، یک گرم از نمونه خاک مخلوط‌شده از تمام نمونه‌های برداشت‌شده (۲۰ نمونه مرکب) از منطقه به ظرف‌های پتری با ۱۰ تکرار منتقل شد و لامل‌های ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر روی خاک‌ها نصب شد. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر محیط کشت سیانوباکتریایی CHU10 هر هفته یک بار به آن‌ها اضافه شد (خیرفام و همکاران ۲۰۲۰). پس از پایان زمان کشت، سیانوباکترهای رشد کرده روی لامل‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری با قدرت تفکیک زیاد و بر پایه برخی ویژگی‌های مهم ریخت‌شناسی بیان‌شده در راهنمای باکتری‌شناسی Bergey شناسایی شدند (ووس و همکاران ۲۰۱۱). پس از شناسایی در حد جنس، سیانوباکترها بر اساس قابلیت زیاد ترشح پلی‌ساکارید، داشتن ساختار رشته‌ای و بیماری‌زا نبودن جداسازی شدند (ووس و همکاران ۲۰۱۱). پس از شناسایی جنس یا جنس‌های مناسب برای تلقیح (*Oscillatoria sp.* و *Nostoc sp.*)، خلص‌سازی انجام شد. سپس، با بهره‌گیری از محیط کشت مایع CHU10 سیانوباکترها ازدیاد شدند (خیرفام و روحی ۲۰۲۰). پیوسته سیانوباکترها تا رسیدن به زیست‌توده‌های مد نظر در آزمایش، ازدیاد شدند. مایه تلقیح تا رسیدن به سطح زیست‌توده مطلوب رشد داده شد (خیرفام و اسدزاده ۲۰۲۰). برای برآورد زیست‌توده سیانوباکتریها، یک نمونه ۲۰ میلی‌لیتری به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد تا سیانوباکترها از محیط کشت جدا شوند. سپس، سلول‌های سیانوباکترهای استخراج‌شده برای حذف رطوبت، در فریزدرایر خشک شدند و وزن خشک برای تعیین زیست‌توده اندازه‌گیری شد (انصاری و فاطما ۲۰۱۶). در این پژوهش، از چهار

و همکاران ۲۰۰۹). طول دوره زمانی اجرای آزمایش حدوداً ۴/۵ ماه (۱۳۴ روز) بود. به منظور ایجاد شرایط خشکی و خشکی-آبگیری در تیمارهای بررسی شده، گروه تیمار خشکی کامل (۱۶ سینی) به مدت ۱۳۴ روز در شرایط محیطی باز قرار گرفتند و گروه تیمار خشکی-آبگیری (۱۶ سینی) به مدت ۶۰ روز در شرایط محیطی باز و شرایط خشکی قرار گرفتند، ۶۰ روز در شرایط آبگیری و داخل استخرهای آب و به شکل کامل غرقاب قرار گرفتند و در پایان ۱۴ روز در شرایط خشکی (به منظور بیشترین کاهش رطوبت سینی‌های تیمارهای گروه خشکی-آبگیری) نگهداری شدند. در پایان با اتمام دوره آزمایش، محتوای ماده آلی و نیتروژن به عنوان مؤلفه‌های غنای پوسته زیستی و پایداری خاک اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری ماده آلی و نیتروژن خاک

برآورد اندازه ماده آلی خاک تیمارها با اندازه‌گیری کربن آلی با روش والکلی-بلک و اعمال ضریب ون-بلمن (۱/۷۲۲) انجام شد (والکلی و بلک ۱۹۳۴). از این رو، یک گرم از خاک نمونه‌های برداشت شده از غلظت‌های صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر هر یک از سینی‌های فرسایشی به ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری انتقال یافت. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر دی‌کرومات پتاسیم یک نرمال به آن افزوده شد و در پایان ۲۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به آن‌ها اضافه شد. این نمونه‌ها سرد شدند و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به همراه ۱۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک غلیظ همراه با ۲۰ الی ۳۰ قطره معرف دی‌فنل‌آمین اضافه شد. سپس، نمونه‌ها با فروآمونیم سولفات ۰/۵ نرمال تا ظهور رنگ قرمز آجری تیترا شدند. هم‌زمان با نمونه‌های خاک، تمام مراحل فوق برای نمونه شاهد (بدون خاک) نیز انجام شد. در پایان بر اساس اندازه مصرف فروآمونیم سولفات ۰/۵ نرمال و با استفاده از رابطه ۱، محتوای درصد کربن آلی اندازه‌گیری شد. سپس، ماده آلی بر اساس درصد کربن آلی و با استفاده از ضریب ون-بلمن برآورد شد.

رابطه (۱) $OC = [V \times (A-B) \times 0.003 \times 100] \div [A \times M]$
 OC: کربن آلی (درصد)، V: حجم دی‌کرومات (میلی‌لیتر)، A: حجم فروآمونیم سولفات مصرفی برای

تیمارهای تعریف شده در مقیاس سینی‌های کوچک، ۲۰۰ کیلوگرم خاک از بستر تالاب قویی با باغلی در حد امکان از نقاط مختلف منطقه و به شکل نمونه‌برداری مرکب جمع‌آوری، مخلوط و به آزمایشگاه منتقل شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). به این منظور، ابتدا نمونه‌های خاک هوا خشک شدند و برای حذف بقایای گیاهی و سنگ و سنگ‌ریزه از الک هشت میلی‌متری برای دستیابی به بیشترین تشابه با شرایط طبیعت عبور داده شدند. سپس، خاک آماده‌شده به شکل لایه‌ای درون سینی‌ها انتقال یافت. کوبیدگی لازم برای هر لایه به وسیله غلطک دستی انجام شد. در این پژوهش، کوبیدگی لایه‌ها و آماده‌سازی خاک سینی‌ها تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری نمونه خاک دست‌نخورده منطقه مطالعه‌شده انجام شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). زیست‌توده (فاز جامد) سیانوباکترهای ازدیادشده پس از انجام فرآیند سانتریفیوژ (۸۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه) از فاز مایع (محیط کشت) جداسازی شد و برای فرآیند تلقیح به محیط آب استریل اضافه شد. سپس، مایه تلقیحی با وزن زیست‌توده‌های تعریف شده (صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر لیتر) تهیه شد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۸). سپس، به اندازه یک لیتر بر مترمربع (۱۵۰ میلی‌لیتر به ازای هر سینی) از مایه تلقیح سیانوباکتریایی روی هر یک از سینی‌ها با روش آب-تلقیحی اسپری شد (وانگ و همکاران ۲۰۰۹). از سوی دیگر، به منظور ایجاد شرایط یکسان در اجرای آزمایش، فرآیندهای فیزیکی آماده‌سازی سینی‌ها کاملاً مشابه بود و همگام با انتخاب تصادفی برای اعمال تیمارهای مختلف، شرایط محیطی (نور، دما و بلندی) یکسانی نیز برای تیمارهای پژوهشی اعمال شد. سینی‌های آماده‌شده به شکل طرح کامل تصادفی و در شرایط محیطی باز قرار گرفتند و صرفاً در شرایط بارش به فضای بسته منتقل شدند. با این حال، بر اساس الگوی زمانی بارشی منطقه و همچنین ایجاد شرایط با دریافت کمترین رطوبت به وسیله سیانوباکترهای تلقیحی، تا حدودی رطوبت‌دهی سطحی به شکل مه‌پاش و به اندازه ۵۰ میلی‌لیتر به ازای هر سینی فرسایشی در هر بازه زمانی انجام شد (وانگ

با توزیع هنجار تبدیل شدند. سپس، همگن بودن پراکنش‌ها با استفاده از آزمون Levene انجام شد. پس از بررسی شرط‌های نامبرده، تحلیل اثرات چندجانبه اعمال شرایط خشکی و خشکی-آبگیری با استفاده از آزمون تجزیه پراکنش دو طرفه انجام شد. همچنین، تحلیل اثرات یک‌جانبه غلظت‌های مختلف از تلقیح زیست‌توده سیانوباکترها، با استفاده از آزمون پراکنش یک‌طرفه انجام شد. در پایان، مقایسه متغیرهای بررسی‌شده در هر یک از تیمارها و شرایط خشکی و آبگیری-خشکی با استفاده از آزمون t جفتی مستقل انجام شد. سپس، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی انجام شد. تمام آزمون‌های نامبرده در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 23 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که اثر شرایط رطوبتی (اعمال شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری) فقط در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر روی محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) بود (جدول ۱). در حالی‌که، اثر تلقیح غلظت‌های مختلفی از سیانوباکترها (صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) اندازه‌های نیتروژن و ماده آلی خاک در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر منجر به تفاوت‌های معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) شد (جدول ۱). هرچند، اثرات متقابل شرایط رطوبتی (خشکی و خشکی-آبگیری) و تلقیح سیانوباکترها روی محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک غیرمعنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) بود (جدول ۱).

اثرات تیمارهای تلقیح (غلظت‌های صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها) روی محتوای نیتروژن در هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری (جدول ۲) در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود. همچنین، تیمارهای تلقیح تحت شرایط خشکی-آبگیری در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر نیز اثرات معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) روی محتوای نیتروژن

شاهد (میلی‌لیتر)، B: حجم فروآمونیم سولفات مصرفی برای نمونه خاک (میلی‌لیتر)، M: وزن خاک خشک (گرم) است.

نیتروژن خاک تیمارهای بررسی‌شده با استفاده از روش کجدال (کجدال ۱۸۸۳) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش و بر اساس روش پیشنهادی، هضم خاک با افزودن دو میلی‌متر آب مقطر و سه میلی‌متر اسیدسولفوریک غلیظ و ۱/۱ گرم قرص کجدال به لوله‌های آزمایشی انجام شد. سپس، به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد و در دستگاه بلوک هضم به مدت یک ساعت در معرض دمای ۲۷۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳۰ دقیقه نیز در دمای ۳۸۰ درجه سانتیگراد نگهداری شد تا عصاره آن شفاف شود. پس از سرد شدن نمونه‌ها، ۱۲ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد و عصاره‌های رقیق‌شده به بالن‌های تقطیر انتقال یافت. سپس، به نمونه‌ها ۲۰ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۱۰ نرمال اضافه شد. عصاره تولیدشده با ۲۵ میلی‌لیتر محلول اسید بوریک و دو قطره معرف برموکروزول مخلوط و وارد مرحل تقطیر شد. سپس، تمام گاز آمونیاک آن متصاعد و رنگ آن به سبز تغییر یافت. در پایان، مرحله تیتراسیون با افزودن تدریجی اسیدسولفوریک ۰/۱ نرمال تا مشاهده رنگ قرمز پررنگ ادامه یافت. پس از سنجش اندازه اسیدسولفوریک ۰/۱ نرمال مصرف‌شده و با استفاده از رابطه ۲، درصد نیتروژن کل خاک محاسبه شد.

رابطه ۲ $TN = (A-B) \times N \times (0.014) \times 100 / M_s$
 TN: نیتروژن آلی کل (درصد)، A: حجم اضافه‌شده اسیدسولفوریک به نمونه خاک (میلی‌لیتر)، B: حجم اضافه‌شده اسیدسولفوریک به نمونه شاهد بدون خاک (میلی‌لیتر)، N: نرمالیت اسیدسولفوریک، M_s : وزن خاک خشک (گرم) است.

تحلیل آماری

پس از اندازه‌گیری محتوای ماده آلی و نیتروژن کل در هر یک از تیمارهای پژوهشی، بانک اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار Excel 2016 به‌منظور تجزیه و تحلیل، تشکیل شد. پس از بررسی بهنجار و ناهنجار بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk، در شرایطی که لازم بود داده‌های ناهنجار به داده‌هایی با

(شکل ۲). نتایج نشان داد که درصد نیتروژن خاک در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر و تحت شرایط خشکی کامل در تیمار تلقیح غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع به صورت معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) و به ترتیب ۲۶ و ۳۹٪ بیش‌تر از تیمار شاهد بوده و غلظت کم (۱/۵ گرم بر مترمربع) از تلقیح سیانوباکترها منجر به افزایش محتوای نیتروژن خاک نشد (شکل ۲). در حالی‌که، در شرایط خشکی کامل و در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر، تلقیح سیانوباکترها با هر سه غلظت ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع تأثیر معنی‌داری (در سطح احتمال پنج درصد) بر اندازه‌های نیتروژن کل خاک نداشتند (شکل ۲).

داشتند. از طرفی، محتوای ماده آلی خاک در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر و تحت هر دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری تأثیرپذیری معنی‌داری (در سطح احتمال پنج درصد) از تیمارهای تلقیح (چهار غلظت صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها) داشت (جدول ۲). محتوای نیتروژن خاک تحت شرایط خشکی کامل در تیمارهای تلقیح غلظت صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر به ترتیب 0.0111 ± 0.008 ، 0.0122 ± 0.007 ، 0.0140 ± 0.010 و 0.0155 ± 0.005 ٪ و در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر به ترتیب 0.0104 ± 0.004 ، 0.0110 ± 0.026 ، 0.0129 ± 0.010 و 0.0121 ± 0.008 ٪ اندازه‌گیری شد

جدول ۱- نتایج تجزیه پراکنش دو طرفه برای برآورد اثر شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری (شرایط رطوبتی) و تلقیح غلظت‌های مختلفی از سیانوباکترها بر محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک.

Table 1-Results of two-way ANOVA to determine the effects of complete dry and dry-dewatering conditions (moisture conditions) and cyanobacterial inoculation concentration levels on treatments soil nitrogen and organic matter.

Variable	Soil depth	Variation sources	df	Mean Square	F-value	Sig.
Total nitrogen (%)	0-1 cm	Moisture conditions	1	0.001	7.526*	0.014
		Inoculation	3	0.003	29.486**	0.0001
		Moisture conditions×inoculation	3	0.00002	0.196 ^{ns}	0.898
	0-5 cm	Moisture conditions	1	0.001	4.186 ^{ns}	0.058
		Inoculation	3	0.001	7.175**	0.003
		Moisture conditions×inoculation	3	0.00001	0.055 ^{ns}	0.982
Organic matter (%)	0-1 cm	Moisture conditions	1	0.302	5.146*	0.037
		Inoculation	3	1.613	27.455**	0.0001
		Moisture conditions×inoculation	3	0.039	0.664 ^{ns}	0.586
	0-5 cm	Moisture conditions	1	0.355	3.842 ^{ns}	0.068
		Inoculation	3	1.964	11.562**	0.0001
		Moisture conditions×inoculation	3	0.004	0.450 ^{ns}	0.987

ns= not significant

*= significantly at p<0.05

**= significantly at p<0.01

ns بدون معنی داری

*= معنی دار در سطح ۵٪

**= معنی دار در سطح ۱٪

۱۳۰/۰۰۱±۰/۰۰۴ و ۱۴۲±۰/۰۰۴٪ بود (شکل ۲). افزون بر این، در شرایط خشکی-غرقابی، محتوای نیتروژن خاک در تیمارهای تلقیح با غلظت ۳ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر به ترتیب ۲۸ و ۴۴٪ و در تیمارهای با تلقیح ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در هر دو ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر به ترتیب ۱۷ و ۲۸٪ (در سطح احتمال یک درصد) در

نتایج اندازه‌گیری محتوای نیتروژن خاک در شرایط خشکی-آبگیری نیز نشان داد که اندازه‌های این متغیر در ژرفای‌های صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر برای هر یک از تیمارهای تلقیح (غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) سیانوباکترها به ترتیب 0.0111 ± 0.011 ، 0.0132 ± 0.015 ، 0.0151 ± 0.007 و 0.0169 ± 0.005 ٪ و 0.0111 ± 0.005 ، 0.0119 ± 0.009 ٪

گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر معنی‌دار بود (در سطح احتمال یک درصد). محتوای ماده آلی در تیمارهای تلقیح با غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر به ترتیب ۶۵ و ۷۲٪ در مقایسه با شاهد افزایش یافت (شکل ۲). همچنین، در شرایط خشکی کامل، محتوای ماده آلی در هر سه تیمار تلقیح با غلظت ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر به ترتیب ۴۱، ۴۴ و ۶۱٪ در مقایسه با شاهد افزایش یافت که این افزایش‌ها از نظر آماری معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود (شکل ۲).

مقایسه با شاهد (تلقیح با غلظت صفر گرم بر مترمربع) افزایش یافت بود (شکل ۲). در این راستا، اثر غلظت کم تلقیح (۱/۵ بر مترمربع) از سیانوباکترها روی اندازه‌های نیتروژن خاک در هر دو ژرفا، معنی‌دار نبود (در سطح احتمال پنج درصد). اندازه‌های ماده آلی خاک تحت شرایط خشکی کامل در تیمارهای تلقیح با غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک و صفر تا پنج سانتی‌متر به ترتیب 0.163 ± 0.042 ، 0.210 ± 0.011 ، 0.269 ± 0.017 و 0.210 ± 0.017 ، 0.210 ± 0.017 و 0.210 ± 0.017 بود (شکل ۲). نتایج تحلیل نشان داد اثر دو غلظت ۳ و ۶

جدول ۲- نتایج تجزیه پراکنش یک طرفه برای برآورد اختلافات (در سطح احتمال پنج درصد) اثرات تلقیح

سیانوباکترها روی محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک تحت شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری.

Table 2- Results of one-way ANOVA to determine differences ($p < 0.05$) cyanobacterial inoculation effects on soil nitrogen and organic matter content under completely dry and dry-dewatering conditions.

Treatments	Variable	Soil depth	Variation sources	df	Mean Square	F-value	Sig.
Completely dry	Total nitrogen (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.001	18.488**	0.001
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.0001	1.732 ^{ns}	0.237
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
Dry-dewatering	Organic matter (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.860	15.34**	0.001
			Within groups	8	0.056		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.468	8.31**	0.008
			Within groups	8	0.059		
			Total	11			
Completely dry	Total nitrogen (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.002	12.968**	0.002
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.001	16.646**	0.001
			Within groups	8	0.0001		
			Total	11			
Dry-dewatering	Organic matter (%)	0-1 cm	Between groups	3	0.793	12.891**	0.002
			Within groups	8	0.061		
			Total	11			
		0-5 cm	Between groups	3	0.582	4.613*	0.037
			Within groups	8	0.126		
			Total	11			

ns= not significant

*= significantly at $p < 0.05$

**= significantly at $p < 0.01$

ns بدون معنی داری

*= معنی دار در سطح ۰.۰۵٪

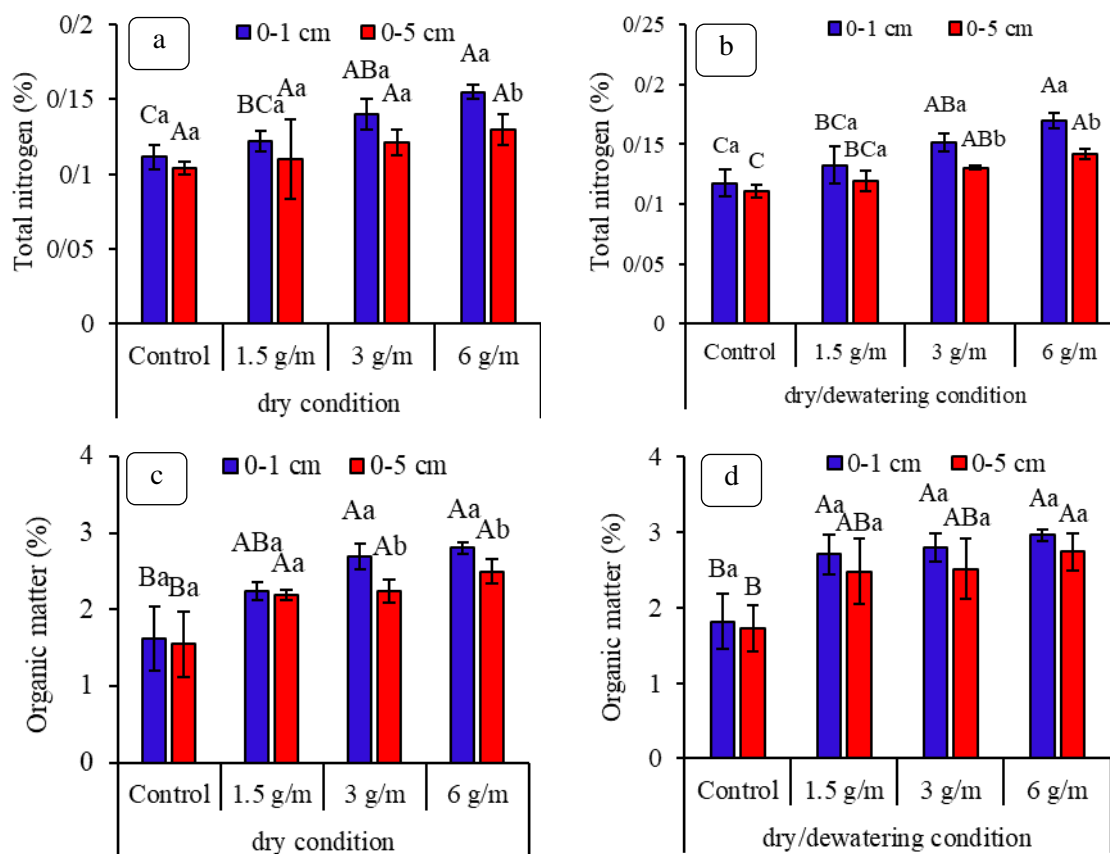
**= معنی دار در سطح ۰.۰۱٪

گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر به ترتیب 0.181 ± 0.036 ، 0.270 ± 0.026 ،

در شرایط خشکی-آبگیری، اندازه‌های ماده آلی خاک در تیمارهای تلقیح با غلظت صفر (شاهد)، ۱/۵، ۳ و ۶

سانتی‌متر از خاک، فقط غلظت ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها منجر به افزایش معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) محتوای ماده آلی (۵۸٪) در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲). نتایج مقایسه اثرات تیمارهای پژوهشی بر متغیرهای نیتروژن و ماده آلی خاک (ژرفای صفر تا یک سانتی‌متر) در دو شرایط خشکی کامل و خشکی-آبگیری نشان داد که اثرات این تیمارها معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) نبود. در شرایط رطوبتی نیز فقط اثر تیمار شش گرم بر متر مربع از سیانوباکترها بر مقدار نیتروژن خاک معنی‌دار بود (جدول ۳ و شکل ۲).

۰/۱۸±۰/۲۸٪ و ۰/۰۸±۰/۲۹۵٪ و در ژرفای صفر تا پنج سانتی‌متر به ترتیب ۰/۳۱±۰/۱۷۲٪، ۰/۴۳±۰/۲۴۸٪، ۰/۴۰±۰/۲۵۱٪ و ۰/۲۴±۰/۲۷۳٪ بود (شکل ۲). بررسی نتایج تجزیه پراکنش یک طرفه نشان داد محتوای ماده آلی در شرایط خشکی-آبگیری و در ژرفای صفر تا یک سانتی‌متری خاک، در هر سه تیمار تلقیح با غلظت ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع از سیانوباکترها در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۴۹، ۵۴ و ۶۳٪ افزایش یافت که از نظر آماری این افزایش‌ها معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) بود (شکل ۲). از سوی دیگر، در همین شرایط رطوبتی ولی در ژرفای صفر تا پنج



شکل ۲- مقایسه میانگین محتوای نیتروژن (الف و ب) و مواد آلی (ج و د) در پاسخ به تیمارهای (صفر، ۱/۵، ۳ و ۶ گرم بر مترمربع) تلقیح سیانوباکترها تحت شرایط خشکی کامل (الف و ج) و خشکی-آبگیری (ب و د). (حروف بزرگ مشابه نشان‌دهنده نبودن اختلاف معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) در میان تیمارهای تلقیح در هر ژرفا و حروف کوچک مشابه نشان‌دهنده نبودن اختلاف معنی‌دار (در سطح احتمال پنج درصد) میان ژرفا در هر غلظت از تلقیح است).

Figure 2- Comparison of the mean soil nitrogen (a and b) and organic matter (c and d) content in response to cyanobacteria inoculation treatments (0, 1.5, 3, and 6 g m⁻²) under both completely dry (a and c) and dry-dewatering (b and d) conditions.

(Similar uppercase letters indicate no significant difference ($p>0.05$) among inoculation treatments at each depth and similar lowercase letters indicate no significant difference ($p>0.05$) between depths at each inoculation level).

خاک‌دانه‌ها (شوایتزر و همکاران ۲۰۱۹) می‌شود و از سوی دیگر، محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک نیز منجر به افزایش اتصال‌پذیری ذرات خاک به یکدیگر، افزایش محتوای رطوبت خاک، تحریک فعالیت و جمعیت میکروبی و پوشش گیاهی و در نتیجه بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک می‌شوند (شوایتزر و همکاران ۲۰۱۹، اویشی و همکاران ۲۰۲۵). با این حال، تحلیل نتایج و اندازه‌های نیتروژن (۰/۱۱۱٪) و ماده آلی (۰/۱۶۳٪) خاک نشان‌دهنده فقر نسبی محتوای نیتروژن و ماده آلی بسترهای خشک‌شده تالاب مطالعه‌شده بود. در این راستا، خیرفام (۲۰۲۲) و ژائو و همکاران (۲۰۲۵) نیز اثرات منفی کمبود ماده آلی و نیتروژن خاک و افزایش فرسایش‌پذیری خاک در برابر نیروی باد را گزارش کرده‌اند.

در این پژوهش تحلیل نتایج نشان داد که بافت خاک بسترهای خشک‌شده تالاب قویی باباعلی (منطقه مطالعه‌شده) به دلیل سیلتی-لومی بودن (سیلت ۶۲٪، شن ۲۸٪ و رس ۱۰٪) با درصد رس کم و درصد سیلت زیاد، نسبت به فرسایش بادی بسیار حساس هستند. افزون بر این، از یک سو چسبندگی کم میان‌ذره‌ای و از سوی دیگر کم بودن جرم و اندازه ذرات شرایطی فراهم آورده است که این خاک‌ها به فرسایش بادی حساس باشند (نان و همکاران ۲۰۱۸، خیرفام و روحی ۲۰۲۰). در این راستا، اوسیلا و همکاران (۲۰۱۵) نیز حساسیت زیاد خاک‌های با محتوای کم رس در برابر نیروی باد را گزارش کرده‌اند. از یک سو اثرات مثبت محتوای رس (۱۰ تا ۴۰٪) سبب بهبود اتصال‌پذیری میان ذرات و پایداری

جدول ۳- نتایج آزمون t مستقل برای برآورد اختلافات میانگین (در سطح احتمال پنج درصد) محتوای نیتروژن و ماده آلی خاک در دو شرایط خشکی و خشکی-آبگیری در هر یک از تیمارهای تلقیح سیانوباکترها.

Table 3- Results of an independent samples t-test to determine the mean difference ($p < 0.05$) between the two groups of completely dry and dry-dewatering conditions on soil nitrogen and organic matter content at each cyanobacteria inoculation level separately.

Variable	Inoculation concentration	Treatment		df	t-value	Sig.
		Completely dry	Dry-dewatering			
Total nitrogen (%)	0 (control)	0.111	0.117	4	-0.792 ^{ns}	0.472
	1.5 g m ⁻²	0.122	0.132	4	-1.036 ^{ns}	0.359
	3 g m ⁻²	0.140	0.151	4	-1.521 ^{ns}	0.203
	6 g m ⁻²	0.155	0.169	4	-3.096 ^{**}	0.003
Organic matter (%)	0 (control)	1.63	1.81	4	-0.570 ^{ns}	0.599
	1.5 g m ⁻²	2.24	2.70	4	-2.751 ^{ns}	0.051
	3 g m ⁻²	2.69	3.80	4	-0.718 ^{ns}	0.512
	6 g m ⁻²	2.80	2.95	4	-2.370 ^{ns}	0.077

ns= not significant
**= significantly at $p < 0.01$

ns بدون معنی داری
**= معنی دار در سطح ۱٪

تسریع گسترش پوشش گیاهی و افزایش پایداری خاک در برابر عامل‌های فرساینده می‌شود در نتیجه حساسیت خاک به فرسایش کاهش می‌یابد (هان و همکاران ۲۰۲۳). یافته‌های این پژوهش نشان داد که اثر شرایط غرقابی (آبگیری تالاب) روی محتوای نیتروژن کل و ماده آلی معنی‌داری نبود. از این رو، استفاده از دیگر راهکارهای بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک در بسترهای خشک‌شده تالاب‌های فصلی ضروری است. در راستای بهبود مؤلفه‌های پایداری

ماده آلی خاک به‌عنوان یک ماده چسبنده عمل می‌کند و ذرات خاک را به شکل خاکدانه در کنار هم نگه می‌دارد. این خاکدانه‌ها یک ساختار پایدار و متخلخل ایجاد می‌کنند که در برابر فرسایش بادی مقاوم است. از این رو، با کمبود ماده آلی، ساختار خاک ضعیف شده و آن را بیشتر مستعد به نابودی و فرسایش می‌کند (فن و همکاران ۲۰۲۵). از سوی دیگر، نیتروژن خاک نیز به‌عنوان یک ماده مغذی برای رشد گیاه عمل می‌کند و به‌طور غیرمستقیم سبب

نتایج این پژوهش نشان داد که تلقیح سیانوباکترها با غلظت ۶ گرم بر مترمربع سیانوباکترها تحت شرایط خشکی-آبگیری (تجربه حداقل یکبار آبگیری تالاب در فصول بارشی سال)، سبب افزایش نیتروژن کل در مقایسه با تلقیح همان غلظت از سیانوباکترها در شرایط خشکی کامل شد. به بیان دیگر، آبگیری تالاب پس از یک دوره خشکی، نقش مؤثری در بهبود عملکرد سیانوباکترهای تلقیح شده در افزایش محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک نداشت. هرچند، فاصله زمانی کم (۱۴ روز) میان اتمام دوره آبگیری و انجام اندازه‌گیری‌ها، می‌تواند از دلایل اثرگذار نبودن آبگیری در عملکرد سیانوباکترها باشد. همچنین اثرگذار نبودن تلقیح غلظت کم (۱/۵ گرم بر مترمربع) در افزایش محتوای ماده آلی و نیتروژن کل نیز ضرورت تلقیح حداقل ۳ گرم بر مترمربع از زیست‌توده سیانوباکترها با هدف بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک را تأیید کرد. از یک سو، توجه به اثرگذاری تلقیح سیانوباکترها بر افزایش مؤلفه‌های پایداری خاک و از سوی دیگر اطمینان از نبودن اثرات سوء و توجیه اقتصادی تلقیح سیانوباکترها نیز ضروری است. در این راستا یافته‌های صادقی و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که سیانوباکترهای تلقیح‌شده به خاک با هدف تعدیل رواناب سطحی ضمن موفقیت در دستیابی به اهداف، واحدهای سیانوباکتریایی در رواناب جمع‌آوری‌شده از سطح خاک تلقیح‌شده مشاهده نشدند. همچنین، صرفه اقتصادی تلقیح سیانوباکترها (۳۵۰ دلار در هر هکتار تلقیح) در مقایسه با برخی افزودنی‌های مرسوم خاک از قبیل زغال زیستی، پلی‌مرهای زیست‌تخریب‌پذیر، مالچ‌های گیاهی و کودهای حیوانی) را تأیید کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

امروزه خشکی کامل یا دوره‌ای تالاب‌ها ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، ابعاد جدیدی از چالش‌های زیست‌محیطی را ایجاد کرده است که تثبیت بسترهای آن‌ها یکی از اولویت‌های مدیریتی است. در این پژوهش اثربخشی تلقیح زیست‌توده‌های مختلفی از سیانوباکترهای بومی روی بسترهای

خاک، تحت شرایط خشکی کامل، تلقیح سیانوباکترها با غلظت ۳ و ۶ گرم بر مترمربع به ترتیب سبب افزایش ۶۵٪ و ۷۲٪ ماده آلی و ۲۶٪ و ۳۹٪ نیتروژن کل خاک در مقایسه با شاهد شدند که نشان‌دهنده اثرگذاری قابل توجه این تیمارها بود.

سیانوباکترها با فرآیندهای پرشماری منجر به افزایش ماده آلی و نیتروژن خاک می‌شوند. از آنجایی که سیانوباکترها موجودات فتوسنتزکننده‌ای هستند تحت تأثیر نور خورشید دی‌اکسید کربن جو را به ترکیبات کربن آلی (مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها) تبدیل می‌کنند. کربن آلی جذب‌شده در فرآیند فتوسنتز به وسیله سیانوباکترهای خاک به ماده آلی در خاک تبدیل می‌شود. همچنین کربن آلی ترسیب‌شده بخشی از زیست‌توده سلولی آن‌ها را تشکیل می‌دهد که پس از تجزیه سلول‌های مرده سیانوباکترها سبب افزایش محتوای ماده آلی خاک می‌شود. (نواز و همکاران ۲۰۲۴). از سوی دیگر، بسیاری از سیانوباکتری‌ها مواد چسبنده و ژلاتینی (مواد پلیمری) خارج سلولی ترشح می‌کنند که سرشار از پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و دیگر ترکیبات آلی است. این پلیمرها هم از سلول‌های سیانوباکترها در برابر عامل‌های محیطی نامساعد محافظت می‌کنند و هم ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و خاکدانه‌های پایدار تشکیل می‌دهند که نقش به‌سزایی در افزایش محتوای ماده آلی خاک دارند (ماگر و توماس ۲۰۱۱). در این راستا، یافته‌های چامیزو و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که حدود ۲۲٪ از کل ترشحات برون‌سلولی سیانوباکترهای خاک‌زی از مواد آلی تشکیل شده است. خیرفام و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که این ترشحات سبب پیوند ذرات خاک به یکدیگر، افزایش خاصیت اسفنجی خاک برای جذب رطوبت می‌شود و منبع غذایی برای دیگر ریزموجودات خاک‌زی است. در نتیجه پایداری خاک بهبود می‌یابد. همچنین، سیانوباکترها عمدتاً با تثبیت زیستی (تبدیل نیتروژن جوی به شکل‌های قابل استفاده زیستی مانند آمونیاک یا آمونیوم) نیتروژن خاک را افزایش می‌دهند (نواز و همکاران ۲۰۲۴).

چند جنس از سیانوباکترها بعد از تلقیح زیست‌توده بررسی شود.

سپاس‌گزاری

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام شد. نویسندگان این مقاله از تمام حمایت‌های مالی و غیرمالی دانشگاه ارومیه تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نمونه‌برداری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: مفهوم‌سازی، راهنمایی، نمونه‌برداری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

نویسنده سوم: راهنمایی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

خشک‌شده یک تالاب فصلی در شرایط خشکی کامل و تجربه حداقل یک دوره خشکی-آبگیری با هدف بهبود محتوای نیتروژن کل و ماده آلی خاک به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم پایداری خاک بررسی شد. یافته‌ها بیانگر محتوای کم نیتروژن و ماده آلی در بسترها بود. حتی یک‌بار آبگیری تالاب بعد از یک دوره خشکی نیز تأثیری در بهبود مؤلفه‌های پایداری خاک نداشت. در حالی‌که، تلقیح سیانوباکترها، به‌ویژه با غلظت زیست‌توده متوسط (۳ گرم بر مترمربع) و زیاد (۶ گرم بر مترمربع)، بر افزایش محتوای نیتروژن کل و ماده آلی خاک به‌شکل قابل توجهی اثرگذار بود. قابلیت زنده‌مانی و استقرار مفید سیانوباکترهای تلقیح‌شده در بسترهای تالابی که برای دوره‌ای چندماهه غرقاب می‌شود، از ابهامات رویکرد تلقیح خاک با سیانوباکترها بود که نتایج این پژوهش تأییدکننده این قابلیت بود. از سوی دیگر، احتمال اثرات سوء بوم‌شناختی و زیست‌محیطی سیانوباکترهای خاک‌زی تلقیح‌شده با زیست‌توده زیاد بر محیط آبی تالاب در دوره‌های آبگیری از نگرانی‌های مطرح‌شده برای این رویکرد بود که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی بیشتر بررسی شوند. هرچند، تاکنون گزارشی از اثرات سوء بوم‌شناختی سیانوباکترهای خاک‌زی، به‌ویژه جنس‌های تلقیح‌شده در این پژوهش، گزارش نشده است. یکی دیگر از نگرانی‌ها احتمال تغییر در ترکیب جمعیت ریزموجودات خاک‌زی است که پیشنهاد می‌شود این موضوع در پژوهش‌های آتی برای یک یا

فهرست منابع

- Ahmady-Birgani H, Agahi E, Ahmadi SJ, Erfanian M. 2018. Sediment source fingerprinting of the Lake Urmia sand dunes. *Scientific Reports*. 8(1): 206.
- Ansari S, Fatma T. 2016. Cyanobacterial polyhydroxybutyrate (PHB): screening, optimization and characterization. *PloS One*, 11(6): e0158168. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158168>.
- Asghari S, Zeinalzadeh K, Kheirfam H, Azar BH. 2022. The impact of cyanobacteria inoculation on soil hydraulic properties at the lab-scale experiment. *Agricultural Water Management*. 272: 107865. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107865>.
- Avecilla F, Panebianco JE, Buschiazzi DE. 2015. Variable effects of saltation and soil properties on wind erosion of different textured soils. *Aeolian Research*. 18: 145-53. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.07.005>.
- Belnap J, Walker BJ, Munson SM, Gill RA. 2014. Controls on sediment production in two US deserts. *Aeolian Research*. 14: 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.03.007>.
- Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, Domingo F. 2012. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*. 49: 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.017>.

- Chamizo S, Mugnai G, Rossi F, Certini G, De Philippis R. 2018. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: gaining insights for applicability in soil restoration. *Frontiers in Environmental Science*. 6: 49. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00049>.
- D'Acqui LP. 2016. Use of indigenous cyanobacteria for sustainable improvement of biogeochemical and physical fertility of marginal soils in semiarid tropics. In *Bioformulations: For sustainable agriculture*, New Delhi: Springer India. pp. 213-232. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2779-3_12.
- Dang A, Bennett JM, Marchuk A, Biggs A, Raine SR. 2018. Quantifying the aggregation-dispersion boundary condition in terms of saturated hydraulic conductivity reduction and the threshold electrolyte concentration. *Agricultural Water Management*. 203: 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.005>.
- Eimanifar A, Mohebbi F. 2007. Urmia Lake (northwest Iran): A brief review. *Saline Systems*. 3(1): 5. <https://doi.org/10.1186/1746-1448-3-5>.
- Fan J, Jiang X, He G. 2025. Soil Aggregates and Organic Carbon Transformation in Response to Microplastics Pollution. *Water, Air and Soil Pollution*. 236(8): 523. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08202-9>.
- Han Y, Zhao W, Ding J, Ferreira CS. 2023. Soil erodibility for water and wind erosion and its relationship to vegetation and soil properties in China's drylands. *Science of the Total Environment*. 903: 166639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166639>.
- Hassanzadeh E, Zarghami M, Hassanzadeh Y. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*. 26(1): 129-145. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9909-8>.
- Keesstra S, Mol G, De Leeuw J, Okx J, De Cleen M, Visser S. 2018. Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*. 7(4): 133. <https://doi.org/10.3390/land7040133>.
- Kheirfam H. 2022. Spatial prioritization of wind-erosion-prone areas in the dried-up beds of Lake Urmia; using field sampling and in-vitro measurement. *Catena*. 217: 106507. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106507>.
- Kheirfam H, Asadzadeh F. 2020. Stabilizing sand from dried-up lakebeds against wind erosion by accelerating biological soil crust development. *European Journal of Soil Biology*. 98: 103189. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103189>.
- Kheirfam H, Roohi M. 2020. Accelerating the formation of biological soil crusts in the newly dried-up lakebeds using the inoculation-based technique. *Science of the Total Environment*. 706: 136036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136036>.
- Kjeldahl C. 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschrift für Analytische Chemie*. 22: 366.
- Mager DM, Thomas AD. 2011. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes. *Journal of Arid Environments*. 75(2): 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001>.
- Nan L, Dong Z, Xiao W, Li C, Xiao N, Song S, Xiao F, Du L. 2018. A field investigation of wind erosion in the farming-pastoral ecotone of northern China using a portable wind tunnel: a case study in Yanchi County. *Journal of Arid Land*. 10(1): 27-38. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0073-8>.
- Nawaz T, Fahad S, Gu L, Saud S, Zhou R. 2024. Cyanobacteria: Role in sustainable biomanufacturing and nitrogen fixation. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. (6): 2132-2155. <https://doi.org/10.1002/bbb.2674>.
- Oishy MN, Shemonty NA, Fatema SI, Mahbub S, Mim EL, Raisa MB, Anik AH. 2025. Unravelling the effects of climate change on the soil-plant-atmosphere interactions: A critical review. *Soil and Environmental Health*. 13: 100130. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100130>.
- Roncero-Ramos B, Román JR, Gómez-Serrano C, Cantón Y, Ación FG. 2019. Production of a biocrust-cyanobacteria strain (*Nostoc commune*) for large-scale restoration of dryland soils. *Journal of Applied Phycology*. 31(4): 2217-2230. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-1749-6>.
- Sadeghi SHR, Kheirfam H, Zarei Darki B. 2020. Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. *Journal of Hydrology*. 585: 124814. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124814>.
- Schweizer SA, Bucka FB, Graf-Rosenfellner M, Kögel-Knabner I. 2019. Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content. *Geoderma*. 355: 113901. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113901>.
- Sommer CG, Lehning M, Fierz C. 2018. Wind tunnel experiments: influence of erosion and deposition on wind-packing of new snow.

Frontiers in Earth Science. 6: 4. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00004>.

Taylor MD, Kim ND, Hill RB, Chapman R. 2010. A review of soil quality indicators and five key issues after 12 yr soil quality monitoring in the Waikato region. *Soil Use and Management*. 26(3): 212-224. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00276.x>.

Visser S, Keesstra S, Maas G, De Cleen M, Molenaar C. 2019. Soil as a basis to create enabling conditions for transitions towards sustainable land management as a key to achieve the SDGs by 2030. *Sustainability*, 11(23): 6792. <https://doi.org/10.3390/su11236792>.

Vos P, Garrity G, Jones D, Krieg NR, Ludwig W, Rainey FA, Schleifer KH, Whitman WB, editors. 2011. *Bergey's manual of systematic bacteriology: Volume 3: The*

Firmicutes. Springer Science and Business Media. 1450 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68489-5>.

Walkley A, Black IA. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1): 29-38.

Wang W, Liu Y, Li D, Hu C, Rao B. 2009. Feasibility of cyanobacterial inoculation for biological soil crusts formation in desert area. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(5): 926-929. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.001>.

Zhao F, Meng Z, Liu Y, Li P, Tang G. 2025. Soil carbon and nitrogen changes due to soil particles redistribution caused by photovoltaic array. *Frontiers in Environmental Science*. 13: 1552447. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1552447>.



Assessment of the Effects of Inoculating Different Concentrations of Cyanobacteria on Organic Matter and Nitrogen Content in the Dried Seasonal Wetlands Beds of seasonal wetlands

Saemeh Sadeghi Gajouti¹, Hossein Kheirfam^{2*}, Saeed Najafi³

1- M.Sc., Graduate, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Healthy ecosystems are vital for sustainable development, serving as the foundation for food security and biodiversity while providing essential resources and services for survival and well-being. Weaknesses in implementing sustainable development plans lead to increased exploitation of resources and instability of ecosystems, particularly in water and soil management. Furthermore, unsustainable practices have led to the formation of new and fragile landscapes. Permanent or seasonal dryness of wetlands, due to unsustainable water consumption, is one of the negative consequences of improper exploitation of water resources, turning their beds into sources of dust. Despite extensive efforts to stabilize and enhance the sustainability of beds, the durability and effectiveness of conventional solutions for controlling wind erosion in these beds have faced challenges due to the periodic flooding of wetlands. Recently, the approach of inoculating cyanobacteria aimed at stabilizing erosion-sensitive beds has gained attention; however, its effectiveness under dry-flooding conditions of wetlands has not been examined. Furthermore, direct measurement of wind erosion resulting from bed stabilization efforts, as well as the use of indicators determining soil erosion sensitivity, such as organic matter content and total nitrogen from the components of soil biological richness, is also common. Therefore, this study was conducted to evaluate the effects of inoculating different concentrations of native cyanobacteria on the organic matter content and nitrogen in the soil under conditions of complete dryness and dry-flooding.

Materials and Methods

For this research, the international Kobi Baba Ali Wetland, in West Azerbaijan Province in northwestern Iran was selected. This 500-hectare wetland is known as the Ramsar Convention.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** h.kheirfam@urmia.ac.ir

Citation: Sadeghi Gajouti, S., Kheirfam, H., Najafi, S. 2026. Assessment of the Effects of Inoculating Different Concentrations of Cyanobacteria on Organic Matter and Nitrogen Content in the Dried Seasonal Wetlands Beds of seasonal wetlands. *Watershed Management Research*. 39(1): 26-44.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.370375.1629

Received: 12 August 2025, **Received in revised form:** 30 August 2025, **Accepted:** 22 September 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 26-44.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



The mentioned wetland is subject to seasonal cycles of dryness and flooding due to decreased rainfall and unsustainable water use upstream. Volume soil samples from the dried bed of the wetland were collected and transferred for preparation into small erosion trays. Simultaneously, native cyanobacteria for soil conservation of the dried-up wetland bed were extracted, identified, purified, and propagated.

From the obtained Cyanobacterial (*Nostoc sp.* and *Oscillatoria sp.*) four concentrations of 0, 1.5, 3, and 6 g m⁻² were prepared. Then, the prepared cyanobacteria were water-inoculated on prepared trays based on the defined treatments in four replicates. The penetration depth of the inoculation solution was at least one cm. Then, the treated trays were placed under two conditions: completely dry (representing a permanently dried wetland) for 134 days, and dry-dewatering (representing a seasonal wetland experiencing cycles of dryness in the warm seasons and flooding during the rainy seasons) with a total of 60 days of dryness, 60 days of flooding, and 14 days of dryness (a total of 134 days). A total of 32 experiments were conducted (16 experiments under complete dryness conditions and 16 experiments under dry-flooding conditions). The study was conducted in the form of a completely randomized experimental design from July to November 2022. After the completion of the experiments, the measurements of organic matter and total nitrogen in the soil were determined using the Walkley-Black and Kjeldahl methods, respectively. Finally, statistical analysis of the results was conducted using one-way and two-way analysis of variance and independent t-tests.

Results and Discussion

The findings showed that the effects of cyanobacteria inoculation treatments (concentrations of 0, 1.5, 3, and 6 g m⁻²) on nitrogen content at depths of 0 to 1 cm were significant (at the 1% probability level) under both complete dryness and dry-flooding conditions. The effects of the inoculation treatments on nitrogen content under dry-flooding conditions at depths of 0 to 5 cm were also significant (at the 1% probability level). The effect of inoculation treatments on soil organic matter content was significant (at the 5% probability level) at both depths of 0 to 1 and 0 to 5 cm and under both complete drought and drought-waterlogging conditions. Nitrogen content increased by 26% and 39% under complete dryness conditions with the inoculation of medium (3 g m⁻²) and high (6 g m⁻²) concentrations of cyanobacteria, and by 28% and 44% under dry-flooding conditions, respectively. Organic matter also increased by 65% and 72% under complete dryness conditions with the inoculation of 3 and 6 g m⁻², and by 49%, 54%, and 63% with the inoculation of 1.5, 3, and 6 g m⁻² under dry-flooding conditions, respectively. The interaction effects of moisture conditions (dry vs. dry-dewatering) and cyanobacterial inoculation on soil nitrogen and organic matter content were not insignificant (at the 5% probability level). The performance of inoculating low concentrations of cyanobacteria (1.5 g m⁻²) in improving the examined components was not acceptable.

Conclusion and Suggestions

The results of this study indicated that the effects of the annual natural flooding of the wetland on improving soil organic matter and nitrogen content, and in other words, on the expansion of the soil biological crust in dry beds, were not positive. Therefore, the implementation of other measures, such as the inoculation of cyanobacteria, is essential for improving organic matter and nitrogen as components of soil sustainability. The findings showed that when cyanobacteria were inoculated into the soil under dry-flooding conditions, they both survived and grew, similar to complete dryness conditions, increasing the measurements of organic matter and nitrogen. While the inoculation of cyanobacteria is effective in improving soil sustainability components against erosive factors, there are also concerns about their negative effects on wetlands as an invasive species, especially on a large scale, which requires further investigation. The inoculation of cyanobacterial, especially at a concentration of at least of 3 g m⁻² is a rapid and environmentally friendly method for stabilizing the substrates of dried wetlands, particularly for wetlands with alternating flooding and dryness conditions. It is recommended that complementary studies be conducted on a desert scale with conditions of alternating dryness and natural dry-flooding, along with field measurements of wind erosion.

Keywords: Arid and semi-arid ecosystems, soil and water resource management, soil inoculation, soil properties, soil stability

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This research was conducted as part of a master's thesis. The authors of this article would like to thank and express their gratitude for all the financial and non-financial support from Urmia University.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that there are no conflicts of interest regarding the writing and publication of the content and results of this research.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution

Author 1: Sampling, laboratory measurements, software/statistical analyses, writing - original draft of the article

Author 2: Conceptualization, supervising, sampling, laboratory measurements, software/statistical analyses, manuscript editing, and checking the results

Author 3: Supervising, software/statistical analyses, manuscript editing, and checking the results



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

پژوهش‌های آب‌بخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

برآورد احتمال رخداد آلودگی نیترات آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم تقویت شیب شدید

مه‌دی هاشمی*^۱، علی دسترنج^۲

- ۱- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آب‌بخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
- ۲- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آب‌بخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک منبع حیاتی آب شیرین، نقش اساسی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان دارند. با این حال، تشدید فعالیت‌های انسانی و صنعتی، منجر به افزایش آلودگی این منابع ارزشمند شده است. در این راستا، آلودگی ناشی از نیترات، به‌دلیل حلالیت و تحرک زیاد در آب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای سلامت انسان و بوم‌سازگان‌های آبی شناخته‌شده است. مصرف آب آلوده به نیترات می‌تواند منجر به بروز بیماری‌های گوناگونی از جمله متهموگلوبینمی (سندرم نوزاد آبی) در نوزادان و حتی برخی از سرطان‌ها در بزرگسالان شود. افزون بر این، ورود نیترات به آب‌های سطحی می‌تواند به پدیده اوتروفیکاسیون و ازبین‌رفتن زیست‌بوم‌های آبی منجر شود. با توجه به اهمیت موضوع و ضرورت حفاظت از منابع آب زیرزمینی، این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب یکپارچه و جامع برای برآورد احتمال رخداد آلودگی آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه با تمرکز بر آلاینده نیترات، در منطقه دشت لنجان در استان اصفهان ایران انجام شد. با استفاده از این چارچوب و بهره‌گیری از رویکردهای نوین مدل‌سازی و تحلیل فضایی، مناطق مستعد به آلودگی شناسایی شد که به ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر برای کاهش خطرات ناشی از آلودگی آب‌های زیرزمینی کمک خواهد کرد. از نتایج این پژوهش می‌توان به‌عنوان الگویی برای برنامه‌ریزی‌های آتی در زمینه مدیریت پایدار منابع آب و حفاظت از سلامت جامعه استفاده کرد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: m_hashemi@areeo.ac.ir

استناد: هاشمی، م.، دسترنج، ع. ۱۴۰۵. برآورد احتمال رخداد آلودگی نیترات آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم تقویت شیب شدید. پژوهش‌های آب‌بخیزداری. ۳۹(۱): ۶۳-۴۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370560.1631

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آب‌بخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۴۵ تا ۶۳

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

در این پژوهش، داده‌های مربوط به غلظت نیترات منابع آب زیرزمینی به‌طور دقیق بررسی شد. از این‌رو، اطلاعات حیاتی از ۱۰۲ حلقه چاه در دشت لنجان استان اصفهان جمع‌آوری شد. هر یک از این چاه‌ها نماینده‌ای از وضعیت نیترات در سفره‌های آب زیرزمینی منطقه مطالعه‌شده بود. برای تحلیل این حجم از داده‌ها و استخراج الگوهای پنهان در آن‌ها، از مدل تقویت شیب شدید استفاده شد. این مدل به‌دلیل توانایی زیاد در شناسایی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها و نیز عملکرد و دقت قابل قبول در پیش‌بینی، انتخاب شد. افزون بر داده‌های غلظت نیترات، ده عامل مهم محیطی و انسانی که به‌طور بالقوه بر آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی اثرگذار بودند، شناسایی و در مدل تحلیلی استفاده شدند. این عوامل شامل شیب زمین، بلندی، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، رده خاک، فاصله از آبراهه، نوع سنگ‌شناسی منطقه و کاربری زمین بودند. با گنجاندن این هشت عامل در مدل تقویت شیب شدید، امکان شناسایی مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر آلودگی نیترات و همچنین برآورد مکانی اندازه احتمال آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی فراهم شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش به‌خوبی بیانگر اثربخشی و کارایی تقویت شیب شدید در برآورد آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی بود. دقت کلی این مدل ۰/۸۶ به‌دست آمد که با بهره‌گیری از آن وضعیت آلودگی منطقه مطالعه‌شده به‌خوبی تفکیک شد. افزون بر این، دیگر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل نیز بیانگر دقت زیاد آن در شناسایی صحیح مناطق آلوده و غیرآلوده بود؛ به‌طوری که اندازه سطح زیر منحنی ROC برابر با ۰/۸۵ بود. همچنین، اندازه بازیابی مدل ۰/۸۰ به‌دست آمد که بیانگر آن بود ۸۰٪ از کل مناطق آلوده واقعی با استفاده از این مدل به‌درستی شناسایی شده است. سرانجام، آماره F1-score که یک معیار ترکیبی از دقت و بازیابی بود، ۰/۸۳ به‌دست آمد که بیانگر تعادل خوب میان این دو معیار و عملکرد کلی قابل اعتماد مدل بود. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که اثر برخی از متغیرهای ورودی بر روند برآورد مکانی آلودگی نیترات آب زیرزمینی، زیاد بود. در میان ده عامل محیطی و انسانی بررسی‌شده، متغیرهای بارش (۲۱٪) و تغییرات بلندی (۱۸٪) به‌عنوان اثرگذارترین و مهم‌ترین متغیرها در تعیین الگوی مکانی آلودگی نیترات شناخته شدند. این یافته‌ها بیانگر اهمیت ویژگی‌های طبیعی و زمین‌ریخت‌شناختی منطقه در مهار انتشار و تجمع نیترات در آب‌های زیرزمینی بود که می‌توان از آنها به‌عنوان الگوی مفیدی برای پژوهش‌های آتی و تدوین راهبردهای مدیریتی بهره برد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش، تولید نقشه‌های خطر بود که در آن به‌خوبی مناطق با خطر زیاد آلودگی نیترات در بخش مرکزی دشت مطالعه‌شده، شناسایی شد. پیشنهاد می‌شود مدیران منابع آب و برنامه‌ریزان شهری و روستایی از این نقشه‌ها به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای انجام اقدامات پیشگیرانه در مناطق حساس، بهره ببرند. شایان ذکر است، نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش خطر آلودگی نیترات با همپوشانی معنادار مناطق پرخطر با کاربری زمین‌های کشاورزی، قاطعانه تأیید شد. بر اساس این یافته پیشنهاد می‌شود برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی و مدیریت پایدار فعالیت‌های کشاورزی از کودهای نیتروژنی به‌شکل بهینه استفاده شود.

واژگان کلیدی

آب زیرزمینی، احتمال رخداد، دشت لنجان، نیترات، XGBoost

مقدمه

از دهه ۱۹۶۰ تاکنون، افزایش چشمگیر مصرف کودهای شیمیایی (یواس دی ای ۲۰۲۳) در رشد تولید جهانی غذا، نقش مهمی داشته است. با این حال، پیامدهای زیست‌محیطی مصرف این کودها نیز قابل توجه است. در این راستا، افزایش نشت نیتروژن به منابع آب زیرزمینی، موجب شده نیترات (NO_3) به یکی از آلاینده‌های مهم سفره‌های آب زیرزمینی تبدیل شود. مهم‌ترین نگرانی بهداشتی برای نیترات، بیماری متهموگلوبینمی (نوزاد آبی) است (ورد و همکاران ۲۰۱۸)، که در نوزادان با غلظت‌های بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر بروز می‌کند و در غلظت‌های بسیار زیاد نیز بر بزرگسالان اثرگذار است (سازمان جهانی بهداشت ۲۰۲۲). پژوهش‌های کنونی، مصرف بلندمدت نیترات را با برخی از انواع سرطان مرتبط دانسته‌اند (پیکتی و همکاران ۲۰۲۲؛ ورد و همکاران ۲۰۱۸). افزون بر خطرات مستقیم، نیترات شاخص مهمی برای ارزیابی کیفیت کلی آب است. زیرا، وجود آن می‌تواند نشان‌دهنده وجود دیگر آلاینده‌های کشاورزی مانند آفت‌کش‌ها نیز باشد. به این دلیل، نیترات یکی از سه شاخص مهم در کنار شوری و pH برای سنجش کیفیت آب زیرزمینی در اهداف توسعه پایدار سازمان ملل به‌شمار می‌آید (یوان ای پی ۲۰۲۳). با توجه به گستردگی آلودگی نیترات و خطرات مرتبط با آن، اهمیت شناسایی مناطقی که غلظت نیترات در آنها زیاد است در مدیریت و کاهش این مخاطرات زیاد است. شبکه‌های پایش حتی با تراکم نسبی، معمولاً شامل چاه‌ها و ایستگاه‌هایی هستند که فاصله زیادی از یکدیگر دارند. از این رو، شناخت توزیع مکانی نیترات در آب زیرزمینی با کمبود داده و خلأ مواجه است (کواتی و همکاران ۲۰۲۵). در دهه‌های پیشین، روش‌های مختلفی از جمله مدل‌های مکانیکی با نیاز داده‌ای گسترده برای پر کردن این خلأها به کار گرفته شده‌اند (الماسری و کالوارچی ۲۰۰۷؛ کرید و بند ۱۹۹۸؛ آلر ۱۹۸۷) و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری با وزن‌دهی عامل‌های

اثرگذار نیز با هدف برآورد احتمال آلودگی و تعیین مناطق حساس، استفاده شده‌اند (آلر و همکاران ۱۹۸۷؛ آراوزو ۲۰۱۷). در سال‌های گذشته، به روش‌های مختلف یادگیری ماشین به دلیل قابلیت کاربرد در مقیاس‌های گسترده و توانایی در تحلیل روابط پیچیده مرتبط با سنج‌های کیفیت آب زیرزمینی، توجه فزاینده‌ای شده است. این روش‌ها به‌ویژه در پیش‌بینی غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی کاربرد مؤثری دارند. در این راستا، می‌توان به نتایج بررسی مدل وایازی لجستیک برای ۱۷ سفره آب اصلی ایالات متحده (گوردک و چی ۲۰۱۲)، سه مدل یادگیری ماشین درختان وایازی تقویت‌شده، تجزیه تفکیک‌کننده چند متغیره و ماشین بردار پشتیبان در دشت لنجانان استان اصفهان (ساجدی‌حسینی و همکاران ۲۰۱۸)، مدل‌های K-نزدیکترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی در دشت اندیمشک-دزفول استان خوزستان (رحمتی و همکاران ۲۰۱۹)، مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی و ماشین تقویت‌شده با شیب در ایالت کارولینای شمالی (مسیه و همکاران ۲۰۱۹)، مدل جنگل تصادفی در آلمان (نول و همکاران ۲۰۲۰)، الگوریتم تقویت شیب شدید در سراسر ایالات متحده (رنسوم و همکاران ۲۰۲۲)، مدل‌های جنگل تصادفی، درخت وایازی تقویت‌شده و وایازی لجستیک در هند (سرکر و همکاران ۲۰۲۲)، مدل‌های شبکه عصبی عمیق، تقویت شیب شدید و وایازی خطی چندگانه در شمال ایران (غلامی و بویج ۲۰۲۲)، مدل‌های جنگل تصادفی معمولی و وزن‌دار، مدل جمعی تعمیم‌یافته با استفاده از LOESS و K-نزدیکترین همسایه در دشت لنجانان اصفهان (حسینی و همکاران ۲۰۲۳) اشاره کرد که همگی این پژوهش‌ها بیانگر قابلیت زیاد یادگیری ماشین در مدل‌سازی و تحلیل داده‌های پیچیده محیطی

نیتترات ارائه داد و موجب ارتقای درک این پدیده در مقیاس آبخوان شد. این دانش قابلیت تعمیم و کاربرد در مناطق فراتر از محدوده مطالعه‌شده را نیز دارد.

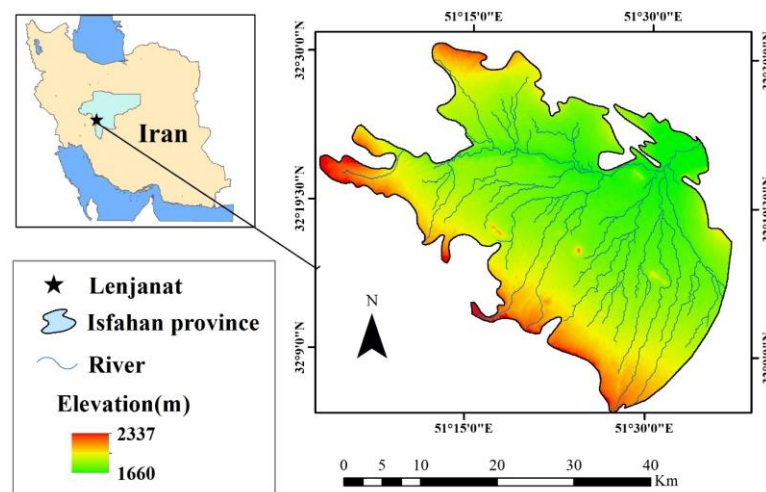
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

دشت لنجان در استان اصفهان، در مرکز ایران است که با مساحت تقریبی ۱۱۸۰ کیلومتر مربع، به‌عنوان منطقه پژوهشی انتخاب شد (شکل ۱). این دشت به‌وسیله کوه‌های آهکی احاطه‌شده و بلندی آن میان ۱۶۶۰ تا ۲۳۳۷ متر از سطح دریا متغیر است. بلندی‌های بخش‌های غربی و شمالی این دشت بیشتر است. اقلیم دشت لنجان خشک و سرد است و میانگین سالانه بارندگی در دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۴ حدود ۱۶۰ میلی‌متر و بیشتر در فصل زمستان بوده است. بیشترین اندازه بارش در بلندی‌های غرب و شمال دشت متمرکز است و از غرب به شرق کاهش می‌یابد، در حالی که دمای هوا در همین جهت افزایش می‌یابد. میانگین ماهانه دما در گرم‌ترین ماه (مرداد) ۲۷ درجه سانتی‌گراد و در سردترین ماه (دی) ۴ درجه سانتی‌گراد ثبت‌شده است (ناصری و همکاران ۲۰۱۲؛ رحیمی و همکاران ۲۰۲۴).

در زمینه آلودگی نیتترات است. از این‌رو، بهره‌گیری از توانایی زیاد این مدل‌ها در مناطقی که ناشناخته است و یا احتمال آلودگی دارد حائز اهمیت است.

در پژوهش‌های پرشماری کاربرد الگوریتم تقویت شیب شدید برای بررسی آلودگی نیتترات در آب زیرزمینی بررسی‌شده است (رنسوم و همکاران ۲۰۲۲، غلامی و بویج ۲۰۲۲، لیانگ و همکاران ۲۰۲۴، آلام و همکاران ۲۰۲۵). نتایج این پژوهش‌ها نیز بیانگر کاربرد موفقیت آمیز این مدل در تحلیل و پیش‌بینی غلظت نیتترات است. در این راستا، در این پژوهش نیز از الگوریتم تقویت شیب شدید که یکی از روش‌های پیشرفته در یادگیری ماشین به‌شمار می‌آید، برای تولید نقشه‌های حساسیت نیتترات بهره گرفته شد از بیشترین ظرفیت شبکه‌های پایش موجود استفاده شود. از این نقشه‌ها می‌توان در شناسایی مناطق نیازمند اقدامات پیشگیرانه نشت نیتترات، بهره برد. افزون بر این، با تحلیل مدل، روابط میان غلظت نیتترات و عامل‌های زمین‌شناسی، پستی‌بلندی، خاک، اقلیم و کاربری زمین بررسی شد تا عامل‌های مؤثر در آلودگی شناسایی شوند. برخلاف نتایج پژوهش‌های پیشین که صرفاً به پیش‌بینی اشاره داشته‌اند، این رویکرد، با بهره‌گیری از پیشرفت‌های کنونی در تفسیر مدل‌های یادگیری ماشین، دیدگاهی عمیق‌تر نسبت به فرآیندهای مؤثر در آلودگی



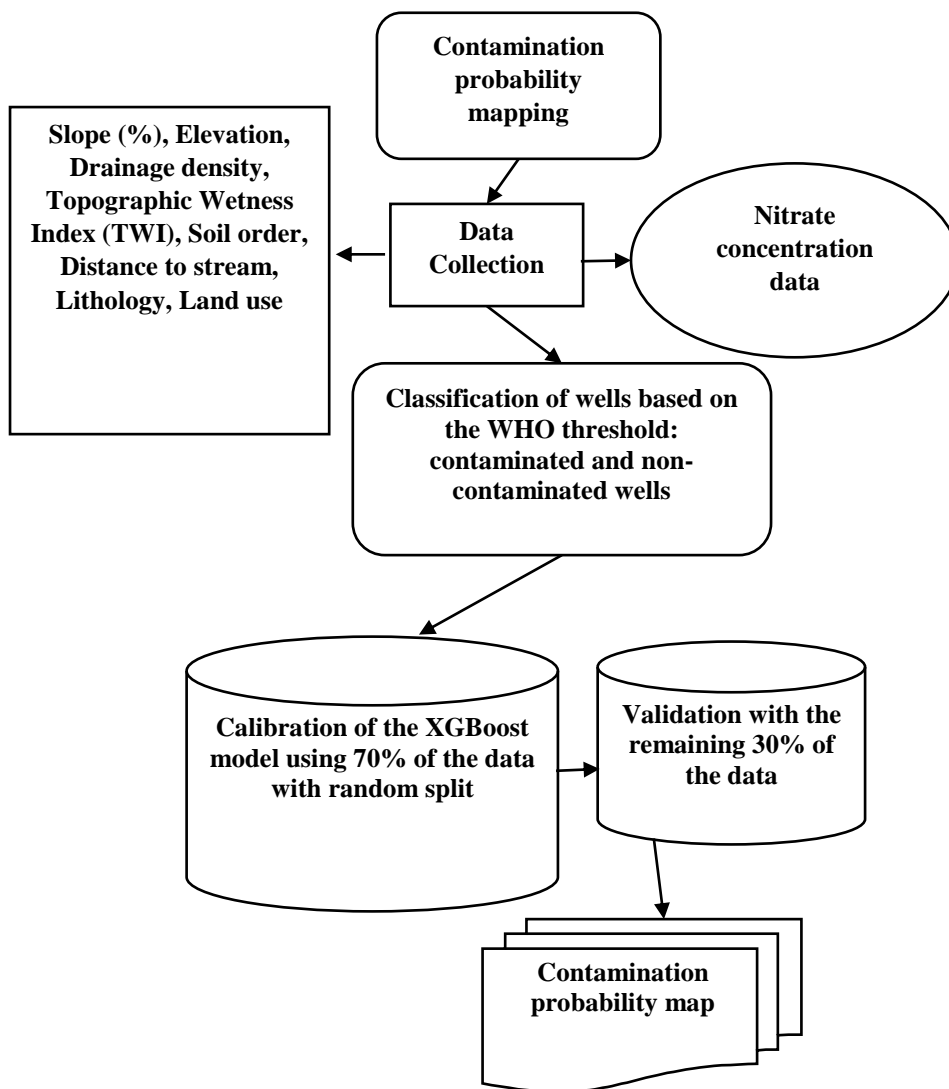
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده.

Figure 1- Geographical location of the study area.

رویکرد پژوهش

شد و ۷۰٪ داده‌ها به‌شکل تصادفی برای آموزش مدل و ۳۰٪ باقی‌مانده برای اعتبارسنجی آن به‌کار گرفته شد. خروجی مدل به‌شکل نقشه احتمال آلودگی ارائه شد که از آن می‌توان در شناسایی مناطق نیازمند اقدامات پیشگیرانه بهره برد. همچنین، با تحلیل مدل، روابط میان متغیرهای وابسته و مستقل بررسی شد تا عوامل مؤثر در آلودگی شناسایی شوند و درک عمیق‌تری از فرآیندهای مؤثر در مقیاس آبخوان فراهم آید.

شرح گام به گام روش ارزیابی احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی در دشت لنجان در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. ابتدا داده‌های اثرگذار بر آلودگی نیترات (شامل عامل‌های زمین‌شناسی، پستی‌بلندی، خاک، اقلیم و کاربری زمین) به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، گردآوری شدند. سپس، داده‌های نیترات چاه‌های نمونه‌برداری شده به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی، از الگوریتم تقویت شیب شدید (XGBoost) استفاده



شکل ۲- روند گام به گام پژوهش.

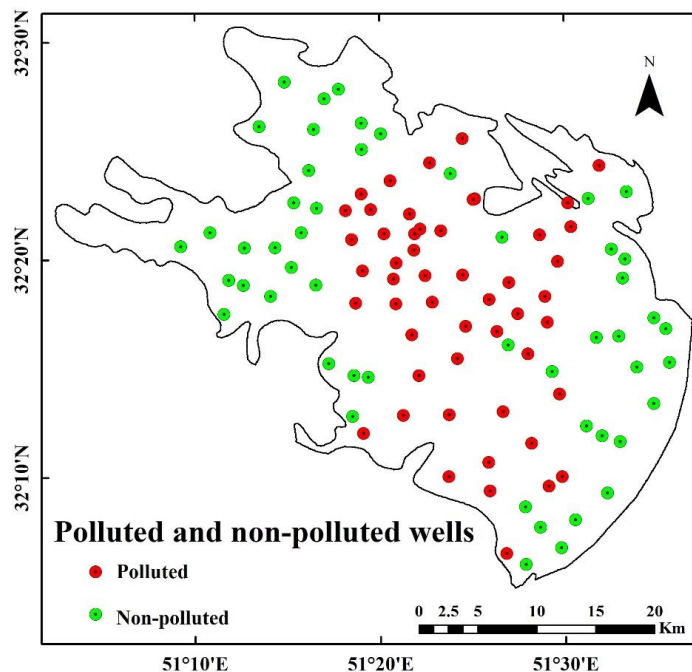
Figure 2- Step-by-step process of the study.

داده‌های استفاده‌شده

نقشه پراکنش آلودگی نیترات آب زیرزمینی

در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی و ارزیابی خطر نیترات در آب‌های زیرزمینی، داده‌های مربوط به غلظت نیترات از ۱۰۲ حلقه چاه با پراکنش مکانی مناسب در دشت لنجان، از شرکت مدیریت منابع آب ایران گردآوری شد. این داده‌ها مربوط به دوره فروردین ۱۳۹۶ بودند. پس از گردآوری داده‌های غلظت نیترات، بر اساس دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO ۲۰۱۱)، آستانه‌ای معادل ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان حد مرزی برای تفکیک چاه‌های آلوده و غیرآلوده در نظر گرفته شد. بر این اساس، چاه‌هایی با غلظت نیترات بیش

از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان چاه‌های آلوده و چاه‌هایی با غلظت کمتر از این اندازه به عنوان چاه‌های غیرآلوده طبقه‌بندی شدند. سپس، چاه‌های آلوده با کد ۱ و چاه‌های غیرآلوده با کد ۰ مشخص شدند. این طبقه‌بندی به عنوان متغیر هدف در مدل‌سازی باینری استفاده شد، به طوری که مدل با تفکیک دو طبقه آلوده و غیرآلوده آموزش داده شد تا احتمال آلودگی نیترات در دیگر نقاط نیز پیش‌بینی شود. نقشه پراکنش چاه‌های آلوده و غیرآلوده از دیدگاه نیترات در دشت لنجان در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نقشه پراکنش چاه‌های آلوده و غیرآلوده از دیدگاه نیترات در دشت لنجان.

Figure 3- Distribution map of polluted and non-polluted wells in terms of nitrate in the Lanjanat Plain.

ویژگی‌های اثرگذار بر آلودگی آب زیرزمینی

نقش عامل‌های محیطی و انسانی در اندازه آلودگی آب‌های زیرزمینی مهم است. برای ایجاد نقشه احتمال رخداد آلودگی آب‌های زیرزمینی، در مجموع ده عامل موثر بر آلودگی آب زیرزمینی که در شکل ۴ نشان داده شده است، استفاده شد. این

عامل‌ها شامل درصد شیب، بلندی، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، بارش، رده خاک، فاصله از آبراهه، سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری زمین است (گاد و همکاران ۲۰۲۴؛ ساجدی حسینی و همکاران ۲۰۱۸). نقش عامل بلندی (شکل a) و شیب زمین (شکل b)

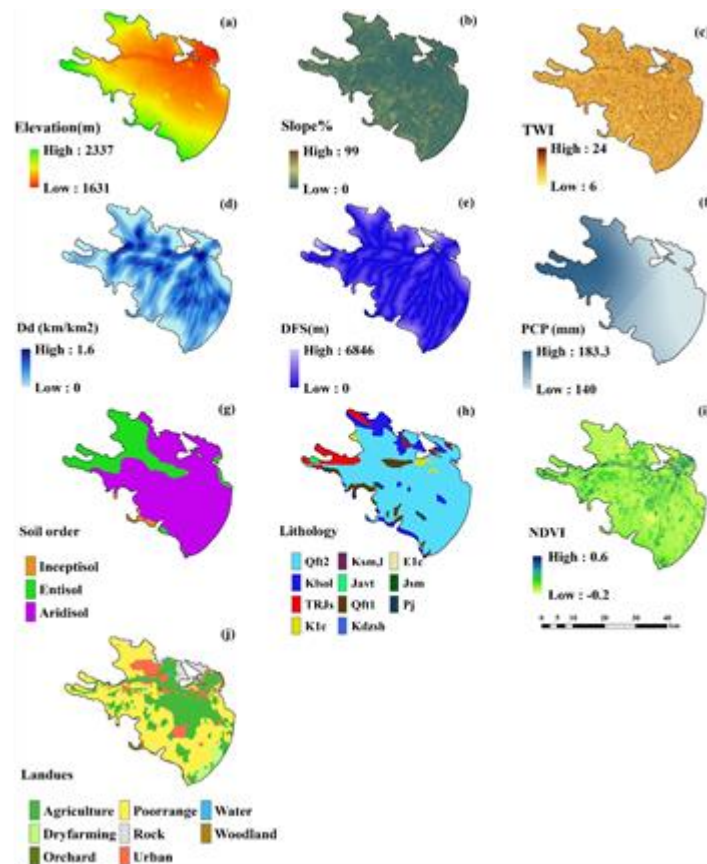
بارش (شکل f4) با افزایش نفوذ آب و شست‌وشوی نیترات، خطر آلودگی آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد (ونگ و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، از آمار بلندمدت ۳۰ ساله (۹۹-۱۳۷۰) ایستگاه‌های باران‌سنجی شرکت مدیریت منابع آب ایران و ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور استفاده شد و میانگین بارش با استفاده از روش درون‌یابی معکوس وزنی فاصله‌ای محاسبه شد. رده‌های خاک (شکل g4) بسته به بافت و نفوذپذیری بر کیفیت آب زیرزمینی به‌طور قابل توجهی اثرگذارند.

رده‌های خاک منطقه مطالعه‌شده از موسسه تحقیقات خاک و آب دریافت شد. این رده‌ها شامل اینسپتیسول، انتیسول و اریدیسول بود. خاک‌های سبک و شنی با نفوذپذیری زیاد مانند انتیسول و اینسپتیسول، آلودگی بیشتری را انتقال می‌دهند، در حالی که خاک‌های سنگین و رسی با خاصیت نفوذپذیری کمتر، مانع مناسبی برای گسترش آلاینده‌ها هستند. از سوی دیگر، شرایط سنگ‌شناسی (شکل h4) منطقه نیز مهم بود. جنس سنگ‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی نقش مهمی در مهار فرسایش‌پذیری و انتقال آلودگی به سفره‌های آب زیرزمینی دارند (شوکل و همکاران ۲۰۲۰). در این پژوهش، از نقشه سازمان زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. بیشتر مساحت دشت به‌وسیلهٔ مخروط‌افکنه‌های دامنه‌ای با بلندی کم و رسوبات تراس‌های دره‌ای پوشیده‌شده است. تمام متغیرهای ورودی به‌شکل نقشه‌های رستری و با اندازه پیکسل ۳۰ در ۳۰ متر در محیط ArcGIS 10.5 آماده شد.

که از عامل‌های محیطی و طبیعی هستند در اندازه آلودگی آب‌های زیرزمینی مهم است. به‌طوری که در مناطق بلند و با شیب تند، رواناب سطحی سریع‌تر تخلیه شده و فرصت نفوذ آلاینده‌ها به آبخوان کاهش می‌یابد، در حالی که در زمین‌هایی با بلندی کم و شیب ملایم، اندازه نفوذ بیشتر و احتمال آلودگی سفره‌های زیرزمینی افزایش می‌یابد.

شاخص رطوبت پستی‌بلندی (شکل c4) نیز نشان‌دهنده اندازهٔ تجمع رطوبت در سطح زمین است، به‌طوری که اندازه‌های زیاد بیانگر شرایط مساعد برای نفوذ و افزایش احتمال آلودگی است (حسینی و همکاران ۲۰۲۳). این شاخص با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی با اندازه پیکسل در محیط SAGA GIS محاسبه شد. تراکم زهکشی و فاصله از رود (شکل d4، e4) به‌ترتیب با استفاده از ابزارهای فاصله اقلیدسی و تراکم خط در ArcGIS محاسبه شدند. تراکم زیاد شبکه زهکشی باعث انتقال سریع رواناب و کاهش فرصت نفوذ می‌شود، در حالی که تراکم کم منجر به باقی‌ماندن طولانی‌تر آب در سطح و افزایش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود (ساجدی حسینی و همکاران ۲۰۱۸).

فاصله از آبراهه نیز یکی از عامل‌های مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی است. زمین‌های مجاور با آبراهه‌ها به‌دلیل شست‌وشوی سریع آلاینده‌ها و انتقال مستقیم آن‌ها به داخل آبخوان، ظرفیت آلودگی بیشتری دارند. از سوی دیگر، با افزایش فاصله از آبراهه، زمان کافی برای جذب، تجزیه و کاهش غلظت آلاینده‌ها در خاک فراهم می‌شود و به این دلیل شدت آلودگی آب زیرزمینی در این مناطق کمتر است (حسینی و همکاران ۲۰۲۳).



شکل ۴- عوامل مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی در دشت لنجان: (الف) بلندی، (ب) شیب، (ج) شاخص رطوبت پستی‌بلندی، (د) تراکم زهکش، (ه) فاصله از آبراهه، (و) بارش، (ز) رده خاک، (ح) سنگ‌شناسی، (ط) شاخص پوشش گیاهی بهنجار شده، (ی) کاربری زمین.

Figure 4- Factors affecting groundwater pollution in the Lenjanat Plain: (a) Elevation, (b) Slope, (c) Topographic Wetness Index (TWI), (d) Drainage density (Dd), (e) Distance from streams (DFS), (f) Precipitation (PCP), (g) Soil order, (h) Lithology, (i) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), (j) Land use.

مدیریت منابع آب ایران دریافت شد. این نقشه شامل کاربری کشاورزی، مرتع، شهری، صخره‌ای، دیم‌کاری، باغ، بیشه و تالاب بود که زمین‌های کشاورزی به دلیل مصرف کود و سموم شیمیایی، منابع اصلی نیترات و فسفات هستند. از سوی دیگر، مناطق صنعتی آلاینده‌های شیمیایی و فلزات سنگین تولید می‌کنند و مناطق شهری نیز به دلیل فاضلاب‌های انسانی می‌توانند موجب آلودگی میکروبی و شیمیایی شوند، در حالی که

پوشش گیاهی با جذب نیتروژن از خاک، نقش مؤثری در کاهش نشت نیترات دارد (اولا و همکاران ۲۰۱۴). در این پژوهش، شاخص پوشش گیاهی بهنجار شده (شکل ۱۴) برای ماه ژوئن سال ۲۰۱۷ (منطبق با سال داده‌های نیترات) با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و تصویرهای دریافتی از سنسور ۲، محاسبه شد. نوع کاربری زمین (شکل ۱۴) بر آلودگی تأثیر مستقیمی دارد. نقشه کاربری زمین منطقه مطالعه‌شده از شرکت

4 Normalized Difference Vegetation Index

۲۰۲۴). تابع زیان XGBoost معمولاً به شکل مجموع اختلاف میان پیش‌بینی‌های مدل و اندازه‌های واقعی است و با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$(y_i - \hat{y}_i) = (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$$\Omega(f) = Y \times T + \frac{1}{2} \lambda \times \sum_{j=1}^T w_j^2 \quad (2)$$

T: تعداد گره‌ها، (\hat{y}_i) : اندازه‌های پیش‌بینی شده، (y_i) : اندازه‌های واقعی، (w_i) : وزن هر گره است.

وزن هر گره همراه با سنج‌های منظم‌سازی (λ, γ) تعیین‌کننده پیچیدگی درخت و اندازه جریمه برای وزن برگ‌ها است. این الگوریتم درخت را به شکل مرحله‌ای و تدریجی می‌سازد. در هر مرحله، بهترین ویژگی‌ها و نقاط تقسیم انتخاب می‌شوند تا تابع زیان در همان مرحله به حداقل برسد. برای پیدا کردن بهترین تقسیم، الگوریتم تمام نقاط ممکن را بررسی می‌کند (لوو و همکاران ۲۰۲۴). در هر مرحله از آموزش، از نزول شیب برای به‌روزرسانی سنج‌های مدل و کاهش تابع زیان بهره‌گرفته می‌شود. به‌طور خاص، بسط دوم تیلور برای تقریب تابع زیان و محاسبه اندازه‌های به‌روزرسانی سنج‌ها به‌کار می‌رود. افزون بر این، XGBoost از چند راهبرد بهینه‌سازی مانند نمونه‌گیری از ستون‌ها و ردیف‌ها و ارزیابی اهمیت ویژگی‌ها استفاده می‌کند تا عملکرد، پایداری و قابلیت تفسیر مدل بهبود یابد (دالیوال و همکاران ۲۰۲۲). این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که XGBoost در مواجهه با داده‌های بزرگ، پراکنده و با ابعاد گسترده، عملکرد مؤثر و قابل اطمینانی ارائه دهد.

مدل‌سازی آلودگی نیترات آب زیرزمینی

در این پژوهش مدل‌سازی از نوع طبقه‌بندی بود. عامل‌های محیطی مؤثر بر آلودگی نیترات به‌عنوان متغیرهای مستقل و وضعیت آلودگی چاه‌ها (آلوده یا غیرآلوده) به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شدند. پیش از مدل‌سازی، به‌منظور اطمینان از نبودن هم‌خطی شدید میان متغیرهای مستقل، شاخص تورم پراکنش (VIF) برای هر یک از متغیرها محاسبه شد.

کاربری‌های طبیعی مانند مراتع و جنگل‌ها کمترین نقش را در آلودگی دارند.

الگوریتم تقویت شیب شدید (XGBoost)

این الگوریتم یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر درخت تصمیم تقویتی (GBDT) است که بر اساس اصول یادگیری تقویتی تجمعی توسعه‌یافته است (چن و همکاران ۲۰۲۳). با ترکیب هم‌زمان تقویت شیب و سازوکارهای منظم‌سازی، امکان ساخت مدل‌های پیش‌بینی دقیق و قابل اعتماد به‌وسیله این الگوریتم فراهم می‌آید. در فرآیند تقویت یا بوستینگ، چندین مدل ضعیف (معمولاً درخت‌های تصمیم کم‌عمق) به شکل مرحله‌ای آموزش داده می‌شوند، به طوری که با هر مدل جدید می‌توان خطاهای پیش‌بینی مدل‌های قبلی را اصلاح کرد (واینس و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش، بخش منظم‌سازی الگوریتم با مهار نرخ یادگیری و تعیین وزن اهمیت ویژگی‌ها پیاده‌سازی شد. این اقدام ضمن جلوگیری از بیش‌برازش، توانایی تعمیم مدل را ارتقا می‌دهد (ژانگ و همکاران ۲۰۲۲) همچنین، این الگوریتم با استفاده از توسعه تیلور مرتبه دوم، امکان تقریب‌زدن و بهینه‌سازی توابع زیان پیچیده و غیرخطی را فراهم می‌آورد، به گونه‌ای که محاسبات، بهینه و کارآمد انجام شوند (ایمانی و همکاران ۲۰۲۵). ساختار الگوریتم بر پایه درخت‌های طبقه‌بندی و وایازی است و این طراحی موجب شده عملکرد XGBoost در حل مسائل طبقه‌بندی و وایازی بسیار مؤثر باشد (دینگ و همکاران ۲۰۲۰). در هر مرحله از آموزش، الگوریتم یک درخت جدید ایجاد می‌کند تا سنج‌های مجموع تابع زیان و منظم‌سازی به حداقل برسد. سنج منظم‌سازی با تنظیم وزن‌های مربوطه، تعادل میان پیچیدگی مدل و توانایی تعمیم‌دهی را حفظ می‌کند، در حالی که دقت کلی مدل همچنان پایدار باقی می‌ماند (لوو و همکاران

1 Extreme Gradient Boosting

2 Gradient Boosting Decision Tree

3 Gradient Boosting

4 Variance Inflation Factor

است، شاخص دقت که بیانگر نسبت نمونه‌های پیش‌بینی شده درست به کل نمونه‌های پیش‌بینی شده مثبت است (رابطه ۳)، شاخص بازخوانی که بیانگر نسبت نمونه‌های واقعی آلوده که درست شناسایی شده‌اند (رابطه ۴) و آماره F1-score که بیانگر میانگین هارمونیک دقت و بازخوانی است (رابطه ۵)، ارزیابی شد. با این شاخص‌ها می‌توان امکان بررسی جامع صحت پیش‌بینی و شناسایی نمونه‌های آلوده را فراهم آورد. محدوده‌های قابل قبول شاخص‌ها، شامل اندازه‌های بیش از ۰/۷ برای AUC، دقت، بازخوانی و آماره F1-score بود که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل است.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4)$$

$$F1-score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

نتایج و بحث

نتایج بررسی هم‌خطی میان متغیرها

در این پژوهش، نتایج بررسی هم‌خطی نشان داد تمام اندازه‌های VIF به‌طور قابل‌توجهی کمتر از آستانه بحرانی ۱۰ بود (موسوی و همکاران ۲۰۲۱). بیشترین اندازه مربوط به متغیر تراکم زهکشی (۲/۶۹) بود و این اندازه همچنان در محدوده قابل قبول بود (جدول ۱). این نتایج مؤید آن بود که میان متغیرهای مستقل هم‌خطی چندگانه وجود ندارد، از این‌رو، می‌توان از تمام متغیرها در مدل پایانی استفاده کرد.

ارزیابی نتایج مدل‌سازی

برای تعیین احتمال رخداد آلودگی آب‌های زیرزمینی، از مدل یادگیری ماشین تقویت شیب شدید استفاده شد. این مدل با تعداد ده متغیر ورودی و داده‌های نیترات و اسنجمی و اعتبارسنجی شد. فرایند واسنجی تا دستیابی به بیشترین اندازه AUC انجام شد.

سپس، الگوریتم XGBoost در محیط نرم‌افزار R و با استفاده از کتابخانه caret اجرا شد (کوهن و همکاران ۲۰۲۰). برای توسعه مدل، از روش تقسیم تصادفی داده‌ها به نسبت ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ برای اعتبارسنجی استفاده شد. سنج‌های مهم مدل شامل سنج nrounds که مشخص‌کننده تعداد تکرارهای الگوریتم بوستینگ است (هر تکرار یک درخت جدید به مدل اضافه می‌کند)، سنج ژرفای بیشینه درخت تصمیم‌گیری (max depth) که مهارکننده پیچیدگی مدل است. ژرفای زیاد می‌تواند الگوهای پیچیده‌تری را یاد بگیرد اما خطر بیش‌برازش را افزایش می‌دهد. سنج نرخ کاهش (eta) ضریبی است که تأثیر هر درخت جدید را کاهش می‌دهد و باعث یادگیری تدریجی‌تر و پایدارتر می‌شود. سنج gamma آستانه‌ای برای تقسیم‌گره‌ها است. اگر کاهش تابع زیان کمتر از این اندازه باشد، تقسیم انجام نمی‌شود. این موضوع پیچیدگی مدل را مهار می‌کند. سنج colsample_bytree درصدی از ویژگی‌ها (ستون‌ها) را مشخص می‌کند که برای ساخت هر درخت انتخاب می‌شوند و این باعث کاهش هم‌وابستگی درخت‌ها و افزایش تعمیم‌پذیری می‌شود. سنج min_child_weight حداقل مجموع وزن نمونه‌ها در یک گره را تعیین می‌کند تا آن گره قابل تقسیم باشد. اندازه بیشتر این سنج از تقسیم‌های ضعیف جلوگیری می‌کند. سنج subsample درصدی از داده‌های آموزشی را مشخص می‌کند که برای ساخت هر درخت استفاده می‌شود و نمونه‌گیری تصادفی از داده‌ها باعث افزایش مقاومت مدل در برابر بیش‌برازش می‌شود (کوهن و همکاران ۲۰۲۰). سنج‌های مدل با استفاده از جست‌وجوی تصادفی و اعتبارسنجی متقابل^۱ بهینه‌سازی شدند.

ارزیابی عملکرد مدل

در این پژوهش، عملکرد مدل با استفاده از شاخص مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) که بیانگر توانایی تمایز میان نمونه‌های آلوده و غیرآلوده

3 Precision
4 Recall

4 Cross-validation
2 Receiver operating characteristic

جدول ۱- نتایج تحلیل هم‌خطی چندگانه میان متغیرهای مستقل با استفاده از عامل تورم پراکنش.

Table 1- Results of multicollinearity analysis of independent variables using the Variance Inflation Factor (VIF).

Factor	VIF
Drainage density	2.69
Distance from stream	2.50
Soil order	1.98
Precipitation	1.87
Elevation	1.63
Land use	1.37
Slope	1.33
Lithology	1.22
NDVI	1.16
Topographic Wetness Index	1.14

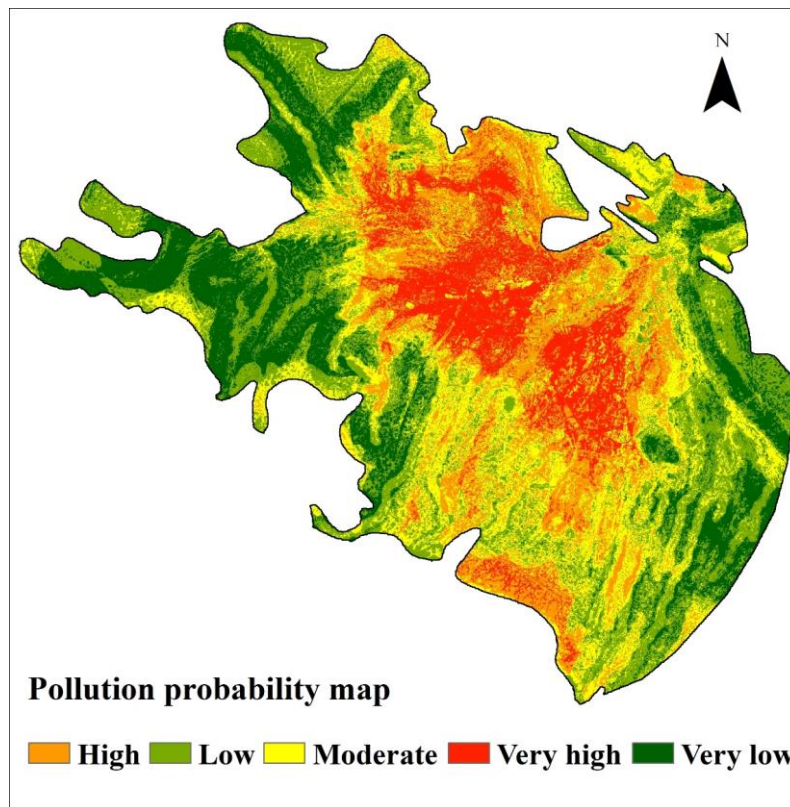
۶۳٪)، از دیگر مدل‌های وایزای بهتر بود. نتایج پژوهش آلام و همکاران (۲۰۲۵) نیز مؤید آن بود که عملکرد مدل XGBoost در منطقه بینچوان چین عالی بود. این نتایج بیانگر توانایی قابل توجه مدل تقویت شیب شدید در پیش‌بینی‌های کاربردی و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده است و می‌توان از آن به‌عنوان ابزار سومندی برای شناسایی نمونه‌های مهم در زمینه پژوهش بهره برد. در پژوهش‌های پرشماری، عملکرد مطلوب این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های یادگیری ماشین گزارش شده است (غلامی و بویج ۲۰۲۲؛ لیانگ و همکاران ۲۰۲۴؛ آلام و همکاران ۲۰۲۵). نتایج این پژوهش‌ها بیانگر توانایی مدل تقویت شیب شدید در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی محیط‌زیستی است. بر اساس نقشه احتمال آلودگی به‌دست آمده در این پژوهش مشخص شد که مناطق قابل توجهی از مساحت دشت لنجان‌ات خطر آلودگی آب زیرزمینی دارند (شکل ۵). بر این اساس، ۱۱/۶٪ از سطح منطقه در طبقه "احتمال آلودگی خیلی زیاد" و ۱۹/۶٪ در طبقه "احتمال آلودگی زیاد" بود. این ارقام بیانگر آن است که حدود یک سوم از دشت در معرض خطر زیاد یا بسیار زیاد است، که از دیدگاه مدیریت منابع آب زیرزمینی و سلامت عمومی، زنگ هشدار جدی تلقی می‌شود. با مقایسه نقشه آلودگی (شکل ۵) با موقعیت کاربری‌های زمین (شکل ۴)، واضح است که مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد عمدتاً با کاربری کشاورزی، هم‌پوشانی دارند.

پس از دستیابی به بیشترین عملکرد، نقشه احتمال رخداد آلودگی آب‌های زیرزمینی تولید و انتخاب شد (شکل ۵). عملکرد مدل در پیش‌بینی نقشه احتمال رخداد آلودگی در جدول ۲ ارائه شده است. عملکرد مدل پیشنهادی در پیش‌بینی آلودگی با دقت کلی ۸۶٪، نشان‌دهنده توانایی زیاد مدل در دسته‌بندی صحیح داده‌ها بود. اندازه سطح زیر منحنی ROC برابر با ۰/۸۵ و بازیابی مدل ۰/۸ بود. این موضوع بیانگر آن بود که ۸۰٪ از نمونه‌ها به درستی شناسایی شده‌اند. افزون بر این، آماره F1-score، برابر با ۰/۸۳ مؤید آن بود که مدل تعادل مناسبی میان دقت و حساسیت داشته و از نظر عملکرد کلی قابل اعتماد است. نتایج پژوهش‌های پیشین نیز مؤید توانمندی‌های مدل XGBoost هستند، هرچند اغلب بر کاربردهای وایزای آن تأکید داشته‌اند. در این راستا، غلامی و بویج (۲۰۲۲) غلظت نیترات در دشت مازندران را برآورد کردند و دریافتند عملکرد مدل XGBoost با ضریب تبیین ۸۶٪ در مقایسه با شبکه عصبی عمیق و وایزای چندگانه بهتر بود. رنسوم و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که عملکرد XGBoost (با ضریب تبیین ۵۶٪) از مدل آدابوست (با ضریب تبیین ۴۰٪) بهتر بود، هرچند در مقایسه با جنگل تصادفی (با ضریب تبیین ۶۲٪) و وایزای تقویت‌شده شیب (با ضریب تبیین ۶۳٪) ضعیف‌تر بود. لیانگ و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان دادند برای پیش‌بینی توزیع غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی چین عملکرد XGBoost (با ضریب تبیین

جدول ۲- ارزیابی کارایی مدل‌سازی آلودگی آب‌های زیرزمینی با مدل XGBoost.

Table 2- Evaluation of the efficiency of groundwater pollution modeling with the XGBoost Model.

AUC	Precision	Recall	F1-score
0.85	0.86	0.80	0.83



شکل ۵- نقشه احتمال آلودگی نیترات آب‌های زیرزمینی مبتنی بر مدل XGBoost.

Figure 5- Groundwater nitrate contamination probability map based on the XGBoost Model.

اهمیت متغیرهای ورودی

نتایج الگوریتم تقویت شیب شدید نشان داد بیشترین اهمیت در میان متغیرهای ورودی مربوط به متغیرهای بارش (۲۱٪) و بلندی (۱۸٪) بود (جدول ۳). این یافته‌ها هم از دیدگاه آماری معنادار بودند و هم از دیدگاه فرآیندهای زمین‌آب‌شیمیایی (هیدروژئوشیمیایی) قابل تبیین هستند. بارش به‌عنوان عامل اصلی تغذیه آب زیرزمینی، نقش دوگانه‌ای در آلودگی نیتراتی دارد. از یک‌سو افزایش بارندگی موجب نفوذ بیشتر آب به درون خاک و سفره‌های زیرزمینی می‌شود، که این فرآیند می‌تواند به شست‌وشوی نیترات‌های تجمع‌یافته در لایه‌های سطحی خاک منجر

شود. از سوی دیگر، در مناطق کشاورزی که مصرف کودهای نیتروژنه رایج است، بارش شدید می‌تواند باعث انتقال سریع نیترات به ژرفای خاک و سرانجام به منابع آب زیرزمینی شود. این یافته با نتایج ونگ و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر اینکه بارش‌های فصلی نقش مهمی در افزایش غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی با نفوذپذیری زیاد و پوشش گیاهی محدود دارند، هماهنگی دارد. متغیر بلندی نیز به‌عنوان یک متغیر پستی‌بلندی، بر الگوهای جریان سطحی و زیرسطحی تأثیرگذار است. مناطق با بلندی بیشتر معمولاً شیب‌های تندتر دارند که می‌تواند منجر به رواناب سریع‌تر و کاهش زمان تماس آب با خاک شود.

به‌طور غیرمستقیم به پوشش گیاهی، رطوبت، خاک و فرآیندهای انتقال آلاینده مرتبط است (ژانگ و همکاران ۲۰۱۸؛ بوون ۲۰۱۲).

نتایج این پژوهش نشان داد که پس از بارش و بلندی، متغیرهای فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، NDVI و شیب زمین در رتبه دوم اهمیت بودند (جدول ۳).

این موضوع ممکن است از نفوذ مؤثر آب به لایه‌های زیرین جلوگیری کرده و در نتیجه بر اندازه انتقال نیترات به سفره‌های زیرزمینی تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر، مناطق با بلندی کم و شیب ملایم‌تر، مستعد تجمع آب و نفوذ بیشتر هستند، که می‌تواند خطر آلودگی را افزایش دهد. از این رو، اهمیت متغیر بلندی در مدل هم به ویژگی‌های فیزیکی زمین مربوط است و هم

جدول ۳- اهمیت و وزن متغیرهای مهم در تحلیل احتمال رخداد آلودگی نیترات.

Table 3- Importance and weights of key variables in nitrate contamination probability analysis.

Variables	Importance
Precipitation	0.21
Elevation	0.18
Distance from streams	0.13
NDVI	0.13
Drainage density	0.13
Slope	0.11
Topographic Wetness Index	0.05
Lithology	0.03
Land use	0.03
Soil order	0.01

خاک در برخی نواحی ناقص یا با دقت محدود بودند. این محدودیت‌ها مشابه مشکلاتی است که در پژوهش‌هایی با داده‌های محدود چاه‌های خصوصی نیز قابل مشاهده است که باعث افزایش خطا در مدل‌سازی می‌شود (آگی‌مانگ و همکاران ۲۰۱۷). این محدودیت‌ها می‌توانند نبودن قطعیت مدل‌های پیش‌بینی را افزایش داده و قابلیت تعمیم نتایج به دیگر مناطق یا بازه‌های زمانی را کاهش دهند. از این رو، به منظور بهبود صحت و قابلیت اعتماد تحلیل‌ها، گردآوری داده‌های با دوره زمانی بیشتر و با پوشش مکانی گسترده‌تر و پایش پیوسته چاه‌ها برای ثبت نوسانات فصلی ضروری است.

استفاده از اندازه کد مصرفی به عنوان یک متغیر ورودی در منطقه مطالعه شده امکان‌پذیر نبود. استفاده از چنین ویژگی مهمی دقت مدل‌سازی را افزایش می‌داد.

محدودیت‌های پژوهش

یکی از محدودیت‌های اساسی این پژوهش، کمبود و ناقص بودن داده‌های پایه بود. داده‌های نیترات فقط از ۱۰۲ چاه و در بازه‌ای زمانی محدود جمع‌آوری شدند. از این رو، تغییرات فصلی و نوسانات کوتاه‌مدت کیفیت آب زیرزمینی لحاظ نشد. این موضوع مشابه محدودیت منتج از داده‌های نسبتاً ناپیوسته در مدل‌سازی نوسانات نیترات است که غنای فرایندهای زیست‌زمین‌شیمیایی را کاهش می‌دهد (ویلیکینز و همکاران ۲۰۲۳). در روش پژوهش فرض شد که سامانه در شرایط پایدار است و انتقال آلودگی از آبخوان در نظر گرفته نشد. از این رو، ممکن است پیوند موجود میان آلودگی و نقاط نمونه‌برداری از آب زیرزمینی در سمت پایین‌دست را «قطع» کند (شو و گومز-هرناندز ۲۰۱۶). افزون بر این، داده‌های محیطی مرتبط با عامل‌های مؤثر بر کیفیت آب، مانند کاربری زمین و ویژگی‌های

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

جایگزینی روش‌های آبیاری سنتی با سامانه‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای، راهکارهای مؤثری برای کاهش نفوذ نیترات به سفره‌های آب زیرزمینی ارائه داد. ارزیابی اقتصادی-زیست‌محیطی این جایگزینی‌ها، همراه با تحلیل سیاست‌های حمایتی و آموزشی برای کشاورزان، می‌تواند به طراحی برنامه‌های اجرایی قابل‌انکسار منجر شود. تلفیق چارچوب ارزیابی خطر با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و داده‌های سنجش‌ازدور نیز امکان پایش منطقه‌ای و تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم می‌آورد. در نتیجه، طراحی شاخص‌های ترکیبی برای سنجش پایداری منابع آب زیرزمینی و ارائه ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره، می‌تواند به ارتقای کیفیت مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک شایانی کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

ارزیابی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی ابزار مهم و مؤثری برای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آید. این پژوهش، چارچوبی برای ارزیابی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی در دشت لنجان ارائه داد. نتایج نشان داد که احتمال رخداد آلودگی در بخش مرکزی منطقه بیشتر است. با توجه به تحلیل نقشه کاربری زمین، مشخص شد که مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد عمدتاً با کاربری کشاورزی هم‌پوشانی دارند. این یافته‌ها مؤید آن است که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و مدیریت نامناسب کودها، نقش مهمی در افزایش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که گسترش ارزیابی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از رویکرد پیشنهادی، امکان‌پذیر و قابل اعتماد است. برای مدیریت و مهار کیفیت آب‌های زیرزمینی در منطقه، کاهش مصرف کودهای نیتروژنی در آبیاری اهمیت ویژه‌ای دارد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود سامانه آبیاری قطره‌ای جایگزین آبیاری غرقابی شود تا از شسته شدن نیترات خاک جلوگیری شود و اثرات منفی کشاورزی بر کیفیت آب کاهش یابد. یافته‌های این پژوهش برای ارزیابی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای قابل اعتماد است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود تا تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه حفاظت از منابع آب زیرزمینی و پیشگیری از آلودگی در مناطق نیمه‌خشک از نتایج ارزشمند آن بهره‌برد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده به توسعه مدل‌های پیش‌بینی جابه‌جایی آلودگی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و داده‌های مکانی توجه شود تا در آینده مناطق پرخطر با دقت بیشتری شناسایی شوند. همچنین، پیشنهاد می‌شود با بررسی و تحلیل سناریوهای مدیریتی کاهش مصرف کود و

فهرست منابع

- Agyemang, ABA. 2017. Vulnerability assessment of groundwater to NO₃ contamination using GIS, DRASTIC model and geostatistical analysis. East Tennessee State University. p.13830146.
- Alam SK, Li P, Rahman M, Fida M, Elumalai V. 2025. Key factors affecting groundwater nitrate levels in the Yinchuan Region, Northwest China: Research using the eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) model with the SHapley Additive exPlanations (SHAP) method. *Environmental Pollution*. 364(1): p.125336. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125336>
- Aller L, Bennett T, Lehr J, Petty RJ, Hackett G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, 455.
- Almasri MN, Kaluarachchi JJ. 2007. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*. 343(3-4):211–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.016>
- Arauzo M, 2017. Vulnerability of groundwater resources to nitrate pollution: A simple and effective procedure for delimiting Nitrate Vulnerable Zones. *Science of the Total Environment*. 575:799–812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.139>
- Beven KJ, Alcock RE. 2012. Modelling everything everywhere: A new approach to decision-making for water management under uncertainty. *Freshwater Biology*. 57:124–132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02592.x>
- Chen C, Yin C, Wang Y, Zeng J, Wang S, Bao Y, Liu X. 2023. XGBoost-based machine learning test improves an accuracy of hemorrhage prediction among geriatric patients with long-term administration of rivaroxaban. *BMC Geriatrics*. 23(1): p. 418. <https://doi.org/10.1186/s12877-023-04049-z>
- Choubin B, Moradi E, Golshan M, Adamowski J, Sajedi-Hosseini F, Mosavi A. 2019. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. *Science of the Total Environment*. 651:2087–2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>
- Covatti G, Li KY, Podgorski J, Winkel LH, Berg M. 2025. Nitrate contamination in groundwater across Switzerland: Spatial prediction and data-driven assessment of anthropogenic and environmental drivers. *Science of the Total Environment*. 973(10): p.179121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179121>
- Creed IF, Band LE. 1998. Exploring functional similarity in the export of Nitrate-N from forested catchments: A mechanistic modeling approach. *Water Resources Research*. 34(11):3079–3093. <https://doi.org/10.1029/98WR02102>
- Dhaliwal JK, Panday D, Saha D, Lee J, Jag Adamma S, Schaeffer S, Mengistu A. 2022. Predicting and interpreting cotton yield and its determinants under long-term conservation management practices using machine learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. 199: p.107107. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107107>
- Gad M, Gaagai A, Agrama AA, El-Fiqy W F, Eid MH, Szűcs P, Ibrahim H. 2024. Comprehensive evaluation and prediction of groundwater quality and risk indices using quantitative approaches, multivariate analysis, and machine learning models: An exploratory study. *Heliyon*. 10(17): p. e36606. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36606>
- Gholami V, Booij MJ. 2022. Use of machine learning and geographical information system to predict nitrate concentration in an unconfined aquifer in Iran. *Journal of Cleaner Production*. 360: p. 131847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131847>
- Gurdak JJ, Qi SL. 2012. Vulnerability of recently recharged groundwater in principle aquifers of the United States to nitrate contamination. *Environmental Science and Technology*. 46(11):6004–6012. <https://doi.org/10.1021/es300688b>
- Hosseini FS, Choubin B, Bagheri-Gavkosh M, Karimi O, Taromideh F, Mako C. 2023. Susceptibility assessment of groundwater nitrate contamination using an ensemble machine learning approach. *Groundwater*. 61(4):510–516. <https://doi.org/10.1111/gwat.13258>
- Hosseini FS, Choubin B, Bagheri-Gavkosh M, Karimi O, Taromideh F, Mako C. 2023. Susceptibility assessment of groundwater nitrate contamination using an ensemble machine learning approach. *Groundwater*. 61(4):510–516. <https://doi.org/10.1111/gwat.13258>
- Imani M, Beik Mohammadi A, Arabnia HR. 2025. Comprehensive analysis of random forest and XGBoost performance with SMOTE, ADASYN, and GNUS under varying imbalance levels. *Technologies*. 13(3): p. 88. <https://doi.org/10.3390/technologies13030088>
- Interagency Agricultural Projections Committee. 2023. USDA Agricultural Projections to 2032. p. 119. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.348090>

- International Agency for Research on Cancer, IARC. 2010. Ingested nitrate and nitrite, and cyanobacterial peptide toxins. International Agency for Research on Cancer. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1970867909768062125>
- Knoll L, Breuer L, Bach M. 2020. Nationwide estimation of groundwater redox conditions and nitrate concentrations through machine learning. *Environmental Research Letters*. 15(6):p.064004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d5c>
- Kuhn M, Wing J, Weston S, Williams A, Keefer C, Engelhardt A, Cooper T, Mayer Z, Kenkel B. Team RC, 2020. Package 'caret'. *The R Journal*. 22(7):1-48.
- Liang Y, Zhang X, Gan L, Chen S, Zhao S, Ding J, Wulue K, Yang H. 2024. Mapping specific groundwater nitrate concentrations from spatial data using machine learning: A case study of chongqing, China. *Heliyon*. 10(6): p.e27867. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27867>.
- Luo S, El X, Li X. 2024. Data Preprocessing Method for Landslide Displacement Prediction Based on XG Boost. In 2024 IEEE 13th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). IEEE. pp. 745-750. <https://doi.org/10.1109/DDCLS61622.2024.10606761>
- Messier KP, Wheeler DC, Flory AR, Jones RR, Patel D, Nolan BT, Ward M H. 2019. Modeling groundwater nitrate exposure in private wells of North Carolina for the Agricultural Health Study. *Science of The Total Environment*. 655:512-519. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.022>
- Mosavi A, Sajedi Hosseini F, Choubin B, Goodarzi M, Dineva AA, Rafiei Sardooi E. 2021. Ensemble boosting and bagging based machine learning models for groundwater potential prediction. *Water Resources Management*. 35(1):23-37. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02704-3>
- Naseri HR, Key HZ, Nakhai M. 2012. The impact of natural and human factors on water quality in Lenjanat Plain, Isfahan. *Geosciences*. 22(85):173-186. (In Persian).
- Ouedraogo I, Vanclooster M. 2016. A meta-analysis and statistical modelling of nitrates in groundwater at the African scale. *Hydrology and Earth System Sciences*. 20(6):2353-2381. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2353-2016>
- Picetti R, Deeney M, Pastorino S, Miller MR, Shah A, Leon DA, Green R. 2022. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental Research*. 210:p.112988. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112988>
- Rahimi D, Bashirian F, Nourbakhsh A. 2024. Assessment of climate change impacts on water resources (Lenjanat Sub-basin). *Natural Geography*. 64(17): 63-78. (In Persian).
- Rahmati O, Choubin B, Fathabadi A, Coulon F, Soltani E, Shahabi H, Mollaeafar E, Tiefenbacher J, Cipullo S, Ahmad BB, Bui DT. 2019. Predicting uncertainty of machine learning models for modelling nitrate pollution of groundwater using quantile regression and UNEEC methods. *Science of the Total Environment*. 688:855-866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.320>
- Ransom KM, Nolan BT, Stackelberg PE, Belitz K, Fram MS. 2022. Machine learning predictions of nitrate in groundwater used for drinking supply in the conterminous United States. *Science of the Total Environment*. 807:p.151065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151065>
- Sajedi-Hosseini F, Malekian A, Choubin, B, Rahmati O, Cipullo S, Coulon F, Pradhan B. 2018. A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination. *Science of the Total Environment*. 644:954-962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.054>
- Sarkar S, Mukherjee A, Gupta SD, Bhanja SN, Bhattacharya A. 2022. Predicting regional-scale elevated groundwater nitrate contamination risk using machine learning on natural and human-induced factors. *Acs Es and T Engineering*. 2(4):689-702. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00360>
- Shukla S, Saxena A. 2021. Appraisal of groundwater quality with human health risk assessment in parts of Indo-Gangetic alluvial plain, North India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 80(1):55-73. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00771-6>
- Ullah S, Zhang H, Heathwaite AL, Heppell C, Lansdown K, Binley A, Trimmer M. 2014. Influence of emergent vegetation on nitrate cycling in sediments of a groundwater-fed river. *Biogeochemistry*. 118(1):121-134. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9909-2>
- United Nations Environment Programme, UNEP. 2023. An introduction to SDG indicator 6.3.2: proportion of bodies of water with good ambient water quality. <https://communities.unep.org/display/sdg632/Documents+and+Materials>
- Wang ZJ, Yue FJ, Lu J, Wang YC, Qin CQ, Ding H, Xue LL, Li SL. 2022. New insight into the response and transport of nitrate in karst groundwater to rainfall events. *Science of the Total Environment*. 818:p.151727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151727>

Ward MH, Jones RR, Brender JD, De Kok TM, Weyer PJ, Nolan BT, Van Breda SG. 2018. Drinking water nitrate and human health: an updated review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15(7):1557.

<https://doi.org/10.3390/ijerph15071557>

Wiens M, Verone-Boyle A, Henscheid N, Podichetty JT, Burton J. 2025. A tutorial and use case example of the extreme gradient boosting (XGBoost) artificial intelligence algorithm for drug development applications. *Clinical and Translational Science*. 18(3):p.e70172.

<https://doi.org/10.1111/cts.70172>

Wilkins B, Johns T, Mager S. 2024. Nitrate-nitrogen dynamics in response to forestry harvesting and climate variability: Four years of UV nitrate sensor data in a shallow, gravel aquifer. *EGUsphere*. 2024:1–27.

<https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-964>

World Health Organization (WHO). 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 38(4):1–108.

World Health Organization (WHO). 2022. *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization. p. 494.

Xu T, Gómez-Hernández JJ. 2016. Joint identification of contaminant source location, initial release time, and initial solute concentration in an aquifer via ensemble Kalman filtering. *Water Resources Research*. 52(8):6587–6595. <https://doi.org/10.1002/2016WR019111>

Zhang P, Jia Y, Shang Y. 2022. Research and application of XGBoost in imbalanced data. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 18(6):p.15501329221106935

Zhang W, Wang W, Zhou D, Zhang, R, Goh ATC, Hou Z. 2018. Influence of groundwater drawdown on excavation responses—A case history in Bukit Timah granitic residual soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 10(5):856-864. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.006>



Estimating Groundwater Nitrate Contamination Probability Using Extreme Gradient Boosting

Mehdi Hashemi^{1*}, Ali Dastranj²

1- Assistant Professor, Soil conservation and watershed management research department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Soil conservation and watershed management research department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Groundwater, as a vital source of fresh water, plays a fundamental role in supplying drinking, agricultural, and industrial needs in many arid and semi-arid regions of the world. However, increased human and industrial activities have led to the exacerbation of pollution in these valuable resources. In this regard, nitrate pollution, due to its high solubility and mobility in water, is recognized as one of the most serious threats to human health and aquatic ecosystems. The consumption of nitrate-contaminated water can lead to various diseases, including methemoglobinemia (blue baby syndrome) in infants and even some cancers in adults. Furthermore, the entry of nitrates into surface waters can result in eutrophication and the degradation of aquatic ecosystems. Given the importance of the issue and the necessity of protecting groundwater resources, this research was conducted with the aim of developing an integrated and comprehensive framework for estimating the probability of groundwater contamination, especially with a focus on nitrate contaminant, in the Lenjanat Plain region located in Isfahan Province, Iran. Using this framework and employing advanced modeling and spatial analysis approaches, areas prone to contamination were identified, which will help in providing effective management solutions to reduce the risks associated with groundwater contamination. The results of this research can serve as a basis for future planning in the sustainable management of water resources and the protection of community health.

Materials and Methods

In this study, data related to the nitrate concentration in groundwater sources were carefully examined. Therefore, crucial information was collected from 102 wells in the Lenjanat Plain of Isfahan Province. Each of these wells represented the nitrate status in the groundwater aquifers of the studied region. To analyze this large volume of data and extract hidden patterns, the Extreme Gradient Boosting model was used. This model was chosen due to its high capability in identifying complex and non-linear relationships between variables, as well as its acceptable prediction precision.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** m_hashemi@areeo.ac.ir

Citation: Hashemi, M., Dastranj, A. 2026. Estimating Groundwater Nitrate Contamination Probability Using Extreme Gradient Boosting. Watershed Management Research. 39(1): 45-63.

DOI: 10.22092/WMRJ.2025.370560.1631

Received: 30 August 2025, **Received in revised form:** 12 September 2025, **Accepted:** 22 September 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 45-63.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

© Author(s)



In addition to nitrate concentration data, ten key environmental and anthropogenic factors potentially influencing nitrate contamination in groundwater were identified and incorporated into the analytical model. These factors included slope, elevation, drainage density, topographic wetness index, soil order, and distance from streams, lithology, and land-use. By integrating these eight factors into the Extreme Gradient Boosting model, it was possible to identify the most significant factors affecting nitrate contamination and also to spatially predict the probability of nitrate contamination in groundwater.

Results and Discussion

The results of this study clearly demonstrated the effectiveness and efficiency of the Extreme Gradient Boosting in predicting nitrate contamination in groundwater. The overall accuracy of this model was 0.86 which allowed the contamination status of the studied area to be well distinguished. In addition, other performance evaluation criteria of the model also indicated its high accuracy in correctly identifying contaminated and uncontaminated areas; with the area under the ROC curve was equal to 0.85. Moreover, the model recall was found to be 0.80, indicating that 80% of all the real contaminated areas were correctly identified using this model. Finally, the F1-score statistic, which is a combined measure of precision and recall, with a value of 0.83, indicates a good balance between these two measures and the overall reliable performance of the model. The sensitivity analysis of the model revealed that the effect of certain input variables on the spatial estimation of nitrate contamination in groundwater was significant. Among the ten environmental and anthropogenic factors examined, precipitation (21%) and elevation changes (18%) were identified as the most influential and important variables in determining the spatial pattern of nitrate contamination. These findings highlight the importance of natural and geomorphological characteristics of the region in controlling the dispersion and accumulation of nitrates in groundwater and can serve as a useful guide for future studies and the development of targeted management strategies.

Conclusion and Suggestions

One of the important achievements of this study was the production of hazard maps that clearly identified areas with high risk of nitrate contamination in the central part of the studied plain. It is recommended that water resource managers and urban and rural planners use these maps as a valuable tool for taking preventive measures in sensitive areas. Notably, the role of human activities in increasing the risk of nitrate contamination was strongly confirmed by the significant overlap of high-risk areas with agricultural land-use. Based on these findings, it is suggested that nitrogen fertilizers be used optimally for the protection of groundwater resources and the sustainable management of agricultural activities.

Keywords: Groundwater, Lenjanat Plain, nitrate, occurrence probability, XGBoost

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, Software, Formal analysis, Writing - original draft preparation

Author 2: Conceptualization, Evaluating the result, Manuscript editing



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس



مردان تحقیقات، آموزش، ترویج کشاورزی

تحلیل پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر استان سیستان و بلوچستان

مرتضی صابری^{۱*}، محمدرضا دهمرده‌قلعه‌نو^۲، رسول خطیبی^۳

۱ و ۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

نابودی خاک ارتباط نزدیکی با افزایش فرسایش بادی دارد. فرسایش بادی یکی از چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهان و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک آن است. زیرا، در این مناطق خاک‌ها چسبندگی کمی دارند و ساختار آنها ناپایدار است و پوشش گیاهی به شکل پراکنده دیده می‌شود. افزون بر اثرات گسترده فرسایش بادی بر اقلیم، کیفیت هوا و سلامت انسان در مقیاس جهانی، ذرات ریز آلی موجود در سطح خاک به وسیله این پدیده جابه‌جا شده و از بین می‌رود. این فرایند موجب کاهش قابل توجه ذخایر مواد مغذی، کاهش حاصلخیزی و نابودی ساختار فیزیکی و زیستی خاک می‌شود. با توجه به شرایط اقلیمی خشک منطقه ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان و نقش مؤثر بادهای شدید در افزایش فرسایش بادی، بررسی پیامدهای این پدیده بر تغییرات ویژگی‌های خاک اهمیت ویژه‌ای دارد. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، بر اساس بازدیدهای میدانی، مشاهده‌های صحرایی و نقشه‌های فرسایش منطقه، شدت فرسایش خاک به‌عنوان تیمار اصلی در چهار سطح بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید دسته‌بندی شد. برای بررسی اثر این تیمارها بر تغییرات ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری در آبخیز رحمت‌آباد ایرانشهر بر اساس طرح کاملاً تصادفی در خرداد ماه ۱۴۰۲ انجام شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: mortezasaberi@uoz.ac.ir

استناد: صابری، م.، دهمرده‌قلعه‌نو، م.ر.، خطیبی، ر. ۱۴۰۴. تحلیل پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک بوم‌سازگان خشک در ایرانشهر استان سیستان و بلوچستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۸۳-۶۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370497.1630

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۶۴ تا ۸۳.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



در هر سطح فرسایش، چهار منطقه همگن با شرایط گیاتاشناسی تقریباً مشابه انتخاب شد و از هر منطقه پنج نمونه خاک از ژرفای صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. نمونه‌ها با روش مرکب ترکیب شدند. بخشی از نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی در ظروف دربسته و با حفظ رطوبت اولیه به آزمایشگاه انتقال یافت و در یخچال نگهداری شدند. بخش دیگر پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲ میلی‌متری برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شد. ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل، ویژگی‌های شیمیایی شامل کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، اسیدیته و هدایت الکتریکی و ویژگی‌های میکروبی شامل فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته میکروبی، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و سهم میکروبی ارزیابی شد. داده‌ها با استفاده از تجزیه پراکنش یک‌طرفه (ANOVA) در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ تحلیل شدند و میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ مقایسه شدند. همچنین، همبستگی میان ویژگی‌های مطالعه‌شده با نرم‌افزار R بررسی شد.

نتایج و بحث

یافته‌های پژوهش نشان داد اثر شدت فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک معنی‌دار بود. تحلیل داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت فرسایش، کربن آلی و نیتروژن کل به‌طور قابل توجهی کاهش یافتند. کربن آلی خاک از ۰/۵۹٪ در مناطق بدون فرسایش به ۰/۱۶٪ و نیتروژن کل از ۰/۰۶۳ به ۰/۰۱۶٪ در مناطق با فرسایش شدید، کاهش یافت. همچنین، حساسیت پتاسیم و فسفر قابل دسترس به فرسایش خیلی زیاد بود، به‌طوری که پتاسیم از ۱۶۱/۳ به ۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و فسفر قابل دسترس از ۸/۳۲ به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافتند که احتمالاً ناشی از جابه‌جایی ذرات ریز غنی از مواد مغذی به‌وسیله باد بود. هدایت الکتریکی خاک با افزایش شدت فرسایش از ۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر در مناطق بدون فرسایش به ۰/۹۳ دسی‌زیمنس بر متر در مناطق با فرسایش شدید افزایش یافت. جرم مخصوص ظاهری خاک نیز از ۱/۳۶ به ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش و تخلخل از ۴۶/۶ به ۳۳/۲٪ کاهش یافت، که نشان‌دهنده تراکم بیشتر خاک و نابودی ساختار خاکدانه‌ها بود. کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس میکروبی پایه و برانگیخته، نیتروژن زیست‌توده و جمعیت میکروارگانسیم‌ها با افزایش شدت فرسایش معنی‌دار ($p < 0.01$) بود. این یافته‌ها بیانگر محدودیت منابع غذایی و کاهش فعالیت متابولیکی میکروارگانسیم‌ها بود. با این حال، تغییرات نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده و سهم میکروبی خاک معنی‌دار ($p < 0.05$) نبود. این یافته بیانگر پایداری نسبی برخی فرایندهای میکروبی حتی در شرایط فرسایش شدید بود. نتایج این پژوهش نشان داد فرسایش بادی هم کیفیت و کمیت عناصر غذایی و ماده آلی خاک را کاهش داد و هم روی ساختار و فعالیت میکروبی خاک به‌شدت تأثیرگذار بود. از این رو، می‌توان از این شاخص‌ها به‌عنوان معیارهای مناسب ارزیابی اثرات فرسایش بادی در بوم‌سازگان‌های خشک، به‌ویژه در ایران‌شهر، استفاده کرد. تحلیل همبستگی نشان داد که اثر فرسایش خاک اثر بر ویژگی‌های میکروبی بسیار منفی بود. همبستگی فعالیت آنزیم کاتالاز (-۰/۹۶)، تنفس میکروبی (-۰/۹۶)، زیست‌توده کربن (-۰/۹۵) و نیتروژن (-۰/۹۸) و جمعیت میکروارگانسیم‌ها (-۰/۹۸) با شدت فرسایش بسیار زیاد و منفی بود. شاخص‌های زیستی به‌طور وابسته عمل کردند به‌طوری که رابطه نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده با سهم میکروبی بسیار مثبت (۰/۹۲) بود. این یافته‌ها تأییدکننده کاهش عملکرد شبکه میکروبی خاک تحت تأثیر فرسایش بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش در ایران‌شهر نشان داد که بهترین شرایط فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک مربوط به تیمار بدون فرسایش بود. کمترین جرم مخصوص ظاهری، بیشترین تخلخل، بیشترین ظرفیت نگهداری آب و بیشترین فعالیت میکروبی خاک مربوط به تیمار نامبرده بود. با افزایش شدت فرسایش از کم تا شدید، کیفیت خاک به‌طور پیوسته کاهش یافت؛ به‌طوری که در شرایط فرسایش شدید، بیشترین نابودی ساختار خاک، کاهش کربن، نیتروژن، پتاسیم و فسفر قابل دسترس و افزایش هدایت الکتریکی مشاهده شد. این یافته‌ها بیانگر آن بود که پایداری بهینه ساختار و

عملکرد بوم‌سازگان‌های خشک در شرایطی که کمترین فرسایش رخ دهد یا وجود نداشته باشد، امکان‌پذیر است. از این‌رو، بر اساس نتایج این پژوهش برای جلوگیری از ورود خاک به مراحل پیشرفته فرسایش، حفاظت از پوشش گیاهی، کاهش چرای بیش از حد، کاهش شخم‌زنی و افزایش ماده آلی پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

تنوع میکروبی، خاک‌های خشک، فرسایش بادی، فعالیت آنزیم کاتالاز، کربن آلی

مقدمه

تبادل بوم‌شناختی به وجود می‌آورند. افزون بر این، ذرات معلق در هوا باعث شکل‌گیری گرد و غبار و طوفان‌های شنی می‌شوند که دید را کاهش داده، منابع آب را آلوده کرده و سلامت انسان را تهدید می‌کنند (کولازو و بوشیازو و همکاران ۲۰۱۵). فرسایش بادی افزون بر اثرات گسترده‌ای که بر اقلیم، کیفیت هوا و سلامت انسان در مقیاس جهانی دارد (کریمن و همکاران ۲۰۱۳)، سبب جابه‌جایی و از بین رفتن ذرات ریز آلی موجود در سطح خاک نیز می‌شود (دیالو و همکاران ۲۰۲۳). این فرایند موجب کاهش قابل‌توجه ذخایر مواد مغذی، کاهش حاصلخیزی و نابودی ساختار فیزیکی و زیستی خاک می‌شود (دو و همکاران ۲۰۲۲)، رشد گیاهان را محدود می‌کند و در نتیجه منجر به کاهش چشم‌گیر بهره‌وری خاک می‌شود (اونز ۲۰۲۰). با افزایش شدت فرسایش بادی و کاهش پوشش گیاهی هم ساختار جامعه میکروبی دگرگون می‌شود و هم کارکردهای مهمی مانند تنفس میکروبی، چرخه نیتروژن و فعالیت‌های آنزیمی، کاهش می‌یابند (مای و همکاران ۲۰۲۴). از این‌رو، با توجه به پیامدهای منفی فرسایش بادی بر سلامت، محیط‌زیست و کشاورزی، کاهش فرسایش بادی خاک‌های بیابانی در مناطق خشک اهمیت زیادی دارد. بر اساس نتایج پژوهش کیو و همکاران (۲۰۲۱)، فرسایش خاک موجب کاهش پیچیدگی شبکه‌های میکروبی، کاهش تنوع تاکسون‌ها و تغییر ترکیب جامعه میکروبی شد، که با کاهش عملکرد چندگانه خاک و محدود شدن فعالیت میکروبی همراه بود. این یافته‌ها اثرات منفی فرسایش

خاک، به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین اجزای بوم‌سازگان‌های زمینی، نقشی اساسی در پایداری زیست‌کره، تولید غذا، تنظیم چرخه‌های زیست‌زمین‌شیمیایی و حفظ تنوع زیستی دارد. با این حال، فرسایش خاک، که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری زمین است، سبب نابودی ساختار خاک، کاهش ماده آلی، عناصر غذایی و ژرفای خاک شده و بر تنوع میکروبی تأثیر منفی دارد (مای و همکاران ۲۰۲۴). اصطلاح فرسایش به فرآیند تدریجی نابودی و ساییدگی سطح زمین گفته می‌شود، که در آن ذرات خاک از سطح جدا شده و به وسیلهٔ عامل‌های طبیعی همچون باد یا جریان‌های آبی به مکان‌های دیگر منتقل می‌شوند (تانر و همکاران ۲۰۲۳). این فرایند در بلندمدت موجب کاهش کیفیت خاک و کاهش توان بوم‌سازگان می‌شود و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی قابل‌توجهی به‌همراه دارد (زاین‌دین و همکاران ۲۰۲۴). اثرات فرسایش شامل فشردگی خاک، نابودی ساختار خاک، کاهش اندازهٔ مواد مغذی و افزایش شوری است که از جمله مهم‌ترین چالش‌های زمین‌بوم‌شناختی و محیط‌زیستی به‌شمار می‌آیند (ذوالفقاری و همکاران ۲۰۲۴). نابودی خاک به‌شدت با افزایش فرسایش بادی مرتبط است. فرسایش بادی یک مشکل زیست‌محیطی جهانی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که خاک‌ها چسبندگی کم، ساختار شل و پوشش گیاهی پراکنده دارند، به‌شمار می‌آید (خیرآبادی و همکاران ۲۰۱۸). در فصل‌های خشک، بادهای پرسرعت به‌راحتی خاک سطحی را جدا کرده و مشکلات پرشماری را برای

خاک را جابه‌جا می‌کند و هم روی کربن آلی خاک و در نتیجه بر کیفیت خاک و چرخه کربن در محیط زیست نیز تأثیرگذار است. فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین عامل‌های تهدیدکننده پایداری و بهره‌وری خاک‌ها است که در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی رخ می‌دهد. برآوردهای اقتصادی موجود اغلب تأثیرات زیست‌محیطی این پدیده، از جمله کاهش تنوع زیستی خاک و اختلال در عملکرد بوم‌سازگان‌ها، را در نظر نمی‌گیرند. افزون بر این، میکروارگانیسم‌های جابه‌جاشده به وسیله گرد و غبار نقش مهمی در فرآیندهای بوم‌سازگانی حیاتی از جمله چرخه زیست‌زمین‌شیمیایی مواد مغذی، ذخیره‌سازی کربن، تجمع خاک و تبدیل ترکیبات سمی در خاک مبدأ دارند (اکوستا و مارتینز ۲۰۱۵). این یافته‌ها بر اهمیت بررسی اثرات زیستی فرسایش بادی و ضرورت استفاده از روش‌های مدیریتی و تثبیت خاک با رویکردهای زیستی، تأکید دارند. با توجه به شرایط اقلیمی خشک منطقه ایرانشهر در استان سیستان و بلوچستان و نقش مؤثر بادهای شدید در افزایش فرسایش بادی، بررسی پیامدهای این پدیده بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و میکروبی خاک، اهمیت ویژه‌ای دارد. فرسایش بادی هم موجب کاهش مواد آلی، عناصر غذایی و نابودی ساختار خاک می‌شود و هم با تغییر در فرآیندهای زیست‌شیمیایی، پایداری بوم‌سازگان‌های مرتعی را تهدید می‌کند و بهره‌وری و تنوع زیستی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، کمبود داده‌های علمی و بررسی‌های میدانی در این زمینه، به‌ویژه در مناطق کمتر بررسی‌شده‌ای چون ایرانشهر، ضرورت انجام این پژوهش را دوچندان می‌کند تا بتوان با شناخت دقیق اثرات فرسایش بادی، راهکارهای مدیریتی و حفاظتی کارآمد برای حفظ کارکردهای بوم‌شناختی خاک و پایداری منابع طبیعی ارائه داد.

مواد و روش‌ها

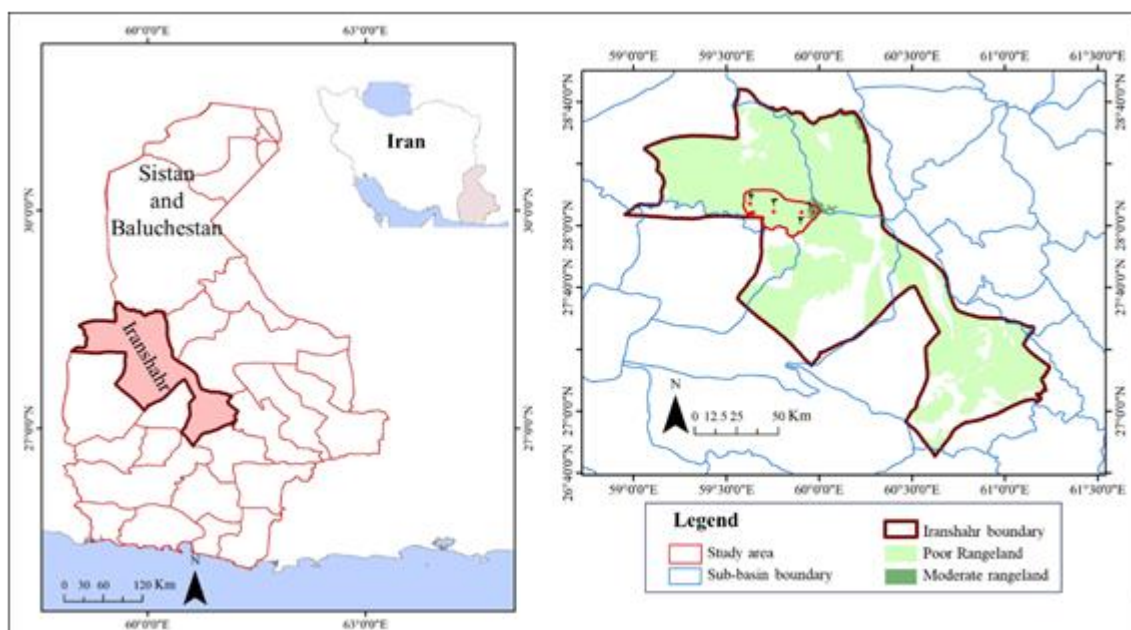
معرفی منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده بخشی از مراتع خشک شهرستان ایرانشهر در آبخیز رحمت‌آباد بود. محدوده جغرافیایی آن میان ۲۷ درجه و ۵۶ دقیقه و ۲۱ ثانیه تا ۲۸ درجه

بر تنوع، عملکرد میکروبی و سلامت بوم‌سازگان خاک را تأیید می‌کند. پیمانتل و برگس (۲۰۱۳) گزارش کردند که افزایش شدت فرسایش باعث کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی، عناصر غذایی و ماده آلی خاک شد و در نتیجه ساختار خاک و حاصل‌خیزی آن کاهش یافت. مرادی و همکاران (۲۰۲۴) نیز دریافتند کاهش ماده آلی خاک فقط ناشی از شستشوی سطحی نبود، بلکه اثر برداشت خاک سطحی و آشکار شدن افق‌های زیرین با محتوای کمتر ماده آلی نیز مهم بود. در نواحی خشک و نیمه‌خشک نتایج پژوهش زائو و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد فرسایش بادی شبیه‌سازی‌شده و رسوب‌گذاری گرد و غبار سبب اثرات قابل‌توجهی بر ساختار و عملکرد شبکه‌های غذایی میکروبی خاک شد. این فرآیندها با جابه‌جایی ذرات سطحی خاک و تغییر در دسترسی به منابع آلی، به‌طور مستقیم بر ترکیب جامعه میکروبی اثرگذارند و با کاهش تنوع عملکردی میکروارگانیسم‌ها، موجب کاهش پایداری عملکردهای زیستی خاک می‌شوند. میکروارگانیسم‌ها در محافظت خاک‌ها در برابر فرسایش نقش مهمی دارند و با تأثیر خود بر تجمع ماده آلی و پایداری خوشه‌های خاک، قابلیت فرسایش خاک را کاهش می‌دهند. از این‌رو، روش‌های مدیریتی که باعث افزایش زیست‌توده میکروبی خاک، محتوای کربن و ذخیره‌سازی آن شوند، به بهبود ساختار خاک و کاهش قابلیت فرسایش کمک می‌کنند (اکوستا و مارتینز ۲۰۱۵). به‌طور کلی، فرسایش بادی افزون بر پیامدهای فیزیکی و شیمیایی، موجب اختلال در فرآیندهای زیستی خاک شده و عملکرد پایدار بوم‌سازگان‌های خاکی را تهدید می‌کند. در پژوهشی ایتوری و بوشیازو (۲۰۲۳) تعامل میان فرسایش بادی و کربن آلی خاک را بررسی کردند و دریافتند فرسایش بادی سبب کاهش ذخایر کربن خاک شد و SOC حساسیت خاک به فرسایش بادی اثرگذار بود. زیرا، بر تجمع خاک اثرگذار بود. همچنین، این پژوهشگران تجمع کربن در رسوبات منتقل‌شده به وسیله باد با دو فرآیند حرکت جهشی و معلق‌سازی ذرات را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد فرسایش بادی هم

آمبرژه، اقلیم منطقه، بیابانی گرم شدید و میانگین تعداد روزهای خشک سالانه ۳۴۲ روز است (درودی و همکاران ۲۰۲۴). بر اساس داده‌های ایستگاه همدید ایران‌شهر، باد غالب منطقه عمدتاً از سمت شمال‌غرب به جنوب‌شرق می‌وزد و بیشترین فراوانی آن در ماه‌های خرداد تا شهریور ثبت شده است. میانگین سرعت سالانه باد حدود ۵/۴ متر بر ثانیه گزارش شده و در دوره‌های اوج وزش، سرعت آن به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد. این الگوی باد، عامل اصلی فعال بودن فرسایش بادی در منطقه به‌شمار می‌آید. با توجه به شرایط اقلیمی خشک و وزش بادهای شدید، فرسایش بادی در این منطقه بسیار فعال است و به نابودی تدریجی خاک‌های سطحی، کاهش مواد آلی و کاهش کیفیت مراتع منجر می‌شود. این روند موجب کاهش پوشش گیاهی مرتع، کاهش ظرفیت چرای دام و کاهش توان بازسازی طبیعی بوم‌سازگان می‌شود (شکل ۱).

و ۱۱ دقیقه و ۵۰ ثانیه عرض شمالی و میان ۵۹ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۷ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۰ دقیقه و ۲۴ ثانیه طول شرقی بود. مساحت این منطقه معادل ۱۱۶۸ کیلومتر مربع و در فاصله ۱۲۶ کیلومتری شمال‌غربی شهر بزمان است. مراتع منطقه شامل دو تیپ اصلی، مراتع با کیفیت متوسط که عمدتاً در بلندی‌های بیشتر (۱۶۲۱ تا ۳۲۱۹ متر از سطح دریا) و گونه‌های غالب آن شامل *Salsola rigida* و *Atriplex canescens* است و مراتع فقیر که در بلندی‌های کمتر (۸۸۱ تا ۱۶۲۱ متری از سطح دریا) و گونه‌های غالب آن شامل *Peganum harmala* و *Haloxylon persicum* است. میانگین سالانه بارندگی ۱۰۳/۳ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۲۷ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بیشترین و کمترین به‌ترتیب ۳۴/۱ و ۱۹/۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (ایستگاه همدید ایران‌شهر، دوره آماری ۳۰ ساله). بر اساس نقشه اقلیم‌شناسی زیستی ایران و طبقه‌بندی



شکل ۱- موقعیت آبخیز رحمت آباد و پایگاه‌های مطالعه‌شده (۱: بدون فرسایش، ۲: فرسایش کم، ۳: فرسایش متوسط، ۴: فرسایش شدید).

Figure 1- Location of the Rahmat Abad watershed and the study sites (1: no erosion, 2: low erosion, 3: moderate erosion, 4: severe erosion).

روش پژوهش

در این پژوهش، بر اساس بازدیدهای میدانی، مشاهده‌های صحرایی و نقشه‌های فرسایش منطقه، شدت فرسایش خاک به‌عنوان تیمار اصلی در چهار سطح شامل: بدون فرسایش، فرسایش کم، متوسط و شدید دسته‌بندی شد. برای بررسی اثر این تیمارها بر تغییرات ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری در آبخیز رحمت‌آباد ایرانشهر بر اساس طرح کاملاً تصادفی در خرداد ماه ۱۴۰۲ انجام شد. در هر سطح فرسایش، چهار منطقه همگن با شرایط گیتاشناسی تقریباً مشابه انتخاب شد و از هر منطقه پنج نمونه خاک (یک نمونه در مرکز و چهار نمونه به‌شکل علامت بعلاوه در اطراف آن) از ژرفای صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. برای هر منطقه فرسایشی، نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق همگن با هم ترکیب و یک نمونه مرکب تهیه شد. بلافاصله پس از برداشت، نمونه‌های خاک به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از نمونه‌ها که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبی در نظر گرفته شده بود، بدون الک کردن و با حفظ شرایط رطوبتی اولیه، در ظروف دربسته و در مجاورت یخ خشک به آزمایشگاه انتقال یافت و تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال نگهداری شد. بخش دیگر نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲ میلی‌متری، استفاده شد (باستانی و همکاران ۲۰۲۳).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین شد (سچومن و همکاران ۲۰۰۲). جرم مخصوص ظاهری خاک با روش کلوخه‌ای، تخلخل با محاسبه بر اساس چگالی حجمی اندازه‌گیری شد (چن و همکاران ۲۰۲۲). ویژگی‌های شیمیایی مانند کربن آلی با روش والکی و بلاک اکسیداسیون دی‌کرومات و نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌لدال تعیین شد. فسفر قابل‌دسترس خاک با روش اولسن و پتاسیم قابل‌دسترس با استفاده از استات آمونیوم خنثی استخراج و به‌وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. اندازه اسیدیته و هدایت

الکتریکی با روش پتانسیومتری تعیین شد (باستانی و همکاران ۲۰۲۳).

ویژگی‌های میکروبی خاک

در این پژوهش برای تعیین ویژگی‌های میکروبی خاک از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. آنزیم کاتالاز با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به‌وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریباً ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون، تنفس برانگیخته با روش انکوباسیون، کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین-استخراج، نیتروژن زیست‌توده میکروبی با روش تدخین با کلروفرم و انکوباسیون اندازه‌گیری شد. همچنین سهم میکروبی از نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل محاسبه شد (چن و همکاران ۲۰۲۲).

تجزیه و تحلیل‌های آماری

تجزیه پراکنش یکطرفه (ANOVA) داده‌های ویژگی‌های خاک به‌وسیله نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن (در سطح احتمال ۰/۰۵) استفاده شد. در پایان همبستگی ویژگی‌های مطالعه‌شده در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج و بحث

اثر فرسایش بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بر اساس نتایج تجزیه پراکنش، اثر شدت فرسایش بادی بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل بسیار معنی‌دار بود. بیشترین حساسیت به فرسایش بادی مربوط در عناصر غذایی پتاسیم و فسفر قابل دسترس مشاهده شد که احتمالاً ناشی از جابه‌جایی ذرات ریز و غنی از مواد مغذی در اثر باد است. فرسایش بادی بر کربن آلی و نیتروژن کل نیز به‌شدت تأثیرگذار بود که نشان‌دهنده کاهش کیفیت ماده آلی و اختلال در چرخه عناصر غذایی در مناطق با فرسایش شدید است. تغییرات هدایت الکتریکی خاک نیز با شدت فرسایش معنی‌دار بود که بیانگر تغییرات غلظت نمک‌های محلول در اثر برداشت

مستقیم فرسایش بر ساختار خاک است. بر اساس این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت اثرات فرسایش بادی هم بر کمیت و هم بر کیفیت خاک بوم‌سازگان خشک ایران‌شهر معنی‌دار بود (جدول ۱).

لایه‌های سطحی خاک است. از سوی دیگر، تغییرات اسیدیته خاک میان سطوح فرسایش معنی‌دار نبود. افزون بر این، با افزایش شدت فرسایش، تراکم خاک افزایش و تخلخل کاهش یافت که بیانگر اثرات

جدول ۱- تجزیه پراکنش یک طرفه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شدت‌های فرسایش.

Table 1- Analysis of variance of erosion intensity on soil physicochemical properties.

Soil parameters		df	Mean Squares	F
Organic Carbon (%)	Between Groups	3	0.1	298.3**
	Within Groups	16	000	
Total Nitrogen (%)	Between Groups	3	0.001	52.16**
	Within Groups	16	000	
Available Potassium (mg/kg)	Between Groups	3	4747.6	575.4**
	Within Groups	16	8.25	
Available Phosphorus (mg/kg)	Between Groups	3	17.12	217.2**
	Within Groups	16	0.07	
pH	Between Groups	3	0.004	0.51 ^{ns}
	Within Groups	16	0.008	
EC (dS/m)	Between Groups	3	0.09	29.9**
	Within Groups	16	0.003	
Bulk Density (g/cm ³)	Between Groups	3	0.03	34.65**
	Within Groups	16	0.001	
Porosity (%)	Between Groups	3	107.4	30.69**
	Within Groups	16	3.5	

** : معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns: معنی‌دار نبودن.

** : significance at the 1% probability level, ns: non- significant.

نیترژن کل، پتاسیم و فسفر قابل‌دسترس معنی‌دار بود. به طوری که کربن آلی از ۰/۵۹٪ در مناطق بدون فرسایش به ۰/۱۶٪ در مناطق با فرسایش شدید و نیترژن کل از ۰/۰۶۳ به ۰/۰۱۶٪ کاهش یافت. پتاسیم قابل دسترس از ۱۶۱/۳ به ۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و فسفر قابل‌دسترس از ۸/۳۲ به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. از سوی دیگر، هدایت الکتریکی از ۰/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر در مناطق بدون فرسایش به ۰/۹۳ در مناطق با فرسایش شدید، افزایش یافت. جرم مخصوص ظاهری از ۱/۳۶ به ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش و تخلخل از ۴۶/۶ به ۳۲/۱۲٪ کاهش یافت. تغییرات اسیدیته خاک در سطوح مختلف فرسایش معنی‌دار نبود (جدول ۲).

با افزایش شدت فرسایش بادی، تغییرات بافت خاک نیز قابل توجه بود. در شرایط بدون فرسایش و فرسایش کم، خاک با بافت لومی‌رسی در ذرات و ظرفیت زیاد نگهداری آب و پایداری ساختاری تعادل مناسبی نشان داد. اما در فرسایش متوسط، با کاهش ذرات ریز و افزایش نسبی شن، بافت به لومی‌شنی تغییر یافت که موجب کاهش تخلخل و توان ذخیره آب شد. سرانجام، در فرسایش شدید، با غالب شدن ذرات شن و کاهش قابل توجه رس و لای، توانایی خاک در حفظ آب، تخلخل و پایداری ساختاری به شدت کاهش یافت و شرایط نامناسبی برای رشد گیاهان و فعالیت میکروبی فراهم آورد (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شدت‌های زیاد فرسایش بادی، کاهش اندازه‌های کربن آلی،

جدول ۲ - مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شدت‌های فرسایش.

Table 2 – Comparison of mean values showing the effect of erosion on soil physicochemical properties.

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Organic Carbon (%)	0.59 ^a	0.47 ^b	0.30 ^c	0.16 ^d
Total Nitrogen (%)	0.063 ^a	0.048 ^b	0.023 ^c	0.016 ^c
Available Potassium (mg/kg)	161.3 ^a	148.6 ^b	96.5 ^c	79.0 ^d
Available Phosphorus (mg/kg)	8.32 ^a	7.78 ^b	4.55 ^c	3.45 ^d
pH	7.68 ^a	7.63 ^a	7.69 ^a	7.61 ^a
EC (dS/m)	0.54 ^c	0.60 ^{bc}	0.70 ^b	0.93 ^a
Bulk Density(g/cm ³)	1.36 ^c	1.41 ^c	1.49 ^b	1.58 ^a
Porosity (%)	46.6 ^a	42.5 ^b	35.9 ^c	33.2 ^c
Soil texture	Loamy clay	Loamy clay	Loamy sand	Sandy

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار است (p<0.05).

Different letters in each row indicate significant differences (p < 0.05).

پژوهش، بیشترین همبستگی مثبت میان پتاسیم قابل جذب و فسفر قابل جذب مشاهده شد که نشان‌دهنده هم‌زمانی تغییرات این دو عنصر در خاک است. از سوی دیگر، رابطه اسیدیته با بیشتر ویژگی‌ها ضعیف بود، به‌جز پتاسیم قابل جذب که همبستگی مثبت و نسبتاً زیادی با آن نشان داد. این یافته‌ها بیانگر آن است که تغییرات فیزیکی ناشی از فرسایش، مستقیماً بر وضعیت حاصلخیزی و ویژگی‌های شیمیایی خاک اثرگذار است و کاهش کیفیت خاک را در پی دارد (جدول ۳ و شکل ۲).

نتایج ضریب همبستگی پیرسون نشان داد رابطه میان فرسایش و بیشتر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک معنی‌دار بود. همبستگی فرسایش با جرم مخصوص ظاهری و هدایت الکتریکی مثبت و بسیار زیاد بود. همبستگی فرسایش با تخلخل، کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و فسفر قابل جذب منفی و بسیار زیاد بود که بیانگر کاهش مواد آلی و عناصر غذایی خاک در اثر افزایش فرسایش است. همچنین، رابطه جرم مخصوص ظاهری با بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌جز اسیدیته بسیار منفی بود. در این

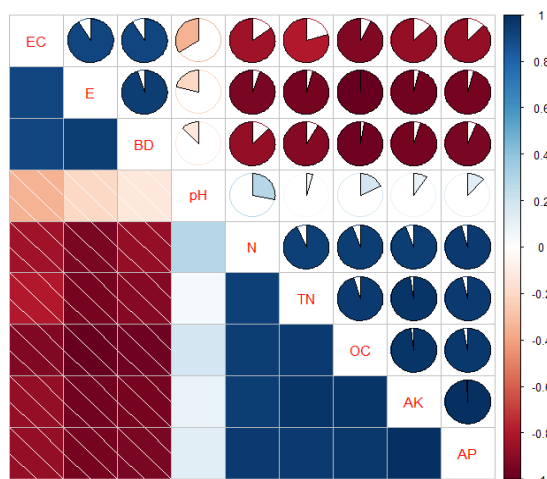
جدول ۳ - نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.

Table 3 – Pearson correlation coefficients among soil physicochemical properties.

	E	BD	N	OC	TN	AK	AP	PH	EC
E	1								
BD	0.94**	1							
N	-0.94**	-0.87**	1						
OC	-0.99**	-0.97**	0.94**	1					
TN	-0.95**	-0.91**	0.93**	0.95**	1				
AK	-0.96**	-0.95**	0.94**	0.97**	0.97**	1			
AP	-0.95**	-0.94**	0.95**	0.96**	0.95**	0.99**	1		
PH	-0.20 ^{ns}	-0.12 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.91**	0.12 ^{ns}	1	
EC	0.91**	0.91**	-0.84**	-0.92**	-0.79**	-0.87**	-0.87**	-0.34*	1

فرسایش (E)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، تخلخل (N) کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، (**: معنی‌دار در سطح ۹۹٪، *: معنی‌دار در سطح ۹۵٪ و ns: معنی‌دار نبودن).

Erosion (E), Bulk Density (BD), Porosity (N) Organic Carbon (OC), Total Nitrogen (TN), Available Potassium (AK), Available Phosphorus (AP), Soil Acidity (pH), Electrical Conductivity (EC), (**: significant at the 99% confidence level, *: significant at the 95% confidence level, and ns: not significant).



شکل ۲- ماتریس همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.
Figure 2- Pearson correlation matrix for soil physicochemical properties.

تأثیر فرسایش بر ویژگی‌های میکروبی خاک

تغییرات نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده و سهم میکروبی خاک تفاوت در میان سطوح مختلف فرسایش معنی‌دار نبود، که نشان‌دهنده پایداری نسبی این نسبت‌ها در برابر فشار ناشی از فرسایش است. از این رو، می‌توان از شاخص‌هایی مانند فعالیت آنزیمی، تنفس میکروبی و زیست‌توده به‌عنوان معیارهای مناسب ارزیابی اثرات فرسایش بادی در خاک‌های مناطق خشک استفاده کرد (جدول ۴).

نتایج جدول تجزیه پراکنش نشان داد اثر شدت فرسایش بادی بر بیشتر شاخص‌های زیستی خاک مانند فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته میکروبی، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیس‌ها، بسیار معنی‌دار بود و تغییرات این ویژگی‌ها در میان سطوح مختلف فرسایش زیاد بود. این یافته‌ها بیانگر حساسیت زیاد فرایندهای زیستی خاک به تغییرات ناشی از فرسایش و نابودی زیستگاه میکروبی است. از سوی دیگر،

جدول ۴- تجزیه پراکنش شدت فرسایش بر ویژگی‌های میکروبی خاک.

Table 4- Analysis of variance of wind erosion intensity on soil microbial properties.

Soil parameters	df	Mean Squares	F
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	146.7 1.75	83.8**
Basal Microbial Respiration ($\text{mg CO}_2/\text{g soil}\cdot\text{day}$)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	0.06 000	344.7**
Basal respiration ($\text{mg CO}_2/\text{g soil}\cdot\text{day}$)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	0.18 0.001	283.2**
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	8587.7 51.9	165.4**
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	42.7 0.12	333.7**
MBC/ MBN (mg/kg)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	3.44 1.10	3.13 ^{ns}
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	2.86 0.005	522.2**
Microbial Quotient ($\text{mg Cmic} / \text{g Corg}$)	Between Groups: 3 Within Groups: 16	25.3 7.71	3.28 ^{ns}

** : معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ns: معنی‌دار نبودن.

** : significance at the 1% probability level, ns: non- significant.

شدت فرسایش بر جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز به شدت تأثیرگذار بود و در شرایط فرسایش شدید کاهش آن محسوس بود. از سوی دیگر، تغییرات سهم میکروبی در میان سطوح مختلف فرسایش معنی‌دار نبود، هرچند در برخی شرایط سهم میکروبی خاک بیشتر بود. در نتیجه می‌توان گفت فرسایش بادی با کاهش کیفیت زیستگاه و محدودیت دسترسی به منابع غذایی، منجر به کاهش فعالیت‌های زیستی و کاهش کارکردهای بوم‌سازگان خاک می‌شود (جدول ۵).

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش شدت فرسایش بادی، کاهش شاخص‌های زیستی خاک معنی‌دار بود. روند فعالیت آنزیم کاتالاز نزولی بود که بیانگر حساسیت زیاد این آنزیم به نابودی ساختار خاک است. همچنین، تنفس پایه و تنفس برانگیخته میکروبی در شدت‌های بیشتر فرسایش کاهش یافتند که نشان‌دهنده کاهش فعالیت متابولیکی و محدودیت توان تجزیه مواد آلی به وسیله میکروارگانیسم‌ها است. کاهش زیست‌توده کربن و نیتروژن میکروبی نیز چشم‌گیر بود. تغییرات نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده قابل توجه بود و نسبتاً پایدار باقی ماند.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر فرسایش بر ویژگی‌های میکروبی خاک.

Table 5 – Mean comparison of erosion effects on soil microbial properties.

Soil parameters	Erosion intensity			
	No erosion	low	Moderate	intensity
Catalase Enzyme ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1}$ dry soil)	33 ^a	31 ^a	23 ^b	18 ^c
Basal Microbial Respiration ($\text{mg CO}_2/\text{g soil}\cdot\text{day}$)	0.42 ^a	0.40 ^b	0.23 ^c	0.12 ^d
Basal respiration ($\text{mg CO}_2/\text{g soil}\cdot\text{day}$)	0.73 ^a	0.69 ^a	0.42 ^b	0.20 ^c
Microbial Biomass Carbon (mg/kg)	163.6 ^a	155 ^a	102.6 ^b	48.0 ^c
Microbial Biomass Nitrogen (mg/kg)	12.1 ^a	10.3 ^b	6.7 ^c	3.7 ^d
MBC/ MBN (mg/kg)	13.4 ^a	14.9 ^a	15.1 ^a	13.0 ^a
Microorganism Population ($\text{CFU} \times 10^7 \text{ g}^{-1}$ dry soil)	3.43 ^a	2.99 ^b	1.87 ^c	1.31 ^d
Microbial Quotient ($\text{mg Cmic} / \text{g Corg}$)	27.5 ^{ab}	33.0 ^{ab}	33.4 ^{ab}	29.0 ^{ab}

حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار است ($p < 0.05$).

Different letters in each row indicate significant differences ($p < 0.05$).

زیست‌توده میکروبی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، رابطه مثبت و بسیار زیاد میان شاخص‌های زیستی نشان داد که این ویژگی‌ها به شکل یک شبکه عملکردی به هم وابسته‌اند و تغییر در یکی، به تغییر مشابه در دیگر شاخص‌ها منجر می‌شود. همبستگی نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده میکروبی با بیشتر شاخص‌ها ضعیف بود، اما با سهم میکروبی مثبت و زیاد بود که بیانگر نقش ساختار شیمیایی زیست‌توده در سهم نسبی میکروبی است (شکل ۳).

در این پژوهش نتایج بررسی ضریب‌های همبستگی پیرسون نشان داد افزایش فرسایش خاک با کاهش محسوس عملکردهای زیستی همراه بود (جدول ۶)، به طوری که همبستگی همه شاخص‌های مهم (فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس میکروبی پایه و برانگیخته، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها)، با فرسایش منفی و بسیار زیاد بود. این یافته بیانگر آن است که نابودی فیزیکی خاک در اثر فرسایش، محیط زیست میکروبی را محدود و توان متابولیکی و تولید

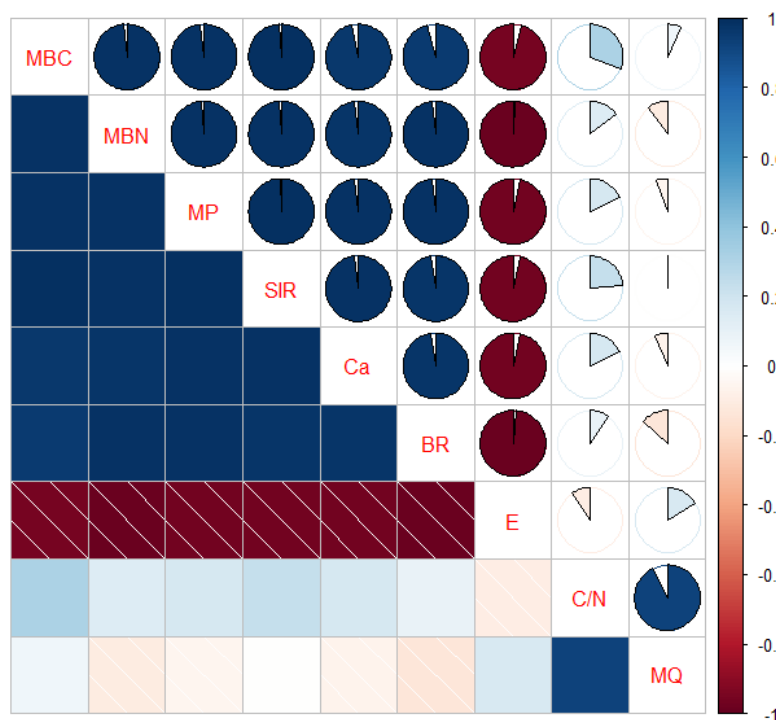
جدول ۶- نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های میکروبی خاک.

Table 6- Results of Pearson correlation analysis for soil microbial properties.

	E	Ca	MP	SIR	MBC	MBN	C/N	BR	MQ
E	1								
Ca	-0.96**	1							
MP	-0.96**	0.98**	1						
SIR	-0.96**	0.98**	0.99**	1					
MBC	-0.95**	0.96**	0.98**	0.99**	1				
MBN	-0.98**	0.97**	0.98**	0.98**	0.98**	1			
C/N	-0.95**	0.17 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.31*	0.14 ^{ns}	1		
BR	-0.98**	0.97**	0.98**	0.97**	0.95**	0.98**	0.09 ^{ns}	1	
MQ	0.16 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.005 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.10 ^{ns}	0.92**	-0.13 ^{ns}	1

فرسایش (E)، آنزیم کاتالاز (Ca)، تنفس میکروبی پایه (MP)، تنفس بر انگیخته (SIR)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBN)، نسبت کربن به نیتروژن زیتوده میکروبی (C/N)، جمعیت میکروارگانیزم‌ها (BR)، سهم میکروبی (MQ)، (**): معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، (*): معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و (ns): معنی‌دار نبودن).

Erosion (E), Catalase enzyme (Ca), Basal microbial respiration (MP), Induced Respiration (SIR), Microbial Biomass Carbon (MBC), Microbial Biomass Nitrogen (MBN), Microbial Biomass C/N Ratio (C/N), Microorganism population (BR), Microbial Quotient (MQ), (**): significant at the 99% confidence level, (*): significant at the 95% confidence level, and ns: not significant).



شکل ۳- ماتریس همبستگی پیرسون برای ویژگی‌های میکروبی خاک.

Figure 3- Pearson correlation matrix for soil microbial properties.

گیاهی شدت یافته است (سالوو-روتیمی و همکاران ۲۰۲۱). در این پژوهش پیامدهای فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی خاک در بوم‌سازگان خشک ایران شهر بررسی شد و نتایج بیانگر آن بود که

فرسایش بادی خاک یک فرآیند طبیعی در محیط‌های خشک و با پوشش گیاهی کم است که در سال‌های گذشته به دلیل تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی مانند شخم‌زنی، چرای بیش از حد و برداشت پوشش

در این پژوهش، با افزایش شدت فرسایش، کاهش تخلخل خاک قابل توجه بود، که بیانگر فشرده شدن خاک و از بین رفتن فضای خالی میان ذرات است. این وضعیت باعث محدودیت جریان آب و هوا در خاک شده و محیط را برای فعالیت میکروبی و فرآیندهای زیستی نامناسب می‌کند (پلاتنیکووا و همکاران ۲۰۲۴). چنین تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی خاک هم کیفیت آن را کاهش می‌دهد هم پایداری بوم‌سازگان خشک را تهدید می‌کند. زیرا، خاک آب را کمتر جذب و ذخیره می‌کند و ظرفیت نگهداری پوشش گیاهی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین ماده آلی نقش مهمی در تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها دارد و افزایش محتوای ماده آلی، موجب افزایش قابل توجه پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (رزاجووا و همکاران ۲۰۲۱).

اثر فرسایش بادی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

بر اساس نتایج این پژوهش فرسایش بادی به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های شیمیایی خاک اثرگذار بود که در نتیجه سبب تغییرات قابل توجهی بر فعالیت میکروبی خاک شد. با افزایش شدت فرسایش اندازه‌های کربن آلی، نیتروژن کل، و عناصر غذایی قابل دسترس از جمله پتاسیم و فسفر خاک کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش منابع غذایی میکروارگانیسم‌ها و کاهش ظرفیت خاک برای حفظ مواد مغذی است. این یافته‌ها با نتایج پیمنتال و بورگس (۲۰۱۳)، مندال و همکاران (۲۰۲۱) و مندال و همکاران (۲۰۲۳) هم راستا است. با افزایش شدت فرسایش، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، اندازه عناصر غذایی و ماده آلی خاک کاهش یافت. این پدیده، ساختار خاک را ضعیف و کیفیت زیست‌محیطی آن را کاهش داد. کاهش ماده آلی خاک هم به دلیل شستشوی سطحی و هم به دلیل برداشت خاک سطحی و آشکار شدن افق‌های زیرین که از نظر مواد آلی فقیرتر هستند، رخ می‌دهد (مرادی و همکاران ۲۰۲۴). کاهش ماده آلی باعث اختلال در فعالیت‌های میکروبی خاک، کاهش ظرفیت نگهداری آب، کاهش پایداری خاکدانه‌ها و تغییر در pH خاک و

چگونه این پدیده باعث تغییر شاخص‌های مهم خاک و ساختار میکروبی شد. فرسایش خاک تعادل زیستی و پایداری بوم‌سازگان را تهدید می‌کند. اثرات فرسایش بادی بر ویژگی‌های فیزیکی با تغییر بافت خاک همراه بود. فرسایش بادی با حذف ذرات ریز و افزایش ذرات درشت باعث سبک‌تر شدن خاک و کاهش پایداری ساختار آن شد. این تغییرات ظرفیت نگهداری آب و تخلخل خاک را کاهش داد و سبب کاهش ظرفیت خاک برای تغذیه پوشش گیاهی و فعالیت میکروبی شد. در نتیجه، بر اساس نتایج پژوهش ژو و همکاران (۲۰۲۴) می‌توان گفت افزایش شدت فرسایش باعث افزایش شکنندگی و کاهش عملکرد بوم‌سازگان می‌شود. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های سیرجانی و همکاران (۲۰۲۴) هم راستا است. همچنین، نتایج نشان داد با افزایش شدت فرسایش بادی، جرم مخصوص ظاهری خاک به‌طور پیوسته افزایش یافت. این افزایش احتمالاً ناشی از کاهش ماده آلی و تجزیه ذرات ریز خاک است. زیرا، ماده آلی سبک نقش مهمی در کاهش تراکم و حفظ ساختار متخلخل خاک دارد. افزایش جرم مخصوص ظاهری معمولاً باعث کاهش نفوذپذیری آب و تهویه خاک می‌شود (ابوحمد و ریدر ۲۰۰۰) و توانایی خاک در حمایت از جوامع میکروبی و تثبیت بوم‌سازگان را کاهش می‌دهد (اصغری و ارخلو 2020). نتایج دیگر پژوهش‌ها بیانگر آن است که افزایش جرم مخصوص ظاهری در خاک‌های فرسایش‌یافته، ناشی از نابودی و از بین رفتن ساختار خاکدانه‌ای است (لیانگ و همکاران ۲۰۱۸). افزون بر این، افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش ماده آلی در خاک‌های فرسایش‌یافته باعث افزایش هدایت حرارتی و کاهش ظرفیت گرمایی خاک می‌شود. همچنین، فرسایش تغییرات روزانه و فصلی دمای خاک را افزایش می‌دهد که این تغییرات حرارتی به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش تنوع و عملکرد جوامع میکروبی می‌شود. زیرا، بسیاری از میکروب‌های خاک نسبت به تغییرات دمایی حساس هستند (گو و همکاران ۲۰۱۸).

چرخه جذب و آزادسازی عناصر غذایی می‌شود (سان و همکاران ۲۰۲۱). فرسایش خاک، لایه سطحی خاک را که معمولاً بیشترین ظرفیت جذب و نگهداری آب را دارد، از بین می‌برد و در نتیجه رطوبت کلی خاک کاهش می‌یابد. هم‌زمان، با نابودی خاکدانه‌های پایدار و از بین رفتن ساختار مطلوب خاک، نفوذپذیری، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد (گان و همکاران ۲۰۲۴). در اثر فرسایش ذرات ریز مانند رس و ماده آلی که نقش مهمی در نگهداری آب دارند، کاهش یافته و ظرفیت جذب آب خاک نیز کاهش می‌یابد. این فرآیند موجب کاهش رطوبت خاک در مناطق فرسایش‌یافته شده و شرایط نامطلوبی برای رشد گیاهان و فعالیت میکروبی فراهم می‌آید (نبی‌الهی و همکاران ۲۰۱۸). بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین تغییر کاربری زمین و فرسایش، به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های خشک، موجب کاهش کیفیت شیمیایی خاک می‌شود. در این شرایط، کاهش عناصر غذایی و حذف خاک سطحی با تضعیف ساختار خاکدانه‌ها و کاهش ظرفیت نگهداری آب همراه است (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). این تغییرات سبب کاهش فعالیت میکروبی خاک و کاهش توان بوم‌سازگان برای تثبیت خاک و نگهداری پوشش گیاهی می‌شود. همچنین، کاهش پتاسیم و فسفر قابل دسترس با افزایش فرسایش، به محدود شدن تغذیه گیاهان بومی و کاهش تنوع زیستی گیاهی منجر می‌شود. از سوی دیگر، افزایش هدایت الکتریکی خاک نشان‌دهنده تجمع نمک‌ها و تغییر ترکیب شیمیایی محیط است، که بر میکروارگانیسم‌ها اثرگذار بوده و در نتیجه ساختار جوامع میکروبی را تغییر می‌دهد (لوو و همکاران ۲۰۲۵). به‌طور هم‌زمان این دو اثر، کاهش عناصر مغذی و افزایش شوری، بوم‌سازگان خشک را آسیب‌پذیرتر می‌کند و روند نابودی خاک و کاهش پایداری زیست‌محیطی را تسریع می‌کند (زمان و همکاران ۲۰۲۵).

نتایج این پژوهش نشان داد اثرات فرسایش بادی بر همه ویژگی‌های میکروبی خاک قابل توجه بود. در این پژوهش با افزایش شدت فرسایش، اندازه تأثیرپذیری

سنجدهای بررسی‌شده نیز افزایش یافت. این یافته با نتایج کیو و همکاران (۲۰۲۱)، سلطانی طولارود و اصغری (۲۰۲۱) و لوو و همکاران (۲۰۲۵) هم راستا است. می‌توان نتیجه گرفت یکی از دلایل اصلی اثرات منفی شدت فرسایش بادی بر ویژگی‌های میکروبی خاک، کاهش ماده آلی و مواد مغذی است که منجر به کاهش تنوع و عملکرد جمعیت باکتری‌های خاک می‌شود. این کاهش باعث محدودیت دسترسی به منابع غذایی، کاهش فعالیت متابولیکی و تغییر ترکیب جمعیت باکتری‌ها شده و در نتیجه، کارکرد میکروارگانیسم‌های خاک و نقش آن‌ها در حفظ عملکرد خاک را مختل می‌کند (چن و همکاران ۲۰۲۰). کاهش آنزیم کاتالاز همراه با کاهش تنفس میکروبی پایه و تنفس برانگیخته با افزایش شدت فرسایش، نشان‌دهنده کاهش توان خاک در مقابله با فشار اکسیداتیو و کاهش فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها است. این کاهش فعالیت‌های میکروبی، سبب محدودیت فرایندهای حیاتی چرخه‌های کربن و نیتروژن شده و ظرفیت خاک در تجزیه سریع مواد آلی و تثبیت مواد مغذی را کاهش می‌دهد و در نتیجه توانایی خاک برای نگهداری پوشش گیاهی و حفظ عملکرد بوم‌سازگان‌های خشک را مختل می‌کند (چائو و ژو ۲۰۲۵). بیشترین اندازه فعالیت آنزیم کاتالاز در منطقه بدون فرسایش و با فرسایش کم مشاهده شد. شایان ذکر است آنزیم‌ها در عملکرد زیست‌شیمیایی خاک نقش بسیار مهمی دارند (لی و همکاران ۲۰۱۵). مواد آلی و عناصر غذایی در مناطق بدون فرسایش و یا با فرسایش کم باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شود (ماکویی و نداکیمی ۲۰۰۸). برای معدنی شدن مواد آلی خاک به‌وسیله میکروارگانیسم‌های خاک، باید آنزیم‌هایی مانند کاتالاز هیدرولیز شوند. به این دلیل مناطق بدون فرسایش و مناطق رسوبی نقش مهمی در فرایند معدنی شدن کربن آلی دارند (کیرکلس و همکاران ۲۰۱۴). کاهش کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها با افزایش شدت فرسایش نشان‌دهنده کاهش تنوع و تراکم میکروبی است. این

فرسایش شدید برخی فرایندهای حیاتی میکروبی ادامه دارند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت فرسایش بادی به‌عنوان عامل محدودکننده پایداری بوم‌سازگان‌های خشک در ایران شهر تأکید دارد. از این‌رو، بر اساس نتایج این پژوهش اجرای اقدامات مدیریت جامع خاک و حفاظت از پوشش گیاهی و پیشنهاد می‌شود. افزون بر این، به‌منظور بهبود ساختار، فعالیت میکروبی خاک و عملکرد بوم‌سازگان‌های خشک، اعمال تدابیر حفاظتی شامل تثبیت خاک با پوشش گیاهی مقاوم به خشکی، جلوگیری از چرای بیش از حد، کاهش شخم‌زنی و افزایش ماده آلی خاک، پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه زابل به‌دلیل حمایت مالی (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسؤل در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: ویرایش و بازبینی نتایج
نویسنده سوم: بازبینی متن مقاله

کاهش عمدتاً ناشی از کاهش منابع آلی، کاهش تخلخل و رطوبت خاک، و کاهش ظرفیت جامعه میکروبی در ذخیره و بازچرخ نیتروژن در خاک‌های نابودشده است. افزون بر این، دسترسی محدود به کربن قابل مصرف و کاهش توان زیستی میکروارگانیسم‌ها بر این روند اثرگذار است (ژائو و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش تغییرات سهم میکروبی خاک نسبت به کربن آلی قابل توجه نبود که بیانگر حفظ نسبتهای فعالیت زیستی میکروارگانیسم‌ها حتی در شرایط فرسایش شدید است. از این‌رو، با وجود کاهش مواد مغذی و فعالیت میکروبی، برخی فرایندهای حیاتی میکروبی در بوم‌سازگان‌های خشک همچنان فعال باقی می‌مانند (ژنگ و همکاران ۲۰۲۳). یافته‌های این پژوهش با نتایج مندل و جیری (۲۰۲۱)، ژائو و همکاران (۲۰۲۵) و کیو و همکاران (۲۰۲۱) هم راستا است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش در منطقه ایران شهر نشان داد که فرسایش بادی اثرات گسترده و چندجانبه‌ای بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در بوم‌سازگان‌های خشک دارد. افزایش شدت فرسایش باعث سبک‌تر شدن خاک، کاهش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب و نابودی ساختار خاکدانه‌ها شد. در نتیجه سبب کاهش توانایی خاک در نگهداری پوشش گیاهی و فعالیت میکروبی شد. کاهش محسوس کربن و نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، همراه با افزایش هدایت الکتریکی، نشان‌دهنده کاهش منابع غذایی میکروارگانیسم‌ها و تغییرات ترکیب شیمیایی محیط بود که سبب وارد آمدن فشار قابل توجهی بر جوامع میکروبی شد. این تغییرات با کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز، کاهش تنفس میکروبی پایه و برانگیخته و کاهش جمعیت و زیست‌توده میکروبی همراه بود. با این حال، سهم میکروبی خاک نسبت به کربن آلی تا حدی حفظ شد که بیانگر آن بود که حتی در شرایط

فهرست منابع

- Abu-Hamdeh NH, Reeder RC. 2000. Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 64(4):1285-1290. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>
- Acosta-Martinez V, Van Pelt S, Moore-Kucera J, Baddock MC, Zobeck TM. 2015. Microbiology of wind-eroded sediments: Current knowledge and future research directions. *Aeolian Research*. 18: 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.06.001>
- Bastani M, Sadeghipour A, Kamali N, Zarafshar M, Bazot S. 2023. How does livestock graze management affect woodland soil health?. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1028149. <https://doi.org/10.3389>
- Cao Y, Zhu T. 2025. Changes in soil properties shape how microbes mediate soil carbon sequestration under nitrogen addition. *Journal of Cleaner Production*. 514: 45819. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145819>
- Chen L, Baoyin T, Xia F. 2022. Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators*. 34: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108470>
- Chen Q, Dong J, Zhu D, Hu H, Delgado-Baquerizo M, Ma Y, He JZ, Zhu YG. 2020. Rare microbial taxa as the major drivers of ecosystem multifunctionality in long-term fertilized soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 141:107686. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107686>
- Colazo JC, Buschiazio D. 2015. The impact of agriculture on soil texture due to wind erosion. *Land Degradation and Development*, 26(1): 62–70. <https://doi.org/10.1002/ldr.2297>
- Creamean JM, Suski KJ, Rosenfeld D, Cazorla A, DeMott PJ, Sullivan RC, White AB, Ralph FM, Minnis P, Comstock JM, Tomlinson, JM, Prather KA. 2013. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the Western U.S. *Science*. 339(6127):1572–1578. <https://doi.org/10.1126/science.1227279>
- Diallo ID, Tilioua A, Darraz C, Alali A, Sidibe D. 2023. Study and analysis of seasonal soil degradation in Lower Guinea and Forest Guinea. *Results in Engineering*. 19: 101381. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101381>
- Dorudi H, Khosroshahi M, Shahabi M. 2024. Investigating of climatic elements affecting the sand dunes activity and sensitivity analysis using the Lancaster index (Case study: Iranshahr). *Spatial Analysis Environmental Hazards*. 11(3):1–20. (In Persian). <https://doi.org/10.61186/jsaeh.11.3.2>
- Dou X, Ma X, Zhao C, Li J, Yan Y, Zhu J. 2022. Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. *Catena*. 212: 106056. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106056>
- Gan F, Shi H, Gou J, Zhang L, Dai Q, Yan Y. 2024. Responses of soil aggregate stability and soil erosion resistance to different bedrock strata dip and land use types in the karst trough valley of Southwest China. *International Soil and Water Conservation Research*. 12(3): 684–696. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.002>
- Guo X, Feng J, Shi Z, Zhou X, Yuan M, Tao X, Hale L, Yuan T, Wang J, Qin Y, Zhou A, Fu Y, Wu L, He Z, Nostrand J, Ning D, Liu X, Luo X, Tiedje J, Yang Y, Zhou J. 2018. Climate warming leads to divergent succession of grassland microbial communities. *Nature Climate Change*. 8(9): 813–818. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0254-2>
- Iturri LA, Buschiazio DE. 2023. Interactions between wind erosion and soil organic carbon. In *Agricultural Soil Sustainability and Carbon Management*. Academic Press. pp. 163–179. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95911-7.00005-0>
- Kheirabadi H, Mahmoodabadi M, Jalali V, Naghavi H. 2018. Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma*. 323: 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.042>
- Kirkels FMSA, Cammeraat LHN, Kuhn J. 2014. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes: A review of different concepts. *Geomorphology*. 226: 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.023>
- Li Z, Xiao H, Tang Z, Huang J, Nie X, Huang B, Ma W, Lu Y, Zeng G. 2015. Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China. *European Journal of Soil Biology*. 71: 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.10.003>
- Liang Y, Lal R, Guo S, Liu R, Hu Y. 2018. Impacts of simulated erosion and soil amendments on greenhouse gas fluxes and maize yield in Miamian soil of central Ohio. *Scientific Reports*. 8(1): 520. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18922-6>
- Luo S, Yuan J, Song Y, Ren J, Qi J, Zhu M, Feng Y, Li M, Wang B, Li X, Song C. 2025. Elevated salinity decreases microbial

- communities' complexity and carbon, nitrogen and phosphorus metabolism in the Songnen Plain wetlands of China. *Water Research*. 276: 123285.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123285>
- Mai Z, Chen Q, Wang L, Zhang J, Cheng H, Su H, Zhang S, Li J. 2024. Bacterial carbonic anhydrase-induced carbonates mitigate soil erosion in biological soil crusts. *Journal of Environmental Management*. 352: 120085.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120085>
- Makoi JH, Ndakidemi PA. 2008. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. *African Journal of Biotechnology*. 7: 181–191.
<https://doi.org/10.4314/ajb.v7i3.58355>
- Mandal D, Chandrakala M, Alam NM, Roy T, Mandal U. 2021. Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India. *Catena*. 204:105440.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105440>
- Mandal D, Patra S, Sharma NK, Alam NM, Jana C, Lal R. 2023. Impacts of soil erosion on soil quality and agricultural sustainability in the north western Himalayan region of India. *Sustainability*. 15(6):5430.
<https://doi.org/10.3390/su15065430>
- Mandal D, Giri N. 2021. Soil erosion and policy initiatives in India. *Current Science*. 120(6): 1007–1012.
<https://www.jstor.org/stable/27310319>
- Moradi HR, Rezaei V, Erfanian M. 2024. Investigation of physicochemical characteristics of soil in badland areas formation. *Researches in Earth Sciences*. 15(3):91–105. (In Persian)
<https://doi.org/10.48308/esrj.2021.101282>
- Nabiollahi K, Golmohamadi F, Taghizadeh-Mehrjardi R, Kerry R, Davari M. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*. 318: 16–28.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024>
- Owens PN. 2020. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: A review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Journal of Soils and Sediments*. 20: 4115–4143.
<https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9>
- Pimentel D, Burgess M. 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture*. 3: 443–463. <https://doi.org/10.3390/agriculture3030443>
- Plotnikova OO, Demidov VV, Farkhodov YR, Tsymbarovich PR, Semenov IN. 2024. Influence of water erosion on soil aggregates and organic matter in arable Chernozems: Case study. *Agronomy*. 14(8):1607.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14081607>
- Qiu L, Zhang Q, Zhu H, Reich PB, Banerjee S, van der Heijden MG, Wei X. 2021. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. *The ISME Journal*. 15(8):2474–2489.
<https://doi.org/10.1038/s41396-021-00946-4>
- Rezáčová V, Czako A, Stehlik M, Mayerová M, Šimon T, Smatanová M, Madaras M. 2021. Organic fertilization improves soil aggregation through increases in abundance of eubacteria and products of arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientific Reports*. 11(1): 12548.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-91653-x>
- Salawu-Rotimi A, Lebre PH, Vos HC, Fister W, Kuhn N, Eckardt FD, Cowan DA. 2021. Gone with the Wind: microbial communities associated with dust from emissive farmlands. *Microbial Ecology*. 82: 859–869.
<https://doi.org/10.1007/s00248-021-01717-8>
- Schuman GE, Janzen HH, Herrick JE. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*. 116:391–396.
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00215-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00215-9)
- Sirjani E, Sameni A, Mahmoodabadi M, Moosavi AA, Laurent B. 2024. In-situ wind tunnel experiments to investigate soil erodibility, soil fractionation and wind-blown sediment of semi-arid and arid calcareous soils. *Catena*. 241: 108011.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108011>
- Soltani Toularoud A, Asghari S. 2021. Assessment the effect of slope aspect and position on some soil microbial indices in rangeland and forest. *Environmental Erosion Research Journal*. 11(1):58–74. (In Persian).
<http://dx.doi.org/10.52547/jeer.11.1.58>
- Sun J, Fu B, Zhao W, Liu S, Liu G, Zhou H, Shao X, Chen Y, Zhang Y, Dend Y. 2021. Optimizing grazing exclusion practices to achieve Goal 15 of the sustainable development goals in the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*. 66:1493–1496.
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.014>
- Tanner S, Ben-Hur M, Argaman E, Katra I. 2023. The effects of soil properties and aggregation on sensitivity to erosion by water and wind in two Mediterranean soils. *Catena*. 221:106787.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106787>
- Wang BR, An SS, Liang C, Liu Y, Kuzayakov Y. 2021. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*. 162: 108422.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>

Zainuddin SNH, Ariffin EH, Taslin PN A, Dong WS, Ramli MZ, Abdul Maulud KN, Awang NA, Nadzri MI, Ibrahim MSI, Ratnayake AS. 2024. Sand dune restoration as sustainable natural architectural design for coastal protection along seasonal storm-prone beach. *Results in Engineering*. 22: 102149. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102149>

Zaman W, Ayaz A, Puppe D. 2025. Biogeochemical cycles in plant–soil systems: significance for agriculture, interconnections, and anthropogenic disruptions. *Biology*. 14(4): 433. <https://doi.org/10.3390/biology14040433>

Zhang X, Pei G, Zhang T. 2023. Erosion effects on soil microbial carbon use efficiency in the Mollisol cropland in northeast China. *Soil Ecology Letters*. 5(4): <https://doi.org/10.1007/s42832-023-0176-4>

Zhao C, Li Y, Zhou Z, Wu R, Su M, Song H. 2025. Simulated wind erosion and local dust deposition affect soil micro-food web by changing resource availability. *Ecological Processes*. 14(1): 7.

<https://doi.org/10.1186/s13717-024-00574-w>

Zolfaghari F, Shojaei S, Khosravi H, Bandak, I. 2024. Evaluation of the effect of the mixture of soil textural compounds on the strength of the soil crust: coding and optimization. *Results in Engineering*. 22: 101988.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101988>

Zuo X, Zhang C, Zhang X, Wang R, Zhao J, Li W. 2024. Wind tunnel simulation of wind erosion and dust emission processes, and the influences of soil texture. *International Soil and Water Conservation Research*. 12(2): 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.08.005>



Analysis of the Impacts of Wind Erosion on the Chemical and Microbial Properties of Soil in the Dryland Ecosystem of Iranshahr, Sistan and Baluchestan Province

Morteza Saberi^{*1} , Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno² , Rasool Khatibi³ 

1 and 2- Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

3- Assistant Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Soil degradation is closely related to the increased wind erosion, which is a major environmental challenge worldwide, especially in arid and semi-arid regions. Because, in these areas, soils have low cohesion and their structure is unstable and vegetation cover is sparse. In addition to the widespread effects of wind erosion on climate, air quality, and human health on a global scale, fine organic particles present on the soil surface are displaced and destroyed by this phenomenon. This process leads to a significantly reduces nutrient reserves, reduces fertility, and destroys the physical and biological structure of the soil. Considering the arid climatic conditions of the Iranshahr region in Sistan and Baluchestan Province and the effective role of strong winds in increasing wind erosion, investigating the consequences of this phenomenon on changes in soil properties is of particular importance. Therefore, this study aimed to investigate the consequences of wind erosion on the physical, chemical, and microbial properties of the soil of arid ecosystems in Iranshahr.

Materials and Methods

In the present study, based on field visits, field observations, and erosion maps of the region, the intensity of soil erosion as the main treatment was categorized into four levels: no erosion, low, moderate, and severe erosion. To investigate the effects of these treatments on soil property variations, sampling was conducted in the Rahmatabad watershed of Iranshahr using a completely randomized design in June 2023. At each erosion level, four homogeneous sites with approximately similar physiographic conditions were selected, and five soil samples were collected from each site at a depth of 0–30 cm. The samples were combined using a composite method. Some of the samples were transported to the laboratory immediately after harvest in sealed containers to measure biological properties, while maintaining the initial humidity, and stored in a refrigerator.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** Mortezasaberi@uoz.ac.ir

Citation: Saberi, M., Dahmardeh Ghaleno, M.R., Khatibi, R. 2026. Analysis of the Impacts of Wind Erosion on the Chemical and Microbial Properties of Soil in the Dryland Ecosystem of Iranshahr, Sistan and Baluchestan Province. *Watershed Management Research*. 39(1): 64-83.

DOI: 10.22092/WMRJ.2025.370497.1630

Received: 23 August 2025, **Received in revised form:** 01 September 2025, **Accepted:** 22 September 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 64-83.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



The other part was prepared for determination of physical and chemical properties after drying in the open air and passing through a 2 mm sieve. Physical properties including soil texture, bulk density, and porosity; chemical properties included organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and potassium, pH, and electrical conductivity; and microbial properties included catalase enzyme activity, basal and induced microbial respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, and microbial contribution were evaluated. Data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) in SPSS version 26, and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at a 95% confidence level. Additionally, correlations among the studied properties were evaluated using R software.

Results and Discussion

The research findings showed that the effect of wind erosion intensity on the physical, chemical, and microbial properties of the soil was significant. Data analysis revealed that as erosion intensity increased, organic carbon and total nitrogen decreased significantly. Soil organic carbon decreased from 0.59% in non-eroded areas to 0.16% and total nitrogen decreased from 0.063 to 0.016% in severely eroded areas. Also, the sensitivity of available potassium and phosphorus to erosion was very high, with potassium decreasing from 161.3 to 79 mg/kg and available phosphorus decreasing from 8.32 mg/kg to 3.45 mg/kg, which was probably due to the movement of fine, nutrient-rich particles by the wind. Soil electrical conductivity of the soil increased with increasing erosion intensity from 0.54 dS/m in areas without erosion to 0.93 dS/m in severely eroded areas. Soil bulk density also increased from 1.36 to 1.58 g/cm³ and the porosity decreased from 46.6% to 33.2%, indicating greater soil compaction and degradation of soil aggregate structure. The decrease in catalase enzyme activity, basal and stimulated microbial respiration, biomass nitrogen, and microbial population was significant ($p < 0.01$) with increasing erosion intensity. These findings indicated limited food resources and reduced metabolic activity of microorganisms. However, change in biomass carbon to nitrogen ratio and soil microbial contribution were not significant ($p < 0.05$). This finding indicated the relative stability of some microbial processes even under severe erosion conditions. The results of this study showed that wind erosion reduced both the quality and quantity of soil nutrients and organic matter, and had a severe impact on soil structure and microbial activity. Therefore, these indices can be used as appropriate criteria for evaluating the effects of wind erosion in arid ecosystems, especially in Iranshahr. Correlation analysis showed that the effect of soil erosion on microbial characteristics was very negative. The correlation of catalase enzyme activity (-0.96), microbial respiration (-0.96), microbial carbon biomass (-0.95) and nitrogen (-0.98), and microorganism population (-0.98) with erosion intensity was very high and negative. Biological indicators functioned in a dependent manner, such that the relationship between the biomass carbon to nitrogen ratio and the microbial contribution was highly positive (0.92). These findings confirmed the reduction in the performance of the soil microbial network under the influence of erosion.

Conclusion and Suggestions

The results of the study in Iranshahr indicated that the best physical, chemical, and microbial soil conditions were observed in the treatment without erosion. The lowest specific gravity, highest porosity, highest water retention capacity, and highest soil microbial activity were related to the aforementioned treatment. As erosion intensity increased from low to high, soil quality steadily decreased; so that under conditions of high erosion, the greatest destruction of soil structure, reduction of available carbon, nitrogen, potassium, and phosphorus, and increase in electrical conductivity were observed. These findings indicated that optimal stability of the structure and function of dryland ecosystems is possible under conditions where minimal or no erosion occurs. Therefore, based on the results of this study, it is recommended to protect vegetation cover, reduce overgrazing, reduce plowing, and increase organic matter to prevent soil from entering advanced stages of erosion.

Keywords: Catalase enzyme activity, drylands, microbial diversity, organic carbon, wind erosion

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors of this article would like to thank the University of Zabol for financial support (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) in conducting this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, conducting qualitative/statistical analyses, drafting the initial version of the manuscript: Conceptualization, conducting qualitative/statistical analyses, drafting the initial version of the manuscript

Author 2: Editing and reviewing the results

Author 3: Reviewing the manuscript

پایش آب‌های سطحی سیلاب با استفاده از قطبش‌های مختلف و شاخص‌های طیفی آب مبتنی بر سنجش از دور در آبخیز کرخه

زینب حزباوی*^۱، مرضیه قشمشی^۲

۱- دانشجویار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کویرشناسی سمنان، سمنان، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

بر اساس آمار جهانی، سیلاب بر بیش از ۴۰٪ از جمعیت جهان اثرگذار است و سبب خسارت جانی و مالی قابل توجهی می‌شود. در ایران، بیش از ۸۰٪ از شهرها در معرض خطر سیلاب هستند. از این‌رو، سرمایه‌گذاری برای انجام اقدامات پیشگیرانه و فناوری‌های پیشرفته برای مبارزه با سیلاب بیش از هر زمان دیگری ضروری است. آمادگی داشتن و کاهش خطر پیش از رویداد بلافاصله سبب کاهش معنادار هزینه‌های بازسازی پس از آن می‌شود. نقشه‌برداری دقیق و پایش بلندمدت سیلاب نقش مهمی در برنامه‌ریزی و پیشگیری دارد. یکی از ابزارهای کارآمد برای پایش و نقشه‌برداری سیلاب در مدیریت بهینه بلافاصله، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. اگرچه تصاویر راداری با دیافراگم مصنوعی (SAR) سنتینل-۱ در شرایط ابری برای شناسایی مناطق سیلابی مفید هستند، اما این روش نیز محدودیت‌هایی دارد. حساسیت داده‌های راداری به پوشش گیاهی متراکم و سازه‌های عمودی ممکن است باعث برآورد کم یا زیاد مناطق آب‌گرفته شود. همچنین، شاخص آب تفاضلی بهنجار شده (NDWI)، شاخص آب تفاضلی بهنجار شده اصلاح شده (MNDWI) و شاخص استخراج خودکار آب (AWEI) به‌دست آمده از داده‌های نوری در شرایط ابری یا سایه گیاهان ممکن است خطا داشته باشند و باعث شناسایی ناقص یا اشتباه مناطق سیلابی شوند. از این‌رو، نتایج به‌دست آمده از هر دو روش باید با دقت تفسیر شوند و با ترکیب داده‌های راداری و نوری می‌توان این محدودیت‌ها را کاهش داد، ولی آن‌ها را به‌طور کامل از بین نمی‌برد. از این‌رو، در این پژوهش داده‌های رادار و نوری با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور مرتبط با طیف آب، تحلیل و مقایسه شدند و مناطق سیلابی در آبخیز کرخه در استان خوزستان شناسایی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: hazbavi.zeinab@gmail.com

استناد: حزباوی، ز.، قشمشی، م. ۱۴۰۵. پایش آب‌های سطحی سیلاب با استفاده از قطبش‌های مختلف و شاخص‌های طیفی آب مبتنی بر سنجش از دور در آبخیز کرخه. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۱۰۷-۸۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370814.1635

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۸۴ تا ۱۰۷.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

در آبخیز کرخه در ماه‌های فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۸ سیلاب گسترده و غیرقابل پیش‌بینی رخ می‌دهد که منجر به خسارت قابل توجهی می‌شود. بر این اساس، منطقه‌ای به مساحت $3838/3$ کیلومترمربع انتخاب شد. در این پژوهش، از سه روش مختلف برای شناسایی و تحلیل آب‌های سطحی ناشی از سیلاب استفاده شد: (۱) در راستای آشکارسازی تغییرات، از داده‌های سه بازه زمانی شامل پیش از فصل کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷)، پس از فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) و هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) استفاده شد. (۲) تصویرهای SAR به دست آمده از ماهواره سنتینل-۱ با قطبش‌های VV و VH با استفاده از فیلتر Refined Lee و الگوریتم آستانه Otsu به منظور شناسایی پهنه‌های سیلابی، پردازش شدند. (۳) برای استخراج دقیق‌تر آب‌های سطحی از تصویرهای نوری، شاخص‌های طیفی آب شامل NDWI، MNDWI و AWEI به دست آمده از ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. شایان ذکر است که AWEI در دو نسخه بدون سایه برای مناطق باز و با سایه برای کاهش اثر سایه در نواحی شهری و کوهستانی وجود داشت که در این پژوهش از نسخه بدون سایه استفاده شد. در پایان، با تلفیق نتایج به دست آمده از روش‌های راداری و نوری و تحلیل تغییرات چندزمانه، نقشه‌های جامعی از گسترش سیلاب تولید و اعتبارسنجی شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد عملکرد قطبش VH با اندازه ۲۵۴ کیلومترمربع در تشخیص مناطق سیلابی کمی بهتر از قطبش VV با اندازه ۲۵۲ کیلومترمربع بود. با یک روش ترکیبی و استفاده از هر دو قطبش و فقط با انتخاب مناطقی با پراکندگی بازگشتی کم در هر دو قطبش، ۲۳۹ کیلومترمربع از مناطق سیلابی، شناسایی شد. ترکیب قطبش‌ها دقت و قابلیت اطمینان نقشه‌برداری سیلاب را بهبود بخشید و به دلیل حساس نبودن رادار به پوشش ابر و شرایط روشنایی، نسبت به داده‌های نوری، برتری داشت. نتایج تجزیه و تحلیل زمانی آب‌های دائمی و موقت در روش ترکیبی (VV+VH) در سه دوره نشان داد که پوشش آب پیش از فعالیت‌های کشاورزی زیاد (۱۵۶۰ کیلومترمربع) بود، در اواخر زمستان به اندازه ۸۴۷ کیلومترمربع کاهش یافت. سپس، در طول رویداد سیلاب به تقریباً ۹۷۴ کیلومترمربع افزایش یافت. با وجود آب کمتر در مقایسه با دوره پیش از فعالیت‌های کشاورزی، سیلاب گسترده‌ای به دلیل بارندگی شدید، ناگهانی و ظرفیت محدود زمین و زیرساخت‌ها رخ داد. با استفاده از MNDWI با اندازه ۲۲۷ کیلومترمربع بیشترین مساحت پوشیده از آب، شناسایی شد. در حالی که با استفاده از AWEI، با اندازه ۱۲۶ کیلومترمربع با رویکردی محافظه‌کارانه‌تر، فقط مناطق با احتمال بسیار زیاد وجود آب‌های سطحی، شناسایی شد. با ترکیب هر سه شاخص طیفی، مساحتی معادل ۶۲ کیلومترمربع به عنوان مناطق مستعد سیلاب، شناسایی شد. تغییرات میان شاخص‌ها به دلیل تفاوت در باندهای طیفی و حساسیت به وجود آب است. نتایج تحلیل NDWI، MNDWI و AWEI، نشان داد تغییرات گستردگی آب دائمی و موقت در طول سیلاب قابل توجه بود به طوری که از ۹۸ کیلومترمربع به ۳۲۴ کیلومترمربع افزایش یافت. روش آستانه‌گذاری Otsu به طور مؤثر برای استانداردسازی و طبقه‌بندی مناطق آبی در میان شاخص‌ها به کار گرفته شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق داده‌های راداری و نوری منجر به شناسایی ۵۸ کیلومترمربع از مناطق سیلابی شد و میان نتایج دو ماهواره ۳۹٪ هم‌پوشانی بود. استفاده از این تلفیق، سبب افزایش چشم‌گیر دقت و قابلیت اطمینان شناسایی مناطق سیلابی شد. از آنجایی که تغییرات در گستره آب فقط نشان‌دهنده رویداد یا شدت سیلاب نیست و بیانگر آن است که عامل‌های آب‌شناختی و مدیریتی نقش مهمتری در رویداد سیلاب دارند. از این رو، پیشنهاد می‌شود به منظور توسعه سامانه‌های هشدار اولیه و برنامه‌ریزی مدیریت بحران، از داده‌های ترکیبی همراه با تجزیه و تحلیل عامل‌های محیطی، استفاده شود. افزون بر این، با بهره‌گیری از این روش امکان پهنه‌بندی دوره‌ای از

سیلاب فراهم‌شده است که پیشنهاد می‌شود در توسعه اقدام‌های پیشگیرانه، مدیریت بهینه سیلاب و برنامه‌ریزی کشاورزی از آن استفاده شود.

واژگان کلیدی

الگوریتم Otsu، پهنه‌بندی سیل، تصویرهای SAR، شاخص‌های سنجش از دور، مدیریت سیل

مقدمه

توسعه به‌شدت تأثیر می‌گذارند. از دلایل مهم این رویداد، آسیب‌پذیری بسیار زیاد ناشی از کمبود مسکن و زیرساخت‌ها، وجود سامانه‌های هشداردهی ناکارآمد، کمبود بودجه و آمادگی نداشتن است (بورا و همکاران ۲۰۱۸). نیاز روز افزون به تأمین مسکن به‌دلیل افزایش جمعیت، مهاجرت به شهرها و گسترش شهرنشینی، به‌طور پیوسته دامنه اثرگذاری و نابودکنندگی بلایای طبیعی را تشدید می‌کنند. افراد غالباً در مناطقی مستقر می‌شوند که بسیار مستعد خطر است، که این موضوع آسیب‌پذیری آن‌ها را افزایش داده و بر کارایی اقدامات لازم برای آمادگی و کاهش خطر اثرگذار است (کونامی و همکاران ۲۰۲۱؛ کرونگتائو و همکاران ۲۰۲۱). سنجش از دور^۱ یک روش کارآمد برای جمع‌آوری داده‌ها در زمینه‌های مختلف و مهم، مانند برنامه‌ریزی شهری، ارزیابی خطر و کاهش خطرات بلایای طبیعی، تاب‌آوری بوم‌سازگان (الهداد و همکاران ۲۰۲۴) و تغییر جهانی اقلیم (تران و لاکشمی ۲۰۲۴) است. رویکردهای سنجش از دور در مقایسه با روش‌های سنتی ارزیابی سیلاب، کارایی و سرعت بیشتر و هزینه کمتر دارند (غفاریان و همکاران ۲۰۱۸). ماهواره‌های پرشمار زمین (EO)^۲ حجم گسترده‌ای از داده‌های سنجش از دور را جمع‌آوری می‌کنند که این موضوع امکان تهیه نقشه و پایش بلادرنگ غرقاب‌شدگی آب را فراهم می‌آورد (پاریدا و همکاران ۲۰۲۲). داده‌های ماهواره‌ای ابزار کارآمدی برای ارزیابی و بررسی شرایط پیش، هنگام و بعد از رویداد سیلاب است. این داده‌ها برای تعیین گستردگی و شدت سیلاب به‌کاربرده می‌شوند. برای تهیه نقشه

رویدادهای حدی، از جمله سیل، به‌دلیل تغییرات سریع در شرایط آب و هوایی و اقلیمی، روزبه‌روز شدیدتر و پرتکرارتر می‌شوند. این پدیده‌ها همراه با تهدیدهای جدی برای زندگی انسان‌ها و زیرساخت‌های موجود، باعث بروز مشکلات فراوانی شده‌اند (رایکس و همکاران ۲۰۱۹). پدیده سیل، به‌طور پیوسته جوامع و اقتصادها را درگیر مشکلات کرده و توجه جهانی را به خود جلب کرده است. زیرا، پیامدهای آن هم در کشورهای توسعه‌یافته و هم در کشورهای در حال توسعه احساس می‌شود (اچندو ۲۰۲۳). هر سال، سیلاب اثرات وحشتناکی بر زندگی میلیون‌ها نفر می‌گذارد و به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی شناخته می‌شود که بیشترین خطر را برای جان انسان‌ها در سراسر جهان به‌همراه دارد (آنوشا و بهاراتی ۲۰۲۰). سیلاب همراه با بارش‌های شدید و بلندمدت سبب جریان یافتن حجم زیادی از آب به سمت پایین‌دست شده و بر منطقه مد نظر اثرات بلندمدتی به‌جای می‌گذارد (رحمان و تاکور ۲۰۱۸). امروزه، با افزایش تغییرات اقلیمی، پذیرفته‌شده است که خطر سیلاب کاهش نخواهد یافت؛ بلکه انتظار می‌رود سیلاب نه اندازه شایع‌تر، بلکه شدیدتر شود و به‌عنوان تهدیدی جدی برای مناطق مختلف جهان باقی بماند (تاوارس و همکاران ۲۰۱۹).

کشور ایران در بسیاری از مناطق به‌واسطه شرایط اقلیمی، پستی‌بلندی و زمین‌ریخت‌شناسی آسیب‌پذیر، همه‌ساله در معرض خطر بلایای طبیعی است، به‌طوری که بیش از ۸۰٪ مساحت شهرهای ایران در معرض رویداد سیلاب است (امینی و همکاران ۲۰۲۲). در گذشته سیل‌های ویرانگر یک‌بار در هر صد سال رخ می‌دادند، اما اکنون هر ساله بر کشورهای در حال

1- Remote Sensing
2- Earth Observation

استخراج نواحی آب‌گرفته را کاهش داد. تصویرهای ماهواره‌ای گستردگی سیلاب را در مناطق جغرافیایی پهناور (مناطق غیرقابل دسترس) در فاصله‌های زمانی منظم تعیین می‌کنند (بهات و راثو ۲۰۱۶). افزون بر این، مناطق غرقاب‌شده اغلب به دلیل داشتن سطحی آرام و زمینه آبی، سبب بازتاب کمتر به ماهواره‌ها می‌شوند. در نتیجه، بخش‌های سیلابی در تصویرهای راداری در مقایسه با دیگر مناطق خشک به شکل تیره‌تر قابل مشاهده‌اند (آمارنات و راجا ۲۰۱۶). این ویژگی‌های رادار با آنتن ترکیبی SAR به طور قابل توجهی در تهیه نقشه‌های گستردگی سیلاب و انجام اندازه‌گیری‌های دقیق از رودها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها مؤثر است (اوهکی و همکاران ۲۰۱۶). به طور معمول، تصویرهای SAR با قطبش‌های (VV)⁴ و (VH)⁵ برای پایش سیلاب استفاده می‌شوند و کاربرد این تصویرها در تهیه نقشه غرقاب‌شدگی بررسی می‌شود (آگنیهورتری و همکاران ۲۰۱۹). تصویرهای SAR ماهواره (سنتینل-۱)⁶ در تهیه نقشه‌های سیلاب اولویت دارند. زیرا، بلافاصله پس از جمع‌آوری داده‌ها به راحتی با شبکه در دسترس هستند و مشاهده‌های نسبتاً منظمی ارائه می‌دهند (اودین و همکاران ۲۰۲۱). از سوی دیگر، استفاده از تصویرهای سنتینل-۱ برای مقایسه وضعیت پیش و بعد از رویداد سیل، و تهیه نقشه تغییرات با تحلیل این دو تصویر، یکی از روش‌های پرکاربرد و مطرح در زمینه استخراج محدوده‌های تحت تأثیر سیلاب به‌شمار می‌آید (دودانگه و همکاران ۲۰۲۱).

در مقایسه با روش‌های سنتی که مستلزم دریافت و پردازش داده‌های سنتینل-۱ بر دستگاه‌های محلی است، استفاده از فناوری‌های مبتنی بر محاسبات ابری مانند گوگل‌ارث‌انجین (GEE)⁷ تحولی شگرف در دسترسی و تحلیل داده‌ها به‌وجود آورده است (گورلیک و همکاران ۲۰۱۷). هم‌چنین، تصویرهای لندست^۸

دقیق سیلاب و پایش آن، پژوهشگران پرشماری ظرفیت مجموعه‌های داده‌ای و رویکردهای مختلف سنجش از دور را بررسی کرده‌اند (گائو و همکاران ۲۰۱۸). پوشش مکانی و زمانی بهبودیافته که به‌وسیله نسل جدید ماهواره‌های مشاهده زمین ارائه شده‌اند، به‌طور قابل توجهی ظرفیت تهیه نقشه و پایش سیلاب را افزایش داده‌اند (کومار ۲۰۱۹). استفاده از الگوریتم‌های کارآمد برای تهیه نقشه سیل، ضروری است (بوکور و همکاران ۲۰۱۸). یکی از چالش‌های اصلی در پایش مناطق سیلابی با استفاده از روش‌های سنجش از دور نوری، حساسیت زیاد این روش به شرایط نامساعد آب و هوایی است (سیان و همکاران ۲۰۱۸). وجود ابرها و کمبود نور خورشید موجب محدود شدن بازیابی داده‌ها در طول موج‌های مرئی و نزدیک به مادون قرمز می‌شود (عطارچی ۲۰۱۹). داده‌های مایکروویو، به‌ویژه داده‌های رادار با آنتن ترکیبی (SAR)³ افزون بر داده‌های نوری، به‌طور معمول برای تهیه نقشه مناطق سیلابی استفاده می‌شوند (دومنگتی و همکاران ۲۰۱۹). به‌رغم حسگرهای نوری که به انرژی الکترومغناطیسی خورشیدی وابسته‌اند، رادار با آنتن ترکیبی SAR از انرژی خود برای ارسال یک پیام استفاده می‌کند و پراکنش بازتابی از اشیاء سطح زمین را دریافت می‌کند (کوی و همکاران ۲۰۲۰)، که این ویژگی کمک زیادی به پایش مؤثر رویدادهای سیلاب می‌کند. اگرچه تصویرهای SAR سنتینل-۱ در شرایط ابری برای شناسایی مناطق سیلابی مفید است. اما، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد. برای مثال، برزنیک و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند سنجه‌های سنجنده مانند قطبش و زاویه دید، در کنار ویژگی‌های سطح زمین، به‌ویژه در نواحی با پوشش گیاهی متراکم، موجب دشواری شناسایی دقیق مناطق آب‌گرفته و در نتیجه، برآورد کم یا زیاد گستردگی سیلاب به‌وسیله داده‌های سنتینل-۱ شد. هم‌چنین، آمیترانو و همکاران (۲۰۲۴) دریافتند که بازتاب‌های پیچیده ناشی از پوشش گیاهی و مناطق شهری، دقت

3- Synthetic Aperture Radar

4- Vertical Transmit, Vertical Receive

5- Vertical Transmit, Vertical-Horizontal

6- Sentinel-1

7- Google Earth Engine

8- Landsat

تغییر، امکان استخراج سطوح آبی را فراهم آورده است و می‌توان همزمان تداخل ناشی از مناطق شهری توسعه‌یافته را کاهش داد. قابل توجه است که برخی ویژگی‌های شهری (مانند سایه‌ها، جاده‌ها و دیگر اشیاء تیره) باعث می‌شوند تا MNDWI و NDWI برای تشخیص دقیق توده‌های آبی در تصویرهای شهری با وضوح زیاد که بازتاب‌های قوی در این دو شاخص تولید می‌کنند، مناسب نباشند (اوزون ۲۰۲۴). با شاخص استخراج خودکار آب AWEI به‌عنوان یک روش جدید، اندازه آستانه اطمینان و ثابتی برای استخراج آب ارائه شد. هدف اصلی توسعه AWEI بهینه‌سازی تفکیک‌پذیری پیکسل‌های آبی و غیرآبی با تفاوت باندها، جمع‌بندی و استفاده از ضریب‌های مختلف بود (فیسو و همکاران ۲۰۱۴). روش‌های آستانه‌گذاری مختلفی از جمله آستانه‌گذاری دستی و روش‌های خودکار برای جداسازی سطوح آبی از عناصر دیگر وجود دارد (بیلماز ۲۰۲۳). در میان روش‌های تقسیم‌بندی آستانه خودکار، الگوریتم Otsu^۹ یکی از قوی‌ترین و محبوب‌ترین‌ها است (محمدی‌آذر و همکاران ۲۰۲۴). الگوریتم آستانه‌گذاری Otsu با شناسایی بیشترین پراکنش میان طبقه‌ها در هیستوگرام داده‌ها، آستانه پویا را به‌طور خودکار تعیین می‌کند (ساری و همکاران ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران ۲۰۲۳). این کار با بیشینه‌سازی پراکنش میان‌گروهی و کمینه‌سازی پراکنش درون‌گروهی میان پیکسل‌های پیش‌زمینه و پس‌زمینه انجام می‌شود (اوتسو ۱۹۷۹). روش Otsu محدودیت آستانه یکنواخت در الگوریتم‌های سنتی را برطرف می‌کند (ژانگ و همکاران ۲۰۲۱).

در مجموع، می‌توان گفت تهیه نقشه سریع سیلاب بر پایه فناوری ابری نیازمند ویژگی‌های خاصی از جمله دسترسی آسان و رایگان به داده‌ها، کارایی و دقت زیاد در تحلیل‌ها، و نیز سهولت استفاده برای تصمیم‌گیران و سودبران است. وجود چنین ویژگی‌هایی می‌تواند به‌طور قابل توجهی سرعت و دقت پاسخ‌گویی به بلایای طبیعی مثل سیلاب را بهبود بخشد. بر این اساس، در این پژوهش، از سامانه ابری GEE،

به‌طور گسترده در بستر GEE استفاده می‌شوند؛ ماهواره‌های لندست برای بیش از ۵۰ سال داده‌های ضروری فراهم آورده‌اند. کاربران می‌توانند با استفاده از فناوری‌های سنجنش از دور، سطوح آبی را به‌طور دقیق شناسایی کنند (چن و همکاران ۲۰۲۴). زیرساخت محاسباتی GEE با بهره‌گیری از پردازش موازی، کارایی فرآیند تحلیل داده‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. این قابلیت هم اندازه فرآیند پردازش را سریع‌تر کرده و هم برای کاربران امکان استفاده از روش‌ها و ابزارهای مختلف برای تحلیل داده‌ها را فراهم آورده است (کومار و موتانگا ۲۰۱۸). همچنین، برنامه‌ریزان می‌توانند ظرفیت مناطق پرخطر را به‌طور سریع ارزیابی کنند. این ابزار محیطی فراهم آورده که در آن غالب اطلاعات جهانی از قبیل بارندگی، دما، تبخیر-تعرق، جمعیت، کاربری زمین و مدل رقومی ارتفاع زمین به‌شکل پردازش‌شده و آماده، قابل استفاده برای عموم است (تمیمی‌نیا و همکاران ۲۰۲۰).

شاخص‌های استخراج طیفی توده‌های آبی مانند شاخص آبی بهنجار شده (NDWI)؛ شاخص آبی بهنجار شده اصلاح شده (MNDWI)؛ و شاخص استخراج خودکار آب (AWEI)^{۱۱} به‌طور معمول برای تعیین دقیق مساحت سطح توده‌های آبی استفاده می‌شوند. باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک (NIR)^{۱۲} برای تعیین ویژگی‌های آب و محاسبه NDWI به‌کار می‌روند (مک‌فیتز ۱۹۹۶). با این حال، با بهره‌گیری از NDWI نمی‌توان تداخل ناشی از مناطق شهری تیره‌ای که با توده‌های آبی ترکیب شده‌اند را به‌طور کامل حذف کرد. معمولاً، با استفاده از یک شاخص آبی می‌توان فقط یک نوع از اشیاء مداخله‌گر را برطرف کرد. برای حل این مشکل، نسخه اصلاح‌شده‌ای از NDWI پیشنهاد شد (ژو ۲۰۰۶). در این نسخه، باند مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR)^{۱۳} به‌جای باند مادون قرمز نزدیک NIR استفاده شده در NDWI به‌کار گرفته شده است. این

-
- 9- Normalized Difference Water Index
 10- Modified Normalized Difference Water Index
 11- Automated Water Extraction Index
 12- Near-Infrared
 13- Short-Wave Infrared

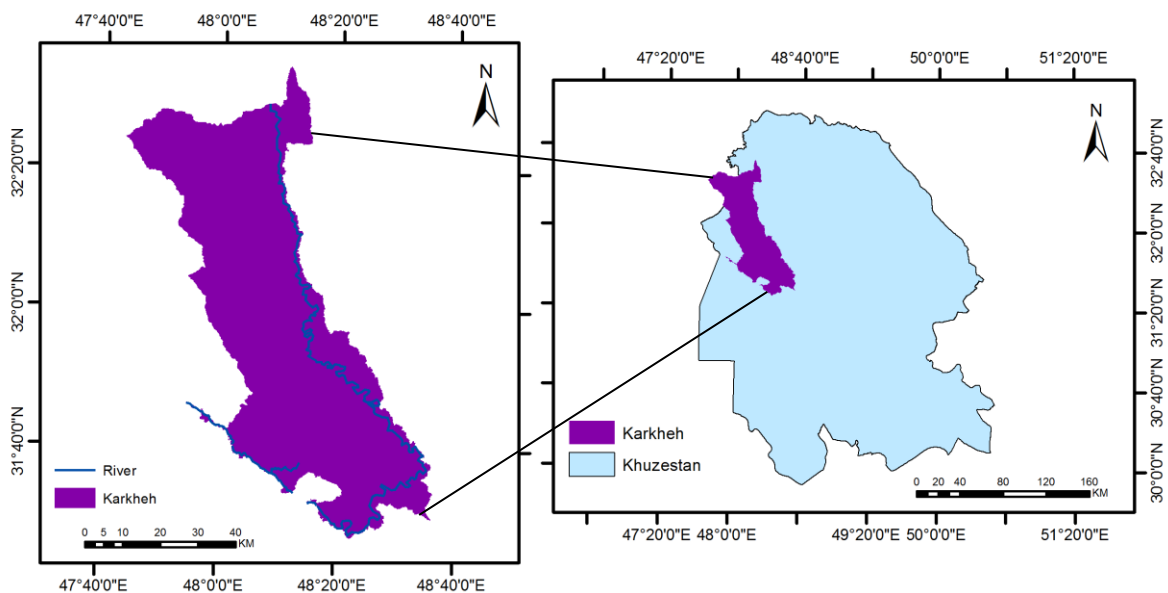
14- Otsu threshold

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

آبخیز کرخه در جنوب غربی کشور و شمال غرب اندیمشک در استان خوزستان میان ۳۱ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ است (شکل ۱). مساحت آن ۳۸۳۸/۳ کیلومتر مربع است. این آبخیز از شمال تا شمال غربی با شهرستان شوش، از شمال شرقی با شهرستان دزفول، از غرب با شهرستان دشت آزادگان، از شرق با شهرستان شوشتر و از جنوب با شهرستان‌های اهواز و حمیدیه همسایه است.

داده‌های نوری سنتینل-۲ و داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ برای پهنه‌بندی سیلاب در آبخیز کرخه استفاده شد. دیگر اهداف این پژوهش شامل تحلیل و مقایسه ترکیب‌های مختلف قطبش VH و VV و یافتن قطبش بهینه برای تمایز مناطق آبی و غیرآبی، اعتبارسنجی نقشه‌های غرقاب‌شدگی سیلاب با بهره‌گیری از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI که از تصویرهای نوری ماهواره سنتینل-۲ استخراج شده‌اند، بود. سرانجام داده‌های راداری و نوری به منظور تشخیص دقیق‌تر مناطق سیلابی با یکدیگر تلفیق شدند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته پردازش تصویر و ترکیب داده‌های ترکیبی راداری و نوری، می‌توان برای مدیریت بهتر مخاطره‌های طبیعی نظیر سیلاب گام موثری برداشت.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز کرخه در استان خوزستان.

Figure 1- Geographical location of Karkheh watershed in the Khuzestan Province.

سنتینل-۱ شامل دو ماهواره مدار قطبی راداری است که در محدوده باند C تصویربرداری می‌کند و در سه سطح ۰، ۱ و ۲ ارائه می‌شوند. سطح ۱ در دو نوع SLC^{۱۵} و GRD^{۱۶} است و در چهار حالت مختلف

روش پژوهش

تصویرهای ماهواره سنتینل-۱ با قدرت مکانی ۱۰ متر و تصویرهای ماهواره سنتینل-۲ با قدرت مکانی ۱۰ و ۲۰ متر (باقری‌هارونی و همکاران ۲۰۲۲)، برای تهیه نقشه‌های سیلاب در آبخیز کرخه استفاده شد.

15- Single Look Complex
16- Ground Range Detected

به‌دست آمده از این قطبی‌سازی تفسیر شد. سپس، حالتی به‌عنوان بهینه انتخاب شد که در آن اندازه‌های بازتاب مربوط به سطوح آبی به‌خوبی از سطوح غیرآبی متمایز شده بودند (اتچیوت و همکاران ۲۰۲۳).

برای تهیه نقشه شاخص‌های طیفی آب و اعتبارسنجی نقشه‌های سیلاب (اتچیوت و همکاران ۲۰۲۳) دو بازه زمانی پایان فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) و هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸)، استفاده شد. داده‌های سنتینل-۲ برای سال ۲۰۱۸ در بازه زمانی مد نظر در دسترس نبود، به‌ناچار از نزدیک‌ترین بازه زمانی در سال ۲۰۱۹ (۲۸ فوریه تا ۲۵ مارس) به‌عنوان دوره پیش از سیلاب استفاده شد (جدول ۲). در این مرحله از کار از فیلتر ابر استفاده شد و برای بهبود کیفیت داده‌ها، اندازه تصاویری با درصد پوشش ابری کمتر از ۲۰٪ انتخاب شد (پفلوم و همکاران ۲۰۲۵).

برای محاسبه شاخص‌های سنجش از دور، از روش ریاضی استفاده شد تا داده‌های طیفی به‌دست آمده از دو یا چند باند را به گونه‌ای تبدیل کند که پیکسل‌هایی با اندازه‌های طیفی مشابه در یک بازه خاص به‌شکل چشمی برجسته شوند. این موضوع باعث شد تا به ویژگی‌های جغرافیایی خاص توجه ویژه شود. الگوی هر نوع پوشش زمین و نیز پاسخ طیفی ویژگی‌های مشخص، پایه و اساس تعریف یک شاخص را تشکیل می‌دهند (بوهناش و همکاران ۲۰۱۹). بررسی ویژگی‌های طیفی عناصر مختلف، نشان‌دهنده اهمیت باندهای منفرد در شناسایی و تفکیک پوشش‌های سطح زمین است. به‌طور ویژه، آب در نواحی طیفی مرئی با بازتاب زیاد و در باندهای مادون قرمز نزدیک NIR و مادون قرمز کوتاه‌موج SWIR با بازتاب بسیار کم است. در باند NIR، اندازه بازتاب آب حتی کمتر از باند قرمز گزارش شده است. به‌جز در شرایطی مانند آب‌های گل‌آلود، که آب به‌طور معمول پرتوهای NIR و SWIR را جذب می‌کند.

(SM) ۱٪، (IW) ۱/۴، (EW) ۱/۹ و (WV) ۲۰ قابل دسترسی است. به‌جز از حالت WV که به‌شکل تک قطبی است، محصول دیگر حالت‌ها به دو شکل تک قطبی (VV, HH) و دو قطبی (HH+HV) یا (VV+VH) موجود است (امینی و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، برای شناسایی مناطق سیلابی از دو تصویر سنتینل رادار با قالب GRD و حالت IW و مسیر نزولی اِبا قطبش‌های VV و VH و ترکیب دو قطبش (VH+VV) استفاده شد (جدول ۱). دوره‌های زمانی استفاده‌شده شامل (۱) پیش از فعالیت‌های کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷) با هدف ارزیابی شرایط پایه و وضعیت منابع آب منطقه پیش از آغاز فعالیت‌های کشاورزی، (۲) پایان فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) برای بررسی تغییرات آب منطقه در دوره‌ای که مصرف آب کشاورزی افزایش می‌یابد و برای شناسایی نقاط حساس به سیلاب و (۳) هنگام رویداد سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) برای تحلیل دقیق اندازه و گستره سیلاب و شرایط واقعی منطقه در زمان رویداد سیلاب، بود. این نوع تفکیک زمانی، امکان مقایسه دقیق‌تری میان تغییرات ناشی از سیلاب و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی را فراهم آورد.

در قطبی‌سازی VH، انتقال بازتاب به‌شکل عمودی و بازگشت آن به‌شکل افقی انجام می‌شود که منجر به پاسخ‌های قوی‌تری در مناطقی با پراکندگی حجمی می‌شود. از سوی دیگر، در قطبی‌سازی VV، هر دو انتقال و بازگشت بازتاب به‌شکل عمودی انجام می‌شود که باعث ایجاد پاسخ‌های بیشتر در مناطقی که پراکندگی آینه‌ای دارند، می‌شود (منجوسری و همکاران ۲۰۱۲). در این پژوهش، از قطبی‌سازی‌های VH و VV داده‌های راداری SAR استفاده شد تا چگونگی استفاده از این داده‌ها را در پهنه‌بندی سیلاب در آبخیز کرخه را بررسی کند. اندازه‌های بازتاب

-
- 17- StripMap mode
 - 18- Interferometric Wide Swath mode
 - 19- Extra Wide Swath mode
 - 20- Wave mode
 - 21- Descending

جدول ۱- مشخصات تصاویرهای سنتینل-۱ استفاده شده برای پهنه‌بندی سیل.

Table 1- Characteristics of Sentinel-1 images used for flood zoning.

No.	Time period	Gregorian calendar	Solar calendar	Data type	Beam mode	Direction of sensor movement	Polarization
1	Pre-agriculture season	2018.09.28- 2018.10.25	1397.07.06- 1397.08.03	Ground range detected (GRD)	Interferometric wide swath (IW)	Descending	Vertical transmit-vertical receive (VV), Vertical transmit-horizontal receive (VH)
2	Post-agriculture season	2019.02.28- 2019.03.25	1397.12.09 1398.01.05				
3	During the flood	2019.03.28- 2019.04.25	1398.01.08 1398.02.05				

جدول ۲- مشخصات تصاویرهای سنتینل-۲.

Table 2- Sentinel-2 image specifications.

No.	Time period	Gregorian calendar	Solar calendar	Data type	Sensor	Used spectral bands
1	Post-agriculture season	2019.02.28- 2019.03.25	1397.12.09 1398.01.05	Surface reflectance (SR)	Multispectral Imager (MSI)	B3, B8, B11, B12
2	During the flood	2019.03.28- 2019.04.25	1398.01.08 1398.02.05			

(۱۹۹۶)، MNDWI (ژو ۲۰۰۶) و AWEI (فیسو و همکاران ۲۰۱۴) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ۳ محاسبه شدند.

$$NDWI = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad (1)$$

$$MNDWI = \frac{\text{Green} - \text{SWIR}}{\text{Green} + \text{SWIR}} \quad (2)$$

$$AWEI = 4(\text{Green} - \text{SWIR1}) - (0.25 \times \text{NIR} + 2.75 \times \text{SWIR2}) \quad (3)$$

برای محاسبه شاخص‌های آب از داده‌های نوری سنجنده سنتینل-۲ (محصول سطح بازتاب تصحیح شده جوی S2_SR) استفاده شد. در شاخص NDWI از باند سبز (B3) GREEN و باند فرورسرخ نزدیک NIR (B8) استفاده شد. در شاخص MNDWI از باندهای سبز (B3) GREEN و فرورسرخ کوتاه ۱ (SWIR1) (B11) استفاده شد و در شاخص AWEI از باند سبز (B3) GREEN، فرورسرخ نزدیک NIR (B8)، فرورسرخ کوتاه ۱ (SWIR1) (B11) و فرورسرخ کوتاه ۲ (SWIR2) (B12) استفاده شد.

این ویژگی موجب ایجاد تضاد زیاد میان باندهای مادون قرمز نزدیک NIR و سبز، و نیز مادون قرمز کوتاه موج SWIR و سبز می‌شود (راجندایران و کومار ۲۰۲۳).

این تغییرات بازتابی به وسیله شاخص‌های طیفی، از جمله شاخص آبی بهنجار شده NDWI، در بررسی‌های مختلف گزارش شده است. به بیان دیگر، این شاخص در تفکیک آب از زمین‌های ساخته شده و پوشش گیاهی مرطوب دقت کمتری دارد و در برخی شرایط پوشش زمین و نوردهی، خطای بیشتری دارد (آلبرتینی و همکاران ۲۰۲۲). شاخص آبی بهنجار شده اصلاح شده MNDWI و شاخص آبی بهبود یافته AWEI نسخه فاقد سایه برای تمایز میان پیکسل‌های حاوی آب و پیکسل‌های فاقد آب استفاده می‌شوند. از آنجایی که اشیاء ناهمگن مانند سایه‌های کوهستان، ابرها با ضخامت کم و سایه‌های ساختمان در برخی باندها انعکاس مشابه آب دارند (خالد و همکاران ۲۰۲۱؛ گونن و آتاسور ۲۰۲۴)، شاخص‌های طیفی آب مختلف استفاده شد که هر یک به منظور تفکیک دقیق‌تر مناطق آبی به کار رفته‌اند. در این پژوهش، شاخص‌های طیفی NDWI (مک‌فیترز

مجموعه داده‌های (آب‌های سطحی جهانی JRC) آتچدا شد (پیمان‌خواه و همکاران ۲۰۲۳). کلیه مراحل پردازش داده‌ها با کدنویسی در محیط GEE انجام شد. در این کدها، مراحل بارگذاری تصاویر، فیلتر زمانی و مکانی، اعمال فیلتر Refined Lee بر داده‌های سنتینل-۱، محاسبه شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI از داده‌های سنتینل-۲، و تعیین آستانه با روش Otsu پیاده‌سازی شد. همچنین، از توابع داخلی GEE برای ترکیب نتایج راداری و نوری و تولید نقشه نهایی سیلاب استفاده شد.

نتایج و بحث

تصویرهای منطقه سیلابی با قطبش‌های VV و VH بعد از اعمال فیلتر Refined Lee و بدون تعیین آستانه به شکل جداگانه استخراج شدند که در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این نقشه‌ها نشان‌دهنده تغییرات آب در سه دوره متفاوت بودند اما نقشه نهایی مناطق سیلابی نبودند. بر اساس قطبش VV، شکل ۲ (a) در محدوده پیش از کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷) در دو رنگ که مناطق با بازتاب کمتر به رنگ سبز، آب یا سطوح صاف و رنگ فیروزه‌ای، نشان‌دهنده زمین‌های خشک یا زیرساخت‌ها است. شکل ۲ (b) در محدوده بعد فصل کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) در دو رنگ که رنگ زرد، آب و سطوح صاف و رنگ سبز ملایم، نشان‌دهنده مناطق خشکی است. شکل ۲ (c) در محدوده هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) در دو رنگ که رنگ زرد نشان‌دهنده مناطقی است که بازگشت راداری در آنها پس از سیلاب کاهش یافته است (این مناطق آب هستند)؛ همچنین می‌تواند نشان‌دهنده مناطقی باشد که رطوبت خاک در آنها افزایش یافته است. رنگ مشکی نشان‌دهنده مناطقی است که بازگشت راداری در آنها افزایش یافته است. نتایج به دست آمده می‌تواند با تغییرات رطوبت خاک یا خشک شدن مناطق آب‌گرفته، تغییرات پوشش گیاهی یا کاربری زمین مرتبط باشد. پیشنهاد

برای استخراج نقشه دقیق سیل، نیاز به آستانه‌گذاری و فیلترگذاری بود. نویز لکه‌ای^{۲۲} معمولاً ناشی از تداخل امواج الکترومغناطیسی است، به شکل الگوهای نامنظم و دانه‌ای در تصویرهای SAR ظاهر شد. این نویز باعث کاهش قدرت تفکیک رادیومتریک تصویرهای SAR می‌شود (آرجنتی و همکاران ۲۰۱۳) و تفسیر آن‌ها را دشوار می‌سازد. برای غلبه بر این مشکل، از روش‌های فیلتر لکه استفاده شد که الگوریتم Refined Lee یکی از بهترین این روش‌ها به شمار می‌آید (سینگ و سینگ‌راوات ۲۰۲۴) که با حفظ لبه‌ها و جزئیات، لکه‌ها را حذف می‌کند. برای کاهش نویز لکه‌ای در تصویرهای راداری از این فیلتر استفاده شد. نتایج به دست آمده، پس از پیش‌پردازش و فیلتر Refined Lee، با استفاده از روش آستانه‌گذاری Otsu به منظور تفکیک مناطق سیلابی از دیگر عارضه‌ها، تحلیل شدند. آستانه‌گذاری Otsu روش نوبویوکی Otsu بهترین رویکرد برای تعیین آستانه در بخش‌بندی تصویر است (یو و همکاران ۲۰۲۳). ایده اصلی این روش استفاده از بیشترین اندازه پراکنش میان خوشه‌ها برای جدا کردن شیء هدف از پس‌زمینه پس از انتخاب یک آستانه مناسب است (هو و وانگ ۲۰۲۲). روش آستانه‌گذاری Otsu با کمینه‌سازی پراکنش درون طبقه‌ای و بیشینه‌سازی پراکنش میان طبقه‌ای، تصویر را به دو بخش (آب و غیرآب) تقسیم می‌کند به گونه‌ای که تفاوت میان این دو طبقه بیشترین اندازه ممکن باشد و اندازه آستانه بهینه را به شکل خودکار تعیین می‌کند که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد (کیم و همکاران ۲۰۱۳).

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (4)$$

آستانه بهینه با روش Otsu روی تصویرهای مربوط به راداری و شاخص‌های طیفی آب NDWI، MNDWI و AWEI اعمال می‌شود. برای حذف آب‌های دائمی از نقشه نهایی سیل، توده‌های آبی دائمی با استفاده از

جدول ۳- مساحت پهنه آبی به دست آمده از ترکیب دو قطبش VV و VH در سه بازه زمانی مختلف.

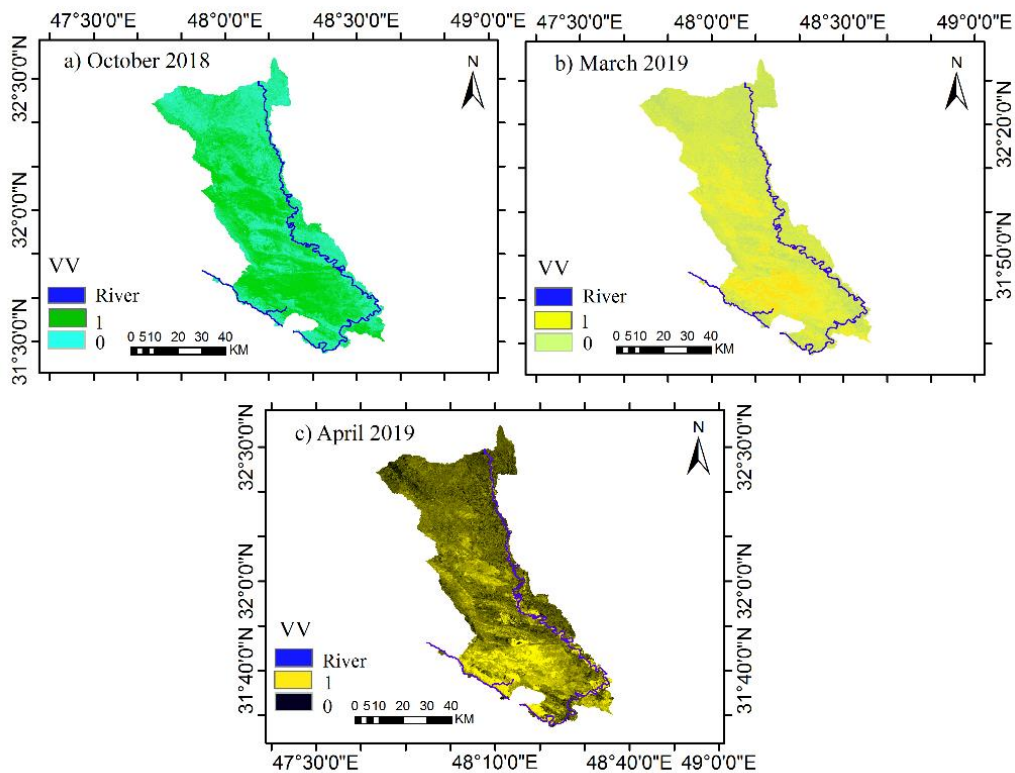
Table 3- Area of water bodies extracted from a combination of VV and VH polarization in three different time periods.

Time period	Flooded area (km ²)	Flooded area (%)
Pre-agriculture season	1560	40.7
Post-agriculture season	847	22.07
During the flood	974	25.37

در دوره پیش از فعالیت‌های کشاورزی، مساحت آب منطقه ۱۵۶۰ کیلومترمربع ثبت شده است که احتمالاً دلیل آن بارندگی‌های پیشین یا سطح بالای آب پشت سد یا رود است. اما در اسفند به دلیل فعالیت‌های کشاورزی، تبخیر، کاهش بارش یا مدیریت منابع آب، سطح آب به اندازه ۸۴۷ کیلومترمربع کاهش یافت. دوباره در دوره هنگام سیل، سطح آب تا حد ۹۷۴ کیلومترمربع افزایش یافت که به احتمال زیاد ناشی از پر شدن رودها و سدها پس از بارش شدید است. نتایج نشان داد به رغم اینکه مساحت آب در دوره سیلاب کمتر از دوره پیش از فعالیت‌های کشاورزی بود، اما باز هم پدیده سیلاب به شکل گسترده رخ داد. این یافته دلایل متفاوتی دارد. در پاییز (پیش از فعالیت‌های کشاورزی)، افزایش آب به شکل تدریجی و پایدار رخ داده و ذخیره‌سازی در سدها و رودها انجام شده است. از سوی دیگر، بارش‌های سیل‌آسا در فروردین (هنگام سیل)، با شدت زیاد و در زمان کوتاه رخ داده‌اند که زمین و سازه‌ها تحمل این رواناب ناگهانی را نداشتند.

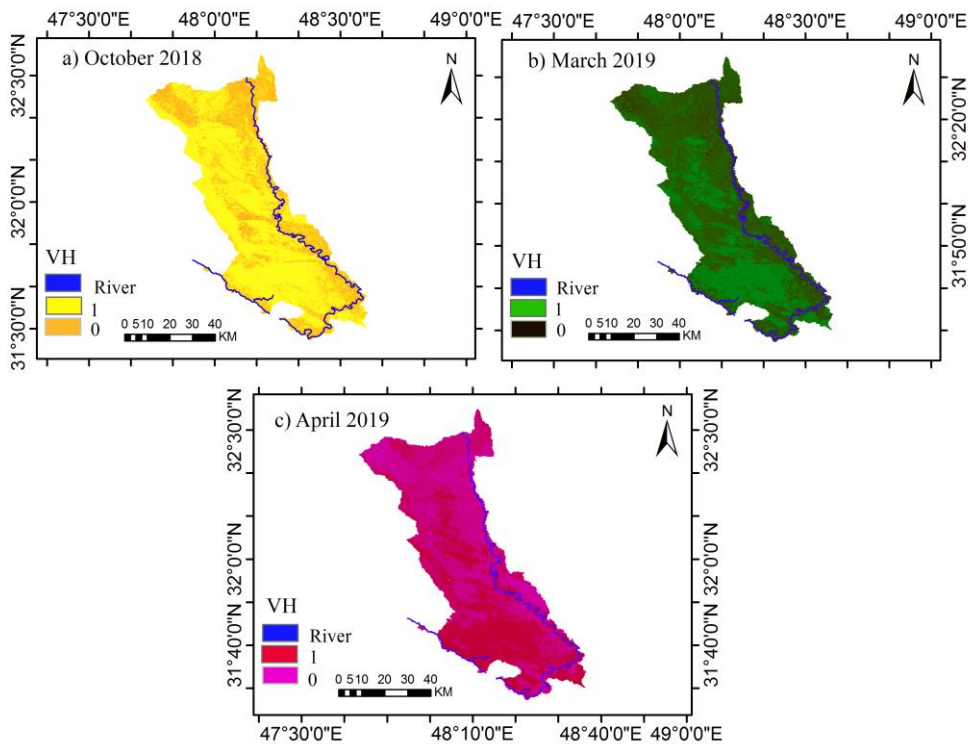
می‌شود در آینده پژوهش‌های بیشتری در ارتباط با دلایل احتمالی نامبرده انجام شود. در مجموع، تصویرهای SAR با قطبش VV نسبت به رطوبت حساس‌تر بودند و می‌توان با استفاده از این ترکیب انواع پوشش زمین مانند باتلاق‌ها و شالیزارها را تفکیک کرد (باثو و همکاران ۲۰۱۸).

بر اساس شکل ۳ (a) (قطبش VH) در محدوده پیش از فعالیت‌های کشاورزی (۶ مهر تا ۳ آبان ۱۳۹۷) مناطق در دو رنگ زرد با بازتاب کمتر نشان‌دهنده آب در مناطق مسطح بود. رنگ قهوه‌ای با بازتاب بیشتر نشان‌دهنده مناطق خشکی یا ساخته شده بود. در شکل ۳ (b) در محدوده بعد کشاورزی (۹ اسفند ۱۳۹۷ تا ۵ فروردین ۱۳۹۸) مناطق در دو رنگ سبز نشان‌دهنده مناطق آبی و مسطح و رنگ مشکی نشان‌دهنده خشکی بود. در شکل ۳ (c) در محدوده هنگام سیلاب (۸ فروردین تا ۵ اردیبهشت ۱۳۹۸) مناطق در دو رنگ قرمز نشان‌دهنده کاهش بازگشت راداری پس از سیلاب و احتمال مناطق آبی بود و رنگ بنفش نشان‌دهنده افزایش بازگشت راداری پس از سیلاب که می‌تواند نشانه مناطقی باشد که از حالت آبی به خشکی تبدیل شده‌اند یا در پوشش گیاهی و کاربری زمین تغییراتی رخ داده است. در مناطق با پوشش گیاهی انبوه، توانایی قطبش VH در استخراج نواحی سیلابی بیشتر بود (امینی و همکاران ۱۴۰۱). برای درک بهتر وضعیت مناطق آبی و ارتباط آن با رویداد سیل، مساحت مناطق آبی (دائمی و موقت) با ترکیب قطبش (VV+VH) در سه دوره زمانی تحلیل شد (جدول ۳).



شکل ۲- تغییرات پهنه‌های آب در سه دوره متفاوت بر اساس قطبش VV.

Figure 2- Changes in the water bodies in three different periods based on VV polarization.



شکل ۳- تغییرات پهنه‌های آب در سه دوره متفاوت بر اساس قطبش VH.

Figure 3- Changes in the water bodies in three different periods based on VH polarization.

این‌که قطبش متقاطع VH از دید فیزیکی، معمولاً حساسیت بیش‌تری به بازتاب دولبه و آب‌گرفتگی‌های زیر پوشش گیاهی دارد، می‌توان با استفاده از آن نواحی آب‌گرفته را که در زیر پوشش گیاهی یا در مجاورت سازه‌های عمودی هستند را دقیق‌تر شناسایی کرد. از این‌رو، تفاوت اندک در نتایج به‌دست‌آمده برای قطبش VH در مقایسه با VV را می‌توان به حساسیت بیشتر آن به تغییرات سطح و بافت زمین در شرایط رطوبتی نسبت داد. در روش ترکیبی (VV+VH)، اندازه پیکسل‌هایی به‌عنوان مناطق سیلابی در نظر گرفته شدند که در هر دو قطبش کاهش بازتاب قابل‌توجهی را نشان داده‌اند و موجب حذف نواحی‌ای شدند که اندازه پیکسل در یکی از قطبش‌ها تغییر بازتاب داشت؛ در نتیجه مساحت نهایی مناطق شناسایی‌شده به ۲۳۹ کیلومترمربع که معادل ۶/۲۳٪ از کل محدوده مطالعه‌شده بود، کاهش یافت. دلیل تفاوت قطبش‌ها با ترکیب آن‌ها ناشی از تفاوت حساسیت فیزیکی دو قطبش به نوع پراکندگی سطحی و حجمی و نیز تفاوت در آستانه‌گذاری بود. از آنجایی که هر دو تصویر از سنجنده SAR و در زمان مشابه دریافت شدند، اثر عامل‌های جوی و نوری در این تفاوت ناچیز بود. در این پژوهش نتایج این بخش نشان داد که استفاده از ترکیب داده‌های قطبش VV و VH انسجام و همپوشانی میان نواحی سیلابی شناسایی‌شده را افزایش داد. افزون بر این، نتایج در مقایسه با روش استفاده از هر قطبش به‌شکل جداگانه قابل‌اعتمادتر بود. توزیع مکانی مناطق سیلابی شناسایی‌شده بر اساس هر قطبش در شکل ۴ ارائه‌شده است.

در این پژوهش، برای تشخیص بهتر مناطق سیلابی از آستانه Otsu استفاده شد و برای حذف نویز و بهبود دقت استخراج نواحی سیل، از رویکرد ریخت‌شناختی فرسایش و گسترش استفاده شد. این رویکرد باعث کاهش لکه‌های کوچک نویز و پر کردن حفره‌های کوچک در نواحی واقعی سیلابی شد و در نتیجه کیفیت نقشه نهایی بهبود یافت (یامادا ۲۰۰۸). بر اساس آستانه‌های جدول ۴، نواحی با کاهش شدید در اندازه‌های بازتاب به‌عنوان مناطق پوشیده از آب در نظر گرفته شدند. زیرا، سطوح آبی باعث کاهش شدید بازتاب در رادار شدند. مساحت مناطق سیلابی از داده‌های VV، VH و ترکیب هر دو استخراج شد که در جدول ۴ ارائه‌شده است.

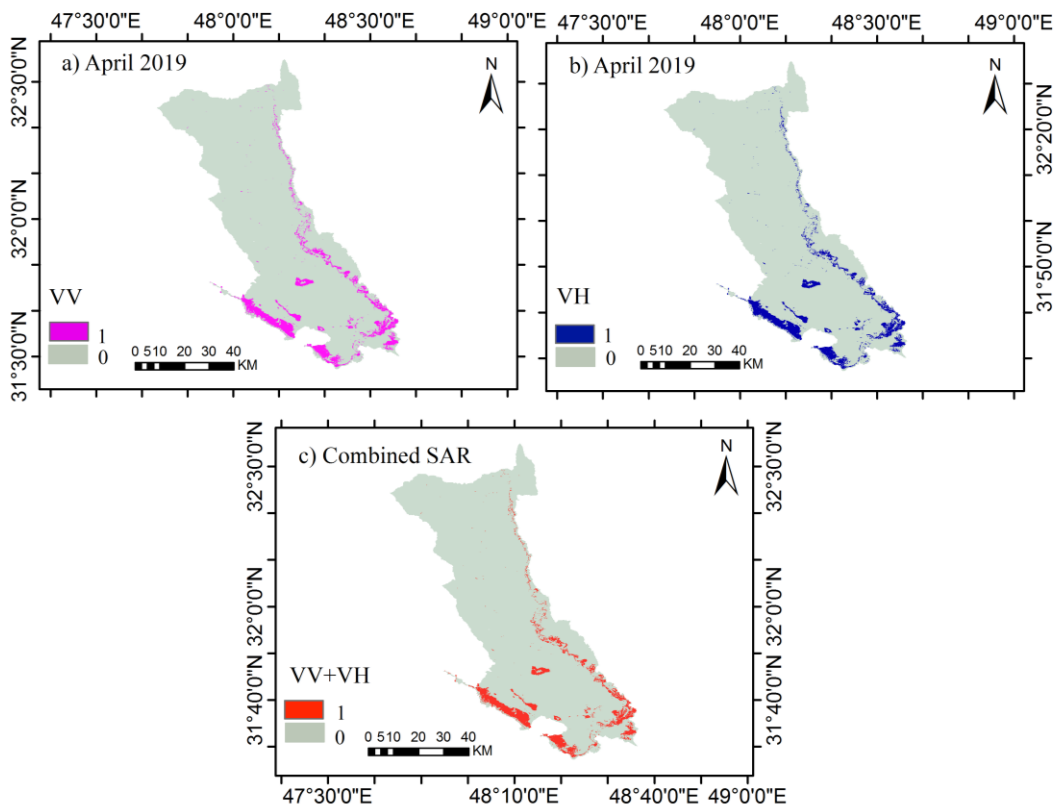
جدول ۴- مساحت پهنا سیلابی با استفاده از

قطبش‌های VV و VH و روش ترکیبی.

Table 4- Area of flooded bodies using VV and VH polarizations and combined method.

Method	Threshold	Flooded area (km ²)
Vertical transmit-vertical receive (VV)	-14.87	252
Vertical transmit-horizontal receive (VH)	-22.87	254
Combined	-	239

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آستانه‌گذاری، مساحت نواحی سیلابی شناسایی‌شده با استفاده از قطبش VV برابر با ۲۵۲ کیلومترمربع و با قطبش VH برابر با ۲۵۴ کیلومترمربع برآورد شد. تفاوت بسیار اندک میان این دو قطبش نشان داد نتایج راداری در هر دو قطبش و نقشه‌ها تقریباً مشابه هستند. با توجه به



شکل ۴- نمایی از سیلاب در قطبش‌های VV و VH و ترکیب آن‌ها.
Figure 4- View of flood in VV and VH polarizations and their combination

حجم ذخیره سد کرخه در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۱ برابر با ۳/۸۶۵/۰۰۰ مترمکعب معادل ۷۳٪ حجم آبیگیر بود. این رقم تا تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۱۵ به ۸۲٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده روند سریع ذخیره‌سازی در این آبخیز بود. با توجه به پیش‌بینی بارندگی‌های شدید در اسفند و فروردین، متولیان سد تلاش کردند با کاهش ذخایر، فضای خالی برای مهار سیل‌های آتی ایجاد کنند. با این حال، به دلیل تداوم بارش‌ها و محدودیت ظرفیت عبور جریان در پایین‌دست، این اقدامات موفقیت‌آمیز نبود و تا تاریخ ۱۳۹۸/۰۱/۲۰ آبیگیر سد کرخه به‌طور کامل پر شد (رجبی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹).

تغییر پوشش زمین‌ها از درختان، درختچه‌های طبیعی و پوشش مرتعی به کاربری کشاورزی (سعدیان و شفیع‌زاده مقدم ۲۰۲۱) و کاهش پوشش گیاهی در پیرامون رود کرخه (کریمی و همکاران ۲۰۲۰) منجر به کاهش توان جذب آب شد و در نتیجه بخش زیادی از بارش به‌شکل رواناب سطحی باقی ماند و مستقیماً

در هفته نخست فروردین ۱۳۹۸ به دلیل افزایش آب خروجی از سدهای دز و کرخه، روستاهای همجوار این سدها و رودها با مشکلات جدی مواجه شدند. بر اساس گزارش‌ها، در بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۱/۰۱ تا ۱۳۹۸/۰۱/۳۱، مجموعاً ۷/۹۱۹/۰۰۰ مترمکعب آب وارد آبیگیر سد کرخه شد و ۵/۹۵۰/۰۰۰ مترمکعب از آن تخلیه شد. در نتیجه، ۱/۹۶۹/۰۰۰ مترمکعب آب در آبیگیر ذخیره شد و با در نظر گرفتن ذخیره پیشین، حجم آب موجود در آبیگیر در پایان این دوره (۱۳۹۸/۰۱/۳۱) به ۵/۸۲۲/۰۰۰ مترمکعب رسید. شایان ذکر است که از ۷/۹۱۹/۰۰۰ مترمکعب آب واردشده به آبیگیر سد کرخه در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین، حدود ۶۰٪ آن از سیل‌های فروردین بود. از این‌رو، بهره‌برداری از سد باید به گونه‌ای انجام می‌شد که در دوره‌های بارندگی شدید با تخلیه پیشگیرانه بخشی از آبیگیر، ظرفیت کافی برای مهار سیلاب فراهم آید. با توجه به بارش‌های گسترده از ابتدای سال آبی،

مقایسه با دوره پیشین، نشان‌دهنده افزایش سطح آب در منطقه بود. پس از لحاظ کردن آستانه‌ها، مساحت نواحی آبی برای هر شاخص محاسبه شد. مساحت‌ها بر اساس تعداد پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده به‌عنوان «آب» پس از آستانه‌گذاری نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- آستانه‌های محاسبه‌شده با روش Otsu برای شاخص‌های طیفی آب و مساحت پهنه‌های آبی استخراج‌شده.

Table 6- Thresholds calculated by Otsu method for spectral water indices and area of extracted water bodies.

Index	Threshold post-agriculture season	Threshold during the flood	Area of water bodies without permanent water during floods (km ²)
NDWI	-0.47	0.05	214
MNDWI	0.12	0.10	227
AWEI	0.14	0.19	126
Combined	-	-	62

ترکیب شاخص‌ها نشان داد که ۶۲ کیلومترمربع از آبخیز کرخه (معادل ۱/۱۶٪ از مساحت کل منطقه) در اثر سیلاب دچار آب‌گرفتگی شده است. هر شاخص حساسیت متفاوتی نسبت به آب سطحی دارد و شرایط جوی بر آن تأثیرگذار است. در شکل ۵، نمایی از سیلاب بر اساس هر شاخص نمایش داده شده است. بر اساس نتایج، بیشترین مساحت منطقه آبی هنگام سیل، به‌وسیله شاخص MNDWI با اندازه ۲۲۷ کیلومترمربع شناسایی شد. از سوی دیگر، عملکرد شاخص AWEI در این منطقه به‌گونه‌ای دیگر بود و اندازه نواحی با احتمال بسیار زیاد از وجود آب را شناسایی کرد. این تفاوت به‌دلیل نوع باندهای استفاده شده در شاخص‌ها است؛ MNDWI به‌دلیل جایگزینی باند SWIR به‌جای NIR حساسیت بیشتری به سطوح آبی در مجاورت خاک و پوشش گیاهی دارد، در حالیکه AWEI نواحی با بازتاب ضعیف یا سایه‌دار را حذف می‌کند و مساحت کمتری را به‌عنوان آب شناسایی می‌کند. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که

وارد رودها و کانال‌ها شد، که باعث سرریز و طغیان آب شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که صرفاً حجم یا گستره آب در زمان رویداد سیلاب نمی‌تواند فقط شاخص مناسبی برای ارزیابی خطر سیلاب باشد؛ بلکه شدت بارش، ویژگی‌های آب‌شناختی خاک، وضعیت زیرساخت‌ها و رفتار رواناب، عامل‌های پستی‌بلندی و ریخت‌شناسی زمین و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی، از مؤلفه‌های اصلی در شکل‌گیری و شدت یافتن سیلاب به‌شمار می‌آیند (برزنیک و همکاران ۲۰۲۵؛ کاراکوس ۲۰۲۵).

برای درک بهتر وضعیت نواحی آبی و ارتباط آن با رویداد سیل، مساحت مناطق آبی (دائمی و موقت) با استفاده از ترکیب سه شاخص طیفی (NDWI، MNDWI و AWEI) در دو بازه زمانی (پیش از سیلاب و هنگام رویداد سیل) تحلیل شد. نتایج این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که پیش از رویداد سیلاب (در پایان فصل کشاورزی)، مساحت نواحی آبی حدود ۹۸ کیلومترمربع بود؛ در حالی‌که در زمان رویداد سیل، این اندازه به حدود ۳۲۴ کیلومترمربع افزایش یافت. این افزایش بیش از سه‌برابری در سطح پوشیده از آب، بیانگر تأثیر بارش‌های شدید و ناگهانی بر گسترش پهنه‌های آبی و رویداد سیلاب در منطقه مطالعه‌شده بود.

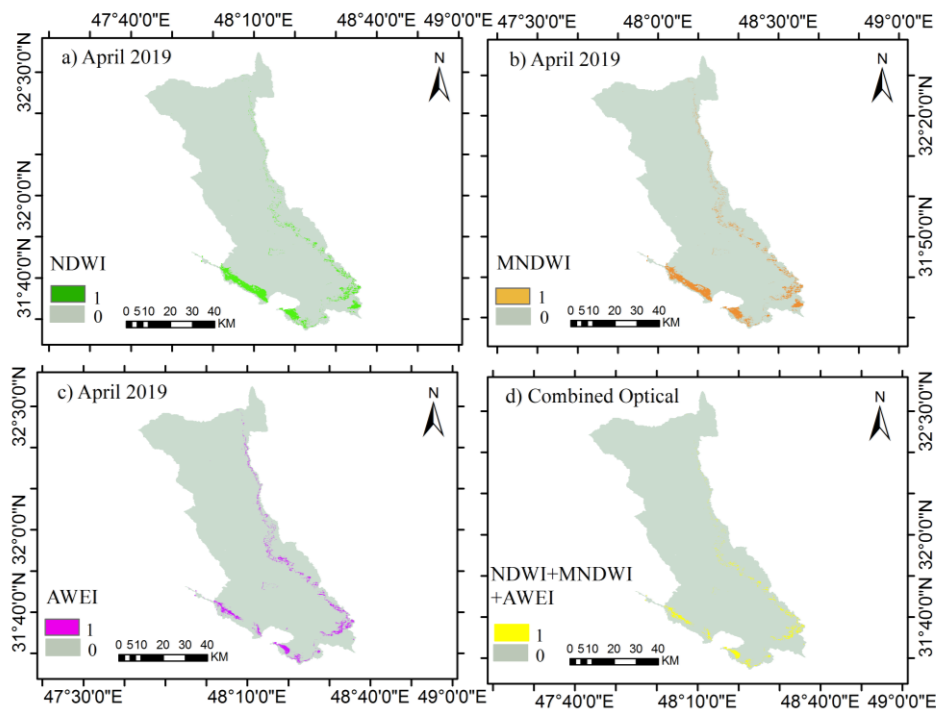
جدول ۵- مساحت پهنه آبی به‌دست آمده از ترکیب NDWI، MNDWI و AWEI در دو بازه زمانی مختلف.

Table 5- Area of water body extracted from combination of NDWI, MNDWI, and AWEI in two different time periods.

Time period	Flooded area (km ²)	Flooded area (%)
Post-agriculture season	98	2.55
During the flood	324	8.44

نتایج محاسبه اندازه‌های آستانه برای سه شاخص NDWI، MNDWI و AWEI برای استخراج نواحی با آب سطحی در دو بازه زمانی (پس از پایان فصل کشاورزی و هنگام رویداد سیل) در جدول ۶ ارائه شده است. افزایش اندازه آستانه‌ها در بازه سیلاب در

انتخاب شاخص طیفی مناسب برای آشکارسازی آب، وابسته به شرایط مکانی، نوع پوشش زمین و ویژگی‌های طیفی منطقه مطالعه شده بود.



شکل ۵- نمایی از منطقه سیلابی بر اساس شاخص‌های طیفی آب.

Figure 5- View of the flooded area based on the spectral water indices.

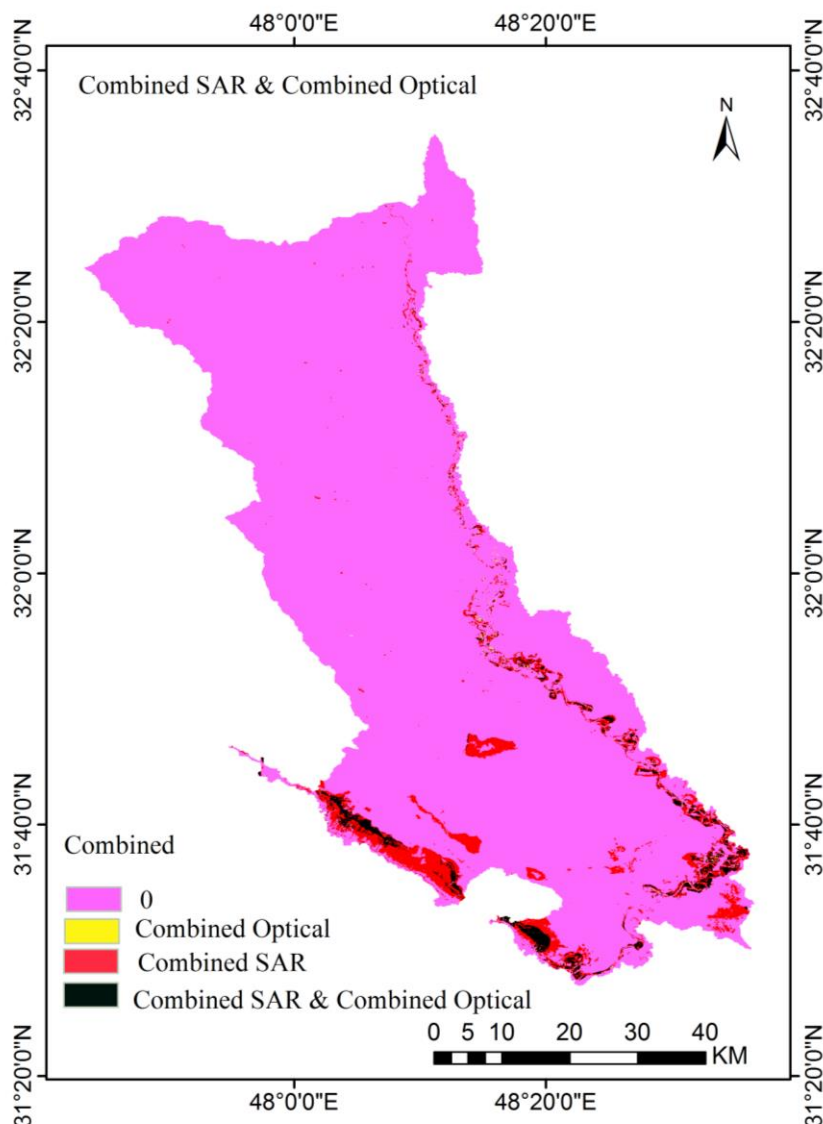
کیلومترمربع به دست آمد که معادل ۱/۵۱٪ از مساحت کل منطقه بود. نتایج به دست آمده از ترکیب داده‌های راداری و نوری در شکل ۶ ارائه شده است؛ به طوری که رنگ قرمز بیانگر مناطق سیلابی شناسایی شده به وسیله داده‌های راداری، رنگ زرد نشان‌دهنده نتایج داده‌های نوری و رنگ مشکی بیانگر نواحی مشترک دو روش (هم‌پوشانی) بود.

به منظور افزایش دقت شناسایی نواحی سیلابی، ترکیب نتایج به دست آمده از داده‌های راداری سنتینل-۱ با قطبش‌های VV و VH و داده‌های نوری سنتینل-۲ با استفاده از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI بررسی شد که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج این پژوهش بیشترین مساحت سیلاب شناسایی شده با استفاده از روش راداری ۲۳۹ کیلومترمربع و با روش داده‌های نوری ۶۲ کیلومترمربع و با ترکیب هر دو روش (راداری و نوری) ۵۸

جدول ۷- مقایسه پهنه‌های سیلابی بر اساس ترکیب داده‌های راداری و نوری.

Table 7- Comparison of the flooded areas based on the combination of radar and optical data.

No.	Comibination used	Identified area (km ²)
1	Combined radar	239
2	Combined optical	62
3	Common flood area in both methods	58
4	Agreement level between both methods	39 %



شکل ۶- نقشه سیلاب به‌دست آمده از ترکیب تصویرهای ماهواره‌ای رادار و نوری.
Figure 6- Flood map obtained from combining radar and optical satellite images.

راداری، نوری و ترکیبی انجام شد تا اندازه همخوانی الگوهای مکانی میان آن‌ها مشخص شود. اندازه هم‌پوشانی نواحی شناسایی شده در داده‌های راداری و نوری برابر با ۵۸ کیلومترمربع بود که حدود ۳۹٪ تطابق را نشان داد. این اندازه تطابق، با در نظر گرفتن تفاوت در حساسیت طیفی و هندسی میان داده‌های راداری و نوری، قابل قبول بود و نشان‌دهنده سازگاری نسبی روش‌ها در استخراج نواحی سیلابی بود و مؤید قابلیت اطمینان روش‌های ترکیبی در تحلیل و پایش نواحی آسیب‌پذیر و افزایش دقت در پهنه‌بندی سیلاب بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد می‌توان با استفاده از

نتایج مقایسه داده‌ها نشان داد که داده‌های راداری، به‌دلیل حساسیت زیاد به بازتاب از سطح آب و مستقل بودن از شرایط نوری و پوشش ابر، توانایی بیشتری در آشکارسازی نواحی سیلابی داشتند. عملکرد این داده‌ها حتی در مناطق با پوشش گیاهی یا شرایط جوی نامساعد نیز در مقایسه با داده‌های نوری بهتر بود. به‌طوری که مساحت شناسایی شده به‌وسیله ترکیب راداری برابر با ۲۳۹ کیلومترمربع بود، در حالی که این اندازه برای ترکیب نوری ۶۲ کیلومترمربع به‌دست آمد. به‌دلیل نبود داده‌های زمینی، ارزیابی تطبیقی با مقایسه نتایج به‌دست آمده از داده‌های

ترکیبی برابر با ۵۸ کیلومتر مربع برآورد شد، که ۳۹٪ با نواحی شناسایی شده به وسیله هر دو سنجنده هم‌پوشانی داشت. این همپوشانی قابل توجه بیانگر ظرفیت زیاد تلفیق داده‌های راداری و نوری در افزایش دقت پهنه‌بندی و تحلیل مخاطرات طبیعی مانند سیلاب است. نتایج بررسی سه بازه زمانی مطالعه شده (پیش از فعالیت‌های کشاورزی، بعد از پایان فصل کشاورزی و هنگام سیل) نشان داد که تغییرات مساحت پهنه آبی بیانگر اندازه آب‌گرفتنی در دوره‌های بررسی شده است و نمی‌تواند فقط شاخصی برای رویداد سیلاب باشد. شایان ذکر است که عامل‌های آب‌شناختی (شدت بارش، شرایط رطوبتی خاک و رفتار رواناب سطحی) بر گسترش پهنه‌های آبی اثرگذارند. بررسی دقیق این عامل‌ها نیازمند پژوهش‌های جداگانه و داده‌های میدانی است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با توسعه سامانه پایش برخط در محیط GEE، تغییرات پهنه‌های آبی و مناطق مستعد سیلاب به شکل دوره‌ای پایش شوند. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود با همکاری میان مراکز پژوهشی و سازمان‌های اجرایی از جمله سازمان مدیریت بحران و وزارت نیرو، بستری برای استفاده از داده‌های سنجنده از دور در مدیریت سد کرخه و بهبود سامانه‌های هشدار سیلاب زمینه‌سازی شود. با ترکیب داده‌های سنجنده از دور با مدل‌های آب‌شناختی و اقلیمی، تحلیل فرآیند رویداد سیلاب و پیش‌بینی آن دقیق‌تر خواهد بود. در نتیجه می‌توان گفت با توجه به اینکه عامل‌های انسانی از جمله تغییرات کاربری زمین و مدیریت نادرست منابع آب در تشدید سیل‌های منطقه مؤثر هستند؛ لحاظ کردن این عامل‌ها در برنامه‌ریزی‌های آتی مدیریت سیلاب ضروری است.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با پشتیبانی دانشگاه محقق اردبیلی (قرارداد ۱۴۰۴/د/۹/۱۳۹۲۷) انجام شد. نویسندگان این مقاله از همکاری دانشگاه محقق اردبیلی به دلیل حمایت مالی و معنوی قدردانی می‌کنند.

روش آستانه‌گذاری Otsu و ترکیب سنجنده‌ها نواحی تحت تأثیر سیلاب را با دقت قابل‌قبولی (۳۹٪ تطابق) شناسایی کرد. در پژوهشی، رجبی‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند رویداد سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در استان خوزستان ناشی از ترکیب عامل‌های مختلف از جمله مد دریا و ورود آب آن به رودها و طغیان نهرهای روستاها بود. نتیجه شدت بارندگی در این منطقه و گستردگی آن در تمام آبخیزهای منطقه قابل مشاهده بود. نتایج این پژوهش با یافته‌های آچیوت و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر استفاده از داده‌های راداری سنتینل-۱ و روش آستانه‌گذاری Otsu، هم‌راستا است. این پژوهشگران نواحی سیلابی در آبخیز بایتارانی با دقت بیش از ۸۰٪ شناسایی کردند. همچنین، از تصویرهای سنتینل-۲ برای محاسبه شاخص NDWI و بررسی دقت نقشه‌های سیلاب، استفاده کردند. این پژوهشگران نشان دادند که با استفاده از ترکیب داده‌های راداری و نوری می‌توان شناسایی نواحی سیلابی را بهبود داد. کاراکوس (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI و روش Otsu در دریاچه وان، عملکرد شاخص AWEI را برتر گزارش کرد؛ در حالیکه در این پژوهش، با استفاده از شاخص MNDWI بیشترین مساحت نواحی آبی شناسایی شد. دلیل این تفاوت احتمالاً ناشی از شرایط مکانی، ویژگی‌های پوشش گیاهی و تفاوت در زمان تصویربرداری است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش قابلیت داده‌های راداری سنتینل-۱ با قطبش VV و VH و داده‌های نوری سنتینل-۲ با استفاده از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI در شناسایی نواحی سیلابی با بهره‌گیری از روش آستانه‌گذاری Otsu بررسی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد می‌توان با استفاده از هر کدام از این داده‌ها مناطق سیلابی را به شکل قابل‌قبولی شناسایی کرد، اما با استفاده از روش ترکیبی راداری و نوری، می‌توان مناطق آب‌گرفته را به طور جامع‌تری شناسایی کرد. مساحت نهایی ناحیه سیلاب شناسایی شده در روش

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج
نویسنده دوم: روش کار، تحلیل نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله

فهرست منابع

- Agnihotri A. K, Ohri A, Gaur S, Das N, Mishra S. 2019. Flood inundation mapping and monitoring using SAR data and its impact on Ramganga River in Ganga Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191:1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7903-4>
- Amarnath G, Rajah A. 2016. An evaluation of flood inundation mapping from MODIS and ALOS satellites for Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 7(5):1526–1537. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084953>
- Albertini C, Gioia A, Iacobellis V, Manfreda S. 2022. Detection of surface water and floods with multispectral satellites. *Remote Sensing*. 14(23):1-24. <https://doi.org/10.3390/rs14236005>
- Amini L, Argany M, Abdollahi Kakroodi A. 2022. Detection of flooded areas in Golestan Province using VV, VH and VV + VH polarizations of Sentinel-1 and Landsat-8 images. *Journal of Geography and Environmental Studies*. 11(43):94-107. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.20087845.1401.11.43.6.7>
- Amitrano D, Di Martino G, Di Simone A, Imperatore P. 2024. Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets. *Remote Sensing*. 16(4):38p. <https://doi.org/10.3390/rs16040656>
- Anusha N, Bharathi B. 2020. Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 23(2):207–219. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.01.001>
- Argenti F, Lapini A, Bianchi T, Alparone L. 2013. A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 1(3):6-35. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2277512>
- Atchyuth BAS, Swain R, Das P. 2023. Near Real-time Flood Inundation and Hazard Mapping of Baitarani River Basin using Google Earth Engine and SAR Imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*. 10 p. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3113777/v1>
- Attarchi S. 2019. Efficiency evaluation of SAR-derived indices in urban impervious surfaces extraction using full polarimetric image. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*. 7(4):837-854. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2019.288561.1162>
- Bagheri Harooni M. H, Farzaneh M, Rayegani B. 2022. Development of remote sensing-based flood estimation methodology in Google Earth Engine. *Environment and Interdisciplinary Development*. 7(76):12-26. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/envj.2022.154826>
- Bao Y, Lin L, Wu S, Deng KAK, Petropoulos G.P. 2018. Surface soilmoisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 72:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.026>
- Breznik J, Oštir K, Rak G. 2025. The potential of Sentinel-1 imagery for flood event detection: A satellite vs. hydraulic model comparison. *Journal of Hydrology*. 651: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132587>
- Bhatt C.M, Rao G.S. 2016. Ganga floods of 2010 in Uttar Pradesh, north India: A perspective analysis using satellite remote sensing data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 7(2):747-763. [doi/full/10.1080/19475705.2014.949877](https://doi.org/10.1080/19475705.2014.949877)
- Borah SB. 2018. Flood inundation mapping and monitoring in Kaziranga National Park, Assam using Sentinel-1 SAR data. *Environmental Monitoring and Assessment*.

- 190(9):9p. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6893-y>
- Bouhennache R, Bouden T, Taleb-Ahmed A, Cheddad A. 2019. A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International*. 34(10):32p. <https://dx.doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094>
- Bucur A, Wagner W, Elefante S, Naeimi V, Briesse C. 2018. Development of an earth observation cloud platform in support to water resources monitoring. *Earth Observation Open Science and Innovation*. pp. 275–283.
- Chen M, Zhang R, Jia M, Cheng L, Zhao C, Li H, Wang Z. 2024. Accurate and rapid extraction of aquatic vegetation in the China side of the Amur River Basin Based on landsat imagery. *Remote Sensing*. 16(654):16 p. <https://doi.org/10.3390/rs16040654>
- Cian F, Marconcini M, Ceccato P. 2018. Normalized Difference Flood Index for rapid flood mapping: Taking advantage of EO big data. *Remote Sensing of Environment*. 209:712–730. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.006>
- Cui J, Zhang X, Wang W. 2020. Integration of optical and SAR remote sensing images for crop-type mapping based on a novel object-oriented feature selection method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 13(1):178–190. <https://dx.doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.5285>
- Dodange P, Ebadi H, Kayani A. 2021. Identification of flood areas with time series statistical calculations based on combining radar and optical data. *Ecohydrology*. 8(3):639–623. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2021.322145.1495>
- Domeneghetti A, Schumann GJP, Tarpanelli A. 2019. Preface: Remote sensing for flood mapping and monitoring of flood dynamics. *Remote Sensing*. 11(8):943. <https://doi.org/10.3390/rs11080943>
- Echendu AJ. 2023. Human factors vs climate change; experts' view of drivers of flooding in Nigeria. *Natural Hazards Research*. 3(2):240–246. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.04.002>
- Elhaddad H, Sultan M, Yan E, Abdelmohsen K, Mohammad AT, Badawy A, Hadi K, Hassan S, Mustafa M. 2024. Optimization of floodwater redistribution from Lake Nasser could recharge Egypt's aquifers and mitigate its excessive floods. *Communications Earth and Environment*. 5(385):11p. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01532-2>
- Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R, Proud SR. 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 140:23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- GAO W, Shen Q, Zhou Y, Li X. 2018. Analysis of flood inundation in ungauged basins based on multi-source remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment*. 190(3):13p. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-018-6499-4>
- Ghaffarian S, Kerle N, Filatova T. 2018. Remote sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: A review. *Remote Sensing*. 10(11):30p. <https://doi.org/10.3390/rs10111760>
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 202:18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Günen MA, Atasever UH. 2024. Remote sensing and monitoring of water resources: A comparative study of different indices and thresholding methods. *Science of The Total Environment*. 926:30 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172117>
- Hu X, Wang Y. 2022. Monitoring coastline variations in the Pearl River Estuary from 1978 to 2018 by integrating Canny edge detection and Otsu methods using long time series Landsat dataset. *Catena*. 209(2):16 p. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105840>
- Karakus P. 2025. Detection of water surface using Canny and Otsu threshold methods with machine learning algorithms on Google Earth Engine: A case study of Lake Van. *Applied Science*. 15:22p. <https://doi.org/10.3390/app15062903>
- Karimi M, Shahedi K, Razinei T, Miryaghoobzadeh M. 2020. Analysis of Performance of vegetation indices on agricultural drought using remote sensing technique in Karkheh Basin. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. 11(4):29–46. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/gisj.11.4.29>
- Khalid HW, Khalil R, Qureshi MA. 2021. Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 24(3):619–634. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.003>

- Konami T, Koga H, Kawatsura A. 2021. Role of pre-disaster discussions on preparedness on consensus-making of integrated flood management (IFM) after a flood disaster, based on a case in the Abukuma River Basin, Fukushima. Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 53:12p. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.102012>
- Kim B, Han Y, Kim Y, Kim Y. 2013. Generation of cloud-free imagery using Landsat-8. In: Paper SC02-0828 in the 34th Asian Conference on Remote Sensing, Proceedings. ACRS. pp. 20–24.
- Krongthao S, Piaseu N, Junda T, Wall B. M. 2021. Community-based flood preparedness for Thai dependent older adults. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 63:10p. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102460>
- Kumar L, Mutanga O. 2018. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. *Remote Sensing*. 10(10):15p. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
- Kumar R. 2019. Flood inundation and hazard mapping of 2017 floods in the rapti river basin using sentinel-1a synthetic aperture radar images. *Applications and Challenges of Geospatial Technology*. 77–98. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-99882-4_6
- Manjusree P, Prasanna Kumar L, Bhatt C. M, Rao GS, Bhanumurthy V. 2012. Optimization of threshold ranges for rapid flood inundation mapping by evaluating backscatter profiles of high incidence angle SAR images. *International Journal of Disaster Risk Science*. 3(2):113–122. <https://dx.doi.org/10.1007/s13753-012-0011-5>
- McFeeters SK. 1996. Theuse of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*. 17:1425–1432. <https://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mohamadiazar N, Ebrahimian A, Hosseiny H. 2024. Integrating deep learning, satellite image processing, and spatial-temporal analysis for urban flood prediction. *Journal of Hydrology*. 639:13 p. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131508>
- Ohki M, Watanabe M, Natsuaki R, Motohka T, Nagai H, Tadono T, Suzuki S, Ishii K, Itoh T, Yamanokuchi T. 2016. Flood area detection using ALOS-2 PALSAR-2 data for the 2015 heavy rainfall disaster in the Kanto and Tohoku Area. *The Remote Sensing Society of Japan*. 36(4):348–359. <https://dx.doi.org/10.11440/rssj.36.348>
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 9(1):62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Parida B. R, Tripathi G, Pandey A. C, Kumar A. 2022. Estimating floodwater depth using SARderived flood inundation maps and geomorphic model in kosi river basin (India). *Geocarto International*. 37(15):4336–4360. <https://dx.doi.org/10.1080/10106049.2021.1899298>
- Peymankhah P, Attarchi S, Moharrami M. 2023. Rapid Flood Monitoring Using Sentinel-1 and Landsat-8 Images (Case study: Kashkan River, Poldakhter City). *Nivar*. 47(122-123):82-94. (In Persian). <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.417413.1265>
- Pflumm L, Kang H, Wilting A, Niedballa J. 2025. GEE-PICX: Generating cloud-free Sentinel-2 and Landsat image composites and spectral indices for custom areas and time frames—a Google Earth Engine web application. *Ecography*. 7 p. <https://doi.org/10.1111/ecog.07385>
- Rahman R, Thakur P. 2018. Detecting, mapping and analysing of flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 27:S37-S41. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.10.002>
- Raikes J, Smith TF, Jacobson C, Baldwin C. 2019. Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38:10p. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101207>
- Rajabizadeh Y, Ayyoubzadeh SA, Ghomeshi M. 2019. Flood Survey of Khuzestan Province in 97-98 and Providing Solutions for its Control and Management in the Future. *Journal of Ecohydrology*. 6(4):1069-1084. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2020.285854.1166>
- Rajendiran N, Kumar LS. 2023. Pixel level feature extraction and machine learning classification for water body extraction. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 48(1):9905–9928 <https://dx.doi.org/10.1007/s13369-022-07389-x>
- Sadian A, Shafizadeh-Moghadam H. 2021. Investigation of land use changes in Karkheh Watershed during 1990 and 2020 using Google Earth Engine platform and Landsat satellite images. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(10):2569-2580. (In Persian).

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.330075.669068>

Sari Y, Prakoso PB, Baskara AR. 2019. Road crack detection using support vector machine (SVM) and OTSU algorithm. In Proceedings of the 2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Bali, Indonesia. 18–21 November. pp. 349–354.

<https://dx.doi.org/10.1109/ICEVT48285.2019.8993969>

Singh G, Singh Rawat K. 2024. Mapping flooded areas utilizing Google Earth Engine and open SAR data: a comprehensive approach for disaster respons. Discover Geoscience. 2(5):13 p. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00006-4>

Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S, Brisco B. 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 164:152-170.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>

Tavares PA, Beltrão NES, Guimarães US, Teodoro AC. 2019. Integration of sentinel-1 and sentinel-2 for classification and LULC mapping in the urban area of Belém, Eastern Brazilian Amazon. Sensors. 19(5):11 p. <https://dx.doi.org/10.3390/s19051140>

Tran T, Lakshmi V. 2024. Enhancing human resilience against climate change: Assessment of hydroclimatic extremes and sea level rise impacts on the Eastern Shore of Virginia, United States. Science of the Total Environment, 947:12 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174289>

Uddin K, Matin MA, Thapa RB. 2021. Rapid flood mapping using multi-temporal SAR images: An example from Bangladesh. In: Bajracharya, B., Thapa, R.B., Matin, M.A. (eds) Earth Observation Science and Applications for Risk Reduction and Enhanced Resilience in Hindu Kush Himalaya Region. Springer, Cham., 201-211. <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-73569-210>

Uzun M. 2024. Analysis of Manyas Lake surface area and shoreline change over various periods with DSAS tool. Turkish Journal of Remote Sensing. 6(1):35–56. <https://doi.org/10.51489/tuzal.1443490>

Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 27(14):3025–3033.

<https://dx.doi.org/10.1080/01431160600589179>

Yamada Y. 2008. Morphological analysis of flood inundated regions in paddy areas using ALOS/PALSAR data and its distribution on the Google Earth–Design of the Future Disaster Management System (FDMS). In The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 37, Part B4,6p. Beijing. <https://isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/4pdf/195.pdf>

Yılmaz OS. 2023. Automatic detection of water surfaces using K-means++ clustering algorithm with Landsat-9 and Sentinel-2 images on the Google Earth Engine platform. Bilge International Journal of Science and Technology Research. 7(2):105–111. <https://dx.doi.org/10.30516/bilgesci.1262550>

You N, Han L, Liu Y, Zhu D, Zuo X, Song W. 2023. Research on Wavelet Transform modulus maxima and OTSU in edge detection. Applied Sciences. 13(16):15p. <https://doi.org/10.3390/app13074454>

Zhang G, Wu M, Wei J, He Y, Niu L, Li H, Xu G. 2021. Adaptive threshold model in google earth engine: A case study of Ulva prolifera extraction in the south yellow sea, China. Remote Sensing. 13(16):25p. <https://doi.org/10.3390/rs13163240>

Zhu D, Zhou C, Zhu Y, Wang T, Zhang C. 2023. Monitoring of supraglacial lake distribution and full-year changes using multisource time-series satellite imagery. Remote Sensing. 15(24):16p. <https://doi.org/10.3390/rs15245726>



Monitoring Flood-induced Surface Waters Using Different Remote Sensing-based Polarizations and Spectral Water Indices in the Karkheh Watershed

Zeinab Hazbavi^{1*}, Marzieh Ghashamshami²

1- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Former M.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

According to global statistics, floods affect more than 40 % of the world's population and cause significant loss of life and property. In Iran, more than 80 % of cities are at risk of flooding. Therefore, investing in preventive measures and advanced technologies to combat floods is more necessary than ever. Preparedness and risk reduction before disasters could significantly reduce the cost of post-disaster recovery. Accurate mapping and long-term monitoring of floods play a key role in planning and prevention. One of the efficient tools for monitoring and mapping floods in optimal disaster management is the use of satellite imagery. Although Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) images are useful for identifying flood areas in cloudy conditions, this method also has limitations. The sensitivity of radar data to dense vegetation and vertical structures may lead to under- or over-estimation of flooded areas. Besides, the Normalized Differential Water Index (NDWI), Modified Normalized Differential Water Index (MNDWI), and Automatic Water Extraction Index (AWEI) obtained from optical data in cloudy or plant shadows may have errors and cause incomplete or incorrect identification of flood areas. Therefore, the results obtained from both methods should be interpreted carefully, and combining radar and optical data can reduce these limitations, but does not completely eliminate them. Therefore, in this study, radar and optical data were analyzed and compared using remote sensing indices related to the water spectrum, and flooded areas were identified in the Karkheh watershed in Khuzestan Province.

Materials and Methods

In the Karkheh watershed, widespread and unpredictable flood occur in the months of March and April 2019, which resulted in significant damage. Accordingly, an area of 3838.3 km² was selected. In this study, three different methods were used to identify and analyze surface water caused by flooding: (1) to detect changes, data from three time periods were used, including pre-agriculture season (September 28 to October 25, 2018), post-agriculture season (February

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** hazbavi.zeinab@gmail.com

Citation: Hazbavi, Z., Ghashamshami, M. 2026. Monitoring Flood-induced Surface Waters Using Different Remote Sensing-based Polarizations and Spectral Water Indices in the Karkheh Watershed. *Watershed Management Research*. 39(1): 84-107.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.370814.1635

Received: 24 September 2025, **Received in revised form:** 13 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 84-107.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



28 to March 25, 2019), and during the flood (March 28 to April 25, 2019). (2) SAR images obtained from the Sentinel-1 satellite with VV and VH polarizations were processed using the Refined Lee filter and the Otsu threshold algorithm to identify flooded areas. (3) To more accurately extract surface water from optical images, spectral water indices including NDWI, MNDWI, and AWEI obtained from the Sentinel-2 satellite were used. It is worth noting that AWEI was available in two versions: shadowless for open areas and shaded to reduce the effect of shadow in urban and mountainous areas, and the shadowless version was used in this study. Finally, by combining the results from radar and optical methods and analyzing multi-temporal variations, comprehensive maps of flood spread were produced and validated.

Results and Discussion

The results of this study showed that the performance of the VH polarization with a value of 254 km² was slightly better in detecting flood areas than the VV polarization with a value of 252 km². With a combined method using both polarizations and only selecting areas with low backscatter in both polarizations, 239 km² of flooded regions were identified. The Combination of polarizations improved the accuracy and reliability of flood mapping and was superior to optical data because the radar was insensitive to cloud cover and lighting conditions. The results of temporal analysis of permanent and temporary water in the combined method (VV+VH) in three periods revealed that water coverage was high (about 1560 km²) pre-agricultural activities, decreased to 847 km² in late winter. Then increased to approximately 974 km² during the flood event. Despite lower water compared to the pre-agriculture period, a widespread flood occurred due to intense, sudden rainfall and the limited land and infrastructure capacity. The largest area covered by water was identified using MNDWI with an area 227 km². While the AWEI, with a value of 126 km², with a more conservative approach, only areas with a very high probability of surface water were identified. By combining all three spectral indices, an area of 62 km² was identified as flood-prone areas. The variations between the indices are due to the differences in spectral bands and sensitivity to water. Analysis of the results of the NDWI, MNDWI and AWEI showed that the changes in permanent and temporary water extent during the flood were significant, increasing from 98 km² to 324 km². The Otsu thresholding method was effectively applied to standardize and classify water areas across indices.

Conclusion and Suggestions

Based on the results of this study, it concluded that combining radar and optical data led to the identification of 58 km² of flood areas, and there was a 39% overlap between the results of the two satellites. Using this combination significantly increased the accuracy and reliability of identifying flood-affected areas. Since changes in water extent do not only indicate the occurrence or severity of floods, it indicates that hydrological and management factors play a more important role in flood occurrence. Therefore, it is suggested that combined data, along with environmental factor analysis, be used to develop early warning systems and crisis management planning. In addition, using this method allows for periodic zoning of floods, which is recommended for use in developing preventive measures, optimal flood management, and agricultural planning.

Keywords: Flood management, flood mapping, Otsu algorithm, remote sensing indices, SAR images

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This research was supported by the University of Mohaghegh Ardabili (Research grant number 1404/d/9/13927). The authors of this article would like to acknowledge to the University of Mohaghegh Ardabili for its financial and logistical support.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

All information and results are provided in the article.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, Supervision, Manuscript editing and review, Results control.

Author 2: Methodology, Software analysis, Writing - original draft preparation



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آب‌مخرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

کاربست رویکرد پنج حلقه‌ای در مدیریت پایدار آبخیز افین خراسان جنوبی

رضا چمنی^۱، معصومه هواسی^۲، رضا یاقوتی^۳، سیدحمیدرضا صادقی^۴*

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، ایران

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۴- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

ساختار سیاسی آبخیزها با اجرای تصمیم‌های مدیران و برنامه‌ریزان، دستخوش تغییر می‌شود. بر این اساس سازمان‌های مختلف نقش اساسی و غیرقابل‌انکاری در شکل‌گیری مدیریت پایدار آبخیزها دارند. حال آن‌که نقش بخش‌های مختلف در مدیریت آبخیزها و کیفیت مدیریت پایدار منابع آن، بررسی نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی نقش رویکرد پنج حلقه‌ای شامل دولت و مجلس شورای اسلامی، شوراها و دهیاری‌ها، بخش خصوصی، دانشگاه و نیروهای نظامی - انتظامی در مدیریت پایدار آبخیز افین، انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا مطالعات تفضیلی-اجرایی هفت زیرآبخیز افین از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان جنوبی، دریافت شد. سپس، گزارش‌های مختلف انجام‌شده بررسی و مشکلات و موانع موجود برای هر زیرآبخیز استخراج شد. در این راستا، با بازدیدهای میدانی و صحبت با جوامع محلی، مشکلات راستی‌آزمایی شد و مشکلات دیگر که در مطالعات وجود نداشت یا بعداً به‌وجود آمده بود نیز مشخص و فهرست مشکلات نهایی شد. سپس، درخت مشکلات نهایی تشکیل و در ساختار استخوان ماهی جانمایی شد. در پایان بر اساس رویکرد پنج حلقه‌ای، وظایف پنج سازمان دولت و مجلس شورای اسلامی، شوراها و دهیاری‌ها، بخش خصوصی، دانشگاه و مجموعه نیروهای نظامی - انتظامی در مدیریت پایدار آبخیز افین، بررسی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: sadeghi@modares.ac.ir

استناد: چمنی، ر.، هواسی، م.، یاقوتی، ر.، صادقی، س.ح.ر. ۱۴۰۵. کاربرد رویکرد پنج حلقه‌ای در مدیریت پایدار آبخیز افین خراسان جنوبی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۱۲۵-۱۰۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370686.1633

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱۰۸ تا ۱۲۵.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نتایج و بحث

نتایج این پژوهش بیانگر ۳۱ مشکل اصلی در هفت زیربخش آفین بود. این مشکلات در هشت بخش پایش و ارزیابی، مخاطره‌های طبیعی، اقتصادی، اجتماعی، بهداشتی رفاهی، آگاهی نداشتن جوامع محلی، مشکلات و موانع طبیعی و سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در ساختار بومی‌شده استخوان ماهی، جانمایی شد. سپس، با استفاده از تجزیه و تحلیل اسناد سازمانی و شرح خدمات سازمان‌ها، مشکلات تعیین‌شده به سازمان‌های مختلف ربط داده شد. نتایج نشان داد بیشترین تعداد مشکلات مربوط به سه خوشه "اقتصادی"، "سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی" و "بهداشتی-رفاهی" بود و هر یک از بخش‌ها بر اساس کارکرد خاص خود در رفع آن‌ها مداخله داشت. نتایج تعیین نقش سازمان‌های مختلف نشان داد که دولت به‌عنوان مرجع اصلی سیاست‌گذاری و تخصیص منابع، نقش مهمی در تمرکززدایی امکانات، اختصاص بودجه و پشتیبانی از دیگر بخش‌ها را دارد. از سوی دیگر، شوراها و دهیاری‌ها در سطح محلی بیشتر در تسهیل مشارکت مردمی، پیگیری مسائل اجتماعی و هماهنگی با دستگاه‌های اجرایی نقش اثرگذارتری داشتند. افزون بر این، بخش خصوصی نیز با سرمایه‌گذاری در بخش فرآورده‌های زراعی و بازاریابی آن بر شکوفایی اقتصادی آبخیز آفین، اثرگذار بود. دانشگاه نیز با ورود به عرصه تولید فن‌آوری‌های محیط‌زیست‌پسند، تربیت نیروهای متخصص و ارائه نوآوری‌های علمی در مدیریت پایدار آبخیز، اثرگذار بود. در این میان، یکی از الگوهای کاربردی، ارائه راهکارهای بهینه‌سازی بهره‌برداری از زرشک، فرآوری محصولات جانبی و گسترش زنجیره ارزش آن بود. اما، نقش دانشگاه فراتر از این بخش بود و شامل پشتیبانی علمی و فناوری از دیگر زمینه‌های مدیریتی نیز بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آبخیز آفین به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مراکز تولید زرشک در خراسان جنوبی، در تولید محصولات زراعی و باغی جایگاه ممتازی دارد. از سوی دیگر، وجود گسل‌های پرشمار در این آبخیز سبب‌شده تا در زمان زلزله، جوامع محلی متحمل خسارت‌های زیاد مالی و جانی شوند. بر این اساس، با هم‌افزایی میان نهادهای دولتی و بخش خصوصی می‌توان افزون بر تقویت اقتصاد زراعی منطقه، به پایداری جوامع انسانی نیز یاری رساند. با این حال، نقش دیگر بخش‌ها نیز در این فرآیند بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، دانشگاه‌ها با تولید دانش و فناوری‌های نوین، شوراها و دهیاری‌ها با بهبود سطح مشارکت محلی و نیروهای نظامی-انتظامی با تأمین امنیت و پشتیبانی فنی هر یک نقش مشخصی در پیشبرد مدیریت پایدار آبخیز دارند. بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود با بهره‌گیری از ظرفیت بخش خصوصی در فرآوری زرشک و تولید محصولات فرعی غذایی-دارویی، از خام فروشی این محصول با ارزش جلوگیری شود و با ایجاد ارزش‌افزوده، به افزایش و پایداری درآمد جوامع محلی کمک شود. همچنین، با توجه به وابستگی شدید منابع آبی به بارندگی، پیشنهاد می‌شود طرح‌های مدیریت منابع آب موجود و افزایش بهره‌وری اقتصادی آن برای جلوگیری از مهاجرت و خالی شدن منطقه از سکنه، اجرا شود.

واژگان کلیدی

توسعه پایدار، دولت محلی، مدیریت جامع آبخیز، مدیریت مشارکتی، مشارکت‌گرواران

مقدمه

خدمات در حال نابودی یا بهره‌برداری ناپایدار است (ابراهیمی‌گت‌کش و صادقی ۲۰۲۴). افزون بر این، فرسایش خاک، رخداد سیلاب، خشک‌سالی، تغییرات آب و هوایی، گسترش صنعت و کشاورزی فشرده نیز

آبخیزها به‌عنوان بستر بوم‌سازگان‌ها (زنگ و همکاران ۲۰۲۴) مجموعه‌ای از مزایا و خدمات رفاهی را برای انسان ارائه می‌دهند. با این حال، بسیاری از این

محیط‌زیستی در مقیاس آبخیز و استفاده از رویکردهای مشترک دانش بین‌رشته‌ای و فرارشته‌ای^۴ مدیریت آبخیزها را تسهیل کرد (گوننس و همکاران ۲۰۱۴). در این مسیر مدل‌های نهادی مختلفی برای هم‌افزایی میان علم و سیاست شکل گرفته است. در این راستا، ابتدا رویکرد سه‌حلقه‌ای^۵ با محوریت دولت، صنعت و دانشگاه به‌عنوان نخستین چارچوب معرفی شد (لیدسدورف ۲۰۰۰). سپس، با افزودن جامعه مدنی و رسانه، رویکرد چهارحلقه‌ای^۶ مطرح شد که فرهنگ و ارتباطات اجتماعی نقش برجسته‌ای در این رویکرد داشتند (کمپیل و همکاران ۲۰۱۵؛ افونسو و همکاران ۲۰۱۲). سرانجام، تکامل این دیدگاه‌ها منجر به معرفی رویکرد پنج‌حلقه‌ای^۷ شد که محیط طبیعی را به‌عنوان یک رکن اساسی وارد چرخه تعاملات کرد (گروندل و دالستروم ۲۰۱۶). یکی از روش‌های مدیریت پایدار استفاده از رویکرد پنج‌حلقه‌ای به‌عنوان یک روش تلفیق دانش بین‌رشته‌ای برای اعمال مدیریت پایدار است. نقطه اثر و هدف نهایی در طراحی و پیشنهاد رویکرد پنج‌حلقه‌ای، تحلیل رشته‌ای و فرارشته‌ای برای میل به توسعه پایدار و بوم‌شناسی اجتماعی^۸ در آبخیزها است که دقیقاً دانش، نوآوری و عرصه را بهم پیوند می‌زند (کارایانیس و کمپیل ۲۰۱۰). پژوهش‌های پرشماری صرفاً برای استفاده از مدل نامبرده در راستای ارزیابی نقش سازمان‌های مختلف بدون توجه به بستر مدیریت آبخیزها و گروداران مختلف در آبخیزها انجام شده است. در این راستا، لیدسدورف (۲۰۰۰) رویکرد سه‌حلقه‌ای مشتمل بر صنعت، دانشگاه و دولت را تشریح و گزارش کرد. دانشگاه و صنعت یک مسیر فن‌آورمحور است در حالی که با استفاده جداگانه از سه مدل می‌توان شرایط مدیریتی پیچیده‌تری را ایجاد کرد. افونسو و همکاران (۲۰۱۲) نیز با تأکید بر پژوهش و توسعه، بخش چهارمی را با عنوان جامعه مدنی به رویکرد سه‌حلقه‌ای

سبب تشدید نابودی آبخیزها شده‌اند (صادقی و همکاران ۲۰۲۴؛ مصباح و همکاران ۲۰۲۵). در دهه‌های گذشته، توسعه ناپایدار و پیامدهای نامطلوب آن بیانگر رابطه نامناسب انسان و طبیعت است که پیامدهای منفی پرشماری را برای آبخیزها به‌همراه دارد (مصفايي و جم ۲۰۲۳؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۵ ب). از این‌رو، برای جلوگیری از نابودی بیشتر زمین، توسعه سیاست‌ها و راهبردهای مؤثر با بهره‌گیری از منابع دقیق علمی و برنامه‌ریزی‌های تخصص محور ضرورت دارد (موجه و همکاران ۲۰۲۴، صادقی و همکاران ۲۰۲۵ الف). تعریف ساده مدیریت پایدار آبخیز^۲ یعنی مدیریت منابع برای بهینه‌سازی منافع اجتماعی-اقتصادی، حفظ خدمات بوم‌سازگان و بهبود عملکردهای بوم‌شناختی در بلندمدت است (نارندرا و همکاران ۲۰۲۱). مدیریت پایدار آبخیز به‌عنوان یک راهبرد مناسب برای بهبود بهره‌وری و مقابله با نابودی زمین است. این راهبرد بر استفاده از فناوری‌های حفاظتی تأکید دارد و شامل هم‌افزایی^۳ میان فناوری‌ها، سیاست‌ها و نهادهای هدف‌مند برای بهبود بهره‌وری، پایداری استفاده از منابع و دسترسی به بازار است (تسفاي و همکاران ۲۰۱۸). بزرگترین چالش‌های پیش‌روی مدیریت پایدار، مسائل مربوط به تغییر کاربری زمین، کمبود منابع آب، نابودی محیط‌زیست، امنیت غذایی، رشد جمعیت و شهرنشینی، نبودن زیرساخت کافی، ضعف اجرای قانون و هماهنگ نبودن گروداران است که به نگرانی‌های جدی جهانی تبدیل شده‌اند. اگرچه آسیب‌های نبود مدیریت برای موارد نامبرده اجتناب‌ناپذیر است اما مدیریت پایدار شیوه‌های مؤثری برای مدیریت این بحران‌ها ارائه می‌دهد (تولدربیان و دینکا ۲۰۲۵؛ عابدی و همکاران ۲۰۲۵). با مدیریت پایدار آبخیزها می‌توان با پیوند و تعامل در تقاطع علم-سیاست-جامعه بر رفتار و تصمیمات دانشمندان، سیاست‌گذاران و دیگر بخش‌های جامعه به‌طور قابل توجهی اثرگذار بود و با ترکیب مهمترین سیاست‌های

4- Interdisciplinary and Transdisciplinary Knowledge

5- Triple Helix

6- Quadruple Helix Approach

7- Quintuple Helix Approach

8- Social Ecology

2- Sustainable Watershed Management

3- Synergy

تمرکز بر دولت-صنعت-دانشگاه، نقش جامعه را به‌طور نظام‌مند در نظر نمی‌گرفت. رویکرد چهارگانه با افزودن جامعه مدنی و رسانه، این کمبود را تا حدی برطرف کرد. اما، مؤلفه محیط طبیعی بیرون از میدان تحلیل باقی ماند. ورود محیط طبیعی در رویکرد پنج‌حلقه‌ای، امکان پیوند هم‌زمان دانش، سیاست، اقتصاد، جامعه و بوم‌شناسی فراهم شد و شکاف میان مدیریت نهادی و پایداری محیطی را پوشش داد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داد اگرچه رویکرد پنج‌حلقه‌ای در زمینه‌های مختلفی استفاده شده است اما، در زمینه مدیریت پایدار آب‌خیزها با کاستی‌هایی همراه است. در این پژوهش‌ها بیشتر جنبه‌های نظری مدل در نظر گرفته شده است و به تحلیل تجربی آن در مقیاس آب‌خیز توجه کافی نشده است. افزون بر این، پیوند نظام‌مند میان مشکلات و موانع شناسایی شده با نهادهای مسئول به‌شکل شفاف بررسی نشده است و بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی بومی در چارچوب پنج‌حلقه‌ای به‌کار گرفته نشده است. در این پژوهش برای نخستین بار در ایران و اختصاصاً در آب‌خیز افین با اتکا به چارچوب رویکرد پنج‌حلقه‌ای موضوع مسئله-سازمان به‌شکل نظام‌مند بررسی شد تا خلأهای کاربردی در مقیاس آب‌خیز را برطرف کند.

کاربرد رویکرد پنج‌حلقه‌ای برای مدیریت پایدار آب‌خیز

رویکرد پنج‌حلقه‌ای، شکل توسعه‌یافته رویکرد سه‌حلقه‌ای و چهارگانه است. به‌گونه‌ای که رویکرد سه‌حلقه‌ای بر روابط دانشگاه، صنعت و دولت مبنی بر اهمیت آموزش عالی برای تولید دانش به روشنی تأکید دارد. از سوی دیگر، رویکرد چهارحلقه‌ای ساختار رویکرد سه‌حلقه‌ای را با افزودن حلقه چهارم مبتنی بر عمومیت فرهنگ، رسانه و جامعه مدنی تشکیل می‌دهد که در آن سیاست‌های دانش‌بنیان و نوآور دستیابی عموم مردم به اهداف از پیش تعیین‌شده را تعبیه می‌کند. حال آن‌که رویکرد پنج‌حلقه‌ای، مؤلفه پنجم و حیاتی در فرآیند نوآوری، با تمرکز بر حساسیت بوم‌شناختی با تأکید بر طبیعت و بوم‌شناسی اجتماعی را معرفی می‌کند (دویکا و همکاران ۲۰۲۴). بر این اساس، رویکرد پنج‌حلقه‌ای شامل پنج بخش

برای بررسی نقش این جامعه بر ایجاد یک چارچوب نظری در مواجهه با چالش‌های پیش‌روی توسعه پایدار، اضافه کردند. در وارملند سوئد، گروندل و دالستروم (۲۰۱۶) رویکرد چهارحلقه‌ای را ارزیابی کردند و رویکرد پنج‌حلقه‌ای را با هدف توسعه پایدار اقتصاد جنگل پیشنهاد دادند. در این پژوهش بخش پنجم با عنوان محیط طبیعی جامعه به رویکرد چهارحلقه‌ای اضافه شد. این بخش بیشتر با عنوان محرک دانش و علوم نوین در پاسخ به چالش‌های محیطی ایجاد شد. انکوش و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی با هدف تجزیه و تحلیل رویکرد پنج‌حلقه‌ای شامل دانشگاه، تجارت، جامعه، دولت و رسانه در مهار آلودگی و آسیب به آب‌خیز سیتاروم انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد پنج بخش مبتنی بر مفهوم پنج‌حلقه‌ای در مدیریت پایدار آب‌خیز نقش دارند. رسیلاواتی و همکاران (۲۰۲۳) نیز رویکرد پنج‌حلقه‌ای شامل دولت، دانشگاه، تجارت، جامعه و رسانه را برای اولویت‌بندی وظایف هر بخش، در راستای حل مشکلات و مناقشات رود آیونگ در جزیره بالی اندونزی اجرا کردند. نتایج این پژوهش نشان داد بدون مدیریت مشارکتی این پنج بخش، وضعیت آب‌خیز پایدار نخواهد بود و برنامه‌ریزی جامعی باید در این زمینه انجام شود. عبدیالله و همکاران (۲۰۲۴) برخی از چالش‌های آب‌خیز سیتاروم اندونزی را با تمرکز بر مدیریت مشارکتی پایدار و رویکرد پنج‌حلقه‌ای دولت، بخش خصوصی، سیاست‌گذاران محلی، دانشگاه و ارتش تشریح کردند. نتایج این پژوهش نشان داد دولت مرکزی به‌عنوان ارائه‌دهندگان سیاست و مقررات و به‌عنوان بخش پیشرو، دولت‌های محلی به‌عنوان ناظر برنامه، دانشگاه‌ها به‌عنوان خالق دانش و نوآوری‌های مدیریت برنامه، بخش خصوصی به‌عنوان شرکای مهم اقتصادی و ارتش ملی اندونزی به‌عنوان مجری نقش اساسی در مدیریت پایدار آب‌خیز سیتاروم دارند. بر پایه نتایج پژوهش‌های پیشین، می‌توان با هماهنگی میان سازمان‌ها و احزاب مختلف و تعیین اثر هر کدام، مشکلات و موانع مدیریت پایدار را برطرف کرد. در چارچوب‌های نهادی پیشین، رویکرد سه‌حلقه‌ای با

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری مشکلات و تهیه چارچوب استخوان ماهی^۹

برای جمع‌آوری موانع و مشکلات آبخیز از رویکرد کیفی و فن‌های گردآوری داده از جمله مطالعات تفصیلی-اجرایی آبخیزداری، بازدیدهای میدانی، گفتگو با جوامع محلی و منابع و مقالات علمی استفاده شد. در این راستا، با بررسی‌های میدانی و مصاحبه با جوامع محلی، فهرست کامل مشکلات و موانع طبیعی، آب‌شناسی، اقلیمی و انسانی آن در قالب جدول اولیه در مقیاس زیرآبخیز، تهیه شد (رسیلاواتی و همکاران ۲۰۲۳). سپس، در راستای تقسیم‌بندی مشکلات به گروه‌های هم‌سرشت و مدیریت بهتر آن‌ها، مشکلات در هشت رده مدیریتی از طبیعی تا انسانی شامل پایش و ارزیابی، مخاطره‌های اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی، بهداشتی-رفاهی، آگاهی نداشتن جوامع محلی، مشکلات و موانع طبیعی و سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی تقسیم‌بندی شد. در هر بخش مشکلات مرتبط با آن از جدول مشکلات انتخاب شد و در چارچوب استخوان ماهی جانمایی شد. سپس، به‌منظور انطباق چارچوب با رویکرد پنج حلقه‌ای، رابطه هر مشکل با سازمان یا نهاد مسئول مستقیم و یا غیرمستقیم در رفع آن، مشخص شد. افزون بر طبقه‌بندی موضوعی، هر مشکل به یکی از بخش‌های پنج‌گانه شامل دولت و مجلس، شوراهای و دهیاری‌ها، بخش خصوصی، دانشگاه و نیروهای نظامی و انتظامی پیوند داده شد. نتیجه این فرایند مدلی بود که هم ساختار کلی مشکلات آبخیز را نشان می‌داد و هم نقش هر یک از نهادهای درگیر را نیز مشخص می‌کرد.

جانمایی مشکلات و موانع در زیرآبخیزها

پس از تعیین موانع و مشکلات آبخیز افین و جانمایی آن در ساختار استخوان ماهی، با استفاده از بازدیدهای میدانی و بررسی شواهد در سال ۱۴۰۳، مشکلات در زیرآبخیزهای مختلف جانمایی شد. بر این اساس، تمام مشکلات در همه زیرآبخیزها وجود نداشته و هر زیرآبخیز مشکلات مربوط به خود را داشت.

نظام آموزشی، نظام اقتصادی، محیط طبیعی، جامعه مبتنی بر رسانه و فرهنگ و نظام سیاسی است (کارایانیس و همکاران ۲۰۱۲). این رویکردهای حلقه‌ای شامل رویکرد سه حلقه‌ای پیشین هستند که سامانه آموزشی به‌وسیله سازمان‌های دانشگاهی و آموزش عالی، نظام اقتصادی شامل صنعت، بانک‌ها و خدمات و نظام سیاسی مشتمل بر نماینده مقامات دولتی و برنامه‌ها، قوانین و ایده‌ها است (گروندل و دالستروم ۲۰۱۶). رویکرد پنج حلقه‌ای بر دیدگاه اجتماعی و بوم‌شناسی محیط‌های طبیعی جامعه تأکید دارد. بوم‌شناسی اجتماعی بر تعامل، توسعه همگانی و تکامل مشترک جامعه و طبیعت تأکید دارد. دانش در رویکرد پنج حلقه‌ای نیروی محوری و محرک پیشرفت است. هدف این رویکرد گنجاندن یک محیط طبیعی به‌عنوان یک زیرسامانه برای رویکردهای دانش و نوآوری است. به‌طوری که طبیعت یک جزء مرکزی و معادل و برای تولید دانش و نوآوری تثبیت می‌شود. رویکرد پنج حلقه‌ای مجموع تعاملات اجتماعی و دانشگاهی در یک دولت به‌منظور ترویج و تجسم یک سامانه واحد، برای توسعه پایدارتر را درک می‌کند و در آن توسعه می‌یابد (کارایانیس و همکاران ۲۰۱۲). مدیریت روش پنج‌گانه از زیرمجموعه روش‌های مدیریت پایدار است و بر همکاری میان بخش‌های گوناگون و مدیریت یکپارچه آبخیز استوار است (هریسون و همکاران ۲۰۱۵). نقش مدیریتی هر یک از بخش‌های این رویکرد برای تسریع مدیریت متفاوت است. دولت مرکزی و متولی ارائه‌دهنده سیاست و مقررات اصلی، به‌عنوان بخش پیشرو عمل می‌کند. دهیارها و شوراهای مربوطه به‌عنوان ناظر برنامه عمل می‌کنند و کل مسئولیت نظارت بر کارآمدی هر یک از اقدامات بر عهده این بخش است. نقش دانشگاه خلق دانش و نوآوری‌های مدیریت در برنامه است. بخش خصوصی و شرکای مهم این طرح، نقش حامی و شرکت‌کننده دارند و نیروی نظامی و انتظامی تأمین امنیت آبخیز را بر عهده دارد (عبدیالله و همکاران ۲۰۲۴).

معرفی منطقه مطالعه شده

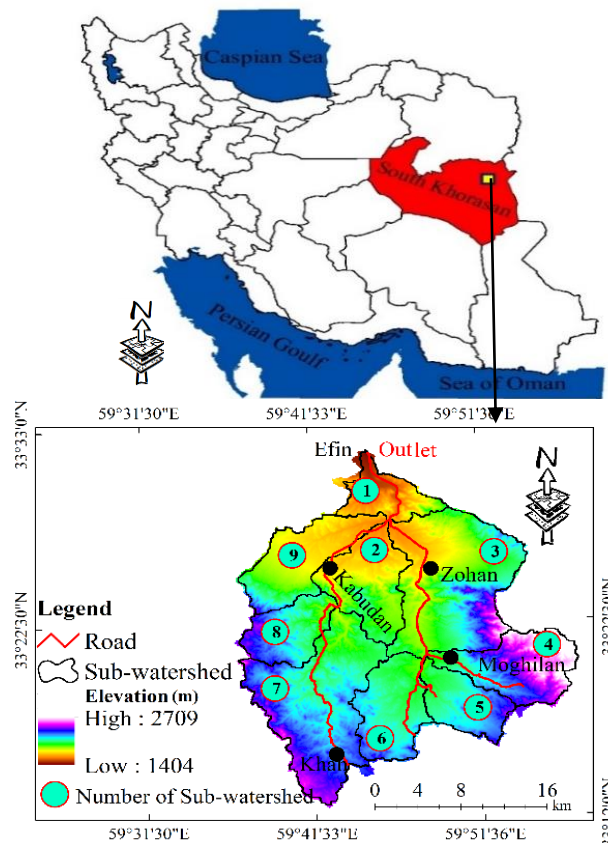
آبخیز افین با مساحت ۶۵۰ کیلومتر مربع مشتمل بر هفت زیرآبخیز بزرگ در شهرستان زیرکوه استان خراسان جنوبی است. بر اساس داده‌های اقلیمی در آبخیز افین میانگین سالانه بارش ۱۳۱/۸ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد است. دامنه تغییرات ارتفاع در این آبخیز از ۱۴۰۴ متر تا ۲۷۰۸ متر است (چمنی و همکاران ۲۰۲۳). روستاهای افین، کبودان، خوان، شیرگ، بنمرود، جان‌احمد و میغان و شهر دهان از مهم‌ترین مراکز جمعیتی داخل آبخیز افین است (چمنی و همکاران ۲۰۲۴). موقعیت آبخیز افین و پراکنش مراکز جمعیتی آن در استان خراسان جنوبی در شکل ۱ نشان داده شده است.

تعیین چگونگی رابطه سازمان‌های پنج‌گانه با مشکلات و موانع

رویکرد پنج‌حلقه‌ای شامل پنج بخش دولت مرکزی و دولت‌های محلی، تصمیم‌گیران منطقه‌ای، بخش خصوصی، دانشگاه و نیروهای نظامی و انتظامی است (عبدیالله و همکاران ۲۰۲۴). در این پژوهش، برای کاربرد این رویکرد در پنج بخش آن شامل دولت، شوراها و دهیاری‌ها، بخش خصوصی، دانشگاه و نیروهای نظامی و انتظامی تغییر داده شد تا بومی‌سازی شود.

تعیین شرح وظایف و خدمات دولتی و غیردولتی

شرح وظایف سازمان‌ها و نهادهای مربوطه بر اساس شرح وظایف ارائه‌شده هر سازمان در صفحه رسمی و مراجعه حضوری به برخی از سازمان‌های مربوطه، تعیین شد.



شکل ۱- موقعیت کلی آبخیز افین و پراکنش مراکز جمعیتی آن در خراسان جنوبی.

Figure 1- The general situation of the Efin Watershed and the distribution of its population centers in the South Khorasan.

نتایج و بحث

چالش‌ها و مشکلات آبخیز افین و جانمایی آن در ساختار استخوان ماهی

موانع و مشکلات هفت زیرآبخیز افین در جدول ۱ ارائه شده است. بر پایه این جدول، ۳۱ مشکل اصلی در آبخیز افین شناسایی شد که ۲۳ مشکل در تمام زیرآبخیزها مشترک و هشت مشکل دیگر در برخی از زیرآبخیزها وجود داشت. پس از تعیین مشکلات و موانع آبخیز افین، مشکلات در هشت بخش پایش و ارزیابی، مخاطره‌های طبیعی، اقتصادی، اجتماعی، بهداشتی-رفاهی، آگاهی نداشتن جوامع محلی، مشکلات و موانع طبیعی و سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی تقسیم‌بندی و در ساختار استخوان‌ماهی جانمایی شد (شکل ۲). نتایج نشان داد بیشترین تعداد مشکل (پنج مشکل) مربوط به بخش‌های اقتصاد، سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی و بهداشتی-رفاهی بود. در حالی که کمترین تعداد مشکل (دو مشکل) مربوط به بخش پایش و ارزیابی بود. دیگر بخش‌ها نیز در میان این دو بودند. بر اساس شکل ۲، مشکلات شناسایی شده در هشت رده اصلی شامل پایش و ارزیابی، مخاطره‌های اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی، بهداشتی-رفاهی، ضعف آگاهی جوامع محلی، موانع طبیعی و سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی دسته‌بندی شدند. این چالش‌ها مهم‌ترین موانع تحقق مدیریت پایدار در آبخیز به‌شمار می‌آیند و هرکدام به سازمان‌ها و نهادهای مرتبط نسبت داده شده‌اند تا مسئولیت نهادی در رفع آن‌ها مشخص شود.

استفاده از رویکرد پنج حلقه‌ای برای مدیریت پایدار آبخیز افین دولت و مجلس شورای اسلامی

دولت به‌عنوان مرجع تصمیم‌گیری در تخصیص بودجه و اجرای طرح‌ها و سیاست‌های توسعه‌ای، نقش مهم و غیرقابل‌انکاری دارد (رضائی ۲۰۱۷). دولت می‌تواند با ایفای نقش دوگانه به‌شکل مستقیم و غیرمستقیم، نقش مهمی در پیشبرد اهداف مدیریتی در بخش‌های مختلف ایفا کند (مصلی‌نژاد ۲۰۱۲). در آبخیز افین وزارت راه و شهرسازی با همکاری وزارت نیرو و شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان جنوبی می‌تواند با در نظر گرفتن دبی مشخص سیلاب آبراهه‌ها، با ساخت پل‌های متناسب با

آب‌دهی رود، فرسایش پایین‌دست و نابودی جاده را کاهش دهند. افزون بر این، لازم است شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان جنوبی با وضع قوانین و مقررات دقیق‌تر بهره‌برداری از دبی مشترک رود و تقسیم آب در زمان نیاز آبی شدید، از بروز تشنجات امنیتی اجتماعی در منطقه جلوگیری کند. سازمان برنامه و بودجه و مجلس شورای اسلامی در زمان تعیین و ابلاغ بودجه می‌بایست تمرکززدایی امکانات رفاهی و بهداشتی، فراهم‌آوری خدمات و امکانات آموزشی و رفاهی برای دانش‌آموزان و محصلین و خدمات و امکانات لازم برای جوامع محلی در آبخیز افین که در یکی از استان‌های محروم کشور است را فراهم آورد و باعث توسعه منطقه شود. از سوی دیگر، مجلس شورای اسلامی می‌تواند به‌طور مستقیم با اتخاذ تدابیر و سیاست‌های حمایتی، بستر ساز و تسهیل‌کننده سرمایه‌گذاری بخش خصوصی سبب احیاء اقتصاد خرد شده و از کاهش درآمد، فشارهای اقتصادی، کوچ اجباری سرمایه اجتماعی آبخیز افین به شهرهای هم‌جوار بکاهد و از اثرات ثانویه و سوء آن نیز در مناطق مهاجرپذیر جلوگیری کند. بر اساس زلزله‌خیز بودن منطقه و رخداد زلزله‌های شدید در سال‌های گذشته، وزارت کشور، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی و وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی باید سیاست‌های لازم و ضروری را قبل، حین و بعد از زلزله در راستای کاهش خسارت‌های مالی، جانی، روحی و روانی اتخاذ نمایند تا اثرات سوء زلزله کاهش یابد.

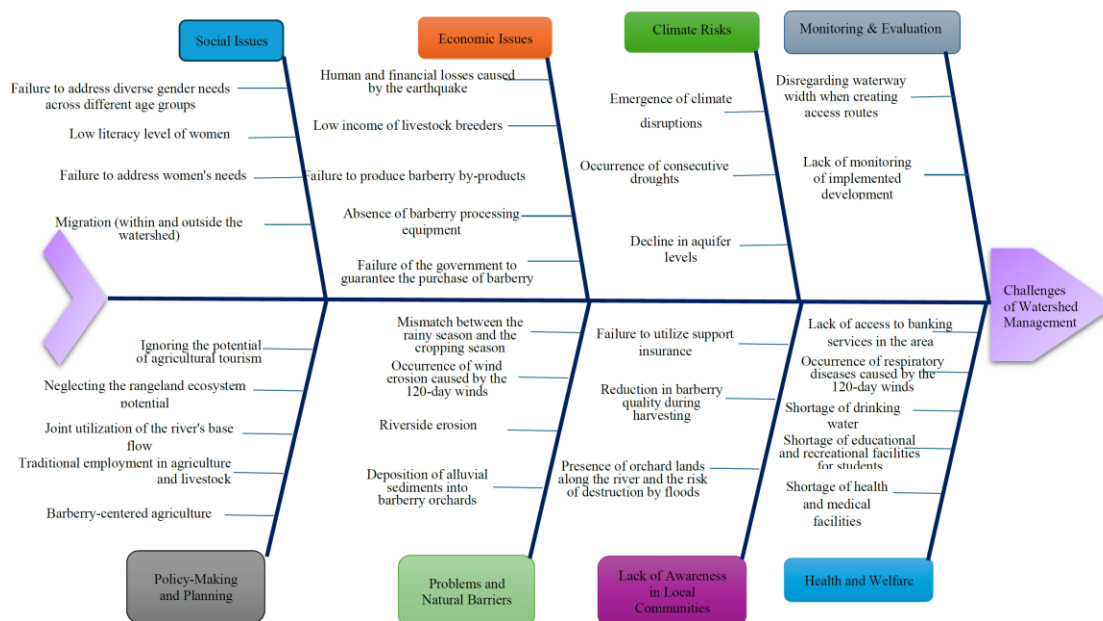
شوراها و دهیاری‌ها

شوراها و دهیاران در مسند تصمیم‌گیران محلی به‌عنوان مکمل یکدیگر عمل می‌کنند و ضمن توجه به منابع مالی محدود خود، در مدیریت روستاها و شهرهای تابعه خود نقش‌هایی دارند که به‌موجب قانون به آن‌ها سپرده شده است (پوررمضان ۲۰۱۶). به بیان دیگر شوراها و دهیاران در مقیاس کوچک قدرت تصمیم‌گیری دارند و می‌توانند همگام با دولت نقش قابل قبولی در اتخاذ و اجرای سیاست‌ها داشته باشند (امانیور و همکاران ۲۰۱۵). شوراها و دهیاری‌ها به‌عنوان سازمان‌های مردم‌نهاد و با توجه به اختیارات و قدرت اجرایی خود می‌توانند شرایط را برای حضور بخش‌های مختلف و جذب سرمایه فراهم آورند (هاشمی و همکاران ۲۰۱۱).

جدول ۱- موانع و مشکلات زیرآبخیزهای آبخیز افین خراسان جنوبی.

Table 1- Obstacles and problems of sub-watersheds in the Efin Watershed of South Khorasan.

Problems/ Issues	Sub-watershed				Jan Ahmad	Kaboodan
	Shirg	Banamrood	Zohan	Fakhran Efin		
The occurrence of climatic crises	*	*	*	*	*	*
The occurrence of repeated droughts	*	*	*	*	*	*
Reduction in aquifer levels due to drought	*	*	*	*	*	*
Mismatch between the rainy season and the agricultural season	*	*	*	*	*	*
Decrease in agricultural production due to reduced water resources	*	*	*	*	*	*
Wind erosion caused by 120-day winds	*	*	*	*	*	*
Incidence of respiratory diseases caused by 120-day winds	*	*	*	*	*	*
Financial and human losses caused by earthquakes	*	*	*	*	*	*
Failure to use insurance to protect against natural and human hazards	*	*	*	*	*	*
lack of drinking water	*	*	*	*	*	*
Riverbank erosion	-	-	*	*	*	*
The entry of debris sediments into barberry orchards and the river	-	-	-	*	-	-
Barberry-based agriculture	*	*	*	*	*	*
Reducing the quality of barberry when using barberry harvesters	*	*	*	*	*	*
Lack of barberry processing equipment	*	*	*	*	*	*
Lack of guaranteed purchase of barberry by the government and economic instability for farmers	*	*	*	*	*	*
Lack of production of barberry by-products	*	*	*	*	*	*
The existence of garden lands on the riverbank and the possibility of destruction by flooding	*	*	-	*	*	*
Joint exploitation of the river's base flow	-	-	-	-	*	-
Lack of attention to the capacity of rangeland ecosystems	*	*	*	*	*	*
Low income of livestock farmers	*	*	*	*	*	*
Traditional occupations: agriculture and animal husbandry	*	*	-	*	-	*
Failure to consider the width of the waterway when creating access roads	*	*	*	*	*	*
Lack of monitoring of implemented development plans	*	*	*	*	*	*
Lack of health and medical facilities	*	*	-	*	*	*
Lack of local banking services	-	*	-	*	-	*
Lack of educational and welfare space for students	*	*	-	*	*	*
Low literacy rate among women	*	*	*	*	*	*
Lack of attention to different gender needs in different age groups	*	*	*	*	*	*
Migration (inside and outside the watershed)	*	*	*	*	*	*



شکل ۲- جانمایی مشکلات و موانع در چارچوب ساختار استخوان ماهی برای آبخیز افین خراسان جنوبی.

Figure 2- Location of problems and obstacles within the framework of the Fish-Bone Framework for the Affin Watershed of South Khorasan.

در آبخیز افین، این آبخیز را به یکی از قطب‌های تولید زرشک تبدیل کرده است. اما، بررسی مشکلات و موانع آبخیز افین بیانگر آن بود که مهم‌ترین مشکلات اقتصادی این منطقه نبود تولید محصولات جانبی زرشک، نبود تجهیزات فرآوری زرشک و درآمد کم ناشی از آن است. از این رو، استفاده از ظرفیت بخش خصوصی در ایجاد کارگاه‌های تولید و بسته‌بندی زرشک، تولید محصولات غذایی جانبی از جمله مربای زرشک، آب‌میوه زرشک، ترشی زرشک، عسل زرشک و موارد مشابه می‌تواند نقش مؤثری در رشد و شکوفایی اقتصاد جوامع محلی داشته باشد. از سوی دیگر، بازاریابی تک‌محصول جهانی زرشک در بازارهای جهانی و صادرات آن نیز به وسیله شرکت‌ها و بخش‌های خصوصی از جمله اتحادیه صادرکنندگان استان خراسان جنوبی می‌تواند تحولی شگرف در درآمد کشاورزان آبخیز افین ایجاد کند. اگرچه آبخیز افین یکی از قطب‌های تولید زرشک در خراسان جنوبی است اما خام‌فروشی زرشک و وجود واسطه‌های پرشمار میان تولیدکننده و خریدار واقعی و مصرف‌کننده و وجود بازار اصلی فروش زرشک در مشهد (استان خراسان رضوی) سبب شده است به‌رغم

وجود سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور نیز سبب شده است تا قدرت اجرایی و عملیاتی این نهادها با همکاری دولت و مجلس افزایش یابد. شوراها و دهیاری‌ها در روستاهای مختلف آبخیز افین می‌توانند با اختیارات خود بستر حضور و مشارکت بخش خصوصی، دانشگاهی، نظامی و انتظامی را فراهم آورند و از ظرفیت آن‌ها در توسعه پایدار آبخیز افین استفاده کنند. به بیان دیگر، شوراها و دهیاری‌ها می‌توانند با مشارکت در تهیه طرح هادی روستایی، برگزاری مراسم شادی و عزا، مراسم‌های محلی و ترویج فرهنگ روستایی-عشایری در منطقه، نقش مؤثری در آبادی روستاهای موجود و حفظ و تداوم فرهنگ آن روستاها داشته باشند. دستیابی به توسعه پایدار یکی از مهم‌ترین اهداف اقتصادی یک کشور است و بخش خصوصی به‌عنوان بازوی گروه اقتصادی دولت، نقش مهمی در این زمینه دارد (بهنامیان و همکاران ۲۰۲۰). بر اساس اصل ۴۴ قانون اساسی، رقابتی شدن، پویایی و توسعه اقتصاد نیازمند کاهش تصدی‌گری دولت و افزایش مشارکت بخش خصوصی در اقتصاد کشور است (جلائئ اسفندآبادی و صمیمی ۲۰۱۴). وجود بیش از دو هزار هکتار از باغ‌های زرشک

پژوهش و تخصص بیشتر به‌وسیله کارشناسان بخش تغذیه و کیفیت غذایی دارد که این موضوع بر نقش دانشگاه تأکید می‌کند. از سوی دیگر، شبیه‌سازی اثرات نابودگر سیلاب و نمایان‌سازی خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی ناشی از آن بر زندگی جوامع محلی به‌وسیله متخصصان و استادان دانشگاه بیرجند و کارشناسان اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان جنوبی و شهرستان زیرکوه و ترویج رعایت اصول و قوانین حریم و بستر رود نیز می‌تواند با کاهش اثرات سوء آن، زمینه مدیریت پایدار آبخیز افین را فراهم آورد.

نیروهای نظامی و انتظامی

نیروهای نظامی و انتظامی می‌توانند با تلاش در بخش‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی، سیاسی، روانی و ملی بر تقویت زیرساخت‌های امنیت پایدار بی‌افزایند (عبدالمکی و احمدوند ۲۰۱۳). این سازمان‌ها نیز همانند دولت می‌توانند به دو روش به بهبود شرایط آبخیز افین کمک کنند. در مرحله نخست نیروهای نظامی و انتظامی با ایجاد فضای امن برای مردم، کسب و کار جوامع محلی و همچنین حفاظت و حمایت از سرمایه‌گذاری‌های بخش خصوصی، امنیت و آرامش خاطر را به ارمغان آورند. در مرحله دوم نیروهای نظامی و انتظامی از جمله سپاه ارتش و بسیج مردمی امکانات، تخصص، خودروها و وسایل مهندسی مناسب برای همکاری در اجرای عملیات توسعه‌ای و اقدامات امداد و نجات را دارند. از این‌رو، بخش‌های نظامی و انتظامی می‌توانند در زمان بروز خطرات طبیعی از جمله سیلاب و زلزله اقدامات لازم برای کمک‌رسانی به مردم را انجام دهند. همچنین مشارکت این نهادها با دولت و بخش خصوصی در راستای اجرای طرح‌های پیش‌بینی‌شده نیز می‌تواند نویدبخش شکوفایی آبخیز افین باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مدیریت پایدار یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در مدیریت منابع طبیعی و آبخیزهای کشور است. از این‌رو، شناخت مشکلات و موانع آبخیزها و تعیین سهم سازمان‌های تصمیم‌گیرنده نقش اساسی در

تولید زیاد زرشک، بخش بزرگی از سود آن به واسطه‌ها تعلق گیرد. از دیگر خواص زرشک ظرفیت دارویی این محصول است. سرمایه‌گذاری شرکت‌های خصوصی و دانش‌بنیان خراسان جنوبی و همچنین شرکت‌های دارویی و تولید زرشک می‌توانند ضمن ایجاد بازار فروش مناسب و پایدار، در درمان بیماران نیز تأثیرگذار باشند. افزون بر این، وجود چندین هکتار باغ زرشک در منطقه سبب به وجود آمدن جاذبه‌های زیبای گردشگری زراعی در فصل گل‌دهی (فروردین) و برداشت محصول (مهر) و ترکیب بی‌نظیر رنگ‌ها شده است که می‌توان ضمن سرمایه‌گذاری و تبلیغات مناسب، از این ظرفیت خدادادی در راستای افزایش گردشگری و همچنین فروش محصول در محل باغ‌های زرشک به گردشگران بهره برد.

دانشگاه

سیاست‌گذاران و مدیران عرصه ملی در کشورهای درحال توسعه بر نقش بی‌بدیل مراکز عالی علمی و دانشگاهی در توسعه کشور آگاهی دارند. اما، در عمل و در زمان نیاز به مشاوره و ارائه راه‌کارهای علمی، این باورها کم است (جاودانی ۲۰۱۰). دانشگاه‌ها در ساختار اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی نقش اساسی دارند (حسین‌لو و همکاران ۲۰۲۱). دانشگاه‌ها می‌توانند تحول سازمانی و نهادی، توانایی‌های مدیریتی و بهسازی منابع انسانی را تقویت کنند (مهدی و شفیعی ۲۰۲۱). با توجه به زرشک‌محور بودن اقتصاد منطقه و وجود این زمین‌ها و بعضاً مناطق مسکونی در حاشیه رود، هرگونه تولید محصول بی‌کیفیت و یا نابودی باغ‌های زرشک و منازل مسکونی حاشیه رود، بر جوامع محلی به‌طور قابل توجهی اثرگذار است. استفاده از ظرفیت دانشگاه‌های دولتی و غیردولتی شهرستان بیرجند و قائنات و همچنین مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان جنوبی در تولید محصول زرشک با کیفیت زیاد و استفاده نکردن از حشره‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها می‌تواند ضمن تولید محصول طبیعی کمک شایانی به صادرات این محصول به بازارهای جهانی کند. افزون بر این، شیوه فرآوری بهداشتی زرشک و جلوگیری از کاهش کیفیت آن هنگام عملیات فرآوری، نیاز به

منطقه دارند. از این رو، پیشنهاد می‌شود با برگزاری جلسات پرشمار هماهنگی و مدیریتی و توجه ویژه به هم‌افزایی تفکری سازمان‌های دولتی، مردم‌نهاد، بخش خصوصی، دانشگاه و نیروهای نظامی و انتظامی در دستور کار گروه‌داران آبخیز افین باشند تا مدیریت جامع این آبخیز از بروز مشکلات ناهماهنگ‌گونه و هدررفت بودجه محدود اختصاص‌یافته، بکاهد و در راستای مدیریت پایدار آبخیز گام بردارد. از سوی دیگر، جلوگیری از تمرکزگرایی امکانات رفاهی و توجه به سیاست‌های امنیت غذایی، جمعیتی و اشتغال در تخصیص بودجه ملی و استانی بیش‌ازپیش نیازمند توجه است. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، نقش هرکدام از سازمان‌های نامبرده در پایداری بلندمدت منطقه و دسترسی به سیاست‌های اهداف توسعه پایدار سازمان ملل، ارزیابی شود.

شکل‌گیری مدیریت پایدار دارد. بر این اساس، در این پژوهش، نقش سازمان‌های پنج‌گانه در مدیریت آبخیز افین بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد در زیرآبخیزهای مختلف ۳۱ مشکل مهم و کلی بود که رفع آنها نیازمند مشارکت نهادها و سازمان‌های مختلف است و رویکرد تک‌محوری پاسخگوی حل مشکلات متفاوت و برطرف‌کننده نیازهای آبخیزنشینان نیست. بر این اساس، خرد جمعی در میان سازمان‌های مرتبط می‌تواند همگام با شکل‌گیری نیازهای جدید، نقشه راه مناسب و اصولی در مدیریت منابع محدود و توسعه پایدار آبخیز افین ایجاد کند. بر اساس نتایج این پژوهش، سازمان‌های مختلف پنج‌گانه به برخی از وظایف خود عمل کرده و در انجام برخی از وظایف ناموفق بوده‌اند. به‌طور کلی، نیروهای نظامی و انتظامی با برقراری امنیت و کمک به جوامع محلی در زمان رخداد حوادث طبیعی و غیرمترقبه نقش مهمی در

جدول ۲- جانمایی مشکلات و موانع در سازمان‌های مربوطه برای آبخیز افین خراسان جنوبی.

Table 2- Assignment of problems and obstacles to the associated organizations for the Affin Watershed of South Khorasan.

Main Category	Sub-Category	Responsible Organization	Implementation Status
Monitoring and Evaluation	Neglecting the channel width in access road construction	Ministry of Roads and Urban Development, Regional Water Company (Ministry of Energy)	Not Implemented
	Lack of monitoring of implemented development projects	National Planning and Budget Organization	Partially Implemented
Climatic Hazards	Occurrence of climatic instabilities	Iran Meteorological Organization	Partially Implemented
	Occurrence of successive droughts	Ministry of Energy, Iran Meteorological Organization	Partially Implemented
	Decline in aquifer levels	Regional Water Company (Ministry of Energy)	Partially Implemented
Economic	Human and financial losses caused by earthquakes	National Disaster Management Organization, Iranian Red Crescent Society	Implemented
	Low income of livestock keepers	Ministry of Agriculture-Jihad (Deputy for Livestock Affairs), Central Organization for Rural Cooperatives of Iran	Partially Implemented
	Lack of by-product food processing of barberry	Ministry of Agriculture-Jihad, AREEO, Ministry of Industry, Mine and Trade	Not Implemented
Social	Absence of barberry processing facilities	Ministry of Industry, Mine and Trade (Participating Banks), Omid Entrepreneurship Fund	Not Implemented
	Lack of guaranteed barberry purchase by the government	Ministry of Agriculture-Jihad, Organization for Rural Cooperatives of Iran	Not Implemented
	Neglect of gender-specific needs across different age groups	Ministry of Interior, Vice Presidency for Women and Family Affairs	Partially Implemented
	Low female literacy rate	Ministry of Education, Literacy Movement Organization	Partially Implemented
	Neglect of women's needs	Ministry of Cooperatives, Labour and Social Welfare, State Welfare Organization of Iran, Vice Presidency for Women and Family Affairs	Not Implemented
Health and Welfare	Migration (internal and external to the watershed)	Ministry of Interior, Housing Foundation of Islamic Revolution	Partially Implemented
	Lack of local banking services	Central Bank of the Islamic Republic of Iran, Post Bank of Iran, Participating Banks	Not Implemented
	Respiratory diseases caused by the 120-day winds	Ministry of Health and Medical Education, Department of Environment	Partially Implemented
	Shortage of drinking water	Provincial Water and Wastewater Company (Ministry of Energy)	Partially Implemented
	Lack of educational and welfare facilities for students	Ministry of Education, Organization for Development, Renovation and Equipping Schools	Not Implemented

Main Category	Sub-Category	Responsible Organization of Iran	Implementation Status
Lack of Awareness in Local Communities	Insufficient health and medical facilities	Ministry of Health, Provincial University, Health and Treatment Network	Not Implemented
	Non-utilization of agricultural insurance schemes	Agricultural Insurance Fund (Keshavarzi Bank), Ministry of Agriculture-Jihad	Partially Implemented
	Reduced quality of barberry due to traditional threshing methods	Ministry of Agriculture-Jihad, AREEO, Institute of Standards and Industrial Research of Iran	Not Implemented
	Presence of orchards along riverbanks with risk of flood damage	Regional Water Company (Ministry of Energy), Natural Resources and Watershed Management Organization	Partially Implemented
Natural Constraints and Problems	Mismatch between rainfall season and cropping season	Ministry of Agriculture-Jihad, AREEO	-
	Wind erosion caused by the 120-day winds	Natural Resources and Watershed Management Organization, Iran Meteorological Organization	Partially Implemented
	Streambank erosion	Natural Resources and Watershed Management Organization, Regional Water Company (Ministry of Energy)	Partially Implemented
	Deposition of colluvial sediments in barberry orchards	Natural Resources and Watershed Management Organization, Ministry of Agriculture-Jihad	Partially Implemented
Policy and Planning	Overlooking the potential of agrotourism	Ministry of Cultural Heritage Tourism and Handicrafts, Ministry of Agriculture-Jihad	Not Implemented
	Neglect of rangeland ecosystem potential	Natural Resources and Watershed Management Organization	Partially Implemented
	Joint exploitation of river baseflow	Regional Water Company (Ministry of Energy), Department of Environment	Partially Implemented
	Traditional employment dependence on farming and livestock	Ministry of Cooperatives, Labour and Social Welfare, Ministry of Agriculture-Jihad	Partially Implemented
	Barberry-centered agriculture	Ministry of Agriculture-Jihad	Partially Implemented

سیاس‌گذاری

نویسندگان مقاله از اداره کل منابع طبیعی و آب‌بخیزداری استان خراسان جنوبی در راستای همکاری در انجام پژوهش و در اختیار گذاشتن مطالعات تفصیلی-اجرایی آب‌بخیز افین و دیگر اطلاعات لازم، تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: بازدید از آب‌بخیز افین، تعیین مشکلات و موانع آب‌بخیزها، همکاری در تهیه نمودار استخوان ماهی، همکاری در تعیین نقش سازمان‌های پنج‌گانه، نوشتن نتایج و بحث مقاله

نویسنده دوم: همکاری در تعیین مشکلات، تهیه ساختار استخوان ماهی، همکاری در تعیین نقش سازمان‌های پنج‌گانه و نوشتن مقدمه و روش کار مقاله
نویسنده سوم: همکاری در تعیین مشکلات، تهیه ساختار استخوان ماهی، همکاری در تعیین نقش سازمان‌های پنج‌گانه و نوشتن مقدمه و روش کار مقاله
نویسنده چهارم: ایده‌پردازی، مفهوم‌سازی پژوهش، روش‌شناسی پژوهش، نظارت بر بخش‌های مختلف پژوهش، ویرایش نهایی مقاله

فهرست منابع

- Abdillah A, Widianingsih I, Buchari RA, Nurasa H. 2024. Collaborative strategies for sustainable management of the Citarum Watershed in Indonesia: A quintuple helix approach. *Discover Sustainability*. 5(1): 347.
- Abdolmalki H, Ahmadvand AM. 2013. The role of the constructive Basij in sustainable security. *Quarterly Journal of Strategic Basij Studies.*, 16(60):115-147.
- Abedi F, Kaviani A, Gholami L, Mousavi V. 2025. Evaluation and Prediction of Land Cover/Use Changes Using Automatic Cell-Artificial Neural Network (CA-ANN) Model in the Darab Plain of Fars Province. *Watershed Management Research*. 38(2):62-82. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2024.366754.1592>
- Afonso O, Monteiro S, Thompson M. 2012. A growth model for the quadruple helix. *Journal of Business Economics and Management*. 13(5): 849-865.
- Amanpour S, Hosseini-Shahparian NA, Atash-Afroz N, Farahmand Q. 2015. Study and analysis of the performance of councils in urban management (case study, Izeh city). *Journal of Urban Research and Planning*. 6(22): 95-110. <https://sid.ir/paper/505922/fa>
- Armas KL, Villegas MN. 2025. Partnerships for sustainable development: A quintuple helix framework for research, innovation, and extension in Philippine state universities. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*. 5(2):e03158-e03158. <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n02.pe03158>
- Behnamian M, Shojaei AN, Haji GA. 2010. Study of factors affecting the growth of private sector investment in Iran. *Applied Theories of Economics*. 7(4):57-84. <https://doi.org/10.22034/eoj.2021.12286>
- Campbell DFJ, Carayannis EG, Rehman SS. 2015. Quadruple helix structures of quality of democracy in innovation systems: the USA, OECD countries, and EU member countries in global comparison. *Journal of the Knowledge Economy*. 6(3):467-493. <https://doi.org/10.1007/s13132-015-0246-7>
- Carayannis EG, Barth TD, Campbell D.F. 2012. The quintuple helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 1:1-12. <https://doi.org/10.1186/2192-5372-1-2>
- Carayannis EG, Campbell DF, Carayannis EG, Campbell DF. 2012. Mode 3 knowledge production in quadruple helix innovation systems: Twenty-first-century democracy, innovation, and entrepreneurship for development. Springer New York. pp. 1-63. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2062-0_1
- Carayannis EG, Campbell DF. 2009. 'Mode 3' and 'Quadruple Helix': toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*. 46(3-4): 201-234. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374>
- Carayannis EG, Campbell DF. 2010. Triple Helix, Quadruple Helix and Quintuple Helix and how do knowledge, innovation and the environment relate to each other?: A proposed framework for a trans-disciplinary analysis of sustainable development and social ecology. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development (IJSESD)*. 1(1):41-69. <https://doi.org/10.4018/jsesd.2010010105>
- Dewika M, Markandan K, Ruwaida JN, Sara YY, Deb A, Irfan NA, Khalid M. 2024. Integrating the quintuple helix approach into atmospheric microplastics management policies for planetary health preservation. *Science of the Total Environment*. 176063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176063>
- Engkus E. 2022. Penta helix perspective: The pollution control of the River Watershed (DAS) Citarum Indonesia. *Sciend*. pp. 194-200.
- Erdogan R. 2013. Stakeholder involvement in sustainable watershed management. In *Advances in landscape architecture*. IntechOpen. Fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*. 46(3/4):201-233. <https://doi.org/10.5772/55798>
- Franc S, Karadžija D. 2019. Quintuple helix approach: The case of the European Union. *Notitia-časopis za Ekonomske, Poslovne i Društvene Teme*. 5(1):91-100. <https://doi.org/10.32676/n.5.1.8>
- Gatgash ZE, Sadeghi SHR. 2024. Comparative effect of conventional and adaptive management approaches on watershed health. *Soil and Tillage Research*. 235:105869. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105869>
- Gholamrezaei S, Keramati F, Naghavi H, Rahimi-Feyzabad F, Pakravan-Charvadeh M. 2025. Stakeholder Analysis of Institutions involved in Forest Resources Management in Lorestan Province. *Forest Research and Development*. 10(4):479-509. <https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55425.1731>
- Gonenc IE, Wolflin JP, Russo RC. 2014. Sustainable watershed management. CRC Press. 230 p.

- Grundel I, Dahlström M. 2016. A quadruple and quintuple helix approach to regional innovation systems in the transformation to a forestry-based bioeconomy. *Journal of the Knowledge Economy*. 7: 963-983. <https://doi.org/10.1007/s13132-016-0411-7>
- Harrison JS, Freeman RE, Abreu MCS. 2015. Stakeholder theory as an ethical approach to effective management: Applying the theory to multiple contexts. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*. 17(55): 858-69. <https://doi.org/10.7819/rbgn.v17i55.2647>
- Hashemi S, Motiei-Lengroudi H, Ghadiri M, Rezvani MR, Moghimi SM. 1390. Explaining the role of village councils and Islamic Councils in the development of Rural Entrepreneurship (Case study: Bahabad, Yazd Province). *Rural Studies*. 2(5): 93-114. <https://sid.ir/paper/180898/en>
- Hosseinlou F, Zamani-Moghaddam Soraniyancheshmeh R. 2019. Presenting a Model of Industry-University Relations in Tehran: A Case Study. *Iranian Engineering Education Quarterly*. 23(91): 113-139. <https://www.doi.org/10.22047/ijee.2021.284757.1832>
- Jalaei Esfandabadi SA, Samimi S. 2014. Investigating the Barriers to Private Sector Investment in Iran (In Line with the General Policies Announced by the System). *Strategic and Macro Policies*. 2(7): 89-109.
- Jam AS, Mosaffaie J. 2023. Introducing the concept of a ladder of watershed management: A stimulus to promote watershed management approaches. *Environmental Science and Policy*. 147:315-325. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.07.001>
- Javedani H. 2009. The role of the university in the development process. *Higher Education Letter*, New Edition. (10): 50-35.
- Leydesdorff L. 2000. The triple helix: an evolutionary model of innovations. *Research Policy*. 29(2): 243-255. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00063-3](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00063-3)
- Mehdi R, Shafiei M. 2021. Rooting of loose engagement of Iranian universities with industry from the higher education informants. *Journal of Innovation and Value Creation*. 10(19): 39-54. <http://noo.rs/jEfsz>
- Mesbah A, Karamidehkordi E, Tohidloo A, Salehpour Jam A, Saadi T. 2025. Application of the Flood Crisis Management Framework in the Alborz Province with Emphasis on Identification, Classification, and Prioritization of Solutions. *Watershed Management Research*. 38(2): 139-160. [10.22092/wmrj.2025.367812.1605](https://doi.org/10.22092/wmrj.2025.367812.1605)
- Moslinejad A. 2012. Economic policymaking and social responsibility of the government. *Quarterly Journal of Politics*. (42):311-331. <https://doi.org/10.22059/jpq.2012.29942>
- Muche AT, Ketsela YS, Ali BM. 2024. Assessing the effectiveness of integrated watershed management practices and suggesting innovative strategies in southern Ethiopia. *Heliyon*. 10(19). 10.1016%2Fj.heliyon.2024.e38619&pii
- Narendra BH, Siregar CA, Dharmawan IWS, Sukmana A, Pratiwi Pramono IB, Basuki TM, Nugroho HYSH, Supangat AB, Purwanto, Setiawan O, Nandini R, Ulya NA, Arifanti VB, Yuwati TW. 2021. A review on sustainability of watershed management in Indonesia. *Sustainability*. 13(19): 11125. <https://doi.org/10.3390/su131911125>
- Pourramazan A. 2016. Providing scientific and practical solutions for sustainable income sources for villages in Gilan province (case study: Gilakjan village). *Human Geography Research*. 48(4):765-782. <https://doi.org/10.22059/jhgr.2016.53400>
- Rezaei MJ. 2017. Public Finance and Public Policy: Government Responsibilities and Limitations. *Public Policy*. (3):187-200. <https://doi.org/10.22059/ppolicy.2017.64177>
- Rosilawati Y, Winarsih AS, Rafique Z, Khatami MI. 2023. Penta Helix Model Communication to Promote Appropriate and Green Technologies for Ayung River Preservation Program in Bali. In *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 425: p. 04001). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342504001>
- Sadeghi SHR, Alipour R, Fereydoni H, Enayati FZ, Pakravan A, Yaghoti R, ... Beigi H. 2025b. Analysis of desirable characteristics of watershed management in detailed-implementation studies of the watershed management (Case study: Daftabad Watershed, South Khorasan, Iran). *Watershed Engineering and Management*. 17(2):152-174. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2025.368017.2095>
- Sadeghi SHR, Alipour R, Fereydouni H, Enayati FZ, Pakravan AR, Yaghuti R, Moradnejad M, Esmailzadeh Ashini F, Abdolbaqi F, Moussavian S, Chamani R, Beigi H, Bahleke M. 2024. Analysis of the characteristics of desirable watershed management in detailed-executive studies of watershed management in the Daftabad watershed of South Khorasan. *Watershed Engineering and Management*. 17(2): 152-174. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2025.368017.2095>

Sadeghi SHR, Ghabelnezam E, Baghban FA, Zabihi Silabi M, Chamani R. 2025a. Variability in health zoning due to applying different methods for averaging pressure, state, and response indices in the Baladeh-e-Noor watershed, Iran. *Integrated Watershed Management*. 5(1): 19-36. [https://doi: 10.22034/iwm.2024.2035677.1163](https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2035677.1163)

Sadeghi SHR, Hassanpour F, Payfashrdeh A, Tavakoli F, Esmailzadeh F, Abdolbaqi F, Rashidi N, Moussavian S, Beigi H, Bahleke M, Chamani R. 2024. Positioning the Fakhran watershed of South Khorasan in the watershed management ladder. *Comprehensive watershed Management*. 4(2):1-19. <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2019702.1122>

Tesfaye G, Debebe Y, Yakob T. 2018. Impact of participatory integrated watershed

management on hydrological, environment of watershed and socio-economic, case study at Somodo Watershed, South Western Ethiopia. *The International Journal of Earth and Environmental Sciences*. 3(1): 1-7.

Teweldebrihan MD, Dinka MO. 2025. Sustainable Water Management Practices in Agriculture: The Case of East Africa. *Encyclopedia*. 5(1): 7.

Zeng D, Chen B, Wang J, Innes JL, Lu J, Guo F, Wang G. 2024. Determinants of Public Participation in Watershed Management in Southeast China: An Application of the Institutional Analysis and Development Framework. *Land* (2012). 13(11). <https://doi.org/10.3390/land13111824>.



Application of the Quintuple Helix Approach in Sustainable Management of the Efin Watershed in the South Khorasan

Reza Chamani¹, Masoumeh Havasi², Reza Yaghoti³, Seyed Hamid Reza Sadeghi^{4*}

- 1- Assistant Professor, Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Birjand, Birjand, Iran
- 2- Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran
- 3- M.Sc. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran
- 4- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran Province, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The political structure of watersheds changes based on decisions made by managers and planners. Consequently, various organizations play a crucial and undeniable role in developing sustainable watershed management. However, the roles of different sectors in watershed management and the quality of their sustainable resource practices have not been studied. Therefore, this study aimed to assess the role of the quintuple helix approach, which includes the government, the Islamic Consultative Assembly, councils and village councils, the private sector, the universities, and military law enforcement forces, in the sustainable management of the Efin Watershed.

Materials and Methods

In this research, first, detailed executive studies of seven Efin sub-watersheds were obtained from the General Office of Natural Resources and Watershed Management of South Khorasan Province. Then, various reports were reviewed and the existing problems and obstacles for each sub-watershed were extracted. In this regard, through field visits and discussions with local communities, the problems were verified, and other problems that were not present in the studies or had emerged later were also identified, and the list of problems was finalized. Then, the final problem tree was formed and placed in the fishbone structure. Finally, based on the quintuple helix approach, the duties of five government organizations and the Islamic Consultative Assembly, councils and village councils, the private sector, the university, and the military and law enforcement forces in the sustainable management of the Efin Watershed were examined.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** sadeghi@modares.ac.ir

Citation: Chamani, R., Havasi, M., Yaghoti, R., Sadeghi, S.H.R. 2026. Application of the Quintuple Helix Approach in Sustainable Management of the Efin Watershed in the South Khorasan. Watershed Management Research. 39(1): 108-125.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.370686.1633

Received: 13 September 2025, **Received in revised form:** 22 September 2025, **Accepted:** 21 December 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 108-125.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Results and Discussion

The results of the study indicated 31 main problems in seven Efin's sub-watersheds. These problems were placed within the localized fishbone structure across eight sections: monitoring and evaluation, natural hazards, economic, social, health and welfare, lack of awareness of local communities, natural problems and obstacles, and policymaking and planning. Then, using the analysis of organizational documents and descriptions of the organizations' services, the identified problems were linked to different organizations. The results showed that the highest number of problems were related to the three clusters of "economic", "policy and planning", and "health-welfare" with each sector has intervened in resolving them based on its specific function. The results of determining the role of different organizations revealed that the government, as the primary authority for policymaking and resource allocation, plays a crucial role in decentralizing facilities, allocating budgets, and supporting other sectors. On the other hand, local councils and village councils play a more significant role in facilitating public participation, addressing social issues, and coordinating with executive agencies. In addition, the private sector also had an impact on the economic prosperity of the Efin Watershed by investing in the agricultural products sector and their marketing. The university also influential by engaging in the development of environmentally friendly technologies, training specialized personnel, and providing scientific innovations in sustainable watershed management. Among these, one of the practical approaches was to provide solutions for optimizing barberry cultivation, processing by-products, and developing its value chain. However, the role of the university went beyond this sector and include scientific and technological support for other management fields.

Conclusion and Suggestions

The Efin Watershed, as one of the largest barberry production centers in South Khorasan, has a privileged position in the production of agricultural and horticultural products. On the other hand, the existence of multiple faults in this watershed has caused local communities to suffer significant financial and human losses during earthquakes. Accordingly, synergy between government institutions and the private sector can not only strengthen the agricultural economy of the region but also contribute to the sustainability of human societies. However, the role of other actors in this process is also very important. In this regard, universities by producing new knowledge and technologies, councils and village councils by improving the level of local participation, and military forces by providing security and technical support, each play a specific role in advancing sustainable watershed management. Based on the results of this research, it is suggested that by utilizing the capacity of the private sector in barberry processing and the production of secondary food and pharmaceutical products, the raw sale of this valuable product can be prevented, by creating added value, the income of local communities can be increased and sustained. Also, given the strong dependence of water resources on rainfall, it is suggested that plans be implemented to manage existing water resource management and increase their economic productivity to prevent migration and depopulation of the region.

Keywords: Co-Management, Integrated Watershed Management, Local Government, Sustainable Development, Stakeholder Participation

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors of the article would like to thank the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of South Khorasan Province for their cooperation in conducting the research and providing detailed-executive studies of the Efin Watershed and other necessary information.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement

All information and results are provided in the text of the article.

Authors' Contribution

Author 1: Visiting the Efin Watershed, determining the problems and obstacles of the watersheds, collaborating in preparing the fishbone diagram, collaborating in determining the role of the five organizations, writing the results and discussion of the article

Author 2: Collaboration in determining the problems, preparing the fishbone structure, collaborating in determining the role of the five organizations, and writing the introduction and methods of the article

Author 3: Collaboration in determining the problems, preparing the fishbone structure, collaborating in determining the role of the five organizations, and writing the introduction and methods of the article

Author 4: Research Conceptualization, research methodology, supervision of different parts of the research, final editing of the article



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آب‌مخزرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

طبقه‌بندی کاربری‌های کشاورزی با کاربرد تلفیقی فنون پیشرفته سنجش از دور، مدل‌سازی جی‌آی‌اس و صحت‌سنجی‌های میدانی در آبخیزهای استان فارس

مجتبی پاک‌پرور^۱، سید مسعود سلیمان‌پور^۲، محمدمهدی قاسمی^۳، محمدهادی جرعه‌نوش^۴،

سارا کوشافر^۵، حسین صحراایان^۶

۱ و ۲- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

۳- استادیار بخش تحقیقات آبیاری تحت فشار، مؤسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، کرج، ایران

۴- مربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

۵ و ۶- کارشناس ارشد سازمان جهاد کشاورزی، شیراز، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

با توجه به گستردگی و تغییرپذیری و پویایی اطلاعات بخش کشاورزی در کشور و به‌ویژه در استان فارس، به‌روز کردن و تدقیق اطلاعات فعالیت‌های مرتبط با آن، اهمیت ویژه‌ای دارد. کاربری‌های کشاورزی در آبخیزها از مهمترین بهره‌بردارها است که نقش تعیین‌کننده‌ای در هر دو دیدگاه مثبت و منفی (نابودی یا حفاظت) آبخیز دارد. تاکنون پژوهش‌های پرشماری در زمینه طبقه‌بندی کاربری‌های کشاورزی با کاربرد تصویرهای ماهواره‌ای انجام شده است. سنجش از دور، یک روش کارآمد در شناسایی محصولات برای برآورد برداشت بالقوه و مدیریت مزارع کشاورزی است. تاکنون، طیف گسترده‌ای از انواع تصویرها برای تنوع گوناگونی از کاربردها برای طبقه‌بندی به‌کار گرفته شده است. برخی از روش‌های پردازش تصویر در جداسازی دسته‌های کاربری زمین و پوشش زمین مناسب‌تر از دیگر روش‌ها است، به‌ویژه زمانی که تصویرها با وضوح بیشتر طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داده است که در شرایطی، دقت طبقه‌بندی شیء‌گرا در مقایسه با پیکسل‌مینا، در جداسازی دسته‌های انتخاب‌شده کاربری زمین و پوشش زمین، بیشتر است.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: pakparvar@gmail.com

استناد: پاک‌پرور، م.، سلیمان‌پور، س.م.، قاسمی، م.م.، جرعه‌نوش، م.ه.، کوشافر، س.، صحراایان، ح. ۱۴۰۵. طبقه‌بندی کاربری‌های کشاورزی با کاربرد تلفیقی فنون پیشرفته سنجش از دور، مدل‌سازی جی‌آی‌اس و صحت‌سنجی‌های میدانی در آبخیزهای استان فارس. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۱): ۱۴۶-۱۲۶.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.369849.1626

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵۰، بهار ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱۲۶ تا ۱۴۶.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



در این پژوهش، برای ارزیابی این دو روش در پهنه‌ای به گستردگی استان فارس، مدل‌های مبتنی بر GIS و سنجش از دور که هم در مدیریت مزارع آبخیزها در زمان حال و هم برای به‌روز رسانی اطلاعات در سال‌های آتی قابل استفاده باشد، تهیه شد. در این پژوهش دقت روش‌های نامبرده تعیین شد و امکان جمع‌کردن مراحل مختلف در یک مدل کاربر دوست فراهم شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تمام مناطق تحت کشت زراعت و باغ در پهنه آبخیزهای استان فارس بررسی شد. از آنجایی که تاریخ‌های بیشینه سبزی‌نگی در اقلیم‌های مختلف متفاوت است، به‌منظور بررسی ترکیب اقلیمی هر شهرستان، نقشه اقلیم استان با مرز شهرستان‌ها ادغام شد. در این پژوهش، نقشه اقلیم بر اساس روش دمارتن و با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی و هم‌دید استان فارس تهیه شد. به‌منظور بررسی الگوی کشت اکثر شهرستان‌هایی که در آنها گندم کاشت می‌شد، آمار سطح زیر کشت محصولاتی که هم‌زمان با گندم کاشت می‌شدند نیز جمع‌آوری شد. در این پژوهش، بر پایه هدف جداسازی کاربری‌های کشاورزی و اندازه میانگین قطعه‌های کشاورزی (حدود ۱ هکتار در استان فارس)، تصویرهای لندست ۸ و سنتینل ۲، به‌ترتیب با وضوح زمینی ۳۰ و ۱۰ متر کافی بود. زیرا، هر هکتار زمین، به‌ترتیب در برگیرنده ۹ و ۱۰۰ پیکسل بود. در یک فعالیت میدانی یکپارچه و گسترده، نقشه کاربری‌های زراعت دیم و باغ دیم با برداشت محدوده‌ها بر سر زمین رسم شد. سپس، با بیشترین دقت مکانی چهار مرحله تدقیق ستادی و میدانی انجام شد. با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط، ابتدا تصحیحات هندسی و در گام بعدی تصحیحات جوی تصویرهای سنتینل و لندست انجام شد و دی‌ان آنها به بازتاب سطح زمین تبدیل شد. سپس، شاخص‌های گیاهی متنوعی ساخته و آزمون شد تا بهترین آنها برای تعیین سطح سبز انتخاب شود و مبنای برداشت اطلاعات میدانی که شامل چندضلعی‌هایی در داخل کاربری‌های کشاورزی بود، باشد. آنگاه روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده شامل: تک‌زمانه، چند زمانه، شی‌ء‌گرا و پیکسل‌مبنا، برای جداسازی کاربری‌های زراعی آبی و تفکیک آنها به‌کار گرفته شد. سپس، کاربری‌های زراعی و باغ دیم با چندین بار برداشت‌های میدانی، جداسازی شدند. کاربری‌های باغی آبی از اطلاعات کاداستر از کاربری‌های کشاورزی استخراج شد و با استفاده از تصویرهای به‌روز شده تدقیق شد. بر اساس ضریب کاپا و صحت کلی نتایج هر دسته از کاربری‌های کشاورزی با واقعیت زمینی مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تصحیحات جوی روی تصویرها بیانگر بهبود قابل توجه سنجش‌های تصویری و شفافیت دیداری آنها بود. در دو کاربری پوشش کاملاً سبز مزارع و کاربری‌های آیش، اندازه‌های تمام شاخص‌های گیاهی پس از تصحیحات جوی باندها افزایش یافت و در دو کاربری بایر و پهنه محدوده‌های آبگیر کاهش یافت و به دامنه ارقام قابل انتظار در منابع معتبر، نزدیک‌تر بود. بیشترین اندازه صحت نقشه سطح سبز به‌دست آمده از شاخص‌های مختلف گیاهی مربوط به EVI و mSAVI بود و mNDVI و GBNDVI در رتبه بعدی بودند. نتایج طبقه‌بندی شی‌ء‌گرا بیانگر برتری قطعی این روش در جداسازی کاربری‌های کشاورزی از مرتع و زمین بایر بود. افزون بر این، امکان جداسازی دو نوع مرتع ضعیف از قوی نیز در این روش فراهم شد. بیشترین صحت در تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی مربوط به شاخص‌های گیاهی EVI و mSAVI بود. بیشترین ضریب کاپا و صحت کلی مربوط به طبقه‌بندی ماشین‌بردار پشتیبان بود. نتایج طبقه‌بندی شی‌ء‌گرا بیانگر برتری این روش در جداسازی کاربری‌های کشاورزی از مرتع و زمین بایر بود. افزون بر این، امکان جداسازی دو نوع مرتع ضعیف از قوی نیز در این روش فراهم شد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

از میان انواع شاخص‌های گوناگون گیاهی بررسی‌شده برای تفکیک سطح سبز کاربری‌های زراعی، نتایج استفاده از شاخص‌هایی مانند EVI و mSAVI که از باند سبز در معادله‌های آنها استفاده شد، مناسب‌تر بود. از دیدگاه روش‌های

پیکسل‌مبنا، بهترین روش SVM بود و پس از آن درخت تصمیم در رتبه بعدی بود. تاکنون، پراکنش مکانی و سطح واقعی کاربری‌های دیم زراعی و باغی به دلیل دشواری، با هیچ روش سنتی و یا سنجش از دور تعیین نشده بود، که در این پژوهش برای نخستین بار و حداقل در استان فارس با دقت مطلوب و مبتنی بر تلفیق سنجش از دور و بازدید میدانی، انجام شد. مقیاس این لایه‌ها بر اساس تصویرهای پایه سنتینل با وضوح ۱۰ متر، برای کاربرد در پژوهش‌های آبخیزداری تا مقیاس تفصیلی-اجرایی، کافی و مناسب است. بر اساس یافته‌های این پژوهش پیشنهاد می‌شود از لایه-های تولیدشده به‌عنوان الگویی برای بررسی تغییرات کاربری زمین‌ها و تصرف غیرقانونی زمین‌های منابع طبیعی استفاده شود. همچنین برای دستیابی به این هدف پیشنهاد می‌شود مرز رقومی زمین‌های ملی روی لایه‌های کاربری‌های کشاورزی نهادشده و مرزهای متصرفی از آن‌ها استخراج شود.

واژگان کلیدی

الگوریتم طبقه‌بندی، تفکیک کاربری کشاورزی، تفکیک‌کننده شیء‌گرا، شاخص‌های گیاهی

مقدمه

قطعه‌های مختلف بر مبنای شباهت پیکسل‌های همجوار تقسیم می‌کنند. به این ترتیب، پیکسل‌ها به مجتمع‌هایی از پیکسل تبدیل می‌شوند که از دیدگاه مکانی و طیفی شباهت دارند و نمایانگر یک پدیده هستند (ریهارد و وودویک ۱۹۹۶). روش طبقه‌بندی شیء‌گرا که در دهه گذشته گسترش فراوانی یافته است، بر ویژگی‌های طیفی پدیده‌ها تکیه دارد و بیشتر از آن بر اطلاعات هندسی و ساختاری آن‌ها استوار است. از این رو، این روش را می‌توان یک روش مبتنی بر دانش کاربر دانست. باریل و بیلوتا (۲۰۱۶) برتری این روش را در مقایسه با پیکسل‌مبنا در تفکیک انواع پوشش زمین اثبات کردند. چنین مزیتی به‌وسیله دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (سونگ و همکاران ۲۰۰۵، کاندریکا و روی ۲۰۰۸، کلیو و همکاران ۲۰۰۸). تاکنون دامنه گسترده‌ای از انواع تصویرها برای تنوع گوناگونی از کاربردها برای روش شیء‌گرا به کار گرفته شده است. تعداد ۸۲ شاخص برای طبقه‌بندی انواع محصولات کشاورزی با توجه به اهمیت آن شاخص‌ها برای هر محصول ارزیابی شد. دقت دو روش طبقه‌بندی RF و SVM، ۹۰ تا ۹۲٪ بود. نتایج نشان داد که بیشترین سهم در شناسایی انواع محصولات خاص مربوط به شاخص‌های پوشش گیاهی بود (سونوب و همکاران ۲۰۱۸). در این

با توجه به گستردگی و تغییرپذیری و پویایی اطلاعات بخش کشاورزی در کشور و به‌ویژه در استان فارس، به‌روز کردن و تدقیق اطلاعات فعالیت‌های مرتبط با آن، اهمیت ویژه‌ای دارد. سنجش از دور یک روش کارآمد در شناسایی محصولات برای برآورد برداشت بالقوه و مدیریت مزارع کشاورزی است. از این عامل می‌توان در تجزیه و تحلیل کلان‌داده در مسائل جهانی امنیت غذایی و آب، نگهداری سوابق دقیق کشاورزی برای اصلاح نژاد و زراعت بهتر، بررسی سازوکارهای فنوتیپی کارآمد و جمع‌آوری داده‌ها در سامانه‌های کشاورزی، پشتیبانی از تعامل میان کشاورزان و دانشمندان کشاورزی و تعیین الزامات مالی برای پیشرفت مداوم مدل‌های کشاورزی استفاده کرد (بیسواس و تیواری ۲۰۲۴). در حالی که هر روز تصویرهای با وضوح بهتر و تفکیک مکانی بیشتر به عرصه فناوری سنجش از دور وارد می‌شود و چالش‌های بیشتری برای روش‌های قدیمی طبقه‌بندی رقومی پیکسل‌مبنا مانند بیشینه‌درست‌نمایی، رخ می‌دهد (کلیو و همکاران ۲۰۰۸). قطعه‌بندی تصویرها، یک قدم مقدماتی برای طبقه‌بندی شیء‌مبنا است و طبقه‌بندی‌کننده‌های شیء‌گرا یک تصویر را به

1-Maximum Likelihood

را در قالب ۱۴ شاخص شناسایی کرد و با استفاده از روش شبکه عصبی نقشه احتمال توسعه شهری را تهیه کرد.

در پژوهشی دیگر، نجفی و همکاران (۲۰۱۷) از روش ماشین‌بردار پشتیبان برای استخراج کاربری‌های جنگل، کشاورزی، مرتع و شهر استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش درجات چندجمله‌ای، مرز میان طبقه‌ها بهتر تفکیک شد و در قسمت‌هایی که از دیدگاه طیفی نزدیک به هم بودند، نتایج مطلوب‌تر بود. همچنین افزایش درجه در پلی‌نومیال باعث شد مرز میان طبقه‌ها با دقت بیشتری جدا شوند. این پژوهشگران هنگامی که هدف طبقه‌بندی بیش از دو کاربری بود، استفاده از درجات بیشتر پلی‌نومیال (ترجیحاً ۵ یا ۶) را توصیه کردند. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد تصویرهای سنتینل در جداسازی انواع کاربری‌ها بیانگر عملکرد بهتر آنها در مقایسه با کاربرد تصویرهای با وضوح مکانی کمتر مانند لندست ۸ است.

دلفان و همکاران (۲۰۱۷) برای طبقه‌بندی تصویرها از دو روش طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی و ماشین‌بردار پشتیبان با کرنل‌های خطی، پایه شعاعی، حلقوی و چندجمله‌ای استفاده کردند. تصویرها در ۷ طبقه کاربری شامل: جنگل، مرتع، کشاورزی، بایر، باغ، مسکونی و آب طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که عملکرد روش شبکه عصبی مصنوعی با صحت کلی ۹۱/۷ و ضریب کاپا ۰/۸۳ در مقایسه با تمام کرنل‌های ماشین‌بردار پشتیبان بهتر بود. در این راستا، محمدی و همکاران (۲۰۱۸) از تلفیق تصویرهای لندست و سنتینل برای بهره‌برداری از وضوح مکانی بهتر سنتینل و تنوع طیفی بیشتر لندست برای پایش تغییرات شهری اهواز استفاده کردند.

نتایج بیانگر عملکرد بهتر روش‌های DWT و Brovey در تلفیق (فیوژن) تصویرها از دیدگاه حفظ اطلاعات طیفی و مکانی در میان انواع روش‌های تلفیق بود. در هیلانگ‌جیانگ چین، ژانگ و همکاران (۲۰۲۴)

راستا، طبقه‌بندی‌های پیکسل‌مبنا و شی‌گرا برای نقشه‌برداری با کاربرد MLC^۲ بررسی شد. دقت طبقه‌بندی شی‌گرا، ۳۶/۷۷٪ بیشتر از پیکسل‌مبنا بود. این دقت در مقایسه با پیکسل‌هایی که در روش شی‌گرا به‌درستی تخصیص داده شده بود، از دیدگاه آماری تا سطح ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (یان و همکاران ۲۰۰۶). از نخستین کاربردهای سنجش از دور در طبقه‌بندی زمین‌ها می‌توان به پژوهش‌های ابطی و پاک‌پرور (۲۰۰۲) اشاره کرد. از روش شی‌گرا در بررسی‌های پوشش گیاهی با اهدافی چون تفکیک کاربری‌های مهم زمین‌ها، تفکیک انواع محصولات کشاورزی زراعی و برآورد اندازه محصول استفاده شده است. در زمینه تفکیک کاربری‌ها می‌توان به نتایج پژوهش‌های پرشماری اشاره کرد (فیضی‌زاده و حاجی میرحیمی ۲۰۰۸، اکبری و همکاران ۲۰۱۱، فیضی‌زاده و هلالی ۲۰۱۰، محمودزاده ۲۰۱۷، دلفان ۲۰۱۷ و هانژی و همکاران ۲۰۲۴). در زمینه تفکیک محصول نیز می‌توان به نتایج پژوهش‌های عاشورلو و همکاران (۲۰۱۶)، درویشی (۲۰۱۵)، هان‌یو (۲۰۲۳)، دنگ و همکاران (۲۰۲۴) و هویی (۲۰۲۴) اشاره کرد. در زمینه برآورد محصول با استفاده از روش شی‌گرا، پژوهش‌های کمتری انجام شده است. در این راستا، می‌توان به پژوهش‌های میرباقری و همکاران (۲۰۰۷) و یاقوتی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. این پژوهشگران نتایج برآورد قابل قبول و نزدیک به واقعیتی از محصول را ارائه کرده‌اند. از آنجایی که هدف این پژوهش، جداسازی زمین‌ها با کاربری کشاورزی در آبخیزهای استان فارس بود بر تفکیک نوع محصول و یا برآورد اندازه محصول متمرکز نبود. از این‌رو، نتایج پژوهش‌های مشابه با هدف اصلی این پژوهش، بررسی شد. محمودزاده (۲۰۱۷) در سردرود تبریز، تغییرات کاربری زمین‌ها در یک دوره ۲۷ ساله را بررسی کرد و با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای چندزمانه لندست ۵ و روش‌های پردازش تصویرهای ماهواره‌ای شی‌گرا، عامل‌های مؤثر بر توسعه فیزیکی

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

در این پژوهش تمام مناطق تحت کشت زراعت و باغ در پهنه آبخیزهای استان فارس بررسی شد. استان فارس در بخش جنوب ایران در میان $35^{\circ} 50'$ تا $33^{\circ} 55'$ طول شرقی و $08^{\circ} 27'$ تا $45^{\circ} 31'$ عرض شمالی است. بلندی این منطقه از ۱۱۵ متر در نواحی جنوب-غربی تا بیش از ۲۹۰۰ متر در بلندی‌های شمال در شهرستان اقلید متغیر است. بر اساس گزارش سازمان هواشناسی کشور از دیدگاه اقلیمی در استان فارس، ناحیه‌های آب و هوایی مشخصی تحت تأثیر ویژگی‌های پستی‌بلندی، پدیدار شده است. ناحیه کوهستانی شمال، شمال‌غرب و غرب با زمستان‌های سرد معتدل و میانگین بارش ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و پوشش گیاهی قابل توجه است که شامل شهرهای اقلید و نورآباد می‌باشد. ناحیه شمال‌شرق با زمستان‌های سرد و خشک و میانگین بارش ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر است که شهرهای مهم آن آباده و بوانات می‌باشد. ناحیه مرکزی با زمستان‌های نسبتاً معتدل توأم با بارندگی و با تابستان‌های گرم و خشک است. آب و هوای این ناحیه به دلیل بارندگی نسبی بلندی‌ها، در مقایسه با شمال و شمال‌غرب وضعیتی کاملاً متفاوت دارد، اندازه بارش این ناحیه از ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر در سال متغیر است. شهرهای مهم این ناحیه شیراز، کازرون، فسا و فیروزآباد است. ناحیه جنوب و جنوب‌شرقی به دلیل کاهش بلندی و پهنای جغرافیایی و شکل استقرار کوه‌ها، اندازه بارش این ناحیه در فصل زمستان در مقایسه با دو فصل بهار و پاییز کمتر است. هوای این ناحیه در زمستان‌ها معتدل و در تابستان‌ها بسیار گرم و اندازه بارش سالانه آن ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر است. شهرهای مهم این ناحیه لار، اوز و خنج است. شایان ذکر است میانگین بلندمدت بارش استان بیش از ۳۰۹ میلی‌متر گزارش شده است (سازمان هواشناسی کشور ۲۰۱۸). این استان با مساحتی حدود ۱۲۲۶۰۸ کیلومتر مربع، چهارمین استان بزرگ کشور است و جمعیت آن ۴'۸۵۱'۲۷۴ نفر است که بر پایه برآورد جمعیت سال

با کاربرد تصویرهای چند طیفی (هایپر اسپکترال) و پایگاه بزرگ داده‌های زمینی کاربری‌های و محصولات مهم را طبقه‌بندی کردند. در ابتدا نتایج صحت‌سنجی داده‌ها را در سال ۲۰۲۴ گزارش کردند. در این مقاله برای نخستین بار جزئیات پایگاه داده‌ای با ۶۰۰۰۰۰ نمونه توصیف شد و محدودیت‌های عملی رسم شد و نیازهای پژوهشی برای آینده تبیین شد.

بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده می‌توان گفت روش‌هایی که در سال‌های گذشته سبب افزایش دقت نتایج و دستیابی بهتر به هدف بوده‌اند به‌طور کلی ترکیبی از تمام امکانات و روش‌های متنوع مانند به‌کارگیری داده‌های چندزمانه، روش‌های جدید طبقه‌بندی و روش شیء‌گرا بوده است.

کاربرد روش طبقه‌بندی شیء‌گرا برای تفکیک پدیده‌هایی که شکل هندسی دارند، به‌وسیله تصویرهایی با وضوح متوسط، برتری‌هایی دارد. افزون بر این، آگاهی از پراکنش مکانی و مساحت کاربری‌های مهم کشاورزی آبی و دیم از جمله نیازهای اطلاعاتی است که دستیابی به اندازه دقیق و قابل اعتماد آنها در مدیریت بهینه کشاورزی نقش با اهمیتی دارد. در سطوح با گستردگی بیشتر مثل آبخیزها، کاربری‌های کشاورزی از مهم‌ترین بهره‌بردارها در سطح هر آبخیز است که نقش تعیین‌کننده‌ای در هر دو دیدگاه مثبت و منفی (نابودی یا حفاظت) آبخیز دارد. از این‌رو، هدف مهم این پژوهش دستیابی به شیوه‌نامه^۴ کاربرد داده‌های سنجش از دور و روش برتر طبقه‌بندی به‌همراه دقیق‌ترین و دست‌یافتنی‌ترین داده‌های میدانی برای تولید اطلس کاربری‌های کشاورزی بود. افزون بر این، مناسب‌ترین شاخص گیاهی تعیین شد و کارآمدترین روش طبقه‌بندی با روش‌های پیکسل‌مبنا و شیء‌گرا معرفی شد و مدل کاربردی در جی‌آی‌اس برای خودکار کردن فرآیند تولید اطلس کاربری‌های کشاورزی توسعه داده شد.

۹ و ۱۰۰ پیکسل بود. در این پژوهش، از تصویرهای سنتینل ۲ به دلیل وضوح بهتر و داشتن باندهای طول موج کوتاه لازم (مرئی و مادون قرمز)، استفاده شد. شایان ذکر است در شرایطی که نیاز به باندهای حرارتی بود، امکان استفاده از سنتینل که فاقد آن است، فراهم نبود. در این راستا، به منظور بررسی چندزمانه^۵ از تصویرهای ماهواره سنتینل ۲ در زمان‌های مختلف (بر اساس برنامه کاشت، داشت و برداشت محصول) استفاده شد. افزون بر این، تعداد پنجره‌های دریافت‌شده تصویرهای سنتینل ۲ برای پردازش کل استان فارس، ۲۱ پنجره بود.

تصحیحات تصویرهای ماهواره‌ای

تصحیح هندسی

تصویرهای سنتینل با دقت مناسبی از دیدگاه هندسی تصحیح شد. همه تصویرهای دریافتی به وسیله نقاط زمینی که در مرحله ساخت لایه‌های کاداستر استان تولیدشده بود، بررسی شد. به این منظور، داده‌های نقاط بازبینی زمینی که به عنوان نقاط پایه^۶ در طرح کاداستر استان فارس تولیدشده و بیش از ۴۰۰۰ عدد بود، استفاده شد.

تصحیح جوی

در محیط نرم‌افزار انوی نسخه ۵،۳ سه روش برای تصحیح جوی شامل تفریق جسم سیاه^۷، کواک^۸ و فلاش^۹ وجود دارد. روش اول و دوم به عنوان روش کلی شناخته شده‌اند و روش سوم از انواع روش‌های مدل‌سازی اما ساده‌سازی شده است. در این پژوهش از روش فلاش، برای انجام تصحیحات جوی روی باندهای مرئی سنتینل ۲ استفاده شد.

استخراج شاخص‌ها و بررسی آنها

ماهواره سنتینل ۲، چهار باند ۱۰ متر و چهار باند ۲۰ متر و چهار باند ۶۰ متر دارد. باندهای ۴ و ۸ این ماهواره به ترتیب به عنوان باندهای مادون قرمز نزدیک

۱۳۹۵ خورشیدی مرکز آمار ایران، چهارمین استان پرجمعیت ایران به‌شمار می‌آید. بر پایه گزارش آمارنامه کشاورزی، این استان با داشتن حدود یک میلیون و دویست هکتار سطح زیر کشت پس از استان‌های آذربایجان شرقی و خراسان رضوی، رتبه سوم را در کل کشور دارد. استان پهناور فارس، به دلیل گستردگی، تنوع اقلیم و حاصلخیزی خاک، یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور به‌شمار می‌آید و سهم قابل توجهی از تولید محصولات و فرآورده‌های کشاورزی کشور به این استان اختصاص دارد، به طوری که در بسیاری از محصولات کشاورزی جایگاه آن، اول تا سوم است.

روش پژوهش

ناحیه‌بندی اقلیمی آبخیزهای استان فارس

از آنجایی که تاریخ‌های بیشینه سبزی‌نگی در اقلیم‌های مختلف متفاوت است، به منظور بررسی ترکیب اقلیمی هر شهرستان، نقشه اقلیم استان فارس برگرفته از اطلس هوا و اقلیم‌شناسی استان فارس (قاسمی و همکاران ۲۰۲۰)، با مرز شهرستان‌ها ادغام شد. در این پژوهش، نقشه اقلیم بر اساس روش دمارتن و با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی و هم‌دید استان فارس تهیه شد.

بررسی الگوی کشت محصولات و تقویم زراعی

به منظور بررسی الگوی کشت اکثر شهرستان‌هایی که در آن‌ها گندم کاشت می‌شد، آمار سطح زیر کشت محصولاتی مانند جو و چغندر قند پاییزه که همزمان با گندم کاشت می‌شدند نیز جمع‌آوری شد. از آنجایی که زمان بیشترین سبزی‌نگی پوشش گیاهی زراعت‌ها برای تعیین بهترین تاریخ دریافت تصویرهای لازم بود، از تقویم کشت محصولات در استان فارس که سالانه به وسیله سازمان جهاد کشاورزی استان فارس تهیه می‌شود، استفاده شد.

دریافت تصویرهای ماهواره‌ای

در این پژوهش، بر پایه هدف جداسازی کاربری‌های کشاورزی و اندازه میانگین قطعه‌های کشاورزی (حدود ۱ هکتار در استان فارس)، تصویرهای رایگان لندست ۸ و سنتینل ۲، به ترتیب با وضوح زمینی ۳۰ و ۱۰ متر کافی بود. زیرا، هر هکتار زمین، به ترتیب در برگیرنده

5- multi temporal

6- benchmark

7- dark object subtraction (DOS)

8- quick atmospheric correction (Quac)

9- fast line-of-site atmospheric analysis of spectral hypercubes (FLAASH)

با استفاده از تحلیل‌گری که روی پایگاه‌های آموزشی (انتخابی) است می‌توان تصمیم‌گیری کرده و به این شیوه روی پردازش و طبقه‌بندی نظارت کرد. انواع روش‌های رایج طبقه‌بندی نظارت‌نشده شامل کمترین فاصله از میانگین^{۱۱}، طبقه‌بندی‌کننده بیشترین درست‌نمایی^{۱۲}، طبقه‌بندی متوازی‌سطوح^{۱۳}، طبقه‌بندی درخت تصمیم و ماشین‌بردار پشتیبان است (علوی‌پناه ۲۰۰۱).

پردازش شیء‌گرای تصویرهای ماهواره‌ای

طبقه‌بندی شیء‌گرا فرایندی است که در آن طبقه‌های پوشش زمین به هر یک (یا هیچ کدام) از اشیاء تصویری اختصاص داده می‌شود. در این فرایند پیکسل‌های متفاوت از نظر درجه عضویت در بیش از یک طبقه، طبقه‌بندی می‌شود و بر اساس درجه عضویت نسبت به هر طبقه، طبقه‌بندی بر اساس روش نزدیکترین همسایه انجام می‌شود. قطعه‌بندی تصویر با تک پدیده شروع می‌شود. سپس، پدیده‌های پرشماری با سطوح قطعه‌بندی سلسله‌مراتبی دنبال می‌شود و هر سطح بعدی شامل دسته‌ای از اشیاء فردی است. پدیده‌ها بر اساس مشابهت طیفی و تباین با پدیده‌های همسایه و ویژگی‌های شکلی گروه‌بندی می‌شوند. این سه گروه مشخصات در یک سنججه به‌نام ناهمگنی، گروه‌بندی می‌شوند. به‌بیان دیگر، با یک سنججه، مقیاس معین سه ویژگی ناهمگنی یک پدیده (رنگ، نرمی و تراکم) مشخص می‌شود. در این پژوهش از نرم افزار ایکاگنیشن^{۱۴} برای قطعه‌بندی و طبقه‌بندی نهایی شیء‌گرای استفاده شد.

و قرمز و باند ۳ به‌عنوان باند سبز در کلیه شاخص‌های پوشش گیاهی به‌کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش، توانایی شاخص‌های پوشش گیاهی در تعیین سطح سبز بررسی شد. معیار بررسی، اندازه تطابق سطح سبز تولیدی آن‌ها با نقاط میدانی بود به شیوه‌ای که بیشترین درصد نقاط مشاهده‌ای که در مزارع سبز برداشت شدند در تصویر شاخص گیاهی بررسی‌شده نیز سبز دیده شود (اسنوب و همکاران ۲۰۱۸). برای هر شاخص، اندازه ارزش عددی که در منابع به‌عنوان آستانه جدایی خاک بستر از پوشش گیاهی (خط خاک) مطرح شده است را در تصویر برش زده و تصویر تولیدشده به‌عنوان سطح سبز آن شاخص در نظر گرفته شد. در این فرایند ارقام گزارش‌شده در منابع، اندکی تغییر داده شد تا بیشترین تطابق با واقعیت زمینی منطقه پژوهشی به‌دست آید. به‌بیان دیگر، در مناطق گرم و خشک که گیاه دچار تنش آبی است این رقم به‌طور مثال برای NDVI نزدیک به ۰/۲۷ و در مناطق معتدل استان نزدیک ۰/۱۷ محاسبه شد. در حالی که در منابع، این رقم از ۰/۱۵ تا ۰/۲۹ گزارش‌شده است (داندان و گو ۲۰۱۳). همین شیوه برای دیگر شاخص‌ها نیز وجود داشت. سپس، شاخص مد نظر در فرایند طبقه‌بندی نظارت‌شده به‌همراه باندهای اصلی در لایه‌های یکپارچه^{۱۵} مشارکت داده شد. شاخص‌های بررسی‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

پردازش پیکسل‌مبنای تصویرهای ماهواره‌ای

استفاده از اطلاعات پیکسلی به‌شکل یک روش است که با استفاده از آن می‌توان نواحی و ارزش‌های پیکسلی مشابه را گروه‌بندی کرد.

11- Minimum distance of mean

12- Maximium likelihood

13- Parallel piped

14- eCognition

10- Layer stacking

جدول ۱- شاخص‌های گیاهی بررسی شده.

Table 1- Plant indices used in the study.

Index	Equation*
BNDVI	$(B8-B2)/(B8+B2)$
CARI	$(B5*\text{SQRT}((a*B4+B4+b)^2)*(a^2+1)^{0.5})/B4$ $a=(B5-B3)150$, $b=B3*550*a$
CVI	$B8*B4/(B3)^2$
DVI	$2.4*B8-B4$
EVI	$(2.5*B8-B4)/(B8+6*B4-7.5*B2+1)$
GBNDVI	$(B8-(B3+B2))/(B8+(B3+B2))$
MCARI	$((B5-B4)-0.2*(B5-B3))*B5/B4$
mNDVI	$(B8-B4)/(B8+B4-2*B2)$
mSAVI	$(2*B8+1-(\text{SQRT}((2*B8+1)^2-8*(B8-B5))))/2$
NDVI	$(B8-B4)/(B8+B4)$
RDVI	$B8-B4/\text{SQRT}(B8+B4)$
SAVI	$1.5*(B8-B4)/(B8+B4+0.5)$

*B- به معنای باند در شاخص و عدد کنار آن به معنای شماره باند در سنیتل ۲ است (اسنوب و همکاران ۲۰۱۸).

*-B is band in the index and number is the band number of Sentinel (Sonobe et al., 2018).

میان واقعیت زمینی امروزی با واقعیت تصویرهای گوگل‌ارث تفاوت باشد و برای ارزیابی نهایی، نقشه‌های اصلاحی در تدقیق ستادی، بار دیگر وارد چرخه تصحیحات تدقیق میدانی شدند. ابتدا دوره‌های آموزشی برای آموزش شیوه اصلاح مرزها در محیط گوگل‌ارث و آرک‌جی‌آی‌اس ۱۰،۳ برای ۶۳۰ نفر از مدیران پهنه‌های کشاورزی مستقر در مراکز خدمات جهاد کشاورزی شهرستان‌ها، برگزار شد. در این دوره‌های آموزشی از شرکت‌کنندگان خواسته شد تمام محدوده‌های رسم‌شده دیم زراعی و باغی در مراحل قبلی را مشاهده کنند و بر پایه شناختی که از پهنه تحت مدیریت خود دارند آن محدوده‌ها را تأیید یا تغییر دهند و برای موردهای مشکوک بازدید میدانی انجام شود. این مرحله شامل تغییرات زیر بود:

پرونده دریافت‌شده از سوی مدیران پهنه‌ها دوباره به‌وسیله گروه همکاران این پژوهش بازبینی نهایی شد تا ایرادات آن به‌ویژه در مرزهای بینابین چندضلعی‌ها تصحیح شود. در پایان، نقشه‌های زراعت دیم و باغ دیم با بیشترین دقت تولید شد که به‌عنوان دو دستاورد از کاربری‌های اطلس کشاورزی استان فارس بود.

برداشت‌های میدانی و رسم مرزهای اولیه

بر اساس تجربیات پیشین، دقت تفکیک کاربری‌های زراعی دیم از کاربری‌های همجوار مرتعی و زراعت آبی و نیز باغ‌های دیم از باغ‌های آبی قابل قبول نبود. از این‌رو، در یک فعالیت میدانی گسترده به‌وسیله همکاران این پژوهش و با همکاری مؤثر سازمان جهاد کشاورزی استان فارس، تمام عرصه کشاورزی استان در مدت زمان ۶ ماه بازدید میدانی شد. کاربری‌های زراعی و باغی دیم شناسایی شد و روی نقشه رسم شد. به این منظور از یک کاربست (اپ) موجود و رایگان به‌نام اندازه‌گیر میدانی مساحت^{۱۵} استفاده شد که به‌وسیله این کاربست و تبلت جداسازی انجام شد. در نتیجه، تمام محدوده‌های کاربری‌های زراعی دیم و کاربری‌های باغی دیم برداشت شد. این محدوده‌ها حالت کلی و پوششی داشت، به‌طوری‌که عرصه بزرگی که زراعت دیم یا باغ دیم بود به‌شکل لکه‌ای بود و در فرایند میدانی تفکیک و رسم شد تا در مرحله بعد لکه‌ها تدقیق شوند. در مرحله بعد در یک فعالیت گسترده ستادی، به‌وسیله گروه همکاران طرح، مرزهای برداشتی در بازدید میدانی روی تصویرهای گوگل‌ارث بارگذاری و مرزها تدقیق شد. از آنجایی که ممکن بود

15-fields area meter pro (<https://goo.gl/Gh5Jp6>)

مرز باغ‌ها و زراعت آبی

در طرح کاداستر فارس کاربری‌های باغ آبی روی تصویرهای با وضوح زیاد رسم شد و در فعالیت میدانی بازبینی و تدقیق شد. از این‌رو، در این پژوهش لایه کاربری باغ آبی از اطلاعات کاداستر استان استخراج و استفاده شد. در طرح کاداستر تا این زمان، بیش از ۷۵٪ عرصه کشاورزی استان پوشش داده شده است (گزارش شفاهی در جلسات سازمانی). از این‌رو، برای آن بخشی از استان که اطلاعات کاداستر موجود نبود مراحلی که برای زراعت و باغ دیم تشریح شد برای باغ آبی نیز انجام شد. برای تفکیک مرز کاربری‌های زراعت آبی از دو روش پیکسل‌مبنا و شیء‌گرا استفاده شد.

برداشت نقاط آموزشی

نمونه‌های تعلیمی به شکل چندضلعی و چهارگوشه‌ای در درون کاربری‌های کشاورزی مد نظر و با ابعاد تقریبی ۱۰۰×۱۰۰ متر برداشت شد. پراکنش فضایی و همگن بودن نمونه‌های تعلیمی در منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد. به بیان دیگر، نمونه‌ها در فاصله تقریبی همسانی نسبت به هم وجود دارند و کل منطقه را به شکل پراکنده پوشش می‌دهند. به منظور بررسی همگنی نمونه‌ها از آزمون Run Test استفاده شد. بر اساس طبقه‌بندی نظارت‌شده، از کل نمونه‌ها درصدی به عنوان نمونه تعلیمی و درصدی به عنوان نمونه آزمون جداسازی شد. برای این منظور، از کل نمونه‌های در دسترس، ۷۰٪ برای مشارکت در طبقه‌بندی و ۳۰٪ برای آزمون نتایج جداسازی شد.

برداشت‌های میدانی مرز کاربری‌ها

در بررسی میدانی از نرم‌افزار کاربردی اندازه‌گیری میدانی مساحت^۶ نصب شده روی تبلت، استفاده شد و مرز کلان کاربری‌های نامبرده با حضور در محل و روی تصویر ماهواره‌ای گوگل (ارائه شده در محیط نرم‌افزار) رسم شد. سپس، در بازدید میدانی، مرزهای کلان با استفاده از تصویرهای گوگل‌ارث با مرزهای دقیق زمینی تطبیق داده شد. در مرحله بعد با بازدید میدانی دوباره به وسیله کارشناسان محلی بازبینی انجام شد.

سپس، بار دیگر در مرکز استان بر اساس تصحیحات جدید میدانی از دیدگاه اختلاط مرزها، ویرایش نقشه‌ای انجام شد. سپس، برای تهیه نقشه کاربری زراعت آبی، با انجام بازدیدهای میدانی گسترده در تمام پهنه استان فارس هزاران نمونه تعلیمی برداشت شد. با استفاده از آن‌ها طبقه‌بندی رقومی با دو روش پیکسل‌مبنا و شیء‌گرا روی تصویرهای ماهواره‌ای سنیتل ۲، برای پوشش کل استان در سال ۱۳۹۸ انجام شد. همچنین، از این نمونه‌ها و با بهره‌گیری از لندست ۸ در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸، کاربری‌های زراعی غیر فعال (نکاشت یا آیش) تفکیک شد.

ارزیابی شاخص‌های گیاهی

معیار بررسی، اندازه تطابق سطح سبز تولیدی شاخص‌های گیاهی با نقاط میدانی بود به شیوه‌ای که بیشترین درصد نقاط مشاهده‌ای که در مزارع سبز برداشت شدند در تصویر شاخص گیاهی بررسی شده نیز سبز دیده شود.

مقایسه روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده بر اساس ضریب کاپا و صحت کلی

پس از انجام هر یک از روش‌های طبقه‌بندی، اندازه دقت آن‌ها با شاخص‌های مختلفی ارزیابی شد. این ارزیابی با کاربرد آن بخشی از نمونه‌های آموزشی که در طبقه‌بندی به کار گرفته نشده بودند (۳۰٪ از نمونه‌ها) انجام شد. روش کاپا در قالب ضریب کاپای کوهن^۷ نمونه‌ای از ابزارهای تصمیم‌گیری و تحلیل آماری است و اندازه عددی ضریب کاپا میان -۱ تا +۱ است. هر چه این ضریب به +۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر وجود توافق متناسب و مستقیم، و هر چه به -۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر وجود توافق وارون و عکس و اندازه‌های نزدیک به صفر آن نبودن توافق را نشان می‌دهد. ضریب کاپا با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (متین‌فر و همکاران ۲۰۱۶).

$$\text{رابطه (۱)} \quad \bar{K} = \frac{(N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i+} \times X_{+i}))}{N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{i+} \times X_{+i})}$$

همان اندازه سبزی‌نگی است که هر گیاه در زمان مشخص از خود نشان می‌دهد. بر اساس تفاوت سبزی‌نگی در زمان‌های مختلف بهترین ترکیب زمانی تصویر برای ورود به طبقه‌بندی مشخص شد. سپس، بر اساس اندازه و شدت شیب، تغییرات زمان‌های مد نظر انتخاب شد. پس از همگون‌سازی داده‌ها و یکپارچگی آن‌ها مدل‌های مختلف طبقه‌بندی نظارت‌شده روی آن‌ها اعمال شد.

جداسازی کاربری‌های زراعی آبی کشت‌شده و آیش برای مشخص کردن محدوده‌های زراعی کشت‌نشده تصویرهای ماهواره‌ای کل استان مربوط به دو تاریخ فروردین و شهریور پنج سال گذشته از ۱۳۹۴ تا سال ۱۳۹۸ (مجموعاً ۱۸۰ پنجره) ماهواره لندست ۸ بارگذاری شد. پس از انجام تصحیحات جوی، با استفاده از شاخص گیاهی برتر (EVI) اندازه‌های سطح زمین‌های سبز تصویرها استخراج شد. آنچه تا این مرحله به دست آمد، کاربری‌های زراعت آبی کشت‌شده و زراعت آبی کشت‌نشده بود که هر دو با دیگر انواع زراعت دیم، باغ آبی و باغ دیم آمیخته بود. از سوی دیگر، محدوده سه کاربری کشاورزی دیگر شامل باغ آبی و دیم و زراعت آبی از قبل تعیین شده بود. از این‌رو، با هم‌نهاد کردن سه کاربری نامبرده روی لایه زراعت آبی (کشت و آیش)، محدوده انواع کاربری‌های کشاورزی تهیه شد. در این پژوهش، برای بهینه‌سازی روش‌ها، مدل‌های کاربردی GIS متنوعی به وسیله تولیدگر مدل برای خودکارسازی فرایندها نوشته شد. با بهره‌گیری از این مدل‌ها امکان به‌روزرسانی لایه‌های تولیدی در سال‌های آتی با سهولت بیشتری فراهم شد. در نتیجه با صرف زمان و هزینه‌ای بسیار کمتر از روند پژوهش‌های پیشین، فرایند به‌روز کردن انجام شد. در پایان نقشه‌های اطلس کاربری‌های کشاورزی با محدوده آبخیزهای تا درجه ۳ استان در محیط جی‌آی‌اس برخورد داده شد و اطلاعات توصیفی و پراکنش انواع کاربری‌ها در آبخیزهای استان به شکل نقشه تهیه شد تا در فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت آن‌ها بهره‌برداری شود.

N: تعداد کل مشاهده‌ها، Xii: عناصر قطر اصلی جدول ماتریس خطا، Xi+: مشاهده‌ها در سطر i و X+i: مشاهده‌ها در ستون i است.

به منظور سهولت محاسبه ضریب کاپا از رابطه ۲ استفاده شد.

$$\text{رابطه (۲)} \quad \bar{K} = \frac{(P_0 - P_e)}{1 - P_e}$$

\bar{K} : اندازه ضریب کاپا، P_0 : اندازه‌های نسبی مشاهده‌ای و P_e : اندازه‌های واقعی اندازه‌گیری است. اندازه عددی روش صحت کلی^۸ میان ۰ تا ۱۰۰ است و هرچه به ۱۰۰ نزدیک باشد نشان‌دهنده هماهنگی بیشتر میان طبقه‌های مرجع با طبقه‌های به دست آمده از طبقه‌بندی است. آنگاه صحت کلی بیشترین اندازه است و تمام ارقام بیش از صفر در قطر ماتریس هستند. اندازه آن از جمع عناصر قطری اصلی Xii تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها (N) و با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد (لیلسند و کیفر ۲۰۰۴).

$$\text{Overall Accuracy} = \text{OA} = \sum_{i=1}^n X_{ii} / N$$

طبقه‌بندی تک‌زمانه و چندزمانه

شاخص‌های مختلف گیاهی با استفاده از ۷۰٪ نمونه‌های آموزشی استخراج شدند. از مجموعه این شاخص‌ها و باندهای اصلی طیفی، لایه‌های یکپارچه ساخته شد و به عنوان ورودی‌های اولیه طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده شد. روش‌های مختلف طبقه‌بندی نظارت‌شده روی هر یک از زمان‌های مختلف با یا بدون حضور شاخص‌ها و باندهای اصلی در لایه‌های یکپارچه اعمال شد و هر بار اندازه ضریب کاپا محاسبه شد. به دلیل اندازه‌های کم ضریب کاپا و صحت کلی مدل تک‌زمانه، استفاده از یک طبقه‌بندی چند زمانه به منظور آشکارسازی شیب تغییرات طیفی طبقات طبقه‌بندی ضروری بود. از این‌رو، بر اساس نمودار تغییرات شاخص گیاهی برتر، شیب تغییرات شاخص پوشش گیاهی آشکار شد. منظور از شیب تغییرات،

نتایج و بحث

در این پژوهش، نتایج تصحیح جوی روی تصویرها بیانگر بهبود قابل توجه سنج‌های تصویری و شفافیت دیداری آن‌ها بود. با افزایش شفافیت تصویرها برخی پدیده‌ها پس از تصحیح قابل مشاهده شدند. به‌منظور بررسی صحت تصحیحات رادیومتریک و جوی انجام شده روی تصویر، رفتار طیفی پدیده‌های مختلف (آب، خاک، گیاه) با رفتار طیفی مرجع این پدیده‌ها که در آزمایشگاه‌های طیفی رسم‌شده بود، بررسی شد.

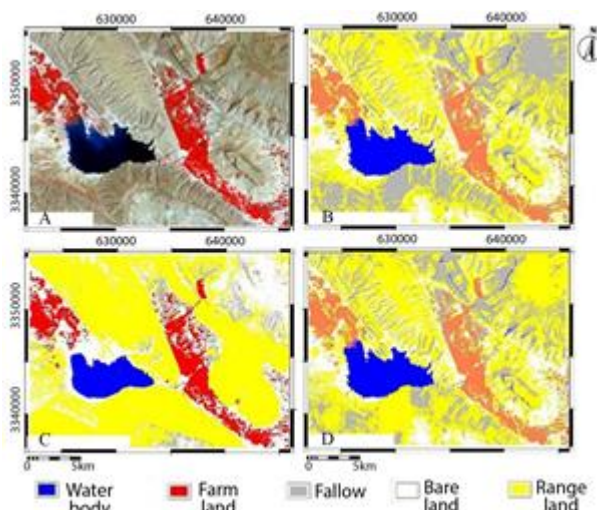
در دو کاربری پوشش کاملاً سبز مزارع و کاربری‌های آیش، اندازه‌های این شاخص پس از تصحیح جوی باندها افزایش یافت. در دو کاربری بایر و پهنه محدوده‌های آبگیر کاهش یافت و به دامنه ارقام قابل انتظار در منابع معتبر، نزدیک‌تر بود. این یافته دلیلی بر افزایش تباین و تفکیک‌پذیری پدیده‌های زمینی پیش و پس از تصحیح جوی بود. به این موضوع معمولاً در پردازش‌های سنجش از دور توجه نمی‌شود.

بررسی شاخص‌های گیاهی

تغییرات ارقام خط خاک شاخص‌های مختلف در اقلیم‌های متفاوت بیانگر حساسیت این شاخص‌ها به شرایط محیطی بود. تفاوت‌های ارقام خط خاک شاخص‌ها محسوس بود. به‌ویژه از دیدگاه حساسیت به ویژگی‌های اقلیمی کاملاً متفاوت بودند. باید به این نکته توجه داشت که در اقلیم‌های مختلف زمان بیشینه سبزی‌نگی متفاوت است؛ به‌طوری که در استان فارس درباره گندم، از اسفند در نواحی جنوبی مانند لار و لامرد، تا خرداد ماه در نواحی شمالی مانند اقلید و آباده متغیر است. اندازه صحت نقشه سطح سبز به‌دست آمده از شاخص‌های مختلف گیاهی در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این جدول، بیشترین اندازه صحت مربوط به EVI و mSAVI و در رتبه بعدی مربوط به mNDVI و GBNDVI بود. دلیل صحت

شاخص mSAVI توانایی آن در کاهش مزاحمت اثر خاک بستر بر پوشش گیاهی بود. دلیل صحت سه شاخص دیگر نیز درکار آوردن باند آبی (۰/۴ تا ۰/۵ میکرو متر) و یا سبز (۰/۵ تا ۰/۶ میکرومتر) بود. از سوی دیگر، ورود فقط باند آبی در شاخص EVI سبب افزایش صحت این شاخص شد که دلیل آن را می‌توان اندازه‌های آب در بدنه توده گیاهی دانست. این یافته‌ها با نتایج پژوهش سونوب و همکاران (۲۰۱۸) هماهنگی دارد. تحلیل داده‌های کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نشان داده است که در طبقه‌بندی تصویرها، بیشترین همبستگی با ضریب‌های پراکنندگی تصویرهای ماهواره‌ای زمانی است که ضریب همبستگی شاخص پوشش گیاهی ۰/۹۲ باشد. با برقراری ارتباط میان بازپراکنش‌های راداری تصویرها و پوشش گیاهی می‌توان طبقه‌بندی کاربری‌های کشاورزی را تسهیل کرد (حیدری و صادقیان ۲۰۲۳).

مقایسه انواع طبقه‌بندی‌ها در تفکیک کاربری زراعت آبی طبقه‌بندی تصویرها به‌وسیله انواع روش‌های موجود در نرم‌افزار انوی ۵,۳ انجام شد. این طبقه‌بندی برای ۲۱ تصویر برای پوشش سرتاسری استانی و برای برش‌های مختلفی که برای هر تصویر بر اساس اقلیم مناطق ایجاد شده بود، انجام شد. نمونه‌ای از خروجی روش‌ها همراه با تصویر اصلی ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از همه روش‌ها کاربری‌های زیر کشت آبی که سطح سبز داشتند با دقت مناسبی تفکیک شد. از دیدگاه آماری نیز برتری روش اس‌وی‌ام به اثبات رسید. ضریب کاپا و صحت کلی این روش از دیگر روش‌ها نیز بیشتر بود (جدول ۲).



شکل ۱- مقایسه روش‌های مختلف طبقه‌بندی پیکسل‌پایه در بخشی از آبخیز بختگان و سد درودزن (A: تصویر، B: بیشینه درست‌نمایی، C: بردار ماشین پشتیبان، D: درخت تصمیم).

Figure 1- Comparison of methods of pixel-based classification in the Bakhtegan and Dorudzan Watershed (A: image, B: maximum likelihood, C: support vector machine, D: decision tree).

جدول ۲- اندازه‌های صحت کلی شاخص‌های گیاهی در تعیین سطح سبز کاربری‌های کشت آبی.

Table 2- Overall accuracy of plant indices in determining the green cover of fallow land.

overall %. accuracy	vegetation index	no.
83	MCARI	1
89	CVI	2
90	BNDVI	3
91	CARI	4
91	RDVI	5
93	DVI	6
93	SAVI	7
95	NDVI	8
96	GBNDVI	9
96	mNDVI	10
99	EVI	11
99	mSAVI	12

طیفی اولیه، به ترتیب ۷۷، ۷۹، ۷۶ و ۷۶٪ بود که با نتایج این پژوهش هماهنگی دارد. نتایج طبقه‌بندی شیء‌گرا بیانگر دقت بیشتر این روش در جداسازی کاربری‌های کشاورزی از مرتع و زمین بایر بود. افزون بر این، امکان جداسازی انواع مراتع از دیدگاه اندازه پوشش نیز فراهم شد (جدول ۳).

یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش نجفی (۲۰۱۷) و آلبرتو و همکاران (۲۰۱۶) هم‌راستا است. نتایج پژوهش احمدی و سادات‌حسینی (۲۰۲۳) نشان داد دقت طبقه‌بندی‌کننده‌های نزدیک‌ترین همسایه، ماشین‌های بردار پشتیبان، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و جنگل‌های تصادفی روی فضای ویژگی

جدول ۳- دقت روش‌های طبقه‌بندی.

Table 3- The accuracy of classification algorithms.

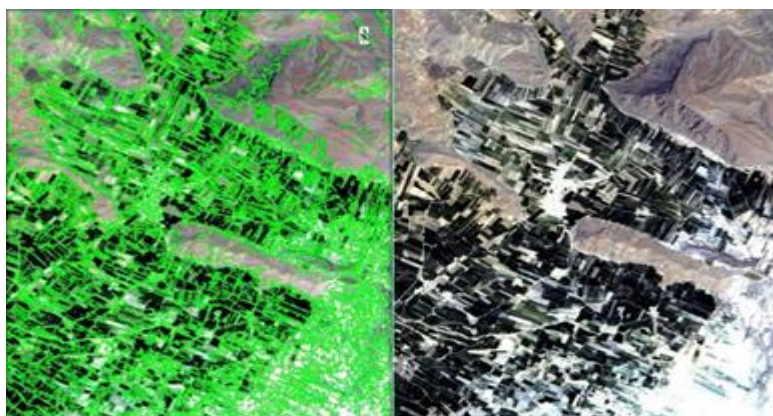
no	Algorithms	Kappa	Overall accuracy%
1	NN	0.62	70
2	ML	0.64	71
3	PP	0.72	72
4	DT	0.78	81
5	SVM	0.85	86
6	OO	0.89	91

*-NN نزدیکترین همسایه، ML بیشینه درست‌نمایی، PP سطوح منوازی، DT درخت تصمیم، SVM ماشین بردار پشتیبان، OO شیء‌گرا.

*-NN nearest neighbor, ML maximum likelihood, PP parallel piped, DT decision tree, SVM support vector machine, OO object oriented.

زمین و وضعیت فعلی فرسایش خاک در مقایسه با روش‌های رایج و پیکسل‌مبنا، افزایش یافت. دقت مطلوب قطعه‌بندی کاربری‌های کشاورزی در شکل ۲ نشان‌داده شده است.

در پژوهشی مو و همکاران (۲۰۲۴) روش‌های مختلف طبقه‌بندی تصویرهای ماهواره‌ای آبخیزها را بررسی کردند و دریافتند که دقت پیش‌بینی‌ها در روش‌های شیء‌گرا برای تعیین اندازه‌های پوشش زمین، کاربری



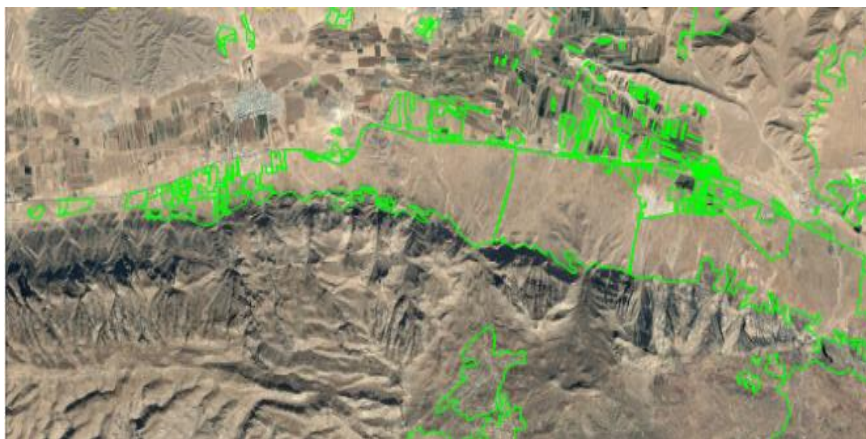
شکل ۲- نمونه‌ای از فرایند قطعه‌بندی در طبقه‌بندی شیء‌گرا در داراب.

Figure 2- The object-oriented segmentation in agricultural fields of Drab.

آخرین نقشه زراعت دیم و باغ‌های دیم

به دلیل دشواری تفکیک کاربری‌های دیم با طبقه‌بندی رقومی و تشابه طیفی آن‌ها با کاربری‌های بایر و مرتع، تفکیک با روش برداشت میدانی انجام شد. سپس، در چهار مرحله رفت و برگشت و بازدید میدانی، دقت تفکیک به حداکثر رسید. از میان صدها محدوده بررسی‌شده در تمام پهنه‌های گسترده استان فارس، نمونه‌ای از شهرستان‌های استهبان در شکل ۳ ارائه شده است.

این یافته با نتایج پژوهش‌های پرشماری مطابقت دارد (سونگ و همکاران ۲۰۰۵، یان و همکاران ۲۰۰۶، کلیو و همکاران ۲۰۰۸، فیضی‌زاده و حاجی میررحیمی ۲۰۰۸، فیضی‌زاده و هلالی ۲۰۱۰، موسوی ۲۰۱۲ و محمودزاده ۲۰۱۷). از این‌رو، با وجود طبقه جدید مرتع ضعیف و قوی، صحت کلی و ضریب کاپای نهایی روش شیء‌گرا بیشتر از بهترین روش پیکسل‌مبنا، ماشین-بردار پشتیبان، بود (جدول ۳).



شکل ۳- تدقیق مرز محدوده دیم استهبان به وسیله کارشناسان محلی.

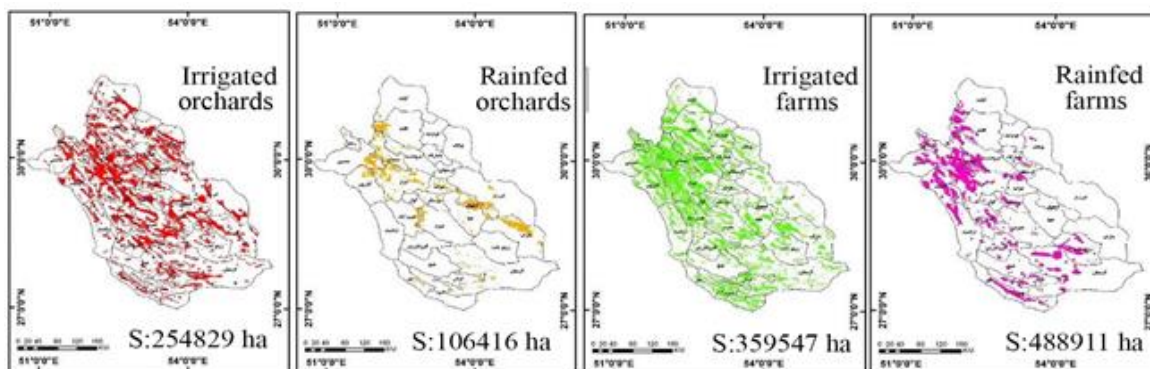
Figure 3- The process of rainfed land verification by local experts in the Estahban.

طشک- بختگان و سد بزرگ میرزای شیرازی در مند بود که دسترسی به آب سطحی و آبیاری بخش بزرگی از زمین‌ها را فراهم ساخته بود؛ هر چند در سال‌های گذشته پیوسته از اندازه آبرسانی کشاورزی از سوی این دو سد کاهش یافته شده است. در زمینه کاربرد شاخص‌های گیاهی و برتری آنها اختلاف دیدگاه زیادی در منابع وجود دارد که گاهی حتی با تناقض همراه است. هر چند عملکرد شاخص NDVI در تشخیص ویژگی‌های مختلف مرتبط با پوشش گیاهی به طور سنتی شناخته شده است و کاربران سنجش از دور آن را تأیید کرده‌اند اما در برخی ویژگی‌های خاص، شاخص‌های دیگری نیز مطرح شده است که کارایی بهتری نیز دارند.

در برداشت اولیه زمینی محدوده‌های بزرگ با قطعه‌ها و لکه‌های دیم‌کاری برداشت شد. سپس، در چند مرحله رفت و برگشت، نقشه‌های محدوده‌های دقیق عرصه‌های واقعی این کاربری‌ها به دست آمد. آخرین نقشه‌های کاربری‌های زراعت دیم و باغ دیم استان فارس در شکل ۴ نشان داده شده است.

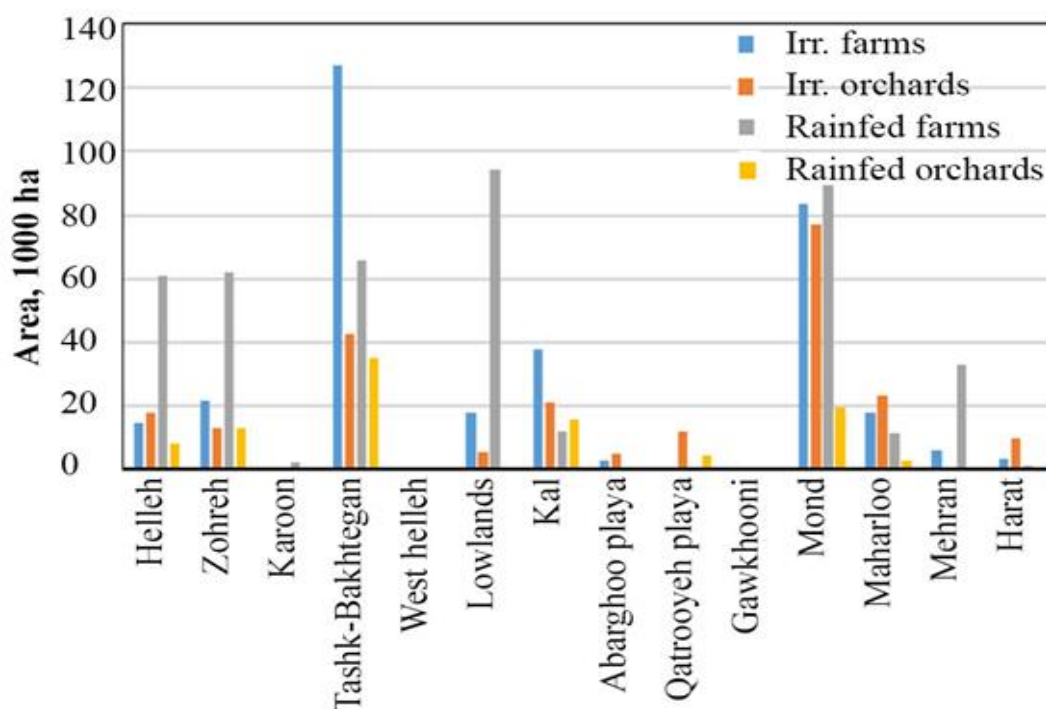
پراکنش در آبخیزها

اطلاعات پراکنش انواع کاربری‌های کشاورزی در آبخیزهای درجه سه استان فارس در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین مساحت زراعت آبی مربوط به آبخیزهای طشک- بختگان بود و در رتبه بعدی مند و کل بودند. بیشترین باغ‌های آبی نیز مربوط به همین سه آبخیز بود. اما، جای مند و طشک- بختگان در این کاربری عوض شد. مهمترین دلیل این موضوع وجود سد بزرگ درودزن در آبخیز



شکل ۴- آخرین نقشه زراعت و باغ‌های دیم و آبی استان فارس.

Figure 4- Final plan of irrigated and fallow agriculture and horticultural land of the Fars Province.



شکل ۵- پراکنش کاربری‌های کشاورزی در آبخیزهای استان فارس.

Figure 5- Distribution of agricultural lands in watersheds of the Fars Province.

روش شیء‌گرا اهمیت کمتری داشتند. یافته‌های این پژوهش، مبنی بر معرفی روش طبقه‌بندی شیء‌گرا به‌عنوان روش برتر در مقایسه با روش پیکسل‌مبنا با نتایج پژوهش‌های پرشماری (سونگ و همکاران ۲۰۰۵، کاندیریکا و وری ۲۰۰۸، کلیو و همکاران ۲۰۰۸، سنگ و همکاران ۲۰۱۵ و باریل و بیلوتا ۲۰۱۶) که هم‌راستا است. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش مبنی بر مقایسه انواع روش‌های طبقه‌بندی پیکسل‌مبنا و معرفی روش اس‌وی‌ام به‌عنوان روش برتر در مقایسه با دیگر روش‌ها (حتی روش شبکه عصبی) با یافته‌های فیضی‌زاده و حاجی‌میررحیمی (۲۰۰۸)، اکبری و همکاران (۲۰۱۱)، فیضی‌زاده و هلالی (۲۰۱۰)، دلفان و همکاران (۲۰۱۷) هماهنگی دارد. امکان جداسازی زمین‌های زراعی آبی آیش با روندیابی سطح سبز در سری‌های زمانی تصویرهای ۵ سال گذشته به‌خوبی فراهم شد که همراه با دقت مطلوبی بود. تاکنون، پراکنش مکانی و سطح واقعی کاربری‌های دیم زراعی و باغی به‌دلیل دشواری، با هیچ روش سنتی و یا سنجش از دور تعیین نشده بود، که در

در این پژوهش بهترین شاخص‌ها به‌ترتیب mSAVI، EVI، mNDVI، GBNDVI و NDVI شناخته شدند. حجم بسیار بزرگ داده‌های میدانی این پژوهش سبب شد تا نتایج قابل اعتماد بوده و به‌عنوان مبنا استفاده شوند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تعیین پراکنش دقیق کاربری‌های کشاورزی در پهنه گسترده استان فارس ضرورت ویژه‌ای در مدیریت کارآمد بخش کشاورزی در عرصه آبخیزها دارد. در این پژوهش، آخرین دست‌آوردهای دانش و مهارت سنجش از دور همراه با انواع داده‌های ماهواره‌ای به‌روز و در دسترس بهره‌برداری شد. از میان انواع مختلف شاخص‌های گیاهی بررسی‌شده برای تفکیک سطح سبز کاربری‌های زراعی، نتایج شاخص‌هایی مانند EVI و mSAVI که باند سبز نیز در معادله آنها استفاده شده بود، مطلوب‌تر بود. از دیدگاه روش‌های پیکسل‌مبنا، برترین روش اس‌وی‌ام و پس از آن درخت تصمیم بود. با این حال همه انواع آن‌ها در مقایسه با

کشاورزی استان فارس و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سپاسگزاری می‌کنند. همچنین، از تلاش کارشناسان جی‌آی‌اس مدیریت‌های جهاد کشاورزی شهرستان‌های استان فارس که در بررسی صحت نتایج میدانی همکاری کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: نگارش نسخه اولیه مقاله، ویرایش و بازبینی مقاله

نویسنده سوم: مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

نویسنده چهارم: کاربرد نرم‌افزار سنجش از دور
نویسنده پنجم: هماهنگ‌سازی فعالیت‌های میدانی
نویسنده ششم: هماهنگ‌سازی فعالیت‌های میدانی و ستادی

این پژوهش برای نخستین بار و حداقل در استان فارس با دقت مطلوب و مبتنی بر تلفیق سنجش از دور و بازید میدانی، انجام شد. در این پژوهش، به‌منظور بهینه‌سازی روش‌ها، مدل‌های مختلفی برای خودکارسازی فرآیندها نوشته شد که امکان به روزرسانی لایه‌های تولیدی در سال‌های آتی با سهولت بیشتر و با صرف هزینه و زمان کمتر را فراهم ساخت.

لایه‌های تولیدی را می‌توان با هر محدوده بزرگ یا کوچک مقیاس و از هر درجه‌ای از مراتب آبخیز در محیط جی‌آی‌اس برای اهداف تلفیقی در مدیریت آبخیزها استفاده کرد. مقیاس این لایه‌ها بر اساس تصویرهای پایه سنتینل با وضوح ۱۰ متر، برای کاربرد در پژوهش‌های آبخیزداری تا مقیاس تفضیلی-اجرایی، کافی و مناسب است

بر اساس یافته‌های این پژوهش پیشنهاد می‌شود از لایه‌های تولیدشده به‌عنوان الگویی برای بررسی تغییرات کاربری زمین‌ها و تصرف غیرقانونی زمین‌های منابع طبیعی استفاده شود. همچنین برای دستیابی به این هدف پیشنهاد می‌شود مرکز رقومی زمین‌های ملی روی لایه‌های کاربری‌های کشاورزی نهادشده و مرزهای متصرفی از آن‌ها استخراج شود.

سپاس‌گزاری

این مقاله بخشی از نتایج برگرفته شده از طرح تحقیقاتی خاص با عنوان "طبقه‌بندی و تهیه اطلس کاربری کاربری‌های کشاورزی در آبخیزهای استان فارس با سنجش از دور و GIS"، با کد مصوب ۲۴-۵۰-۲۹-۰۱۳-۹۶۰۳۴۶ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان این مقاله، از حمایت‌های پژوهشکده نامبرده، سازمان جهاد

فهرست منابع

Abtahi SM, Pakparvar M. 2002. Monitoring of desertification by satellite data processing (Case study: Kashan Plain). Iranian Journal of Range and Desert Research. 6(9): 85-104. (In Persian).
Doi.org/10.22052/JDEE.2023.248369.1083.

Ahmadi S, Sadat Hasani S. 2023. Combining spectral and spatial information to distinguish agricultural products using Sentinel 2 multi-temporal images (Case study: Qorveh County), Iran remote sensing and GIS. 15(1): 39-61. (In Persian). Doi.org/10.52547/gisj.15.1.39

- Alavipanah SK, Masoudi M. 2001. Land Use Mapping Using Landsat TM and Geographic Information System (GIS), a Case Study: Mouk Region of Fars Province. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*. 8(1): 65-76. (In Persian)
- Alberto RT, Serrano SC, Damian, GB, Camaso EE, Celestino AB, Hernando PJC, Isip MF, Orge KM, Quinto MJC, Tagaca RC. 2016. Object based agricultural land cover classification map of shadowed areas from aerial image and lidar data using support vector machine. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic. Doi:10.5194/isprs-annals-III-7-45-2016
- Ashurlu M, Alimomammadi A, Rezaeian P, Ashurlu D. 2016. Application of Lincar Distinction Analysis for Wheat Discrimination from Other Crops on Satellite Images. *Environmental Science*. 4(2): 101-116. (In Persian). Doi.org/10.5194/isprs-annals-III-7-45-2016.
- Barrile V, Bilotta G. 2016. Fast Extraction of Roads for Emergencies with Segmentation of Satellite Imagery. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 223: 903-908. Doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.313
- Biswas D, Tiwari A. 2024. A big data-driven agricultural system for remote biosensing applications. *Agricultural Biotechnology Journal*. 16(4): 321-324. Doi.org/10.22103/jab.2025.23995.1603
- Cleve C, Kelly M, Kearns FR, Moritz M. 2008. Classification of the wildland-urban interface: A comparison of pixel- and object-based classifications using high-resolution aerial photography. *Computers, Environment, and Urban Systems*. 32(1): 10-21. Doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2007.10.001
- Delfan L, Naghavi H, Maleknia R, Nureddini SAR. 2017. Investigating the efficiency of Sentinel 2 satellite images and nonparametric classification methods in preparing land use maps. *First National Conference on Applied Research in Science and Engineering*, Mashhad, Iqbal Lahori Institute of Higher Education in Mashhad. (In Persian).
- Deng H, Zhang W, Zheng X, Zhang H. 2024. Crop classification combining object-oriented method and Random Forest model using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) multispectral image. *Agriculture* 14(4): 548. Doi.org/10.3390/agriculture14040548
- Feizizadeh B, KHedmat Zadeh A, Nikjoo, M R. 2018. Micro-classification of orchards and agricultural croplands by applying object based image analysis and fuzzy algorithms for estimating the area under cultivation. *jgs. Journal of Applied Research in Geographic Sciences*. 13(8): 202-216. (In Persian). Doi.org/10.29252/jgs.18.48.201
- Ghasemi MM, Shams, Sh, Sahraeian Jahromi H, Bazrafkan AA, Akbari F. 2020. Fars Province Atlas of Weather and Climatology. Agricultural Organization of Fars. Shiraz, Iran, 179 p. <https://fajo.ir/site/images/fanavari/atlas.pdf>.
- Gudarzi M, Farahpur M, Musavi SAR. 2005. Land cover and rangeland classification map using Land sat satellite image (TM) (Case study: Namrood Watershed). *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 13(3): 265-277. (In Persian)
- Heidari AA, Sadeghian S. 2023. Application of remote sensing technology in agricultural data analysis using radar and optical satellite data. *The 5th International Conference on Biology and Earth Sciences*, 11/03/2023 Hamedan, Iran. (In Persian).
- Jafari M, Zehtabian GH, Ehsani AH. 2011. Effect of thermal bonding and supervised classification algorithms of satellite data in making land use maps (Case study: Khashan). *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 20(1): 72-87. (In Persian). Doi.org/10.22092/ijrdr.2013.2984
- Kandrika S, Roy PS. 2008. Land use land cover classification of Orissa using multi-temporal IRS-P6 awifs data: A decision tree approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 10: 186-193. Doi.org/10.1016/j.jag.2007.10.003
- Lillesand TM, Kiefer RW. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 7th ed. John Wiley, New York. 770 p.
- Mahmoodzadeh H. 2017. Application of artificial neural network in modeling and predicting land use changes in Sardroud City. *Journal of Geography and Planning*. 21 (60): 221-237. (In Persian). <https://www.magiran.com/p1741465>.
- Matinfard H, Zandieh V. 2016. Investigating land use changes in the Malayer Plain by processing Landsat 7 and 8 spectral data. *The First International Conference on natural hazards and environmental crises in Iran, solutions and challenges*, 13/09/2016, Ardebil, Iran. (In Persian).
- Metkan AA, Ashurlu D, Salehi H. 2015. Improving digital classification of agricultural products in multi-temporal images using texture information in Qorveh County. *Iran remote*

- sensing and GIS. 8(4): 65-78. (In Persian). Doi.org/10.1109/Multi-Temp.2015.7245780
- Mohamadi P, Ahmadi A, Feizizadeh B, Jafarzadeh AA, Rahmati M. 2024. Utilizing the conventional, object-oriented and pixel-based techniques to estimate erosion and sediment yield by MPSIAC model. Dryland Soil Research. 1(1): 113-124. Doi.org/10.47176/jsssi.01.01.1020
- Mohammadi SH, Ranraz K, Kabolizadeh M. 2018. Application of Landsat 8 and Sentinel 2 satellite image fusion in environmental monitoring. Journal of RS and GIS for Natural Resources. 9(3): 53-71. (in Persian)
- (in Persian) Najafi A, Azizi Ghalati S, Mokhtari MH. 2017. Application of Support Vector Machine in land use classification of Kileh-Chalkrod basin. Watershed Management Journal. 8(15): 101-92. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i6.72967>
- Ryherd S, Woodcock C. 1996. Combining spectral and texture data in the segmentation of remotely sensed images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 62: 181-194.
- Sang H, Zhai L, Zhang J, An F. 2015. An object-oriented approach for agricultural land classification using rapideye imagery, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015 International Workshop on Image and Data Fusion, 21-23 July 2015, Kona, Hawaii, USA. pp. 145-148.
- Sofyanian AR, Khodakarami L. 2012. Preparing a land use map using a fuzzy classification method (Case study of three sub-watersheds: Kabudar Ahang, Razan-Qahavand, and Khonjin-Talkhab in Hamedan Province). Land Planning. 3(4): 114-95. (In Persian)
- Song M, Civco DL, Hurd JD. 2005. A competitive pixel-object approach for land cover classification. International Journal of Remote Sensing. 26(22): 4981-4997. Doi.org/10.1080/01431160500213912
- Sonobe R, Yamaya H, Tani X, Wang N, Kobayashi I, Mochizuki K. 2018. Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning, Journal of Applied Remote Sensing. 12(2): 026019. Doi.org/10.1117/1.JRS.12. 026019
- Xu D, Guo X. 2013. A study of soil line simulation from Landsat images in Mixed Grassland. Remote Sensing. 5(9): 4533-4550 Doi.org/10.3390/rs5094533
- Xue H, Xu L, Zhu Q, Guijun Y, Long H, Li H, Xiaodong Y, Zhang j, Yang Y, Xu S, Yang M, Li Y. 2023. Object-oriented crop classification using time series sentinel images from google earth engine. Remote Sensing 15(5): 1353. Doi.org/10.3390/rs 15051353
- Yaghuti H, Masia-Abadi MH, Amiri E, Pazira E. 2017. Using satellite imagery and remote sensing technology to estimate rice yield. Soil and Water Resources Canservation. 7(3):55-69. (In Persian).
- Yan G, Mas, JF, Maathuis BHP, Xiangmin Z, Van Dijk PM. 2006. Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches—a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. International Journal of Remote Sensing, 27(18):4039-4055. Doi.org/10.1080/01431160600702632
- Zhang H, Feng S, Wu D, Zhao C, Liu X, Zhou Y, Wang S, Deng H, Zheng S. 2024. Hyperspectral image classification on large-scale agricultural crops: The Heilongjiang Benchmark Dataset, Validation Procedure, and Baseline Results. Remote Sensing. 16(3): 478. Doi.org/10.3390/rs16030478



Classification of Agricultural Land using a Combined Application of Advanced Remote Sensing Techniques, GIS Modeling, and Field Accuracy Assessments in the Watersheds of the Fars Province

Mojtaba Pakparvar^{*1}, Seyed Masoud Soleimanpour², Mohammad Mehdi Ghasemi³
Mohammad Hadi Jorenush⁴, Sara Koushafar⁵, Hossein Sahraeian⁶

1 and 2- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

3- Assistant Professor, Modern Irrigation Systems Department, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

4- Researcher, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

5 and 6- Masters in Science Agricultural Organization of Fars

Extended Abstract

Introduction and Goal

Given the vastness, variability, and dynamism of agricultural sector information in the country, and especially in Fars Province, updating and refining information related to agricultural activities is of particular importance. Agricultural land use in watersheds are among the most important forms of uses, playing a crucial role in both positive and negative aspects (destruction or protection) of the watershed. Numerous studies have been conducted on the classification of agricultural land using satellite images. Remote sensing is an efficient method for identifying crops to estimate potential harvest and managing agricultural fields. A wide range of image types has been used for variety applications in classification. Some image processing methods are more suitable than others for distinguishing land use and land cover categories, especially when images are classified with high-resolution. Additionally, a review of previous research has shown that, under certain conditions, the accuracy of object-based classification is greater than pixel-based classification in separating selected land use and land cover categories. In this study, to evaluate these two methods over an area as vast as Fars Province, GIS-based and remote sensing models were developed that can be used both for current watershed farm management and for updating information in the coming years.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** pakparvar@gmail.com

Citation: Pakparvar, M, Soleimanpour, S.M., Ghasemi, M.M., Jorenush, M.H., Koushafar, S., Sahraeian, H. 2026. Classification of Agricultural Land using a Combined Application of Advanced Remote Sensing Techniques, GIS Modeling, and Field Accuracy Assessments in the Watersheds of Fars Province. *Watershed Management Research*. 39(1): 126-146.

DOI: 10.22092/WMRJ.2025.369849.1626

Received: 19 July 2025, **Received in revised form:** 04 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

Published online: 21 March 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No.1, Ser. No: 150, Spring 2026, pp. 126-146.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

© Author(s)



The accuracy of the mentioned methods was determined, and the possibility of integrating various stages into a user-friendly model was provided.

Materials and Methods

In this study, all areas under agricultural and horticultural cultivation in the watersheds of Fars Province were examined. Since the dates of maximum greening are different in different climates, in order to study the climatic composition of each county, the climate map of the province was merged with the boundaries of the counties. The climate map in this study was prepared based on the Demarton method and using data from climatological and synoptic stations of Fars Province. To investigate the crop patterns, statistics on the area under cultivation of crops that were planted simultaneously with wheat were also collected for most of the counties where wheat was grown. In this study, based on the goal of distinguishing agricultural land use and measuring the average size of agricultural plots (around 1 hectare in Fars Province), Landsat 8 and Sentinel 2 images, with a ground resolution of 30 and 10 m, respectively, were sufficient. This was because each hectare of land contains 9 and 100 pixels, respectively. In a comprehensive field activity, the map of rainfed agriculture and rainfed orchards was drawn by delineating boundaries on the ground. Then four stages of headquarters and field verification were conducted with the highest spatial accuracy. Using relevant software, first, geometric and then atmospheric corrections were performed on the Sentinel and Landsat images, converting their DN values to reflectance. Next, various vegetation indices were generated and evaluated to select the best one for delineating green cover, which served as the basis for field data collection, including polygons within agricultural land use. Then, supervised classification methods including single-date, multi-temporal, object-based, and pixel-based, were utilized to distinguish irrigated croplands and classify them. Rainfed croplands and orchards were separated through repeated field surveys. Irrigated orchards were extracted from cadastral data of agricultural lands and refined using updated images. Based on the Kappa coefficient and overall accuracy, the results of each category of agricultural land use were compared with the ground truth.

Results and Discussion

The results of atmospheric corrections on the image indicate a significant improvement in image metrics and visual clarity. In two land uses with fully green cover and fallow land uses, the values of all vegetation indices increased after atmospheric correction, while in the barren land and water catchment areas, the values decreased, bringing them closer to the expected range found in reliable sources. The highest accuracy of the green area map obtained from various vegetation indices was related to EVI and mSAVI, while mNDVI and GBNDVI were in the next ranks. The results of object-oriented classification showed the clear superiority of this method in separating agricultural lands from rangeland and barren lands. Furthermore, this method also allowed for the separation of two types of rangeland, weak and strong. The highest accuracy in map production was related to the vegetation indices EVI and mSAVI. The highest Kappa coefficient and overall accuracy were related to the support vector machine classification. The results of object-oriented classification showed the superiority of this method in separating agricultural lands from rangeland and barren lands. Additionally, the method provided the possibility of distinguishing two types of rangeland, weak and strong.

Conclusion and Suggestions

Among the various vegetation indices examined for distinguishing the green cover in agricultural lands, the results of using indices such as EVI and mSAVI, which utilized the green band in their equations, were more suitable. From the perspective of pixel-based algorithms, the best algorithm was SVM, followed by the Decision Tree, which ranked second. Until now, the spatial distribution and actual extent of rainfed agricultural and orchard land uses had not been determined by any traditional method or remote sensing due to its complexity. In this study for the first time, and at least in the Fars Province, it was carried out with satisfactory accuracy based on a combination of remote sensing and field surveys. The scale of these layers, based on

Sentinel base images with a resolution of 10 m, is sufficient and suitable for use in watershed studies up to a detailed-executive scales Based on the findings of this study, it is recommended that the produced layers be used as a model for examining land use changes and illegal land grabbing of natural resources. Additionally, to achieve this goal, it is suggested that the digital boundary of national lands be integrated with the agricultural land use layers, and the boundaries of encroachment be extracted from them.

Keywords: Agricultural landuse classification, classification algorithm, object oriented classifier, Vegetation indices

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This paper is part of the results derived from a specific research project titled "Classification and Preparation of Agricultural Land Use Atlas in Watersheds of Fars Province Using Remote Sensing and GIS," with the code 960346-013-29-50-24, conducted at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. The authors of this paper would like to express their gratitude to the mentioned research institute, the Agricultural Organization of Fars, and the Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center for their support. They also wish to thank and appreciate the efforts of GIS experts from the Agricultural Management Centers of the counties of Fars Province, who collaborated in verifying the field results.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, conduction of the research, Writing - original draft preparation

Author 2: Writing and Manuscript editing

Author 3: Formal analysis and investigation

Author 4: Remote sensing application

Author 5: Office work

Author 6: Field and office work coordination

Watershed Management Research Journal

Founder: Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
ISSN: 2981-2038 Vol. 39, No. 1, Ser. No. 150, Spring 2026

Director in Chief: A. Moradi - Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research,
Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Editor in Chief: A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research
Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Editorial Board :

M.T. Dastorani- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural
Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

S.Y. Eerfanifard- Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of
Geography, Tehran University

A.H. Haghiabi- Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University Ataollah Kavian-
Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural and Natural Resources
University

D. Khalili - Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University,
Shiraz, Iran A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research
Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research
Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural
Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran M. Soufi- Emeritus
Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research,
Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

M. Zare- Professor of Earth Sciences Department, College of Sciences, Shiraz University

Executive Manager: S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed
Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education
Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Language Editor and Editorial Office: M. Enayati - M.Sc. Expert, Soil Conservation and
Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research
and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO),
Shiraz, Iran

Statistics Consultant: L. Jowkar- Emeritus Fellow, Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization
(AREEO), Shiraz, Iran

Page Layout Expert: P. Haghighi - M.Sc. Expert, Soil Conservation and Watershed Management
Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center,
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Address: Office of the Journal of Watershed Management Research, Fars Agricultural and Natural
Resources Research and Education Center, Janbazan Ave. Modarres Blvd. Shiraz, I.R. Iran

Postal code: 71558-63511

POB: 71555-617

Phone: +987137204959

Website: <http://wmrj@areeo.ir>

Email: wmrj@areeo.ac.ir



Watershed Management Research

150

ISSN: 2981-2038

Vol. 39, No. 1, Ser. No. 150, Spring 2026

- **Assessment of the Teleconnection Effects on PM_{2.5} Concentration using Machine Learning Models in the Sistan and Baluchestan Province**

Abolfazl Davari, Rasool Mahdavi Najafabadi, Marzieh Rezai, Ommolbanin Bazrafshan, Ali Reza Shahriary 1

- **Assessment of the Effects of Inoculating Different Concentrations of Cyanobacteria on Organic Matter and Nitrogen Content in the Dried Seasonal Wetlands Bedsof seasonal wetlands**

Saemeh Sadeghi Gajouti, Hossein Kheirfam, Saeed Najafi 26

- **Estimating Groundwater Nitrate Contamination Probability Using Extreme Gradient Boosting**

Mehdi Hashemi, Ali Dastranj 45

- **Analysis of the Impacts of Wind Erosion on the Chemical and Microbial Properties of Soil in the Dryland Ecosystem of Iranshahr, Sistan and Baluchestan Province**

Morteza Saberi, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleho, Rasool Khatibi 64

- **Monitoring Flood-induced Surface Waters Using Different Remote Sensing-based Polarizations and Spectral Water Indices in the Karkheh Watershed**

Zeinab Hazbavi1, Marzieh Ghashamshami 84

- **Application of the Quintuple Helix Approach in Sustainable Management of the Efin Watershed in the South Khorasan**

Reza Chamani, Masoumeh Havasi, Reza Yaghoti, Seyed Hamidreza Sadeghi 108

- **Classification of Agricultural Land using a Combined Application of Advanced Remote Sensing Techniques, GIS Modeling, and Field Accuracy Assessments in the Watersheds of the Fars Province**

Mojtaba Pakparvar, Seyed Masoud Soleimanpour, Mohammad Mehdi Ghasemi, Mohammad Hadi Jorenush, Sara Koushafar, Hossein Sahraeian 126