



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مركز تحقیقات آموزش کشاورزی

تغییرپذیری زمانی-مکانی اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آینده آبخیزهای کشور

- سیدحمیدرضا صادقی^۱، علی نصیری‌خییوی^۲، رضا چمنی^۳، نگین بهنیا^۴، وحید موسوی^۵، حمید نوری^۶،
 پدیده‌السادات صادقی^۷، محمدحسین شوشتری^۸، عبدالواحد خالدی‌درویشیان^۹، مهدی وفاخواه^{۱۰}، حمیدرضا مرادی رکابدارکلانی^{۱۱}
 ۱، ۱۰ و ۱۱- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۲- پژوهشگر مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، اردبیل، ایران
 ۳ و ۴- پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۵ و ۹- دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۶- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
 ۷- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
 ۸- دانش‌آموخته دکتری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

سلامت آبخیز یک واژه گسترده و دربرگیرنده منابع آبی، کیفیت بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، جامعه‌های گیاهی و جانوری، گیاهان بومی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، فرآیندهای بارش-رواناب، ویژگی‌های ریخت‌شناسی است. امنیت آبی و غذایی کشور به‌عنوان اصلی‌ترین اهداف کلان ملی به‌دلیل مدیریت ناصحیح منابع آب و سرزمین، در معرض تهدید است. از سوی دیگر، ارزیابی و مدیریت جامع آبخیزها، در جامعه‌های علمی بین‌المللی به‌عنوان رویکردی مؤثر و کارا برای مدیریت آب، سرزمین و منابع وابسته به آن‌ها و ایجاد تعادل میان نیازهای اقتصادی-اجتماعی جامعه‌های آبخیزنشین و سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. افزون بر این، آگاهی از سلامت آبخیزها یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین بخش‌ها در مدیریت پایدار و جامع آبخیزها به‌شمار می‌آید. از این‌رو، در این پژوهش اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آبخیزهای رده سوم کشور، پیش‌بینی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: sadeghi@modares.ac.ir

استناد: صادقی، س. ح. ر.، نصیری‌خییوی، ع.، چمنی، ر.، بهنیا، ن.، موسوی، و.، نوری، ح.، صادقی، پ.، شوشتری، م. ح.، خالدی‌درویشیان، ع.، وفاخواه، م.، مرادی رکابدارکلانی، ح. ر. ۱۴۰۵. تغییرپذیری زمانی-مکانی اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آینده آبخیزهای کشور. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۲): ۶۲-۴۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.371015.1638

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۴۴ تا ۶۲.

© نویسندگان

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



مواد و روش‌ها

برای دستیابی به هدف پژوهش، بیش از ۵۲۰ معیار مختلف مرتبط با شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ از عامل‌های محیطی، اقلیمی و انسانی برای حدود ۶۴۰ آبخیز شناسایی و جمع‌آوری شد. سپس، به دلیل همبستگی درونی معیارها، از آزمون تورم پراکنش برای کاهش داده‌ها و حذف معیارهای هم‌راستا استفاده شد. در پایان، شاخص‌های نهایی در دو دسته ایستا و پویا تعریف شدند. در ادامه، معیارهای اثرگذار بر وضعیت سلامت و امنیت آبخیزها با دقت مکانی مطلوب زیرآبخیزها و در مدل PSR استخراج و اندازه معیارها برای شرایط کنونی (۲۰۲۳) محاسبه شد. پس از تعیین معیارهای پویا، از روش‌های مختلف شامل وایزی، مدل SARIMA و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شد و معیارهای پویا برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ پیش‌بینی شد. پس از پیش‌بینی معیارهای پویا، دوباره مدل مفهومی PSR برای سال‌های آینده استفاده شد و سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در نرم‌افزار ARC-GIS نسخه ۱۰/۸ پهنه‌بندی شد. برای ارزیابی وضعیت آینده، پیش‌بینی شاخص‌های پویا بر اساس داده‌های زمانی سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ انجام شد و اثر هر شاخص بر سلامت آبخیز تحلیل شد.

نتایج و بحث

تحلیل پهنه‌بندی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان‌دهنده توزیع ناهمگون وضعیت سلامت آبخیزها بود. در مناطق شمالی (گیلان، مازندران) به دلیل بارندگی زیاد و پوشش گیاهی مترکم، سلامت آبخیزها مطلوب (۶۰ تا ۷۰ درصد در طبقات خوب و بسیارخوب) بود. از سوی دیگر، وضعیت مناطق جنوبی (هرمزگان، سیستان و بلوچستان) به دلیل کم‌بارشی و فعالیت‌های نامناسب انسانی، ضعیف‌تر (۴۰ تا ۵۰ درصد در طبقات متوسط تا ضعیف) بود. بر این اساس در سال‌های آینده، سلامت مناطق شمال‌غربی نسبتاً کاهش خواهد یافت، درحالی‌که مناطق شرقی (مانند خراسان رضوی) به دلیل خشک‌سالی و برداشت بی‌رویه آب، به شدت آسیب خواهد دید و سلامت آنها به کمتر از ۲۰ درصد خواهد رسید. در مجموع نتایج نشان داد اثر شاخص پاسخ (حدود ۶۰ درصد) در مقایسه با شاخص‌های فشار و حالت بر سلامت سامانه آبخیزهای مطالعه‌شده بسیار بیشتر بود. از این رو، می‌توان گفت در سال‌های آینده (سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳) اندازه اثرگذاری تغییرات شاخص‌های مدل PSR بر شاخص سلامت آبخیز، قابل توجه نخواهد بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر پایه نتایج این پژوهش، مدیریت آبخیزها در آینده باید بر واکنش‌پذیری سریع استوار باشد زیرا، این مدیریت به‌طور فزاینده‌ای به اقدامات انطباقی مانند احیای پوشش گیاهی و مهار سیلاب وابسته خواهند شد. افزون بر این، اگرچه اثر فشارهای انسانی (حدود ۲۰ درصد) نسبتاً پایدار است، اما نوسانات آن نیازمند مدیریت یکپارچه فعالیت‌های بشری مانند کشاورزی و توسعه شهری است. از سوی دیگر، پایداری نسبی شاخص حالت (حدود ۱۹ درصد) بیانگر لزوم توجه به راهبردهای بلندمدت مانند حفاظت از منابع خاک و آب است. از این رو، ترکیب اقدامات کوتاه‌مدت انعطاف‌پذیر با سیاست‌های پایدار حفاظتی، ابزار مدیریت بهینه آبخیزها در تغییرات محیطی آینده خواهد بود. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش مؤید رویکرد پویا و سازگار در مدیریت آبخیزها است، به شیوه‌ای که ترکیب راهبردهای کوتاه‌مدت واکنشی مبتنی بر پایش (مانند تغییر موقت الگوی کشت در پاسخ به خشک‌سالی) و راهبردهای بلندمدت حفاظتی، بازخوردی برای اصلاح و تقویت راهبردهای بلندمدت و پایدار (مانند احیای بوم‌سازگان و مدیریت جامع منابع آب) و زمینه‌ساز ایجاد یک رویکرد مدیریت سازگار است و سبب هم‌بستگی سامانه‌ای میان این دو سطح شده و یا با بهبود آن ضامن حفظ سلامت آبخیزها در برابر تغییرات آینده است. بر اساس نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که نهادهای حاکمیتی مانند سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و وزارت نیرو، از یافته‌های این پژوهش در قالب آیین‌نامه‌های تخصیص بودجه برای طرح‌های آبخیزداری بهره‌گیرند.

واژگان کلیدی

پیش‌بینی سلامت آبخیز، رویکرد مفهومی PSR، مدل‌سازی پویا، مدیریت جامع آبخیز

مقدمه

سلامت آبخیز یک واژه گسترده و دربرگیرنده منابع آبی، کیفیت بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، جامعه‌های گیاهی و جانوری، گیاهان بومی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، فرآیندهای بارش-رواناب، ویژگی‌های ریخت‌شناسی است (جات و همکاران ۲۰۰۸؛ حزباوی و همکاران ۲۰۱۸؛ ابراهیمی گت‌کش و صادقی ۲۰۲۴). افزون بر این، بوم‌سازگان‌های سالم به‌طور طبیعی پویا و اغلب توانایی حفظ سلامت خود را دارند. با این حال، در بسیاری از بوم‌سازگان‌ها به دلیل تغییر کاربری زمین، افزایش بی‌رویه سطح برداشت آب زیرزمینی و ساخت سدها، وضعیت طبیعی آن‌ها دچار اختلال شده است (ماتو و همکاران ۲۰۱۸؛ مؤمنیان و همکاران ۲۰۱۸). از دیگر ویژگی‌های یک آبخیز سالم، داشتن ساختار و عملکرد لازم برای حفظ سلامت بوم‌سازگان‌های آبی، حاشیه آبی و خشکی‌زی است که دربرگیرنده وضعیت پوشش گیاهی مطلوب برای حمایت از فرآیندهای پویای آب‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی در محدوده تغییرات طبیعی آن‌ها باشد (لیانگ و همکاران ۲۰۱۰).

سلامت و پایداری آبخیز از مفاهیم مهم حفاظت و مدیریت پایدار آبخیزها به‌شمار می‌آید. ضرورت انجام این پژوهش نبودن یک چهارچوب مفهومی جامع و دستورالعمل عملیاتی و شفاف برای ارزیابی جامع آبخیزها، بود (صادقی و همکاران ۲۰۲۰؛ نصیری‌خیاوی و همکاران ۲۰۲۴). از دیگر ویژگی‌های بوم‌سازگان‌ها و زیستگاه‌های جانوری و گیاهی پیوستگی، اندازه مناسب و کیفیت مطلوب آب آن‌هاست. آبخیزها به سامانه‌های اقتصادی-اجتماعی وابسته‌اند، یعنی سلامت و رفاه جامعه‌های انسانی، با سلامت و رفاه آبخیزهایی که در آن زندگی می‌کنند ارتباط متقابل و تنگاتنگ دارد. از این‌رو، تعیین شاخص‌هایی در سلامت آبخیزها با درجه اطمینان قابل‌قبول، ضروری است (صادقی و همکاران ۲۰۱۹؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۰). در ارزیابی سلامت آبخیز، معیارها و شاخص‌های مهمی شامل عامل‌های انسانی، اقلیمی، آب‌شناسی، زمین‌شناسی، خاکی و پوشش گیاهی به‌عنوان معیار

شرایط کنونی سلامت آبخیز معرفی و توسعه داده‌شده است. در این راستا، استفاده جداگانه از هرکدام از این معیارها نمی‌تواند گویای وضعیت سلامت بوم‌سازگان مطالعه‌شده باشد. بر این اساس در این پژوهش ترکیبی از این معیارها مدنظر بود. اما، شیوه ترکیب و تلفیق این معیارها و شاخص‌ها بسته به شرایط پژوهشی متفاوت است و یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی سلامت منابع آب و خاک و بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. از این‌رو، مدل‌های مفهومی مختلفی برای تبیین این معیارها و شاخص‌ها در قالب یک چهارچوب مشخص ارائه شده‌اند (دای و همکاران ۲۰۰۷؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۳ الف و ب؛ حزباوی و صادقی ۲۰۱۶).

در پژوهشی لیانگ و همکاران (۲۰۱۰) امنیت محیط‌زیست پکن را با استفاده از مدل مفهومی فشار، حالت و پاسخ PSR بررسی و گزارش کردند که شاخص امنیت محیط‌زیست پکن از ۰/۵۸۹ در سال ۲۰۰۴ به ۰/۵۴۰ در سال ۲۰۰۸ کاهش یافت. آنها دلیل اصلی کاهش شاخص را اقتصاد پرسرعت در حال توسعه و افزایش فشار جمعیت، زمین، منابع و فشار محیط شهری معرفی کردند. در چین، در راستای ارزیابی نمونه‌ای سلامت آبخیز، وو و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از رویکرد مفهومی PSR وضعیت سلامت چندین بوم‌سازگان آبی در رودهای یانگ‌چنگ، چانگ‌دانگ و تاشان را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که وضعیت سلامت در رودهای یانگ‌چنگ و تاشان در وضعیت سالم و رود چانگ‌دانگ در وضعیت خطر بوم‌شناختی است. این پژوهشگران گزارش کردند فشار اجتماعی-اقتصادی و سلامت آبزیان دو عامل اصلی اثرگذار بر خطر محیط‌زیستی منطقه است. در استان کرمانشاه صادقی و همکاران (۲۰۲۳) اثرپذیری شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مدت یک دوره آماری را بررسی کردند. بر پایه نتایج این پژوهش در دوره‌های زمانی ۱۹۶۱ تا ۱۹۸۰، ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ اندازه تغییرات شاخص‌های سلامت آبخیز با افزایش

مواد و روش‌ها

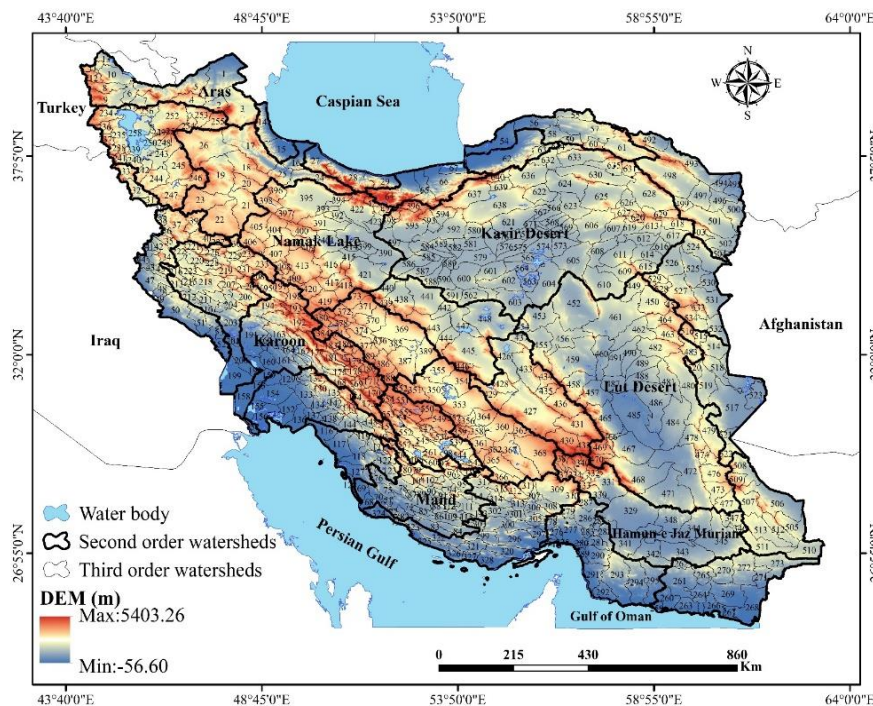
معرفی منطقه مطالعه‌شده

گستره مطالعه‌شده در این پژوهش شامل ۶۴۰ آبخیز رده سوم کل کشور بود که پراکنش جغرافیایی آنها در شکل ۱ ارائه شده است. برای دستیابی به هدف اصلی پژوهش، ابتدا معیارها و شاخص‌های اثرگذار بر وضعیت سلامت و امنیت آبخیزهای اولویت‌دار رده سوم کشور با دقت مکانی مناسب زیرآبخیزها استخراج شد (صادقی و همکاران ۲۰۲۳الف). سپس، تمام متغیرهای مؤثر بر سلامت آبخیز از دیگر منابع موجود و مرتبط (حزبای و صادقی ۲۰۱۶؛ صادقی و همکاران ۲۰۱۹؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۰)، گردآوری شد. همچنین، تمام این داده‌ها برای یک دوره آماری مشابه (۱۳۵۰ تا ۱۴۰۲) آماده‌سازی و همگون شدند. سپس، شاخص‌ها و معیارهای استفاده‌شده در این پژوهش در دو دسته ایستا یا ثابت در کوتاه‌مدت و پویا یا متغیر در کوتاه‌مدت طبقه‌بندی شدند. در مرحله مقدماتی، ۱۷۳ معیار از عامل‌های محیطی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان شاخص فشار و ۳۳۱ معیار از عامل‌های محیطی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان شاخص حالت و ۱۳ معیار از عامل‌های محیطی و انسانی به‌عنوان شاخص پاسخ انتخاب شدند. همچنین، به‌دلیل وجود همبستگی میان برخی متغیرهای استفاده‌شده، از آزمون تورم پراکنش^۱ (VIF) برای کاهش داده‌ها و حذف متغیرهای با هم‌راستایی^۲ استفاده شد و شاخص‌های نهایی فشار، حالت و پاسخ در دو دسته معیارهای ایستا و پویا متناسب با موجودیت و یا بازسازی سری زمانی ارائه شد. در این پژوهش، برای حذف متغیرهای هم‌راستا، آستانه VIF برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد و در مراحل محاسبه‌ای بعدی از ۱۳۷ معیار نهایی استفاده شد.

دوره آماری، متفاوت بود و در دوره‌های کوتاه‌مدت این تغییرات در مقایسه با کل دوره بیشتر بود. بیشترین اندازه تغییرات در ۳۰ سال ابتدایی دوره آماری مشاهده شد و با افزایش مدت دوره آماری تا پایان دوره، اندازه تغییرات این شاخص‌ها کاهش یافت. از این‌رو، نتایج ۳۰ سال پایانی دوره آماری، برای محاسبه شاخص‌های سلامت کنونی، مطلوب و قابل اطمینان بود. در آبخیز صفاورد (جواهرده) رامسر، رجبی و همکاران (۲۰۲۴) اثر تغییر اقلیم و کاربری بر تغییر سلامت آبخیز برای مدت ۱۰ تا ۲۰ سال آینده را بررسی و گزارش کردند اثرات تغییر اقلیم و کاربری بر شاخص سلامت آبخیز در آینده معنی‌دار نخواهد بود. این پژوهشگران بر تغییر از وضعیت ناسالم به شرایط متوسط با گرایش منفی تأکید کردند. همچنین، نتایج کمی‌سازی وضعیت سلامت آبخیز در دوره کنونی و دوره‌های پیش‌بینی ۱۰ و ۲۰ ساله نشان داد که اندازه‌های شاخص سلامت آبخیز مشابه بود، اما تغییرات شاخص سلامت در زیرآبخیزها در ابتدای دوره مطالعه‌شده، از شرایط نسبتاً ناسالم تا سلامت متوسط بود. پژوهش‌های گوناگونی در زمینه مدل‌های مفهومی ارزیابی سلامت در مقیاس آبخیز انجام شده است. در این پژوهش‌ها بیشتر وضعیت سلامت کنونی آبخیزها تحلیل شده است و به ارزیابی آینده سلامت آبخیزها بر اساس تغییرات پویای متغیرهای گوناگون با اثر متفاوت بر وضعیت سلامت کم‌تر توجه شده است. افزون بر این، به‌رغم انجام پژوهش‌های پرشمار در زمینه پیش‌بینی متغیرهای آب‌اقلیمی کاربری زمین، هنوز به‌طور جامع و در سطح ملی اثر این متغیرها بر وضعیت سلامت آبخیز بررسی نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف پیش‌بینی سلامت آبخیز و نیز تعیین اندازه اثرگذاری کمی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر شاخص سلامت آبخیز در آبخیزهای رده سوم کشور به‌عنوان واحدهای کاری مناسب مدیریتی در سطح کلان و بخش‌های اصلی اجرایی، انجام شد.

1-Variance Inflation Factor

2- Collinearity



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیزهای رده سوم مطالعه‌شده در ارزیابی سلامت ایران.

Figure 1- Geographical location of third-order watersheds studied in health assessment, Iran.

شد. افزون بر این، پایگاه‌های داده‌های مرتبط در محیط‌های متنوع شامل Excel نسخه ۲۰۱۳، ARC-Fragstats نسخه ۱۰/۸، TerrSet نسخه ۲۰۲۳، SPSS نسخه ۴/۲، موتور Google Earth و برای پشتیبانی فرآیند تحلیل پژوهش ۲۰۱۶ روند نمای روش‌شناسی پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از تهیه معیارهای ایستا و پویا برای شرایط کنونی، به‌منظور تعیین شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳، شاخص‌های پویا با استفاده از مدل SARIMA^۳ در هر آبخیز پیش‌بینی شد. از مدل SARIMA برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی مهم (دما، بارش و شاخص خشکی در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه) استفاده شد. همچنین، از مدل زنجیره Markov در نرم‌افزار TerrSet برای پیش‌بینی روند تغییرات کاربری/پوشش زمین بهره گرفته شد. بر این اساس،

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش از داده‌ها و اطلاعات موجود در مقیاس آبخیزهای رده سوم کشور فقط در پژوهش پیشین (گزارش خاتمه‌یافته بنیاد با شماره طرح ۴۰۰۵۷۹۴) استفاده شد. همچنین، داده‌های طرح در حال تکمیل بنیاد با شماره ۴۰۲۷۵۰۹ و دیگر پژوهش‌های در حال انجام و برنامه‌ریزی‌شده‌ای است که از سوی نهادهای حاکم بر امور منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، سازمان هواشناسی، پژوهشگاه منابع آب ایران، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز ملی آمار ایران و بنیاد ملی علم ایران، حمایت می‌شود. مدل مفهومی فشار-وضعیت-پاسخ به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، بر مبنای این منابع تنظیم و پیاده‌سازی شد.

در این پژوهش، داده‌های به‌دست‌آمده از اطلاعات و نقشه‌های پایه مرتبط با متغیرها، از جمله داده‌های توسعه‌ای و زیرساختی، شامل داده‌های اقلیمی، آب‌شناختی، خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، کاربری زمین/پوشش زمین، از منابع موجود تهیه و استخراج

3- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average

افزون بر این، برای ارائه نتایج بهینه از دیگر روش‌ها مانند وایازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین از قبیل جنگل تصادفی^۴ (RF)، ماشین بردار پشتیبان^۵ (SVM) و K نزدیک‌ترین همسایه^۶ (KNN) استفاده شد. شایان ذکر است که از زبان برنامه‌نویسی Python در محیط Anaconda3 برای پیاده‌سازی تمام رویکردها شامل SARIMA، وایازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شد (ابوبکار و همکاران ۲۰۱۶؛ یزد و همکاران ۲۰۱۹). همچنین، برای پیش‌بینی معیارهای پویا، ترکیبی از مدل SARIMA و الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. به‌منظور انتخاب معیار نهایی پیش‌بینی، یک فرآیند اعتبارسنجی چندمعیاره به‌کار گرفته شد. عملکرد هر مدل با استفاده از سنج‌های RMSE، MAE و R² برای داده‌های آزمون ارزیابی و تحلیل باقی‌مانده‌ها انجام شد. سرانجام، برای هر متغیر، مدلی به‌عنوان خروجی نهایی انتخاب شد که افزون بر داشتن بهترین معیارهای عملکرد، توجیه نظری قوی‌تری و منطبق‌تری با ماهیت متغیر مطالعه‌شده داشته باشد. برای مثال، برای داده‌های با ساختار زمانی قوی از SARIMA و برای متغیرهای با روابط غیرخطی پیچیده از یادگیری ماشین به‌عنوان مدل نهایی استفاده شد.

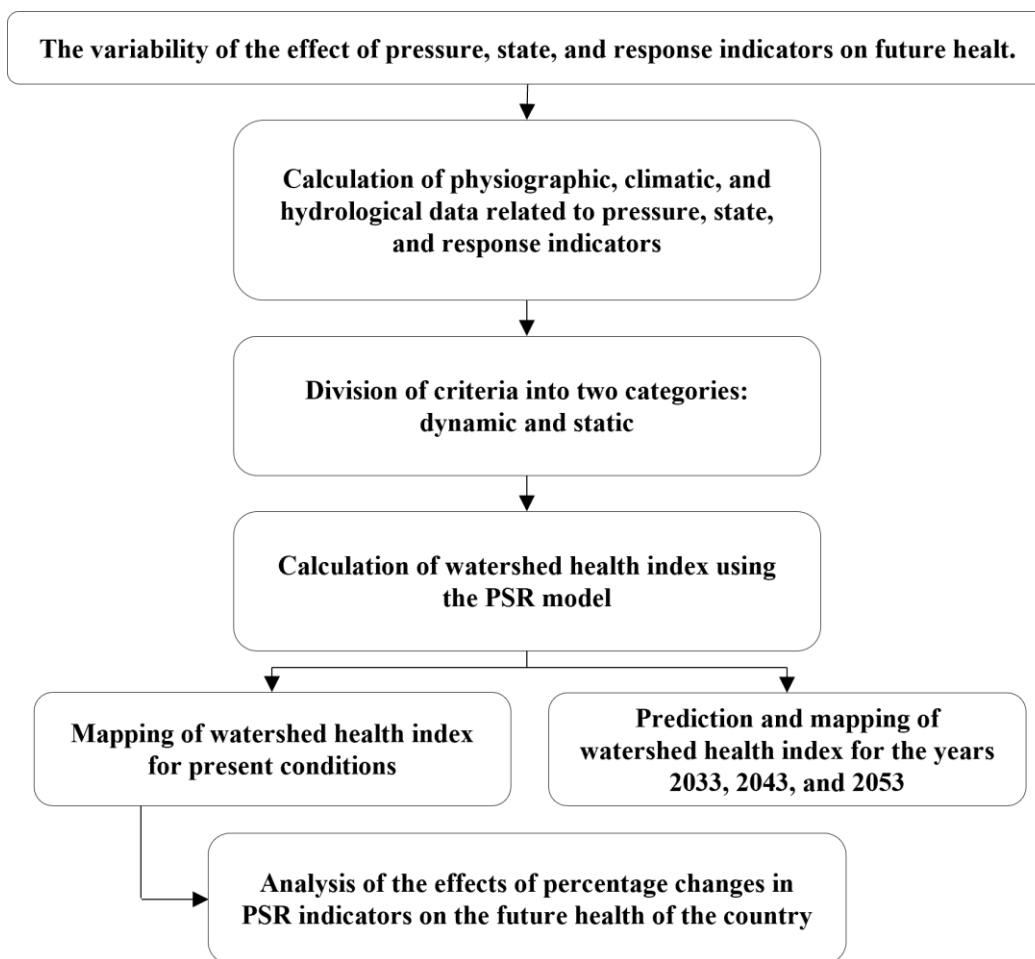
پس از بهنجارسازی متغیرهای نهایی ایستا و پویا، شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر اساس میانگین حسابی اندازه‌های بهنجارشده معیارهای مطالعه‌شده محاسبه شدند. سرانجام، برای تعیین وضعیت نهایی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور، از میانگین هندسی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ برای هر یک از زیرآبخیزها با استفاده از رابطه ۱ استفاده شد (صادقی و همکاران، ۲۰۲۳؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۴؛ حزباوی و همکاران، ۲۰۱۸).

برای مقایسه پهنه‌بندی سلامت آبخیز در زمان‌های مختلف، چهار نقشه برای زمان کنونی و سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ به‌طور جداگانه تهیه شد. همچنین، مداخله نسبی تغییرات معیارهای پویا در شرایط کنونی و یا یک مقطع قبل، انجام شد. سرانجام، پهنه‌بندی جدید برای سال مطالعه‌شده آینده، تهیه شد (چمنی و همکاران ۲۰۲۲).

در این پژوهش ارزیابی نسبی و مقایسه‌ای آبخیزهای مختلف در سطح کشور با یکدیگر انجام شد و سپس روند تغییرات، تحلیل شد. پس از تعیین اندازه شاخص‌های محاسبه‌ای ایستا و پویای رویکرد ارزیابی سلامت بوم‌سازگان، اندازه‌های شاخص سلامت به ۱۰ طبقه تقسیم‌بندی شد. در مجموع، طبقه‌های استفاده‌شده شامل سالم، سالم با گرایش منفی، نسبتاً سالم با گرایش منفی، نسبتاً سالم با گرایش مثبت، متوسط سالم با گرایش منفی، متوسط سالم با گرایش مثبت، نسبتاً ناسالم با گرایش مثبت، نسبتاً ناسالم با گرایش منفی، ناسالم با گرایش مثبت و ناسالم بود (چمنی و همکاران ۲۰۲۳؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۳). سپس، با استفاده از وایازی چندمتغیره اندازه اثر سه شاخص اصلی فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آبخیز در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ پیش‌بینی شد (چمنی و همکاران ۲۰۲۳؛ صادقی و همکاران ۲۰۲۳ الف و ب).

$$\text{میانگین هندسی} = \left[\prod_{n=1}^k X_n \right]^{\frac{1}{k}} \quad (1)$$

- 4- Random Forest
- 5- Support Vector Machine
- 6- K-Nearest Neighbors



شکل ۲- روندنمای پژوهش.

Figure 2- Flowchart of research methodology.

نتایج و بحث

نقشه‌های شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای زمان حال، سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. همچنین، پس از کمی‌سازی و پهنه‌بندی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ، اقدام به پهنه‌بندی شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های آینده شد.

معیارهای ارزیابی عملکرد و صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی معیارهای پویای شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در جدول ۱ و اندازه‌های ضریب Kappa و دقت نهایی پیش‌بینی اثر کاربری زمین در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، پس از کمی‌سازی و پهنه‌بندی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ، شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای شرایط کنونی و سال‌های آینده، پهنه‌بندی شد. بر این اساس،

جدول ۱- آماره‌های ارزیابی پیش‌بینی معیارهای پویای شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور.

Table 1- Evaluation statistics in predicting dynamic criteria of the health index of the third-order watersheds of Iran.

Criteria*	Optimal model	R ²	RMSE	MAE
Mean rainfall erosion	Power Regression	0.75	17.2	16.04
Erosion damage	Linear Regression	0.81	9.08	5.98
Daily groundwater changes	SARIMA	0.78	0.99	0.78
Palmer drought index	SARIMA	0.81	0.97	0.79
Potential evapotranspiration	Random Forest	0.82	0.99	0.81
Population	Linear Regression	0.98	1.24	0.98
Mean water erosion	Linear Regression	0.89	0.91	0.82
Precipitation components	SVM	0.88	0.91	0.79
Temperature components	Random Forest	0.86	0.65	0.55
BSI index	SARIMA	0.83	1.56	0.97
LST index	SARIMA	0.9	0.91	0.72
NDSI index	SARIMA	0.91	0.83	0.69
NDTI index	SVM	0.87	0.98	0.86
NDVI index	Random Forest	0.84	1.22	0.92
NDWI index	Random Forest	0.93	0.78	0.67
Soil salinity index	SVM	0.95	0.66	0.52
TVDI index	KNN	0.96	0.55	0.45
Wind components	SARIMA	0.85	3.21	2.12

*: BSI (شاخص خاک لخت)، LST (دمای سطح زمین)، NDSI (شاخص بهنجار شده تفاضل برف)، NDTI (شاخص بهنجار شده تفاضل خاک‌ورزی)، NDVI (شاخص بهنجار شده تفاضل گیاهی)، NDWI (شاخص بهنجار شده تفاضل آب)، TVDI (شاخص خشکی، دما، پوشش گیاهی).

*: BSI (Bare Soil Index), LST (Land Surface Temperature), NDSI (Normalized Difference Snow Index), NDTI (Normalized Difference Tillage Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), and TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index).

جدول ۲- ضریب Kappa و دقت نهایی پیش‌بینی اثر شاخص کاربری زمین.

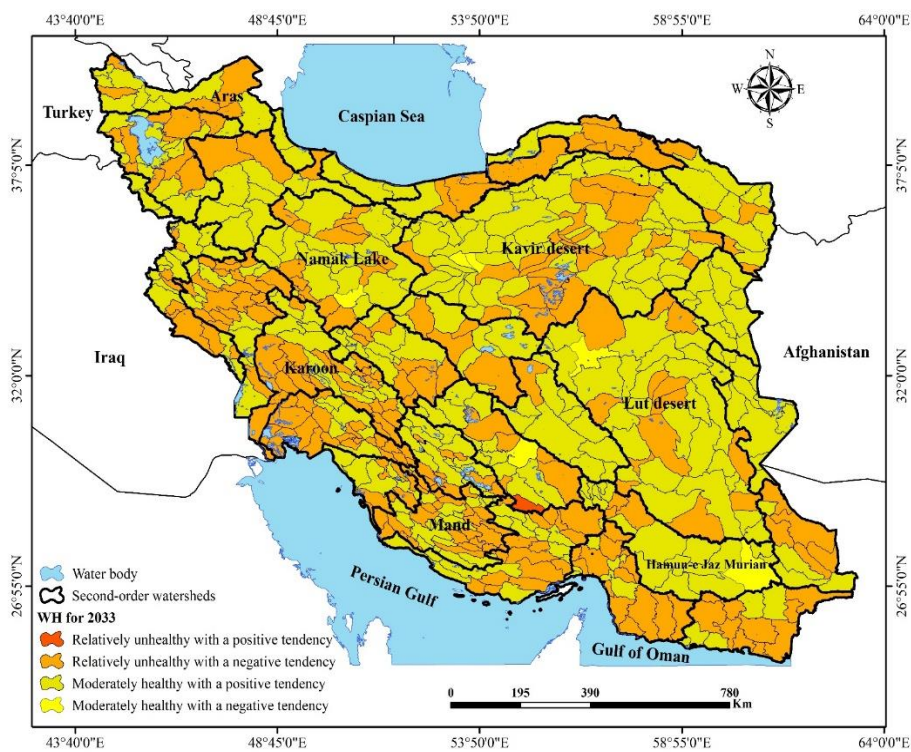
Table 2- Kappa coefficient and final accuracy in land-use impact prediction.

Year	Kappa coefficient	Qualitative interpretation of the Kappa coefficient	Production accuracy
2033	0.94	Excellent agreement	0.96
2043	0.84	Excellent agreement	0.91
2053	0.78	Remarkable agreement	0.87



شکل ۳- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور در شرایط کنونی.

Figure 3- Zoning of health status in the country's third-order watersheds under current conditions.



شکل ۴- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای سال ۲۰۳۳.

Figure 4- Zoning of health status in the country's third-order watersheds for the year 2033.



شکل ۵- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای سال ۲۰۴۳.

Figure 5- Zoning of health status in the country's third-order watersheds for the year 2043.



شکل ۶- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای سال ۲۰۵۳.

Figure 6- Zoning of health status in the country's third-order watersheds for the year 2053.

جدول ۳- اندازه اثر شاخص‌های PSR بر شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور.

Table 3- Contribution of PSR indices to the health index of Iran's third-order watersheds.

PSR Model Indicators	Effect size in target years (%)		
	2033	2043	2053
Pressure	19.49	20.13	19.70
State	19.31	18.37	19.35
Response	61.20	61.50	60.94

ناسالم سلامت آبخیز در این منطقه از ایران بود. از دیدگاه کلان و مبتنی بر نتایج، الگوی ناهمگون و رو به افزایش سلامت آبخیزها، فراتر از یک پراکندگی مکانی صرف است و شوربختانه بیانگر شکل‌گیری یک شکاف بوم‌شناختی نگران‌کننده میان مناطق شمالی و مناطق جنوبی/شرقی کشور است. این شکاف به معنای تفاوت فزاینده در تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها، امنیت آبی و معیشتی جامعه‌های محلی است. تداوم این روند سبب تشدید نابرابری‌های محیط‌زیستی، ایجاد چرخه‌های معیوب فقر و نابودی محیط‌زیست در مناطق محروم، ایجاد فشار برای مهاجرت‌های محیط‌زیستی میان استان‌ها و یا دیگر آشفته‌گی‌های بوم‌شناختی می‌شود.

در این پژوهش نتایج تحلیل نشان داد شاخص سلامت آبخیزها تحت تأثیر ترکیب پیچیده‌ای از عامل‌های متغیر اقلیمی، آب‌شناختی و انسانی است. در شرایط کنونی، ناهمگونی شدید در توزیع سلامت آبخیزها مشاهده شد. وضعیت مناطق شمالی کشور (گیلان و مازندران) با ۴۵ درصد مساحت در طبقه متوسط سالم، نسبتاً مطلوب است. در این راستا، نتایج پژوهش صادقی و همکاران (۲۰۲۳) در آبخیز آسیاب‌رود در شهرستان چالوس نشان داد وضعیت سلامت در این منطقه از شمال ایران در طبقه متوسط است که با یافته‌های این پژوهش، هم‌راستا است. درحالی‌که وضعیت مناطق جنوب‌شرقی با ۷۰ درصد مساحت در طبقه نسبتاً ناسالم، بحرانی‌تری بود. این الگو عمدتاً تحت تأثیر توزیع نابرابر بارش‌ها و فشارهای متفاوت انسانی است. از سوی دیگر، برای سال ۲۰۳۳، پیش‌بینی‌ها بیانگر افزایش ناهمگونی موجود است. مناطق شمالی با حفظ ۶۰ تا ۷۰ درصد مساحت در طبقه‌های خوب، روند نابودی‌شان کندتر است. درحالی‌که روند نابودی مناطق شرقی و جنوبی با بیش از ۵۰ درصد مساحت در طبقه‌های ضعیف، بیشتر

ارزیابی مقایسه‌ای اندازه تغییرات شاخص سلامت برای سال‌های آینده در مقایسه با زمان کنونی در آبخیزهای رده سوم کشور

نتایج تحلیل پهنه‌بندی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان داد وضعیت سلامت به‌شکل ناهمگون توزیع شده است (شکل‌های ۳ تا ۶). در مناطق شمالی (گیلان، مازندران) به دلیل بارندگی زیاد و پوشش گیاهی متراکم، سلامت آبخیزها مطلوب است (۶۰ تا ۷۰ درصد در طبقه‌های خوب و بسیارخوب). از سوی دیگر، مناطق جنوبی (هرمزگان، سیستان و بلوچستان) به دلیل بارش کم و فعالیت‌های نامناسب انسانی، وضعیت ضعیف‌تر است (۴۰ تا ۵۰ درصد در طبقه‌های متوسط تا ضعیف). در سال‌های آینده، سلامت مناطق شمال‌غربی نسبتاً کاهش خواهد یافت، درحالی‌که مناطق شرقی (مانند خراسان‌رضوی) به دلیل خشک‌سالی و برداشت بی‌رویه آب، به شدت آسیب خواهد دید و سلامت آن‌ها به کمتر از ۲۰ درصد خواهد رسید. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پارکس و همکاران (۲۰۱۰) و نصیری‌خیای و همکاران (۲۰۲۴)، هم‌راستا است. نتایج کلی ارزیابی با یافته‌های صادقی و همکاران (۲۰۲۳الف) در تحلیل سلامت آبخیزهای رده دوم کشور هماهنگی دارد. بررسی تطبیقی نقشه‌های سلامت آبخیز در شرایط کنونی و سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان‌دهنده روند نابودی تدریجی و نگران‌کننده آبخیزهای رده سوم در سطح کشور است. در این راستا، در آبخیز شازند در استان مرکزی حزیای و همکاران (۲۰۱۸) کاربرد مدل مفهومی سلامت آبخیز مبتنی بر شاخص‌های فشار-حالت- پاسخ (PSR) در چهار سال ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بر اساس مدل PSR بیانگر وضعیت نسبتاً

سوی دیگر، افزایش ۶۴/۲۰ درصد تراکم جمعیتی در نقاط خاص، فشار بر منابع محلی را تشدید خواهد کرد. صادقی و همکاران (۲۰۲۳) نیز سلامت آبخیز آسیاب‌رود در شهرستان چالوس ارزیابی کردند و دریافتند که از میان عامل‌های بررسی‌شده، بیشترین اثر مربوط به عامل اقلیم و عامل انسانی بود.

بیشترین آسیب‌پذیری مربوط به مناطق شرقی و جنوب‌شرقی کشور با کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصد سلامت آبخیز تا سال ۲۰۵۳ بود که دلیل آن ترکیب عامل‌های کاهش بارش، افزایش دما و فشارهای انسانی است. حتی سلامت مناطق شمالی با منابع آب نسبتاً کافی نیز تا سال ۲۰۵۳، ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش ظرفیت جبران‌پذیری بوم‌سازگان‌ها است. رفتار نامنظم شاخص‌هایی مانند تنوع Shannon نشان‌دهنده وجود آستانه‌های بوم‌شناختی و تغییرات ناگهانی در سامانه‌های آبخیز است. به‌طورکلی، اثر همکنش عامل‌های مختلف (مانند کاهش بارش و افزایش فرسایش) تشدیدکننده است و منجر به کاهش سلامت کلی آبخیزها می‌شود. کاهش تدریجی ظرفیت خودترمیمی آبخیزها از دیگر یافته‌های مهم این پژوهش بود. در این راستا، حتی تغییرات کوچک در فراسنجه‌های محیطی نیز بر سلامت کلی سامانه به‌طور قابل‌توجهی اثرگذار بود. این تغییرات هم بر کارکردهای بوم‌شناختی آبخیزها اثرگذارند و هم خدمات بوم‌سازگانی ارائه‌شده به جامعه‌های محلی را نیز دچار اختلال خواهند کرد. ازجمله این خدمات می‌توان به کاهش کیفیت و کمیت منابع آب، افزایش فرسایش خاک و کاهش تنوع زیستی اشاره کرد. از این‌رو، نتایج این تحلیل بیانگر ضرورت اتخاذ رویکردهای مدیریتی جامع و یکپارچه در سطح آبخیزها است که بتوان هم‌زمان با پوشش ابعاد بوم‌شناختی، اجتماعی و اقتصادی راه‌کارهای مناسب برای هر منطقه را نیز ارائه داد.

تحلیل اثر شاخص‌های PSR بر شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور

اندازه‌های اثر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر شاخص وضعیت سلامت آبخیز در جدول ۳ ارائه‌شده

است. شایان ذکر است برای سال ۲۰۳۳ روند ناپودی مناطق با سلامت مطلوب در مقایسه با زمان کنونی ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج پیش‌بینی برای سال ۲۰۴۳، متفاوت بود. مناطق شمال‌غربی با ۶۰ تا ۷۰ درصد مساحت در طبقه سالم، کانون‌های مثبت به‌شمار می‌آیند، اما در روند ناپودی مناطق مرکزی و جنوبی با ۵۰ تا ۶۰ درصد مساحت در طبقه ناسالم، افزایش چشم‌گیری مشاهده شد. کاهش ۳۰ تا ۳۵ درصد مناطق با سلامت خوب در استان‌های مرکزی در مقایسه با سال ۲۰۳۳ هشداردهنده است.

نتایج پیش‌بینی برای سال ۲۰۵۳، بیانگر تشدید بحران در مقیاس کشوری بود. سلامت مناطق شمالی در مقایسه با سال ۲۰۴۳، ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت. وضعیت مناطق شرقی و جنوبی با کم‌تر از ۲۰ درصد مساحت در طبقه سالم بحرانی و بی‌سابقه است. گسترش طبقه‌های ناسالم به ۶۰ تا ۷۰ درصد در برخی استان‌های مرکزی، بیانگر تشدید روند بیابان‌زایی است. کاهش ۱۱/۹۰ درصد بارش سالانه تا سال ۲۰۵۳ همراه با تغییر الگو به سوی بارش‌های نامنظم، موجب کاهش تغذیه آبخوان‌ها و تشدید تنش آبی خواهد شد. همچنین، افزایش ۲/۸۷ درصد دمای میانگین سالانه تا سال ۲۰۵۳ منجر به افزایش تبخیر-تعرق بالقوه و کاهش رطوبت خاک خواهد شد که بر پوشش گیاهی اثرگذار است. از سوی دیگر، کاهش ۳۴/۵۰ درصد شاخص تفاضل برف تا سال ۲۰۵۳، سبب تغییر زمان و حجم رواناب‌ها خواهد شد و سامانه‌های آب‌شناختی را با چالش مواجه خواهد کرد. نوسانات روزانه افزایش‌یافته منابع آب زیرزمینی نشان‌دهنده تخلیه شدید سفره‌ها است. شوربختانه، افزایش ۱۵/۵۲ درصد میانگین فرسایش خاک تا سال ۲۰۵۳، حاصلخیزی زمین‌ها را تهدید می‌کند. همچنین، کاهش ۳۴/۴۰ درصد مراتع و ۱۵/۹۰ درصد جنگل‌ها، ظرفیت نگهداری آب و خاک را کاهش خواهد داد. از مهم‌ترین نقاط ضعف و اثرگذار بر سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های آینده، افزایش ۸۱/۴۰ درصد زمین‌های بایر (نشان‌دهنده پیش‌روی پدیده بیابان‌زایی) است. از

است. بر پایه نتایج این جدول اثر شاخص پاسخ (حدود ۶۰ درصد) در مقایسه با شاخص‌های فشار و حالت بر سلامت سامانه آبخیزهای مطالعه‌شده در تمام سال‌های بررسی‌شده ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ بسیار بیشتر بود. از سوی دیگر، اندازه اثر شاخص‌های فشار و حالت تقریباً یکسان و در مجموع کمتر از ۴۰ درصد بود.

از این‌رو، می‌توان گفت در سال‌های آینده (سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳) تغییرات اندازه اثر شاخص‌های مدل PSR بر شاخص سلامت آبخیز، قابل توجه نخواهد بود. اندازه اثر شاخص پاسخ (حدود ۶۰ درصد) بیانگر آن است که مدیریت و عکس‌العمل سامانه‌های انسانی و طبیعی در برابر تغییرات، عامل اصلی تعیین‌کننده سلامت آبخیزها هستند. این یافته کاملاً با نتایج بخش پیشین مبنی بر اهمیت فشارهای نامناسب انسانی (مانند برداشت بی‌رویه آب) و کاهش ظرفیت خودترمیمی بر نابودی بوم‌سازگان‌ها، هم‌خوانی دارد و بیانگر آن است که مدیریت نادرست همچنان به‌عنوان مهم‌ترین عامل بحران در آینده تلقی و سبب تشدید اثرات منفی فشارها و تغییرات حالت خواهد شد. اثر شاخص فشار و عامل‌هایی مانند فشارهای مستقیم انسانی و فشارهای اقلیمی (کاهش بارش، افزایش دما) را نمایان می‌سازد.

نتایج پیش‌بینی‌های این پژوهش حتی در یک سناریوی عادی و بدون در نظر گرفتن رخدادهای بی‌سابقه بیانگر بحرانی شدن وضعیت غالب آبخیزهای کشور است و این یک هشدار جدی است.

اگرچه اثر شاخص پاسخ در تبیین تغییرپذیری سلامت در میان آبخیزها بسیار مهم بود، اما این به‌معنای بی‌اثر بودن فشارها نیست، بلکه بیانگر تفاوت در کیفیت مدیریت (پاسخ) است. بر پایه نتایج این پژوهش کاهش سلامت حتی در مناطق با مدیریت نسبتاً مطلوب (شمالی)، نشان‌دهنده شدت و سرعت فشارهای نوظهور، به‌ویژه فشارهای اقلیمی است که در حال پیشی گرفتن از اثربخشی سطح کنونی اقدامات پاسخ است. در این پژوهش چارچوب PSR به‌طور

مستقیم برای پیش‌بینی کمی نقاط تغییر یا شکست طراحی نشده بود، ولی یافته‌های آن به‌عنوان سندی هشداردهنده برای شناسایی مناطق و شاخص‌های با اثر زیاد برای ایجاد تغییرات غیرقابل‌بازگشت است. نتایج این پژوهش نشان داد تاب‌آوری بوم‌شناختی مناطق خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان که هم‌اکنون در طبقه‌های سلامت ضعیف تا خیلی ضعیف هستند، بسیار کم است. در چنین شرایط ناپایدار، تداوم فشارهای مهم شناسایی‌شده در این پژوهش (مانند برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و کاهش بارش) منجر می‌شود این سامانه‌ها آستانه‌های بحرانی را پشت سر گذاشته و به‌طور غیرقابل‌بازگشت (مانند بیابان‌زایی کامل یا نابودی آبخوان) فروپاشیده شوند و یا به‌بیان دیگر رهاسازی یا گسست^۸ رخ دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سلامت آبخیز یک واژه گسترده و دربرگیرنده منابع آبی، کیفیت بوم‌شناختی از جمله پوشش گیاهی، جامعه‌های گیاهی و جانوری، گیاهان بومی، ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی، فرآیندهای بارش-رواناب، ویژگی‌های ریخت‌شناسی است. امنیت آبی و غذایی کشور به‌عنوان اصلی‌ترین اهداف کلان ملی به‌دلیل مدیریت ناصحیح منابع آب و سرزمین، در معرض تهدید است. از سوی دیگر، ارزیابی و مدیریت جامع آبخیزها، در جامعه‌های علمی بین‌المللی به‌عنوان رویکردی مؤثر و کارا برای مدیریت آب، سرزمین و منابع وابسته به آن‌ها و ایجاد تعادل میان نیازهای اقتصادی-اجتماعی جامعه‌های آبخیزنشین و سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید. از این‌رو، در این پژوهش اثرات شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر سلامت آبخیزهای رده سوم کشور پیش‌بینی شد. نتایج تحلیل نشان داد که مدیریت آبخیزها در آینده باید بر واکنش‌پذیری سریع استوار باشد. زیرا، این مدیریت به‌طور فزاینده‌ای به اقدامات انطباقی مانند احیای پوشش گیاهی و مهار سیلاب وابسته خواهند شد. در

7- Tipping Points

8- Release

که نهادهای حاکمیتی مانند سازمان منابع طبیعی و آب‌خیزداری کشور، وزارت نیرو و استانداری‌ها، از یافته‌های این پژوهش در قالب دستورالعمل‌های اجرایی و آیین‌نامه‌های تخصیص بودجه برای طرح‌های آب‌خیزداری بهره‌گیرند. همچنین پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌یادگیری عمیق برای بهبود پیش‌بینی متغیرهای پویا به دلیل توانایی این مدل‌ها در یادگیری روابط پیچیده غیرخطی و وابستگی‌های زمانی بلندمدت استفاده شود. از سوی دیگر، انجام شبیه‌سازی اثر سیاست‌های مدیریتی (مانند تغییر الگوی کشت، احیای جنگل‌ها، طرح تنفس، تعادل رابطه دام و مرتع و مهار فرسایش) بر تغییرپذیری وضعیت سلامت و امنیت بوم‌شناختی آب‌خیزهای کشور در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره "۴۰۳۹۰۲۹" انجام‌شده است.

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 نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سیدحمیدرضا صادقی: نظارت، مفهوم‌سازی، مجری طرح، ویرایش متن، بازبینی نتایج
 علی نصیری‌خیای: مفهوم‌سازی، تهیه پیش‌نویس اولیه، تحلیل‌های آماری و نرم‌افزاری
 رضا چمنی: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری
 نگین بهنیا: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری
 وحید موسوی: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری

راستای شیوه واکنش سریع، پیشنهاد می‌شود اولویت‌بندی هوشمند مناطق مختلف کشور از نقشهٔ بحرانی ارائه‌شده از نتایج این پژوهش بهره‌گرفته شود. افزون بر این، اگرچه اثر فشارهای انسانی (حدود ۲۰ درصد) نسبتاً پایدار است، اما نوسانات آن نیازمند مدیریت یکپارچه فعالیت‌های بشری مانند کشاورزی و توسعه شهری است. از سوی دیگر، پایداری نسبی اثر شاخص حالت، بیانگر لزوم توجه به راهبردهای بلندمدت مانند حفاظت از منابع خاک و آب است. از این‌رو، ترکیب اقدامات کوتاه‌مدت انعطاف‌پذیر با سیاست‌های پایدار حفاظتی، ابزار مدیریت بهینه آب‌خیزها در تغییرات محیطی آینده خواهد بود. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش مؤید رویکرد پویا و سازگار در مدیریت آب‌خیزها است، به شیوه‌ای که می‌توان با ترکیب اقدامات کوتاه‌مدت واکنشی و راهبردهای بلندمدت حفاظتی سلامت آب‌خیزها در برابر تغییرات آینده را تضمین کرد.

در این پژوهش، می‌توان به خطاهای اندازه‌گیری در داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و سنجش‌ازدور، تفاوت در وضوح مکانی و زمانی در داده‌های مختلف دورسنجی و زمینی، فرضیه‌های ساده‌کننده در مدل‌های SARIMA و یادگیری ماشین و چشم‌پوشی احتمالی از پیچیدگی‌های آب‌خیز و نبودن قطعیت در سناریوهای تغییر کاربری زمین (به‌ویژه تحت تأثیر سیاست‌های انسانی) به‌عنوان منابع خطا و نبودن قطعیت‌ها اشاره کرد. بر پایهٔ نتایج این پژوهش مشخص شد که مدل PSR، قابلیت تعیین حدود آستانه برای تاب‌آوری سامانه‌های طبیعی را ندارد. از سوی دیگر، پیش‌بینی‌های این پژوهش مبتنی بر فرض تداوم روندهای کنونی در عامل‌های اقلیمی، محیطی و مدیریتی است. این مدل تنش‌های غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی در مقیاس کلان و مؤثر بر سامانه از جمله تحولات ناگهانی اقتصادی-اجتماعی (مانند تحریم‌های شدید، درگیری‌ها یا مهاجرت‌های گسترده) را در نظر نمی‌گیرد. به این دلیل بایستی پیش‌بینی‌ها به‌عنوان چشم‌اندازی مدیریتی در شرایط عادی و با احتیاط تفسیر و در نظر گرفته شوند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود

پدیده‌السادات صادقی: تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری

حمید نوری، محمدحسین شوشتری، عبدالواحد خالدی درویشان، مهدی وفاخواه و حمیدرضا مرادی رکابدارکلائی: تهیه داده و اطلاعات

فهرست منابع

- Abubakar A, Chiroma H, Zeki A, Uddin M. 2016. Utilising key climate element variability for the prediction of future climate change using a support vector machine model. *International Journal of Global Warming*. 9(2):129–151. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2016.074952>
- Chamani R, Sadeghi SHR, Zare S, Shekohideh H, Mumzaei A, Amini H, Hemmati L, Zarei R. 2023. Flood-oriented watershed health and ecological security conceptual modeling using PSR approach for the Sharghonj Watershed, South Khorasan Province, Iran. *Natural Resource Modeling*. e12385. <https://doi.org/10.1111/nrm.12385>
- Dai Q, Chuobin L, Sha X, Xue L, Zheng Z, Junliang T, Guoliang W. 2007. Health diagnoses of ecosystems subject to a typical erosion environment in Zhifanggou watershed, north-west China. *Frontiers of Forestry in China*. 2:241–250. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11461-007-0040-1>
- 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>
- Hazbavi Z, Jantiene EM, Nunes J, Keesstra S, Sadeghi SHR. 2018. Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*. 87:196–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.054>
- Hazbavi Z, Sadeghi SHR, Gholamalifard M, Davudirad AA. 2020. Watershed health assessment using the pressure--state--response (PSR) framework. *Land Degradation and Development*. 31(1):3–19. <https://doi.org/10.1002/ldr.3420>
- Hazbavi Z, Sadeghi SHR. 2017. Watershed health (Part two): Pressure, state and response conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*. 4(15):25–30. https://www.wmji.ir/article_696852.html?lang=en
- Jat MK, Khare D, Garg PK, Shankar V. 2009. Remote sensing and GIS-based assessment of urbanisation and degradation of watershed health. *Urban Water Journal*. 6(3):251–263. <https://doi.org/10.1080/15730620801971920>
- Khiavi AN, Tavooosi M, Khodamoradi H, Kuriqi A. 2024. Integration of watershed eco-physical health through algorithmic game theory and supervised machine learning. *Groundwater for Sustainable Development*. 101216. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101216>
- Liang P, Liming D, Guijie Y. 2010. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. *Procedia Environmental Sciences*. 2:832–841. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.094>
- Liang P, Liming D, Guijie Y. 2010. Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. *Procedia Environmental Sciences*. 2:832–841. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.094>
- Mao X, Wang X, Chen Q, Yin X. 2014. A PSR-framework-based health assessment of Ulansuhai Lake in China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 23:2093–2102. <https://www.pjoes.com/A-PSR-Framework-Based-Health-Assessment-r-nof-Ulansuhai-Lake-in-China,89399,0,2.html>
- Momenian P, Nazarnezhad H, Miryaghoubzadeh M, Mostafazadeh R. 2018. Assessment and prioritizing of subwatersheds based on watershed health scores (Case study: Ghotorchay, Khoy, West Azerbaijan). *Journal of Watershed Management Research*. 9(17):1–13. <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.1>
- Nasiri Khiavi A, Tavooosi M, Khodamoradi H, Kuriqi A. 2024. Integration of watershed eco-physical health through algorithmic game theory and supervised machine learning. *Groundwater for Sustainable Development*. 101216. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101216>
- Parkes MW, Morrison KE, Bunch MJ, Hallström LK, Neudoerffer RC, Venema HD, Waltner-Toews D. 2010. Towards integrated governance for water, health and social-ecological systems: The watershed governance prism. *Global Environmental Change*. 20(4):

693–704.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.06.001>

Rajabi MR, Vafakhah M, Sadeghi SHR. 2024. Predicting the effect of hydro-climatic and land-use dynamic variables on watershed health status. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(31):44150–44168. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34071-6>

Sadeghi SHR, Chamani R, Silabi MZ, Tavosi M, Katebikord A, Darvishan AK, Moosavi V, Sadeghi PS, Vafakhah M, Rekabdarkolaei HM. 2023a. Watershed health and ecological security zoning throughout Iran. *Science of The Total Environment*. 905:167123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167123>

Sadeghi SHR, Hazbavi Z, Gholamalifard M. 2019. Zonation of health dynamism for the Shazand Watershed based on low and high flow discharges. *Watershed Engineering and Management*. 11(3):589–608.

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120288.1427>

Sadeghi SHR, Zabihi Silabi M, Sarvi Sadrabad H, Riahi M, Modarresi Tabatabaei S. 2023b. Watershed health and ecological security modeling using anthropogenic, hydrologic, and climatic factors. *Natural Resource Modeling*, e12371. <https://doi.org/10.1111/nrm.12371>

Wu D, Chen, T, Zhang L, Ling H, Yang J, Shen C. 2024. Ecological risk assessment under the PSR framework and its application to shallow urban lakes. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(16):23568–23578. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32651-0>

Yazd HRGH, Salehnia N, Kolsoumi S, Hoogenboom G. 2019. Prediction of climate variables by comparing the k-nearest neighbor method and MIROC5 outputs in an arid environment. *Climate Research*. 77(2):99–114. <https://doi.org/10.3354/cr01545>



Spatio-Temporal Variability of the Effect of Pressure, State, and Response Indices on the Future Health of Iran's Watersheds

Seyed Hamidreza Sadeghi¹*, Ali Nasiri Khiavi², Reza Chamani³, Negin Behnia⁴, Vahid Moosavi⁵, Hamid Noori⁶, Padideh Sadat Sadeghi⁷, Mohammad Hossein Shoushtari⁸, Abdulvahed Khaledi Darvishan⁹, Mehdi Vafakhah¹⁰, Hamidreza Moradi Rekabdarkolaei¹¹

- 1, 10, and 11- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 2- Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran
- 3 and 4- Postdoctoral Fellow, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 5 and 9- Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 6- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Malayer University, Iran
- 7- Former M.Sc., Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
- 8- Former Ph.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Watershed health is a broad term that encompasses water resources, ecological quality (including vegetation, plant and animal communities, native plants, geomorphological features, and precipitation-runoff processes), and morphological features. The country's water and food security, as the main national goals, are under threat due to improper management of water and land resources. Comprehensive assessment and management of watersheds are considered effective and efficient approaches by international scientific communities for managing water, land, and their dependent resources, and for balancing the socio-economic needs of watershed communities with the health and sustainability of ecosystems. Also, awareness of watershed health is considered one of the most fundamental aspects of sustainable, comprehensive watershed management. Therefore, in this study, the effects of pressure, state, and response indicators on the health of the country's third-order watersheds were predicted.

Article Type: Research Article

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

Citation: Sadeghi, S.H.R., Nasiri Khiavi, A., Chamani, R., Behnia, N., Moosavi, V., Noori, H., Sadeghi, P.S., Shoushtari, M.H., Khaledi-Darvishan, A., Vafakhah, M., Moradi Rekabdarkolaei, H.R. 2026. Spatio-Temporal Variability of the Effect of Pressure, State, and Response Indices on the Future Health of Iran's Watersheds. *Watershed Management Research*. 39(2): 44-62.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.371015.1638

Received: 13 October 2025, **Received in revised form:** 27 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

Published online: 22 June 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 44-62.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

© Author(s)



Materials and Methods

To achieve the research aim, more than 520 criteria related to pressure, state, and response indicators from environmental, climatic, and human factors were identified and collected for about 640 watersheds. Then, due to correlations among criteria, the variance inflation factor test was used to reduce the data and eliminate criteria with severe multicollinearity. Finally, the indicators were divided into two categories: static and dynamic. Next, the criteria affecting the health and security status of watersheds were extracted with appropriate spatial accuracy at the sub-watershed and PSR model levels, and their values were calculated for the current conditions (2023). After determining the dynamic criteria, various methods, including regression, the SARIMA model, and machine learning algorithms, were used to predict dynamic criteria for 2033, 2043, and 2053. After predicting the dynamic criteria, the PSR conceptual model was applied to future years, and the health zoning of the country's third-order watersheds was conducted in ArcGIS 10.8. To assess future status, dynamic indicators were predicted from time-series data for 2033, 2043, and 2053, and the effects of each indicator on watershed health were analyzed.

Results and Discussion

A spatial zoning analysis of the health of the country's third-order watersheds in 2033, 2043, and 2053 showed that health status was heterogeneous. In the northern regions (Gilan, Mazandaran), high rainfall and dense vegetation cover result in favorable watershed health (60-70% in the good and very good classes). In contrast, the southern regions (Hormozgan and Sistan and Baluchestan) have poorer status (40-50% in the moderate to poor classes) due to low rainfall and inappropriate human activities. Accordingly, in the coming years, the health of northwestern regions is expected to decline somewhat, while eastern regions (such as Khorasan Razavi) will be severely affected by drought and excessive water extraction, with health declining to below 20%. Overall, the results showed that the response index (about 61%) had a greater effect on the health of the study watershed system than the pressure and state indices. Therefore, no significant change was observed in the future study years (2033, 2043, and 2053) in the impact of the PSR model indices on the watershed health index.

Conclusion and Suggestions

The analysis showed that future watershed management should be based on rapid responsiveness, as it will increasingly rely on adaptive measures such as vegetation restoration and flood control. Also, although the impact of human pressures (about 20%) is relatively stable, its fluctuations require integrated management of human activities such as agriculture and urban development. On the other hand, the relative stability of the state index (about 19%) indicates the need to focus on long-term strategies, such as soil and water resource conservation. Therefore, combining flexible short-term measures with sustainable conservation policies will be the key to optimal watershed management in the face of future environmental changes. Overall, the findings of this study support a dynamic and adaptive approach to watershed management, in which the combination of short-term, reactive strategies based on monitoring (such as temporary changes in cropping patterns in response to drought) and long-term conservation strategies provides feedback for modifying and strengthening long-term, sustainable strategies (such as ecosystem restoration and integrated water resources management) and paves the way for the creation of an adaptive management approach, leading to a systemic correlation between these two levels or, by improving it, ensuring the health of watersheds against future changes. According to the study's results, it is recommended that governing bodies, such as the Natural Resources and Watershed Management Organization and the Ministry of Energy of Iran, use these findings to develop regulations for budget allocation to watershed management projects.

Keywords: Dynamic modeling, integrated watershed management, PSR conceptual framework, watershed health prediction

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This work is based upon research funded by the Iran National Science Foundation (INSF) under project No. 4039029.

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

Seyed Hamidreza Sadeghi: Supervision, Conceptualization, Project Investigator, Manuscript Editing, Results Control

Ali Nasiri Khiavi: Conceptualization, Writing - Original Draft Preparation, Statistical and Software Analyses

Reza Chamani: Software and Statistical Analyses

Negin Behnia: Software and Statistical Analyses

Vahid Moosavi: Software and Statistical Analyses

Padideh Sadat Sadeghi: Software and Statistical Analyses

Hamid Noori, Mohammad Hossein Shoushtari, Abdolvahed Khaledi Darvishan, Mehdi Vafakhah, and Hamidreza Moradi Rekabdarkolaei: Data Curation