



پایش تغییرات مکانی و زمانی سلامت آبخیز با استفاده از رویکرد مفهومی بنیه-ساختار-تاب‌آوری (VOR)

مقاله پژوهشی

رقیه دژبانی^۱، زینب حزباوی^۲، رئوف مصطفی‌زاده^۳، اباذر اسمعیلی‌عوری^۴، نازیلا علانی^۵

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون نیروهای محرکه تخریب سرزمین ناشی از نیازهای غیرمنطقی انسانی و تغییر اقلیم، امنیت و سلامت آبخیزهای کشور مورد تهدید جدی قرار گرفته است. بر همین اساس، تحقیق حاضر با هدف تحلیل وضعیت سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی با استفاده از رویکرد بنیه-ساختار-تاب‌آوری (VOR) در سطح ۳۶ زیرآبخیز و طی سه مقطع زمانی (۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰) برنامه‌ریزی شد. بدین منظور، داده‌های پایه مورد نیاز جمع‌آوری شدند.

پس از تعیین مهم‌ترین متغیرها، نسبت به استانداردسازی آن‌ها با هدف هم‌بعد کردن و حذف بزرگی متغیرهای مختلف اقدام شد. سپس متغیرها بر حسب ماهیت طبیعی خود و هدف تحقیق به گروه‌های مختلف دسته‌بندی شدند و پس از میانگین‌هندسی آن‌ها سه شاخص بنیه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) محاسبه شدند. در نهایت، شاخص سلامت آبخیز (WHI) با استفاده از اصول حاکم بر رویکرد مفهومی VOR به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در آبخیز کوزه‌تپراقی شاخص بنیه (V) دارای میانگین و انحراف معیار برابر با $0/88 \pm 0/05$ در سال اول، $0/81 \pm 0/08$ در سال دوم و $0/78 \pm 0/17$ در سال سوم بوده‌اند. شاخص ساختار (O) نیز دارای میانگین و انحراف معیار برابر با $0/05 \pm 0/08$ در سال اول، $0/70 \pm 0/08$ در سال دوم و $0/68 \pm 0/07$ در سال سوم بوده‌اند. همچنین میانگین و انحراف معیار شاخص تاب‌آوری (R) در سال‌های اول تا سوم به‌ترتیب برابر با $0/28 \pm 0/22$ ، $0/30 \pm 0/25$ و $0/29 \pm 0/25$ بوده است. در نهایت، شاخص سلامت آبخیز (WHI) در سال ۱۳۷۹ برابر با مقدار عددی $0/49$ بوده و در سال ۱۳۸۹ روند افزایشی داشته و به $0/85$ رسیده است، اما در سال ۱۴۰۰ به مقدار $0/47$ کاهش یافته است. می‌توان جمع‌بندی نمود که سلامت آبخیز در دوره مورد مطالعه کاهش جزئی داشته است. نتایج تحقیق حاضر در تعیین خط مشی کاربردی و مسأله‌محور مدیریت منابع آب، خاک و پوشش گیاهی کاربرد دارند.

رقیه دژبانی^۱، زینب حزباوی^۲ (✉)، رئوف مصطفی‌زاده^۳، اباذر اسمعیلی‌عوری^۴، نازیلا علانی^۵

- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی
- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی
- استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی
- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

DOI: 10.30495/girs.2022.697684

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: z.hazbavi@uma.ac.ir

پیشینه و هدف

امروزه، امنیت و سلامت آبخیزها به سبب افزایش روزافزون نیازهای انسانی و تغییر اقلیم مورد تهدید قرار گرفته است. با توجه به توسعه سریع جامعه مدرن، فعالیت‌های شدید انسانی و انواع الگوهای برنامه‌ریزی شده و نشده استفاده از زمین، منجر به تغییرات ساختار و عملکرد بوم‌سازگان‌ها شده است. با توجه به این‌که وضعیت سلامت بوم‌سازگان‌های جهانی روند نزولی را نشان می‌دهد. بنابراین، پایش سلامت آن‌ها برای دستیابی به پایداری بیش‌تر لازم است. بر همین اساس، ارائه اطلاعات پایه در خصوص سلامت آبخیز می‌تواند در بخش‌های مختلف تدوین پروژه‌ها، حفاظت منابع و سیاست‌گذاری‌ها کاربرد داشته باشد. لذا، تحقیق حاضر با هدف تحلیل وضعیت سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی با استفاده از رویکرد بینه-ساختار-تاب‌آوری (VOR) در سطح ۳۶ زیرآبخیز طی سه مقطع زمانی (۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰) برنامه‌ریزی شد.

مواد و روش‌ها

آبخیز کوزه‌تپراقی با مساحت ۸۰۵/۷۰ کیلومترمربع در بخش مرکزی استان اردبیل قرار گرفته است. حداقل و حداکثر ارتفاع در این آبخیز به ترتیب برابر با ۱۳۷۸ و ۲۵۴۹ متر نسبت به سطح دریا برآورد شده است. جهت دستیابی به تحقیق حاضر، داده‌های پایه مورد نیاز به منظور تعیین و محاسبه متغیرها و شاخص‌های ارزیابی سلامت در سه مقطع زمانی مختلف شامل سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ جمع‌آوری شدند. پس از تعیین مهم‌ترین متغیرها، نسبت به استانداردهای آن‌ها با هدف هم‌بعد کردن و حذف بزرگی متغیرهای مختلف اقدام شد، سپس متغیرها بر حسب ماهیت طبیعی خود و هدف تحقیق به گروه‌های مختلف دسته‌بندی شدند و پس از میانگین‌هندسی آن‌ها سه شاخص بینه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) به دست آمد. در نهایت، شاخص سلامت آبخیز (WHI) با استفاده از اصول حاکم بر رویکرد مفهومی بینه-ساختار-تاب‌آوری (VOR) به دست آمد. شاخص بینه (V) به‌طور کلی توسط ویژگی‌های بهره‌وری پوشش گیاهی به تصویر کشیده می‌شود. از آن‌جا که شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) ارتباط تنگاتنگی با تولید پوشش گیاهی دارد، بنابراین در این پژوهش نماینده اصلی برای انعکاس سطح بینه (V) آبخیز در نظر گرفته شد. ساختار (O) بوم‌سازگان نشان‌دهنده تنوع و ارتباط‌های بین گونه‌ای یک بوم‌سازگان است. متغیرهای مورد استفاده برای محاسبه شاخص

ساختار (O) آبخیز شامل سنجه‌های سیمای سرزمین (COHESION)، سرایت سیمای سرزمین (CONTAG)، شاخص تنوع شانون (SHDI) و شاخص یکنواختی شانون (SHEI) بوده است. شاخص تاب‌آوری (R) به‌عنوان پتانسیل یک بوم‌سازگان تلقی می‌شود که با بازیابی ساختار و عملکرد اصلی خود به اختلالات خارجی واکنش نشان دهد. برای محاسبه شاخص تاب‌آوری (R)، ضریبی بر حسب نوع خدمات بوم‌شناختی نیز برای هر کاربری زمین تعیین شد. قابل ذکر است که محاسبه NDVI در محیط TerrSet 18.00، سنجه‌های سیمای سرزمین در Fragstats 4.2.1 و پهنه‌بندی مکانی و زمانی شاخص‌های مورد ارزیابی سلامت آبخیز در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.8 صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که در آبخیز کوزه‌تپراقی شاخص بینه (V) به ترتیب دارای میانگین و انحراف معیار برابر با 0.88 ± 0.05 در سال اول، در سال دوم برابر با 0.81 ± 0.08 و در سال سوم برابر با 0.78 ± 0.17 بوده‌اند. شاخص ساختار (O) به ترتیب دارای میانگین و انحراف معیار برابر با 0.057 ± 0.08 در سال اول، در سال دوم برابر با 0.07 ± 0.08 و در سال سوم برابر با 0.07 ± 0.08 بوده‌اند. همچنین شاخص تاب‌آوری (R) به ترتیب دارای میانگین و انحراف معیار برابر با 0.28 ± 0.22 در سال اول، در سال دوم برابر با 0.30 ± 0.25 و در سال سوم برابر با 0.29 ± 0.25 بوده‌اند. در نهایت، شاخص سلامت آبخیز (WHI) در سال ۱۳۷۹ برابر با مقدار عددی ۰/۴۹ بوده و در سال ۱۳۸۹ روند افزایشی داشته و به ۰/۸۵ رسیده است، اما در سال ۱۴۰۰ به مقدار ۰/۴۷ کاهش یافته است. می‌توان جمع‌بندی نمود که سلامت آبخیز در دوره مورد مطالعه کاهش جزئی داشته است. دلایل مختلفی از جمله استفاده غیراصولی از زمین به‌ویژه تولید مرتع به کشاورزی و تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی و هیدرولوژی موجب به‌وجود آمدن وضعیت نامناسب سلامت در آبخیز کوزه‌تپراقی شده‌اند.

نتیجه‌گیری

ارزیابی وضعیت سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی با استفاده از اصول حاکم بر رویکرد مفهومی VOR، نشان‌دهنده وضعیت متوسط شاخص سلامت بوده است. نتایج حاضر، خط مشی کاربردی و مسأله‌محور در راستای تبیین و تدوین طرح‌های مدیریتی و حفاظتی به

واژه‌های کلیدی: تخریب سرزمین، تاب‌آوری آبخیز، شاخص سلامت، مدیریت پایدار.

کارشناسان اجرایی و مدیران زمین ارائه می‌دهند و می‌توانند در مدیریت راهبردی منابع آب، خاک و پوشش گیاهی کاربرد داشته باشند.

لطفاً به این مقاله استناد کنید: طاهرمنش، س.، اصغری بیرامی، ب.، مختارزاده، م. بررسی کارایی شبکه یادگیری عمیق در شناسایی تغییرات اراضی با استفاده از تصاویر دو زمانه لندست-۸. نشریه سنجش اژدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۵(۳): ۱۱۹-۱۴۰.

مقدمه

پویایی منابع پایه آبخیز شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی، پوشش گیاهی و جوامع گیاهی و جانوری از طریق ارزیابی سلامت آبخیز (Watershed Health) قابل دستیابی است (۱۴، ۱۵، ۱۹). افزایش تغییر کاربری و پوشش زمین در اثر توسعه تا حد زیادی موجب افزایش تنش بوم‌شناختی می‌شود (۲۰). تخریب اراضی یکی از پدیده‌های مخرب است که ثبات و امنیت بوم‌سازگان‌ها را در همه مناطق به‌ویژه در مناطق خشک تهدید می‌کند (۸ و ۹). از طرفی، با توجه به رشد روزافزون عوامل مخرب انسانی، حفظ سلامت منابع متنوع بوم‌شناختی ضروری است. وضعیت مناسب زیست گیاهی و جانوری برای حفظ کارکرد فرایندهای هیدرولوژی و ژئومورفولوژی در محدوده تغییرات طبیعی آن‌ها جزء ویژگی‌های یک آبخیز سالم است.

یک آبخیز سالم در برابر آشفتگی‌ها بایستی تاب‌آور باشد و پتانسیل آن با گذشت زمان روبه‌زوال و تحلیل نرود. از طرفی، با توجه به روابط درونی و بیرونی حاکم بر انسان و محیط‌زیست، امروزه سلامت آبخیزها در ارتباط تنگاتنگ با وضعیت سامانه‌های اقتصادی-اجتماعی است (۳۵). در این میان، عوامل اقتصادی و اجتماعی به‌عنوان یک پل ارتباطی عمل می‌کنند و تأثیر سایر عوامل را در مناطقی با سطح متوسط یا پایین سلامت بوم‌سازگان (Ecological Services) پیوند می‌دهند و تضعیف یا تقویت می‌کنند (۲۸). به‌طورکلی می‌توان اظهار کرد که اساس رفاه مادی، یعنی خدمات بوم‌شناختی (Ecological Services) موردنیاز برای بقاء و توسعه جامعه انسانی، توسط بوم‌سازگان‌های طبیعی تأمین می‌شود و پایداری توسعه اجتماعی و انسانی مبتنی بر آبخیزهای سالم است (۲۶، ۳۰).

ارزیابی و پایش سلامت آبخیز یا بوم‌سازگان که دربرگیرنده بخشی از آبخیز بوده، به‌معنی بررسی عملکرد کلی آبخیز یا بوم‌سازگان از ابعاد مختلف پایایی، پایداری ساختار و میزان قدرت تاب‌آوری آن پس از بروز تنش‌ها و آشفتگی‌ها است (۱۶). سلامت بوم‌سازگان با بوم‌شناسی تنش در ارتباط

بوده که براساس بنیه (V)، ساختار (O)، و تاب‌آوری (R) سامانه آن و عدم وجود علائم آشفتگی استوار است (۱). ارزیابی سلامت آبخیز یک روش مهم برای به دست آوردن اطلاعات در مورد شرایط بوم‌سازگان‌های موجود در آن بوده و نقش حیاتی در حفظ و تقویت وضعیت سلامت آن‌ها دارد. علاوه بر این، اطلاعات و دانش مفیدی را برای تصمیم‌گیران توسعه‌های نوین شهری و روستایی فراهم می‌کند (۳۶). باین‌حال، با توجه به توسعه سریع جامعه مدرن، فعالیت‌های شدید انسانی و انواع الگوهای منطقی و غیرمنطقی استفاده از زمین، منجر به تغییرات ساختار و عملکرد بوم‌سازگان‌ها شده است (۲۸). در مدیریت آبخیز، آگاهی از مؤلفه‌ها و هشدارهای تخریب زمین از اساسی‌ترین و مهم‌ترین بخش‌هاست. دانش سلامت آبخیز با استفاده از رویکرد سامانه‌ای به‌دنبال حفظ و نگه‌داری بوم‌سازگان‌ها از طریق حفاظت از آبخیزهای سالم و پیش‌گیری از تغییر و ایجاد اختلال در آن‌هاست. بوم‌سازگان‌های سالم توانایی حفظ سلامت خود را دارند و پویا هستند، درحالی‌که در بسیاری از بوم‌سازگان‌ها به‌دلیل افزایش بی‌رویه سطح برداشت آب‌زیرزمینی و ساخت سدها رژیم طبیعی بوم‌سازگان دچار اختلال شده که این امر به‌نوبه خود باعث آسیب‌پذیری آبخیز می‌شود (۵، ۲۵).

مدیریت صحیح بوم‌سازگان‌ها بدون اطلاع از وضعیت سلامت آن امکان‌پذیر نیست. برای مثال، پوشش گیاهی یکی از اصلی‌ترین جزء آبخیز است و نقش مهمی در سلامت آن دارد. یکی از ویژگی‌هایی که سلامت پوشش گیاهی را تعیین می‌کند، قابلیت تاب‌آوری آن در زمان بروز آشفتگی‌های محیطی است. وقتی در بوم‌سازگان تغییری اتفاق می‌افتد وجود سطح بالایی از تاب‌آوری می‌تواند شرایط موردنیاز برای شروع دوباره و سازمان‌دهی مجدد را فراهم کند (۱۸، ۳۳). برای اندازه‌گیری ثبات بوم‌شناختی و تضمین توسعه پایدار، مفهوم سلامت بوم‌سازگان اهمیت پیدا کرده است. ارزیابی سلامت، به‌عنوان یک نظریه و روش برای اندازه‌گیری بوم‌سازگان/آبخیز، یک نقطه عطف تحقیقاتی در حوزه‌های بوم‌شناسی در مقیاس کلان و مدیریت بوم‌سازگان است (۲۲).

۰/۵۷ و ۰/۴۰، نقش اساسی در سلامت بوم‌سازگان در سطح جهانی دارند. داس و همکاران (۴) ارزیابی سلامت بوم‌سازگان مکانی-زمانی در منطقه کلکته هند را با استفاده از رویکرد VOR انجام دادند. شاخص‌های بنیه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) به ترتیب با استفاده از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، ماتریس چشم‌انداز، استفاده از زمین و داده‌های پوشش زمین (LULC) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که سلامت بوم‌سازگان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ از ۰/۶۲ به ۰/۳۸ کاهش یافته است. هی و همکاران (۱۷) ارزیابی سلامت بوم‌سازگان ۱۸۳ شهرستان در استان Sichuan، چین بر اساس مدل VORS را انجام دادند. در همین راستا، از روش وزن‌دهی آنتروپی، شاخص موران و مدل درجه مانع برای تجزیه و تحلیل سطح سلامت بوم‌سازگان و ویژگی‌های توزیع فضایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که در مجموع ۸۰/۸۷ درصد از شهرستان‌ها در طبقه متوسط و سالم، متمرکز در بخش جنوب شرقی Sichuan، و ۱۹/۱۳ درصد از شهرستان‌ها در طبقه ناسالم قرار داشتند. لی و همکاران (۲۲) سلامت منطقه ساحلی رودخانه Yangtze در استان Jiangsu، چین را بر اساس تغییر کاربری اراضی ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، زمین‌های مسکونی بیش از ۲۰ درصد افزایش یافته و همه انواع زمین‌های مورد مطالعه تا حدی به زمین‌های مسکونی تبدیل شده‌اند.

در داخل کشور نیز ابراهیمی و همکاران (۷)، آبخیز طالقان واقع در استان البرز را از جهت سلامت آبخیز مورد ارزیابی قرار دادند و پیش‌بینی سلامت آن را بر پایه متغیرهای کیفیت آب سطحی و با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که می‌توان مقادیر متغیرهای کیفیت آب سطحی آبخیز طالقان را با بررسی الگوی داده‌ها با دقت قابل قبول پیش‌بینی کرد و در راستای اهداف پژوهش فوق به میزان ۰/۸۷ پیش‌بینی شد تا پایان مهر ۱۳۹۷ وضعیت سلامت آبخیز به مقدار ۲۷ درصد کاهش یابد. صادقی و همکاران (۲۹) سلامت آبخیز شازند یکی از زیرآب‌خیزهای دریاچه نمک را بر اساس دبی‌های مشخصه کم‌آبی و پرآبی با استفاده از رویکرد

ارزیابی و بایش سلامت آبخیز با هدف ارائه خط‌مشی مناسب و نقشه راه به‌منظور تبیین و تدوین راه‌کارهای مدیریتی در جهان و ایران با استفاده از رویکردهای مختلف مورد تأکید قرار گرفته است. برای نمونه، لی و همکاران (۲۳) به ارزیابی سلامت مراتع چمن‌زارهای آلپی Qinghai-Tibetan چین با استفاده از مدل VOR پرداختند. در این مطالعه از سه شاخص شامل زی‌توده، تنوع زیستی و ظرفیت حمل استفاده شد. همچنین، یک روش آنتروپی نیز برای محاسبه وزن هر شاخص و یک چارچوب سه‌بعدی برای تفسیر شاخص‌ها و شاخص سلامت آبخیز (WHI) استفاده شد. شاخص سلامت آبخیز (WHI) در چهار قطعه چمن‌زار در سطوح مختلف تخریب محاسبه شد. نتایج نشان داد که قطعه با کمترین اختلال نسبت به سایر قطعه‌ها نسبتاً سالم بود. علاوه بر این، شاخص‌های سلامت ارائه‌شده در چارچوب VOR سه‌بعدی به شیوه‌ای ثابت در چهار قطعه در امتداد گرادیان‌های اختلال کاهش یافت. یو و خیو (۳۸) ارزیابی سلامت بوم‌سازگان شهری Huainan را بر اساس الگوی سیمای سرزمین و مدل VOR انجام دادند. در این مطالعه، از تصاویر سنجنش از دور در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳ در شهر Huainan به‌عنوان منبع داده استفاده شد و علاوه بر این تجزیه و تحلیل الگوی چشم‌انداز و مدل بنیه-ساختار-تاب‌آوری (VOR) برای تعریف یک شاخص ارزیابی سلامت بوم‌سازگان استفاده شد. نتایج نشان داد که ناهمگنی فضایی در الگوی چشم‌انداز در دوره‌های مختلف زمانی با توجه به شاخص منطقه‌ای سلامت بوم‌سازگان، پس از اندکی افزایش، کاهش سریعی یافته است. ران و همکاران (۲۸) تغییرات زمانی و مکانی سلامت بوم‌سازگان را با استفاده از مدل بنیه-ساختار-تاب‌آوری-خدمات بوم‌سازگان (VORS) برای دوره‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ ارزیابی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مناطقی که دارای سطح بالایی از سلامت بوم‌سازگان هستند، عمدتاً در نزدیکی خط استوا و در خط رگرسیون شمال-جنوب توزیع می‌شوند. آن‌ها هفت منطقه بحرانی با سطح بالایی از سلامت بوم‌سازگان را شناسایی کردند و مشخص کردند که بارش متوسط سالانه و رطوبت خاک به ترتیب با همبستگی

امتیاز سلامت را به خود اختصاص دادند. نتایج بررسی وضعیت سلامت زیرآبخیزها نیز نشان داد که تعداد ۲۴ زیرآبخیز در طبقه ۶۰-۴۰ و در حد متوسط و بقیه (تعداد ۱۳ زیرآبخیز) در طبقه ۸۰-۶۰ و دارای سلامت زیاد هستند. قابل نظام و همکاران (۱۰) به توسعه مدل PSR-Fuzzy برای ارزیابی سلامت آبخیز کوزه تپراقی پرداختند. برای پهنه بندی سلامت آبخیز از شش عملگر AND, OR, SUM, PRODUCT, گامای ۰/۹ و گامای ۰/۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که وضعیت سلامت آبخیز در عملگر PRODUCT، ۶۷، ۲۳، ۹ و ۱ درصد از مساحت کل به ترتیب در طبقات ناسالم، نسبتاً ناسالم، متوسط و نسبتاً سالم قرار گرفتند. برای عملگر گامای ۰/۹، حدود ۴۶، ۱، ۱۷ و ۳۶ درصد آبخیز به ترتیب در طبقات ناسالم، متوسط، نسبتاً سالم و سالم قرار گرفت.

نیکوئی و همکاران (۲۷) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل VOR پرداختند. در این تحقیق هیدرولوژی آبخیز با استفاده از مدل SWAT شبیه سازی و متغیرهای هیدرولوژیکی زیرآبخیزها با رسوب و رواناب ماهانه تعیین شد. سپس، سلامت آبخیز برای دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ محاسبه شد. نتایج نشان داد که سلامت کلی آبخیز در وضعیت متوسط قرار گرفته است، اما با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه ای و افزایش دما، شاخص سلامت در تعداد بیش تری از زیرآبخیزها کاهش می یابد، به گونه ای که برای دوره ۲۰۵۹-۲۰۳۰ در سناریو SSPI-2.6، شاخص سلامت در ۳۴/۶ درصد از مساحت کل آبخیز کاهش داشته است.

بر اساس مرور مطالعات می توان جمع بندی نمود که رویکرد VOR کاربرد بیش تری در تحلیل امنیت و پایداری بوم شناختی دارد و مورد توجه دانشمندان مختلفی قرار گرفته است. اساس و پایه این رویکرد انتخاب متغیرهای کلیدی از شرایط واقعی آبخیز مورد مطالعه است و نتایج به دست آمده از کاربرد این رویکرد به صورت منطقه ای اهمیت زیادی در سیاست گذاری ها و برنامه ریزی های منطقه ای دارد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف کاربرد رویکرد VOR در ارزیابی سلامت آبخیز

مفهومی RRV مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور از شاخص های پایایی (R)، تاب آوری (R) و آسیب پذیری (V) برای چهار مقطع زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷، ۱۳۹۳ استفاده کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که به ترتیب ۵۹، ۵۳، ۶۸، ۶۶، درصد از آبخیز مطالعاتی در مقطع زمانی اول تا چهارم در وضعیت نسبتاً سالم و سالم قرار دارند و برای دبی مشخصه پربابی به ترتیب ۱۹، ۲۲، ۵۴ و ۳۸ درصد آبخیز شازند در مقطع های زمانی مورد نظر در وضعیت نسبتاً سالم و سالم از نظر شاخص سلامت آبخیز (WHI) قرار دارند. مؤمنیان و همکاران (۲۵)، ارزیابی و اولویت بندی زیرآبخیزهای قطورچای واقع در استان آذربایجان غربی را بر اساس درجه سلامت آبخیز انجام دادند. سلامت زیرآبخیزها در پنج بخش وضعیت زیستی (غناي گونه ای)، پیوستگی هیدرولوژیکی (تعداد سازه ها در واحد طول رودخانه)، ژئومورفولوژی (حساسیت خاک به فرسایش و حساسیت پذیری اقلیم)، هیدرولوژی (پوشش گیاهی چندساله و سطوح غیرقابل نفوذ) و کیفیت آب (منابع آلاینده نقطه ای و غیرنقطه ای) ارزیابی شد. نقشه نهایی حاصل از ترکیب کلیه شاخص ها نشان داد که وضعیت سلامت کلیه زیرآبخیزها متوسط است.

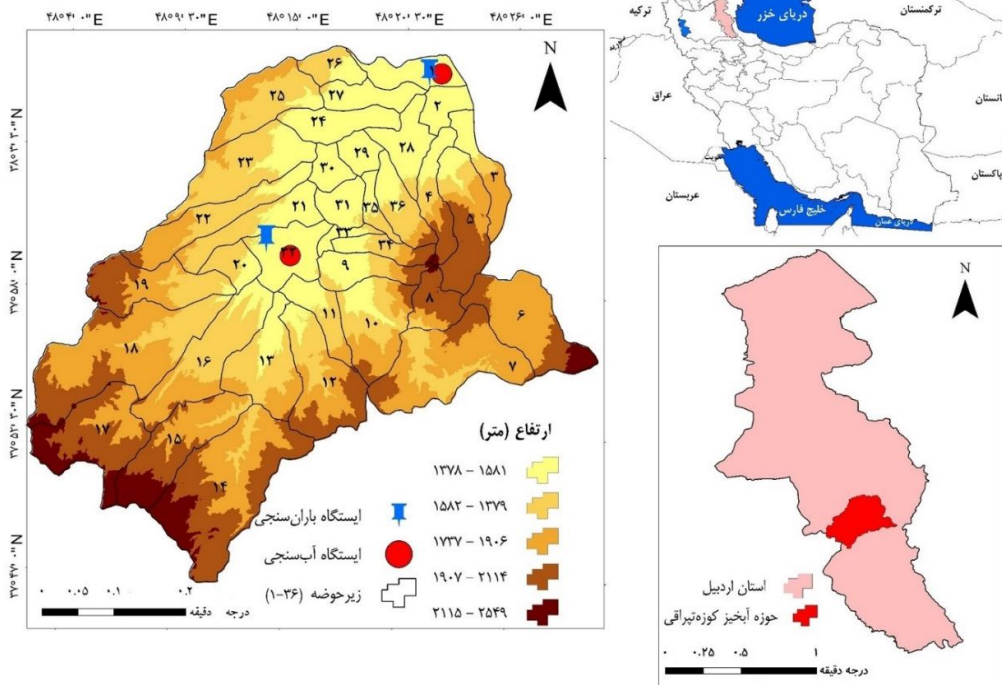
حزبای و همکاران (۱۴) سلامت آبخیز کوزه تپراقی واقع در استان اردبیل را با استفاده از رویکرد PSR ارزیابی نمودند. در این مطالعه از شاخص های فشار-حالت-پاسخ (PSR) استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که وضعیت سلامت در قسمت شرق و جنوب شرقی آبخیز در وضعیت نسبتاً سالم و متوسط قرار گرفته است و وضعیت بهتری نسبت به سلامت آبخیز در قسمت های غربی و شمالی دارد. شاهدی و همکاران (۳۳) به بررسی سلامت آبخیز تالار با استفاده از چارچوب ارزیابی سلامت آبخیز (WHAF) پرداختند. در این تحقیق، با تقسیم بندی آبخیز تالار به ۳۷ زیرآبخیز در محیط GIS، شاخص سلامت در پنج بخش ژئومورفولوژی، کیفیت آب، هیدرولوژی، وضعیت زیستی و پیوستگی هیدرولوژیکی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که زیرآبخیز ۳۴ با دارا بودن امتیاز ۷۱/۶۶ حداکثر امتیاز سلامت و زیرآبخیز ۲۶ با امتیاز ۴۰/۷۹ حداقل

منطقه مورد مطالعه

آبخیز کوزه‌تپراقی دارای مساحت ۸۰۵/۷۰ کیلومترمربع و محیط ۱۴۸/۹۸ کیلومتر است. حداقل و حداکثر ارتفاع آبخیز به ترتیب برابر با ۱۳۷۸ و ۲۵۴۹ متر نسبت به سطح دریاست (شکل ۱). هم‌چنین، به ترتیب مجموع طول آبراهه و شیب متوسط آبخیز کوزه‌تپراقی برابر با ۱۰۵۴/۱۱ کیلومتر و ۱۴/۵۹ درصد برآورد شده است (۲؛ ۱۴). از کل مساحت آبخیز، کاربری‌های مرتع، باغ، زراعت دیم، پهنه آبی، زراعت آبی و مسکونی به ترتیب ۳۹/۲۹، ۳/۰۰، ۴۲/۶۶، ۰/۲۱، ۱۴/۵۸ و ۰/۲۶ درصد از مساحت را تشکیل داده‌اند. طبق گزارش‌های انجام شده از این آبخیز حداکثر، حداقل و متوسط بارش به ترتیب برابر با ۳۹۵/۷۰، ۳۸/۲۴ و ۳۴۹/۰۳ میلی‌متر است (۲؛ ۱۰). آبخیز کوزه‌تپراقی واقع در استان اردبیل، به دلیل شرایط منطقه از جمله تنوع در نوع کاربری و غنای گونه‌ها و هم‌چنین در دسترس بودن داده‌ها، برای انجام این مطالعه انتخاب شد.

کوزه‌تپراقی واقع در استان اردبیل برای سه دوره زمانی مختلف انجام شده است، تا با تحلیل متغیرهای محیطی و بوم‌شناختی، بنیه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) این آبخیز را بررسی و راهکارهای مدیریتی مناسبی برای بهبود سلامت و پایداری آن ارائه دهد. اهمیت این کار در آن است که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان یک الگو برای سایر آبخیزها در منطقه و کشور مورد استفاده قرار گیرد و اطلاعات ارزشمندی در اختیار تصمیم‌گیران و مدیران منطقه‌ای قرار دهد که می‌تواند به بهبود سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در جهت حفظ و بهبود سلامت بوم‌سازگان‌ها کمک کند. هم‌چنین، این تحقیق با ارائه تحلیل‌های دقیق و کاربردی، در راستای توسعه دانش بوم‌شناختی و ارتقاء روش‌های مدیریتی و حفاظتی در سطح ملی قابلیت کاربرد دارد.

مواد و روش‌ها



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

مفهوم‌سازی رویکرد VOR

VOR رویکرد کلاسیک ارزیابی سلامت بوم‌سازگان است که بر اساس سه شاخص بنیه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) استوار است که موجب ارائه یک شاخص چندعملکردی به نام شاخص سلامت آبخیز (WHI) می‌شود (۲۶):

بنیه می‌تواند از طریق سوخت و ساز، تولید و حاصل‌خیزی خاک اندازه‌گیری شود. بنیه (V) بوم‌سازگان به‌طور کلی توسط شاخص‌های بهره‌وری پوشش گیاهی به تصویر کشیده می‌شود. از آن‌جا که شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) ارتباط تنگاتنگی با تولید پوشش گیاهی دارد، به‌طور گسترده‌ای نشان‌دهنده سطح بنیه (V) است (۱۶، ۲۲). از آن‌جا که شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) ارتباط تنگاتنگی با تولید پوشش گیاهی دارد، به‌طور گسترده‌ای برای محاسبه شاخص بنیه (V) استفاده می‌شود. NDVI یکی از شاخص‌های کاربردی در جهان است که در مسائل مختلف بوم‌شناختی به‌کار می‌رود. در حقیقت می‌توان گفت که NDVI شاخصی است که در تحلیل و اندازه‌گیری‌های سنجش از دور برای ارزیابی یک منطقه از لحاظ وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی کاربرد مهمی دارد. کریگلر و همکاران (۲۱) برای اولین بار مفهوم این شاخص را بیان کردند. شاخص NDVI به تغییر در مقدار کلروفیل، زی‌توده، و تنش میزان آبی که در تاج پوشش گیاهی وجود دارد واکنش نشان می‌دهد (۳، ۱۲).

NDVI می‌تواند انواع مختلف کاربری اراضی را با استفاده از مقادیر آستانه استخراج کند. این مقادیر آستانه می‌تواند با توجه به تفاوت در محیط فیزیکی متفاوت باشند (۳). در پژوهش حاضر جهت تهیه نقشه NDVI، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ با کیفیت مناسب برای سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ مربوط به منطقه مورد مطالعه انتخاب شد و سپس به محیط نرم‌افزار TerrSet فراخوانده شدند و اقدام به تهیه نقشه خروجی به صورت رابطه ۱ شد (۶).

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad [1]$$

که در آن NIR و R به ترتیب باند مادون قرمز نزدیک و باند

مادون قرمز است.

ساختار (O) بوم‌سازگان نشان‌دهنده تنوع گونه‌ای و ارتباط‌های بین گونه‌ای یک بوم‌سازگان است (۱۶) و به مفهوم پایداری بوم‌سازگان‌ها اشاره دارد. یکی از مهم‌ترین عوامل در مدیریت فرآیندهای بوم‌شناختی در مقیاس سیمای سرزمین، الگوی فضایی بوم‌سازگان است (۱۳). متغیرهای مورد استفاده برای محاسبه شاخص ساختار (O) آبخیز شامل سنجه‌های الگوی چشم‌انداز بوده که منعکس‌کننده ثبات آبخیز نیز هستند. این سنجه‌ها شامل شاخص‌های پیوستگی سیمای سرزمین (COHESION)، سرایت سیمای سرزمین (CONTAG)، تنوع شانون (SHDI) و یکنواختی شانون (SHEI) است (۶). سنجه COHESION به‌صورت رابطه (۲) ارتباط فیزیکی لکه‌های مربوط به یک کاربری را بیان می‌کند. با افزایش پیوستگی لکه‌ها مقدار این شاخص نیز افزایش می‌یابد (۲).

$$COHESION = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right]^{-1} \cdot (100) \quad [2]$$

که در آن p_{ij} محیط لکه ij به‌صورت تعداد سطوح سلولی، a_{ij} مساحت لکه ij به‌صورت تعداد سلول‌ها و Z تعداد کل سلول‌ها در سیمای سرزمین است.

سنجه CONTAG (رابطه ۳) به‌صورت درصد بیان می‌شود و چگونگی توزیع پوشش اراضی در سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. آیا لکه‌های کاربری و پوشش اراضی به‌صورت بزرگ و مجتمع و در کنار هم گرد آمده‌اند؟ یا به‌صورت لکه‌های کوچک و پراکنده توزیع یافته‌اند؟ با مقایسه این سنجه در سال‌های مختلف می‌توان نحوه تغییرات پراکنش پوشش‌های اراضی را به‌دست آورد (۲۳).

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \circ \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right] \circ \left[\ln \left(P_i \circ \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \quad [3]$$

رابطه (۶) تعریف شد:

$$O = \frac{\sum Xi}{n} \quad [6]$$

که در آن O به شاخص ساختار اشاره دارد، x متغیرهای مورد استفاده آن و n به معنی تعداد متغیرهاست.

تاب‌آوری به توانایی بوم‌سازگان برای بقاء در حالت کنونی خود و برگشت به حالت قبل از تنش مثل تغییر اقلیم طبیعی، آتش‌سوزی سریع و فعالیت‌های انسانی آتش گفته می‌شود (۱۶). به‌طور کلی، تاب‌آوری (R) به‌عنوان پتانسیل یک بوم‌سازگان تلقی می‌شود که با بازیابی ساختار و عملکرد اصلی خود به اختلالات خارجی واکنش نشان می‌دهد. هر نوع زمینی، بسته به ماهیت آن، قابلیت متفاوتی برای بازیابی دارد. بوم‌سازگان با بازیابی ساختار و عملکرد اصلی خود به اختلالات خارجی واکنش نشان می‌دهد. بر همین اساس، نقش کلیدی در مفهوم تاب‌آوری بوم‌سازگان به کاربری زمین نسبت داده شود (۱۳، ۲۲). برای محاسبه شاخص تاب‌آوری (R) نیز با استفاده از نقشه کاربری زمین، دو ضریب تاب‌آوری و مقاومت بر حسب نوع خدمات هر کاربری تعیین شده و از آن به‌صورت رابطه (۷) استفاده شد.

$$R = 0.3 \times \sum Pi * Resil + 0.7 * \sum Pi * Resist \quad [7]$$

که در آن Pi نسبت مساحت هر نوع کاربری زمین در آبخیز است. Resist، ضریب تاب‌آوری و Resil ضریب مقاومت مربوط به هر نوع سیمای سرزمین است که مقدار ضریب آن‌ها طبق جدول (۱) استفاده شد.

که در آن Pi نسبت سیمای سرزمین است که توسط هر نوع لکه (کلاس) i اشغال شده، g_{ik} تعداد مرزهای مشترک (اتصالات) بین پیکسل‌های نوع لکه (کلاس) i و k بر اساس روش تکرار شمارش و m تعداد انواع لکه‌ها (کلاس‌ها) موجود در سیمای سرزمین است.

شاخص تنوع شانون (۳۲) (رابطه ۴) از مهم‌ترین سنجش‌های تنوع برای مطالعه تنوع اجزای تشکیل‌دهنده سیمای سرزمین است. شاخص شانون، تنوع را در هر لکه به‌طور نسبی محاسبه می‌کند. اگر در سیمای سرزمین فقط یک لکه وجود داشته باشد، این شاخص‌ها برابر با صفر هستند و زمانی که تعداد لکه افزایش می‌یابد و توزیع منطقه متناسب با انواع لکه بیش‌تر شود، مقدار آن یک است (۲۳).

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i) \quad [4]$$

که در آن Pi نسبت اشغال شده توسط نوع لکه (کلاس) i در سیمای سرزمین است.

شاخص SHEI (رابطه ۵) به گونه‌ای بیان می‌شود که توزیع یکنواخت منطقه بین انواع لکه‌ها منجر به حداکثر SHEI می‌شود.

$$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i)}{\ln m} \quad [5]$$

که در آن Pi نسبت سیمای سرزمین است که توسط هر نوع لکه (کلاس) i اشغال شده و m تعداد انواع لکه‌های (کلاس‌های) موجود در سیمای سرزمین می‌باشد. بر همین اساس، شاخص ساختار (O) آبخیز به‌صورت

جدول ۱. ضریب‌های تاب‌آوری و مقاومت انواع کاربری‌ها (۳۴، ۳۸)

Table 1. Resilience and resistance coefficients of different land uses (28, 32)

نوع کاربری	زراعت	مناطق مسکونی	بدنه آبی	جنگل	مرتع
ضریب resil	۰/۴	۰/۲	۰/۷	۰/۵	۰/۶
ضریب resist	۰/۵	۰/۳	۰/۸	۱	۰/۸

۰/۲۵ و برای سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ به ترتیب برابر ۰/۱۴ و ۰/۱۶ به دست آمد. همچنین، تغییرات میانگین NDVI در سال ۱۳۷۹ از ۰/۲۷ با انحراف معیار ۰/۰۵ (زیرآب‌خیز ۱۵) تا ۰/۲۲ (زیرآب‌خیزهای ۲۱، ۳۴، ۳۵ و ۳۶) متغیر بوده است. حداکثر مقدار NDVI برای سال ۱۳۸۹ برابر ۰/۱۶ با انحراف معیار ۰/۰۵ (زیرآب‌خیز ۱۵) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۱۱ (زیرآب‌خیزهای ۲۱، ۳۴، ۳۵ و ۳۶) به دست آمد. هم‌چنین نتایج به دست آمده در سال ۱۴۰۰ نشان داد که حداکثر مقدار NDVI برابر ۰/۲۲ (زیرآب‌خیز ۱۷) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۲ (زیرآب‌خیز ۱۴) به دست آمد.

در مجموع پس از استانداردسازی متغیرها و تلفیق آن‌ها، شاخص بینه (V) برای کل آبخیز در سال ۱۳۷۹ برابر ۱، در سال ۱۳۸۹ برابر ۰/۵۶ و در سال ۱۴۰۰ برابر ۰/۶۴ به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده در سطح زیرآب‌خیز، در سال ۱۳۷۹ حداکثر مقدار شاخص بینه (V) برابر ۱ (زیرآب‌خیز ۱۵) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۸۲ (زیرآب‌خیزهای ۳۴ و ۳۶) بوده است. حداکثر مقدار این شاخص در سال ۱۳۸۹ برابر ۱ (زیرآب‌خیز ۱۵) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۷۰ (زیرآب‌خیز ۲۱) بوده است. هم‌چنین در سال ۱۴۰۰ حداکثر و حداقل مقدار شاخص بینه (V) برابر ۱ (زیرآب‌خیز ۳۲) و ۰/۳۵ (زیرآب‌خیز ۲۳) برآورد شد (شکل ۴).

قابل ذکر است که پس از محاسبه تمام متغیرهای مورد استفاده در محاسبه هر کدام از شاخص‌های بینه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R)، به منظور حذف بزرگی متغیرهای محاسبه شده و با توجه به برخورداری متغیرهای مطالعاتی از مفاهیم و اثرات مثبت و منفی بر سلامت آبخیز، متغیرهای مورد مطالعه در بازه عددی بین صفر و یک استانداردسازی شدند (رابطه ۸).

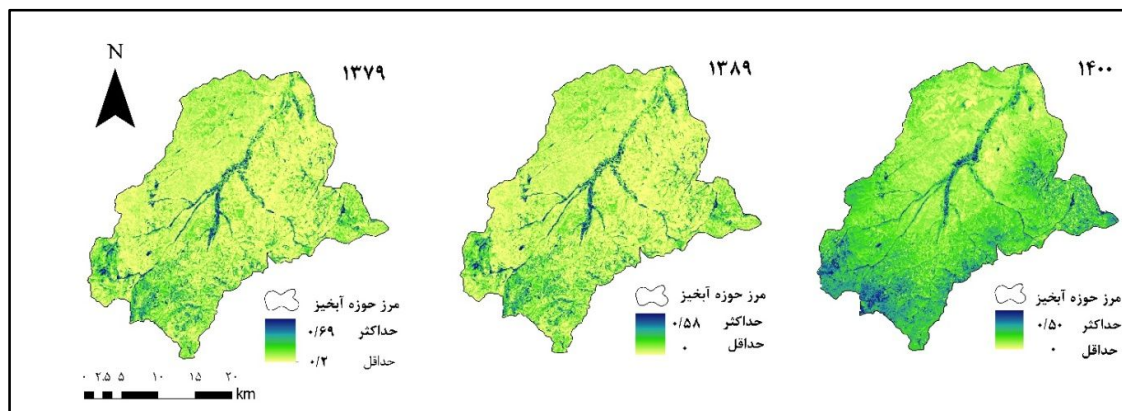
$$A_i = X_i / \max X_i \quad [8]$$

A_i ، مقدار بدون بعد از شاخص X_i ، مقدار واقعی شاخص i -th و $\max X_i$ نشان‌دهنده حداکثر مقدار شاخص i -th است. پس از استانداردسازی با استفاده از میانگین هندسی به برآورد هر شاخص پرداخته شد. در ادامه با میانگین شاخص‌های VOR شاخص سلامت آبخیز (WHI) ارزیابی شد. جهت پهنه‌بندی و نیز تهیه نقشه‌های تغییرات مکانی-زمانی شاخص‌های مورد ارزیابی از محیط نرم‌افزار ArcMap 10.8 استفاده شد.

نتایج

شاخص بینه (V)

نتایج تغییرات NDVI، در شکل (۲) و جدول (۲)، به عنوان متغیر اصلی مورد استفاده برای محاسبه بینه (V)، برای سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ در سطح کل آبخیز کوزه‌تپراقی ارائه شده است. مقادیر متوسط متغیر NDVI برای سال ۱۳۷۹ برابر



شکل ۲. تغییرات مکانی-زمانی NDVI در آبخیز کوزه‌تپراقی

Fig 2. Spatio-temporal changes of NDVI in the Koozeh Topraghi watershed

جدول ۲. متوسط NDVI در سطح زیرآبخیز و سال‌های مورد بررسی

Table 2. The mean NDVI at sub-watershed level and study years

1400	1389	1379	زیرآبخیز	1400	1389	1379	زیرآبخیز
0/16	0/12	0/23	19	0/13	0/13	0/24	1
0/12	0/13	0/24	20	0/16	0/14	0/25	2
0/11	0/12	0/23	21	0/12	0/12	0/23	3
0/14	0/12	0/23	22	0/15	0/13	0/24	4
0/12	0/13	0/24	23	0/16	0/12	0/23	5
0/11	0/13	0/24	24	0/19	0/15	0/26	6
0/13	0/13	0/24	25	0/18	0/13	0/24	7
0/12	0/13	0/24	26	0/17	0/12	0/23	8
0/11	0/13	0/24	27	0/13	0/12	0/23	9
0/13	0/13	0/24	28	0/16	0/12	0/23	10
0/13	0/13	0/24	29	0/14	0/13	0/24	11
0/11	0/12	0/23	30	0/18	0/13	0/24	12
0/15	0/14	0/25	31	0/16	0/15	0/26	13
0/16	0/15	0/26	32	0/2	0/15	0/26	14
0/15	0/15	0/26	33	0/21	0/16	0/27	15
0/13	0/12	0/23	34	0/15	0/14	0/25	16
0/11	0/12	0/23	35	0/22	0/15	0/26	17
0/12	0/12	0/23	36	0/18	0/14	0/25	18

شاخص ساختار (O)

در راستای نتایج به‌دست آمده (شکل ۳)، میانگین شاخص پیوستگی (COHESION) در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ به‌ترتیب برابر با ۹۸/۶۷، ۹۸/۴۸ و ۹۸/۶۳ به‌دست آمد. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده در سطح زیرآبخیزها نشان می‌دهد که در سال ۱۳۷۹ حداکثر مقدار میانگین شاخص پیوستگی برابر ۹۰/۸۰ (زیرآبخیز ۲۶) و حداقل مقدار آن برابر ۸۵/۴۱ (زیرآبخیز ۳۳) بوده است. در سال ۱۳۸۹ نیز مقدار شاخص پیوستگی بین ۹۹/۸۱ (زیرآبخیز ۲۶) و ۸۰/۸۸ (زیرآبخیز ۶) متغیر بوده است. هم‌چنین، حداکثر شاخص پیوستگی در سال ۱۴۰۰ برابر ۹۹/۸۱ (زیرآبخیز ۲۶) و حداقل مقدار آن برابر ۸۷/۷۴ (زیرآبخیز ۶) به‌دست آمد. شاخص پیوستگی لکه‌ها (COHESION) ارتباط فیزیکی لکه‌ها را بیان می‌کند. با افزایش پیوستگی لکه‌ها مقدار این شاخص نیز افزایش یافت (شکل ۳).

شاخص سرایت سیمای سرزمین (CONTAG) نیز در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ برای کل آبخیز به‌ترتیب برابر ۵۱/۱، ۵۲/۱۳ و ۵۰/۳۱ محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده در سطح زیرآبخیزها نشان داد که حداکثر مقدار شاخص سرایت سیمای سرزمین در سال ۱۳۷۹ برابر ۹۷/۱۳ (زیرآبخیز ۲۶) و حداقل

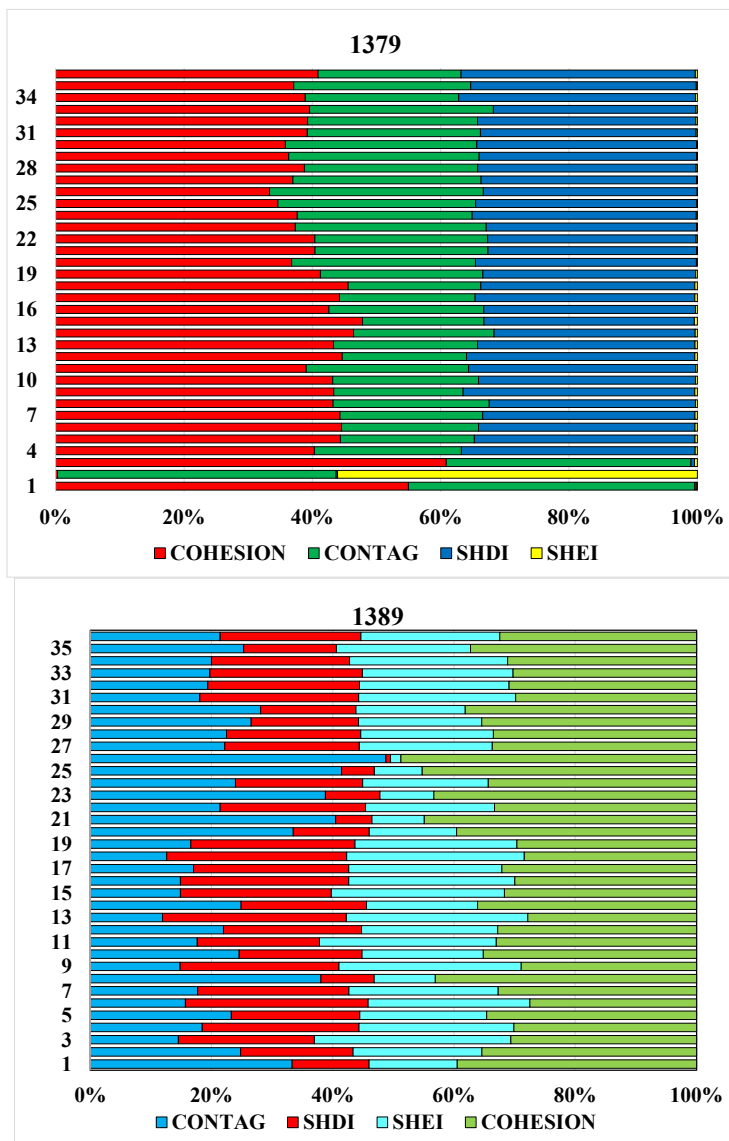
مقدار آن برابر ۳۳/۱۵ (زیرآبخیز ۱۵) بوده است. در سال ۱۳۸۹ حداکثر مقدار شاخص سرایت سیمای سرزمین برابر ۹۷/۴۰ (زیرآبخیز ۲۶) و حداقل مقدار شاخص سرایت سیمای سرزمین در این سال برابر ۳۸/۲۹ (زیرآبخیز ۱۳) به‌دست آمد. هم‌چنین حداکثر مقدار شاخص سرایت سیمای سرزمین در سال ۱۴۰۰ برابر ۹۷/۴۰ (زیرآبخیز ۲۶) و حداقل مقدار آن برابر ۳۴/۹۰ (زیرآبخیز ۳) به‌دست آمد (شکل ۳).

شاخص تنوع شانون (SHDI) در سال ۱۳۷۹ برابر با ۱ و در سال ۱۳۸۹ برابر ۱/۰۴ و در سال ۱۴۰۰ برابر ۱/۱۵ برای کل آبخیز به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در سطح زیرآبخیزها، شاخص تنوع شانون در سال ۱۳۷۹ بین ۰/۸۰ (زیرآبخیز ۳) و ۰/۰۲ (زیرآبخیز ۲۶) متغیر بوده است. در سال ۱۳۸۹ حداکثر مقدار شاخص تنوع شانون برابر ۱/۱۳ (زیرآبخیز ۱۳) و حداقل مقدار شاخص تنوع شانون در این سال برابر ۰/۰۱ (زیرآبخیز ۲۶) به‌دست آمد. هم‌چنین حداکثر مقدار شاخص تنوع شانون در سال ۱۴۰۰ برابر ۱/۲۰ (زیرآبخیز ۱۸) و حداقل مقدار آن نیز برابر ۰/۰۱ (زیرآبخیز ۲۶) به‌دست آمد.

شاخص یکنواختی شانون (SHEI) در سال ۱۳۷۹ برابر ۰/۵۶ و در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ به‌ترتیب برابر ۰/۵۸ و ۰/۶۴ برای

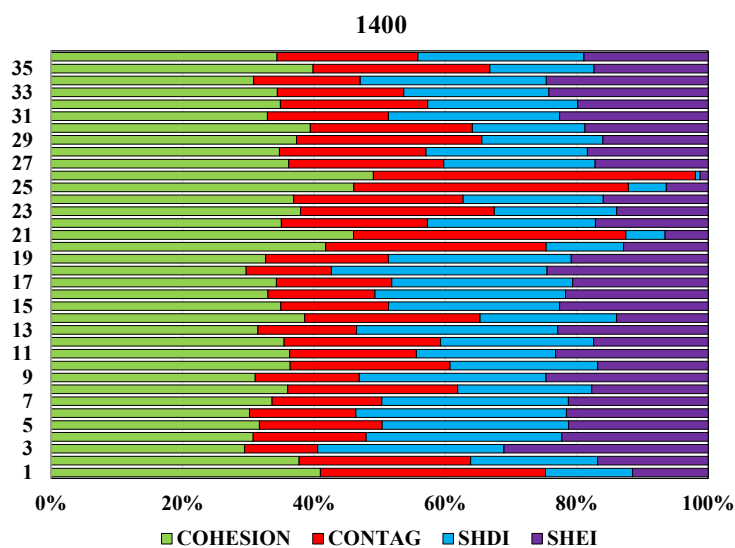
شاخص یکنواختی شانون در این سال برابر ۰/۰۲ (زیرآبخیز ۲۶) به دست آمد. همچنین، حداکثر مقدار شاخص یکنواختی شانون در سال ۱۴۰۰ برابر ۰/۹۹ (زیرآبخیز ۳) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۰۲ (زیرآبخیز ۲۶) محاسبه شد (شکل ۳).

کل آبخیز به دست آمد. نتایج به دست آمده در سطح زیرآبخیزها نشان داد که حداکثر مقدار شاخص یکنواختی شانون در سال ۱۳۷۹ برابر ۰/۶۷ (زیرآبخیز ۱۲) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۰۲ (زیرآبخیز ۲۶) بوده است. در سال ۱۳۸۹ حداکثر مقدار شاخص یکنواختی شانون برابر ۰/۷۱ (زیرآبخیز ۳) و حداقل مقدار



شکل ۳. میانگین سنجه‌های مورد استفاده در محاسبه شاخص ساختار (O) در سطح زیرآبخیز و در سال‌های مورد بررسی

Fig 3. Mean values of metrics used for organization indicator (O) calculation at the sub-watershed level for study years



ادامه شکل ۳. میانگین سنجه‌های مورد استفاده در محاسبه شاخص ساختار (O) در سطح زیرآبخیز و در سال‌های مورد بررسی

Fig 3. Mean values of metrics used for organization indicator (O) calculation at the sub-watershed level for study years

۰/۹۵، در سال ۱۳۸۹ برابر ۱ و در سال ۱۴۰۰ برابر ۰/۹۶ به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده در سطح زیرآبخیز نشان می‌دهد که حداکثر مقدار شاخص تاب‌آوری (R) در سال ۱۳۷۹ در زیرآبخیز ۶ (با مقدار عددی ۴۵/۵۹) و حداقل مقدار آن در زیرآبخیز ۲۷ (با مقدار عددی ۱/۷۵) بوده است. حداکثر و حداقل مقدار این شاخص در سال ۱۳۸۹ برابر ۱۳ و ۰/۸۲ (زیرآبخیز ۱۳) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۶۱ (زیرآبخیز ۱) بوده است. حداکثر و حداقل مقدار شاخص نام‌برده در سال ۱۴۰۰ به‌ترتیب برابر ۰/۸۲ (زیرآبخیزهای ۳ و ۳۶) و ۰/۵۴ (زیرآبخیز ۲۵) برآورد شد (شکل ۴).

شاخص تاب‌آوری (R)

شاخص تاب‌آوری (R) برای کل آبخیز در سال ۱۳۷۹ برابر

میانگین شاخص ساختار (O) در سال ۱۳۷۹ برابر ۰/۹۳، در سال ۱۳۸۹ برابر ۰/۹۵ و در سال ۱۴۰۰ برابر ۰/۹۹ است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در سطح زیرآبخیز، در سال ۱۳۷۹ حداکثر مقدار شاخص ساختار (O) برابر ۰/۷۵ (زیرآبخیز ۲۶) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۳۹ (زیرآبخیز ۳) بوده است. حداکثر مقدار این شاخص در سال ۱۳۸۹ برابر ۰/۸۲ (زیرآبخیز ۱۳) و حداقل مقدار آن برابر ۰/۶۱ (زیرآبخیز ۱) بوده است. حداکثر و حداقل مقدار شاخص نام‌برده در سال ۱۴۰۰ به‌ترتیب برابر ۰/۸۲ (زیرآبخیزهای ۳ و ۳۶) و ۰/۵۴ (زیرآبخیز ۲۵) برآورد شد (شکل ۴).

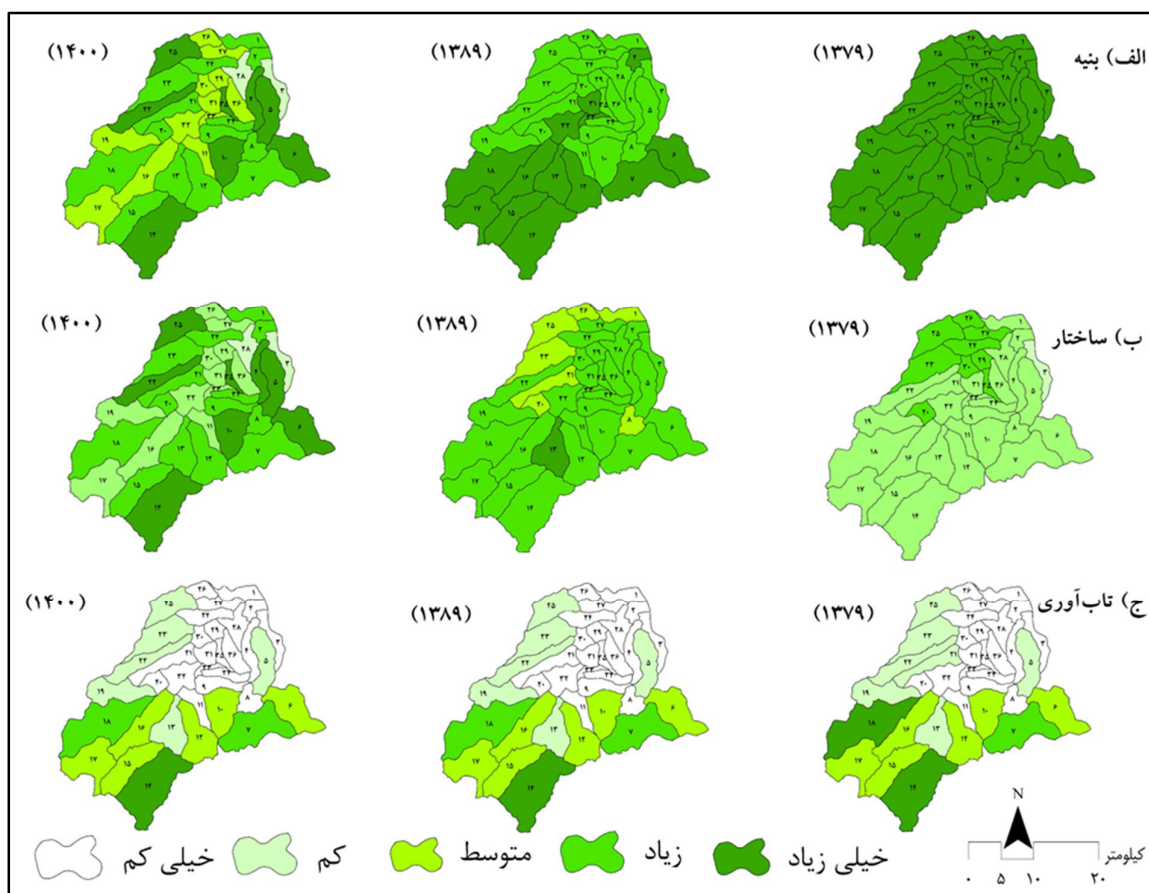
شاخص تاب‌آوری (R)

شاخص تاب‌آوری (R) برای کل آبخیز در سال ۱۳۷۹ برابر

جدول ۳. نتایج شاخص تاب‌آوری (R) در سطح زیرآبخیز در سال‌های مورد بررسی

Table 3. The results of the resilience indicator (R) at the sub-watershed level for the study years

۱۴۰۰	۱۳۸۹	۱۳۷۹	زیرآبخیز	۱۴۰۰	۱۳۸۹	۱۳۷۹	زیرآبخیز
۱۶/۹۹	۱۷/۱۸	۸/۳۹	۱۹	۵/۸۸	۵/۸۸	۶/۱۹	۱
۴/۲۱	۴/۲۴	۵/۸۴	۲۰	۳/۹۸	۳/۹۸	۲۰/۰۴	۲
۹/۶۴	۴/۶۴	۷/۳۹	۲۱	۷/۳۱	۸/۰۳	۶/۹۴	۳
۱۲/۹۵	۱۲/۷۲	۳/۴۵	۲۲	۸/۵۹	۸/۹۹	۲۲/۱۰	۴
۱۶/۷۶	۱۵/۳۹	۸/۴۰	۲۳	۱۶/۴۶	۱۸/۷۰	۱۶/۱۸	۵
۷/۸۲	۷/۸۲	۳/۴۸	۲۴	۲۰/۷۱	۲۱/۷۶	۴۵/۵۹	۶
۱۱/۹۱	۱۱/۸۹	۴/۷۸	۲۵	۳۰/۶۳	۳۱/۴۴	۲۲/۱۶	۷
۴/۲۰	۴/۲۰	۹/۴۰	۲۶	۸/۳۳	۹/۰۰	۱۹/۰۵	۸
۵/۹۳	۵/۹۳	۱/۷۵	۲۷	۷/۶۰	۸/۳۲	۲۵/۲۱	۹
۷/۳۲	۷/۳۲	۵/۸۵	۲۸	۲۰/۴۳	۲۰/۷۲	۳۷/۳۰	۱۰
۳/۴۱	۳/۴۲	۲/۶۳	۲۹	۶/۹۵	۶/۹۶	۱۹/۴۳	۱۱
۳/۵۲	۳/۵۲	۸/۳۶	۳۰	۲۳/۰۶	۲۳/۰۶	۴/۰۳	۱۲
۴/۷۸	۴/۷۹	۵/۸۴	۳۱	۱۵/۷۸	۱۶/۰۲	۴/۲۹	۱۳
۹/۲۱	۹/۳۳	۷/۳۹	۳۲	۴۸/۷۱	۴۸/۶۷	۹/۷۷	۱۴
۱/۷۳	۱/۷۴	۳/۴۵	۳۳	۲۴/۳۲	۲۴/۳۲	۱۳/۰۷	۱۵
۵/۲۲	۵/۷۱	۸/۴۰	۳۴	۲۰/۰۴	۲۰/۰۶	۱۶/۵۲	۱۶
۲/۵۷	۲/۵۷	۳/۴۸	۳۵	۲۶/۳۲	۲۶/۵۵	۸/۰۶	۱۷
۷/۸۰	۷/۹۹	۴/۷۸	۳۶	۳۶/۷۶	۳۸/۸۳	۱۲/۲۵	۱۸



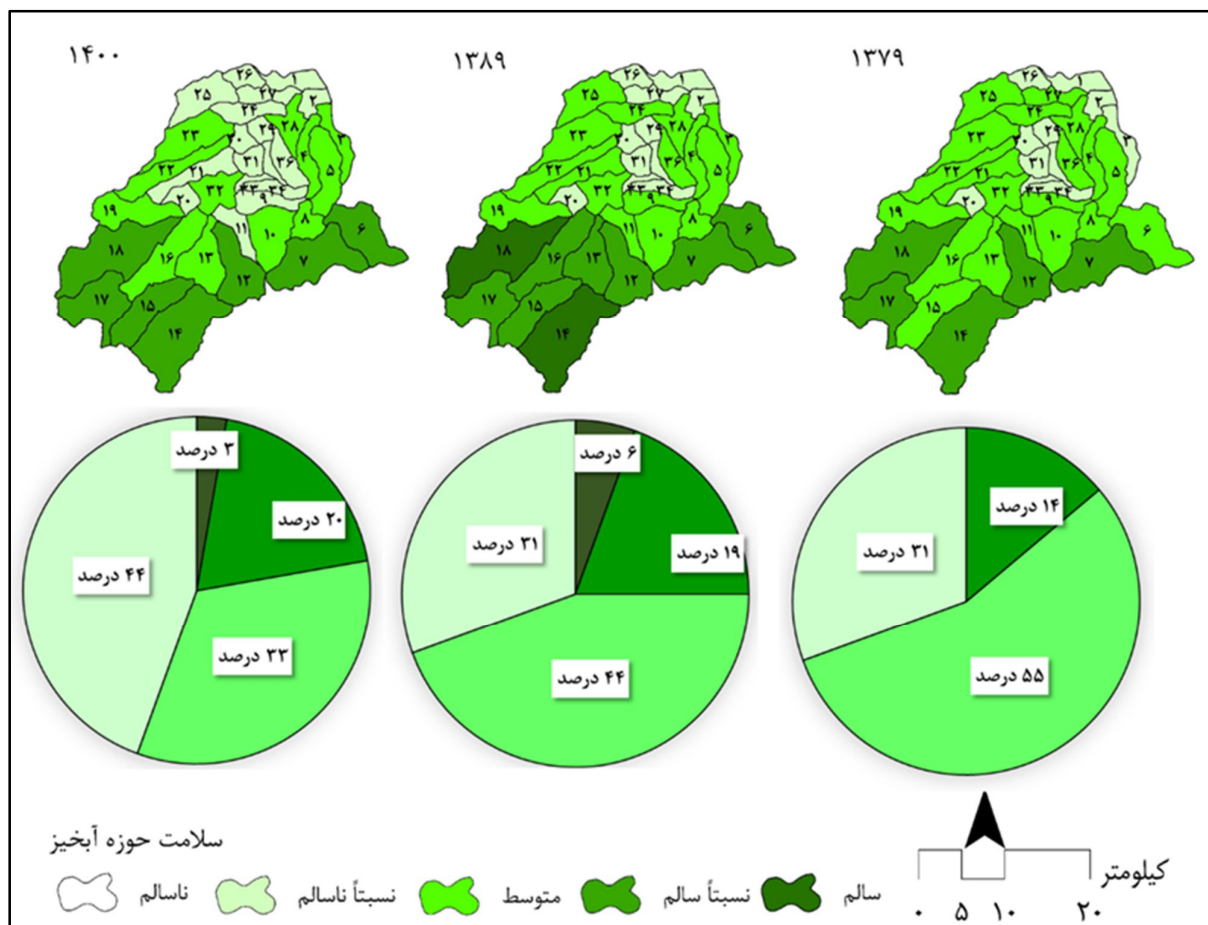
شکل ۴. توزیع مکانی شاخص‌های بنیه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) در سال‌های مورد بررسی

Fig 4. Spatial distribution of vigor (V), organization (O), and resilience (R) indicators in the study years

آبخیز در وضعیت نسبتاً سالم، ۵۵ درصد در وضعیت متوسط، ۳۱ درصد در وضعیت نسبتاً ناسالم قرار دارند. در سال ۱۳۸۹ از کل مساحت آبخیز، ۶ درصد در وضعیت سالم، ۱۹ درصد در وضعیت نسبتاً ناسالم، ۴۴ درصد در وضعیت متوسط و ۳۱ درصد در وضعیت نسبتاً ناسالم از درجه سلامت قرار دارند. هم‌چنین در سال ۱۴۰۰ از کل مساحت آبخیز، ۳ درصد در وضعیت سالم، ۲۰ درصد در وضعیت نسبتاً سالم، ۳۳ درصد در وضعیت متوسط و ۴۴ درصد در وضعیت نسبتاً ناسالم از درجه سلامت آبخیز قرار دارند. در واقع می‌توان گفت که در سال ۱۳۸۹ نسبت به سال ۱۳۷۹ سلامت آبخیز افزایش پیدا کرده و سپس در سال ۱۴۰۰ نسبت به سال ۱۳۸۹ سلامت آبخیز کاهش پیدا کرده است (جدول ۵).

شاخص سلامت آبخیز (WHI)

شکل (۵) و جدول‌های (۴) و (۵) نتایج حاصل از توزیع مکانی و مقایسه شاخص‌های رویکرد VOR را نشان می‌دهند. به‌طور کلی، در آبخیز کوزه‌تپراقی شاخص سلامت آبخیز (WHI) برابر با مقدار عددی ۰/۴۹ در سال ۱۳۷۹ بوده و در سال ۱۳۸۹ کاهش یافته و به مقدار ۰/۵۸ رسیده است. سپس سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی در سال ۱۴۰۰ به مقدار ۰/۴۷ رسیده است و می‌توان گفت که سلامت آبخیز در دوره مورد مطالعه روند افزایشی و سپس کاهشی داشته است. در همین راستا شاهدی و همکاران (۳۱)، سلامت آبخیز تالار با استفاده از چارچوب ارزیابی سلامت آبخیز (WHAF) حداکثر مقدار عددی سلامت ۷۱/۶۶ و حداقل مقدار عددی را ۴۰/۷۹ ارزیابی کردند. هم‌چنین نتایج نشان داد که در سال ۱۳۷۹، ۱۴ درصد از کل مساحت



شکل ۵. توزیع مکانی شاخص سلامت آبخیز (WHI)

Fig 5. Spatial distribution of watershed health index (WHI)

جدول ۴. مقایسه نتایج شاخص‌های سلامت آبخیز در سال‌های مورد مطالعه

Table 4. Comparison of the results of the watershed health indicators in the study years

1400	1389	1379	شاخص‌ها
۰/۶۴	۰/۵۶	۱/۰۰	بنیه (V)
۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۳	ساختار (O)
۰/۹۶	۱/۰۰	۰/۹۵	تاب‌آوری (R)
۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۴۹	شاخص سلامت آبخیز (WHI)

جدول ۵. طبقه‌بندی زیرآبخیزهای مورد مطالعه بر اساس طبقات شاخص سلامت آبخیز (WHI)

Table 5. Classification of study sub-watersheds based on the watershed health index (WHI) classes

طبقه	۱۳۷۹	۱۳۸۹	۱۴۰۰
ناسالم	-	-	-
نسبتاً ناسالم	۳۴، ۳۳، ۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۶، ۲۰، ۳، ۲، ۱	۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۶، ۲۰، ۲، ۱	۲۹، ۲۷، ۲۶، ۲۰، ۱۱، ۹، ۲، ۱
متوسط	۱۹، ۱۶، ۱۵، ۱۳، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۵، ۴	۱۹، ۱۶، ۱۳، ۱۰، ۸، ۵، ۴، ۳	۳۶، ۳۵، ۳۴، ۳۳، ۳۱، ۳۰
نسبتاً سالم	۱۸، ۱۷، ۱۴، ۱۲، ۷	۱۸، ۱۷، ۱۵، ۱۴، ۱۲، ۷، ۶	۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۳، ۱۲، ۷، ۶
سالم	-	-	۱۸، ۱۴

بحث و نتیجه‌گیری

افزایش مساحت کاربری‌های مسکونی و صنعتی و در نتیجه کاهش زیستگاه‌های طبیعی ناشی از فعالیت‌های انسانی موجب کاهش سلامت آبخیزها در مناطق مختلف جهان در دوره‌های زمانی مختلف شده است. در طول دهه سوم از قرن ۲۱، جوامع انسانی در سرتاسر کره زمین با چالش‌های جدی در زمینه تخریب بوم‌سازگان‌ها، افت سطح آب زیرزمینی، خشکسالی و سیل‌های ناشی از اقدامات انسانی، مسائل آلودگی پهنه‌های آبی و جنگل‌زدایی روبه‌رو شده است. بر همین اساس، در تحقیق حاضر با استفاده از اصول حاکم بر رویکرد مفهومی بینه-ساختار-تاب‌آوری (VOR)، وضعیت سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج میانگین شاخص‌های بینه (V)، ساختار (O) و تاب‌آوری (R) در سال ۱۳۷۹، به‌ترتیب برابر با ۱، ۰/۹۳ و ۰/۹۵، برای سال ۱۳۸۹ برابر با ۰/۵۶، ۰/۹۵ و ۱ و برای سال ۱۴۰۰ برابر با ۰/۶۴، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ برآورد شد.

نتایج بیان‌گر مقادیر پایین شاخص بینه (V) بوده که خود بیان‌گر سرزندگی و نشاط پایین آبخیز کوزه‌تپراقی است. هر چند در برخی از زیرآبخیزهای واقع در شمال غربی از وضعیت بهتری برخوردار هستند. نکته قابل توجه مربوط به بهبود وضعیت جزئی این شاخص در دو سال آخر نسبت به سال اول مورد بررسی در برخی از زیرآبخیزهاست که بایستی دلایل این بهبود را با بازدیدهای صحرائی بیش‌تر مورد بررسی قرار داد.

در راستای تأیید نتایج حاصل از تحقیق حاضر، یان و همکاران (۳۷) اشاره نمودند که در نظر گرفتن شاخص تنوع شانون (SHDI) و سرایت سیمای سرزمین (CONTAG) اثر قابل توجهی در ارزیابی شاخص ساختار (O) دارند. بدین‌منظور با تغییر کمی در نوع و الگوی بوم‌سازگان باعث می‌شود که ساختار و تاب‌آوری بوم‌سازگان نسبتاً پایدار باقی بماند. هم‌چنین، هی و همکاران (۱۷)، در بررسی تفاوت‌های منطقه‌ای سلامت بوم‌سازگان در چین، نتیجه گرفتند که تغییرات جزئی در ساختار بوم‌سازگان عمدتاً در مناطق شمال غربی متمرکز بوده است، در حالی‌که تغییرات بالایی در جنوب چین رخ داده است. علاوه بر این، شاخص تاب‌آوری (R) روند نزولی زیادی در منطقه ساحلی جنوب شرقی آبخیز سیچوان، دشت شمال چین و دشت شمال شرقی از ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ نشان داده است.

میانگین شاخص سلامت آبخیز (WHI) کوزه‌تپراقی در سال‌های مورد بررسی روند افزایشی-کاهشی را طی کرده است، به‌طوری‌که در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۹ و ۱۴۰۰ به‌ترتیب ۰/۴۹، ۰/۸۵ و ۰/۴۷ به‌دست آمده است. در حالت کلی می‌توان بیان کرد که استفاده اصولی از منابع و امکانات آبخیز می‌تواند سلامت آن را افزایش داده و در ارائه خدمات به بوم‌سازگان کارکرد مناسب داشته باشد. از نظر شاخص سلامت آبخیز (WHI)، زیرآبخیز ۱۸ در تمام سال‌های مورد بررسی در طبقه سالم سلامت قرار گرفته است، که این نتیجه با نتایج علائی و همکاران (۲) در ارزیابی و مقایسه میزان شاخص‌های تکه‌شدگی

و پوشش گیاهی کاربرد داشته باشند. بنابراین نتایج تحقیق حاضر در تکمیل مطالعات پیشین می‌تواند پشتوانه نظری، روش‌شناختی و مبنای تصمیم‌گیری لازم برای ارتقاء سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی و هماهنگی توسعه منطقه‌ای در سطح استان اردبیل را فراهم کنند. علاوه بر این، ارزیابی وضعیت سلامت آبخیز در طول زمان اطلاعات مفیدی درباره تغییرات مرتبط با مدیریت و استفاده از منابع طبیعی ارائه می‌دهد. این ارزیابی‌ها می‌توانند به مدیران کمک کنند تا بهترین روش‌ها را برای مدیریت پایدار این منابع انتخاب کنند. نتایج این تحقیق می‌توانند به‌عنوان یک منبع آگاهی مهم برای عموم مردم و افراد مختلف درباره وضعیت سلامت، حفظ و مدیریت بهینه و مؤثر منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرند.

پژوهش حاضر، علی‌رغم داشتن اهداف و نتایج مهم، با چندین محدودیت مواجه بوده است که باید در تحقیقات آتی نظر گرفته شوند. برای نمونه، به‌دست آوردن داده‌های محیطی و بوم‌شناختی دقیق و به‌روز چالش‌برانگیز بوده است. کمبود داده‌های معتبر موجب کاهش دقت نتایج می‌شود. هم‌چنین، بوم‌سازگان‌های واقع در یک آبخیز دارای تنوع و پیچیدگی‌های زیادی هستند که درک و تحلیل تمامی عوامل مؤثر بر سلامت را با مشکل مواجه می‌نماید. فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، صنعتی و توسعه شهری می‌تواند تأثیرات غیرقابل پیش‌بینی بر سلامت آبخیز داشته باشد که کنترل و پیش‌بینی آن‌ها به‌طور منظم طی بازه‌های زمانی کوتاه ضروری است.

آبخیز کوزه‌تپراقی مطابقت دارد. نتایج آن‌ها نشان داد زیرآبخیزهایی که در آن تخریب کم‌تر است، می‌تواند به‌دلیل شرایط مطلوب منابع و استفاده اصولی در این زیرآبخیز باشد. طبق نتایج مدل مفهومی VOR، سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی در سطح متوسط ارزیابی شد. در همین راستا حزباوی و همکاران (۱۴) با استفاده از رویکرد مفهومی فشار-حالت-پاسخ (PSR)، وضعیت سلامت این آبخیز را نیز در سطح متوسط گزارش دادند. میزان شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۴۶، ۰/۵۵ و ۰/۳۱ و میانگین شاخص سلامت آبخیز (WHI) برابر با ۰/۴۱ به‌دست آمده است.

طبق نتایج به‌دست آمده، تغییرات مکانی شاخص سلامت آبخیز (WHI) کوزه‌تپراقی در مناطق مختلف آبخیز متفاوت است. در همین راستا، حزباوی و همکاران (۱۴) با استفاده از مدل مفهومی PSR و قابل‌نظام و همکاران (۱۰) با استفاده از مدل مفهومی PSR-Fuzzy به وضعیت نامطلوب سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی که تا سال ۱۳۹۸ محاسبه شده بود، نیز اشاره کرده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که میانگین شاخص سلامت آبخیز (WHI) محاسبه شده توسط مدل مفهومی PSR و PSR-Fuzzy برابر با ۰/۴۱ بوده است. هم‌چنین یافته‌های یان و همکاران (۳۷)، هی و همکاران (۱۷)، عباس‌زاده تهرانی و همکاران (۱)، گسی و همکاران (۱۱) نیز نشان‌دهنده تغییرات مکانی و زمانی شاخص سلامت در آبخیزهای مورد مطالعه بوده است. نتایج به‌دست آمده می‌توانند در مدیریت منابع آب، خاک

References

1. Abbaszadeh Tehrani N. 2015. Introducing a method for ecosystem health assessment based on remote sensing technologies. *Environmental Research*, 6(12): 71-84.
2. Alaei N, Mostafazadeh R, Esmaili-Ouri A, Hazbavi Z, Sharari M, Huang G. 2022. Spatial comparative analysis of landscape fragmentation metrics in a watershed with diverse land uses in Iran. *Sustainability*, 14, 14876.
3. Amiri F, Tabatabaie T. 2022. The effect of land use change/land cover on land surface temperature in the coastal area of Bushehr. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 13(2): 130-147. (In Persian).
4. Das M, Das A, Pereira P, Mandal A. 2021. Exploring the spatio-temporal dynamics of ecosystem health: A study on arapidly urbanizing metropolitan area of Lower Gangetic Plain, India. *Ecological Indicators*, 125: 107584, 12 p.
5. Dehrami R, Amiri F. 2023. Impact assessment of land-use changes on groundwater quality in Dahram watershed of Fars province. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1): 165-180.
6. Dezhbani R, Hazbavi Z, Mostafazadeh R, Esmaili Ouri A, Alaei N. 2023. Analysis of the relationship between spatial and temporal changes in land use and landscape metrics in the KoozehTopraghi Watershed. *Journal of Geography, Urban and Regional Studies*, 12(45), 82-99. (In Persian).
7. Ebrahimi P, Salajegheh A, Mohseni Saravi M, Malekian A, Sadoddin A. 2017. Prediction of watershed health based on surface water quality variables (Case study: Taleghan watershed).

- Geography and Environmental Sustainability, 8(26): 1-13. (In Persian).
8. Eskandari H, Eskandari Damaneh H, Khosravi H, Cheraghi M, Adeli Sardooei M. 2023. Assessment of land degradation using Landsat satellite data in the period 2011-2021 (Case Study: Isfahan county). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 14(1): 20-24. 10.30495/GIRS.2023.686944. (In Persian).
 9. Farajollahi A, Asgari HR, Ownagh M, Mahboubi MR, Salman Mahini AR. 2016. Monitoring and prediction of spatial and temporal changes of landuse/ cover (Case study: Marave Tappeh region, Golestan). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 6(4): 1-14. (In Persian).
 10. Gabelnezam E, Babaei L, Alaei N, Hazbavi Z. 2022. Development of an incorporative PSR-Fuzzy model for health assessment of the KoozehTopraghi Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4), 152-167. (In Persian).
 11. Ge F, Tang G, Zhong M, Zhang Y, Xiao J, Li J, Ge F. 2022. Assessment of ecosystem health and its key determinants in the middle reaches of the Yangtze River Urban Agglomeration, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2): 771.
 12. Han JCh, Huang Y, Zhang H, Wu X. 2019. Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China. *Journal of Environmental Management*, 232: 1037-1048.
 13. Hasani M, Pielesiak I, Mahiny AS, Mikaeili A. 2021. Regional ecosystem health assessment based on landscape patterns and ecosystem services approach. *Acta Ecologica Sinica*, 43(2), 333-342.
 14. Hazbavi Z, Parchami N, Alaei N, Babaei L. 2020. Assessment and analysis of the KoozehTopraghi watershed health status, Ardabil Province, Iran. *Conservation Water & Soil Resources*, 9(3): 121-140. (In Persian).
 15. Hazbavi Z, Sadeghi H. 2016. Watershed health (Part two): Pressure, state and response conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*, 4(15): 25-30. (In Persian).
 16. Hazbavi Z, Sadeghi SHR. 2017. Watershed health (Part three): Vigor, organization and resilience conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*, 5(16): 1-7.
 17. He R, Huang X, Ye X, Pan Z, Wang H, Luo B, Hu X. 2022. County ecosystem health assessment based on the vors model: A case study of 183 counties in Sichuan Province, China. *Sustainability*, 14(18): 11565.
 18. Jahandari J, Hejazi R, Jozi SA, Moradi A. 2022. Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem service in Bandar Abbas Watershed using InVEST software. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(4): 91-106.
 19. Jones ChR, Palmer M, Motkaluk S, Walters M. 2002. *Watershed Health Monitoring Emerging Technologies*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420010145>.
 20. Kakehmami A, Moameri M, Ghorbani A, Ghafari S. 2020. Analysis of land use/ cover changes in Ardabil province using landscape metrics. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(3): 68-86. (In Persian).
 21. Kriegler F, Malila W, Nalepka R, Richardson W. 1969. Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition. *Proceedings of the 6th Int Symp on Remote Sens & Environ Ann Arbor, MI: University of Michigan*, 97-131.
 22. Li Y, Deng M, Fang G, Lu Y, Sun C, Zhu Z. 2024. Ecosystem health evaluation based on land use change—case study of the riparian zone of the Yangtze River in Jiangsu Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2): 1-19.
 23. Li Y, Dong S, Wen L, Wang X, Wu Y. 2013. Three-dimensional framework of vigor, organization, and resilience (VOR) for assessing rangeland health: a case study from the alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *EcoHealth*, 10(4):423-33.
 24. McGarigal K, Cushman SA, Neel EN. 2002. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, 691-703.
 25. Momenian P, Nazarnejad 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.
 26. Mosaffaie J, Salehpour Jam A, Tabatabaei M, Kousari M. 2021. Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land use policy*, 100: 104911.
 27. Nikouei H, Azari M, Dastorani M.T. 2022. The effect of climate change on the Fariman dam watershed health using VOR model. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4): 107-121. (In Persian).
 28. Ran C, Wang Sh, Bai X, Tan Q, Wu L, Luo X, Chen H, Xi H, Lu Q. 2020. Evaluation of temporal and spatial changes of global ecosystem health. *Land Degradation & Development*, 32(3): 1500-1512.
 29. Sadeghi H, Ebrahimi Z, Jafari F, Farzi P. 2018. Health assessment of Asiabrud Basin using conceptual model of pressure-state-response. *The 13th National Conference on Watershed Management Science & Engineering & the 3rd National Conference on Protection Natural*

- Resources and Sustainable, October 10 and 11, University of Mohaghegh Ardabili, 6 p.
30. Sadeghi H, Hazbavi Z, Gholamalifard M. 2019. Zonation of health dynamism for the Shazand Watershed based on low and high flow discharges. *Watershed Engineering and Management*, 3(11): 589-608. (In Persian).
31. Shahedi K, Mohseni B, Moumeni B. 2022. Investigation of Talar Watershed health the using watershed health assessment framework (WHAF) on GIS environment. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, Accepted Manuscript. (In Persian).
32. Shannon E, Weaver W. 1964. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1-132.
33. Taabe M, Ranjbarfordoei A, Muosavi Sayed H, Khosroshahi M. 2017. Quantifying vegetation health based on resilience. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(4): 49-60.
34. Wang Z, Liu Y, Li Y, Su Y. 2022. Response of ecosystem health to land use changes and landscape patterns in the karst mountainous regions of Southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6): 3273.
35. WenTsai Y, Yang J, Lin Y, Chen Ch. 2021. Establishment of the watershed health indicators and health check of reservoirs, *Ecological Indicators*, 127: 107779, 7p.
36. Xiao R, Yu X, Shi R, Zhang Z, Yu W, Li Y, Chen G, Gao J. 2019. Ecosystem health monitoring in the Shanghai-Hangzhou Bay Metropolitan Area: A hidden Markov modeling approach. *Environment International*, 133: 105170.
37. Yan, Y, Zhao C, Wang C, Shan P, Zhang Y, Wu G. 2016. Ecosystem health assessment of the Liao River Basin upstream region based on ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 36(4): 294-300.
38. Yu W, Xiao R. 2018. Urban ecosystem health assessment based on landscape pattern and VOR Model. *Environmental Earth Sciences*, 1: 1004, 7 p.



Monitoring the spatio-temporal changes of watershed health using vigor-organization-resilience (VOR) conceptual approach

Roqiyeh Dejbani¹, Zeinab Hezbawi², Rauf Mostafizadeh³, Abazar Esmaali-Uri⁴, Nazila Alaei⁵

Received: 2022-11-21 / Accepted: 2022-12-14 / Published: 2025-01-16

Abstract

Due to the ever-increasing driving forces of land degradation induced by irrational human needs and climate change, the security and health of the country's watersheds have been seriously threatened. Based on this, the present research was planned to analyze the health status of the Koozeh Topraghi watershed using the vigor- organization-resilience (VOR) approach at the level of 36 sub-watersheds and during three time periods (2000, 2010, and 2021). For this purpose, the essential basic data were collected. After determining the most important variables, they were standardized to equalize and remove the magnitude of different

variables. Then, the variables were classified into various groups according to their nature and the purpose of the research. After their geometric mean, three indicators of vigor (V), organization (O), and resilience (R) were calculated. Finally, the watershed health index (WHI) was obtained using the principles governing the conceptual approach of VOR. The results showed that in the Koozeh Topraghi watershed, the vigor (V) indicator had a mean and standard deviation of 0.88 ± 0.05 in the first year, 0.81 ± 0.08 in the second year, and 0.68 ± 0.17 in the third year. The organization (O) indicator also had a mean and standard deviation of 0.57 ± 0.08 in the first year, 0.70 ± 0.08 in the second year, and 0.68 ± 0.07 in the third year. In addition, the mean and standard deviation of the resilience (R) indicator in the first to third years were 0.28 ± 0.22 , 0.30 ± 0.25 and 0.29 ± 0.25 , respectively. Finally, the WHI was equal to 0.49 in 2000 and had an increasing trend in 2010 and reached 0.85, but it decreased to 0.47 in 2021. It can be concluded that the watershed health has slightly reduced in the study period. The results of this research are used in determining the practical policy and problem-oriented management of water, soil, and vegetation resources.

Roqiyeh Dejbani¹, Zeinab Hezbawi²✉, Rauf Mostafizadeh³, Abazar Esmaali-Uri⁴, Nazila Alaei⁵

1 .Master's degree in Watershed Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

2 .Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Institute, University of Mohaghegh Ardabili

3 .Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Institute, University of Mohaghegh Ardabili

4 .Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Member of Water Management Research Institute, University of Mohaghegh Ardabili

5 . PhD student in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Urmia

DOI: 10.30495/girs.2022.697684

e-mail: z.hazbavi@uma.ac.ir

Extended abstract

Background and Objective

Nowadays, the security and health of watersheds are threatened due to increasing human needs and climate change. Due to the rapid development of

modern society, intense human activities, and various planned and unplanned patterns of land use, have led to changes in the structure and function of ecosystems. Since the global ecosystems are experiencing a declining health status, therefore, watershed health monitoring is necessary to achieve greater sustainability. Based on this, providing basic information about watershed health can be used in different parts of project development, resource protection and policies. Therefore, this study aims to investigate the health of the Koozeh Topraghi watershed using the vigor-organization-resilience (VOR) model during the years 2000, 2010, and 2021.

Materials and Methods

Koozeh Topraghi watershed, located in Ardabil province, has an area of 805.70 Km². The minimum and maximum elevations of the watershed are 1378 and 2549 m, respectively, compared to the sea level. Besides, the total length of the waterway and the mean slope of the Koozeh Topraghi watershed are estimated as 1054.11 km and 14.59%, respectively. The data used in this research are Landsat 7 and Landsat 8 images. Landsat 7 and 8 satellite images of the study area were selected based on their quality and relevance. Then TerrSet software was used to prepare the normalized difference vegetation index (NDVI) map. Landsat images for the years 2000, 2010, and 2020 were downloaded and an NDVI map was prepared in TerrSet software after converting bands 4 and 5 into Idrisi format. The organization (O) of ecosystems shows the diversity and interspecies relationships of an ecosystem. In addition, the indices of Patch Cohesion Index (COHESION), Contagion (CONTAG), Shannon's Diversity Index (SHDI), and Shannon's Evenness Index (SHEI) were calculated using Fragstats 4.2.1 software. Finally, after data standardization, watershed health was obtained using the vigor-organization-resilience (VOR) model. The vigor (V) indicator is generally depicted by vegetation productivity characteristics. Since the NDVI is closely related to vegetation production, it broadly indicates the foundation level. The criteria used to calculate the watershed organization (O) indicator include the landscape pattern index, which reflects the stability of the watershed organization (O) and is based on the indices of Patch Cohesion Index (COHESION), Contagion (CONTAG), Shannon's

Diversity Index (SHDI) and Shannon's Evenness Index (SHEI). Watershed resilience is considered as the potential of an ecosystem to respond to external disturbances by restoring its original structure and function. Each type of land has a different ability to recover, depending on its nature. To calculate the resilience (R) indicator, a coefficient was determined for all types of land uses according to the type of service for each land use. It should be noted that the calculation of NDVI in the TerrSet18.00 environment, landscape metrics in Fragstats 4.2.1., and spatial and temporal zoning of watershed health indicators was done in the ArcMap 10.8 software environment.

Results and Discussion

The results showed that the vigor (V) indicator has a mean and standard deviation of 0.88±0.05 in the first year, 0.81±0.08 in the second year, and 0.68±0.17 in the third year over the study area.

The organization (O) indicator had a mean and standard deviation of 0.57±0.08 in the first year, 0.70±0.08 in the second year, and 0.68±0.07 in the third year. Besides, the resilience (R) indicator had a mean and standard deviation of 0.28±0.22 in the first year, 0.30±0.25 in the second year, and 0.29±0.25 in the third year. Finally, the watershed health index (WHI) was 0.49 in 2000, and in 2010 it had an increasing trend and reached 0.85, but in 2021 it decreased to 0.47. It can be concluded that the watershed health has decreased slightly in the study period. Various reasons, inappropriate land use especially pasture production for agriculture, and changes in climatic and hydrological components, have caused inappropriate health conditions in the Koozeh Topraghi watershed.

Conclusion

In the current research, the health status of the Koozeh Topraghi watershed was evaluated using the principles governing the VOR conceptual model. Based on the results, the values of vigor (V), organization (O), and resilience (R) indicators were equal to 0.73, 0.96, and 0.97, respectively. The mean health index of Koozeh Topraghi watershed is equal to 0.23. The obtained results can be used in the appropriate management of water resources, soil, and vegetation.

Keywords: Health index, Land degradation, Sustainable management, Watershed resilience