



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی آبخیز نیر، استان اردبیل

زینب حزب‌بوی^{۱*}، ائلناز قابل‌نظام^۲، الهام عزیزی^۳، زهرا شریفی^۴، سولماز فتح‌العلمی^۵، محمدرضا نیکو^۶

- ۱ - دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۲ - دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
- ۳ - دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۴ - دانشجوی دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- ۵ - دانش‌آموخته‌ی دکتری، کارشناس، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۶ - دانشیار، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان

چکیده‌ی مبسوط

مقدمه و هدف

کیفیت بوم‌شناختی یک واحد اندازه‌گیری جامع از عناصر، ساختار و عملکرد یک بوم‌سازگان در مقیاس‌های زمان و مکان است. هم‌چنین، ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی می‌تواند در اولین گام برنامه‌ریزی هدف‌مند و مدیریت جامع آبخیز اطلاعات ارزشمندی برای استفاده‌ی کارشناسان و مدیران داشته باشد. به این منظور، این پژوهش با هدف محاسبه‌ی شاخص کیفیت بوم‌شناختی (EQI) در یکی از آبخیزهای بالادست سد یامچی که بی‌تأثیر از دخالت‌های انسانی نیست، انجام شد.

مواد و روش‌ها

آبخیز نیر به‌عنوان منطقه‌ی مطالعاتی در بخش جنوب‌غرب استان اردبیل است. برای انجام پژوهش، ابتدا، متغیرهای مهم ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی (شاخص بهنجار شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)، نسبت پوشش گیاهی

نوع مقاله: پژوهشی

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

استناد: حزب‌بوی، ز.، قابل‌نظام، ا.، عزیزی، ا.، شریفی، ز.، فتح‌العلمی، س.، نیکو، م. ر. ۱۴۰۲. ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی آبخیز نیر، استان اردبیل. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۶ (۳): ۹۰-۱۱۰.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.360357.1494

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۰۸/۲۸، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۹/۳۰، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۲، دوره‌ی ۳۶، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پایایی ۱۴۰، پاییز ۱۴۰۲، صفحه‌های ۹۰ تا ۱۱۰.

© نویسندگان

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



(FVC)، شاخص سطح برگ (LAI)، تولید خالص اولیه (NPP)، شاخص رطوبت (IM)، شاخص دمای سطح زمین (LST)، فرسایش خاک، شاخص پیوستگی بوم‌شناختی و شاخص نگهداشت رواناب) استخراج و محاسبه شدند. متغیرها به نحوی انتخاب شدند که نشان‌دهنده‌ی سه عملکرد حفظ، پشتیبانی و تنظیم بوم‌سازگان باشند. پس از نرمال‌سازی، با استفاده از رویکرد پیشرفته‌ی تصمیم‌گیری چندمعیاره به نام مدل تصور تعقیبی (PPM)، وزن‌دهی متغیرها انجام شد. در نهایت براساس مجموع وزنی متغیرها، شاخص کیفیت بوم‌شناختی (EQI) برای ۱۱ زیرآبخیز محاسبه شد.

نتایج و بحث

دامنه‌ی تغییرپذیری بسیار زیاد متغیرهای استفاده شده در سطح کل آبخیز نیر تأیید شد. به‌طور کلی، زیرآبخیز ۱ حداکثر میانگین متغیرهای اول تا چهارم (NPP، NDVI، FVC و LAI) و حداقل میانگین LST داشت. در حالی که زیرآبخیز ۱۱ از نظر همین پنج متغیر وضعیت عکس داشت. هر پنج متغیر منعکس‌کننده‌ی ساختار و عملکرد پوشش گیاهی و در نتیجه کیفیت بوم‌شناختی هستند. وضعیت سایر شاخص‌ها به‌جز پیوستگی بوم‌شناختی (EC) نیز در زیرآبخیز ۱ در وضعیت متوسط ارزیابی شدند. براساس روش وزن‌دهی PPM، شاخص نسبت پوشش گیاهی (۰/۳۹) بیشترین اهمیت و شاخص‌های رطوبت و نگهداشت رواناب با وزن ۰/۰۱ کم‌ترین اهمیت را داشتند. هم‌چنین، نتایج ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی نشان داد که زیرآبخیزهای ۱۱ (EQI=۰/۱۰) و ۱ (EQI=۰/۹۰) به‌ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین اندازه‌ی EQI را داشتند. به‌طور کلی، با توجه به نتایج پهنه‌بندی مشخص شد که قسمت‌های جنوب‌شرق و شمال‌شرق آبخیز در طبقه‌ی بسیار کم شاخص کیفیت بوم‌شناختی (EQI) هستند که ۲۹٪ آبخیز مطالعه شده را تشکیل می‌دهند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش به‌عنوان یکی از هدف‌های اصلی و مهم مدیریت آبخیز در راستای حفظ سلامت و یکپارچگی بوم‌سازگان می‌تواند کاربرد داشته باشد. هم‌چنین، می‌توان اولویت‌بندی تخصیص بودجه‌ی احیاء را براساس درجه‌ی تاب‌آوری زیرآبخیزهای مطالعه شده انجام داد.

واژگان کلیدی: ارزیابی شاخص محور، تاب‌آوری بوم‌سازگان، مدل تصور تعقیبی، مدیریت منابع

مقدمه

انسان را تهدید می‌کند (ورسمارتی و همکاران ۲۰۱۳، وی و همکاران ۲۰۲۱). بر همین اساس، اخیراً، بررسی زمان و ماهیت تغییر بوم‌سازگان به‌عنوان یک چالش اساسی مطرح شده است، زیرا تغییر در بوم‌سازگان که نتیجه‌ی فعالیت‌های غیرمنطقی انسان بوده است، تمام جلوه‌ها و جنبه‌های زندگی انسان را تحت تأثیر قرار داده است (یانگ و همکاران ۲۰۱۱). برای تصمیم‌گیری‌های لازم در مدیریت بوم‌سازگان و بهبود شفافیت آن، نیاز اساسی به معیارها و مفهوم‌هایی برای توصیف شرایط «مطلوب» یا «نامطلوب» یا تعریف شاخص کیفیت بوم‌شناختی (EQI) در یک بوم‌سازگان است (فرفوگل و لوتزنیوتن ۲۰۰۲، بورخارد و مولر ۲۰۰۸). کیفیت در واژه به‌معنای چگونگی، حالت، وضعیت و به‌طور کلی به‌معنای نشان دادن ویژگی‌های کمی و کیفی هر پدیده، شیء و موضوعی که بررسی شده است، می‌باشد (استادی و همکاران ۲۰۱۷). کیفیت

مالتوس اولین کسی بود که با بررسی عامل‌های انسانی مؤثر بر محیط‌زیست، به چرایی رخداد مشکلات بوم‌شناختی توجه کرد. او باور داشت که رشد جمعیت عامل اصلی کمبود منابع است (مالتوس و همکاران ۲۰۲۲). هم‌چنین، فعالیت‌های انسانی روند طبیعی چرخه‌ی بوم‌سازگان را تغییر داده است و منجر به بروز مشکلات حاد بوم‌شناختی مانند نابودی جنگل‌ها، فرسایش خاک و بیابان‌زایی شده است (وانگ و همکاران ۲۰۲۱، مو و همکاران ۲۰۲۱، لیو و همکاران ۲۰۱۹). بوم‌سازگان یک سامانه‌ی پویا و شکننده است که برای گردش مواد و جریان انرژی، ساختار و عملکرد ویژه‌ی دارد (وو و همکاران ۲۰۲۲). از آن جایی که بوم‌سازگان‌ها مهم‌ترین منبع تولید خدمات در جهان به‌شمار می‌روند و بخش بزرگی از خدمات گوناگون را برای میلیون‌ها انسان فراهم می‌کنند، از این رو، مشکلات بوم‌شناختی به‌طور جدی تعادل بوم‌سازگان‌ها را ضعیف کرده است و بقای

متحد (UNEP)^۴ و سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD)^۵ به‌طور مشترک چارچوب "فشار-حالت-پاسخ" (PSR)^۶ را در زمینه‌ی ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی پیشنهاد کردند و از این ارزیابی به‌عنوان یک کار پیچیده و چالش‌برانگیز یاد کرده‌اند (آن و همکاران ۲۰۲۲). نگرانی مهم جامعه‌ها در کشورها، درک و فهم تغییرات کیفیت بوم‌شناختی است. بنابراین در این میان شناسایی توزیع و تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت بوم‌شناختی و بررسی آن اهمیت زیادی دارد. در این راستا، چنگ‌لین و همکاران (۲۰۱۶) در استان آنهوئی کیفیت بوم‌شناختی محیط‌زیست براساس ردپای بوم‌شناختی را ارزیابی کردند. آن‌ها از داده‌های بوم‌شناختی محیط‌زیست^۷، جامعه، اقتصاد و جمعیت، ردپای بوم‌شناختی، ظرفیت تحمل بوم‌شناختی محیط‌زیست و کمبود و مازاد بوم‌شناختی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که رابطه‌ی میان عرضه و تقاضای ردپای بوم‌شناختی تقریباً نامتعادل است. در چین هانگ و همکاران (۲۰۲۰) در استان جیانگسو در نانجینگ کیفیت بوم‌شناختی و تأثیر شهرنشینی بر اساس شاخص بوم‌شناختی مبتنی بر سنجش از دور (RSEI)^۸ را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها بیان‌گر این بود که فرآیند شهرنشینی با ضریب همبستگی ۰/۹۱- با کیفیت بوم‌شناختی منطقه همبستگی منفی دارد. در شانگ‌های چین یان و همکاران (۲۰۲۱) ارزیابی چندمعیاره‌ی کیفیت محیط‌زیست شهری را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین شاخص بوم‌شناختی مبتنی بر سنجش از دور در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است. در چین اوپانگ و همکاران (۲۰۲۱) در استان جیانگ‌شی کیفیت بوم‌شناختی را با استفاده از مدل تصور تعقیبی (PPM)^۹ ارزیابی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در محاسبه‌ی کیفیت بوم‌شناختی، شاخص بهنجار شده‌ی اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)^{۱۰} و کارایی مصرف آب (WUE)^{۱۱} بیش‌ترین را داشتند و و شاخص سطح برگ (LAI)^{۱۲} و نسبت بوون^{۱۳} کم‌ترین وزن را داشتند. در شمال چین کونگ و همکاران

بوم‌شناختی نیز یک نیاز اساسی برای بقاء انسان است که مستقیماً بر توسعه‌ی پایدار، محیط زندگی انسانی و اقتصاد اجتماعی تأثیر می‌گذارد و به‌دنبال آن توسعه‌ی پایدار نیز به چگونگی تأثیر اقدام‌های انسانی بر وضعیت خدمات بوم‌سازگان بستگی دارد (تادسه و همکاران ۲۰۱۴). کیفیت بوم‌شناختی بیان‌گر ساختار، عملکرد، سازگاری و تاب‌آوری بوم‌سازگان از نظر شرایط زیستی، فیزیکی، شیمیایی و یکپارچگی محیطی است که در یک محدوده‌ی زمانی-مکانی خاص تعریف می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۱۹، کونگ و همکاران ۲۰۲۲).

کمی‌سازی دقیق روند تغییرات کیفیت بوم‌شناختی و شاخص‌های مهم و مؤثر قبل و پس از فعالیت‌های اصلاحی، برای مدیریت سیاست منطقه‌ای از نظر شکنندگی و پایداری بوم‌شناختی ضروری است (چای و لها ۲۰۱۸). احیاء بوم‌سازگان نیازمند مشارکت انسان در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی است، که نقش بشر در تغییر الگوهای چشم‌انداز، استفاده‌ی منطقی از زمین، پوشش گیاهی، تنوع گونه‌ها و پایداری ساختار بوم‌سازگان آشکار می‌شود (سو و همکاران ۲۰۱۷). از طرفی پیش‌شرط‌های تصمیم‌گیری‌های مدیریتی از روش تجزیه و تحلیل کمی مؤثر و جامع اطلاعات کیفیت بوم‌سازگان به‌دست می‌آید (جانسن و همکاران ۲۰۱۳، هونگ و همکاران ۲۰۱۶). به‌طور کلی با توسعه‌ی معیارهای مدیریتی، تعریف کیفیت بوم‌شناختی تعدادی ایده مرتبط را به‌وجود آورده است که برجسته‌ترین آن‌ها شامل مفهوم‌های یکپارچگی زیستی^۲ و سلامت بوم‌سازگان^۳ است (پاتزولد و همکاران ۲۰۱۰). یکپارچگی بوم‌شناختی نشان‌دهنده‌ی واگرایی از شرایط مرجع طبیعی است که به فعالیت‌های انسانی مربوط می‌شود و سلامت بوم‌سازگان نیز به‌عنوان "پایدار بودن، حفظ سازمان و استقلال در طول زمان و تاب‌آوری در برابر تنش" تعریف شده است (کار ۱۹۹۹، پاتزولد و همکاران ۲۰۱۰).

در دهه‌ی اخیر، در سطح جهان و ایران، ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی به شکل‌های مختلف توسعه یافته و به‌کار گرفته شده است. برنامه‌ی محیط‌زیست سازمان ملل

- 2 - Biological integrity
- 3 - Ecosystem health
- 4 - United Nations Environment Programme (UNEP)
- 5 - Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)
- 6 - Pressure-state-response (PSR)
- 7 - Eco-environmental quality
- 8 - Remote Sensing Ecological index (RSEI)
- 9 - Projection Pursuit Model (PPM)
- 10 - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- 11 - Water Use Efficiency (WUE)
- 12 - Leaf Area Index (LAI)
- 13 - Bowen

ضروری در برنامه‌ریزی برای پایداری است، بنابراین برای حفظ یکپارچگی، تعادل بوم‌سازگان‌ها، مدیریت مؤثر کیفیت بوم‌شناختی و دستیابی به توسعه‌ی پایدار و با کیفیت اقتصادی-اجتماعی ضروری است. همچنین در طرح‌ریزی و برنامه‌ریزی آبخیزها به جنبه‌های مختلف محیط‌زیست از جمله کیفیت بوم‌شناختی آبخیزها و شناسایی عامل‌های مهم تأثیرگذار بر آن توجه و تأکید شود. از این‌رو با توجه به این‌که کیفیت بوم‌شناختی پیوسته در اثر دخالت‌های انسانی و عامل‌های طبیعی مختلف در حال تغییر است، در این پژوهش با هدف تعیین اندازه‌ی اهمیت هر یک از شاخص‌های مؤثر بر کیفیت بوم‌شناختی آبخیز، ارزیابی و تحلیل مکانی کیفیت بوم‌شناختی آبخیز نیر به‌عنوان بخشی از آبخیز رود قره‌سو انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند در پایش و ارزیابی منظم شاخص‌های مختلف کیفیت بوم‌شناختی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و در سطح‌های مختلف تصمیم‌گیری محلی، منطقه‌ای یا ملی استفاده شوند.

مواد و روش‌ها

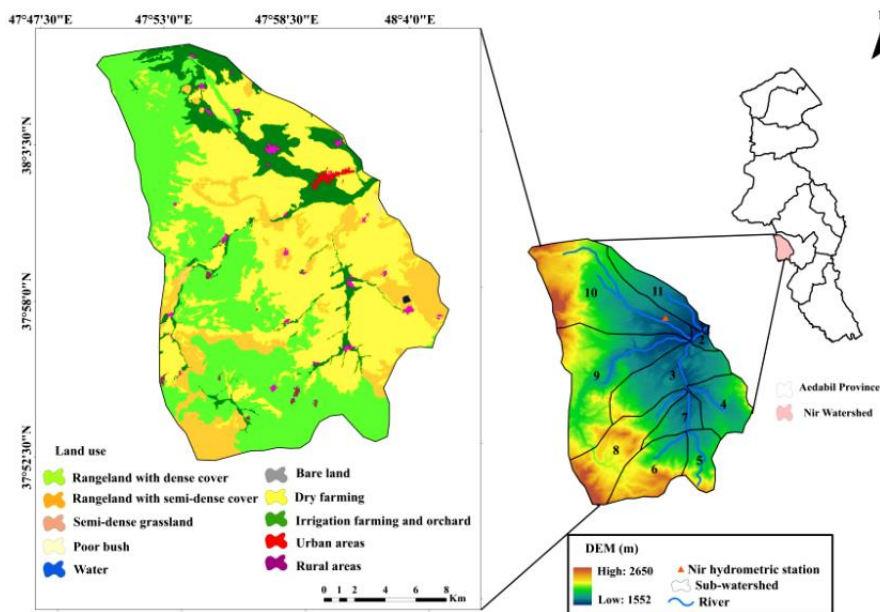
معرفی منطقه‌ی مطالعه‌شده

آبخیز نیر در بخش جنوب‌غرب استان اردبیل است. رود نیرچای که از زیرشاخه‌های بالیخوچای است، در این آبخیز جریان دارد (شکل ۱). شهر نیر در قسمت شرقی این آبخیز است. مساحت آبخیز نیر ۳۷۹/۳۱ کیلومتر مربع، بارندگی آن حدود ۳۵۸/۵۹ میلی‌متر و بلندی متوسط آن ۱۹۱۹/۱۳ متر است. بیشتر جریان‌های عرض‌های میانی و جنب حاره‌ای در استان اردبیل، در دو فصل بهار و تابستان در این ناحیه فعال هستند (چوبه و کاکه‌مسی ۲۰۱۵). بخش‌های کوهستانی این آبخیز در شمال‌غرب و جنوب‌غرب هستند. در این پژوهش، آبخیز نیر به ۱۱ زیرآبخیز تقسیم‌بندی شد که اطلاعات تکمیلی مربوطه در جدول ۱ نشان داده شده است.

(۲۰۲۲) در منطقه‌ی شنی اوتینداگ چارچوب علمی جدیدی برای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی مناطق خشک براساس اصل^{۱۴} IOAO ارائه دادند. نتایج آنها نشان داد که پوشش گیاهی ۳۰٪ کیفیت زمین‌های شنی و خاکی را بهبود داده است.

در ایران نیز، لقای و همکاران (۲۰۱۱) راهکارهای باززنده‌سازی و سامان‌دهی پارک‌های شهری را با هدف بهبود کیفیت بوم‌شناختی و اجتماعی در پارک شهر محله‌ی سنگلج تهران با روش توصیفی و تحلیلی را بررسی کردند. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که بوم‌شناختی پارک با توجه به ترکیب پوشش گیاهی و آسیب‌شناسی آن، راهکارهای بهینه‌سازی وضعیت آن و پایداری چشم‌انداز پارک اهمیت زیادی دارد و انجام فعالیت اجتماعی برای تأمین نیازهای بازدیدکنندگان را تأکید کردند. در مشهد استادی و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی و رتبه‌بندی مناطق شهری با تأکید بر کیفیت بوم‌شناسی پارک‌ها و فضای سبز به روش تاپسیس را انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مناطق ۵ و ۱۲ به‌ترتیب بهترین و نامطلوب‌ترین کیفیت بوم‌شناختی را داشتند. سپهوند (۲۰۲۱) در خرم‌آباد کیفیت بوم‌شناختی چشم‌انداز خیابان‌های شهری از دیدگاه شهروندان ارزیابی کرد. ایشان نتیجه گرفت که وجود فضای سبز و عنصرهای بوم‌شناسی نقش مهمی در رویدادهای مکانی و محورهای سبز شهری دارند و کاستی در ارتقاء کیفیت عملکرد نادیده گرفته شده است و شهروندان رضایت نداشته‌اند.

در نهایت می‌توان گفت که برای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی از رویکردهای مختلفی استفاده شده است. با بررسی پژوهش‌های انجام شده در ایران مشخص است که تاکنون در مقیاس آبخیز، ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی انجام نشده است. با توجه به محدودیت‌ها و ظرفیت سرزمین، یکپارچگی و رابطه‌های بوم‌شناختی میان اجزاء مختلف آن به‌خاطر تشدید فعالیت‌های انسانی آسیب‌پذیر به‌نظر می‌رسد. از آنجایی که دانش بوم‌شناختی پیش‌نیاز



شکل ۱- موقعیت مکانی آبخیز نیر در استان اردبیل.

Figure 1- Location of Nir watershed in the Ardabil Province.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های گیتهاشناسی و اقلیمی زیرآبخیزهای نیر (زارعی و همکاران ۲۰۲۰).

Table 1- Some physiographic and climatic characteristics of Nir sub-watersheds (Zarei et al. 2020).

Sub-watershed	Area (km ²)	Perimeter (Km)	Mean height (m)	Mean rainfall (mm)	Drainage density (Km/Km ²)	Evaporation and transpiration (mm)	Land use
1	0.62	3.37	1578.89	338.72	2.07	74	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- semi-dense grassland
2	3.63	9.74	1648.38	342.65	1.24	177	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- semi-dense grassland- rural areas
3	46.88	34.43	1766.81	349.68	1.09	216	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- semi-dense grassland- rural areas- dense rangeland - poor bush land
4	28.34	21.99	1804.84	351.95	0.87	63	Bare land- irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- semi-dense grassland - rural areas - dense rangelands
5	17.56	18.28	1913.36	358.30	1.07	226	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- dense rangelands
6	33.65	25.20	2065	367.22	1.57	237	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- dense rangelands- poor bush land
7	15.03	19.37	1747.38	348.52	0.98	137	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangeland with semi-dense cover- rural areas- dense rangeland
8	43.22	35.85	2129	370.97	1.32	241	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- dense rangelands - poor bush land
9	80	47.16	1920	358.70	1.30	216	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- dense rangelands - poor bush land- semi-dense grassland
10	88.85	45.12	1965	361.31	1.71	222	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- urban areas- dense rangelands - water bodies
11	21.53	27.49	1733.78	347.77	1.29	140	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- urban areas
Total	379.31	85.29	1919.13	358.59	1.32	86.41	Irrigation farming- irrigation farming and orchard- rangelands with semi-dense cover- rural areas- urban areas- semi-dense rangelands- water bodies- bare land- poor shrub land- semi-dense grassland

روش پژوهش

متغیرهای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی

در این پژوهش چارچوبی مفهومی برای پایش کیفیت بوم‌شناختی با استفاده از عملکرد بوم‌سازگان و شرایط محیطی توسعه داده شد. در این چارچوب از نه متغیر استفاده شد. این متغیرها نشان‌دهنده‌ی سه عملکرد حفظ، پشتیبانی و تنظیم بوم‌سازگان هستند. این متغیرها به شرح زیر هستند:

شاخص بهنجار شده‌ی اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)
 شاخص بهنجار شده‌ی اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) به‌عنوان معیاری برای تعیین سبزی‌نگی پوشش گیاهی است (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). این شاخص اکثراً برای مقیاس‌بندی غنای گونه (وانگ و گامون ۲۰۱۹) و تا حدی به‌دلیل ارتباط شناخته شده میان بهره‌وری و تنوع زیستی استفاده می‌شود (ژانگ و همکاران ۲۰۱۲، اوهری و همکاران ۲۰۱۷). بر این اساس، در این پژوهش از NDVI به‌عنوان شاخصی به‌عنوان نماینده‌ی تنوع زیستی در بحث کیفیت بوم‌شناختی استفاده شده است. براساس کیفیت تصویرهای ماهواره‌ای در سال ۱۳۹۸، سه تصویر با حداکثر پوشش گیاهی و نبودن پوشش ابر در منطقه‌ی مطالعه شده، از ماهواره‌ی لندست ۸ انتخاب و دریافت شد. تصویرهای ماهواره‌ای باندهای تصویر به‌وسیله‌ی نرم‌افزار ENVI 5.3 به‌شکل سه باند مختلف تهیه شد و سه رنگ قرمز، سبز و آبی به هر باند، ترکیب شد. برای اطمینان از انجام تصحیح هندسی، صحت تصویرها از روش مقایسه‌ی تصویرها با نقشه‌های زمین منبع تأیید شد. پردازش تصویرهای ماهواره‌ای مجموعه داده‌های گروه لندست ۸ به صورت تصحیح‌های تشعشع‌سنجی جوی با استفاده از دستورالعمل Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis (of Spectral Hypercube, FLAASH) با نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. باندهای ۴ و ۵ به محیط نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8 و TerrSet فراخوان شدند. در نهایت اندازه‌های NDVI در سطح زیرآبخیزها با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

Red: باند قرمز، NIR: باند مادون قرمز نزدیک است.

نسبت پوشش گیاهی (FVC)

نسبت پوشش گیاهی^{۱۵} (FVC) یک متغیر مهم در بررسی تعادل بوم‌سازگان، فرسایش خاک و تغییرات آب

و هوایی است که اغلب برای ارزیابی و نظارت بر نابودی پوشش گیاهی و بیابان‌زایی استفاده می‌شود. نسبت پوشش گیاهی به‌طور مستقیم نشان‌دهنده‌ی حفظ حاصل‌خیزی خاک از راه جلوگیری از فرسایش است (ریکوسکی و فورسلا ۱۹۹۸، تانگ و همکاران ۲۰۲۰). سنجش از دور تنها راه ممکن برای برآورد نسبت پوشش گیاهی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است. در این پژوهش در تصویرهای NDVI، پیکسل‌ها نماینده‌ی قسمت‌های پوشیده شده با گیاه و بدون پوشش گیاهی هستند. فرض بر این است که NDVI هر پیکسل از دو قسمت با پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی تشکیل شده است (لی و همکاران ۲۰۰۴، سوری و همکاران ۲۰۲۱). بر این اساس، نسبت پوشش گیاهی با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه شد.

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

NDVImax و NDVImin: به ترتیب حداقل و حداکثر اندازه‌ی NDVI است.

شاخص سطح برگ (LAI)

شاخص سطح برگ (LAI) یک شاخص مهم زیستی-فیزیکی گیاهی است که شامل اطلاعات گسترده‌ای برای رفتار پویای بهره‌وری بوم‌سازگان، آب و هوا و پستی‌بلندی است. همچنین این شاخص کمی برای بیان اندازه‌ی سبزی‌نگی گیاه به سطح سایه‌انداز آن است (عندلیبی و همکاران ۲۰۲۱). این شاخص معرف مجموع مساحت یک طرف برگ گیاهان در واحد سطح زمین است که به صورت یک عدد و بدون واحد نشان داده می‌شود (عدل ۲۰۰۷). از آنجایی که LAI نماینده‌ی رشد گیاه است، اغلب برای تعیین کمیت تولید فتوسنتز گیاه، تبخیر و تعرق، تبادل انرژی سطح زمین میان بوم‌سازگان و جو و تولید خالص اولیه استفاده می‌شود (عدل ۲۰۰۷، جعفری‌صیادی و همکاران ۲۰۱۸، کیو و ژوانگ ۲۰۱۸). جونخری و همکاران (۲۰۰۴) معتقدند که برآورد LAI برای بسیاری از بررسی‌های مربوط به جو ضروری است و از آن به‌عنوان یک مؤلفه بحرانی که واکنش تاج پوشش گیاهان نسبت به تغییرات جهانی محیط زیست را به‌خوبی نشان می‌دهد، استفاده می‌شود (عدل ۲۰۰۷). شاخص سطح برگ (LAI) با استفاده از رابطه‌ی ۳، از سامانه‌ی GEE^{۱۶} برآورد شد. (عندلیبی و همکاران ۲۰۲۱).

15 - Fractional vegetation coverage (FVC)

16 - Google Earth Engine

شد. شاخص رطوبت با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شد (اویانگ و همکاران ۲۰۲۱).

(۴)

$$MI = 100 \times \left(\frac{P}{PET} - 1 \right)$$

P: بارش (میلی‌متر)، ET: تبخیر و تعرق است. داده‌های اقلیمی مربوط به آبخیز نیر از ایستگاه هواشناسی نیر برای دوره‌ی آماری ۱۳۹۳-۱۳۶۰ تهیه شد. هم‌چنین، نقشه‌ی تبخیر و تعرق از اطلاعات سنجش از دور MOD16A3 با اندازه‌ی سلولی ۵۰۰ متر تهیه شد. این دستورالعمل مبتنی بر معادله‌ی پنمن-مونته‌یث^{۱۷} است. برای اجرای دستورالعمل از داده‌های هواشناسی روزانه به‌همراه طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS) سنجش از دور مانند ویژگی‌های پویای گیاهی، آلبدو و پوشش زمین استفاده می‌شود (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a3v006/>).

شاخص دمای سطح زمین (LST)

دمای هوا از جمله عامل‌هایی است که تحت تأثیر شرایط محیطی است و یکی از شاخص‌های ارزیابی کیفیت محیط زیست به‌شمار می‌رود. منبع اصلی و رایج داده‌های اقلیمی مانند دمای هوا، ایستگاه‌های هواشناسی هستند. در حالی که این ایستگاه‌ها فقط آمار نقاط خاصی را دارند (دشتکیان و دهقانی ۲۰۰۸). روش‌های مختلفی مانند رابطه‌ی وایازی با بلندی، میانگین وزنی فاصله‌ی معکوس^{۲۰} و کریجینگ برای برآورد دمای سطح زمین به‌وسیله‌ی پژوهش‌گران استفاده شده است. اما با توجه به این که دمای سطح زمین^{۲۱} (LST) وابستگی زیادی به نوع پوشش آن دارد، بنابراین روش‌های مزبور نمی‌توانند دما را به درستی برآورد کنند (یانگ و همکاران ۲۰۰۴). روش‌های مختلف درون‌یابی زمانی دقت قابل قبولی دارند که داده‌های ماهواره‌ای پوشش سطح زمین نیز در نظر گرفته شود. در این پژوهش از دمای سطح زمین به‌عنوان شاخص مهم تنظیم گرما استفاده شد که از نتایج فتح‌العلومی و همکاران (۲۰۲۰) برگرفته شده است. فتح‌العلومی و همکاران (۲۰۲۰) برای برآورد شاخص دمای سطح زمین از تصویرهای ماهواره‌ای سایت USGS در سال ۱۳۹۸ استفاده کردند. این پژوهشگران از داده تولیدی بخار آب (MOD07) با وضوح ۵۰۰۰ متر برای برآورد LST بر مبنای باندهای حرارتی تصویرهای لندست ۸ استفاده کردند.

$$LAI = 3.618 \times EVI - 0.118 \quad (۳)$$

EVI: شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته است.

شاخص تولید خالص اولیه (NPP)

تولید خالص اولیه^{۱۷} (NPP) از شاخص‌های مهم ارزیابی تولید بوم‌سازگان‌های طبیعی است که به‌عنوان نتیجه‌ی تبادل ذخیره‌ی کربن میان هواکره و زیست‌کره در نظر گرفته می‌شود. برای نگهداری سایر خدمات بوم‌سازگان NPP، ضروری است (گارلند و همکاران ۲۰۲۱). اندازه‌ی تولید گیاهان در هر بوم‌سازگان تحت تأثیر عامل‌های اقلیمی هم‌چون بارش، دما، انرژی خورشیدی، شرایط خاک و موجودات زنده است که تغییرات فصلی و سالانه‌ی زیادی دارد (ایمهوف و همکاران ۲۰۰۴). اندازه‌ی NPP از نظر اندازه‌ی ماده برای سطح‌های دوم زنجیره غذایی اهمیت دارد، افزون بر این نشانه‌ای از سلامت و تعادل بوم‌شناختی و منبع کربن تثبیت شده است (کاستانزا ۲۰۱۲). در این پژوهش برای برآورد تولید خالص اولیه از پژوهش دادجو و همکاران (۲۰۲۱) استفاده شد. به این صورت که، پس از مشخص شدن مکان نقاط نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف منطقه‌ی مطالعه شده، سه خط نمونه با فاصله‌ی ۵۰ متر (خط نمونه اول به‌صورت تصادفی و دو خط نمونه بعدی به‌صورت نظام‌مند) انتخاب شدند. سپس با در نظر گرفتن ۱۰ کرت یک مترمربعی با فاصله‌های ۱۰ متر در امتداد هر خط نمونه، تولید خالص اولیه با روش قطع و توزین به‌دست آمد. سپس رابطه‌های مدل‌سازی میان عامل‌های تأثیرگذار و تولید خالص اولیه برآزش داده شد و با استفاده از بهترین رابطه، تولید خالص اولیه برای کل آبخیز برآورد شد (دادجو و همکاران ۲۰۲۱).

شاخص رطوبت (IM)

گیاهان نسبت به عامل‌های محیطی از جمله دما و اندازه‌ی بارش و رطوبت به‌صورت ترکیبی واکنش نشان می‌دهند. عمل فتوسنتز در گیاه که منجر به تولید کربوهیدرات می‌شود با افزایش دما افزایش می‌یابد. از طرفی تبخیر و تعرق در گیاهان تحت تأثیر اندازه‌ی دما و نزولات جوی و رطوبت است و با افزایش آن‌ها اندازه‌ی تولید خالص اولیه در گیاهان افزایش می‌یابد (جعفری ۲۰۱۴). در این پژوهش از شاخص رطوبت^{۱۸} به‌عنوان شاخص نهفته (بالقوه) برای تنظیم آب‌شناختی استفاده

17 - Net primary productivity (NPP)

18 - Moisture index (IM)

19 - Penman-Monteith

20 - Inverse distance weighted (IDW)

21 - Land surface temperature (LST)

فرسایش خاک

تغییر کاربری زمین‌ها می‌تواند اندازه‌ی فرسایش را افزایش دهد. فرسایش خاک دلیل اصلی نابودی و هدررفتن منابع زمین است که می‌تواند کیفیت بوم‌شناختی یک آبخیز را تحت تأثیر قرار دهد (لوگسدون و چابی ۲۰۱۳). نگهداشت خاک به‌عنوان یک خدمت بوم‌سازگانی به‌توان بوم‌سازگان‌ها در حفظ خاک و مهار کردن فرسایش بستگی دارد. در این پژوهش برای برآورد اندازه‌ی فرسایش ویژه‌ی سالانه از مدل EPM^{22} استفاده شد. مدل ظرفیت فرسایش (EPM) برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ در کشور یوگسلاوی ارائه شد. این مدل به‌عنوان ابزاری برای برآورد اندازه‌ی رسوب و فرسایش خاک به‌کار گرفته شده است. فرسایش به صورت کمی و کیفی با استفاده از این مدل و از رابطه‌ی ۵ محاسبه شد و نقشه‌ی ضریب شدت فرسایش به‌دست آمد. هر چه اندازه‌ی فرسایش خاک کم‌تر باشد، ظرفیت نگهداشت خاک بیشتر است (اسمعلی‌عوری و عبداللہی ۲۰۱۱).

$$Z = Y \cdot X_a (\Psi + 1^{0.5}) \quad (5)$$

Ψ : ضریب فرسایش آبخیز (بدون واحد)، X_a : ضریب استفاده از زمین (بدون واحد)، Y : ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش (بدون واحد)، I : شیب متوسط آبخیز در واحدهای مختلف زمین‌ها و یا در شبکه‌های ایجاد شده در نقشه (بر حسب درصد) است. اندازه‌های ضریب حساسیت خاک به فرسایش، ضریب استفاده از زمین و شرایط فرسایش آبخیز براساس جدول‌های مدل EPM به‌دست آمد (اسمعلی‌عوری و عبداللہی ۲۰۱۱).

شاخص پیوستگی بوم‌شناختی

براساس پژوهش‌های هاشمی و همکاران ۲۰۱۵، علائی و همکاران ۲۰۲۰ و زندسلیمی و بهرامی ۲۰۲۲، تکه‌شدگی سیمای سرزمین، دلیل اصلی ازبین‌رفتن گونه‌های گیاهی و جانوری است. تکه‌شدگی سیمای سرزمین به‌وسیله‌ی تغییر کاربری زمین‌ها، جاده‌کشی، خطوط راه‌آهن و بسیاری از موردهای دیگر منجر به آلودگی محیط‌زیست، تغییر شرایط آب و هوای محلی و کاهش کیفیت آب می‌شود که در نهایت موارد مزبور باعث اختلال در خدمات بوم‌سازگان در سطح محلی می‌شود.

در این پژوهش، برای محاسبه‌ی شاخص پیوستگی بوم‌شناختی پس از تهیه‌ی نقشه‌ی کاربری زمین‌ها (فتح‌العلومی و همکاران ۲۰۲۰) از نرم‌افزار Fragstats برای محاسبه‌ی سنجه‌های تعداد لکه NP^{23} ، تراکم لکه PD^{24} ، حاشیه‌ی کل TE^{25} ، شاخص به‌هم پیوستگی (Cohesion)، شاخص بزرگ‌ترین لکه LPI^{26} و تراکم حاشیه ED^{27} استفاده شد. اندازه‌ی شاخص LPI صفر تا ۱۰۰ است یعنی هر چه اندازه‌ی این معیار به عدد ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی کیفیت بوم‌شناختی خوب است. سپس از میانگین هندسی این سنجه‌ها شاخص پیوستگی بوم‌شناختی محاسبه شد.

شاخص نگهداشت رواناب

تنوع بوم‌شناختی و جغرافیایی در بوم‌سازگان‌های آبی، قابل توجه است. توانایی آسیب‌پذیری بوم‌سازگان‌های آبی در برابر تغییرات آب و هوایی به حساسیت و رویارویی این بوم‌سازگان با محرک‌های متغیر آب و هوایی و ظرفیت آن‌ها برای انطباق با چنین تغییراتی بستگی دارد. رواناب سطحی و کارایی آبیاری تحت تأثیر نفوذ آب به خاک است. ذخیره‌ی سطحی یکی از متغیرهای مؤثر بر اندازه‌ی رواناب و نفوذ است که به عامل‌هایی هم‌چون شیب زمین، پوشش گیاهی و زبری خاک بستگی دارد. در این پژوهش، برای برآورد اندازه‌ی نگهداشت رواناب در آبخیز نیر از مدل InVEST استفاده شد. براساس این مدل متغیرهای بارش، کاربری زمین‌ها، گروه آب‌شناختی خاک، CN خاک منطقه‌ی مطالعه شده تعیین شد و به‌عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار استفاده شد. برای تهیه‌ی نقشه‌ی گروه آب‌شناختی خاک آبخیز نیر از سایت جهانی Soilgrids.Org ابتدا درصد رس، شن و لای دریافت شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار SAGA 2.1.1 سه لایه‌ی درصد شن، رس و لای با هم ترکیب و نقشه‌ی بافت خاک تهیه شد. در نهایت با استفاده از نقشه‌ی بافت خاک و دستورالعمل‌های موجود (مهدوی ۲۰۰۹) گروه‌های آب‌شناسی خاک آبخیز نیر مشخص شد. هم‌چنین برای برآورد CN از نرم‌افزار ایرانی CN Calculator استفاده شد. برپایه‌ی این نرم‌افزار برای هر نوع کاربری زمین‌ها در هر گروه آب‌شناختی خاک و با تعیین رطوبت منطقه، اندازه‌ی CN به‌دست آمد. با توجه به این‌که این نرم‌افزار ایرانی است، رطوبت منطقه به سه شکل مرطوب، متوسط و

22 - Erosion potential model (EPM)

23 - Number of patches

24 - Patch density

25 - Mean patch size

26 - Largest patch index

27 - Edge density

در جایی که وزن ارزیابی بیش از حد ذهنی و منفی باشد یا جهت مثبت شاخص‌ها به هدف کل نامشخص باشد، از این روش استفاده می‌شود (فانگ و همکاران ۲۰۱۰، لیو و همکاران ۲۰۱۹). مزایای استفاده از PPM عملکرد قوی، اعتبار و دقت زیاد است (جیانگ و همکاران ۲۰۱۱، دنگ و همکاران ۲۰۱۳). بدون در نظر گرفتن تداخل‌های مرتبط با عامل‌های ذهنی، با استفاده از مدل PPM، نتایج واقعی و قابل‌قبولی به دست می‌آید (لیو و همکاران ۲۰۱۹، اوپانگ و همکاران ۲۰۲۱). از این روش، روش ارزیابی PPM، در تجزیه و تحلیل موضوعی نمونه‌های کوچک مزایای طبیعی دارد (لیو و همکاران ۲۰۱۹). یکی دیگر از مزایای بارز این روش در حذف اثرات هم‌بستگی و خودهمبستگی متغیرهای بررسی شده در یک موضوع خاص است و نگرانی‌های مهم در انتخاب متغیرهای مختلف را کاهش می‌دهد (اوپانگ و همکاران ۲۰۲۱). ویژگی‌های مزبور باعث می‌شود که این روش در ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی ارزش زیادی داشته باشد. این مدل با استفاده از زبان اسکریپت Matlab 2018b اجرا شد.

محاسبه‌ی شاخص کیفیت بوم‌شناختی (EQI)

بردار پیش‌بینی a که همان وزن به‌دست آمده از PPM است تعیین شد و سپس با روش مجموع وزنی اندازه‌های معیارشده متغیرها (x) در سطح زیرآبخیز، EQI با استفاده از رابطه‌ی ۸ محاسبه شد.

$$EQI_j = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot a_j \right) \times 100 \quad (8)$$

پس از محاسبه‌ی EQI، اندازه‌های آن به پنج طبقه‌ی مساوی صفر و یک دسته‌بندی شد. این پنج طبقه شامل خیلی کم (۰/۲۰ - ۰/۴۰)، کم (۰/۴۰ - ۰/۶۰)، متوسط (۰/۶۰ - ۰/۸۰)، زیاد (۰/۸۰ - ۱/۰۰) و خیلی زیاد (۱/۰۰ - ۰/۸۱) بودند. سپس نقشه‌ی توزیع مکانی این شاخص در سطح آبخیز نیر در محیط ArcGIS 10.8 رسم شد.

نتایج و بحث

نتایج محاسبه و پهنه‌بندی متغیرهای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی

نتایج محاسبه‌ی نه متغیر اصلی استفاده شده برای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی دامنه‌ی تغییرپذیری بسیار زیاد متغیرهای استفاده شده در سطح کل آبخیز

خشک طبقه‌بندی شد. لازم به ذکر است که استان اردبیل در مقایسه با استان‌های شمال (مرطوب) و جنوب (خشک) کشور در منطقه‌ای با رطوبت متوسط است.

معیارسازی داده‌ها

برای مقایسه‌ی صحیح متغیرهای استفاده شده که بزرگی و واحدهای متفاوت داشتند، ابعاد آن‌ها حذف شد. با توجه به اینکه متغیرهای مطالعه شده مفهوم‌های مثبت و منفی در ارتباط با کیفیت بوم‌شناختی بودند، معیارسازی با روش حداکثر انجام شد. بر این اساس، ابتدا رابطه‌ی مثبت و منفی هر کدام از متغیرهای مطالعه شده با کیفیت بوم‌شناختی بررسی شد و سپس با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای متغیرهای دارای اثر مثبت و منفی بر EQI انجام شد (سعدالدین و همکاران ۲۰۱۶).

$$Index = \frac{Score - lowest\ score}{highest\ score - lowest\ score} \quad (6)$$

$$Index = 1 - \frac{Score - lowest\ score}{highest\ score - lowest\ score} \quad (7)$$

Score: اندازه‌ی داده‌های معیارشده‌ی واقعی، Lowest Score: حداقل اندازه‌ی داده‌ی معیارشده، Highest Score: حداکثر اندازه‌ی معیارشده‌ی متغیر مربوطه است.

وزن‌دهی

هم‌اکنون روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی متغیرها وجود دارد که یکی از روش‌های کاربردی در ارزیابی تغییرات کیفیت بوم‌شناختی، مدل تصور تعقیبی (PPM) است (اوپانگ و همکاران ۲۰۲۱). اصطلاح «تصور تعقیبی» اولین بار به‌وسیله‌ی فریدمن و توکی (۱۹۷۴) برای کشف ساختار یا ویژگی داده‌هایی با ابعاد بزرگ مطرح شده است. مدل PPM مبتنی بر تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی^{۲۸} (EDA) بدون پیش‌فرض‌های مصنوعی است (جونز و سیبسون ۱۹۸۷، لیو و همکاران ۲۰۱۹). یک روش برای تشخیص «ساختار» پیش‌بینی نشده، خوشه‌ها، نقطه‌های پرت، چولگی، تمرکز نزدیک یک خط یا منحنی در داده‌های دو متغیره است. این روش به تغییر داده هر شاخص نسبتاً حساس است و ارزیابی را با مقایسه‌ی بزرگی اندازه‌های پیش‌بینی شده انجام می‌دهد.

این شاخص در سطح زیرآبخیزهای نیر نشان داد که حداقل و حداکثر اندازه‌ی آن به ترتیب در زیرآبخیز ۴ (۰/۲۲) و در زیرآبخیز ۱ (۰/۷۰) بود. میانگین تولید خالص اولیه نیز در کل آبخیز ۰/۲۸ بود و حداقل اندازه‌ی آن در زیرآبخیز ۱۰ (۰/۳) و حداکثر آن در زیرآبخیز ۱ (۰/۴۱) مشاهده شد. همچنین میانگین شاخص رطوبت ۳۱۴/۹۸ به دست آمد که حداقل و حداکثر اندازه‌های آن به ترتیب، ۳۳۳۲۶/۴۶ (زیرآبخیز ۱) و ۴۳۰۹۹/۸۴ (زیرآبخیز ۸) بود (جدول ۲، شکل ۲).

محاسبه‌های دمای سطح زمین (LST) نشان داد که میانگین آن در کل آبخیز مطالعه شده ۴۰/۳۴ بود و حداقل اندازه‌ی آن در زیرآبخیز ۱ (۳۶/۵۷) و حداکثر اندازه‌ی آن در زیرآبخیز ۷ (۴۳/۰۸) مشاهده شد. با محاسبه‌ی معیارهای لازم برای برآورد اندازه‌ی فرسایش خاک بر پایه‌ی مدل EPM مشخص شد که اندازه‌ی کل فرسایش ویژه برای این آبخیز ۴۲۱/۴۱ مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال بود. حداقل فرسایش در زیرآبخیز ۸ (۱۴۳/۸۴) مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال) و حداکثر آن در زیرآبخیز ۲ (۱۳۹۹/۷۸) مترمکعب بر کیلومتر مربع در سال) برآورد شد. نتایج برآورد فرسایش خاک با مدل EPM با نتایج پژوهش

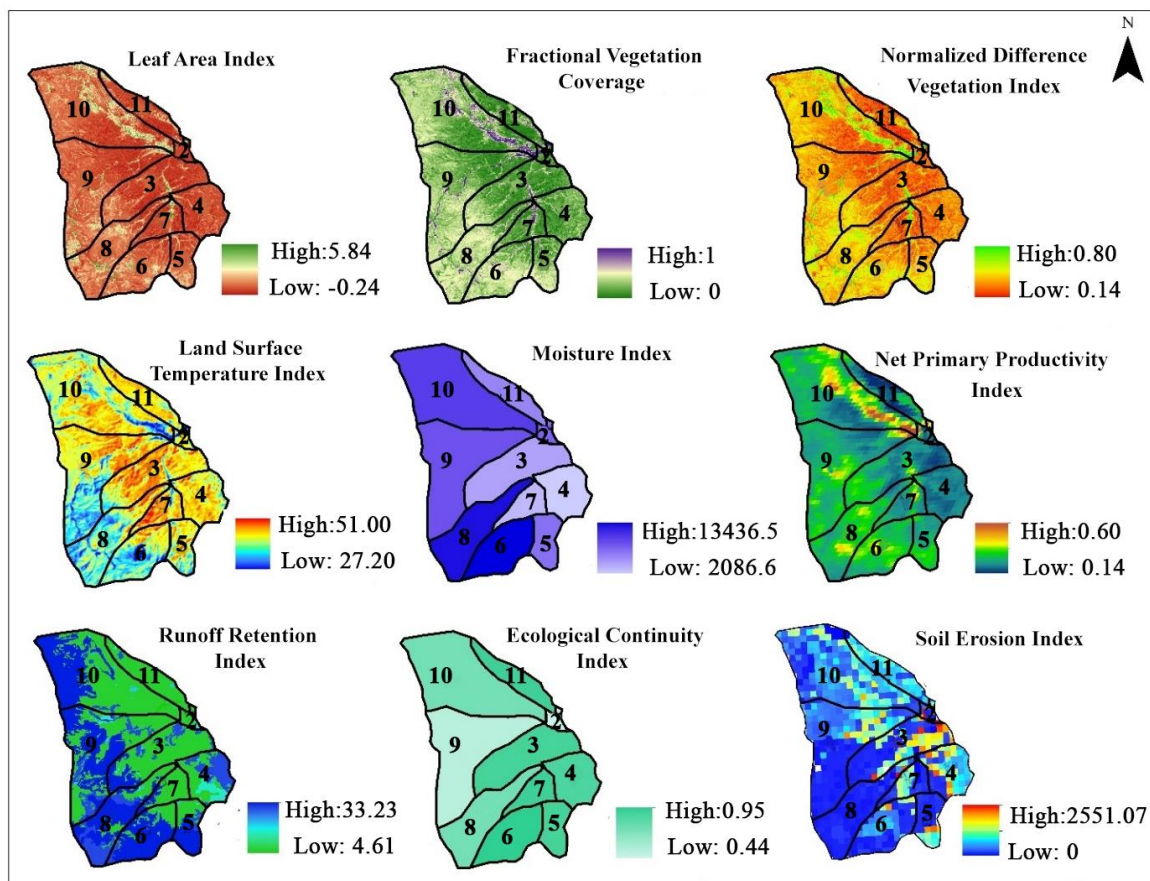
نیر بود. اما به طور کلی، حداکثر میانگین اندازه‌های واقعی متغیرهای اول تا چهارم (LAI، FVC، NDVI، NPP) و حداقل میانگین LST در زیرآبخیز ۱ بود. هر پنج متغیر منعکس کننده‌ی ساختار و عملکرد پوشش گیاهی در راستای بهبود کیفیت بوم‌شناختی از دیدگاه‌های مختلف بودند. در حالی که در زیرآبخیز ۱۱ این پنج متغیر وضعیت عکس داشتند. سایر شاخص‌ها به جز پیوستگی بوم‌شناختی (EC) نیز در زیرآبخیز ۱ در وضعیت متوسط ارزیابی شدند. وضعیت زیرآبخیز ۶ از نظر تمام متغیرهای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی به جزء شاخص نگهداشت رواناب نیز، مناسب ارزیابی شد.

با برآورد NDVI برای زیرآبخیزهای نیر مشخص شد که اندازه‌ی متوسط آن در کل آبخیز نیر ۰/۳۴ است. همچنین، حداکثر اندازه‌ی NDVI، ۰/۴۶ در زیرآبخیز ۱ در شرق آبخیز بود و حداقل اندازه‌ی آن ۰/۲۷ در زیرآبخیز ۱۱ مشاهده شد. نتایج برآورد نسبت پوشش گیاهی برای کل آبخیز نشان داد که میانگین، حداکثر و حداقل اندازه‌ی این شاخص به ترتیب ۰/۳۳، ۰/۵۷ (در زیرآبخیز ۱) و ۰/۲۳ (در زیرآبخیز ۱۱) بود (جدول ۲، شکل ۲). افزون بر این، اندازه‌ی متوسط شاخص سطح برگ ۰/۳۳ به دست آمد. نتایج تحلیل

جدول ۲- اندازه‌های واقعی و معیار شده‌ی میانگین متغیرهای مطالعه شده در زیرآبخیزهای نیر.

Table 2- Actual and standardized mean values of the studied variables in the Nir sub-watersheds.

Sub-watershed	Normalized difference vegetation index (NDVI)	Fractional vegetation coverage (FVC)	Leaf area index (LAI)	Net primary productivity index (NPP)	Moisture index (IM)	Land surface temperature Index (LST)	Soil erosion (m ³ /km.year)	Ecological integrity	Runoff retention index	
Actual values	1	0.46	0.57	0.70	0.41	33326.46	36.57	873.91	0.46	7.15
	2	0.31	0.30	0.29	0.29	34303.77	440.21	1399.78	0.44	0.14
	3	0.29	0.26	0.24	0.25	36198.09	42.48	5557.07	0.89	9.21
	4	0.29	0.25	0.22	0.22	36824.5	41.88	704.43	0.87	10.75
	5	0.35	0.35	0.34	0.28	38691.82	40.30	461.15	0.89	12.39
	6	0.37	0.39	0.40	0.30	41688.71	38.17	268.74	0.95	14.03
	7	0.29	0.26	0.26	0.27	35871.01	43.08	428.34	0.91	8.33
	8	0.38	0.40	0.42	0.29	43099.84	38.21	143.84	0.74	0.20
	9	0.34	0.34	0.34	0.27	38885.58	39.73	327.98	0.50	11.59
	10	0.36	0.38	0.40	0.3	39784.08	40.34	446.50	0.74	10.44
	11	0.27	0.23	0.24	0.22	35669.68	41.98	568.96	0.91	6.68
Standardized values	1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.43	0.00	0.42	0.46	0.50
	2	0.21	0.21	0.15	0.37	0.50	0.56	0.00	0.44	0.00
	3	0.11	0.09	0.03	0.16	0.18	0.91	0.67	0.89	0.65
	4	0.11	0.06	0.00	0.00	0.00	0.82	0.55	0.88	0.76
	5	0.42	0.35	0.25	0.32	0.44	0.57	0.75	0.89	0.88
	6	0.53	0.47	0.37	0.42	1.00	0.25	0.90	0.95	1.00
	7	0.11	0.09	0.07	0.26	0.09	1.00	0.77	0.91	0.59
	8	0.58	0.50	0.40	0.37	0.96	0.25	1.00	0.74	0.00
	9	0.37	0.32	0.24	0.26	0.60	0.49	0.85	0.51	0.82
	10	0.47	0.44	0.38	0.42	0.72	0.58	0.76	0.75	0.74
	11	0.00	0.00	0.05	0.00	0.33	0.83	0.66	0.92	0.47



شکل ۲- تغییرات مکانی شاخص‌های بررسی شده در ارزیابی EQI در زیرآبخیزهای نیر.

Figure 2- Spatial changes of the investigated indicators in EQI assessment at the Nir sub-watersheds.

نیر، زیرآبخیز ۹ بیش‌ترین تعداد لکه (۱۸۱) را داشت. با این‌که زیرآبخیز ۱۰ در مقایسه با زیرآبخیز ۹ مساحت بیش‌تری داشت، اما زیرآبخیز ۹ لکه‌های فراوان‌تری در مقایسه با زیرآبخیز ۱۰ داشت. از طرف دیگر، زیرآبخیز ۱ با کم‌ترین تعداد لکه (۴) ارزیابی شد (جدول ۳). واژه‌ی تراکم به‌معنای تعداد در واحد سطح است. رابطه‌ی میان تراکم لکه (PD) و اتصال لکه معکوس است، به این معنی که پیوستگی در شرایطی کاهش پیدا می‌کند که تراکم لکه بیش‌تر باشد (کانگ و همکاران ۲۰۱۳). نتایج محاسبه‌های سنجش تراکم لکه (PD)، در سطح کل آبخیز نیر نشان داد که اندازه‌ی کل این معیار ۴۸۶ متر در ۱۰۰ هکتار بود. حداقل و حداکثر اندازه‌ی آن به‌ترتیب در زیرآبخیزهای ۱ (۴ متر در ۱۰۰ هکتار) و ۹ (۱۸۱ متر در ۱۰۰ هکتار) به‌دست آمد (جدول ۳).

زارعی (۲۰۱۹) هم‌خوانی دارد (جدول ۲، شکل ۲). با محاسبه‌ی برخی از معیارهای لازم برای محاسبه‌ی پیوستگی بوم‌شناختی مشاهده شد که میانگین پیوستگی بوم‌شناختی در کل آبخیز نیر ۰/۴۳ بود. حداقل و حداکثر اندازه‌ی پیوستگی به‌ترتیب در زیرآبخیز ۲ (۰/۴۴) و ۴ (۰/۶۹۵) به‌دست آمد (جدول ۲، شکل ۲). محاسبه‌های انجام‌شده برای تمام سنجش‌های پیوستگی بوم‌شناختی در سطح زیرآبخیز در جدول ۳ نشان داده شده است. بررسی نتایج محاسبه‌های معیار تعداد لکه (NP) در سطح آبخیز نیر نشان داد که در کل این آبخیز ۴۸۶ لکه وجود داشت. این معیار با کیفیت بوم‌شناختی رابطه‌ی منفی داشت، یعنی هر چه تعداد لکه بیش‌تر باشد به‌معنی نداشتن پیوستگی و به‌دنبال آن نداشتن کیفیت بوم‌شناختی خوب است. در سطح زیرآبخیزهای

جدول ۳- اندازه‌های سنجه‌های استفاده شده در محاسبه‌ی شاخص پیوستگی بوم‌شناختی در سطح زیرآبخیزهای نیر.

Table 3- The values of metrics used in calculation of the ecological integrity index at the Nir sub-watersheds level.

Sub-watershed	NP (No.)	PD (m per 100 ha)	TE (m)	COHESION (dimensionless)	LPI (%)	ED (m per 100 ha)	Ecological integrity index
1	4	6.35	1870	87.19	48.07	92.72	0.46
2	23	6.5	11880	87.9	52.73	33.62	0.44
3	72	1.53	90310	97.96	68.2	19.26	0.89
4	35	1.23	51150	97.31	53.62	18.06	0.87
5	22	1.26	25080	96.5	49.44	14.41	0.89
6	38	1.12	56210	97.79	71.95	16.66	0.95
7	27	1.79	28600	97.12	71.63	19.04	0.91
8	73	1.68	953.70	96.18	39.11	22.05	0.74
9	181	2.26	422110	95.05	18.85	30.25	0.50
10	97	1.09	184470	97.01	34.55	20.76	0.74
11	31	1.44	34430	96.56	65.33	16.01	0.91
Total	486	1.28	835560	97.61	22.33	22.03	0.43

است که اندازه‌ی عددی این معیار زمانی صفر می‌شود که در سطح زیرآبخیز هیچ حاشیه‌ای وجود نداشته باشد. بر این اساس کل زیرآبخیز از یک لکه‌ی بزرگ تشکیل می‌شود، در نتیجه زیرآبخیز مد نظر کیفیت بوم‌شناختی خوبی دارد (مک‌گاریگال ۲۰۰۲).

درنهایت، نتایج بررسی آخرین متغیر در ارزیابی EQI آبخیز نیر، نشان داد که اندازه‌ی متوسط نگهداشت رواناب در آبخیز نیر ۱۰/۹۸ مترمکعب بود. اندازه‌ی حداقل نگهداشت رواناب در زیرآبخیز ۱۱ (۰/۴ مترمکعب) و حداکثر اندازه‌ی آن در زیرآبخیزهای ۳، ۴، ۶، ۷ و ۸ (۳۳/۲۳ مترمکعب) بود.

نتایج وزن‌دهی متغیرها

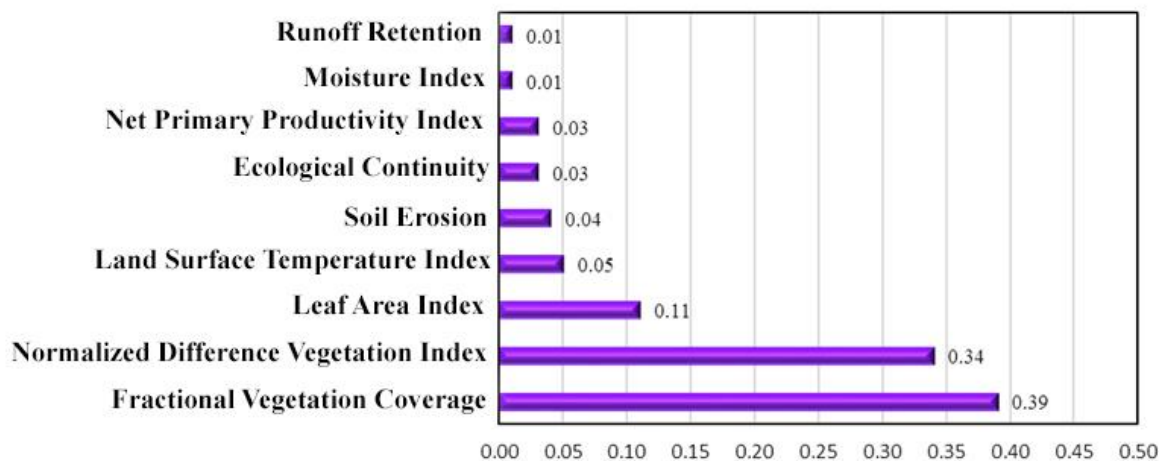
نتایج وزن‌دهی به‌دست آمده از کاربرد PPM نشان داد که شاخص نسبت پوشش گیاهی با وزن ۰/۳۹ بالاترین اهمیت را داشت (شکل ۳). هم‌چنین شاخص بهنجارشده‌ی اختلاف پوشش گیاهی با وزن ۰/۳۴ رتبه‌ی بعدی را داشت. کم‌ترین اهمیت نیز مربوط به شاخص‌های رطوبت و نگهداشت رواناب با وزن ۰/۰۱ بود. در این راستا، اوپانگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز از ۱۱ شاخص و مدل تصور تعقیبی برای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی استفاده کردند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که شاخص بهنجارشده‌ی اختلاف پوشش گیاهی و کارایی مصرف آب بیشترین و شاخص سطح برگ و نسبت بیوون در محاسبه‌ی EQI کم‌ترین وزن را داشتند. افزون بر این، اثرگذاری متغیرهای استفاده شده در زمینه‌های مختلف آب و خاک در آبخیز نیر توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. در پژوهش اصغری سراسکانرود و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش وزن‌دهی کریتیک مشخص شد که از میان هفت متغیر بررسی شده، تغییرات کاربری زمین‌ها (پوشش

حاشیه‌ی کل (TE) در پیوستگی بوم‌شناختی نوعی ماتریس نشان داده شده از سیمای سرزمین براساس ویژگی حاشیه‌ی لکه است، که اندازه‌ی گرایش مرکزی را در لکه‌ی مربوطه نشان می‌دهد (مک‌گاریگال ۲۰۰۱). نتایج برآورد شده‌ی حاشیه‌ی کل (TE) نشان داد که اندازه‌ی این سنجه برای کل آبخیز نیر ۸۳۵۵۶۰ متر بود. هم‌چنین، زیرآبخیز ۱ کمترین اندازه‌ی حاشیه‌ی کل لکه (۱۸۷۰ متر) و زیرآبخیز ۱۱ بیشترین اندازه‌ی آن (۳۴۴۳۰ متر) را داشت (جدول ۳). با بررسی سنجه‌ی به‌هم پیوستگی لکه (COHESION) که با کیفیت بوم‌شناختی رابطه‌ی مستقیم داشت، مشخص شد که اندازه‌ی کل این سنجه در کل آبخیز نیر ۹۷/۶۱ بود. حداقل و حداکثر اندازه‌ی پیوستگی به‌ترتیب در زیرآبخیزهای ۲ (۸۷/۹) و ۳ (۹۷/۹۶) لکه بود. شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) درصدی از سیمای سرزمین است که به‌وسیله‌ی بزرگ‌ترین لکه اشغال شده است. این سنجه با کیفیت بوم‌شناختی رابطه‌ی مستقیم دارد، یعنی در یک زیرآبخیز هر چه اندازه‌ی LPI بیش‌تر باشد، پیوستگی و کیفیت بوم‌شناختی نیز بهتر خواهد بود. نتایج محاسبه‌های LPI در سطح آبخیز نیر نشان داد که اندازه‌ی این سنجه برای کل آبخیز نیر ۲۲/۳۳٪ بود. حداقل و حداکثر اندازه‌ی آن به‌ترتیب در زیرآبخیز ۹ (۱۸/۸۵) و ۶ (۷۱/۹۵)٪ بود (جدول ۳).

برای نشان دادن بهتر عملکرد آبخیز از معیار تراکم حاشیه (ED) در محاسبه‌ی پیوستگی بوم‌شناختی استفاده می‌شود (مصطفی زاده و همکاران ۲۰۱۸). بررسی نتایج تراکم حاشیه نشان داد که اندازه‌ی این سنجه برای کل آبخیز نیر ۲۲/۰۳ متر در ۱۰۰ هکتار بود. هم‌چنین، اندازه‌ی حداقل و حداکثر آن به‌ترتیب در زیرآبخیزهای ۵ (۱۴/۴۱) متر در ۱۰۰ هکتار و ۱ (۹۲/۷۲) متر در ۱۰۰ هکتار بود. (جدول ۳). قابل ذکر

ترکیب متغیرهای زمینی و شاخص‌های طیفی، گزارش کردند که بلندی در میان متغیرهای زمینی (حالت اول) و ضریب گسیلندگی در میان شاخص‌های طیفی (حالت‌های دوم و سوم) به‌عنوان مهم‌ترین متغیرها بودند.

گیاهی) با بیش‌ترین وزن (۰/۱۶۴-۰/۱۶۵) در نهایت بیش‌ترین اثرگذاری را بر اندازه‌ی فرسایش خاک داشتند. هم‌چنین، فتح‌العلومی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی و مدل‌سازی کربن آلی خاک در سه حالت فقط مبتنی بر متغیرهای زمینی، فقط مبتنی بر شاخص‌های طیفی و



شکل ۳- وزن متغیرهای مطالعه شده.

Figure 3- The weight of the studied variables.

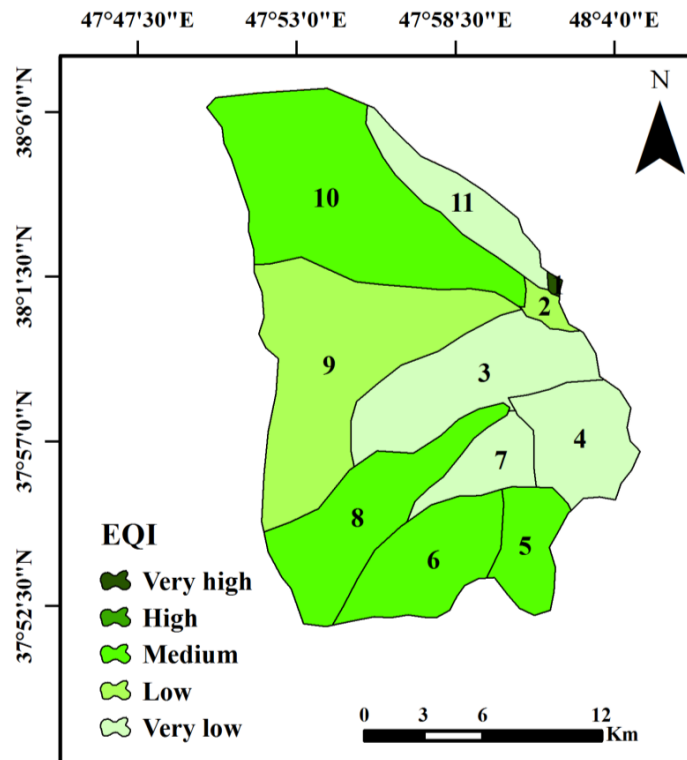
EQI کم و خیلی کم بود. نتایج این پژوهش با یافته‌های اسمعلی‌عوری و همکاران (۲۰۱۴) و اصغری‌سراسکانرود و همکاران (۲۰۱۸) در راستای طبقه بندی بخش غربی شهرستان نیر در طبقه‌ی پرخطر از نظر فرسایش خاک (یکی از متغیرهای ارزیابی کیفیت بوم‌شناختی سرزمین) مطابقت دارد. هم‌چنین اصغری‌سراسکانرود و همکاران (۲۰۱۸) بر تغییرات کاربری زمین‌ها (سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۶) در تشدید فرسایش خاک تأکید کرده‌اند. در نتایج پژوهش‌های فرخ‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) به ظرفیت و تهدید زیاد سیل در آبخیز نیر و پیرامون آن در اثر تغییر اقلیم و کاربری زمین‌ها اشاره شده است. آنها معتقدند که سیل به‌طور اساسی سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی و زیستی سرزمین و در نتیجه کاهش کیفیت بوم‌شناختی منطقه خواهد شد. یافته‌های فتح‌العلومی و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان‌گر توزیع غیریکنواخت کربن آلی خاک در سطح آبخیز نیر و پیرامون آن بوده است. آنها میانگین اندازه‌ی کربن آلی را ۰/۳٪ گزارش کردند.

نتایج محاسبه‌ی شاخص کیفیت بوم‌شناختی (EQI) نتایج محاسبه‌ی شاخص کیفیت بوم‌شناختی نشان داد که دامنه‌ی تغییرات EQI، از ۰/۱۰ تا ۰/۹۰ است (جدول ۴). زیرآبخیز ۱۱ (EQI=۰/۱۰) کم‌ترین کیفیت بوم‌شناختی را داشت و در وضعیت نامناسبی بود. این در حالی است که زیرآبخیز ۱ به‌دلیل وضعیت خوب پوشش گیاهی (EQI=۰/۹۰) در سطح خوبی بود (جدول ۴) و شکل ۴). بنابراین قسمت کوچکی از شرق آبخیز نیر کیفیت بوم‌شناختی بهتری در مقایسه با سایر قسمت‌ها داشت. با توجه به پهنه‌بندی نشان داده شده در شکل ۴، قسمت‌های شمال شرقی و جنوب شرقی کیفیت بوم‌شناختی ضعیف است. در این پژوهش در نهایت به‌ترتیب ۱، صفر، ۴۸، ۲۲ و ۲۹٪ از مساحت آبخیز نیر از نظر EQI به‌ترتیب در طبقه‌های خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم بودند. این یافته‌ها بیان‌گر آن است که سطح قابل توجهی از آبخیز نیر در طبقه‌های EQI زیاد و خیلی زیاد نبود. در حالی که حدود نیمی از مساحت آبخیز در طبقه‌های

جدول ۴- اندازه‌های EQI در زیر آبخیزهای نیر.

Table 4- EQI values in the Nir sub-watersheds.

Sub-watershed	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
EQI	0.90	0.22	0.18	0.15	0.41	0.51	0.19	0.53	0.37	0.48	0.10



شکل ۴- تغییرات مکانی EQI در زیرآبخیزهای نیر.

Figure 4- Spatial changes of EQI in the Nir sub-watersheds.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی نه شاخص چندعملکردی و اصلی در زمینه‌ی بوم‌شناسی، اندازه‌ی کیفیت بوم‌شناختی آبخیز نیر ارزیابی و پهنه‌بندی شد. در این پژوهش اندازه‌های شاخص کیفیت بوم‌شناختی ($0/22 \pm 0/37$) کم بود. نتایج ارزیابی EQI در سطح ۱۱ زیرآبخیز بررسی شده نشان داد که زیرآبخیز ۱ در شرق آبخیز نیر (نزدیک به نقطه‌ی خروجی) شرایط ایده‌آل‌تری ($EQI=0/90$) در مقایسه با سایر زیرآبخیزها داشت. هم‌چنین، در زیرآبخیزهای ۵، ۶، ۸ و ۱۰ در بخش‌هایی از جنوب و شمال آبخیز اندازه‌ی متوسط و قابل قبولی از EQI داشتند. به‌نظر می‌رسد در این زیرآبخیزها افزایش نفوذ رواناب، افزایش رطوبت خاک و به‌دنبال آن افزایش پوشش گیاهی، سبب شده است تا شرایط ایده‌آلی از نظر کیفیت بوم‌شناختی فراهم شود. هم‌چنین، اندازه‌های شاخص کیفیت بوم‌شناختی در زیرآبخیزهای ۲ و ۹ در بخش مرکزی و غرب آبخیز کم بود. در نهایت، زیرآبخیزهای ۳، ۴، ۷ و ۱۱ در جنوب شرقی و شمال شرقی آبخیز کمترین اندازه‌های EQI را داشتند. در زیرآبخیزهایی که EQI کمترین اندازه را داشت، نسبت

پوشش گیاهی، شاخص بهنجارشده‌ی اختلاف پوشش گیاهی، سطح برگ و تولید خالص اولیه در سطح کمی بود و اندازه‌ی نگهداشت رواناب نیز کم بود. پوشش گیاهی کم، خاک با نفوذپذیری کم، رطوبت کم و ایجاد رواناب زیاد و به‌دنبال آن ایجاد فرسایش خاک و گل‌آلودگی آب از جمله عامل‌هایی بودند که بر کیفیت بوم‌شناختی این زیرآبخیزها اثر می‌گذارد. در نتیجه زیرآبخیزهای ۳، ۴، ۷ و ۱۱ خدمات کم‌تری برای رفاه بشر دارند. از این رو می‌توان گفت که این زیرآبخیزها در اولویت حفاظت قرار دارند. در این راستا، می‌توان اولویت تخصیص بودجه‌ی احیاء را به برگرداندن سطح تاب‌آوری همین زیرآبخیزها در نظر گرفت. براساس نتایج این پژوهش، اولویت ارتقاء تنوع زیستی، پوشش گیاهی و مهار کردن فرسایش خاک در زیرآبخیزهای با کیفیت بوم‌شناختی بسیار کم، جلوگیری از نابودی پوشش گیاهی و افزایش رطوبت خاک با حفظ پوشش گیاهی موجود و نیز استفاده از رویکردهای مدیریت سازگار با هدف افزایش کیفیت بوم‌شناختی آبخیز نیر پیشنهاد می‌شود.

فهرست منابع

- Alaei N, Mostafazadeh R, Esmali Ouri A, Sharari M, Hazbavi Z. 2020. Assessment and Comparison of Landscape connectivity in KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province. *Iranian Journal of Applied Ecology*. 8(4): 19-34. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.47176/ijae.8.4.2572>
- Adl HR. 2007. Estimation of Leaf Biomass and Leaf Area Index of Two Major Species in Yasuj Forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 15(4): 426-417. (In Persian).
- An M, Xie P, He W, Wang B, Huang J, Khanal R. 2022. Spatiotemporal Change of Ecologic Environment Quality and Human Interaction Factors in Three Gorges Ecologic Economic Corridor, based on RSEI. *Ecological Indicators*. 141: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109090>
- Andalibi L, Ghorbani A, Moameri M, Hazbavi Z, Nothdurft A, Jafari R, Dadjou F. 2021. Leaf Area Index Variations in Ecoregions of Ardabil Province, Iran. *Remote Sensing*. 13(15): 2879. <https://doi.org/10.3390/rs13152879>
- Asghari Saraskanroud S, Aghayary L, Pirouzi E. 2018. Study of Land Use Change and its Effect on Erosion in Nir City using GIS and RS (Case Study: Nir County). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*. 8(4): 49-62. (In Persian).
- Burkhard B, Muller F. 2008. Indicating Ecosystem Health and Integrity. In: Denhardt, A., Petschow, U. (Eds), *Sustainability in River Basins-A Question of Governance*. O'kom-Verlag, Munchen. 35-57.
- Chai LH, Lha D. 2018. A New Approach of Deriving Indicators and Comprehensive Measure for Ecological Environmental Quality Assessment. *Ecological Indicators*. 85: 716-728. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.039>
- Cheng-lin M, Li-yan S, Li Y. 2016. The Studies of Ecological Environmental Quality Assessment in Anhui Province based on Ecological Footprint. *Ecological Indicators*. 60: 879-883. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.040>
- Cong W, Li X, Pan X, Liu X, Lu Q, Wang F. 2022. A New Scientific Framework of Dryland Ecological Quality Assessment based on IOAO Principle. *Ecological Indicators*. 136 (7): 108595. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108595>
- Choobeh S, Kake Mami A. 2015. Investigating Changes in Temperature and Precipitation using the Statistical Exponential Subscale of the HADCM3 Model Output in the Baliqlo Chai Watershed in the 2080-2099 Decade. The Second National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment. March 12 and 13. University of Mohaghegh Ardabili. 1-7. (In Persian).
- Coștanza R. 2012. Ecosystem Health and Ecological Engineering. *Ecological Engineering*. 45: 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.023>
- Dadjou F, Ghorbani A, Moameri M, Mostafazadeh R, Hazbavi Z. 2021. Modeling Production and Canopy Cover Parameters to Identify the most Effective Environmental Factors in Baghrou Semi-Steppe Rangelands of Ardabil Province, Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*. 10(3): 1-15. (In Persian) <http://dx.doi.org/10.47176/ijae.10.3.5032>
- Dashtekian K, Dehghani MA. 2008. Land Surface Temperature Analysis of Desert Area in Relation with Vegetation and Urban Development using RS and GIS, Case Study: Yazd-Ashkezar Area. *Pajouhesh and Sazandegi*. 77(3): 169-179. (In Persian)
- Deng CX, Xie BG, Li XQ, Liu LK, Xiang YB. 2013. Evaluation of Cultivated Land Intensive Utilization in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration based on Projection Pursuit. *Geographical Research*. 32(11): 2000-2008.

- <https://doi.org/10.11821/dlyj201311003>
Esmali-Ouri A, Abdullahi Kh. 2011. Watershed Management and Soil Conservation. University of Mohaghegh Ardabili Press. 612 pp. (In Persian)
- Esmali-Ouri A, Ahmadi H, Tahmoures M. 2014. Quantity Assessment of Water Erosion Intensity using Regional Model of Erosion and Sediment Yield (Case Study: Nir Watershed, Ardebil). *Journal of Range and Watershed Management*. 67(3): 407-417. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jrwm.2014.52830>
- Fang C, Wei L, Huang W, Xiao F. 2010. A Water Quality Evaluation Method of Projection Pursuit Regression based on Ant Colony Algorithm in Nanning Urban River. 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. IEEE. pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5516961>
- Farrokhzadeh B, Choobeh S, Nouri H, Goodarzi M. 2018. Study of Climate Change and Land Use Changes Impacts on Surface Runoff: Balighlo Chai Watershed in Ardebil. *Watershed Engineering and Management*. 10(3): 318-331. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwms.2017.107110.1165>
- Fathololoumi S, Vaezi A, Alavipanah SK, Ghorbani A. 2020. Modeling Soil Organic Carbon Variations using Remote Sensing Indices in Ardabil Balikhli Chay Watershed. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51(9):2417-2429. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.299509.668542>
- Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik J, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder PK. 2005. Global Consequences of Landuse. *Science*. 309(5734): 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Freyfogle ET, Lutz Newton J. 2002. Putting Science in its Place. *Conservation Biology*. 16(4): 863-873. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01042.x>
- Friedman JH, Tukey JW. 1974. A Projection Pursuit Algorithm for Exploratory Data Analysis. *IEEE Transactions on Computers*. C-23(9): 881-890. <https://doi.org/10.1109/T-C.1974.224051>
- Garland G, Banerjee S, Edlinger A, Miranda Oliveira E, Herzog C, Wittwer R, Philippot L, Maestre FT, Heijden MGA, Hector A. 2021. A Closer Look at the Functions Behind Ecosystem Multifunctionality: A Review. *Journal of Ecology*. 109(2): 600-613. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13511>
- Hang X, Luo XC, Cao Y, Li YC. 2020. Ecological Quality Assessment and the Impact of Urbanization based on RSEI Model for Nanjing, Jiangsu Province, China. *Applied Ecology*. 31(1): 219-229. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202001.030>
- Hashemi SM, Yavari AR, Jafari HR. 2015. Spatio-Temporal Analysis of Environmental Quality of Ecotonal Zones in Iranian Central Plateau using Landscape Ecological Metrics. *Environmental Studies*. 41(1): 201-218. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jes.2015.53910>
- Hong WY, Jiang RR, Yang CG, Zhang FF, Su M, Liao Q. 2016. Establishing an Ecological Vulnerability Assessment Indicator System for Spatial Recognition and Management of Ecologically Vulnerable Areas in Highly Urbanized Regions: A Case Study of Shenzhen, China. *Ecological Indicators*. 69: 540-547. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.028>
- Imhoff ML, Bounoua LL, Ricketts T, Loucks C, Harriss R, Lawrence WT. 2004. Global Patterns in Human Consumption of Net Primary Production. *Nature*. 24(429): 3-870. <https://doi.org/10.1038/nature02619>
- Jafari M. 2014. Change and Vulnerability of Net Primary Production (NPP) in Iranian Forest, Rangeland and Desert Dcosystems Impacted by Climate Change. *Rangeland and Desert Research*, 21(1): 139-153. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2014.8086>

- Jafari Sayadi F, Gholami Sefidkouhi MA, Zi-aetabar Ahmadi MKh. 2018. Leaf Area Index and Crop Coefficient Estimation from Operational Land Imager (OLI) Sensor Data. *Water Research in Agriculture*. 32(3): 395-404. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/jwra.2018.117797>
- Janssen R, Arciniegas GA, Verhoeven JTA. 2013. Spatial Evaluation of Ecological Qualities to Support Interactive Land-Use Planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 40(3): 427-446. <https://doi.org/10.1068/b37064>
- Jiang Q, Fu Q, Wang Z. 2011. Comprehensive Evaluation of Regional Land Resource Carrying Capacity based on Particle Swarm Optimization Projection Pursuit Model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 27(11): 319-324. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2011.11.060>
- Jones ME, Sibson R. 1987. What is Projection Pursuit, Royal Statistical Society. Series A (General). 150(1):1-36.
- Jonkheere I, Fleck S, Nackaerts K, Coppin P. 2004. Review of Methods for in Situ Leaf Area Index Determination: Part I, Theories, Sensors and Hemispherical Photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121(1-2): 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Kang N, Sakamoto T, Imanishi J, Fukamachi K, Shibata S, Morimoto Y. 2013. Characterizing the Historical Changes in Land Use and Landscape Spatial Pattern on the Ogurake Floodplain after the Meiji Period. *Intercultural Understanding*. 1(3): 11-16. <https://doi.org/10.14993/00000843>
- Karr JR. 1999. Defining and Measuring River Health. *Freshwater Biology*. 41(2): 221-234. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00427.x>
- Hasibi A, Fallah Farbod S, Laghai H. 2011. Theory and Techniques for Revitalization of Urban Park in Old Context of City with Emphasis on Conservation of Cultural and Historical Heritage (Case study: The First Tehran's public park). *Journal of Environmental Science and Technology*. 16(3): 137-154. (In Persian).
- Li MM, Wu BF, Yan CZ, Zhou WF. 2004. Estimation of Vegetation Fraction in the Upper Basin of Miyun Reservoir by Remote Sensing. *Resource Science*. 26(4): 153-159.
- Liu D, Zhang G, Li H, Fu Q, Li MO, Faiz MA, Ali S, Li T, Imran Khan M. 2019. Projection Pursuit Evaluation Model of a Regional Surface Water Environment based on an Ameliorative Moth-Flame Optimization Algorithm. *Ecological Indicators*. 107: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105674>
- Logsdon RA, Chaubey I. 2013. A Quantitative Approach to Evaluating Ecosystem Services. *Ecological Modelling*. 257: 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.02.009>
- Mahdavi M. 2009. *Applied Hydrology*. Second Volume. University of Tehran. 437 p.
- 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. pp. 691-703.
- Mostafazadeh R, Jafari A, Keivan-Behjou F. 2018. Comparing the Rangeland Structure and Degradation of Landscape Connectivity in Iril Sub-Watersheds, Ardabil Province. *Iranian Journal of Applied Ecology*. 7(1): 41-53. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.29252/ijae.7.1.41>
- Mu D, Luo P, Lyu J, Zhou M, Huo A, Duan W, Nover D, He B, Zhao X. 2021. Impact of Temporal Rainfall Patterns on Flash Floods in Hue City, Vietnam. *Flood Risk Management*. 14(1): e12668. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12668>.
- Oehri J, Schmid B, Schaeppman-Strub G, Niklaus PA. 2017. Biodiversity Promotes Primary Productivity and Growing Season Lengthening at the Landscape Scale.

- Proceedings of the National Academy of Sciences. 114(38): 10160–10165. <https://doi.org/10.1073/pnas.1703928114>
- Ostadi M, Soltanifard H, Adab H, Gholeychipour Z, Pahlovani A. 2017. Assessment and Ranking of Mashhad Urban District to Refer Ecological Quality of Urban Green Spaces using Topsis Method. *Environmental Studies*. 43(2): 329-347. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jes.2017.63082>
- Ouyang X, Wang J, Chen X, Zhao X, Ye H, Watson AE, Wang SH. 2021. Applying a Projection Pursuit Model for Evaluation of Ecological Quality in Jiangxi Province, China. *Ecological Indicators*. 133: 108414. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108414>
- Paetzold A, Warren PH, Maltby LL. 2010. A Framework for Assessing Ecological Quality based on Ecosystem Services. *Ecological Complexity*. 7(3): 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.11.003>
- Qu Y, Zhuang Q. 2018. Modeling Leaf Area Index in North America using a Process-based Terrestrial Ecosystem Model. *Ecosphere*. 9(1): 1-17. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2046>
- Reicosky DC, Forcella F. 1998. Cover Crop and Soil Quality Interactions in Agroecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*. 53(3): 224–229.
- Sadoddin A, Shahabi M, Bai M. 2016. Evaluation and Comprehensive Management of Watersheds, Principles and Approaches of Modeling and Decision Making. Publications of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 170 p. (In Persian).
- Sepahvand R. 2021. Assessment of the Ecological Quality of Urban Streets from the Perspective of Citizens in Khorramabad. The 12th National Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering and Environment. Research Institute of Paya Shahr Etrak, 1-14. (In Persian).
- Souri M, Alibegy T, Erfanian M, Motamedi J, Khalifezadeh R. 2021. Evaluation of GPP based on NDVI Index with MODIS Spatial Resolution Sensor in Estimating Rangeland Production (Resin Basin of Kermanshah Province). *Rangeland and Desert Research*. 28(1): 21-33. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijdr.2021.123850>
- Su QJ, An YL, Ma SB, Zhao Y, An JK, An HF. 2017. Differences of Landscape Ecological Quality Under Different Lithologic Zones in Karst Mountainous Areas: A Case Study of Luodian County. *Carsologica Sinica*. in Chinese with English Abstract. 36(4): 454–462.
- Tadesse G, Zavaleta E, Shennan C, FitzSimmons M. 2014. Local Ecosystem Service Use and Assessment Vary with Socio-Ecological Conditions: A Case of Native Coffeeforests in Southwestern Ethiopia. *Human Ecology*. 42(6): 873–883. <https://doi.org/10.1007/s10745-014-9704-2>
- Tang L, He MZ, Li XR. 2020. Verification of Fractional Vegetation Coverage and NDVI of Desert Vegetation via UAVRS Technology. *Remote Sensing*. 12(11): 1742. <https://doi.org/10.3390/rs12111742>
- Vrsmarty CJ, Pahl-Woßl C, Bhaduri A. 2013. Water in the Anthropocene: New Perspectives for Global Sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 5(6): 535–538. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.011>
- Wang R, Gamon JA. 2019. Remote Sensing of Terrestrial Plant Biodiversity. *Remote Sensing of Environment*. 231:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111218>
- Wang H, Yan SJ, Liang Z, Jiao KW, Li DL, Wei FL, Li SC. 2021. Strength of Association Between Vegetation Greenness and its Drivers Across China Between 1982 and 2015: Regional Differences and Temporal Variations. *Ecological Indicators*. 128(107831): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107831>
- Wang S, Wang J, Zhang L, Xiao Z, Feng W, Sun N, Li D, Chen B, Chen J, Li Y, Huang X, Wang M. 2019. A National Key R&D Program: Technologies and Guidelines for Monitoring Ecological Quality of Terrestrial

- Ecosystems in China. *Journal of Resources and Ecology*. 10(2): 105–111. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2019.02.001>
- Wei X, Wang N, Luo P, Yang J, Zhang J, Lin K. 2021. Spatiotemporal Assessment of Land Marketization and its Driving Forces for Sustainable Urban-Rural Development in Shaanxi Province in China. *Sustainability*. 13(14):7755. <https://doi.org/10.3390/su13147755>
- Wu Z, Zhu D, Xiong K, Wang X. 2022. Dynamics of Landscape Ecological Quality based on Benefit Evaluation Coupled with the Rocky Desertification Control in South China Karst. *Ecological Indicators*. 138: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108870>
- Yan Y, Yu X, Long F, Dong Y. 2021. A Multi-Criteria Evaluation of the Urban Ecological Environment in Shanghai based on Remote Sensing. *Geo-Information*. 10(10): 688. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100688>
- Yang X, Scuderi L, Paillou P, Liu Z, Li H, Ren X. 2011. Quaternary Environmental Changes in the Drylands of China- A Critical Review. *Quaternary Science Reviews*. 30(23-24): 3219–3233. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.08.009>
- Yang JS, Wang YQ, August PV. 2004. Estimation of Land Surface Temperature using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity. *Environmental Informatics*. 4(1): 40-47. <https://doi.org/10.3808/jei.200400035>
- Zandsalimi M, Bahrami B. 2022. Examining Changes in the Ecological Structure of Four Hills in Sanandaj using Object-Oriented Method and Metrics of Continuity and Complexity. *Journal of Environmental Science and Technology*. 24(10): 77-91. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/JEST.2021.59586.5330>
- Zareie Sh. 2019. Determining and Comparing the Degree of Watershed Vulnerability in the Sub-Watersheds of Samyan, Ardabil Province. Master's of Science Thesis. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil. 115 p. (In Persian).
- Zareie Sh, Hazbavi Z, Mostafazadeh R, Esmali Ouri A. 2020. Vulnerability Comparison of Samian Sub-Watersheds based on Climate Change Components. *Physical Geography Research Quarterly*. 112 p. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.283909.1007406>
- Zhang Y, Chen HYH, Reich PB. 2012. Forest Productivity Increases with Evenness, Species Richness and Trait Variation: A Global Meta-Analysis. *Ecology*. 100(3): 742–749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01944.x>



Assessment of Ecological Quality in the Nir Watershed, Ardabil Province

Zeinab Hazbavi¹, Elnaz Ghabelnezam², Elham Azizi³, Zahra Sharifi⁴, Solmaz Fathololoumi⁵, Mohammad Reza Nikoo⁶

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

2- Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

3- Former M.Sc. Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4- Ph.D. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

5- Former Ph.D. Student, Expert, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

6- Associate Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman

Extended Abstract

Introduction and Objective

Ecological quality is an inclusive measurement unit of the elements, configuration, and performance of an ecosystem in the temporal and spatial scales. In addition, assessing ecological quality could provide valuable information for experts and managers in the first step of directed planning and comprehensive watershed management. Therefore, the current research was conducted to calculate the ecological quality index (EQI) in one of the upland watersheds of Yamchi Dam, which is not without the effect of human interference.

Materials and Methods

Nir Watershed as a study area is located in the southwestern part of Ardabil Province. To carry out the current research, first, the essential variables of ecological quality assessment (normalized difference vegetation index (NDVI), fractional vegetation coverage (FVC), leaf area index (LAI), net pri-

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: z.hazbavi@uma.ac.ir

Citation: Hazbavi, Z., Ghabelnezam, E., Azizi, E., Sharifi, Z., Fathololoumi, S., Nikoo, M.R. 2023. Assessment of ecological quality in the Nir Watershed, Ardabil Province. *Watershed Management Research*. 36(3):90-110.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.360357.1494

Received: 21 October 2022, Received in revised form: 19 November 2022, Accepted: 21 December 2022,

Published online: 23 September 2023

Watershed Management Research, VOL. 36, No.3, Ser. No: 140, Autumn 2023, pp. 90-110.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



mary production (NPP), moisture index (IM), land surface temperature (LST), soil erosion, ecological integrity index, and runoff retention index) were collected and calculated. The variables were chosen to represent the three functions of ecosystems maintaining, supporting, and regulating. After standardization, weighting of the variables was done using the advanced multi-criteria, i.e., Projection Pursuit Model (PPM). Afterward, the EQI was calculated based on the sum weight of all variables for 11 sub-watersheds of Nir.

Results and Discussion

The wide range of variability of the variables used in the entire Nir Watershed area was confirmed. In general, sub-watershed 1 had the maximum mean of the first to fourth variables (FVC, NDVI, NPP, and LAI) and the minimum mean LST. While sub-watershed 11 had the opposite situation in terms of these five variables. All five variables reflect the structure and function of vegetation and therefore the ecological quality. The status of other indicators except ecological continuity (EC) was also evaluated in sub-watershed 1 in a medium status. Based on the PPM weighting method, the FVC (0.39) has the highest importance, and moisture and runoff retention indices with an equal weight of 0.01 have been assigned the least priority. In addition, the ecological quality results showed that watersheds 11 (0.10) and 1 (0.90) respectively have the lowest and highest levels of EQI. In general, according to the zoning result, it was found that the northeastern and southeastern parts of the watershed have the lowest EQI which covered 29% of the area.

Conclusion and Suggestions

The results can be used as one of the main goals of managing watersheds regarding preserving the ecosystem's health and integrity. Moreover, the priority of rehabilitation budget allocation can be assigned according to the resilience degrees of studied sub-watersheds.

Keywords: Ecosystem resilience, index-based assessment, resource management, projection pursuit model