

ارزیابی یکپارچه و ترسیم مکانی فشارهای انسانی مؤثر بر وضعیت بوم‌شناختی حوضه آبریز کشف‌رود

مهشید حسینی^۱، حسین مصطفوی^{۲*}، خسرو پیری^۳، مجید دلاور^۴ و کامران داوری^۵

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵)

چکیده

رودخانه‌ها، عناصر حیاتی چرخه هیدرولوژیک و بوم‌سازگان‌ها هستند؛ با این حال، گسترش شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب، سدسازی و ورود آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی، فشارهای متعددی را بر این سامانه‌ها وارد کرده است. پژوهش حاضر با رویکردی یکپارچه به ارزیابی فشارهای انسانی مؤثر بر حوضه آبریز کشف‌رود پرداخته است. در این مطالعه، کیفیت آب در ۱۰ ایستگاه، با استفاده از شاخص $IRWQI_{sc}$ بررسی شد و فشارهای ناشی از کشاورزی، توسعه شهری، فعالیت‌های صنعتی، برداشت شن و ماسه و سدسازی با بهره‌گیری از داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای تحلیل شد. نتایج نشان داد که درصد پوشش اراضی کشاورزی طی پنج دهه از ۱۳/۴۴٪ به ۱۸/۲۳٪ افزایش و سطح پوشش مراتع از ۵۸/۲۰٪ به ۳۶/۹۸٪ کاهش یافته است؛ هم‌زمان اراضی مسکونی از ۱/۲۷٪ به ۲/۲۴٪ گسترش یافته‌اند. نتایج محاسبه شاخص کیفیت آب بیانگر آن است که اکثر ایستگاه‌های پایش در طبقه «خیلی بد» جای دارند. همچنین تحلیل فشارهای تجمعی نشان داد که نواحی مرکزی و شمال شرقی حوضه، به‌ویژه اطراف کلان‌شهر مشهد، بیشترین شدت فشار انسانی را تجربه می‌کنند. این نتایج، ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب، بازنگری در الگوهای توسعه کاربری اراضی و کنترل منابع آلاینده کشاورزی و صنعتی را برای احیا و پایداری بلندمدت رودخانه کشف‌رود برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: کشف‌رود، کیفیت آب، فشارهای انسانی، کاربری اراضی، شاخص $IRWQI_{sc}$ ، مدیریت منابع آب

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. دانشیار گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳. استاد گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴. دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۵. استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hmostafaviw@gmail.com

مقدمه

زیادی از اطلاعات را به‌صورت عددی تبدیل کرده و داده‌های پیچیده کیفیت آب را به اطلاعاتی قابل‌درک و قابل‌استفاده برای عموم مردم تبدیل می‌کند (۱۰).

این پژوهش تلاش می‌کند تا فشارهای انسانی مؤثر بر وضعیت بوم‌شناختی موجود در این حوضه آبریز را در ابعاد مختلف شناسایی و مکان‌یابی کرده و با آشکار نمودن سهم اثرات منفی فشارهای انسانی و بهره‌گیری از شاخص $IRWQI_{sc}$ وضعیت سلامت آن را منعکس نماید و ضمن بررسی وضعیت پارامترهای کیفیت آب، انواع فشارهای انسانی موجود در آن را بررسی کند؛ این در حالی است که در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده یا تنها بر روی آلودگی‌ها تمرکز شده و یا انواع فشارها به‌صورت پراکنده و یا در مقیاس‌های نامناسب بررسی شده‌اند (۱، ۲، ۹، ۲۱، ۳۵، ۴۴ و ۵۱).

مواد و روش‌ها

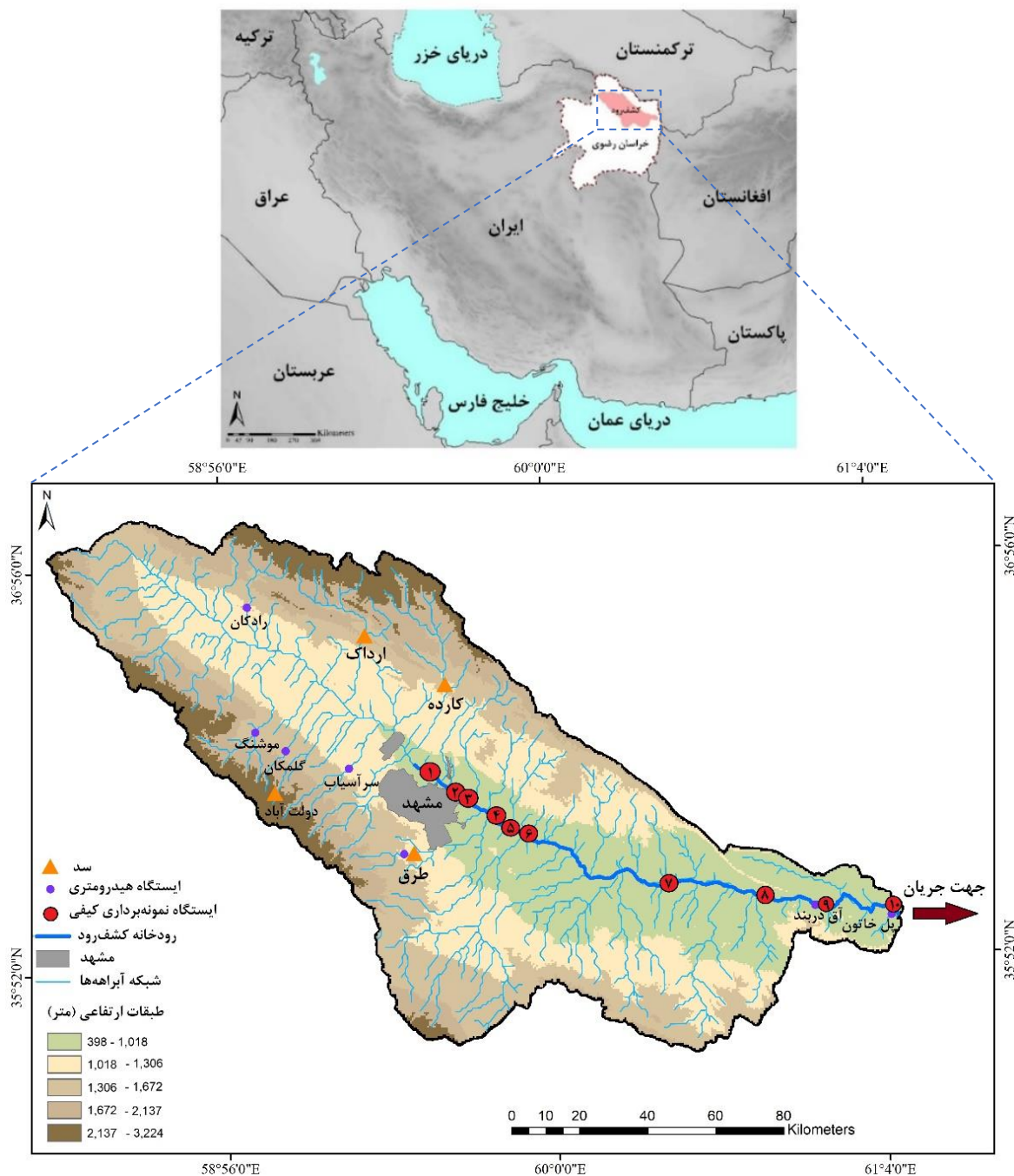
معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود بخشی از حوضه آبریز قره قوم ایران بوده که در شمال شرق کشور و در استان خراسان رضوی واقع شده است. بر اساس دستورالعمل و ضوابط تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی کشور (۴۲)، مساحت این حوضه معادل ۱۶۷۶۷ کیلومترمربع برآورد شده است. رودخانه کشف‌رود به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه بخش شمال شرقی استان خراسان رضوی شناخته می‌شود و طول آن از مرتفع‌ترین نقطه تا خروجی حوضه حدود ۳۷۴ کیلومتر گزارش شده است (۳۲ و ۴۰). این رودخانه در وضعیت کنونی به‌صورت فصلی جریان دارد و تنها در برخی از مقاطع آن، جریان آب به‌صورت دائمی مشاهده می‌شود. مسیر رودخانه در بستری میان دشتی و در دره‌ای قرار گرفته و از میان رشته‌کوه‌های هزارمسجد و بینالود، در جهت غربی- شرقی جاری شده و در نهایت، در جنوب مزدآوند و در محلی به نام پل خاتون با هریرود تلاقی کرده و رودخانه تجن را تشکیل می‌دهد (۹). حوضه آبریز کشف‌رود تقریباً به‌صورت نوار قوسی

رودخانه‌ها مهم‌ترین منابع حیاتی طبیعت محسوب شده و حفاظت آن‌ها از مهم‌ترین مسئولیت‌های بهره‌برداران در یک حوضه آبریز است (۴۹). در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت، وقوع خشک‌سالی‌ها، تغییرات کاربری اراضی و تغییر در میزان برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی، همگی به‌صورت مرتبط با یکدیگر، تأثیر زیادی بر منابع آب گذاشته (۲۵، ۲۶ و ۷) و از طرفی دیگر، رودخانه‌ها به‌عنوان محلی برای تخلیه فاضلاب‌ها، پساب کارخانه‌ها و زهکش‌های اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۴۳). متأسفانه فقدان اطلاعات و شناخت ناکافی از خدمات بوم‌سازگان رودخانه‌ها باعث شده تا بر میزان صدمات وارده بر رودخانه‌ها افزوده شود و مطلوبیت زیستگاهی آن‌ها کاهش یابد (۳۹، ۲۹ و ۵۳). در همین راستا، ارزیابی بوم‌شناختی دقیق و تدوین برنامه‌ای جامع و یکپارچه جهت مدیریت پایدار، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر بوده و یکی از مهم‌ترین مسائل پیش روی سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب است (۳۸).

رودخانه کشف‌رود، مهم‌ترین عارضه فیزیوگرافی دشت مشهد بوده و یکی از بزرگ‌ترین رودخانه‌های شمال شرق ایران است. این رودخانه خدمات و عملکردهای بی‌شماری داشته و نقش مهمی در تعادل زیستی، بوم‌شناختی، اقتصادی و اجتماعی منطقه داشته است. طی دهه‌های اخیر این حوضه آبریز با چالش‌های متعددی روبه‌رو شده است. کاهش آبدهی مسیر رودخانه کشف‌رود از یک‌سو و ورود انواع آلاینده از سویی دیگر، آن را در فهرست محیط‌های تهدیدکننده سلامت انسان قرار داده است (۲).

شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران (Integrated River Water Quality Index System for Classification, $IRWQI_{sc}$)، یکی از شاخص‌های منابع آب سطحی است که توسط سازمان محیط‌زیست ایران معرفی شده و جهت سنجش کیفیت آب‌های سطحی کاربرد دارد (۲۳ و ۴۸). این شاخص در مطالعات متعددی جهت ارزیابی کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفته است (۵، ۱۱، ۱۸، ۲۷، ۳۳ و ۴۸) و استفاده از آن، حجم



شکل ۱. موقعیت قرارگیری حوضه آبریز کشف‌رود

گاه با سیلاب‌های مخاطره‌آمیز روبه‌رو هستند (۱)؛ به‌طوری‌که دبی اوج سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله در خروجی اصلی حوضه، $368/4$ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است (۵۷). میزان نزولات در ارتفاعات و دشت تفاوت زیادی داشته؛ به‌طوری‌که در ارتفاعات هزارمسجد حدود 800 میلی‌متر و در سطح دشت

شکل از شرق به غرب گسترده شده است. از نظر اقلیمی، این حوضه متأثر از اقلیم‌های خشک و بیابانی نظیر قره‌قوم ترکمنستان و بیابان‌های مرکزی ایران قرار دارد و بیشترین ارتفاع آن، قله‌های 3000 متری هزارمسجد است (۳۵). رودخانه‌های حوضه به تبعیت از اقلیم منطقه به‌صورت فصلی درآمده‌اند و

تغییرات احتمالی در الگوی جریان طولانی مدت مشخص شود. همچنین در مجموع، ۲۰ نمونه آب در مرداد و آبان سال ۱۴۰۳ در ۱۰ مقطع مختلف در بازه اصلی رودخانه کشف‌رود برداشت و به آزمایشگاه تخصصی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز ارسال شد.

به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی این حوضه، از تصاویر ماهواره‌ای سری لندست ۱ و ۹ در سال‌های ۱۹۷۳ و ۲۰۲۳ میلادی (۱۳۵۲ و ۱۴۰۲ شمسی) استفاده شد. در مرحله بعد، بر اساس آخرین نسخه شبکه هیدروگرافی وزارت نیرو و با استفاده از برنامه الحاقی ArcHydro در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2، نقشه زیرحوضه‌ها تهیه گردید. بدین منظور، ابتدا لایه مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model, DEM) با استفاده از تابع Fill Sinks اصلاح شد تا چاله‌های موجود در لایه رستری DEM پر شده و رواناب در سلول‌های به دام افتاده جریان یابد. سپس لایه جهت جریان (Flow Direction) بر اساس DEM اصلاح شده، استخراج و لایه تجمع جریان (Flow Accumulation) که نشان‌دهنده تعداد تجمع سلول‌های بالادست هر سلول است، تولید شد. در نهایت با استفاده از این اطلاعات و ساخت لایه رستری از قطعات شبکه هیدروگرافی، لایه زیرحوضه‌ها بر اساس جهت جریان و خروجی رودخانه ساخته شد (شکل ۴). همچنین، داده‌های مربوط به محل استقرار صنایع پراکنده و کارگاه‌های برداشت شن و ماسه موجود در حوضه، از سازمان صنعت، معدن و تجارت استان خراسان رضوی گردآوری شد. در ادامه روش ارزیابی هر یک از فشارهای انسانی وارد شده بر حوضه آبریز کشف‌رود تشریح شده است (شکل ۲).

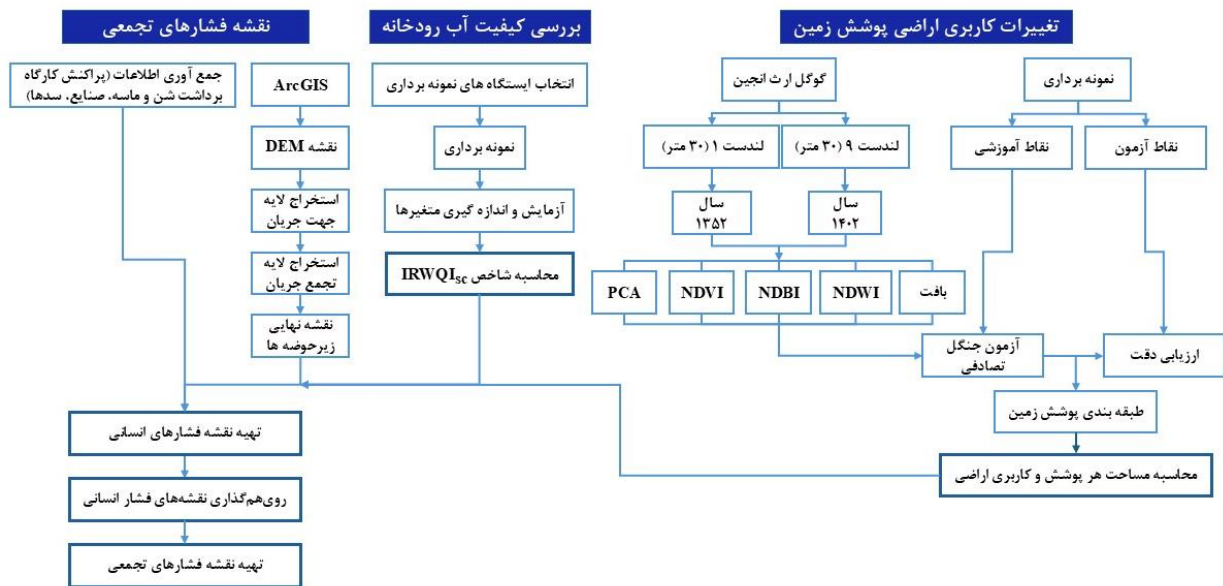
تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز کشف‌رود

در این مطالعه با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور، نقشه‌های تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین حوضه آبریز کشف‌رود در یک بازه زمانی ۵۰ ساله (سال‌های ۱۳۵۲ و ۱۴۰۲) برای چهار کلاس پیکره‌های آبی (Normalized Difference Water Index-NDWI)، اراضی کشاورزی و پوشش گیاهی

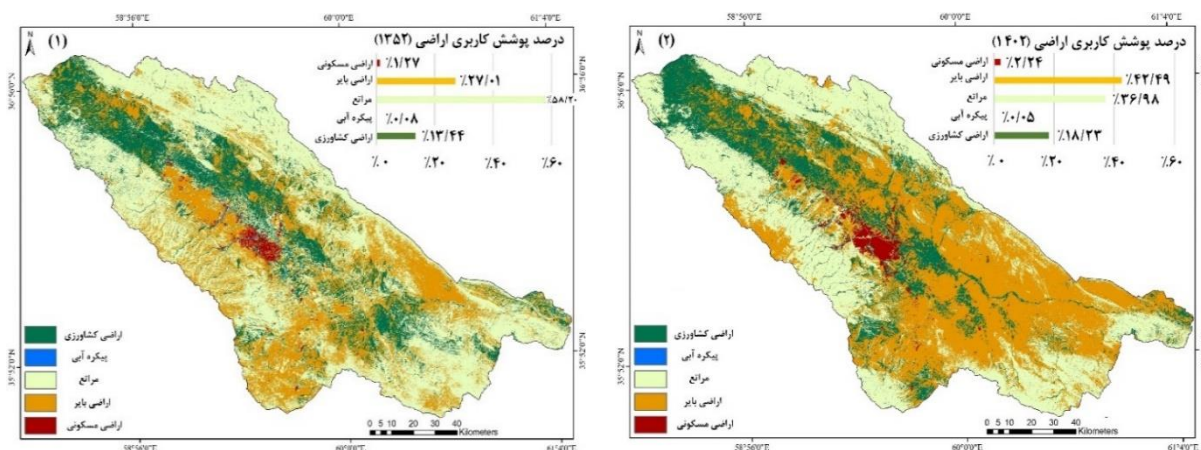
مشهد نزدیک به ۲۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (۱). دشت مشهد که در محدوده حوضه آبریز کشف‌رود قرار دارد، به عنوان کانون اصلی فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در وضعیت بسیار بحرانی قرار گرفته است. رشد شدید جمعیت و توسعه اقتصادی، افت قابل توجه آب‌های زیرزمینی را به دنبال داشته است. به همین دلیل، از سال ۱۳۴۷ به علت افت سطح آب، دشت مشهد به عنوان دشت ممنوعه اعلام شده است (۴).

تهیه و جمع‌آوری داده‌ها

به منظور نمونه‌برداری و سنجش متغیرهای فیزیکی و شیمیایی، انتخاب ایستگاه‌ها با رویکردی یکپارچه و با در نظر گرفتن عوامل مختلف تأثیرگذار بر حوضه آبریز کشف‌رود انجام شد. برای این کار، بر اساس مطالعات اولیه، بررسی‌های صحرایی و توجه به عواملی مانند توزیع منابع آلودگی، موقعیت مکانی صنایع و شهرهای صنعتی، تراکم اراضی کشاورزی، محل تخلیه پساب‌های شهری و صنعتی و پیوستگی رودخانه، تعداد ۱۰ ایستگاه تعیین گردید. این ایستگاه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که نوع فشارهای انسانی، میزان شدت و پراکنش آن‌ها بر رودخانه کشف‌رود، به طور دقیق قابل ارزیابی باشند. با توجه به عدم وجود جریان و یا جریان بسیار اندک در فصول خشک؛ امکان نمونه‌برداری تنها در بازه‌های مشخصی از رودخانه امکان‌پذیر بود (شکل ۱). حداقل و حداکثر فاصله میان ایستگاه‌ها به ترتیب ۶/۷ و ۵۲/۳ کیلومتر اندازه‌گیری شد. همچنین، دبی جریان در فصل خشک حداقل ۰/۳ و حداکثر ۱/۱ مترمکعب بر ثانیه و در فصل تر حداقل ۰/۰۰۲ و حداکثر ۲/۸ مترمکعب بر ثانیه ثبت گردید؛ علاوه بر این به منظور تحلیل رژیم هیدرولوژیک رودخانه، داده‌های دبی متوسط سالانه هفت ایستگاه هیدرومتری موشنگ، رادکان، سرآسیاب، طرق، گلمکان، آق‌دربند و پل خاتون در دوره آماری ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی گردآوری شده و روند تغییرات و نوسانات دبی در هر ایستگاه با استفاده از ترسیم خط روند در محیط نرم‌افزار Excel (نسخه ۲۰۱۶) بررسی گردید تا



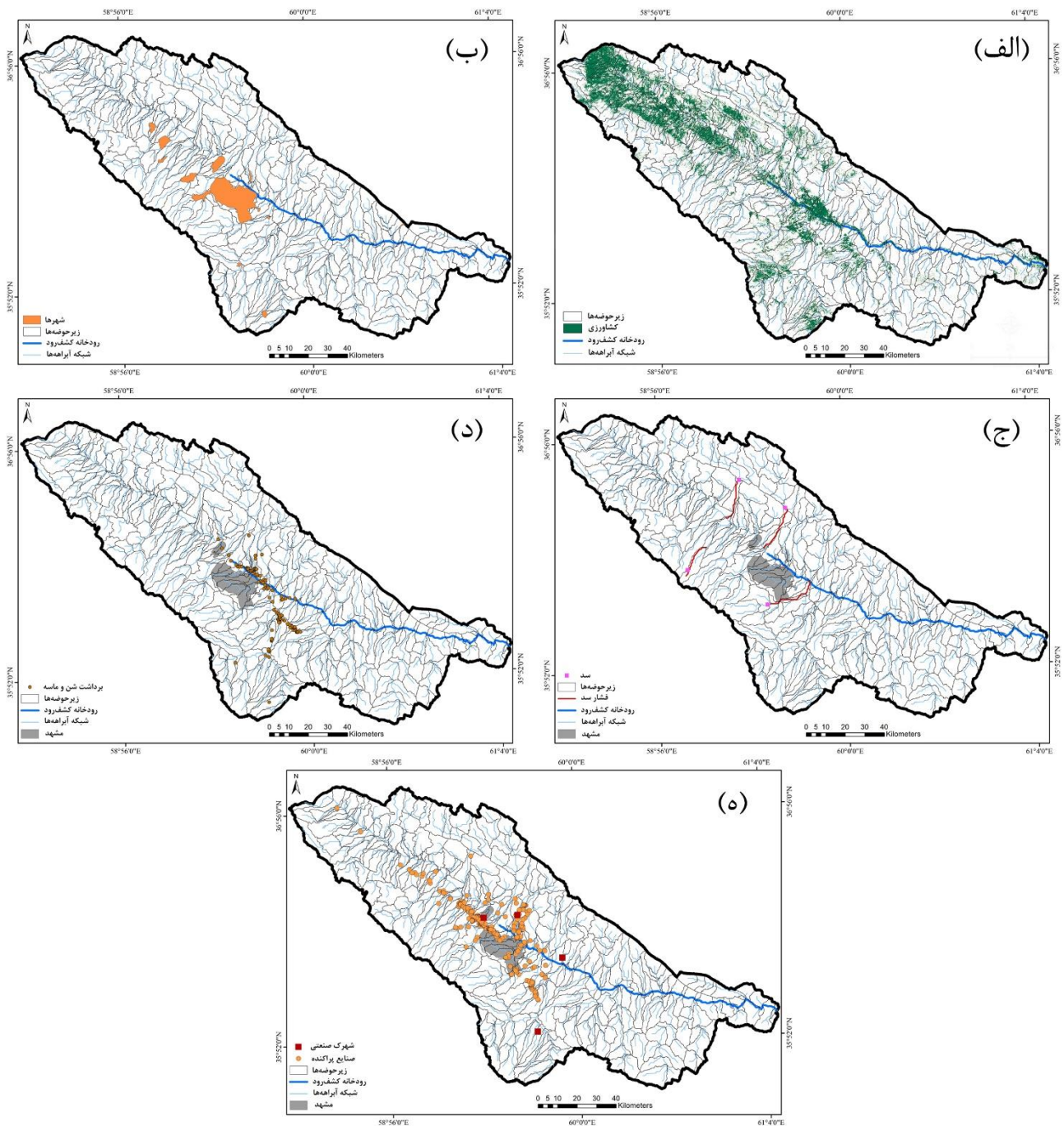
شکل ۲. روندنمای مراحل انجام کار



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی / پوشش زمین حوضه آبریز کشف رود در سال های ۱۳۵۲ و ۱۴۰۲.

رقومی ارتفاع و لایه های شیب، به همراه پنج شاخص NDVI، NDBI، NDWI، بافت (Texture) و تحلیل مؤلفه های اصلی (Principal Component Analysis, PCA) استفاده شد (۵۴ و ۵۸). برای ارزیابی دقت نتایج، از نمونه برداری نقاط آموزشی و آزمون استفاده شد، به طوری که ۷۵٪ از نمونه ها برای آموزش مدل و ۲۵٪ برای آزمون آن به کار رفتند (شکل ۳).

(Normalized Difference Vegetation Index- NDVI)، مناطق مسکونی (Normalized Difference Built-up Index- NDBI) و اراضی باور تهیه شدند. فرآیند تهیه نقشه با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست و تکنیک جنگل تصادفی (Random Forest) در محیط گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) انجام شد. همچنین، برای طبقه بندی نقشه پوشش زمین از محصول مدل



شکل ۴. نقشه‌های پراکنش (الف) کاربری کشاورزی، (ب) شهرها، (ج) سدها، (د) کارگاه‌های برداشت شن و ماسه و (ه) صنایع و شهرک‌های صنعتی در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱. طبقه‌بندی اراضی کشاورزی و مناطق شهری بر مبنای شدت فشارهای انسانی (۴۵).

تقسیم‌بندی کاربری	وضعیت خوب	وضعیت متوسط	وضعیت بحرانی
کاربری کشاورزی	$1 < 10\%$	$3 \leq 10\%$ و $40\% \leq$	$5 \geq 40\%$
کاربری شهری	$1 < 1\%$	$3 \leq 1\%$ و $15\% \leq$	$5 \geq 15\%$

پس از تلفیق نقشه زیرحوضه‌ها با نقشه کاربری و پوشش اراضی، نسبت هر نوع کاربری در هر زیرحوضه از طریق تقسیم مساحت آن کاربری بر کل مساحت زیرحوضه محاسبه گردید. به‌منظور دسته‌بندی سطوح مختلف فشار انسانی در انواع کاربری‌ها، از الگوی طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط مصطفوی و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد (جدول ۱). برای نمایش شدت فشار در نقشه‌های خروجی، یک سیستم رنگ‌بندی به کار گرفته شد که در آن رنگ قرمز بیانگر وضعیت بحرانی، زرد نشان‌دهنده شرایط متوسط و رنگ سبز معرف وضعیت مطلوب است. این کدگذاری بر اساس طبقه‌بندی مذکور انجام شد (۴۵). در ادامه، تعداد زیرحوضه‌های درگیر با هر نوع کاربری در شدت‌های مختلف به همراه درصد آن‌ها تعیین گردید. برای تولید نقشه وضعیت رودخانه‌ها، لایه شبکه هیدروگرافی با نقشه شدت فشارهای انسانی از طریق ابزار Intersect در محیط GIS همپوشانی شد. پس از اعمال رنگ‌بندی، آمار مربوط به تعداد و درصد زیرحوضه‌های تحت تأثیر هر کاربری در سطوح مختلف فشار استخراج گردید (شکل ۵).

بررسی کیفیت آب رودخانه کشف‌رود

به‌منظور بررسی و ارزیابی کیفیت آب رودخانه کشف‌رود، از شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران استفاده شد که به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت طبقه‌بندی کیفیت منابع آب طراحی شده است. این شاخص، پیشنهادی برای توسعه سیستم مقایسه کیفیت آب در بخش‌های مختلف کشور بوده و دارای ۱۰۰ درجه کیفیت آب است؛ به‌طوری‌که اگر مقدار شاخص برابر ۱۰۰ باشد، نشان دهنده عدم وجود آلاینده و اگر برابر صفر باشد به این معنی است که تمام آلاینده‌ها به حد غیرمجاز رسیده‌اند. محاسبه مقدار شاخص $IRWQI_{SC}$ شامل مراحل زیر است (۲۳ و ۴۸):

۱- انتخاب متغیرها بر اساس جدول ۲؛

۲- تبدیل غلظت اکسیژن محلول (برحسب میلی‌گرم بر لیتر) به درصد اشباع؛

۳- تعیین وزن هر متغیر با استفاده از جدول ۲؛

۴- محاسبه مقدار شاخص برای هر متغیر با استفاده از منحنی‌های رتبه‌بندی (۲۳)؛

۵- محاسبه شاخص با استفاده از رابطه زیر:

$$IRWQI_{SC} = \left[\prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

W_i : وزن متغیر i ام؛ n : تعداد متغیرها؛ I_i : مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی است.

۶- در نهایت، برای تعیین معادل توصیفی شاخص از مقدار محاسبه‌شده، از جدول ۳ استفاده می‌شود که بر اساس الگوی رنگی مشخص شده است.

عملیات نمونه‌برداری و آزمایشگاهی

به‌منظور کاهش خطا و افزایش دقت در اندازه‌گیری متغیرهای مربوط به شاخص کیفیت آب، نمونه‌ها توسط ظروف پلی‌اتیلنی جمع‌آوری شدند و تمامی ظروف حاوی نمونه با رعایت شرایط استاندارد به آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی انتقال یافتند. تمامی روش‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در این مطالعه، مبتنی بر دستورالعمل ارائه‌شده در (۲۰۱۷) APHA بوده است (۶). برای سنجش متغیرهای محیطی شامل دما، pH، شوری و هدایت الکتریکی از دستگاه HACH مدل WTW استفاده شد.

مقادیر نیتريت و نترات با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر و واکنش‌گرهای استاندارد تعیین گردید. همچنین، مقادیر سختی به روش تیتراسنجی، غلظت آمونیوم با روش نسلر (Nessler Method) و میزان اکسیژن محلول پس از تثبیت نمونه‌ها در محل با استفاده از محلول‌های پتاسیم‌یدید و منگنزسولفات، از طریق روش وینکلر (Winkler Method) و تیترا با محلول تیوسولفات سدیم اندازه‌گیری شدند. روش تیتراسیون وینکلر به دلیل دقت بالاتر نسبت به دستگاه‌های DO-سنج، به‌عنوان روش مرجع در بسیاری از مطالعات برای تعیین یا اعتبارسنجی غلظت اکسیژن

جدول ۲. مشخصات پارامترهای شاخص کیفیت آب سطحی ایران IRWQI_{SC} (۲۳).

پارامتر	واحد	وزن	روش آنالیز
pH	-	۰/۰۵۱	pH سنج
هدایت الکتریکی (EC)	$\mu\text{S/cm}$	۰/۰۹۶	EC سنج
کدورت (TDS)	NTU	۰/۰۶۳	EC سنج
فسفات (PO_4^{3-})	mg/l	۰/۰۸۷	Spectrophotometer
سختی کل (TH)	mg/l	۰/۰۵۹	EDTA Titration
آمونیم (NH_4^+)	mg/l	۰/۰۰۹	Nessler Method
نیتрат (NO_3^-)	mg/l	۰/۱۰۸	Spectrophotometer
اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5)	mg/l	۰/۱۱۷	Winkler Method
اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)	mg/l	۰/۰۹۳	COD متر
اکسیژن محلول (%DO)	%Saturation	۰/۰۹۷	Winkler Method
کلی‌فرم مدفوعی (FC)	CFU/mL	۰/۱۴۰	Multiple Tube Fermentation Method

 جدول ۳. طبقه‌بندی آب‌های سطحی بر اساس شاخص IRWQI_{SC} (۲۳).

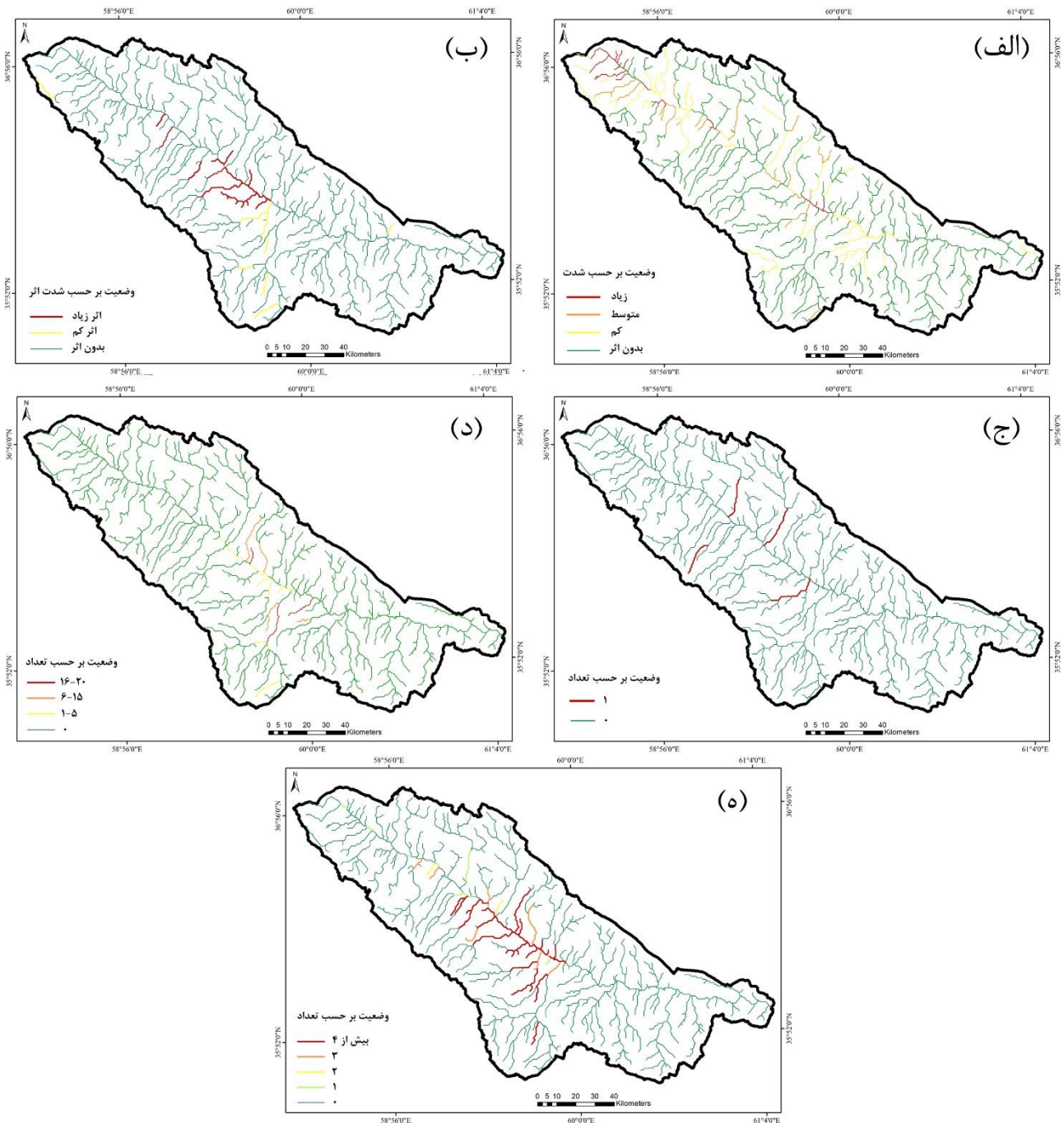
مقدار شاخص	معادل توصیفی
کمتر از ۱۵	خیلی بد
۱۵ - ۲۹/۹	بد
۳۰ - ۴۴/۹	نسبتاً بد
۴۵ - ۵۵	متوسط
۵۵/۱ - ۷۰	نسبتاً خوب
۷۰/۱ - ۸۵	خوب
بیشتر از ۸۵	بسیار خوب

تجزیه و تحلیل داده‌ها و ترسیم نمودارها نیز به کمک نرم‌افزارهای Excel (نسخه ۲۰۱۶) صورت پذیرفت.

تهیه نقشه فشار تجمعی

با هم‌پوشانی نقشه‌های به‌دست‌آمده از فشارهای مختلف انسانی در این پژوهش (شکل‌های ۵ و ۶)، نقشه نهایی فشار تجمعی زیرحوضه‌ها تهیه گردید (شکل ۷). در ادامه، با استفاده از دستورالعمل چارچوب آب (Water Framework Directive, WFD) نیاز و یا عدم نیاز به انجام فعالیت‌های مربوط به احیاء

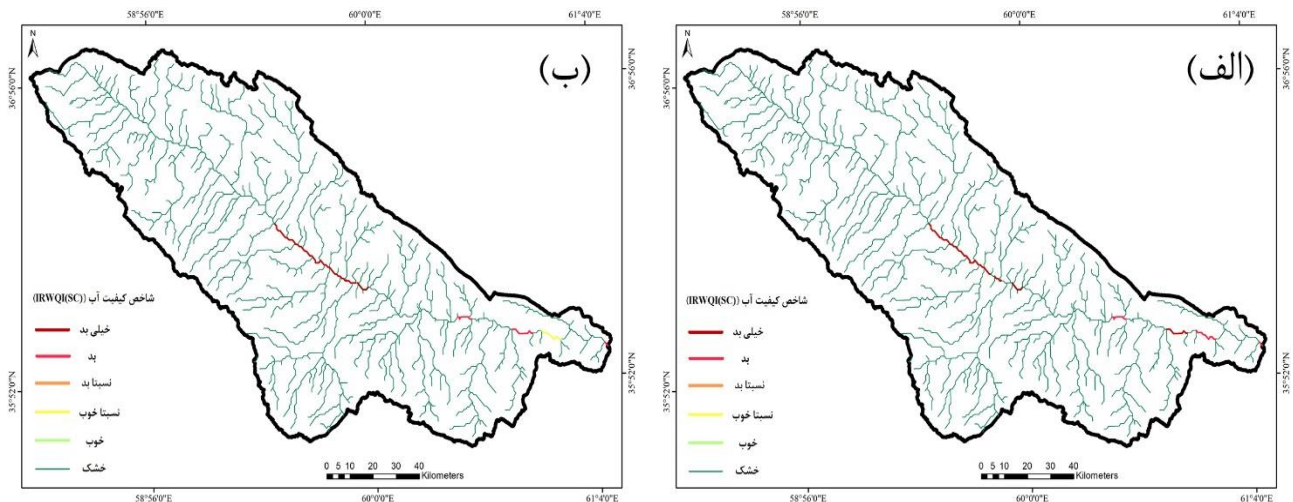
محلول به‌کار رفته است (۳۰، ۵۵ و ۱۶). مقادیر اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده با روش وینکلر، بر اساس غلظت تعادلی اکسیژن و با استفاده از متغیرهای دما، شوری و فشار محیط به درصد اشباع تبدیل می‌گردد (۵۶). سنجش فسفات نیز به روش رنگ-سنجی و بر اساس تشکیل کمپلکس آبی‌رنگ فسفومولیدات، با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۸۸۳ نانومتر انجام شد. برای محاسبه مقادیر کلی‌فرم‌های مدفوعی (Fecal Coliforms) از روش تخمیر چند لوله‌ای (Multiple Tube Fermentation Method) استفاده گردید. درنهایت،



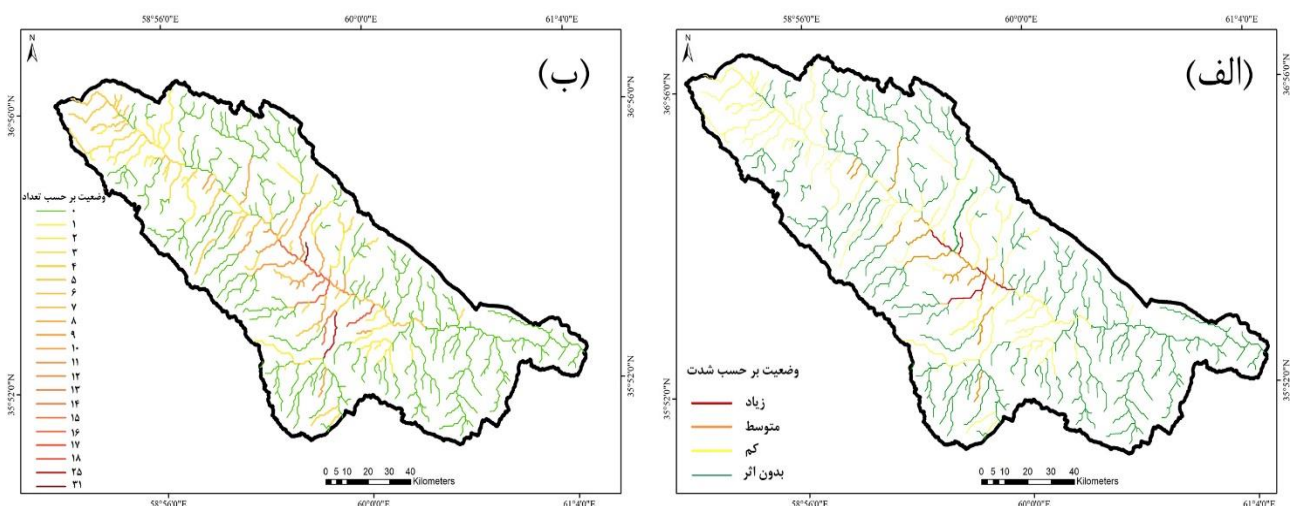
شکل ۵. نقشه‌های فشار (الف) کشاورزی بر حسب شدت، (ب) شهری بر حسب شدت، (ج) سدسازی بر حسب تعداد، (د) کارگاه‌های برداشت شن و ماسه بر حسب تعداد و (ه) صنعت بر حسب تعداد در حوضه آبریز کشف‌رود.

سواحل) است. این دستورالعمل بر استفاده پایدار از منابع آب و حفاظت از بوم‌سازگان‌های آبی تأکید داشته و دستیابی به استانداردهای بالای کیفیت آب را دنبال می‌کند. بر اساس این دستورالعمل، مناطقی که دارای کیفیت آب متوسط، بد و خیلی بد

برای هریک از ایستگاه‌ها تعیین گردید (جدول ۶). دستورالعمل چارچوب آب، به‌منظور ایجاد یک چارچوب قانونی در مدیریت منابع آب طراحی شده است و هدف آن حفاظت از کیفیت و وضعیت منابع آبی (رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، آب‌های زیرزمینی و



شکل ۶. نقشه وضعیت کیفیت آب بر اساس شاخص $IRWQI_{SC}$ در حوضه آبریز کشف‌رود (الف) در فصل خشک و (ب) در فصل تر.



شکل ۷. نقشه فشار تجمعی بر حسب (الف) شدت و (ب) تعداد در حوضه آبریز کشف‌رود.

نتایج

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که حوضه آبریز کشف‌رود تحت تأثیر فشارهای گسترده و متنوع انسانی قرار دارد که این امر منجر به افت چشمگیر کیفیت آب و بروز تغییرات بوم‌شناختی فراوانی شده است (جداول ۴ تا ۶ و شکل‌های ۵ تا ۷). تحلیل نقشه‌های تغییرات کاربری اراضی بین سال‌های ۱۳۵۲ و ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که سطح اراضی کشاورزی از ۱۳/۴۴٪ به ۱۸/۲۳٪ افزایش پیدا کرده است. این رشد بیانگر تشدید فعالیت‌های کشاورزی است که تحت تأثیر افزایش جمعیت و

قرار می‌گیرند، نیازمند اجرای برنامه‌های احیاء هستند. اقدامات احیا مطابق با توصیه‌های دستورالعمل چارچوب آب و مطالعات مرتبط شامل مواردی چون: کنترل پساب‌های شهری و صنعتی، مدیریت مصرف کود و سموم کشاورزی، بازنگری در برداشت بی‌رویه آب و بازگرداندن پیوستگی هیدرولوژیک در مناطق متأثر از سدسازی و برداشت شن و ماسه است (۳۱). انتخاب نوع اقدام، متناسب با فشارهای انسانی غالب صورت می‌گیرد و موفقیت اجرای آن در مقیاس حوضه، منوط به پایش مستمر کیفیت آب است.

جدول ۴. نتایج آنالیزهای نمونه‌های برداشت‌شده از رودخانه کشف‌رود در فصل تابستان (گرم)

ایستگاه‌های نمونه‌برداری - فصل خشک (تابستان)										واحد	متغیر
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۴۰۰	۴۰۹۰	۳۰۶۰۰	۲۰۲۰۰	۲۱۷۰۰	۲۲۴۰	۱۸۷۱	۱۶۸۴	۱۹۰۷	۱۶۴۴	μS/cm	EC
۲۸	۲۶/۱	۳۰	۳۱	۳۲	۲۸	۲۵	۲۷	۲۶	۲۴	°C	دما
۸/۰	۸/۳	۸/۱۷	۷/۸۰	۸/۱۸	۷/۴۸	۷/۳۰	۷/۳۳	۷/۲۹	۷/۵۳	-	pH
۴	۷/۱	۴۱/۵	۸۹	۷۴۰	۴۱/۲	۴۰۷	۲۹۴	۳۲۷	۴۰۱	NTU	کدورت
۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۳	۰/۰۶	۱۴/۶	۲/۵	۲/۷۵	۳/۳۳	۳/۰۱	۴/۰۸	mg/l	فسفات
۲۵۰۰	۷۰۰	۵۴۹۰	۳۲۸۰	۷۶۰	۴۴۵	۳۴۰	۲۷۵	۳۲۰	۲۵۰	mg/l	سختی کل
۰/۰۹	۰/۱	۱/۴۲	۰/۹۶	۵۱۶	۴۸	۶۵	۶۹	۱۱۱/۶	۶۵	mg/l	آمونیم
۲۷/۲	۳	۱۱/۵	۱۳	۳۶۰	۱۸/۵	۲۵۰/۵	۱۱۴	۸۹	۲۹	mg/l	نترات
۸/۶	۳	۶۵	۲۰	۱۸۵۰	۴۵/۵	۱۹۸	۱۵۵/۵	۲۹۹/۵	۱۱۲/۵	mg/l	BOD ₅
۱۷/۲	۶	۱۳۰	۴۰	۳۷۰۰	۹۱	۳۹۶	۳۱۱	۵۹۹	۲۲۵	mg/l	COD
-	۸۰	۱۳۵/۵	۱۱۷/۶	۲/۹	۴۲/۷	۸/۴	۱۰	۱۲/۸	۱۳/۵	%Saturation	%DO
>۱۱۰۰	>۱۱۰۰	۴	۳	>۱۱۰۰	>۱۱۰۰	۴۴	۲۰	>۱۱۰۰	>۱۱۰۰	CFU/100mL	FC

جدول ۵. نتایج آنالیزهای نمونه‌های برداشت‌شده از رودخانه کشف‌رود در فصل پاییز (سرد)

ایستگاه‌های نمونه‌برداری - فصل تر (پاییز)										واحد	متغیر
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۱۳۰۰	۳۳۹۰	۳۰۶۰	۳۹۲۰	۲۱۸۰۰	۲۳۲۰	۱۶۷۹	۱۶۶۳	۱۷۵۹	۱۴۹۱	μS/cm	EC
۳۰	۱۳	۱۵	۱۸	۲۵	۲۳	۱۶	۲۰	۲۳	۱۶	°C	دما
۸/۱۰	۸/۵۴	۷/۳۵	۷/۵۸	۸/۴۵	۷/۵۸	۷/۶	۷/۵۶	۷/۴۷	۷/۶۸	-	pH
۳/۴	۷/۶۸	۶/۹۷	۵/۹۲	۶۶۰	۲۴۰	۹۵/۴	۳۹۲	۳۴۱	۲۷۳	NTU	کدورت
۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۵	۱۰/۲	۱۴/۷۵	۷/۲۵	۱۷/۵	۱۶/۲۵	۹/۷	mg/l	فسفات
۲۲۲۰	۶۱۵	۷۶۵	۶۷۰	۸۹۰	۳۵۰	۳۱۰	۲۵۵	۲۹۵	۲۵۵	mg/l	سختی کل
۰/۰۷	۰/۱	۱/۵	۱/۴۸	۶۵۰	۹۶/۴	۳۰/۸	۵۳/۴	۵۸/۶	۲۷	mg/l	آمونیم
۲۶/۸	۲/۶	۹/۲	۸/۲	۱۰۰۵	۴۳۸	۱۵/۵	۱۱۵	۲۰۲/۵	۲۶/۵	mg/l	نترات
۷/۸	۲/۷۵	۳۵/۵	۴۰/۵	۱۳۴۵	۳۵۷	۸۲	۳۲۸	۳۹۸/۵	۲۰۹	mg/l	BOD ₅
۱۵/۶	۵/۵	۷۱	۸۱	۲۶۹۰	۷۱۴	۱۶۴	۶۵۶	۷۹۷	۴۱۸	mg/l	COD
-	>۱۰۰	۴۸/۷	۷۹/۶	۰	۰	۳۶/۷	۱۴/۳	۱۷/۳	۸۴/۴	%Saturation	%DO
>۱۱۰۰	۷۵	>۱۱۰۰	۲۴۰	>۱۱۰۰	۱۶	۴۶	۹	۴	۱۰	CFU/100mL	FC

تمرکز زیاد این فعالیت‌ها در نواحی بالادست و میان‌دست حوضه است. پوشش مرتعی نیز کاهش چشم‌گیری یافته و از ۵۸/۲۰٪ به ۳۶/۹۸٪ کاهش پیدا کرده است. این افت، نشان‌دهنده تخریب

رشد تقاضای غذایی است. این گسترش عمدتاً به بهای کاهش مراتع طبیعی و اراضی حاشیه‌ای صورت گرفته است. بررسی شدت فشار ناشی از فعالیت‌های کشاورزی (شکل ۴) بیانگر

جدول ۶. دستورالعمل احیاء بر اساس دستورالعمل چارچوب آب WFD - نتایج برگرفته از شاخص IRWQI_{SC}

شماره ایستگاه	مقدار شاخص IRWQI _{SC} در فصل خشک	معادل توصیفی شاخص در فصل خشک	مقدار شاخص IRWQI _{SC} در فصل تر	معادل توصیفی شاخص در فصل تر	نیاز به اقدام جهت احیاء رودخانه
۱	۸/۱۴	خیلی بد	۸/۳۸	خیلی بد	دارد
۲	۸/۱۱	خیلی بد	۶/۲۲	خیلی بد	دارد
۳	۹/۵۵	خیلی بد	۶/۰۵	خیلی بد	دارد
۴	۹/۲۰	خیلی بد	۸/۴۰	خیلی بد	دارد
۵	۱۲/۴۲	خیلی بد	۵/۱۴	خیلی بد	دارد
۶	۵/۱۸	خیلی بد	۳/۰۹	خیلی بد	دارد
۷	۲۳/۷۱	بد	۲۲/۷۵	بد	دارد
۸	۱۱/۵۹	خیلی بد	۲۰/۹۴	بد	دارد
۹	۵۱/۰۳	متوسط	۶۰/۶۳	نسبتاً خوب	ندارد
۱۰	۲۲/۳۲	بد	۲۰/۴۴	بد	دارد

گسترده پوشش گیاهی است. هم‌زمان با این روند، وسعت اراضی بایر به‌طور قابل‌توجهی از ۲۷/۰۱٪ به ۴۲/۴۹٪ افزایش یافته است. همچنین گسترش کاربری شهری در اطراف شهرهای بزرگ مشهد، گلبهار و چناران بیشترین شدت فشار را نشان داده است (شکل ۵)، به‌گونه‌ای که برخی زیرحوضه‌ها در وضعیت فشار بحرانی قرار گرفته‌اند. اگرچه مساحت مناطق ساخته‌شده سهم کمتری از کل حوضه را شامل می‌شود؛ اما در بازه زمانی ۵۰ ساله از ۱/۲۷٪ به ۲/۲۴٪ افزایش یافته است. این روند صعودی، اثرات شهرنشینی و توسعه زیرساخت‌ها در پی رشد جمعیت را برجسته می‌سازد. هرچند این تغییر نسبی اندک به نظر می‌رسد؛ اما افزایش مطلق اراضی مسکونی، نقش مهمی در تشدید فشار بر منابع موجود دارد. یافته‌ها حاکی از آن است که فشارهای ناشی از کاربری‌های کشاورزی، شهری و صنعتی، به‌ویژه در فصل خشک، تأثیرات قابل‌توجهی بر کیفیت آب حوضه داشته‌اند. در دوره‌های خشک، کاهش دبی رودخانه به دلیل برداشت گسترده آب توسط کشاورزان با استفاده از موتور تلمبه‌های مجاز و غیرمجاز، موجب افت حجم جریان و گسست پیوستگی رودخانه شده و در نتیجه، غلظت آلاینده‌ها افزایش یافته و افت شدید کیفیت آب در

بخش‌های مختلف رودخانه تشدید می‌گردد. همچنین گسست پیوستگی رودخانه و ورود فاضلاب و پساب شهری، روستایی و صنعتی در نقاط مختلف، موجب شده تا تفاوت مقادیر برخی از متغیرها در ایستگاه‌های متوالی بسیار زیاد باشد. تحلیل شاخص کیفیت آب نشان داد که در فصل خشک، تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری به‌جز ایستگاه شماره ۹، در طبقه‌بندی «خیلی بد» قرار دارند. ایستگاه شماره ۹، به دلیل فاصله از مراکز عمده آلاینده و کاهش فشارهای انسانی، وضعیت کیفی «متوسط» را نشان داد. در فصل تر، کیفیت آب به‌طور نسبی بهبود یافته است؛ با این حال، حدود ۸۰٪ ایستگاه‌ها همچنان در طبقات «بد» یا «خیلی بد» قرار داشتند. بررسی نقشه‌های مربوط به فشارهای تجمعی (شکل ۷) نیز نشان داد که بیشترین تراکم فشارهای انسانی در نواحی مرکزی و شمال شرقی حوضه، به‌ویژه در اطراف شهر مشهد، متمرکز شده و این مناطق در وضعیت فشار بحرانی قرار دارند. مناطق میان‌دست و پایین‌دست حوضه نیز تحت تأثیر ترکیبی از فشارهای کشاورزی، شهری، صنعتی و سدسازی، بیشترین تغییرات بوم‌شناختی و کاهش کیفیت آب را تجربه کرده‌اند. این نتایج بر اهمیت مدیریت کاربری اراضی و کنترل منابع آلاینده در راستای

حفظ کیفیت آب و سلامت بوم‌سازگان رودخانه‌ای تأکید دارد. به‌طورکلی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تداوم بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی و فقدان برنامه‌ریزی مناسب در کاربری اراضی، به بروز تغییرات بوم‌شناختی چشمگیری در حوضه آبریز کشف‌رود منجر شده است. این تغییرات نه تنها کیفیت منابع آب را به خطر انداخته، بلکه پایداری رودخانه را نیز تهدید کرده است.

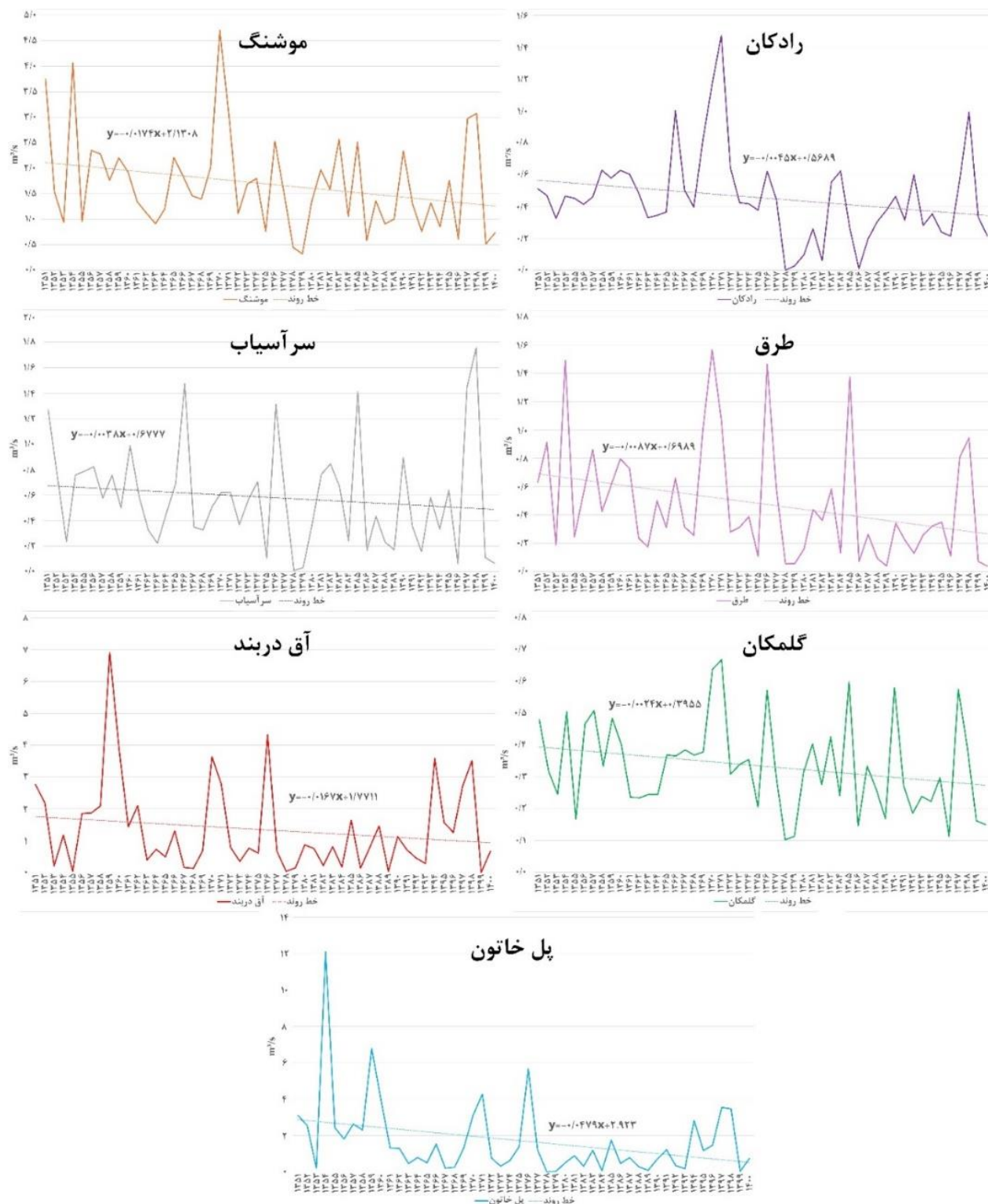
بررسی روند تغییرات دبی متوسط سالانه در هفته ایستگاه منتخب نشان داد که تمامی ایستگاه‌ها روندی نزولی داشته و بیانگر کاهش عمومی جریان‌های سطحی در چند دهه اخیر است. بیشترین نرخ افت مربوط به ایستگاه پل خاتون (۰/۰۴۷۹-) واقع در خروجی حوضه است (شکل ۱). در مجموع، این الگوی فراگیر افت دبی بیانگر تاثیر همزمان تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی و سایر فشارهای انسانی بر رژیم هیدرولوژیکی کشف‌رود و هشداردهنده تداوم روند کاهش منابع آب سطحی در منطقه است.

بحث و نتیجه‌گیری

تغییرات کاربری اراضی، رشد جمعیت، توسعه صنعتی، تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی طی دهه‌های اخیر فشارهای فزاینده‌ای را بر حوضه‌های آبریز وارد کرده‌اند که تداوم آن می‌تواند منجر به تخریب بوم‌سازگان و کاهش خدمات محیط‌زیستی گردد (۱۹، ۳۶ و ۳۷). بررسی‌های این پژوهش نشان داد که کیفیت آب رودخانه کشف‌رود در وضعیت نامطلوبی قرار دارد و ورود آلاینده‌ها از منابع متعدد آن را به یکی از محیط‌های تهدیدکننده سلامت انسان تبدیل کرده است.

تحلیل تغییرات کاربری اراضی طی پنج دهه (۱۴۰۲-۱۳۵۲) نشان داد که پوشش طبیعی مراتع کاهش چشم‌گیری داشته و این امر بیانگر تخریب گسترده پوشش گیاهی و افت کارکردهای بوم‌شناختی است؛ در مقابل، اراضی بایر حدود ۵۷/۳٪ افزایش یافته‌اند. در کنار این تحولات کاربری اراضی، کشاورزی یکی از فشارهای انسانی اصلی در بخش بالادست و میان‌دست حوضه

است که عمده این اراضی به کشت غلات (گندم و جو) اختصاص دارند. استفاده از نهاده‌های شیمیایی در کشاورزی، منجر به تولید پساب‌ها و زه‌آب‌های آلاینده می‌شود (۴۱). کودها و سموم استفاده‌شده توسط کشاورزان سبب افزایش نیتрат و فسفات آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش اکسیژن محلول آب می‌شوند (۲) و ورود کودها و سموم به چرخه آب موجب افزایش غلظت نیترات و فسفات در منابع سطحی و زیرزمینی، کاهش اکسیژن محلول و درنهایت بروز پیامدهای منفی بر سلامت انسان و سایر زیست‌مندان شده است (۳ و ۴۶). همچنین سموم شیمیایی پس از ورود به خاک، اثرات سمی خود را به مدت طولانی حفظ کرده و موجودات خاک‌زی و زنجیره غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. افزون بر این، برداشت آب برای آبیاری محصولات کشاورزی فشار مضاعفی بر منابع آبی وارد نموده و موجب اختلال در پیوستگی هیدرولوژیک و بوم‌شناختی رودخانه‌ها می‌شود (۵۹). در مطالعه‌ای تأثیر منابع آلاینده بر کیفیت آب رودخانه کشف‌رود بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در فصل‌های زراعی، به دلیل مصرف زیاد سموم و کودهای شیمیایی و همچنین کاهش دبی جریان رودخانه ناشی از برداشت آب برای آبیاری اراضی کشاورزی، میزان کدورت، نیترات و غلظت املاح محلول در آب افزایش می‌یابد (۲۱). بررسی روند تغییرات دبی سالانه در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه (شکل ۸) نشان داد که مجموع جریان سطحی طی پنج دهه اخیر کاهش چشم‌گیری یافته است. شیب خطوط روند در اغلب ایستگاه‌ها منفی بوده (در بازه ۰/۰۱- تا ۰/۰۵- مترمکعب بر ثانیه در سال) که بیانگر افت تدریجی جریان پایه و تشدید ناپایداری رژیم هیدرولوژیک است. در ایستگاه‌های پایین دست (آق‌در بند و پل‌خاتون) اثر برداشت انسانی و تغییر کاربری اراضی به وضوح مشاهده می‌شود. کاهش دبی پایه به ویژه در مقاطع پایین‌دست، بیانگر تاثیر تلفیقی اقلیم خشک، توسعه کشاورزی و برداشت بی‌رویه از منابع آبی است. در پژوهشی دیگر، غلظت عناصر سنگین در طول رودخانه کشف‌رود در پنج ایستگاه نمونه‌برداری طی فصل بهار بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت عنصر



شکل ۸. روند تغییرات دبی متوسط سالانه در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز کشف‌رود در بازه زمانی ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۰.

رودخانه، به‌ویژه در اطراف تصفیه‌خانه التیمور (ایستگاه نمونه‌برداری شماره ۵- شکل ۱) نسبت داده‌شده است (۴۴).

جیوه در اغلب ایستگاه‌ها بیشتر از حد مجاز بوده است که یکی از علل آن به مصرف سموم شیمیایی در اراضی کشاورزی حاشیه

همچنین نتایج مطالعه‌ای دیگر بیانگر آن بود که غلظت تمامی فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در رودخانه کشف‌رود، کمتر از حدود مجاز استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای مصارف کشاورزی است؛ با این حال، با توجه به ادامه روند ورود آلاینده‌های سمی به رودخانه، خطر افزایش سریع و تجمعی غلظت این عناصر و رسیدن به مقادیر بحرانی در آینده وجود دارد (۳۵).

همچنین مساحت مناطق مسکونی افزایش یافته و تقریباً دو برابر شده و پیامدهای مستقیم توسعه شهری را بر منابع آب آشکار ساخته است. بیشترین فشار ناشی از شهرنشینی در بخش‌های میان‌دست حوضه، اطراف کلان‌شهر مشهد و شهرهای گلبهار، چناران، طرقبه و شاندیز مشاهده می‌شود. توسعه شهری با تغییر رژیم‌های هیدرولوژیک رودخانه‌ها و افزایش دبی‌های اوج و حجم رواناب، موجب تشدید تغییرات جریان و تهدید پایداری بوم‌شناختی سیستم‌های رودخانه‌ای شده است (۲۲، ۴۷، ۱۵، ۲۰، ۸ و ۱۴). علاوه بر این، ظرفیت محدود تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مشهد نیز از چالش‌های اساسی مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. در حال حاضر، چهار تصفیه‌خانه فعال شامل پرکنندآباد با ظرفیت روزانه ۱۲۰ هزار مترمکعب، خین عرب با ۸۳ هزار مترمکعب، التیمور با ۷۰ هزار مترمکعب و اولنگ با ۲۵ هزار مترمکعب در حال بهره‌برداری هستند. بر اساس برآوردهای جمعیتی، ظرفیت مورد نیاز تصفیه فاضلاب در شرایط فعلی حدود ۵۴۲ هزار مترمکعب در روز بوده و این میزان تا افق سال ۱۴۲۰ به حدود ۸۱۴ هزار مترمکعب در روز افزایش خواهد یافت. این اختلاف قابل توجه میان ظرفیت موجود و نیاز واقعی منجر به ورود مستقیم بخشی از فاضلاب شهری به رودخانه کشف‌رود و تشدید آلودگی‌ها شده است (۲۴ و ۳۵).

از سوی دیگر، فشار ناشی از شهرک‌ها و واحدهای صنعتی در حوضه کشف‌رود به یک چالش عمده زیست‌محیطی بدل گردیده است. طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵، تعداد واحدهای صنعتی از کمتر از ۱۰۰ به بیش از ۴۵۰۰ واحد افزایش یافته است (۲۸). صنایع غالب شامل فلزی، غذایی و شیمیایی بوده و برخی

از آن‌ها به‌ویژه در شهرک صنعتی طوس، پساب‌های خود را به تصفیه‌خانه پرکنندآباد (محل ایستگاه نمونه‌برداری شماره ۱-شکل ۱) منتقل می‌کنند که به کاهش راندمان تصفیه و افت کیفیت پساب خروجی منجر می‌شود (۵۱). افزون بر این، تخلیه مستقیم پساب‌های صنعتی به رودخانه، به‌ویژه در بخش پایین‌دست و نیز ورود پساب شور شهرک چرم‌شهر (ایستگاه نمونه‌برداری شماره ۶-شکل ۱)، آثار منفی قابل‌توجهی بر کیفیت آب و اراضی کشاورزی اطراف داشته است. از دیگر منابع آلاینده می‌توان به کارگاه‌های برداشت شن و ماسه اشاره کرد که موجب تغییر رنگ و شفافیت آب، افزایش کدورت، غلظت یون‌های سولفات، کاهش اکسیژن محلول و افزایش مقادیر BOD و COD می‌شوند (۵۰). این تغییرات نه تنها کیفیت آب، بلکه سلامت بوم‌سازگان رودخانه‌ای را تهدید می‌کنند.

علاوه بر این، احداث سدها نیز با تغییر رژیم هیدرولوژیک، ریخت‌شناسی و زیستی رودخانه‌ها (۱۳، ۱۷ و ۵۲) از عوامل کلیدی تغییر در اکوسیستم محسوب می‌شود. چهار سد مخزنی مهم حوضه آبریز کشف‌رود شامل طرق (با ظرفیت ۳۳/۱ میلیون مترمکعب)، کارده (۲۸/۱ میلیون مترمکعب)، ارداک (۳۰ میلیون مترمکعب) و دولت‌آباد (۱/۲ میلیون مترمکعب) هستند (شکل ۶). اگرچه ظرفیت کل این سدها ۹۲/۴ میلیون مترمکعب است؛ اما طبق آمار شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ذخیره واقعی آن‌ها در سال ۱۴۰۲ تنها ۲۵/۶۸ میلیون مترمکعب گزارش شده که ۷۲٪ کمتر از ظرفیت کل است (۳۴) و این کاهش شدید موجب تغییرات اساسی در جریان‌های پایین‌دست و تضعیف فرآیندهای بوم‌شناختی گردیده است (۱۲).

در نهایت، بررسی نقشه فشارهای تجمعی نشان داد که الگوی توزیع فشارهای انسانی در حوضه کشف‌رود ناهمگن بوده (شکل ۱۷) و بیشترین تراکم فشارها در نواحی مرکزی و شمال شرقی به دلیل گسترش کاربری شهری، صنعتی و کشاورزی مشاهده می‌شود. در مقابل، شدت فشارها (شکل ۱۶) در بخش‌های میانی حوضه، به‌ویژه در مسیرهای اصلی آبراه‌ها، بیشتر بوده که ناشی از اثرات سدسازی، برداشت شن و ماسه و توسعه کاربری‌های

کارآمد برای کنترل و کاهش فشارهای محیط‌زیستی در دستور کار قرار گیرد تا امکان احیای شرایط بوم‌شناختی و پایداری بلندمدت این حوضه فراهم آید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری ارزشمند شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی که در گردآوری داده‌ها مشارکت داشتند، سپاسگزاری نمایند.

شهری است. این نتایج نشان دادند که حتی مناطقی با تعداد محدود منابع فشار می‌توانند به دلیل شدت بالای اثرگذاری، تغییرات قابل توجهی بر بوم‌سازگان ایجاد کنند.

درمجموع، یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که تداوم بهره‌برداری بی‌رویه و مدیریت ناپایدار در حوضه کشف‌رود می‌تواند منجر به بحران‌های جدی در کیفیت منابع آب، سلامت بوم‌سازگان و امنیت آبی منطقه گردد. از این‌رو، ضرورت دارد راهکارهایی مبتنی بر مدیریت یکپارچه منابع آب، بازنگری در الگوهای توسعه شهری و کشاورزی و اتخاذ سیاست‌های حفاظتی

منابع

1. Abedini, M., Pour Farrash Zadeh, F. and Gharachorlu, M., 2021. Analysis and modeling of the relationship between monthly discharge and geomorphometric characteristics (Case Study: Kashafrud Watershed). *Geography and Environmental Planning* 32(4): 29-44. (In Persian)
2. Aghasafari, H., Ghorbani, M. and Doorandish, A., 2015. Analysis of farmers' financial participation to reduce chemical fertilizer consumption (Case study: Kashafrud River watershed). *Journal of Agricultural Economics and Development* 29(1): 1-19. (In Persian)
3. Ahmad, M.F., Ahmad, F.A., Alsayegh, A.A., Zeyaulah, M., AlShahrani, A.M., Muzammil, K., Saati, A.A., Wahab, S., Elbendary, E.Y., Kambal, N. and Abdelrahman, M.H., 2024. Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*, 10(7).
4. Akbari, M., Jarge, M. R. and Madani Sadat, H., 2012. Assessment of decreasing of groundwater-table using Geographic Information System (GIS) (Case study: Mashhad Plain Aquifer). *Journal of Water and Soil Conservation* 16(4): 63-78. (In Persian)
5. Alranaei, M., Pourmanafi, S., Nemati, M. and Lotfi, A., 2025. Monitoring the water quality of the Karun Bozorg River based on the IRWQIsc index in the spring of 2022. *Geography and Environmental Planning*, 35(4): 165-192.
6. APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd edition.). American Public Health Association, Washington DC, US.
7. Arnell, N. W., Vuuren, D. P. and Isaac, M., 2011. The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change* 21: 592-603.
8. Ashley, S. T., and Ashley, W. S., 2008. Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47: 805-818.
9. Azamirad, M., Ghahraman, B. and Esmaeili, K. (2018). Investigation flooding potential in the Kashafrud Watershed, Mashhad, using SCS and GIS. *Watershed Management Journal* 9(17): 26-38. (In Persian)
10. Babaei Semiromi, F., Hassani, A. H., Torabian, A., Karbassi, A. R. and Hosseinzadeh Lotfi, F. 2011. Water quality index development using fuzzy logic: A case study of the Karoon river of Iran. *African Journal of Biotechnology*. 10(50): 10125-10133.
11. Bagheri, H., Mazlomi Mochani, M., Khalili, R. and Moridi, A., 2024. Seasonal changes in the water quality of Sardab River: dual perspectives of the Iran Water Quality Index (IRWQI) for surface water resources – conventional parameters (IRWQIsc) and the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). *Journal of Water and Irrigation Management* 14 (1): 224-234.
12. Baumgartner, L. J., Marsden, T., Duffy, D., Horta, A., and Ning, N., 2021. Optimizing efforts to restore aquatic ecosystem connectivity requires thinking beyond large dams. *Environmental Research Letters*, 17(1): 014008.
13. Beck, M. W., Claassen, A. H. and Hundt, P. J., 2012. Environmental and livelihood impacts of dams: common lessons across development gradients that challenge sustainability. *International Journal of River Basin Management*, 10(1): 73-92.

14. Brown, L. R., Cuffney, T. F., Coles, J. F., Fitzpatrick, F., McMahon, G., Steuer, J., et al., 2009. Urban streams across the USA: Lessons learned from studies in 9 metropolitan areas. *Journal of the North American Benthological Society*, 28(4): 1051-1069.
15. Burian, S.J. and Pomeroy, C.A., 2010. Urban impacts on the water cycle and potential green infrastructure implications. *Urban ecosystem ecology*, 55: 277-296.
16. Carpenter, J. H., 1965. The accuracy of the winkler method for dissolved oxygen analysis. *Limnology and Oceanography*, 10: 135-140.
17. Chen, S., Fath, B. D. and Chen, B., 2010. Ecological risk assessment of hydropower dam construction based on ecological network analysis. *Procedia Environmental Sciences*, 2: 725-728.
18. Dadkhah Tehrani, M., Karimi Darmian, S., Moridi, A. and Khalili, R., 2023. Evaluation of water quality of Chalus River based on IRWQISC and NSFQI water quality index. *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3): 7064-7072.
19. Darko, G., Obiri-Yeboah, S., Takyi, S. A., Amponsah, O., Borquaye, L.S., Amponsah, L.O., Fosu-Mensah, B.Y., 2022. Urbanizing with or without nature: pollution effects of human activities on water quality of major rivers that drain the Kumasi Metropolis of Ghana. *Environmental Monitoring and Assessment*. 194(1): 38.
20. Debbage, N., and Shepherd, J. M., 2018. The influence of urban development patterns on streamflow characteristics in the Charlanta Megaregion. *Water Resources Research*, 54(5): 3728-3747.
21. Dehghan, P., Ghafari, M., and Alami, S., 2008. Investigation of the impact of emerging pollutants on water quality of the Kashafrud River 3rd Conference on Water Resources Management of Iran, University of Tabriz, Iran. (In Persian).
22. DeWalle, D. R., Swistock, B. R., Johnson, T. E., and McGuire, K. J., 2000. Potential effects of climate change and urbanization on mean annual streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 36(9): 2655-2664.
23. Environment Protection Agency. 2013. Iran's water resources quality index calculation manual, Tehran, Iran. (In Persian)
24. Esmailian, H., Taffazoli, S.M., Rajabzadeh Moghani, N., and Ghodsizadeh Azarmi., S.A., 2021. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(2): 63-70.
25. Fisher, G., Tubiello, F., van Velthuisen, H., and Wiberg, D., 2006. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74: 1083-1107.
26. Forrester, J. W. (1961). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48: 1037-1041.
27. Ghamarnia, H., Palash, Z., and Palash, M., 2023. Evaluation of Golin river quality in Kermanshah province using the standard surface water resources quality index of Iran (IRWQISC). *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 10(1): 7-14.
28. Gholizadeh Sarabi, S., Davary, K., Ghahraman, B., and Shafiei, M., 2021. A perceptual socio-hydrological model of co-evolutionary coupled human-water system based on historical analysis, Mashhad basin, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 66(3): 355-372.
29. Hanna, D. E., Tomscha, S. A., Ouellet Dallaire, C., and Bennett, E. M., 2018. A review of riverine ecosystem service quantification: Research gaps and recommendations. *Journal of Applied Ecology*, 55(3): 1299-1311.
30. Helm, I., Jalukse, L., and Leito, I., 2012. A highly accurate method for determination of dissolved oxygen: Gravimetric Winkler method. *Analytica Chimica Acta*, 741: 21-31.
31. Hering, D., Borja, A., Carstensen, J., Carvalho, L., Elliott, M., Feld, C.K., Heiskanen, A.S., Johnson, R.K., Moe, J., Pont, D. and Solheim, A.L., 2010. The European Water Framework Directive at the age of 10: a critical review of the achievements with recommendations for the future. *Science of the total Environment*, 408(19): 4007-4019.
32. Kazemi Roshkhari, I., Asadi Vaighan, A., Azari, M., 2024. Impacts of climate change and land use on the discharge of Kashfroud basin using SWAT model. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 28 (1):93-109. (In Persian).
33. Ketabi, N., Dadkhah Tehrani, M., Moridi, A., and Khalili, R., 2024. Assessment of the Water Quality of Tajan River (Sari) Using NSFQI and IRWQISC Quality Indices. *Journal of Research in Environmental Health*, 10(1): 96-109.
34. Khorasan Razavi Regional Water Company (KRRWC). 2023. Water Profile of Khorasan Razavi Province (Statistical Yearbook 2023). Ministry of Energy, Khorasan Razavi Regional Water Company, Mashhad, Iran. (In Persian)
35. Laqayi Afshar, P., Dastourani, M., Azari, M., and Farzam, M., 2016. Assessment of Mashhad city on surface water quality. Conference on Geography, Environment, Security, and Tourism, Bozorgmehr University of Qaenat, Iran. (In Persian)
36. Li, P., Tian, R., Xue, C. and Wu, J., 2017. Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15): 13224-13234.
37. Li, P., Wang, D., Li, W., and Liu, L., 2022. Sustainable water resources development and management in large river basins: an introduction. *Environmental Earth Sciences*, 81(6): 179.

38. Liani, G., Bakhshoudeh, M., and Zibayi, M., 2019. Application of system dynamics in evaluating policy effects on water demand management in the KheirAbad River Basin. *Journal of Economic and Agricultural Development Research of Iran*, 51(2): 195–216. (In Persian)
39. Loomis, J., P. Kent, L. Strange, K. Fausch and A. Covich., 2001. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey. *Journal of Ecological Economics and Management*, 33: 103-117.
40. Mahmoodi, M., Honarmand, M., Naseri, F. and Mohammadi, S., 2020. The Effect of Land Use Changes on the Flood Hydrograph in the Kashaf-Rood River by Analyzing of SCS-CN Results. *Water and Soil*, 34(1), 43-54. (In Persian)
41. Mateo-Sagasta, J.; Zadeh, S.M.; Turrall, H.; Burke, J., 2017. Water pollution from agriculture: A global review. In Executive Summary; FAO: Rome, Italy; IWMI: Colombo, Sri Lanka.
42. Ministry of Energy. 2005. Guide Lines and Criteria for Classification and Coding Watersheds and Study Areas in Iran. Iran Water Resources Management Company. Tehran, Iran.
43. Mirzae, M., and Nazari, A., 2004. Investigation of population changes on water quality in Latyan River Basin. *Water and Wastewater Journal*, 15(1): 33-21. (In Persian)
44. Modarres, M., Rezaei, M., and Naseri, M.A., 2013. Investigation of lead, chromium, and cadmium concentrations in the Kashafrud River and some agricultural products. *Agricultural Water Research Journal*, 27(3): 359-367. (In Persian)
45. Mostafavi, H., Schinegger, R., Pinter, K., Kremser, H., Bakhtiyari, M., Abdoli, A., et al., 2015. Comparison of human pressures and fish assemblages in the salmonid and cyprinid streams of the southern Caspian Sea basin. *Iran Journal of Ichthyology*, 2: 20-34.
46. Pathak, V.M., Verma, V.K., Rawat, B.S., Kaur, B., Babu, N., Sharma, A., Dewali, S., Yadav, M., Kumari, R., Singh, S. and Mohapatra, A., 2022 Current status of pesticide effects on environment, human health and its eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. *Frontiers in microbiology*, 13: 962619.
47. Poff, N. L., Bledsoe, B. P., and Cuhaciyan, C. O., 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology*, 79: 264-285.
48. Rafiee, G., Moezzi, F., Poorbagher, H., Rezaei Tavabe, K., and Nematollahi, M., 2021. Study on water quality of the Balighli-chai and Ghare-Sou Dareh Roud Rivers using the biotic indices of aquatic invertebrates and Iran's water resources quality index (IRWQISC). *Natural Environment Journal*, 74(4): 798-808. (In Persian)
49. Rajayi, H., Esmaeili, K., Baghian Kalan, A., Sheibani Zadeh, Z., and Vahedi Toroghi, A., 2018. Study and identification of general characteristics of rivers in Khorasan Razavi province in the sub-basins of the central desert, salt desert, and Nehbandan-Khaf. 3rd National Conference on Soil and Watershed Protection, Tehran, Iran. (In Persian)
50. Saviour, N.M., 2012. Environmental impacts of soil and sand mining: a review. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(3): 125-134.
51. Shojaan, S., and Bannejad, H., 2015. The role of industrial units and wastewater treatment plants in the pollution of Kashafrud River in Mashhad plain. National Congress on Irrigation and Drainage of Iran, Mashhad, Iran. (In Persian)
52. Suen J.P., 2011. Determining the ecological flow regime for existing reservoir operation. *Water Resources Management*, 25: 817 -835.
53. Tickner, D., Opperman, J.J., Abell, R., Acreman, M., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Cooke, S.J., Dalton, J., Darwall, W., Edwards, G. and Harrison, I., 2020. Bending the curve of global freshwater biodiversity loss: an emergency recovery plan. *BioScience*, 70(4): 330-342.
54. Wang, J., Li, J., Liu, S., Li, H., Chen, X., Peng, C., Zhang, P. and Liu, X., 2021. Distinct micro plastic distributions in soils of different land-use types: a case study of Chinese farmlands. *Environmental Pollution*: 269: 116-199.
55. Wei, Y., Jiao, Y., An, D., Li, D., Li, W., and Wei, Q., 2019. Review of dissolved oxygen detection technology: From laboratory analysis to online intelligent detection. *Sensors*, 19(18): 3995.
56. Wilde, F.D. and Radtke, D.B. eds., 1998. Handbooks for Water-resources Investigations: National field manual for the collection of water-quality data. Field measurements (Vol. 9). US Department of the Interior, US Geological Survey, US.
57. Yazdani, V., and Alimirzayi, H., 2017. Presenting a comprehensive plan for organizing and improving the Kashafrud River. *Natural ecosystems of Iran*, 8(4): 71-93. (In Persian)
58. Yong, M., Shinoda, M., Nandintsetseg, B., Bi, L., Gao, H., and Wang, Y., 2021. Impacts of land surface conditions and land use on dust events in the inner Mongolian grasslands, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9: 664900.
59. Zeaiean, P., Rabiei H, R., Alimohamadi, A., 2006. Detection of land use/cover Changes of Isfahan by agricultural lands around urban area using remote sensing and GIS technologies. *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 9 (2):41-54. (In Persian)

Integrated Assessment and Spatial Mapping of Anthropogenic Pressures Affecting the Ecological Status of the Kashafrud River Basin

Mahshid Hosseini¹, Hossein Mostafavi^{2*}, Khosro Piri³, Majid Delavar⁴ and Kamran Davari⁵

(Received: November 15-2025; Accepted: December 06-2025)

Abstract

Rivers are vital components of the hydrological cycle and ecosystems. However, rapid urban expansion, land-use change, overexploitation of water resources, dam construction, and industrial and agricultural pollutants have exerted significant pressure on these systems. This study employs an integrated approach to assess anthropogenic impacts on the Kashafrud River Basin. Water quality was evaluated at 10 monitoring stations using the Iranian Water Quality Index (IRWQI_{sc}), while land use changes—such as agricultural expansion, urban development, industrial activities, sand and gravel extraction, and dam construction—were analyzed through spatial data and satellite imagery. Results show that agricultural land increased from 13.44% to 18.23% over five decades, while rangeland decreased from 58.20% to 36.98%. Residential areas expanded from 1.27% to 2.24%. Water quality assessments indicated that most stations fall into the “very poor” category. Cumulative pressure analysis revealed that the central and northeastern parts of the basin, especially around Mashhad, experience the highest levels of anthropogenic stress. These findings highlight the urgent need for integrated water management, revised land-use planning, and stricter controls on pollution sources to ensure the long-term sustainability of the Kashafrud River.

Keywords: Kashafrud River, Water Quality, Anthropogenic Pressures, Land Use, IRWQI_{sc}, Water Resources Management

-
1. Ph.D. Student, Research Institute of Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
 2. Associate Professor, Department of Biodiversity and Ecosystem Management, Environmental Sciences Research Institute (ESRI), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
 3. Professor, Department of Biodiversity and Ecosystem Management, Environmental Sciences Research Institute (ESRI), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
 4. Associate Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
 5. Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- *: Corresponding author, E-mail: hmostafaviw@gmail.com