ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی حوضه رودخانه گرگانرود برای مصارف مختلف با رویکرد شاخص کیفیت آب کانادا (CCME)

آرش زارع گاریزی[1*]، کاکا شاهدی[2] و آرین مطبوع[3]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰)

چکیده

خصوصیات کیفی آب از مؤلفه‌هایی است که لحاظ آن در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب، ارزیابی سلامت حوضه‌های آبخیز و همچنین اعمال تغییرات مدیریتی ضرورت دارد. هدف از این تحقیق، ارائه یک تصویر کلّی از وضعیت کیفیت آب‌های سطحی در حوضه رودخانه گرگانرود برای استفاده در طرح‌ها و برنامه‌های مدیریت آبخیز است. بدین منظور از داده‌های ثبت شده تعدادی از متغیرهای فیزیکوشیمیایی آب (شامل آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی، TDS، EC، SAR، pH و سختی کل) در ۲۵ ایستگاه هیدرومتری و شاخص کیفیت آب کانادا (CCME) برای ارزیابی استفاده شد. نتایج ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت نشان داد که به‌طورکلی، میانگین شاخص کیفیت آب در سرشاخه‌ها و مناطق مرتفع، بیشتر از مناطق پایین‌دست و نزدیک به خروجی حوضه است. فرایندهای ژئوشیمیایی و اضافه شدن انواع آلاینده به آب در مسیر حرکت آب از سرشاخه‌ها تا خروجی حوضه باعث کاهش کیفیت آب شده است. بالاترین کیفیت آب در سطح حوضه برای ایستگاه‌های کبودوال و شیرآباد و پایین‌ترین در ایستگاه باغسالیان ارزیابی شده است. در مورد کیفیت آب برای مصرف شرب، از بین متغیرهای منتخب برای ارزیابی، متغیرهای سختی، بی‌کربنات و کلرید، عوامل تنزل کیفیت آب در سرشاخه‌ها و مناطق بالادست حوضه تشخیص داده شد. امّا به سمت پایین‌دست حوضه، با افزایش آلاینده‌هایی مانند TDS، سولفات و سدیم، کیفیت آب رودخانه به‌شدت کاهش پیدا کرده و در وضعیت نسبتاً ضعیف تا ضعیف قرار گرفته است. کیفیت آب برای مصارف کشاورزی در اکثر ایستگاه‌های حوضه (حدود ۶۰٪ ایستگاه‌ها) در طبقه عالی قرار دارد و عامل محدودکننده‌ای از منظر کیفی وجود ندارد. تنها در ۳ ایستگاه در نزدیکی خروجی حوضه میزان بالای کلرید، SAR و هدایت الکتریکی باعث شده کیفیت آب برای مصارف کشاورزی در طبقه نسبتاً ضعیف تا ضعیف قرار گیرد. در خصوص کیفیت آب برای مصارف صنعتی، تنها ۲۸٪ از ایستگاه‌های هیدرومتری که در سرشاخه‌ها قرار دارند، در وضعیت خوب ارزیابی شده است. سختی آب، اسیدیته و TDS مهم‌ترین عوامل تنزل کیفیت آب برای مصارف صنعتی در مناطق بالادست حوضه و کلرید و سولفات عوامل کاهش کیفیت آب در پایین‌دست حوضه هستند. نتایج این تحقیق می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، آبخیزداری و منابع طبیعی در حوضه گرگانرود کمک نماید. امّا در بخش صنعت و به‌ویژه بهداشت و سلامت نیاز به بررسی‌های تفصیلی‌تر، با در نظر گرفتن برخی دیگر از متغیرهای مهم کیفیت آب (مانند نیترات، کلیفرم کل، کلیفرم روده‌ای و ...) است.

واژه‌های کلیدی: استاندارد کیفیت آب، پارامترهای کیفیت آب، حوضه گرگانرود، شاخص کیفیت آب کانادا

۱. گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: arash.zare86@gmail.com

مقدمه

مدیریت حوضه‌های آبخیز فرایندی پیچیده است که نیاز به تجزیه‌وتحلیل مقادیر زیادی از داده‌های نظارتی در سطح تحلیلی، مکانی و زمانی دارد (۲۵). در نظر گرفتن خصوصیات کیفی آب جهت ارزیابی سلامت حوضه‌های آبخیز، برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب و اعمال تغییرات مدیریتی ضرورت دارد. کیفیت آب تحت‌تأثیر عوامل طبیعی و مداخلات انسانی بوده (۱۹) که موضوع بسیار حساس و نیازمند مدیریت همه‌جانبه است (۱۸). رودخانه‌ها از منابع آب در دسترس انسان بوده و از دیرباز همواره جوامع انسانی و مراکز صنعتی در مجاورت آن برپا شده است (۲۶). به همین دلیل مقادیر زیادی از آلاینده‌های انسانی و صنعتی وارد رودخانه‌ها می‌شود (۱۸). لذا برنامه مدون برای حفظ منابع آب و کنترل آلودگی‌های آن‌ها مسئله مهمی در بخش‌های مدیریتی بوده است (۲۰). در همین راستا پایش و مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها به‌دلیل قرارگیری در معرض انواع آلاینده‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند (۲۶). بنابراین ارزیابی کیفیت منابع آب با استفاده از شاخص‌های کیفی، روشی مناسب جهت مدیریت منابع آب محسوب می‌شود (۲۰). شاخص کیفیت آب (WQI) ابزاری برای تعیین کیفیت آب با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب‌های سطحی بوده که بر اساس چندین پارامتر کیفیت آب، کیفیت کلی آب را در یک مکان و زمان مشخص، با ارائه یک عدد واحد بیان می‌کند (۲۳). هدف از شاخص کیفیت آب تبدیل داده‌های پیچیده کیفیت آب به اطلاعات قابل درک و قابل استفاده برای عموم است (۱۴) و به‌عنوان ابزاری ارزشمند در فرایند ارزیابی و مدیریت منابع آب محسوب شده که به‌طور بالقوه در مراحل مختلف مدیریت و تصمیم‌گیری از جمله ارزیابی و پایش سلامت منابع آب و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی قابل استفاده هستند (۱۳). اولین شاخص کیفیت آب با استفاده از متغیرهای مختلف توسط هورتون ارائه شد که بعدها توسط سازمان ملی بهداشت ایالات متحده (NSF) اصلاح شد و تحت عنوان NSFWQI مورد استفاده قرار گرفت (۳ و ۱۷). شاخص کیفیت آب محیط‌زیست شورای وزیران کانادا (CCME-WQI)، یکی از موفق‌ترین تلاش‌ها برای تدوین یک شاخص کارآمد برای ارزیابی کیفیت آب به شمار می‌رود. از جمله مزایای شاخص CCME-WQI عدم محدودیت تعداد پارامترهای مورداستفاده جهت ارزیابی کیفیت آب است (۱۹) و به‌طور کلی در مورد نوع و تعداد پارامترهای آبی که باید در یک دوره آزمایش شوند، و نوع بدنه آبی آزمایش شده انعطاف‌پذیر است (۶). شاخص CCME-WQI در برنامه محیط‌زیست ملل متحد (NUEP) به‌عنوان روش مبنایی برای تدوین شاخص جهانی کیفیت آب شرب انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به‌عنوان روشی بهینه توسط متخصصان برجسته کیفیت آب حاضر در کارگاه‌های برگزار شده توسط برنامه توسعه سازمان ملل متحد (UNDP) انتخاب شد (۲۱ و ۲۲). در زمینه ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های مختلف، پژوهش‌های بسیاری در سراسر دنیا انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

بررسی اسیدیته (pH)، مواد جامد محلول (TDS)، اکسیژن محلول، نیترات و فسفات در مطالعات موکوت و همکاران (۱۸) با استفاده از روش CCME-WQI جهت ارزیابی کیفیت آب رودخانه کارنافولی بنگلادش نشان می‌دهد که ورود پساب صنعتی به این رودخانه باعث کاهش کیفیت آب رودخانه شده به‌گونه‌ای که آب رودخانه برای زندگی آبزیان، انسان، مصارف آبیاری و صنعتی مناسب نیست. ارزیابی وضعیت شیمیایی رودخانه در مطالعه گیکاس و همکاران (۱۱) بر اساس روش WFD-MEEG، نشان می‌دهد که آب رودخانه در کلاس کیفیت "خوب" بود، درحالی‌که طبق CCME-WQI کیفیت رودخانه در نقاط مختلف در رده خوب، نسبتا ضعیف تا ضعیف متغیر بود. به نظر می‌رسد که CCME-WQI سخت‌گیرتر از WFD MEEG است. همچنین گارسیا آویلا و همکاران (۸) با مقایسه روش‌های WAWQI و CCME-WQI برای ارزیابی کیفیت آب در شهر آزوگ در اکوادور دریافتند که شاخص CCME مناسب برای فعالیت‌های نظارتی است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای ارزیابی و درک کیفیت آب آشامیدنی مورداستفاده قرار گیرد. آبیاری، تأمین آب خانگی، تفریح و تأمین غذا (ماهیگیری) از کارکردهای مهم دریاچه هاواسا در اتیوپی محسوب می‌شود. از این‌رو مطالعات زمد و

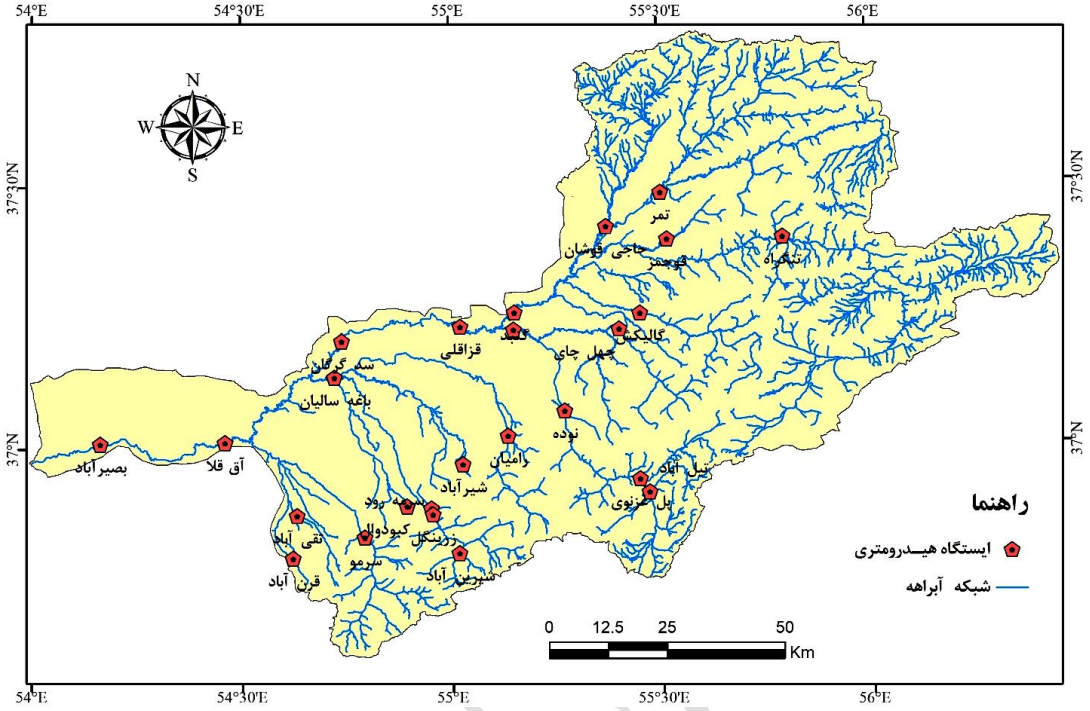
همکاران (۲۷) نشان می‌دهد که با افزایش ورود آلاینده‌ها کیفیت آب این دریاچه با توجه به شاخص CCME کاهش یافته و کیفیت در محدوده نسبتاً ضعیف قرار دارد. در مطالعه بیلگین (۲) کیفیت آب حوضه رودخانه کوروه در شرق ترکیه با استفاده از روش CCME WQI ارزیابی شد و نتایج نشان داد که کیفیت آب حوضه رودخانه کوروه تحلیل رفته و در معرض تهدید است و کیفیت کلی آن به سطح طبیعی یا مطلوب نزدیک نیست. ورود حجم عظیمی از فاضلاب، رودخانه گنگ را در معرض تخریب و آلودگی گسترده قرار داده و تلاش زیادی برای بهبود کیفیت آب رودخانه شده است. از این‌رو مطالعات کاناوجیه و تیواری (۱۵) با استفاده از روش CCME WQI نشان داد که علی‌رغم تلاش‌ها، کیفیت رودخانه برای استفاده عمومی مناسب نبود و بهبود قابل‌ملاحظه‌ای حاصل نشد. الگوهای به‌دست آمده از تلفیق روش CCME WQI و نقشه‌های خودسازماندهی کوهونن (SOM) در مطالعه یوتووا و همکاران (۲۵) با استفاده از داده‌های ۱۰ ایستگاه در حوضه رودخانه مستا بلغارستان طی دوره ۲۰۰۸ الی ۲۰۱۸ بیانگر تفاوت کیفیت آب در موقعیت‌های زمانی و مکانی مختلف بوده و می‌تواند با فعالیت‌های مدیریتی متفاوت بهبود یابد. گردآوری اطلاعات ارزیابی کیفیت آب پهنه‌های مختلف آبی با استفاده از رویکرد WQI در مطالعه جلال‌الدین و همکاران (۷) نشان می‌دهد که عمده مطالعات انجام شده در ایران مربوط به حوضه رودخانه کارون، جاجرود و شهرچای است.

ایران دارای منابع آب طبیعی محدودی است که بخش بزرگی از آن متشکل از آب‌های سطحی بوده و باید به‌خوبی مدیریت شود. ارزیابی کیفیت آب جهت جمع‌آوری اطلاعات قابل اعتماد، کنترل آلودگی منابع آب، ارزیابی سلامت حوضه‌های آبخیز، برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر ضروری است که در کشور ما به‌ندرت مورد توجه قرار می‌گیرد. اطلاعات کم، وجود نقص در داده‌های موجود به‌دلیل عدم اندازه‌گیری‌های مداوم و یکپارچه، عدم اندازه‌گیری برخی از پارامترهای مهم کیفیت آب و همچنین کمبود داده‌های بلندمدت کیفیت آب از جمله چالش‌های پیش رو جهت ارزیابی کیفیت آب در ایران محسوب می‌شود. بنابراین می‌توان از شاخص کیفیت آب محیط‌زیست شورای وزیران کانادا (CCME WQI) به‌عنوان شاخصی با اعتبار جهانی و مورد تأیید کارشناسان، جهت ارزیابی کیفیت آب سطحی در ایران استفاده کرد. مدیریت کیفیت آب حوضه گرگانرود که نیمی از استان گلستان را شامل می‌شود، برای اقتصاد فعلی و آینده استان گلستان بسیار مهم است. لذا در پژوهش حاضر وضعیت کیفیت آب حوضه گرگانرود و تغییرات زمانی و مکانی آن با استفاده از رویکرد شاخص کیفیت آب کانادا مورد بررسی قرار گرفته است. در اکثر پژوهش‌های انجام شده، کیفیت آب برای یک نوع مصرف خاص، در یک دوره زمانی کوتاه و با تعداد محدودی از ایستگاه‌ها، بررسی و ارزیابی شده است. امّا هدف از این تحقیق، ارائه یک تصویر جامع و کلّی از وضعیت کیفیت آب‌های سطحی در حوضه رودخانه گرگانرود با استفاده از همه داده‌های موجود و قابل استفاده در تمامی ایستگاه‌های حوضه برای مصارف مختلف (شرب، کشاورزی و صنعت) است، تا بتوان از نتایج آن در برنامه‌ریزی‌های حوضه‌ای/منطقه‌ای در زمینه مدیریت منابع آب، آبخیزداری و منابع طبیعی استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

گرگانرود از مهم‌ترین رودخانه‌های استان گلستان است که از ارتفاعات جنگل گلستان تا دریای خزر امتداد دارد. حوضه گرگانرود با مساحت حدود ۱/۱ میلیون هکتار، با کاربری‌های اصلی جنگل، مرتع و کشاورزی حدود نیمی از مساحت استان گلستان را شامل می‌شود. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن (De Martonne) از نیمه‌خشک در شرق تا مرطوب در بخش‌های غربی متغیر است. تقریباً ۶۷٪ آب سطحی استان (حدود ۸۲۸ میلیون مترمکعب) در این حوضه جریان دارد. در این حوضه ۲۵ ایستگاه هیدرومتری دارای آمار کیفیت آب کافی و مناسب وجود دارد (شکل ۱).

داده‌ها: در این پژوهش از داده‌های ثبت شده متغیرهای کیفیت آب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه گرگانرود استفاده شده است. نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه‌ها توسط شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان وابسته به وزارت نیرو انجام



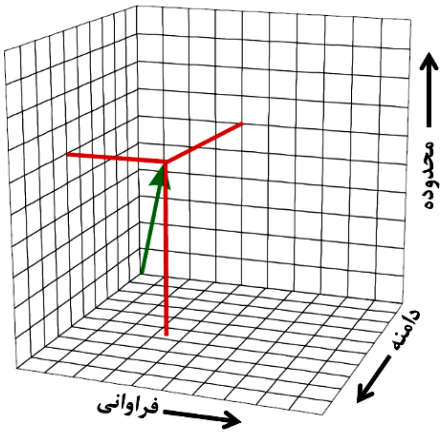
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه گرگانرود به همراه شبکه آبراهه و ایستگاه‌های هیدرومتری

شده است. متغیرهای اندازه‌گیری شده عبارت‌اند از: کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کاتیون‌های اصلی (کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^{+})، پتاسیم (K^{+})) و آنیون‌های اصلی (کلرید (Cl^{-})، بی‌کربنات (HCO_3^{-})، سولفات (SO_4^{2-})) هستند. متأسفانه متغیرهای مهمی مانند اکسیژن محلول، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی، مواد مغذی (ترکیبات نیتروژن و فسفر)، باکتری‌ها (ازجمله کلیفرم مدفوعی) و فلزات سنگین که از دیرباز به‌عنوان متغیرهای اصلی برای پایش سلامت محیط‌های آبی و حوضه‌های آبخیز شناخته شده‌اند (۲) در حوضه گرگانرود و به‌طور کلی در ایران به‌صورت منظم و گسترده مورد اندازه‌گیری قرار نگرفته‌اند. بنابراین با توجه به انعطاف‌پذیری و نداشتن محدودیت در انتخاب متغیرها، از روش CCME-WQI جهت ارزیابی کیفیت آب سطحی حوضه گرگانرود استفاده شده است. در اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه گرگانرود، اولین داده‌های کیفیت آب ثبت شده مربوط به اواخر دهه ۱۳۴۰ است. در سال‌های ابتدایی نمونه‌برداری‌ها به‌صورت نامنظم در چند ماه از سال صورت گرفته، ولی از اوایل دهه ۱۳۷۰ به بعد هر ماه یک‌بار نمونه‌برداری انجام شده است. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌های کیفیت آب، پیش پردازش‌های اولیه شامل مرتب کردن سری زمانی داده‌ها، حذف ردیف‌های تکراری، تأثیر خطای بارز (مثل خطای اعشار در درج داده‌ها) و مواردی نظیر آن از طریق رسم نمودار شاخص (Index plot) و نمودار پراکنش متغیرها در برابر یکدیگر انجام شد. سپس با توجه به آمار و اطلاعات موجود، تعداد ۲۵ ایستگاه دارای داده‌های کافی در سطح حوضه آبخیز گرگانرود برای این پژوهش انتخاب شد. خلاصه داده‌های کیفیت آب ثبت شده در ایستگاه‌های منتخب، در جدول ۱ آورده شده است.

شاخص کیفیت آب کانادا (CCME WQI): بر اساس مدل مفهومی (شکل ۲) و دستورالعمل ارائه شده (۴ و ۵) این شاخص از سه فاکتور محدوده (Scope)، فراوانی (Frequency) و دامنه (Amplitude) تشکیل شده است که در نهایت عددی بین صفر (بدترین کیفیت آب) و ۱۰۰ (بهترین کیفیت آب) ارائه می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه داده‌های کیفیت آب ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه گرگانرود

ایستگاه	تعداد نمونه	TDS حداقل، متوسط، حداکثر	EC حداقل، متوسط، حداکثر	pH حداقل، متوسط، حداکثر	SAR حداقل، متوسط، حداکثر	سختی کل حداقل، متوسط، حداکثر	HCO3 حداقل، متوسط، حداکثر	Cl حداقل، متوسط، حداکثر	SO4 حداقل، متوسط، حداکثر	Ca حداقل، متوسط، حداکثر	Mg حداقل، متوسط، حداکثر	Na حداقل، متوسط، حداکثر
تنگراه	۴۳۹	۱۷۸، ۵۶۷، ۲۰۹۹	۲۸۶، ۸۸۱، ۳۴۵۰	۶/۲، ۷/۵۳، ۹/۶	۰/۰۹، ۲/۱۴، ۹/۱	۱۵۰، ۲۸۴، ۸۴۰	۸۲، ۲۴۷، ۴۱۵	۹، ۱۱۹، ۶۱۰	۷، ۹۵، ۵۸۷	۲۰، ۶۱، ۱۶۰	۴، ۳۳، ۱۰۷	۳، ۸۵، ۵۵۲
قوچمز	۲۱۳	۱۶۱، ۳۹۱، ۱۵۸۸	۲۵۹، ۶۰۹، ۲۵۲۰	۶/۶، ۷/۸۴، ۸/۷۳	۰/۰۲۴، ۰/۷۶، ۷/۱۶	۱۲۴، ۲۶۱، ۵۰۰	۱۴۶، ۳۱۲، ۵۴۳	۱۲، ۲۷، ۳۵۴	۱۲، ۲۹، ۴۷۹	۲۰، ۴۳، ۱۰۰	۱۵، ۳۸، ۶۷	۹، ۲۹، ۳۶۸
تمر	۵۰۶	۲۲۹، ۱۰۳۰، ۱۰۵۸۶	۳۴۸، ۱۶۱۳، ۱۷۹۶۰	۶/۴، ۷/۶۱، ۹/۶	۰/۰۳۸، ۳/۷۴، ۱۸/۵۲	۱۳۹، ۴۲۰، ۴۲۰۰	۱۱۰، ۲۷۹، ۶۸۹	۱۱، ۲۶۱، ۴۶۰۸	۰، ۲۵۲، ۳۳۹۶	۲۰، ۷۱، ۶۰۱	۱۰، ۵۸، ۳۶۵	۱۴، ۲۰۰، ۲۷۵۹
حاجی قوشان	۳۶۸	۰، ۲۹۴۱، ۳۲۴۵۱	۶۲۵، ۴۶۸۳، ۵۷۳۰۰	۶/۴، ۷/۵۶، ۸/۸	۱/۲۷، ۷/۰۳، ۴۰/۵۷	۱۹۶، ۱۱۳۶، ۱۰۷۵۰	۱۴۶، ۲۶۸، ۷۳۲	۴۶، ۱۰۲۱، ۱۸۴۳۳	۵۰، ۸۳۸، ۵۴۳۵	۳۰، ۱۸۵، ۱۵۰۳	۲۲، ۱۶۳، ۱۲۱۶	۴۷، ۶۳۶، ۸۷۴۹
گالیکش	۴۹۴	۱۵۷، ۳۱۷، ۲۴۲۰	۲۳۶، ۴۸۸، ۳۳۶۰	۶/۳، ۷/۶، ۸/۸	۰/۰۷، ۰/۶۲، ۸/۸۴	۸۹، ۲۲۱، ۹۶۷/۳۹	۷۰، ۲۳۴، ۵۱۹	۵، ۲۷، ۲۸۴	۱، ۳۸، ۹۲۴	۱۴، ۴۹، ۱۶۰	۵، ۲۴، ۱۶۵	۲، ۲۲، ۶۲۳
گنبد	۵۵۶	۲۵۳، ۱۸۰۴، ۱۴۱۶۴	۳۹۵، ۲۸۱۸، ۲۴۱۰۰	۶/۲، ۷/۵۶، ۹/۹	۰/۰۵۸، ۴/۹۹، ۲۶/۰۹	۱۲۶، ۷۲۹، ۴۵۰۰	۱۸، ۳۱۴، ۶۲۲	۱۸، ۵۱۹، ۶۵۵۸	۲۲، ۵۳۹، ۴۲۱۲	۴، ۱۱۵، ۸۰۲	۱۳، ۱۰۸، ۸۰۲	۲۰، ۳۷۴، ۴۰۲۳
لزوره	۴۳۸	۱۸۲، ۴۱۱، ۹۰۹	۲۷۸، ۶۳۸، ۱۳۹۰	۶/۲، ۷/۵۷، ۸/۵۸	۰/۰۷، ۱/۲۸، ۳/۵۷	۱۳۸، ۲۳۹، ۴۱۱	۷۹، ۲۱۹، ۳۱۱	۱۱، ۷۱، ۲۲۷	۵، ۶۲، ۲۰۳	۲۳، ۵۵، ۸۵	۷، ۲۵، ۵۶	۲، ۴۶، ۱۵۲
تیل آباد	۲۴۴	۲۱۵، ۴۵۲، ۱۵۳۵	۳۳۶، ۷۱۱، ۲۴۴۰	۶/۱، ۷/۶۴، ۹	۰/۰۳۶، ۲/۰۹، ۸/۲۲	۱۴۳، ۲۲۱، ۴۰۰	۹۸، ۲۲۳، ۳۲۰	۱۴، ۱۰۴، ۵۱۰	۹، ۴۷، ۳۰۰	۲۴، ۴۷، ۸۰	۵، ۲۵، ۳۹	۱۱، ۷۲، ۳۷۸
پل غزنوی	۱۴۸	۲۸۵، ۹۱۷، ۱۴۲۳	۴۴۵، ۱۴۶۷، ۲۲۶۰	۶/۹۴، ۷/۸۹، ۸/۴۶	۰/۰۶۲، ۵/۳۲، ۹/۳۵	۱۸۰، ۲۸۸، ۴۷۵	۱۴۰، ۲۳۳، ۳۵۴	۲۱، ۳۰۸، ۵۶۷	۴۹، ۱۱۲، ۲۰۶	۳۶، ۵۷، ۱۰۰	۱۸، ۳۶، ۶۱	۲۲، ۲۰۸، ۳۵۶
نوده	۵۲۴	۲۱۰، ۸۶۸، ۲۴۳۰	۳۲۵، ۱۳۷۰، ۳۸۶۰	۶/۴، ۷/۶۱، ۱۰/۲	۰/۱۱، ۵/۲۵، ۱۲/۱۵	۱۱۶، ۲۷۳، ۷۰۰	۶۱، ۲۳۷، ۳۹۷	۱۴، ۲۸۷، ۱۱۵۶	۷، ۱۱۲، ۵۹۹	۲۰، ۵۵، ۱۶۰	۵، ۳۳، ۸۶	۵، ۲۰۳، ۶۹۰
اراز کوسه	۵۵۰	۱۸۷، ۸۹۷، ۷۰۰۰	۲۸۶، ۱۳۷۵، ۱۱۲۴۰	۶/۲، ۷/۵۵، ۹/۶	۰/۱۳، ۳/۳۶، ۱۵/۹۶	۱۲۴، ۳۷۱، ۲۸۰۰	۷۹، ۲۶۴، ۶۵۹	۱۱، ۲۲۶، ۲۱۲۷	۵، ۱۹۹، ۲۷۹۷	۱۶، ۷۰، ۴۴۱	۶، ۴۸، ۲۹۷	۶، ۱۶۹، ۱۵۲۹
قزاقلی	۴۴۶	۲۰۸، ۱۲۹۳، ۹۳۴۵	۳۱۷، ۲۰۱۸، ۱۲۱۰۰	۶/۲، ۷/۵۶، ۸/۵	۰/۱۴، ۴/۲۳، ۱۸/۶۵	۱۴۹، ۵۲۲، ۲۸۴۸	۱۰۴، ۲۸۲، ۶۷۱	۱۱، ۳۵۵، ۲۷۹۰	۷، ۳۴۷، ۳۳۶۲	۲، ۸۹، ۴۶۱	۴، ۷۳، ۵۰۴	۴، ۲۶۰، ۲۲۹۹
رامیان	۴۴۰	۱۵۷، ۳۱۰، ۵۵۰	۲۴۵، ۴۸۰، ۸۵۵	۶/۱، ۷/۵۷، ۹/۱	۰/۰۶، ۰/۵۶، ۲/۱	۱۲۹، ۲۲۱، ۳۷۲	۷۶، ۲۲۸، ۳۸۴	۴، ۱۸، ۱۱۰	۵، ۵۲، ۱۵۹	۲۰، ۴۹، ۱۱۲	۲، ۲۴، ۴۶	۲، ۱۹، ۶۹
سد گرگان	۴۶۰	۱۰۲، ۱۴۹۶، ۱۵۳۲۶	۳۷۷، ۲۳۵۶، ۲۲۵۷۳	۵/۷، ۷/۴۹، ۹/۹	۰/۰۷، ۵/۰۲، ۳۱/۹۳	۱۵۳، ۵۷۰، ۴۰۰۰	۱۲۸، ۲۷۰، ۴۲۷	۱۴، ۴۴۵، ۵۷۰۷	۱۰، ۳۸۸، ۳۹۹۶	۶، ۹۵، ۶۶۱	۴، ۸۲، ۶۹۳	۲، ۳۱۱، ۳۷۲۴
شیرآباد	۴۰۴	۱۲۵، ۲۴۹، ۸۹۵	۱۹۸، ۳۸۹، ۱۴۰۰	۵/۷، ۷/۶۵، ۱۰/۳	۰/۰۱، ۰/۲۱، ۶	۱۰۵، ۱۹۸، ۳۹۵	۱۰۱، ۲۱۲، ۳۳۶	۴، ۱۳، ۷۱	۳، ۲۳، ۳۱۰	۴، ۵۲، ۱۰۴	۱، ۱۷، ۵۶	۰، ۶، ۵۷
زرینگل	۵۱۰	۲۱۵، ۷۱۳، ۱۱۷۱	۳۳۵، ۱۱۰۷، ۱۸۶۳	۵/۷، ۷/۴۷، ۸/۷	۰/۱۲، ۲/۸۹، ۶/۳۳	۹۹، ۳۱۹، ۵۰۵	۶۱، ۲۲۸، ۴۰۹	۷، ۱۸۲، ۳۵۸	۱۴، ۱۳۲، ۳۱۴	۱۶، ۷۵، ۱۳۰	۷، ۳۲، ۶۰	۵، ۱۱۹، ۲۴۴
سرمه رود	۴۰۹	۱۷۵، ۳۴۹، ۲۲۸۵	۲۵۷، ۵۴۲، ۳۵۷۱	۵/۹، ۷/۵۹، ۹/۵	۰/۰۴، ۰/۶۶، ۶/۲۱	۹۹، ۲۳۷، ۷۵۲	۳۱، ۲۳۲، ۳۴۸	۷، ۴۳، ۵۸۵	۱، ۴۳، ۷۱۶	۶، ۵۸، ۱۲۴	۲، ۲۳، ۱۳۴	۱، ۲۵، ۴۱۸
کبودوال	۳۰۷	۱۵۰، ۲۶۰، ۶۷۲	۲۵۰، ۴۰۶، ۱۰۷۰	۶/۱، ۷/۶۶، ۸/۶۴	۰/۰۱، ۰/۱۶، ۲/۵۳	۱۳۵، ۲۱۴، ۳۴۰	۹۲، ۲۲۷، ۳۲۹	۴، ۱۳، ۱۶۳	۲، ۲۱، ۱۴۲	۲۲، ۵۱، ۸۸	۹، ۲۱، ۳۸	۰، ۶، ۱۰۷
باغه سالیان	۴۴۹	۲۳۹، ۵۴۰۶، ۲۹۳۴۵	۰، ۸۱۰۷، ۳۵۵۷۰	۶/۱، ۷/۵۷، ۸/۷	۰/۰۹، ۱۰/۶۹، ۳۷/۰۹	۱۸۵، ۱۹۴۷، ۷۹۴۳	۱۲۵، ۳۴۲، ۸۷۲	۱۴، ۱۵۲۷، ۹۲۸۷	۱۷، ۲۰۸۳، ۹۴۵۵	۱۶، ۲۶۲، ۱۵۲۳	۶، ۳۱۷، ۱۳۶۲	۳، ۱۲۲۲، ۶۵۷۵
سرمو	۴۶۶	۱۹۹، ۵۵۱، ۹۴۱	۳۰۷، ۸۴۵، ۱۴۷۵	۶/۰۶، ۷/۴، ۸/۵۱	۰/۰۷، ۰/۵۳، ۲/۸۶	۱۶۰، ۴۰۴، ۶۸۰	۶۱، ۲۰۵، ۲۹۳	۷، ۳۳، ۱۶۳	۱۲، ۲۳۷، ۴۵۰	۳۰، ۸۷، ۱۶۴	۹، ۴۶، ۹۵	۲، ۲۵، ۱۰۴
تقی آباد	۴۲۹	۱۲۴، ۳۵۵، ۵۳۳۱	۰، ۵۵۰، ۸۵۳۰	۶/۲، ۷/۴۲، ۸/۶۵	۰/۰۳، ۰/۰۴۴، ۸/۹۳	۱۱۶، ۲۵۸، ۲۳۴۰	۷۳، ۲۴۷، ۵۴۳	۴، ۳۰، ۱۸۴۳	۲، ۵۷، ۱۵۹۸	۲۰، ۶۰، ۴۸۱	۶، ۲۷، ۲۷۷	۱، ۱۸، ۹۹۳
امامزاده گرگان	۳۰۷	۱۸۳، ۲۹۱، ۵۵۰	۲۸۲، ۴۵۱، ۸۳۰	۶/۱، ۷/۶۵، ۹	۰/۰۱، ۰/۱۵، ۱/۵۴	۱۲۹، ۲۳۳، ۳۱۲	۹۲، ۲۱۸، ۲۹۳	۲، ۱۲، ۲۸	۲، ۴۶، ۹۶	۲۴، ۵۴، ۸۳	۱۰، ۲۴، ۴۵	۰، ۵، ۲۹
آق قلا	۴۶۶	۲۸۹، ۳۶۰۰، ۱۶۰۶۲	۴۵۷، ۵۴۷۹، ۲۵۷۰۰	۵/۶، ۷/۵۷، ۱۰/۲	۰/۰۲۶، ۸/۳۹، ۲۶/۱۴	۲۲۳، ۱۲۹۷، ۶۵۰۰	۱۲، ۲۹۱، ۴۷۶	۲۵، ۱۰۵۰، ۴۴۶۷	۵۸، ۱۲۴۴، ۶۹۹۳	۲۰، ۱۸۵، ۷۶۲	۱۲، ۲۰۱، ۷۵۴	۹، ۷۸۸، ۳۸۳۹
بصیرآباد	۳۷۳	۰، ۳۱۵۱، ۲۲۳۷۰	۴۵۰، ۴۷۷۸، ۳۴۴۲۰	۶/۳، ۷/۴۸، ۸/۶	۰/۰۲۹، ۷/۷۲، ۲۹/۵۴	۲۱۳، ۱۱۰۵، ۶۱۰۰	۹۵، ۲۸۸، ۶۵۹	۱۸، ۹۵۶، ۱۰۶۳۵	۳۸، ۹۹۷، ۶۶۷۶	۳۳، ۱۵۹، ۱۰۳۲	۲۲، ۱۷۴، ۱۰۷۰	۱۰، ۶۸۷، ۵۱۷۲



شکل ۲. مدل مفهومی شاخص CCME WQI

محدوده (F_1) عبارت است از درصد پارامترهایی که در طول دوره زمانی مورد بررسی از آستانه تعیین شده تجاوز کرده باشند (نسبت به تعداد کل پارامترها) که از رابطه ۱ به‌دست می‌آید.

$$F_1 = \frac{\text{تعداد پارامترهای مردود}}{\text{تعداد کل پارامترها}} \times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

فراوانی (F_2) عبارت است از درصد آزمایش‌هایی که در طول دوره زمانی مورد بررسی از آستانه تعیین شده تجاوز کرده باشند (نسبت به تعداد کل داده) که از رابطه ۲ به‌دست می‌آید (فراوانی عدم تحقق اهداف).

$$F_2 = \frac{\text{تعداد آزمایش‌های مردود}}{\text{کل تعداد آزمایش‌ها}} \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

دامنه (F_3) عبارت است از میزان تجاوز از آستانه تعیین شده که در سه مرحله محاسبه می‌شود (میزان برآورده نشدن اهداف). مرحله اول: محاسبه میزان انحراف (Excursion) با استفاده از رابطه ۳ در زمانی که مقادیر متغیر کیفیت آب نباید از مقادیر استاندارد تجاوز کند.

$$\text{Excursion} = \left(\frac{\text{مقدار عددی آزمایش مردود}}{\text{مقادیر استاندارد}}\right) - ۱ \qquad (۳)$$

محاسبه میزان انحراف با استفاده از رابطه ۴ در زمانی که مقادیر متغیر کیفیت آب نباید کمتر از مقادیر استاندارد باشند.

$$\text{Excursion}_i = \left(\frac{\text{مقادیر استاندارد}}{\text{مقدار عددی آزمایش مردود}}\right) - ۱ \qquad (۴)$$

مرحله دوم: با استفاده از رابطه ۵ نرمال‌سازی جمع میزان انحرافات (nse)

$$\text{nse} = \frac{\sum_{i=0}^{n} \text{Excursion}_i}{\text{تعداد کل دفعات آزمایش شده}} \qquad (۵)$$

مرحله سوم: با استفاده از رابطه ۶ محاسبه F_3.

$$F_3 = \frac{\text{nse}}{0.01\text{nse} + 0.01} \qquad (۶)$$

پس از محاسبه هر سه فاکتور موردنظر شاخص نهایی با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$\text{CCME WQI} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}\right) \qquad (۷)$$

مثالی از محاسبه شاخص کیفیت آب برای مصرف شرب در ایستگاه آق‌قلا در سال ۲۰۱۶ به‌عنوان نمونه در زیر ارائه می‌شود.

تعداد ۹ پارامتر برای ارزیابی کیفیت آب شرب در نظر گرفته شده و در ایستگاه آق‌قلا، ۱۳ بار نمونه‌برداری در ماه‌های مختلف سال ۲۰۱۶ انجام شده است. یعنی در مجموع ۱۱۷ = ۱۳ × ۹ آزمایش انجام شده است.

از بین ۹ پارامتر، ۸ پارامتر (حداقل یک بار در طول دوره زمانی) از آستانه‌های استاندارد تعیین شده برای کیفیت آب شرب تجاوز کرده‌اند و تنها یک پارامتر (pH) همواره در محدوده مجاز بوده؛ بنابراین $F_1 = (۸ \div ۹) \times ۱۰۰ = ۸۸/۹$

از مجموع ۱۱۷ آزمایش، ۹۵ آزمایش از آستانه‌های مربوطه تجاوز کرده‌اند؛ بنابراین $F_2 = (۹۵ \div ۱۱۷) \times ۱۰۰ = ۸۱/۲$

میزان انحراف/تجاوز از محدوده استاندارد کیفیت آب برای هر آزمایش از رابطه ۳ محاسبه شده است. در اولین آزمایش، مقدار اندازه‌گیری شده برای TDS، ۳۳۹۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده در حالی‌که آستانه مجاز تعیین شده در استاندارد آب شرب، ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است. بنابراین $Excursion_1 = (۳۳۹۰ \div ۱۰۰۰) - ۱ = ۲/۳۹$. این محاسبه برای همه ۱۱۷ آزمایش انجام شده؛ سپس بر اساس آن، nse و F3 از رابطه ۵ و ۶ به‌دست می‌آید. این مقادیر برای سال ۲۰۱۶ در ایستگاه آق‌قلا به‌ترتیب ۴/۹۲ و ۸۳/۱ به‌دست آمده است. در نهایت، شاخص کیفیت آب با استفاده از رابطه ۷، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{CCME WQI} = 100 - \left(\frac{\sqrt{88.9^2 + 81.2^2 + 83.1^2}}{1.732} \right) = 15.5 \quad (۸)$$

در جدول ۲ کلاس‌های کیفی آب روش CCME WQI و تفسیر متناسب آن برای مصرف مدنظر ارائه شده است (۵).

ارزیابی کیفیت آب برای مصارف مختلف

مصرف شرب: از حداکثر مطلوب متغیرهای کیفیت آب در استاندارد کیفیت آب آشامیدنی ایران (جدول ۳) به‌عنوان آستانه متغیرهای کیفیت آب برای مصرف شرب استفاده شد.

مصارف صنعتی: یکی از دشواری‌های ارزیابی کیفیت آب برای صنعت، تفاوت ذاتی بین صنایع مختلف (حتی صنایعی که محصولات مشابهی تولید می‌کنند) است. برخی صنایع مانند پتروشیمی، داروسازی و صنایع الکترونیکی بسیار حساس بوده و آب مورد استفاده در این صنایع باید از کیفیت بسیار بالایی برخوردار باشد که تنها از طریق فرایندهای تصفیه می‌توان چنین آبی را تهیه نمود. در این بررسی، کیفیت آب برای فرایندهای معمول صنعتی مانند سرمایش، تولید بخار، انتقال حرارت، ایجاد رطوبت، روان‌سازی، شستشو و استفاده در صنایع لبنی، صنایع غذایی و... مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای کیفیت آب و محدوده مجاز آن‌ها با توجه به این مصارف، مطابق جدول ۴ تعیین شد.

مصرف کشاورزی: برای محاسبه شاخص کیفیت آب برای مصرف کشاورزی، از متغیرها و آستانه‌های تعیین شده در راهنمای تفسیر کیفیت آب برای آبیاری FAO (۱) استفاده شد. در ارزیابی کیفیت آب برای کشاورزی سه معیار اساسی مورد نظر قرار می‌گیرد که عبارت‌اند از:

۱) میزان املاح محلول در آب (شوری): شوری آب با افزایش پتانسیل اسمزی موجب کاهش توانایی جذب آب توسط گیاهان، ایجاد تنش آبی و کاهش میزان محصول می‌شود، ۲) نفوذ آب در خاک: افزایش نسبت سدیم در مقابل کلسیم و منیزیم (افزایش SAR) باعث پراکندگی ذرات خاک و کاهش میزان نفوذپذیری می‌شود و ۳) مسمومیت یونی: در صورتی که تراکم بعضی یون‌ها نظیر سدیم و کلر در بافت‌های گیاهان زیاد شود منجر به کاهش محصولات و آسیب به گیاهان حساس می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص کیفیت آب کانادا برای مصارف مختلف به شرح جدول ۶ ارائه شده است.

مصرف شرب: با توجه به نتایج به‌طور میانگین، کیفیت آب حوضه گرگانرود برای مصرف شرب از ضعیف در ایستگاه باغه‌سالیان تا کیفیت خوب در ایستگاه‌های کبودوال و شیرآباد متفاوت است. میانگین شاخص کیفیت آب ۴۸٪ از ایستگاه‌های مورد ارزیابی در وضعیت متوسط، ۱۶٪ در طبقه نسبتاً ضعیف، ۲۸٪ در طبقه ضعیف و تنها ۸٪ در طبقه خوب قرار دارد.

متوسط شاخص کیفیت آب ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در مناطق مرتفع‌تر و بالادست (غالباً جنوب حوضه) بیشتر بوده است و در طول مسیر به سمت خروجی حوضه کیفیت

جدول ۲. طبقه‌بندی CCME WQI و تفسیر تناسب آن برای مصرف مد نظر

طبقه کیفی آب	دامنه امتیاز	تفسیر تناسب و شرایط کیفی آب
عالی	۹۵–۱۰۰	کیفیت آب حفظ شده و تقریباً هیچ تهدید یا اختلال وجود ندارد؛ شرایط، بسیار نزدیک به حالت طبیعی و بکر است.
خوب	۸۰–۹۴	کیفیت آب حفظ شده و فقط اندکی تهدید یا اختلال وجود دارد؛ شرایط به‌ندرت از حالت طبیعی یا مطلوب فاصله می‌گیرد.
متوسط	۶۵–۷۹	کیفیت آب به‌طور معمول حفظ شده و گاهی اوقات مورد تهدید و اختلال قرار دارد؛ شرایط در برخی مواقع از حالت طبیعی یا مطلوب خارج می‌شود.
نسبتاً ضعیف	۴۵–۶۴	کیفیت آب به‌طور مکرر در معرض تهدید یا اختلال قرار دارد؛ شرایط در اغلب مواقع از حالت طبیعی و مطلوب خارج می‌شود.
ضعیف	۰–۴۴	کیفیت آب تقریباً همیشه در معرض تهدید یا اختلال قرار دارد؛ شرایط مداوماً از حالت طبیعی یا مطلوب خارج شده است.

جدول ۳. استانداردهای ملّی مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران برای کیفیت آب شرب (mg/lit)

متغیر	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	TDS	pH	سختی
حداکثر غلظت مجاز	۲۵۰	—	—	—	۴۰۰	۴۰۰	۱۵۰۰	۶/۹–۵	۵۰۰
حداکثر مطلوب	۲۰۰	۳۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۰۰۰	۶/۸–۵/۵	۲۰۰

جدول ۴. حداکثر مجاز متغیرهای کیفیت آب برای مصارف صنعتی (mg/lit)

متغیر	SO_4^{2-}	Cl^-	TDS	pH	سختی
حداکثر غلظت مجاز	۲۰۰	۲۰۰	۸۰۰	۶/۵ – ۸	۲۵۰

آب تنزل پیدا می‌کند، به‌گونه‌ای که کمترین میزان کیفیت آب مربوط به سه ایستگاه انتهایی حوضه گرگانرود (باغه سالیان، آق قلا و بصیرآباد) است. همچنین به‌طور میانگین کیفیت آب در قسمت شمالی حوضه به‌طور چشمگیر نسبت به مناطق جنوبی حوضه بدتر است. نتایج تحقیق قلی‌زاده و حیدری (۱۰) در ارزیابی کیفیت آب رودخانه گرگانرود در پنج نقطه از رودخانه در محدوده شهر گنبد کاووس (شمال حوضه گرگانرود) با شاخص‌های $IRWQI_{SC}$ و NSFWQI نیز نشان داده که کیفیت آب رودخانه در طبقه کیفی نسبتاً بد است و تنها یک نقطه قبل از شهر گنبد و بعد از سد گلستان، کیفیت آب متوسط داشته است. دلایلی همچون اضافه شدن انواع آلودگی در طول مسیر، کاربری اراضی، خصوصیات زمین‌شناختی، نوع و تراکم پوشش گیاهی باعث کاهش کیفیت آب از مناطق بالادست به سمت

جدول ۵. راهنمای تفسیر کیفیت آب برای کشاورزی (۱)

مسئله			میزان محدودیت در استفاده		
			بدون محدودیت	کم تا متوسط	شدید
شوری (EC) بر دسترسی گیاه به آب اثر می‌گذارد(dS/m)			< ۰/۷	۰/۷ – ۳	> ۳
نفوذ آب در خاک (با استفاده از SAR و EC ارزیابی می‌شود)					
SAR	۰ – ۳	EC	< ۰/۷	۰/۷ – ۰/۲	> ۰/۲
	۳ – ۶		< ۱/۲	۱/۲ – ۰/۳	> ۰/۳
	۶ – ۱۲		< ۱/۹	۱/۹ – ۰/۵	> ۰/۵
	۱۲ – ۲۰		< ۲/۹	۲/۹ – ۱/۳	> ۱/۳
	۲۰ – ۴۰		< ۵	۵ – ۲/۹	> ۲/۹
مسمومیت یونی	سدیم (Na)				
	آبیاری سطحی (SAR)		< ۳	۳ – ۹	> ۹
	آبیاری بارانی (me/l)		< ۳	> ۳	
	کلرید (Cl)				
	آبیاری سطحی (me/l)		< ۴	۴ – ۱۰	> ۱۰
	آبیاری بارانی (me/l)		< ۳	> ۳	
	بورون (B) (mg/l)		< ۰/۷	۰/۷ – ۳	> ۳
اثرات متفرقه	نیتروژن (NO3 - N) (mg/l)		< ۵	۵ – ۳۰	> ۳۰
	بی‌کربنات (HCO3) (me/l) (فقط آبیاری بارانی)		< ۱/۵	۱/۵ – ۸/۵	> ۸/۵
	pH			۸/۵ – ۶/۵	

جدول ۶. شاخص کیفیت آب برای مصارف مختلف در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه گرگانرود

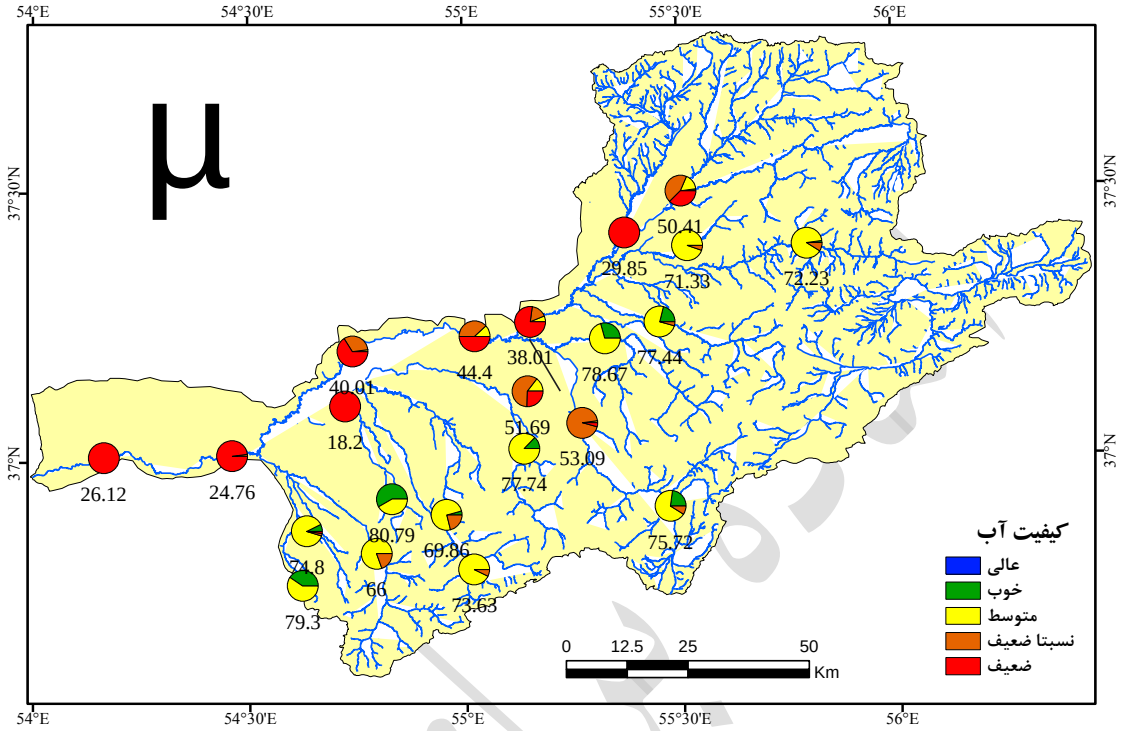
ایستگاه	دوره آماری	میانگین شاخص کیفیت آب برای شرب	میانگین شاخص کیفیت آب برای کشاورزی	میانگین شاخص کیفیت آب برای صنعت
تنگراه	۱۹۷۰–۲۰۱۷	۷۲/۲	۹۸/۷	۷۱/۶
قوچمز	۱۹۹۱–۲۰۱۷	۷۱/۳	۱۰۰/۰	۷۶/۵
تمر	۱۹۶۹–۲۰۱۷	۵۰/۴	۷۷/۱	۴۳/۸
حاجی قوشان	۱۹۸۳–۲۰۱۷	۲۹/۸	۵۳/۸	۲۴/۴
گالیکش	۱۹۷۰–۲۰۱۷	۷۷/۴	۹۹/۴	۸۳/۲

جدول ۶. شاخص کیفیت آب برای مصارف مختلف در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه گرگانرود (ادامه)

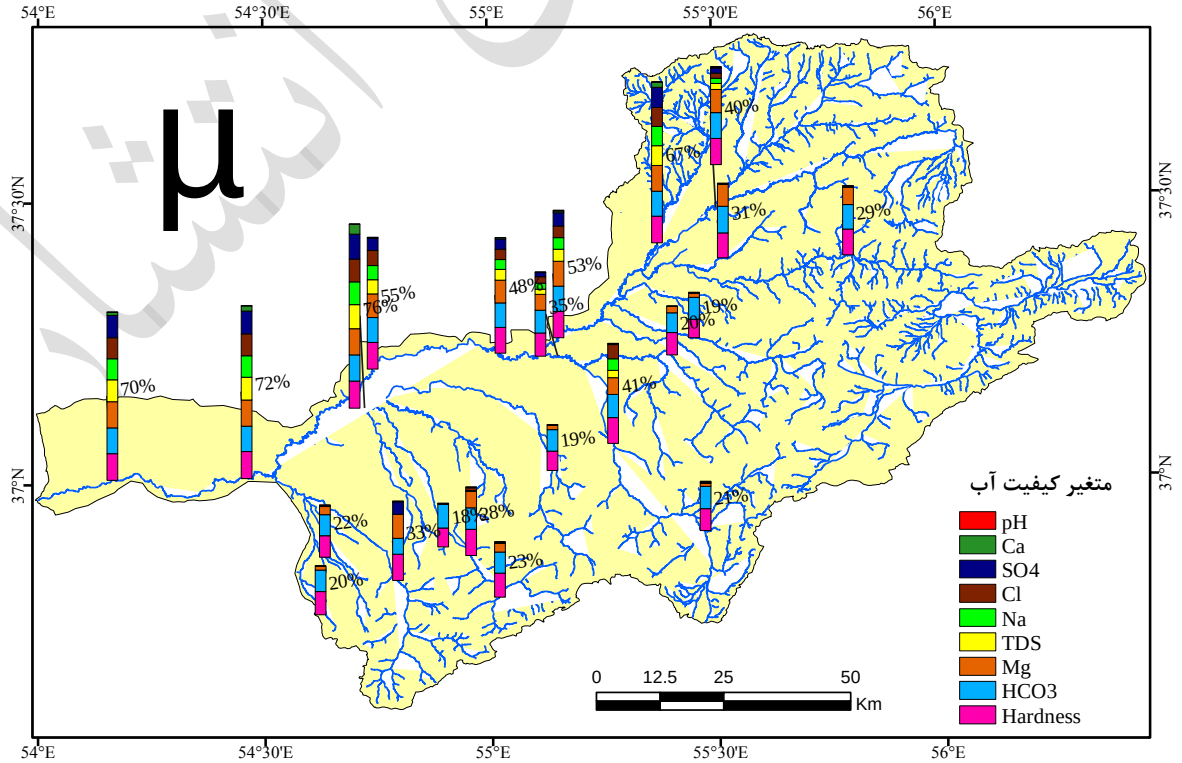
ایستگاه	دوره آماری	میانگین شاخص کیفیت آب برای شرب	میانگین شاخص کیفیت آب برای کشاورزی	میانگین شاخص کیفیت آب برای صنعت
گنبد	۲۰۱۷-۱۹۶۹	۳۸/۰	۵۹/۸	۳۲/۰
لزوره	۲۰۱۷-۱۹۷۱	۷۸/۷	۱۰۰/۰	۸۱/۴
تیل آباد	۲۰۱۷-۱۹۷۹	۷۵/۷	۹۸/۷	۸۱/۰
پل غزنوی	۲۰۱۷-۲۰۰۴	۵۲/۲	۸۲/۷	۴۴/۴
نوده	۲۰۱۷-۱۹۶۸	۵۳/۱	۷۵/۵	۴۷/۱
اراز کوسه	۲۰۱۷-۱۹۷۰	۵۱/۷	۷۵/۷	۴۴/۶
قزاقلی	۲۰۱۷-۱۹۷۲	۴۴/۴	۶۸/۹	۳۸/۵
رامیان	۲۰۱۷-۱۹۷۰	۷۷/۷	۱۰۰/۰	۸۳/۵
سد گرگان	۲۰۱۴-۱۹۶۸	۴۰/۰	۶۸/۹	۳۳/۸
شیرآباد	۲۰۱۷-۱۹۶۸	۸۲/۵	۹۹/۶	۸۸/۲
شیرین آباد	۲۰۱۷-۲۰۰۴	۷۳/۶	۱۰۰/۰	۷۵/۳
زرینگل	۲۰۱۷-۱۹۶۹	۶۹/۹	۹۹/۷	۵۳/۸
سرمه رود	۲۰۱۷-۱۹۷۱	۷۶/۷	۹۹/۲	۷۸/۰
کبودوال	۲۰۱۷-۱۹۷۹	۸۰/۸	۱۰۰/۰	۸۸/۹
باغه سالیان	۲۰۱۷-۱۹۷۲	۱۸/۲	۳۹/۱	۱۵/۷
سرمو	۲۰۱۷-۱۹۷۷	۶۶/۰	۱۰۰/۰	۶۲/۰
تقی آباد	۲۰۱۷-۱۹۷۲	۷۴/۸	۹۸/۶	۷۶/۳
امامزاده گرگان	۲۰۱۷-۱۹۶۹	۷۹/۳	۱۰۰/۰	۸۴/۵
آق قلا	۲۰۱۷-۱۹۶۸	۲۴/۸	۴۷/۵	۲۰/۵
بصیرآباد	۲۰۱۳-۱۹۶۸	۲۶/۱	۴۸/۹	۲۱/۴

خروجی حوضه شده است. همچنین درصد فراوانی طبقات مختلف کیفیت آب نشان می‌دهد که کیفیت آب در مناطق بالادست به‌طور معمول در طبقه متوسط قرار داشته؛ ولی در قسمت‌های شمالی تا خروجی حوضه، کیفیت آب غالباً ضعیف است (شکل ۳).

متغیرهایی که باعث تنزل کیفیت آب شده‌اند در شکل ۴ قابل مشاهده است. تعداد مواردی که استاندارد کیفیت آب را نداشته‌اند از سرشاخه‌ها به سمت پایین‌دست و خروجی حوضه افزایش پیدا می‌کنند. غالب متغیرهای محدودکننده کیفیت آب در سرشاخه‌ها مربوط به کلرید، سختی و بی‌کربنات بوده که منشأ طبیعی و ژئوشیمیایی دارند. اما با افزایش تنوع و میزان آلاینده‌ها از سرشاخه به سمت خروجی حوضه، حجم آلودگی و تعداد نمونه‌هایی که فاقد استاندارد کیفیت آب هستند نیز افزایش‌یافته است.



شکل ۳. کیفیت آب برای مصرف شرب در حوضه گرگانرود (اعداد نشان‌دهنده متوسط شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های هیدرومتری و نمودارهای دایره‌ای نشان‌دهنده درصد فراوانی طبقات مختلف کیفیت آب در هر ایستگاه هستند)



شکل ۴. فراوانی تجاوز متغیرهای کیفیت آب از استاندارد کیفیت آب شرب در حوضه گرگانرود (اعداد نشان‌دهنده درصد آزمایش‌های مردود برای هر ایستگاه هیدرومتری و رنگ‌ها نشان‌دهنده درصد موارد تجاوز از استاندارد برای هر متغیر کیفیت آب است)

مصارف کشاورزی: با توجه به نتایج، میانگین کیفیت آب حوضه گرگانرود برای مصارف کشاورزی از ضعیف در ایستگاه باغه‌سالیان تا کیفیت عالی در بیشتر ایستگاه‌های حوضه متغیر است (شکل ۶). به‌طور میانگین کیفیت آب سطحی حوضه گرگانرود برای مصارف کشاورزی مورد تأیید است، به‌گونه‌ای که کیفیت آب ۵۶٪ از ایستگاه‌های هیدرومتری برای مصارف کشاورزی در طبقه عالی، ۴٪ خوب، ۲۰٪ متوسط، ۱۶٪ نسبتاً ضعیف و ۴٪ ضعیف قرار دارد. متوسط شاخص کیفیت آب ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در مناطق مرتفع‌تر و بالادست (بخصوص در جنوب حوضه) بیشتر بوده و با قرارگیری در طبقه کیفی عالی، از منظر کیفیت آب جهت مصارف کشاورزی محدودیت وجود ندارد. طبقه کیفی آب در ایستگاه‌های واقع در شمال حوضه از متوسط تا ضعیف متغیر است. این یافته با نتایج تحقیق قره محمودلو و همکاران (۹) که بر اساس نمودار ویلکوکس نشان دادند کیفیت آب برای کشاورزی در ایستگاه بصیرآباد (پایین دست حوضه گرگانرود) در مقایسه با ایستگاه لزوره (بالادست حوضه گرگانرود) به مراتب بدتر است، هم‌خوانی دارد.

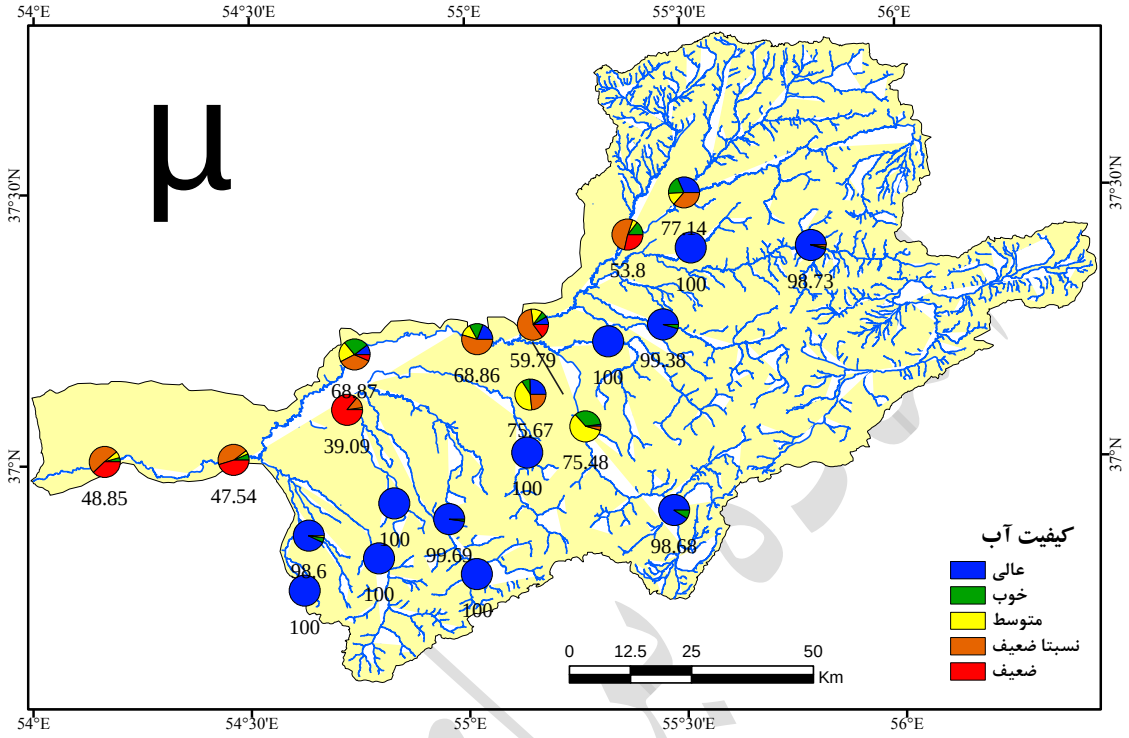
همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، اندازه‌گیری متغیرهای محدودکننده کیفیت آب نشان می‌دهد، آب‌های سطحی بالادست محدودیت کیفی نداشته و کاملاً مناسب برای مصارف کشاورزی است. به‌ترتیب کلرید (Cl^-)، هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) اصلی‌ترین متغیرهای محدودکننده کیفیت آب در پایین‌دست و خروجی حوضه محسوب می‌شوند.

مصارف صنعتی: نتایج ارزیابی کیفیت آب ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه گرگانرود نشان می‌دهد میانگین شاخص کیفیت آب از طبقه کیفی خوب در کبودوال تا ضعیف در باغه‌سالیان متغیر بوده است (شکل ۶). کیفیت آب برای مصارف صنعتی در سطح حوضه با محدودیت‌هایی مواجه است، به نحوی که میانگین شاخص کیفیت آب ۲۸٪ از ایستگاه‌ها در طبقه خوب، ۲۰٪ متوسط، ۱۲٪ نسبتاً ضعیف و ۴۰٪ ضعیف قرار دارد.

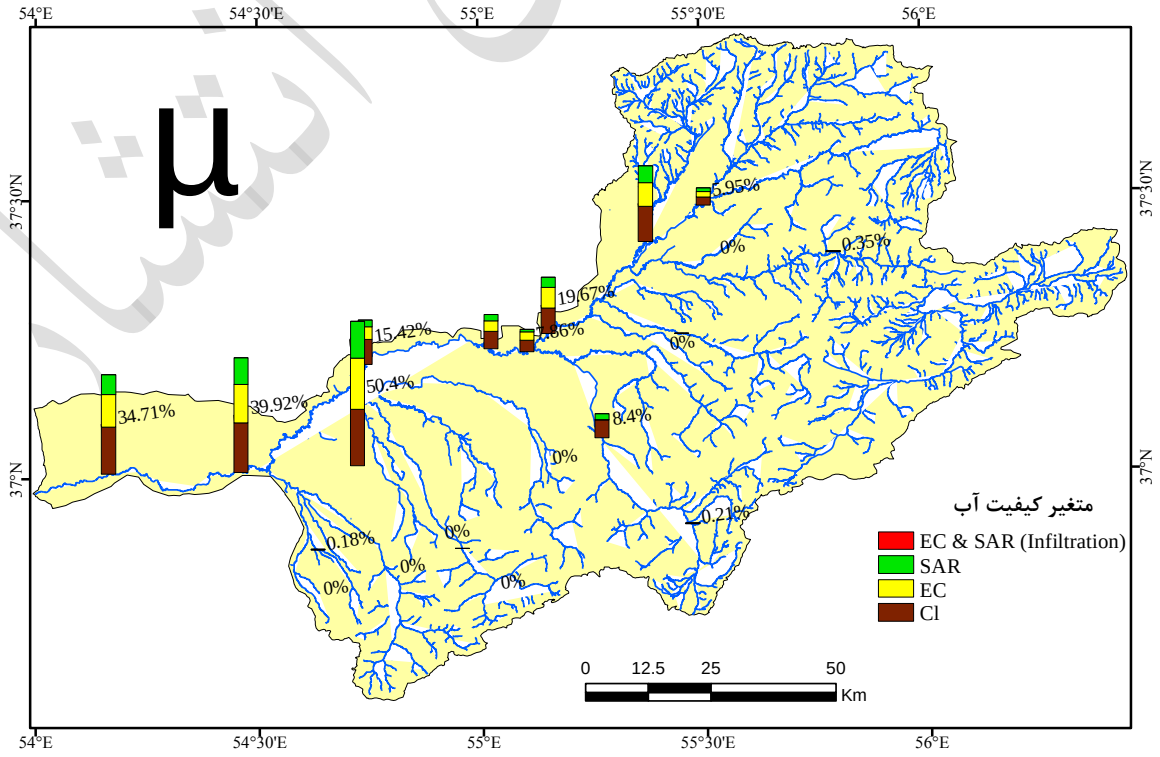
متوسط شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در پایین‌دست حوضه (شمال حوضه) از منظر کیفیت آب دارای محدودیت زیاد برای استفاده در صنایع است، به‌نحوی‌که کیفیت آب در این مناطق در طبقات نسبتاً ضعیف تا ضعیف قرار گرفته‌اند. همچنین به‌دلیل کیفیت آب بالاتر و قرارگیری در طبقات کیفی خوب تا متوسط در سرشاخه‌ها و نواحی مرتفع، محدودیت مصرف آب برای صنایع کمتر است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، فراوانی درصد طبقات کیفی آب در مناطق پایین‌دست تا خروجی حوضه گرگانرود برای مصارف صنعتی غالباً ضعیف بوده و در بالادست غالباً خوب تا متوسط است.

لازم به ذکر است، کیفیت آب از بالادست به سمت خروجی حوضه به‌صورت خطی کاهش پیدا نمی‌کند؛ بلکه پیوستن آبراهه‌ها به یکدیگر، روی کیفیت آب تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، از منظر تعداد پارامترهایی که اهداف کیفی آب را محقق نکرده‌اند و هم تداوم این موضوع، ایستگاه هیدرومتری حاجی قوشان کیفیت آب بسیار پایینی داشته است امّا بعد از پیوستن آبراهه‌های گالیکش و لزوره، کیفیت آب در ایستگاه گنبد اندکی افزایش پیدا می‌کند. یاریان (۲۴) نیز در تحقیق خود در حوضه گرگانرود به تغییرات کیفیت آب ناشی از پیوستن آبراهه‌های مختلف به یکدیگر اشاره نموده‌اند.

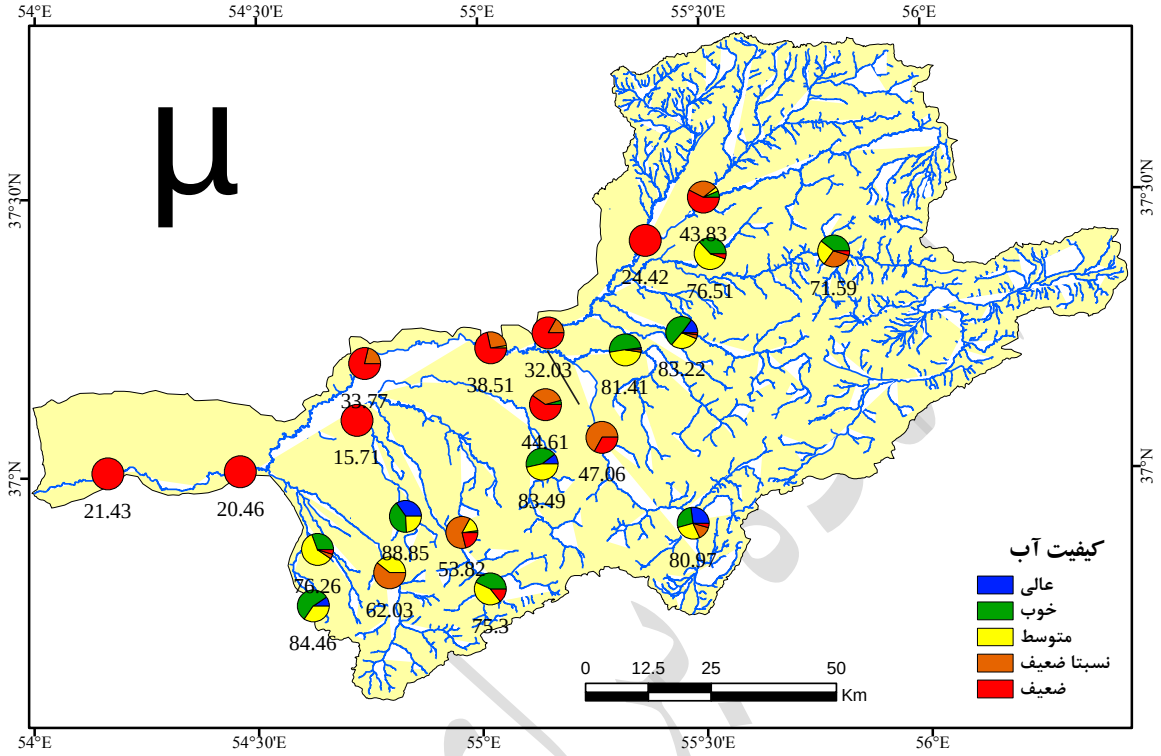
با توجه به دستورالعمل‌های ارزیابی شاخص کیفیت آب، مهم‌ترین عامل محدود کننده آب سطحی برای مصارف صنعتی در سطح حوضه گرگانرود تجاوز متغیرهای سختی آب، سولفات، جامدات محلول (TDS) و کلرید از حد استاندارد است. باتوجه‌به شکل ۸، سختی آب به‌عنوان عامل اصلی کاهش کیفیت آب در سرشاخه‌ها شناسایی شده است. اما در مناطق پایین‌دست و قسمت‌های شمالی حوضه گرگانرود، با افزایش بیش از حد مجاز سختی آب، سولفات، جامدات محلول و کلرید کیفیت آب به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرده و با قرارگیری در طبقات کیفی نسبتاً ضعیف و ضعیف برای مصارف صنعتی مناسب نیستند.



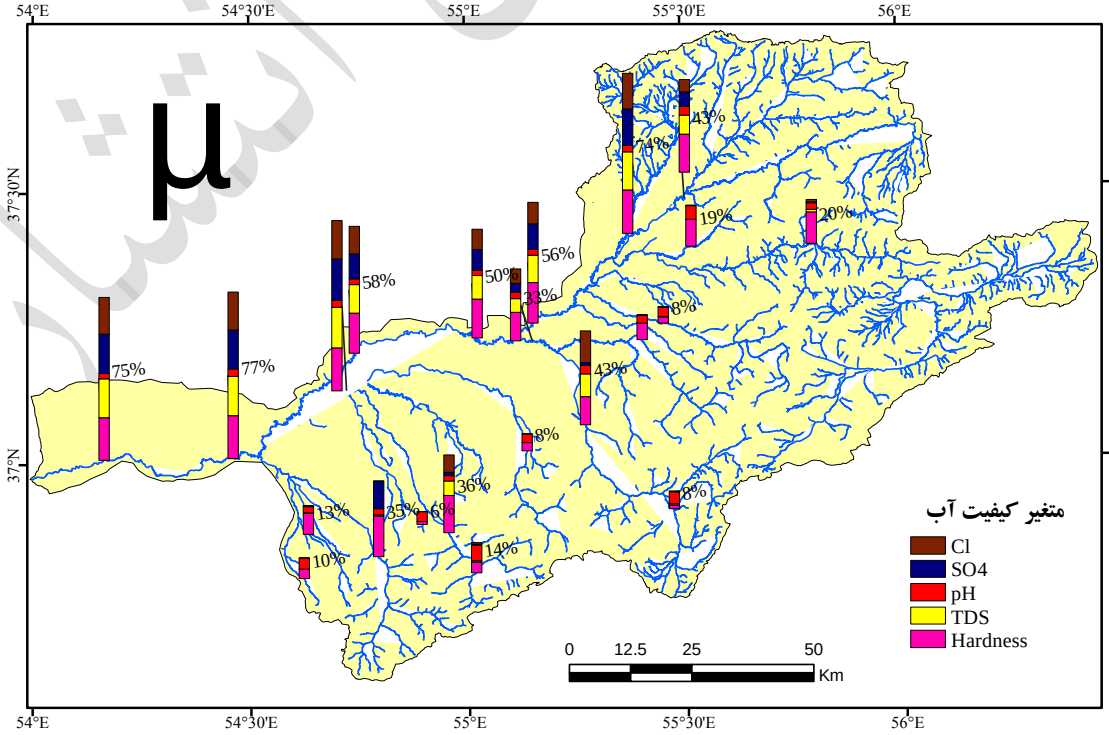
شکل ۵. کیفیت آب برای مصرف کشاورزی در حوضه گرگانرود (اعداد نشان‌دهنده متوسط شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های هیدرومتری و نمودارهای دایره‌ای نشان‌دهنده درصد فراوانی طبقات مختلف کیفیت آب در هر ایستگاه هستند)



شکل ۶. فراوانی تجاوز متغیرهای کیفیت آب از استاندارد کیفیت آب کشاورزی در حوضه گرگانرود (اعداد نشان‌دهنده درصد آزمایش‌های مردود برای هر ایستگاه هیدرومتری و رنگ‌ها نشان‌دهنده درصد موارد تجاوز از استاندارد برای هر متغیر کیفیت آب است)



شکل ۷. کیفیت آب برای مصارف صنعتی در حوضه گرگانرود (اعداد نشان‌دهنده متوسط شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های هیدرومتری و نمودارهای دایره‌ای نشان‌دهنده درصد فراوانی طبقات مختلف کیفیت آب در هر ایستگاه هستند)



شکل ۸. فراوانی تجاوز متغیرهای کیفیت آب از استاندارد کیفیت آب برای صنعت در حوضه گرگانرود (اعداد نشان‌دهنده درصد آزمایش‌های مردود برای هر ایستگاه هیدرومتری و رنگ‌ها نشان‌دهنده درصد موارد تجاوز از استاندارد برای هر متغیر کیفیت آب است)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت ارزیابی کیفیت آب حوضه گرگانرود برای مصارف مختلف از شاخص CCME استفاده شده است. از جمله دلایل انتخاب این شاخص، انعطاف‌پذیری در خصوص نوع و تعداد متغیرهای کیفیت آب و مقایسه مقادیر متغیرها با مقادیر مرجع و استانداردهای کیفیت آب بدون نیاز به استانداردسازی متغیرها یا استفاده از منحنی‌های سنجه (که غیرعینی و مبتنی بر نظر و سلایق کارشناسان است) است.

نتایج پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که به‌طورکلی در مناطق مرتفع‌تر و بالادستی (مناطق جنوبی و شرقی حوضه) کیفیت آب بهتر از مناطق پایین‌دست (مناطق شمالی تا غربی حوضه) بوده و در مسیر حرکت آب از سرشاخه تا خروجی حوضه کیفیت آب به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. اراضی گسترده کشاورزی و مناطق شهری و روستایی در پایین دست حوضه و ورود آلاینده‌های مختلف به رودخانه‌ها را می‌توان دلایل اصلی کاهش کیفیت آب در حوضه گرگانرود به شمار آورد. به نظر می‌رسد اگر در سال‌های آینده اقداماتی جهت کاهش عوامل آلاینده (به خصوص پساب‌های کشاورزی و مناطق مسکونی) صورت نگیرد، حیات اکوسیستم رودخانه به خطر افتاده و سلامت جوامع بهره‌بردار از منابع آبی حوضه در معرض آسیب جدی قرار گیرد.

در این مطالعه کیفیت آب برای مصارفی مثل تفرج یا محیط زیست مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین عدم دسترسی به داده‌های برخی از پارامترهای مهم کیفیت آب سبب شده تا برخی از متغیرهای کیفیت آب مانند نیترات، فسفات، BOD و متغیرهای میکروبی مورد ارزیابی قرار نگیرند؛ لذا پیشنهاد می‌شود، برنامه پایش مستمر و منظمی برای اندازه‌گیری و ثبت این متغیرها توسط دستگاه‌های تحقیقاتی و اجرایی مرتبط، تدوین و اجرا شود تا بتوان اطلاعات جامع‌تر و کامل‌تری برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب حوضه آبخیز گرگانرود بدست آورد. همچنین شاخص CCME علی‌رغم نقاط قوت، ضعف‌هایی مانند در نظر گرفتن وزن (اهمیت) یکسانی برای تمامی پارامترها دارد و می‌توان بر اساس این شاخص و با تکمیل داده‌های مورد نیاز روش‌های وزنی، فازی، هیبریدی طراحی و استفاده کرد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از بخشی از یک طرح تحقیقاتی است که با حمایت طرح کلان ملّی مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز کشور انجام شده است. بدین‌وسیله از حمایت‌های این طرح کلان ملّی قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Ayers R.S. and D. W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome.
2. Bilgin, A. 2018. Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment 190*: 1-11.
3. Brown, R. M., N. I. McClelland, R. A. Deininger and R. G. Tozer. 1970. A water quality index-do we dare. *Water and Sewage Works 117*(10).
4. CCME 2001 Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0 Technical Report. *Canadian Council of Ministers of the Environment*, Winnipeg. Available online at: https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf
5. CCME 2017 Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index Users Manual. *Canadian Council of Ministers of the Environment*, Winnipeg. Available online at: https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf
6. Dao, V., W. Urban and S. B. Hazra. 2020. Introducing the modification of Canadian water quality index. *Groundwater for Sustainable Development 11*: 100457.
7. Galal Uddin, Md., S. Nash, and A. I. Olbert. 2021. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators 122*: 107218.

8. García-Ávila, F., C. Zhindón-Arévalo, L. Valdiviezo-Gonzales, M. Cadme-Galabay, H. Gutiérrez-Ortega and L. F. del Pino. 2022. A comparative study of water quality using two quality indices and a risk index in a drinking water distribution network. *Environmental Technology Reviews 11*(1): 49-61.
9. Ghareh Mahmoodlu, M., N. Jandaghi and M. Sayadi. 2020. Hydrochemical Evaluation and Qualitative Deterioration Assessment of Gorganrud River. *Iranian Journal of Geology* 55 (14) :129-145 (in Farsi).
10. Gholizadeh, M. and O. Heydari. 2020. Evaluation of Gorganrood River Water Quality based on Surface Water Quality Indicators in Gonbad Kavous. *Iranian Journal of Health and Environment* 13 (1) :33-48 (in Farsi).
11. Gikas, G. D., G. K. Sylaios, V. A. Tsihrintzis, I. K. Konstantinou, T. Albanis and I. Boskidis. 2020. Comparative evaluation of river chemical status based on WFD methodology and CCME water quality index. *Science of the Total Environment 745*: 140849.
12. Giriyappanavar, B. S., and R. R. Patil. 2013. Application of CCME WQI in assessisng water quality for Fort Lake of Belgaum, Karnataka. *Indian Journal of Applied Research 3*(4).
13. Gitau, M. W., J. Chen and Z. Ma. 2016. Water quality indices as tools for decision making and management. *Water Resources Management 30*: 2591-2610.
14. Horton, R. K. 1965. An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation 37*(3): 300-306.
15. Kanaujiya, A. K., and V. Tiwari. 2023. Water quality analysis of River Ganga and Yamuna using water quality index (WQI) during Kumbh Mela 2019, Prayagraj, India. *Environment, Development and Sustainability* 1-22.
16. Khan, F., T. Husain, and A. Lumb. 2003. Water quality evaluation and trend analysis in selected watersheds of the Atlantic region of Canada. *Environmental Monitoring and Assessment* 88 (1-3): 221-248.
17. Lumb, A., T. C. Sharma and J. F. Bibeault. 2011. A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health 3*: 11-24.
18. Mukut, S., M. Rahaman, M. Azim, M. Hossain and M. H. Uddin. 2023. Water quality assessment of Karnaphuli River of Bangladesh using CCME-WQI method. *Asian Journal of Environment and Ecology 20*(1): 6-15.
19. Rahman, A., M. A. Zafor and M. Rahman. 2013. Surface water quality and risk assessment in the vicinity of Sylhet City. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering 5*(1): 29-34.
20. Rahnama, S., and A. Shahidi. 2019. The assessment quality southern branches of Haleil Rood river by Canadian Water Quality Index (CWQI) and Aquachem software. *Journal of Research in Environmental Health* 5(3):181-193 (in Farsi).
21. Rickwood, C. and G. M. Carr. 2007. Global drinking water quality index development and sensitivity analysis report. *United Nations Environment Programme (UNEP) & Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Programme 1203*: 1196-1204.
22. Rickwood C. J. and G. M. Carr. 2009. Development and sensitivity analysis of a global drinking water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment* 156:73–90
23. Tyagi, S., B. Sharma, P. Singh and R. Dobhal. 2013. Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources 1*(3): 34-38.
24. Yaryan, M.A. 2016. Using WQI to Assess Metal and Microbial Contamination of Gorganrud River. Master thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, I.R. Iran.
25. Yotova, G., M. Varbanov, E. Tcherkezova and S. Tsakovski. 2021. Water quality assessment of a river catchment by the composite water quality index and self-organizing maps. *Ecological indicators 120*: 106872.
26. Zare Garizi, A., A. Sadoddin, V. B. Sheikh, and A. R. Salman Mahiny. 2012. Long-term trend analysis of water quality variables for the Chehelchay River (Golestan province). *Iranian Water Research JournaL* 6(10): 155-165 (in Farsi).
27. Zemed, M., M. Beshah and D. Reddythota. 2021. Evaluation of water quality and eutrophication status of Hawassa Lake based on different water quality indices. *Applied Water Science* 11(3): 61.