


ارزیابی کیفیت آب رودخانه آجی‌چای و عوامل مؤثر بر آن

یعقوب دین‌پژوه* ، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

dinpazhoh@tabrizu.ac.ir

ندا جعفری، دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

jafarineda53@gmail.com

چکیده

طرح مسئله: مطالعه کیفیت آب‌های سطحی که از قابل دسترس‌ترین منابع تأمین آب در کشاورزی، شرب و صنعت محسوب می‌شود، اهمیت فراوانی دارد. افزون بر این، شناسایی پارامترهای هیدروشیمیایی آب رودخانه‌ها که کیفیت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند، اهمیت بسزایی دارد. روش پژوهش: در مطالعه حاضر، کیفیت آب آشامیدنی در حوضه آبریز آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی با استفاده از سه شاخص با روش‌های متفاوت وزن‌دهی شامل WQI، EWQI و ImpWQI مشخص شد. در این تحقیق، از داده‌های ۱۱ پارامتر کیفیت آب شامل کل جامدات محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، کلراید (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+) و سختی کل (TH) در سه ایستگاه هیدرومتری شامل ارزنق، آخولا و مرکید طی دوره آماری (۱۴۰۰-۱۳۸۲) استفاده شد. از روش تجزیه به عامل‌ها (FA) برای تشخیص عوامل مؤثر بر کیفیت آب رودخانه بهره گرفته شد. نتایج: نتایج نشان داد که کیفیت آب در ایستگاه ارزنق براساس شاخص‌های WQI و EWQI در سطح متوسط و براساس شاخص ImpWQI در سطح ضعیف قرار گرفت؛ در حالی که کیفیت آب در ایستگاه‌های آخولا و مرکید طبق هر سه شاخص در طبقه بسیار ضعیف ارزیابی شد. نتایج FA نشان داد که در ایستگاه‌های ارزنق، آخولا و مرکید، مجموع دو عامل اول به‌ترتیب، بیش از ۷۸٪، ۸۱/۱٪ و ۹۲/۴۳٪ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه می‌کرد. در ایستگاه ارزنق، کیفیت آب بیشتر تحت تأثیر «نمک کلرور سدیم» از یک سو و «سختی با کربنات کلسیم» از دیگر سو بود. کیفیت آب در ایستگاه آخولا بیشتر تحت تأثیر «کربنات منیزیم و کلسیم» و «سولفات‌ها» بود. کیفیت آب، در ایستگاه مرکید بیشتر تحت تأثیر «همه متغیرها به‌جز اسیدیته» و «اسیدیته» است. می‌توان نتیجه گرفت که با هر سه شاخص، کیفیت آب در هر سه ایستگاه نشان‌دهنده محدودیت در استفاده شرب است؛ ارزیابی نهایی برای مصارف انسانی نیازمند اندازه‌گیری دقیق پارامترهای تکمیلی، از جمله پارامترهای میکروبی و فلزات سنگین است. کنترل آلاینده‌های اصلی، پایش مستمر کیفیت آب، استفاده از روش‌های تصفیه مناسب و برنامه‌ریزی منطقه‌ای برای مدیریت منابع آب منطقه ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به عامل‌ها، شاخص کیفیت آب آنتروپی، شاخص کیفیت آب، شاخص کیفیت آب بهبودیافته

*نویسنده مسؤول

دین‌پژوه، یعقوب و جعفری، ندا. (۱۴۰۴). ارزیابی کیفیت آب رودخانه آجی‌چای و عوامل مؤثر بر آن، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۶ (۴)، ۳۴-۱.



مقدمه

آب‌های سطحی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت محسوب می‌شود. رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب جاری در نهرها از جمله آب‌های سطحی سهل‌الوصول برای تأمین آب آشامیدنی هستند؛ با این حال، چون آب‌های سطحی در ذات خود در برابر تغییرات و آلودگی بسیار آسیب‌پذیرند (Hammoumi et al., 2024)؛ بنابراین، حفاظت از آلودگی این منابع ارزشمند بسیار حیاتی است. در این راستا، پایش مداوم آب در طول رودخانه در مقاطع زمانی مساوی از اهمیت فراوانی برخوردار است. برای این منظور، اندازه‌گیری پارامترهای کیفی از قبیل شوری، اسیدیته، کدورت، رسوب و غیره در آب‌های سطحی برای تأمین آب سالم مردم بسیار مهم است. در عمل، ارزیابی کیفیت آب با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای هیدروژئوشیمیایی با مقادیر استاندارد نظیر هر پارامتر، که به‌طور رسمی در دستورالعمل‌های ملی یا بین‌المللی ارائه می‌شود، انجام می‌گیرد (Zhang et al., 2010)؛ بنابراین، نظارت و ارزیابی مستمر کیفیت آب برای مدیریت پایدار و حفاظت از منابع آب در هر منطقه ضروری است (Zhang et al., 2022). از جمله ابزارهای سودمند برای ارزیابی کیفیت آب، می‌توان به سه شاخص کیفی پر کاربرد شامل شاخص کیفیت آب با نماد^۱ WQI، شاخص کیفیت آب آنتروپی با نماد EWQI و شاخص کیفیت آب اصلاح شده با نماد ImpWQI اشاره کرد. این شاخص‌ها ابزارهای مدیریتی قوی کنترل کیفی آب در مدیریت منابع آب هستند. اوددین اظهار داشت که شاخص‌های کیفیت آب، امکان تبدیل مقادیر داده‌های کیفیت آب را به یک ارزش بصورت عددی فراهم می‌کند (Uddin et al., 2021). این شاخص‌ها در طول زمان، در هر نقطه از رودخانه، تغییر می‌کند. از طرفی، مقدار شاخص در نقاط مختلف مسیر رودخانه نیز تغییر می‌کند. با پایش مقدار شاخص در طول مسیر رودخانه، می‌توان مکان‌هایی که موجب آلودگی آب می‌شوند را شناسایی و نسبت به رفع آلودگی اقدام کرد. روش‌های کاهش ابعاد مانند تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، در مطالعات کیفیت آب به‌کار گرفته شده‌اند (Khoshrovesh et al., 2025).

پیشینه پژوهش

۱. مطالعات داخلی

مطالعات انجام‌یافته در ایران نشان می‌دهند که ارزیابی کیفیت آب مناطق مختلف کشور اغلب با شاخص‌های WQI و شاخص‌های وزن‌دار آنتروپی (EWQI) و روش‌های تحلیل چندمتغیره انجام شده است؛ برای مثال، روحانی و همکاران، در حوضه آبریز گرگان‌رود با استفاده از EWQI و تحلیل عاملی نشان دادند که دو عامل اصلی بیش از ۹۷٪ تغییرات کیفیت آب سطحی را کنترل می‌کنند و پارامترهای EC و TDS بیشترین تأثیر را دارند (روحانی و همکاران، ۱۳۹۷)؛ در حالی که مطالعه دیگر از امیری و همکاران در دشت لنجان بر تغییرات فصلی کیفیت آب زیرزمینی تأکید داشت (Amiri et al., 2014). در پژوهش آنها، نتایج EWQI، به‌گونه‌ای بود که درصد نمونه‌های با کیفیت عالی تا متوسط در فصل مرطوب بالاتر از فصل خشک بود. هرچند این پژوهش‌ها به شناسایی برخی پارامترهای کلیدی انجامید، به دلیل اتکای صرف به یک شاخص و نبود رویکرد ترکیبی، تصویر جامعی از کیفیت آب ارائه نکردند.

^۱ Water Quality Index (WQI)

مروج و همکاران و اخونی‌پورحسینی و ابراهیمی که به ترتیب بر رودخانه‌های کارون و بابلرود انجام دادند، از روش GIS و آنتروپی شانون برای وزن‌دهی پارامترها استفاده کردند (مروج و همکاران، ۱۳۹۶؛ اخونی‌پورحسینی و ابراهیمی، ۱۳۹۸). نتایج بیانگر پایین بودن کیفیت آب رودخانه دز به دلیل تزریق مواد آلاینده به آن در پایین دست ایستگاه دزفول است. همچنین مقادیر شاخص WQI در رودخانه کارون در بازه خوب تا عالی و برای رودخانه بابلرود در وضعیت عالی گزارش شده است؛ بنابراین، نتایج این دو مطالعه نشان داد که این روش‌ها در شناسایی مناطق بحرانی مؤثرند؛ با این حال، در اکثر موارد، تحلیل عاملی برای استخراج مؤلفه‌های اصلی مؤثر بر کیفیت آب استفاده نشده است (مروج و همکاران، ۱۳۹۶؛ اخونی‌پورحسینی و ابراهیمی، ۱۳۹۸).

صادقی و همکاران در رودخانه زیارت روند تغییرات شاخص WQI را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مقدار این شاخص برای تمام ایستگاه‌های رودخانه زیارت بین ۲۹/۶۸ تا ۶۴/۷۸ بود. ایشان در برخی از ایستگاه‌ها، مقدار این شاخص را در بازه (۵۰-۷۰) و در برخی دیگر، در بازه (۲۵-۵۰) گزارش کردند (صادقی و همکاران، ۱۳۹۹). خوش‌روش و همکاران روش‌های کاهش ابعاد داده‌ها مانند تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) را در مطالعه کیفیت آب به کار گرفتند (خوش‌روش و همکاران، ۱۴۰۴). خلیلی و همکاران، گرچه روی آب رودخانه چالوس مطالعه‌ای با استفاده از شاخص WQI و روش‌های آماری چندمتغیره، تغییرات مکانی و تأثیر فعالیت‌های انسانی انجام دادند؛ با این حال، متأسفانه در مطالعه ایشان مقایسه بین شاخص‌ها یا بررسی ترکیبی آنها انجام نشده است (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۰). در مطالعات نسبتاً جدید، مانند منافی ملایوسفی و ملکانی که کیفیت آب رودخانه صوفی چای در استان آذربایجان شرقی را با استفاده از شاخص WQIT بررسی کردند، وزن پارامترها از آنتروپی شانون و تحلیل سلسله مراتبی تعیین شد و این وزن‌ها با اوزان نظیر سازمان بهداشت جهانی برای آب سالم مقایسه شد. پارامترهای مؤثر شامل کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی بود. ایشان میانگین شاخص کیفیت آب با استفاده از روش آنتروپی شانون، تحلیل سلسله مراتبی و وزن‌دهی استاندارد سازمان بهداشت جهانی را به ترتیب، معادل ۱۳، ۳۸ و ۱۶ گزارش کردند که نشان‌دهنده کیفیت عالی آب حوضه مذکور بود (منافی ملایوسفی و ملکانی، ۱۴۰۱). در مطالعه‌ای دیگر که قره‌محمودلو و شیرزادینا انجام دادند از تلفیق روش‌های آنتروپی شانون، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مدل‌سازی GIS برای تحلیل فضایی کیفیت آب استفاده شده است. براساس شاخص WQI، کیفیت آب همه چشمه‌ها و چاه‌های واقع در حاشیه ارتفاعات، عالی گزارش شده است؛ اما با دور شدن از دشت، کیفیت آب چند چاه خوب تا ضعیف توصیف شده است. این پژوهش‌ها گامی روبه‌جلو در جهت کمی‌سازی تأثیر عوامل مختلف بودند؛ اما تمرکز اصلی بر ارزیابی منطقه‌ای و یک شاخص محدود بود (قره‌محمودلو و شیرزادینا، ۱۴۰۲). مطالعات دیگری نظیر حسینی و همکاران، دریکوندی و همکاران و کمالی و همکاران در رابطه با کاربرد شاخص‌های کیفی در ایران انجام دادند؛ ولی به ارتباط بین شاخص‌ها، هم‌پوشانی نتایج و تأثیر هم‌زمان پارامترها کمتر توجه شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷؛ دریکوندی و همکاران، ۱۴۰۲؛ کمالی و همکاران، ۱۴۰۳).

در کل، مرور مطالعات داخلی نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت در کاربرد مدل‌های آماری و شاخصی، بیشتر پژوهش‌ها فاقد مقایسه میان شاخص‌ها، تحلیل هم‌زمان چند شاخص، و بررسی روابط علی بین متغیرهای کیفی

بوده‌اند. این خلأ علمی، نیاز به پژوهش‌هایی را آشکار می‌سازد که با ترکیب شاخص‌های مختلف و تحلیل‌های آماری پیشرفته، ارزیابی جامع‌تری از کیفیت آب ارائه دهند.

۲. مطالعات خارجی

پژوهش‌ها در سطح بین‌المللی، طیف وسیعی از شاخص‌ها و روش‌های آماری برای بررسی کیفیت آب به‌کار گرفته شده است. در مطالعه سیمئونوف و همکاران، در یونان، روش‌های PCA و CA برای شناسایی الگوهای مکانی آلودگی مؤثر واقع شد و مبنایی برای توسعه تحلیل‌های چندمتغیره در مطالعات بعدی فراهم آورد (Simeonov et al., 2003). العبیدی و همکاران در کردستان عراق روند نزولی کیفیت آب را در گذر زمان گزارش داد که اهمیت پایش بلندمدت را برجسته کرد (Alobaidy et al., 2010). در مطالعات جدیدتر، مانند آویتی و همکاران در تونس و ژانگ و همکاران در چین، مقایسه بین شاخص‌های WQI، EWQI و ImpWQI انجام و نشان دادند که استفاده از روش‌های وزن‌دهی مبتنی بر آنتروپی می‌تواند دقت ارزیابی را افزایش دهد. هرچند این مطالعات از نظر روش‌شناسی پیشرفته بودند، بیشتر بر داده‌های کوتاه‌مدت و بدون تحلیل عاملی تلفیقی تمرکز داشتند (Zhang et al., 2020; Aouiti et al., 2021). فاطیما و همکاران در پاکستان و لئو و لی در چین، ضمن بهره‌گیری از روش‌های آماری چندمتغیره و GIS، نقش فعالیت‌های انسانی را در افت کیفیت آب بررسی کردند؛ با این حال، رویکرد آنها بیشتر توصیفی و منطقه‌محور بوده و مقایسه بین شاخص‌ها یا تحلیل‌های تلفیقی بین روش‌ها انجام نگرفته است (Fatima et al., 2022; Liu & Li, 2023). داس در هند و آریمان و همکاران در ترکیه، از تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و مدل Fuzzy-TOPSIS بهره گرفتند (Das, 2024; Ariman et al., 2024). علاوه بر آن، مطالعه داس و مطالعه آپوکوتان و همکاران در هند با بهره‌گیری از EWQI، SOM و روش‌های MCDM توانستند ترکیب شاخص‌ها و تحلیل مکانی - زمانی را انجام دهند و عوامل مؤثر بر کیفیت آب را به‌شکل دقیق‌تر شناسایی کنند (Das, 2025; Appukuttan et al., 2025). با وجود این، فقدان ارزیابی هم‌زمان چند شاخص بین‌المللی و تحلیل عاملی برای تبیین عوامل کلیدی مؤثر بر افت کیفیت آب، همچنان یک شکاف دانشی در این حوزه باقی مانده است (Das, 2025; Appukuttan et al., 2025).

مرور منابع نشان می‌دهد که گرچه پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های مختلف انجام شده است، هر یک از آنها با محدودیت‌هایی همراه بوده‌اند؛ به‌طور مثال، برخی تنها متکی بر یک شاخص خاص بوده و برخی دامنه مکانی محدودی داشته‌اند. افزون بر این، نتایج مطالعات پیشین در مواردی با همدیگر متناقض بوده و تصویری جامع از ترکیب عوامل مؤثر بر کیفیت آب ارائه نکرده‌اند. این شکاف دانشی ضرورت انجام مطالعه حاضر را برجسته می‌سازد تا با بهره‌گیری هم‌زمان از چند شاخص مختلف و تحلیل عاملی، ارزیابی کامل‌تری از وضعیت کیفیت آب منطقه به‌دست آید. با توجه به اهمیت منابع آب آشامیدنی و محدودیت‌های موجود در تحقیقات گذشته، اجرای این پژوهش در منطقه مورد مطالعه اجتناب‌ناپذیر است. نوآوری تحقیق حاضر در به‌کارگیری توأمان سه شاخص WQI، EWQI و ImpWQI همراه با روش تجزیه به عامل‌ها (FA) نهفته است که امکان ارزیابی جامع‌تر کیفیت آب، شناسایی دقیق‌تر عوامل مؤثر بر افت کیفیت و مقایسه نتایج سه شاخص را فراهم

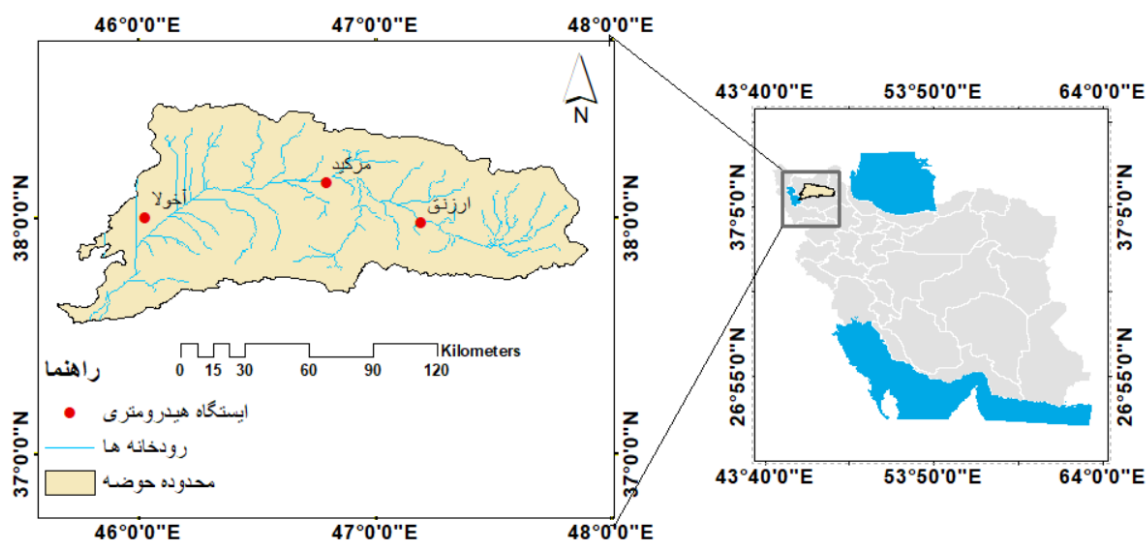
می‌آورد. همچنین در این مطالعه، علاوه بر استفاده از شاخص‌های متداول کیفیت آب، شامل WQI و EWQI، در مطالعه حاضر، برای اولین بار در ایران از شاخص ImpWQI برای ارزیابی کیفیت آب حوضه آبریز آجی‌چای استفاده شد. این شاخص با ترکیب بهینه پارامترها و وزن‌دهی پیشرفته، دقت ارزیابی کیفیت آب را نسبت به شاخص‌های سنتی افزایش می‌دهد و امکان تحلیل جامع‌تری از وضعیت کیفی آب فراهم می‌کند. با توجه به محدودیت داده‌های موجود برای محاسبه شاخص‌های بومی ایران (IWQI)، تمرکز بر شاخص‌های بین‌المللی امکان انجام ارزیابی جامع و قابل اتکا را فراهم و شکاف موجود در مطالعات پیشین این رودخانه را رفع می‌کند. این رویکرد تحلیلی، افزون بر ارزش علمی، کاربرد عملی نیز دارد و می‌تواند به توسعه پایدار مدیریت منابع آب منطقه کمک کند؛ بنابراین، دو هدف اصلی مطالعه حاضر شامل الف) بررسی کیفیت آب رودخانه آجی‌چای با سه شاخص WQI، EWQI و ImpWQI به منظور تناسب آب با مصارف شرب و ب) بهره‌گیری از روش تجزیه به عامل‌ها برای تعیین پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب رودخانه است.

روش پژوهش

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب ایران یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه است و به‌لحاظ موقعیت جغرافیایی بین عرض‌های $37^{\circ} 42'$ تا $38^{\circ} 30'$ شمالی و طول $40^{\circ} 45'$ تا $53^{\circ} 47'$ شرقی واقع شده است. ارتفاع بالاترین قسمت این حوضه 3400 متر متعلق به دامنه‌های جنوب و جنوب غربی کوه سبلان است. پایین‌ترین نقطه در غرب آذرشهر، دارای ارتفاع 1270 متر در محل ورود آب به دریاچه ارومیه است (ثانی‌خانی و همکاران، ۱۳۹۲). این حوضه از شمال به حوضه آبخیز اهرچای، از جنوب به حوضه آبخیز قزل‌اوزن و صوفی‌چای، از شرق به حوضه آبخیز بالخلوچای و از غرب به دریاچه ارومیه محدود می‌شود (الله‌پوردی پور و دین‌پژوه، ۱۴۰۴). رودخانه آجی‌چای طویل‌ترین رود بخش‌های شرقی حوضه دریاچه ارومیه است. از سرچشمه‌های این رود، کوه سبلان، واقع در شمال شرق و دیگری کوه سهند در بخش جنوبی حوضه آجی‌چای است. اقلیم حوضه نیمه‌خشک بوده و میانگین دمای سالانه آن حدود $11/3$ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه آن 320 میلی‌متر است. مقدار شاخص اقلیمی دومارتون در این حوضه $24/40$ گزارش شده است (عیسی زاده و همکاران، ۱۴۰۱). حداکثر و حداقل مقدار میانگین دمای روزانه در این حوضه به ترتیب، $22-$ درجه سلسیوس در ژانویه و 40 درجه سلسیوس در ماه ژوئیه است (Barzegar et al., 2016). سازندهای این منطقه شامل سنگ‌های آهکی و دگرگونی پرمین - تریاس در شمال و سازند میوسن بالایی با سنگ‌آهک، مارن، دولومیت و نمک‌های تبخیری در بخش میانی و پایین دست است. رسوبات کواترنری آبرفتی روی این واحدها گسترده و ساختار حوضه تحت تأثیر گسل تبریز و فعالیت های آتشفشانی کوه سهند شکل گرفته است (Safari et al., 2020). کاربری اراضی در حوضه آجی‌چای شامل زمین‌های زراعی در مناطق دشت، مراتع طبیعی در نواحی شیب‌دار و اراضی مسکونی در حاشیه رودخانه است (قدوسی و همکاران، ۱۳۹۳). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز آجی‌چای را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز آجی‌چای و سه ایستگاه هیدرومتری منتخب در آن.

Fig 1 Geographical location of the Ajichai basin and three selected hydrometric stations in it.

داده‌ها

در این مطالعه، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در سه ایستگاه ارزنتق، آخولا و مرکید شامل پارامترهای pH، EC، TDS، HCO_3^- ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، K^+ و TH استفاده شد. برای این منظور، سه مقیاس زمانی در نظر گرفته شد که شامل الف) میانگین مقادیر هر پارامتر در تمام ماه‌های سال و طول دوره آماری، ب) مقدار میانگین طولانی مدت هر پارامتر در ماه پرآب (اردیبهشت)، و ج) مقدار میانگین طولانی مدت هر پارامتر در ماه کم آب (شهریور) بود، که از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ شد. حداکثر ۵/۲۶ درصد از کل داده‌ها مفقود بود. داده‌های گم‌شده با استفاده از میانگین‌گیری از داده نظیر سال قبل و بعد بازسازی شد. به‌منظور بررسی تغییرات سری‌های زمانی بارش و دبی، از داده‌های دبی برای سه ایستگاه مورد بررسی در طول دوره آماری ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰ استفاده شد. درخور ذکر است که داده‌های بارش تنها برای ایستگاه مرکید موجود بود؛ زیرا این آمار توسط سازمان آب منطقه‌ای تنها برای این ایستگاه طی دوره مذکور جمع‌آوری شد و برای دو ایستگاه دیگر، یعنی ارزنتق و آخولا در دسترس نبود.

روش‌های مورد استفاده

در این مطالعه، به‌منظور بررسی کیفیت آب سه ایستگاه ارزنتق، آخولا و مرکید از سه شاخص WQI، EWQI و ImpWQI استفاده شد. شاخص‌های متعددی برای ارزیابی کیفیت آب ارائه شده‌اند که هر یک دارای نقاط قوت و محدودیت‌های خاص خود هستند. شاخص WQI یکی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین شاخص‌ها در این زمینه است که به‌دلیل سادگی و کاربرد گسترده، استفاده می‌شود؛ اما وزن‌دهی آن به پارامترها تا حدی سلیقه‌ای است. شاخص EWQI با بهره‌گیری از روش آنتروپی، این محدودیت را برطرف و وزن‌دهی دقیق‌تری را فراهم می‌کند. در مقابل، شاخص ImpWQI به‌عنوان نسخه اصلاح‌شده WQI، ضعف‌های شاخص کلاسیک را جبران می‌کند و نتایج دقیق‌تری

ارائه می‌دهد؛ از این رو، به نظر می‌رسد استفاده هم‌زمان از سه شاخص مذکور در این پژوهش، علاوه بر فراهم آوردن امکان مقایسه و اعتبارسنجی متقابل نتایج، ارزیابی جامع‌تری از کیفیت آب را در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. به‌منظور تعیین مؤلفه‌های اصلی و پارامترهای تأثیرگذار بر عامل‌های مذکور در هر سه ایستگاه از روش تجزیه به عامل‌ها استفاده شد. این روش‌ها در ادامه شرح داده شده است.

شاخص WQI

معمولاً شاخص WQI برای ارزیابی کیفیت آب شرب استفاده می‌شود (Akter et al., 2016; Mukate et al., 2019). هدف WQI ارزیابی کیفیت آب با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامترهای هیدروشیمی آب است. این مهم با تخصیص وزن به هر پارامتر W_i ، با نماد W_i انجام می‌شود (Fatima et al., 2022). وزن‌های مذکور براساس اهمیت هر پارامتر یا میزان تأثیر آن بر سلامت انسان اختصاص می‌یابد. این وزن‌ها از یک (کمترین تأثیر بر کیفیت آب) تا ۵ (بیشترین تأثیر بر کیفیت آب) تغییر می‌کنند. بیشترین وزن به پارامتری اختصاص داده می‌شود که اثرات حیاتی بر سلامتی انسان دارد و حضور آن در آب بالاتر از حد غلظت بحرانی می‌تواند قابلیت استفاده از منبع را برای مصارف خانگی و آشامیدنی محدود کند (Şener et al., 2017). وزن نسبی پارامتر کیفی W_i که با نماد RW_i نشان داده می‌شود از رابطه زیر محاسبه شد (Derdour et al., 2020):

$$RW_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

که در آن n تعداد پارامترهای شیمیایی مورد استفاده در بررسی کیفیت آب (در مطالعه فعلی برابر با ۱۱) و W_i وزن پارامتر کیفی W_i در شاخص است. در این مطالعه وزن‌های لحاظ‌شده با جمع‌بندی پژوهش‌های انجام گرفته‌شده از جمله (Shaibur et al., 2024; Varol & Davraz, 2014; Karunanidhi et al., 2021) در نظر گرفته شد. در این راستا، مقدار یک به پارامتر HCO_3^- ، وزن دو به پارامتر K^+ ، سه به پارامترهای Ca^{2+} ، Mg^{2+} و TH ، مقدار چهار به پارامترهای pH ، EC و Na^+ و در نهایت، مقدار پنج به پارامترهای TDS ، Cl^- و SO_4^{2-} اختصاص داده شد. برای محاسبه شاخص WQI لازم است ابتدا درجه‌بندی کیفیت آب شرب برای پارامتر کیفی W_i که با نماد q_i نشان داده می‌شود، محاسبه شود. مقدار درجه‌بندی کیفیت آب شرب برای یکایک پارامترهای کیفی در هر ایستگاه از رابطه زیر به دست آمد (Krishna Kumar et al., 2015):

$$q_i = 100 * \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

که در آن q_i درجه‌بندی کیفیت آب شرب برای پارامتر کیفی W_i ، C_i غلظت پارامتر کیفی W_i در آب برحسب میلی‌گرم بر لیتر و S_i مقدار نظیر استاندارد آب آشامیدنی برای پارامتر کیفی W_i برحسب میلی‌گرم بر لیتر براساس دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) است. پس از محاسبه مقادیر q_i برای پارامترهای کیفی، مقدار شاخص WQI از رابطه زیر به دست آمد (Mahato et al., 2023):

$$WQI = \sum_{i=1}^n RW_i \times q_i \quad (3)$$

که در آن n تعداد پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده برای نمونه آب ایستگاه مدنظر است. جدول ۱ دامنه تغییرات WQI را به همراه توصیف آب نشان می‌دهد (Aouiti et al., 2021; Zhang et al., 2020).

جدول ۱. طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس شاخص‌های کیفی (Aouiti et al., 2021; Zhang et al., 2020)

Table 1 Classification of water quality based on quality indices (Aouiti et al., 2021; Zhang et al., 2020)

بیشتر از ۲۰۰	۲۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۵۰	کمتر از ۵۰	شاخص
۵	۴	۳	۲	۱	رتبه
بشدت ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	عالی	کیفیت آب

شاخص کیفیت آب آنتروپی (EWQI)

در این مطالعه، به منظور اجتناب از قضاوت شخصی دربارهٔ اختصاص وزن به پارامترهای کیفی آب، از روش آنتروپی شانون^۱ برای تخصیص وزن‌ها استفاده شد. مراحل اصلی استفاده از روش ضریب آنتروپی برای تعیین وزن‌ها به شرح زیر است: فرض شد m تعداد نمونه‌های آب (تعداد سال‌های آماری) و n تعداد پارامتر کیفی اندازه‌گیری شده در هر نمونه (اینجا ۱۱) باشد. ابتدا ماتریس X به صورت زیر در نظر گرفته شد (جعفری و همکاران، ۱۴۰۰):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن x_{ij} مقدار متغیر i ام برای نمونه j ام است. برای از بین بردن تأثیر واحدهای مختلف شاخص‌های مشخصه و درجه‌های کمیت متفاوت کیفیت، لازم است داده‌ها استاندارد شوند. برای این کار ماتریس X به ماتریس استاندارد شده Y (رابطه ۶) تبدیل شد. درایه واقع در سطر i ام و ستون j ام ماتریس Y که با y_{ij} نشان داده می‌شود، به شرح رابطه زیر استاندارد شد:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (5)$$

ماتریس Y به شرح زیر نوشته شد:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن m تعداد نمونه‌های آب و n تعداد پارامترهای شیمیایی (در اینجا ۱۱) است. سپس نسبت مقدار پارامتر j ام استاندارد شده در نمونه i به مجموع مقادیر همان پارامتر در نمونه‌های مدنظر با P_{ij} نشان داده شد. این نسبت با رابطه زیر محاسبه شد:

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (7)$$

¹ Shannon

آنگاه مقدار آنتروپی اطلاعات (e_j) با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

$$e_j = -\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \frac{1}{\ln(m)} \quad (۸)$$

هرچه مقدار e_j کوچک‌تر باشد، تأثیر پارامتر کیفی‌زام در کیفیت آب بیشتر است. سپس وزن پارامتر زام (w_j) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$w_j = \frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad (۹)$$

برای محاسبه EWQI، لازم است مقیاس درجه‌بندی کیفیت (q_j) برای هر پارامتر کیفی به دست آید. در این مطالعه از q_j نسبت غلظت پارامتر شیمیایی زام در هر نمونه آب به مقدار حداکثر غلظت توصیه‌شده برای همان پارامتر در استاندارد جهانی به شرح زیر محاسبه شد:

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (۱۰)$$

در این رابطه C_j ، غلظت پارامتر شیمیایی زام در هر نمونه آب بر حسب میلی‌گرم بر لیتر (به‌جز pH و EC) و S_j غلظت همان پارامتر برای کیفیت آب آشامیدنی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر در استاندارد جهانی است (WHO, 2011). در نهایت، شاخص EWQI با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$EWQI = \sum_{j=1}^n w_j q_j \quad (۱۱)$$

شاخص کیفیت آب اصلاح شده^۱ (ImpWQI)

برای محاسبه شاخص کیفیت آب اصلاح شده، لازم است که ابتدا ضرایب همبستگی بین هر جفت از پارامترهای کیفی محاسبه شود (Zhang et al., 2020). ضرایب همبستگی بین هر جفت پارامترهای کیفی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})(y_{ij} - \bar{y}_{ij})}{\sqrt{\sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 \sum (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2}} \quad i=1,2,\dots,m \text{ و } j=1, 2, \dots, n \quad (۱۲)$$

که در آن x_{ij} مقدار ثبت‌شده برای i امین پارامتر شیمیایی در i امین نمونه آب و y_{ij} مقدار استانداردشده (نرمال شده) همان نمونه (از رابطه ۵) است و \bar{x}_{ij} و \bar{y}_{ij} به ترتیب، میانگین مقادیر x_{ij} ها و y_{ij} ها را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، پارامتر C_j به شرح زیر به دست آمد:

$$C_j = \delta_j \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (۱۳)$$

که در آن δ_j نشان‌دهنده انحراف معیار مقادیر پارامتر زام و m تعداد پارامترهای شیمیایی مورد استفاده است. وزن هر پارامتر (w_j) از رابطه زیر حاصل شد (Eid et al., 2024):

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^m C_j} \quad (۱۴)$$

^۱ Improve Water Quality Index (ImpWQI)

که در آن C_j مقدار غلظت یا اطلاعات پارامتر m ، تعداد پارامترهای شیمیایی مورد استفاده است. در مرحله بعدی، برای هر پارامتر یک شاخص موسوم به درصد مقیاس درجه‌بندی کیفیت آب که با نماد Q_j نشان داده می‌شود، به شرح رابطه زیر به دست آمد.

$$Q_j = \frac{C_j - C_{jp}}{S_j - C_{jp}} \times 100\% \quad (15)$$

که در آن C_j غلظت پارامتر شیمیایی j ام در نمونه آب برحسب میلی‌گرم در لیتر (بجز pH و EC) و C_{jp} مقدار ایدئال پارامتر در آب خالص و S_j مقدار استاندارد برای هر پارامتر شیمیایی برحسب میلی‌گرم در لیتر با توجه به استاندارد جهانی همان پارامتر برای کیفیت آب آشامیدنی است. در این مطالعه، برای همه پارامترها، به جز pH، مقدار $C_{jp} = 0$ در نظر گرفته شد، برای پارامتر اسیدیته یا pH مقدار $C_{jp} = 7$ لحاظ شد (Bhat & Prasun & Singh, 2025; Pandit 2014) در نهایت، شاخص ImpWQI از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{ImpWQI} = \sum_{j=1}^m W_j Q_j \quad (16)$$

تجزیه به عامل‌ها (FA)

روش تجزیه به عامل‌ها (FA) برای شناسایی عوامل اصلی و مؤثر بر کیفیت آب و کاهش ابعاد داده‌ها انتخاب شد (Ariman et al., 2024). با توجه به چندپارامتری بودن داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری، FA امکان تشخیص الگوهای پنهان، اولویت‌بندی عوامل مؤثر و ارائه ارزیابی جامع و دقیق‌تر از وضعیت کیفیت آب را فراهم می‌سازد (Ali et al., 2024). گام اول در این روش، انجام روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PC) است. هر مؤلفه ترکیبی خطی از همه متغیرهای مدنظر است. اولین مؤلفه، بیشترین واریانس داده‌ها را در بر دارد. مؤلفه‌های دوم، سوم و ... به ترتیب حاوی بیشترین اطلاعات داده‌ها هستند. برای انجام این تجزیه، ماتریس همبستگی بین متغیرها با ابعاد $p \times p$ محاسبه شد. واضح است که کل تعداد مؤلفه‌های اصلی (Z_i) برابر با تعداد متغیرهای شیمیایی مورد بررسی در مطالعه حاضر (p) است. مقادیر هر مؤلفه با استفاده از رابطه زیر تخمین زده شدند (مقدم و همکاران، ۱۳۸۷):

$$Z_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + a_{i3}X_3 + \dots + a_{ip}X_p \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

که در آن Z_i مقدار مؤلفه اصلی i ام، a_{ij} مقدار ضریب مربوط به متغیر اصلی j ام، برای مؤلفه اصلی i ام (که اینجا با X_i نشان داده شده) بوده و p تعداد کل متغیرها و n تعداد نمونه‌های مورد بررسی (اینجا تعداد پارامترهای شیمیایی موجود در آب معادل با ۱۱) است. در این مطالعه، برای محاسبه ضرایب a_{ij} ابتدا ماتریس همبستگی داده‌ها با ابعاد $p \times p$ موسوم به ماتریس تشابه تشکیل شد. ضرایب همبستگی بین هر جفت پارامتر شیمیایی، در یک ایستگاه، درایه‌های این ماتریس را تشکیل می‌دهند. مقادیر ویژه این ماتریس محاسبه شدند. پر واضح است که جمع همه مقادیر ویژه برابر با تعداد کل متغیرها یا p است. آنگاه، بردارهای ویژه نظیر مقادیر ویژه هم محاسبه شدند. این بردارهای ویژه، همان ضرایب مؤلفه‌های اصلی یا ضرایب a_{ij} هستند (مقدم و همکاران، ۱۳۸۷). در هر مؤلفه اصلی، متغیری که ضریب بزرگ‌تر (نسبت به بقیه) دارد، به عنوان متغیر مؤثر بر مؤلفه مذکور در نظر گرفته شد. معمولاً چند عامل اول واریانس

زیادی از کل واریانس داده‌ها را دربر دارد. با رسم نمودار صخره‌ای^۱ تعداد مؤلفه‌های اصلی مهم انتخاب شد. این مؤلفه‌ها با معیار دارابودن مقدار ویژه بیش از واحد انتخاب شدند. این مؤلفه‌ها با همدیگر بطور مطلق ناهمبسته هستند. مرحله بعدی، انجام تجزیه به عامل‌ها (FA) است. در این مرحله، فقط تعداد معدودی از مؤلفه‌ها (با مقدار ویژه بیش از یک) در نظر گرفته شدند محوره‌های این مؤلفه‌ها به‌منظور بهتر نشان دادن موقعیت متغیرها در صفحه PC ها، دوران دوران (با روش واریماکس^۲) داده شدند. این کار تفسیرپذیری عامل‌ها را آسان می‌کند.

در این پژوهش، تحلیل عاملی براساس ۱۱ پارامتر کیفی به‌منظور تعیین مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب سطحی در هر یک از ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبریز آجی‌چای بررسی شد. برای این کار، در هر ایستگاه ماتریس داده‌ها طوری تنظیم شد که هر سطر متعلق به یک سال از دوره آماری و هر ستون متعلق به یکی از پارامترهای کیفی مورد مطالعه باشد. در این مطالعه، داده‌های کیفی آب به سه صورت استفاده شدند. این صور شامل سالانه (میانگین مقادیر اندازه گرفته شده در یک سال)، یک اندازه گیری در ماه پرآب (اردیبهشت) و یک مورد در ماه کم‌آب (شهریور) بود؛ برای نمونه، در ایستگاه ارزنق طی دوره ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰، ماتریس داده‌ها شامل ۱۹ سطر (نمایانگر سال‌ها) و ۱۱ ستون (نمایانگر پارامترهای کیفی) بود. در هر سطر، مقادیر پارامترها به تفکیک سالانه و همچنین برای ماه‌های اردیبهشت و شهریور درج شد. بدین ترتیب، امکان تحلیل تغییرات کیفیت آب در مقیاس سالانه و نیز در شرایط هیدرولوژیکی متفاوت (پرآب و کم‌آب) فراهم شده. مقادیر هر پارامتر، در هر سال، در متن جدول درج شد. آنگاه ماتریس همبستگی بین پارامترهای هر ایستگاه به دست آمد. سپس معنی‌داری ضرایب همبستگی در سطح ۵ درصد آزمون شد. واضح است که هرچه میزان همبستگی بین متغیرهای اصلی بیشتر باشد، روش تجزیه به عامل‌ها کاراتر خواهد بود. محور افقی در نمودار صخره‌ای به شماره عامل اختصاص دارد و محور قائم به مقادیر ویژه مربوط است؛ به‌طوری‌که اشاره رفت، از بین مؤلفه‌های اصلی، تعداد اندکی از آنها که مقدار ویژه بیش از یک داشتند، انتخاب شد. پر واضح است که همواره، بیشینه مقدار ویژه از آن عامل اول است. پس از آن، بیشینه مقدار متعلق به عامل دوم و ... است. طبیعی است که مقدار ویژه به‌تدریج برای عامل‌های بعدی کاهش می‌یابد. پس از انتخاب مؤلفه‌های اصلی مهم، محوره‌های مؤلفه‌های منتخب بطور متعامد دوران یافتند. نمودار پراکنش نقاط یا موقعیت پارامترهای کیفی در دیاگرام با محوره‌های عمود برهم که محور افقی آن ضرایب عامل اول و محور قائم آن ضرایب عامل دوم است، رسم شد. به این ترتیب، پارامترهای کیفی که مقدار قدرمطلق ضرایب عامل‌های آن به عدد یک نزدیک بود به‌عنوان «دسته پارامترهای مهم» در آن ایستگاه شناسایی شد. این نمودار برای هر ایستگاه برای دو عامل نخست، به‌طور جداگانه، رسم شد.

نتایج

جدول ۲ مقادیر میانگین شاخص‌های WQI، EWQI و ImpWQI را به‌همراه وضعیت کیفیت آب رودخانه در سه ایستگاه ارزنق، آخولا و مرکید نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که هرچه مقدار شاخص (ها) کمتر، کیفیت آب

^۱ Scree Plot

^۲ Varimax

بهرتر است. در طول دوره آماری، دامنه تغییرات شاخص WQI در ایستگاه ارزنق بین ۹۲/۹۰ و ۱۶۲/۹۱ و میانگین آن، در این ایستگاه، ۱۲۹/۳۲ بود. در ایستگاه آخولا دامنه تغییرات شاخص WQI بین ۱۸۱/۹۸ و ۳۲۰/۲۲ و میانگین آن ۲۳۹/۲۰ بود. بیشترین مقدار شاخص WQI در ایستگاه مرکید مشاهده شد که دامنه تغییرات آن بین ۴۲۱/۸۶ و ۴۸۵۵/۴۹ بود و میانگین این شاخص در ایستگاه مرکید ۱۱۴۶/۶۶ بود. دامنه تغییرات مقدار شاخص EWQI در ایستگاه ارزنق بین ۹۱/۹۸ و ۱۵۱/۴۲ با میانگین ۱۲۷/۳۶ بود. در ایستگاه آخولا کمترین و بیشترین مقدار این شاخص به ترتیب برابر با ۱۶۵/۲۷ و ۲۹۰/۷۲ با میانگین ۲۱۹/۶۷ بود. در ایستگاه مرکید، کمترین و بیشترین مقدار شاخص EWQI به ترتیب معادل با ۳۵۹/۰۶ و ۳۹۲۵/۹۳ با میانگین ۹۴۵/۹۲ بود. افزون بر این، نتایج نشان داد که در ایستگاه ارزنق کمترین و بیشترین مقدار شاخص ImpWQI به ترتیب برابر با ۱۰۹/۰۲ و ۱۹۸/۴۱ با میانگین ۱۵۶/۱۷ بود. در ایستگاه آخولا دامنه تغییرات این شاخص بین ۲۴۸/۵۵ و ۴۶۰/۳۲ با میانگین ۳۳۲/۹۸ بود. همچنین، در ایستگاه مرکید این شاخص بین ۶۷۸/۷۱ و ۸۱۳/۹۱ با میانگین ۱۸۹۶/۲۰ بود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب رودخانه آجی‌چای با سه شاخص مورد بررسی، در هر سه ایستگاه به شدت ضعیف و برای مصارف شرب نامناسب است. هرچند کیفیت آب در هر سه ایستگاه نامناسب است، بدترین کیفیت آب متعلق به ایستگاه مرکید، سپس آخولا و در نهایت، ارزنق بود؛ بنابراین، در این راستا لازم است تمهیدات لازم برای بهبود کیفیت آب رودخانه صورت گیرد.

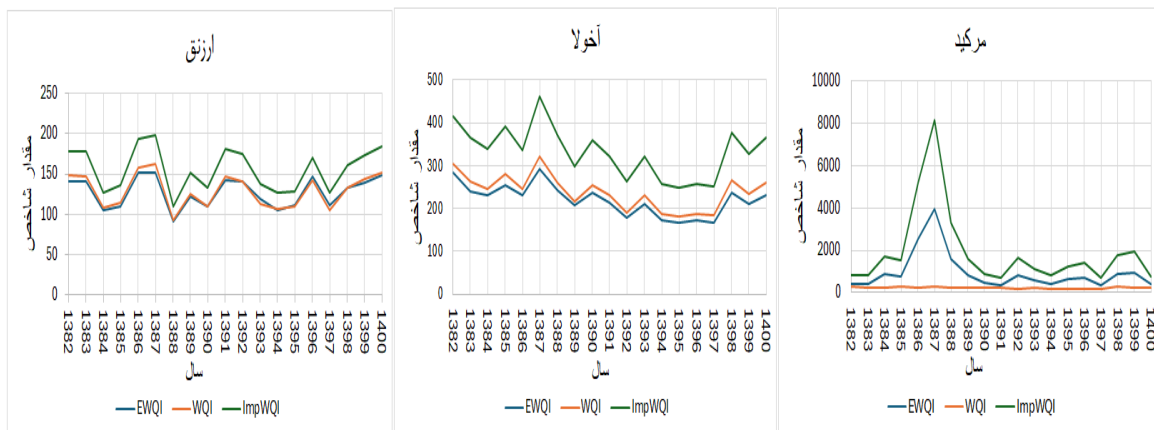
با توجه به نتایج جدول ۲ کیفیت آب در هر سه ایستگاه به طور کلی «ضعیف» بوده است؛ با این حال شدت این وضعیت در ایستگاه مرکید به مراتب بیشتر از دو ایستگاه دیگر است؛ به طوری که میانگین مقادیر WQI، EWQI و ImpWQI در مرکید به ترتیب تقریباً پنج برابر، چهار برابر و ۱۲ برابر مقادیر نظیر ایستگاه ارزنق است. این امر، احتمالاً ناشی از قرارگیری ایستگاه مرکید در پایین دست و دریافت پساب‌های شهری (تبریز) و صنعتی (کارگاه‌های چرم‌سازی و صنایع غذایی) موجود در حد فاصل شهر تبریز و دریاچه ارومیه است. علاوه بر این، تفاوت بین مقادیر سه شاخص نشان می‌دهد که شاخص ImpWQI نسبت به دو شاخص دیگر به آلاینده‌هایی نظیر شوری و سختی کل حساسیت بیشتری دارد و بنابراین، وضعیت بحرانی‌تری از کیفیت آب را بازتاب داده است.

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های WQI، EWQI و ImpWQI در رودخانه آجی‌چای و در ایستگاه‌های ارزنق، آخولا و مرکید

Table 2 Values of WQI, EWQI, and ImpWQI in Ajichai river at the stations Arzanag, Akhola, and Markid

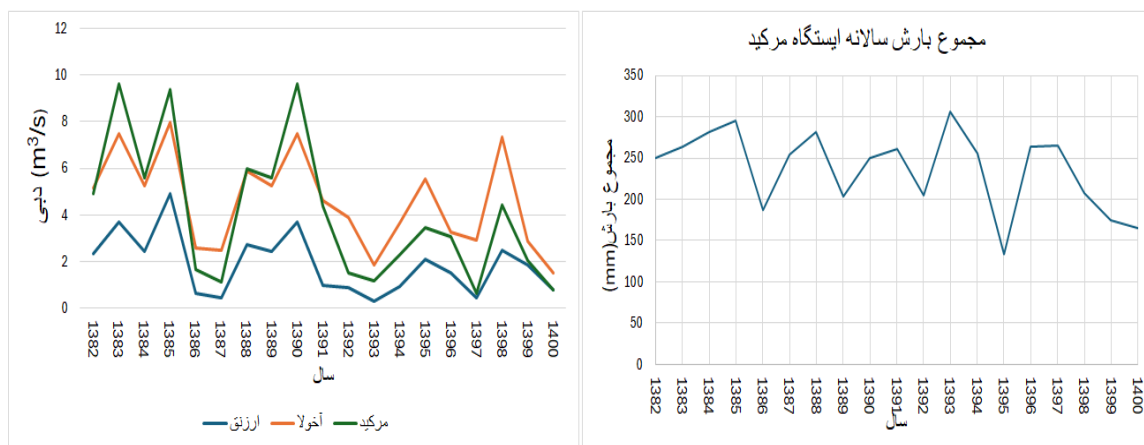
ایستگاه	WQI	وضعیت کیفیت آب	EWQI	وضعیت کیفیت آب	ImpWQI	وضعیت کیفیت آب
ارزنق	۱۲۹/۳۲	متوسط	۱۲۷/۳۶	متوسط	۱۵۶/۱۷	ضعیف
آخولا	۲۳۹/۲۰	به شدت ضعیف	۲۱۹/۶۷	به شدت ضعیف	۳۳۲/۹۸	به شدت ضعیف
مرکید	۱۱۴۶/۶۶	به شدت ضعیف	۹۴۵/۹۲	به شدت ضعیف	۱۸۹۶/۲۱	به شدت ضعیف

شکل ۲ نمودار سری زمانی مقادیر شاخص های کیفیت آب رودخانه آجی چای را در طول دوره آماری با سه شاخص WQI، EWQI و ImpWQI در ایستگاه های مورد مطالعه نشان می دهد؛ به طوری که از این شکل استنباط می شود در هر سه ایستگاه، نمودار شاخص ImpWQI در مقایسه به شاخص های EWQI و WQI در موقعیت نسبتاً بالاتری قرار دارد. این نشان می دهد که شاخص مذکور حساسیت بیشتری به تغییرات کیفیت آب دارد. از طرفی، می توان دید که بیشترین مقادیر مشاهده شده با هر سه شاخص در ایستگاه مرکید، متعلق به سال های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ است. در این سه سال، مقدار شاخص ImpWQI به ترتیب برابر با ۵۱۷۱/۹۶، ۸۱۳۷/۹۲ و ۳۳۰۰/۲۴ بود. این افزایش می تواند ناشی از کاهش جریان رودخانه به دلیل وقوع خشکسالی های پی در پی و هم زمان افزایش تخلیه پساب های صنعتی و کشاورزی باشد؛ بنابراین، اوج مقادیر شاخص ها در این سال ها احتمالاً ترکیبی از شرایط اقلیمی و فشار انسانی است.



شکل ۲. نمودار سری های زمانی شاخص های مورد مطالعه در رودخانه آجی چای و سه ایستگاه آب سنجی ارزنق، آخولا و مرکید

Fig. 2 Time series diagrams of the used indices in the Aji-Chai River at three hydrometric stations: Arznag, Akhola, and Markid



شکل ۳. نمودار تغییرات دبی ماهانه ایستگاه های ارزنق، آخولا و مرکید و مجموع بارش سالانه ایستگاه مرکید طی دوره آماری ۱۳۸۲-۱۴۰۰

Fig. 3. Diagram of monthly discharge changes at Arznag, Akhola, and Markid stations and total annual precipitation at Markid station during the statistical period 1382-1400

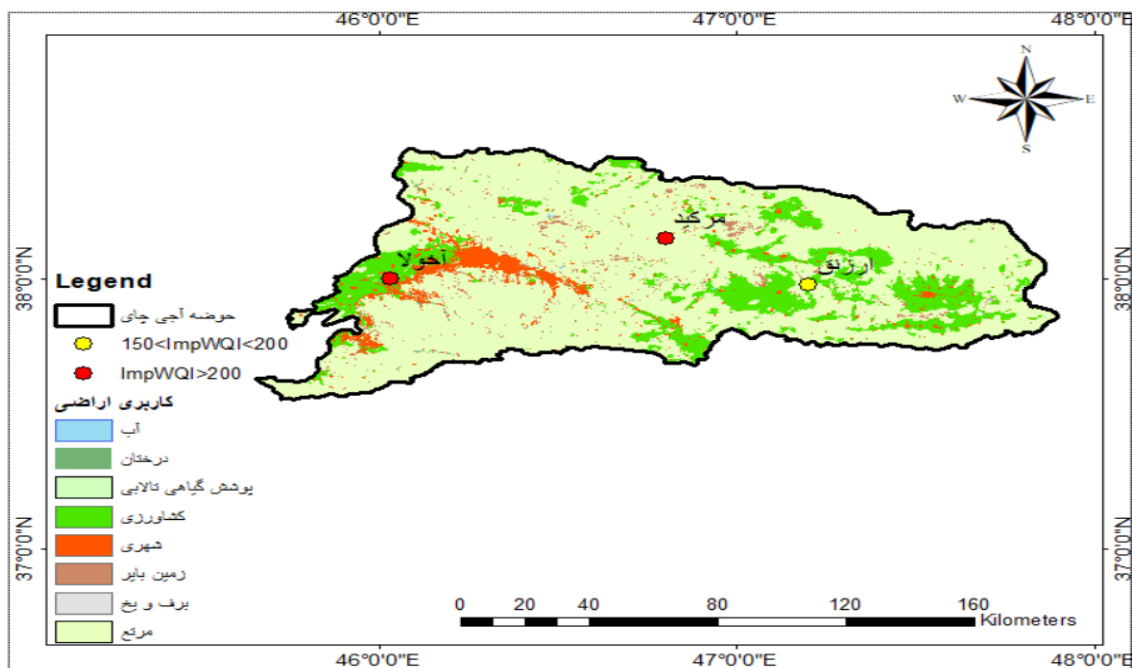
به‌منظور بررسی تغییرات سه شاخص مدنظر با تغییرات سالانه دبی و بارش با توجه به محدودیت داده‌ها، تحلیل تغییرات بارش تنها برای ایستگاه مرکید انجام شد؛ در حالی که داده‌های دبی برای هر سه ایستگاه موجود بود. در ایستگاه ارزنق، شاخص‌های کیفیت آب (WQI، EWQI و ImpWQI) بین حدود ۹۱ تا ۱۹۸ واحد در نوسان بودند. در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴، که دبی جریان به حدود سه تا چهار مترمکعب بر ثانیه افزایش یافت، مقادیر شاخص‌ها کاهش یافته‌اند (WQI حدود ۱۴۵). این موضوع، نشان‌دهنده بهبود نسبی کیفیت آب در اثر افزایش جریان و رقیق شدن آلاینده‌هاست. در مقابل، در سال‌های ۱۳۸۶ و به‌ویژه ۱۳۸۷ که دبی کاهش یافته است (حدود ۳ تا ۴ مترمکعب بر ثانیه)، شاخص‌ها افزایش درخور توجهی داشته‌اند (ImpWQI تا حدود ۱۹۸)؛ بنابراین، سال ۱۳۸۷ را می‌توان به‌عنوان یکی از سال‌های وضعیت آب در ایستگاه ارزنق (به لحاظ کیفیت آب) معرفی کرد. در پایان دوره (۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰)، شاخص‌ها کاهش خفیفی نشان داده‌اند که ممکن است ناشی از بهبود نسبی وضعیت کیفی یا کنترل آلودگی‌ها باشد.

در ایستگاه آخولا، طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰، دبی جریان بین حدود ۱/۵ تا ۸ مترمکعب بر ثانیه تغییر کرده است. بیشترین میزان دبی رودخانه در سال ۱۳۸۵ (m^3/s) و کمترین آن در سال ۱۴۰۰ (m^3/s) ثبت شده است. با کاهش تدریجی دبی از اواخر دهه ۱۳۸۰ به بعد، شاخص‌های کیفیت آب WQI، EWQI و ImpWQI نیز تغییر کرده‌اند؛ به طوری که در سال‌های با دبی بالا (مانند ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵) مقادیر شاخص‌ها کمتر و کیفیت آب بهتر بوده است؛ اما در سال‌های با دبی پایین‌تر (به‌ویژه از ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷) مقدار شاخص‌ها افزایش یافته که نشان‌دهنده افت کیفیت آب هستند. در مجموع، رابطه‌ای معکوس بین دبی و شاخص‌های کیفیت آب مشاهده می‌شود؛ یعنی با افزایش دبی، کیفیت آب بهبود یافته و با کاهش دبی، کیفیت آب کاهش یافته است.

در ایستگاه مرکید، افزایش دبی معمولاً با کاهش مقادیر شاخص‌ها همراه بوده است. در سال‌های پرآب، مانند ۱۳۸۳ و ۱۳۹۰ که دبی به بیش از نه مترمکعب بر ثانیه رسید، شاخص‌های WQI و ImpWQI کاهش یافته و کیفیت آب را بهبود دادند. این رابطه، به‌ویژه در WQI و ImpWQI واضح‌تر است؛ زیرا رقیق شدن آلاینده‌ها در جریان‌های پرآب موجب ارتقای کیفیت می‌شود. کاهش دبی منجر به افت مقادیر شاخص‌ها شده است. در سال‌هایی مانند ۱۳۹۷ و ۱۴۰۰ که دبی به زیر یک m^3/s رسید، مقادیر هر سه شاخص کاهش شدند. در این شرایط EWQI نوسانات شدیدتری نشان داد که احتمالاً به دلیل حساسیت بالای آن به تغییرات نسبی پارامترهای کیفی است. افزایش بارش در برخی سال‌ها (مانند ۱۳۹۳ با ۳۰۶ میلی‌متر بارش سالانه) موجب بهبود شاخص‌ها شده است؛ به‌ویژه مقدار شاخص ImpWQI به بیش از ۱۱۰۰ رسید؛ با این حال، در سال‌هایی با بارش بالا اما دبی پایین (مانند ۱۳۸۶)، شاخص‌ها به‌ویژه EWQI و ImpWQI جهش‌های غیرمنتظره‌ای داشتند که احتمالاً ناشی از ورود آلاینده‌های سطحی در اثر رواناب بارشی باشد. کاهش بارش در برخی سال‌ها مانند ۱۳۹۵ با ۱۳۴ میلی‌متر بارش سالانه، منجر به افت شاخص‌ها شده است. در این سال، WQI به پایین‌ترین مقادیر خود نزدیک شده که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم خشکسالی بر تمرکز آلاینده‌ها و افت کیفیت آب است (شکل‌های ۲ و ۳). در مجموع، بین دبی جریان و شاخص‌های کیفیت آب رابطه‌ای معکوس مشاهده می‌شود؛ به طوری که با افزایش دبی، مقادیر شاخص‌ها کاهش یافته و کیفیت آب بهبود یافته است. بارش نیز نقش دوگانه‌ای ایفا می‌کند. در شرایط دبی بالا، بارش می‌تواند موجب رقیق شدن آلاینده‌ها و ارتقای کیفیت

آب شود؛ اما در شرایط دبی پایین، بارش شدید ممکن است منجر به ورود رواناب سطحی و افزایش غلظت آلاینده‌ها شود که در نهایت افت کیفیت آب را به دنبال دارد.

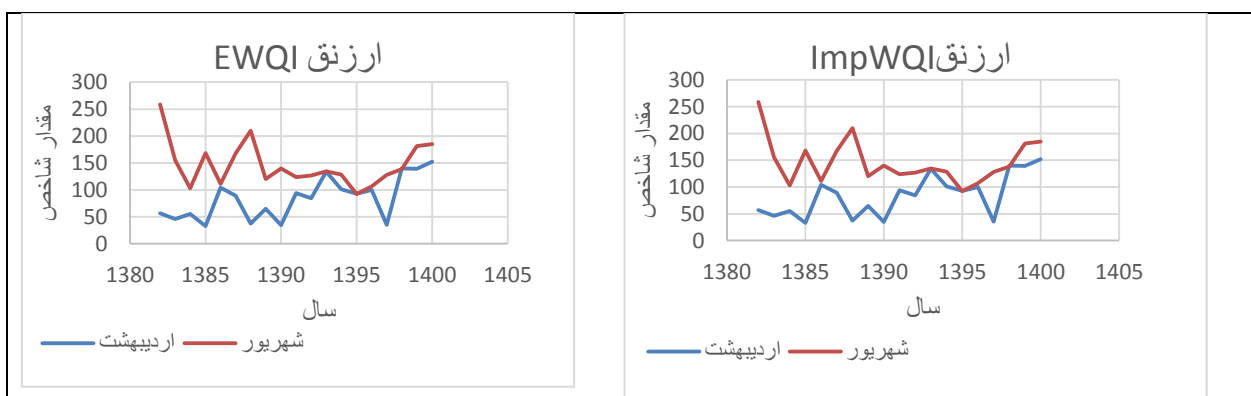
در این مطالعه، نقشه‌های کاربری اراضی نیز از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با وضوح مکانی ۱۰ متر برای سال پایانی دوره آماری، یعنی سال ۱۴۰۰ تهیه شد. این انتخاب به منظور تأکید بیشتر بر جدیدترین شرایط و امکان تجزیه و تحلیل دقیق‌تر از وضعیت منطقه (در سال آخر) انجام شد؛ بنابراین، چون شاخص ImpWQI نسبت به دو شاخص دیگر حساس‌تر است و آلودگی را با شدت بیشتر نشان می‌دهد؛ بنابراین، کاربری اراضی حوضه آجی چای با کیفیت آب با این شاخص تحلیل شد. ایستگاه‌های ارزنق و آخولا که طبق شاخص ImpWQI کیفیت آب را ضعیف نشان می‌دهند، تحت تأثیر کاربری‌های کشاورزی و شهری قرار داشتند. ایستگاه مرکید، با مقادیر بالاتر شاخص ImpWQI کیفیت آب به شدت ضعیف را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد کیفیت بسیار پایین آب در مرکید، ناشی از تجمع آلاینده‌ها در وسط حوضه، فعالیت‌های کشاورزی متمرکز، زهکش‌ها و رواناب‌های متمرکز و جریان کمتر باشد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حتی با وسعت کشاورزی کمتر در این ایستگاه، نسبت به سایر ایستگاه‌ها، شدت آلودگی در مرکید بیشتر است. نتایج نشان دادند که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و توسعه اراضی، عامل اصلی کاهش کیفیت آب هستند. این یافته‌ها می‌توانند در مدیریت پایدار منابع آب و کاهش غلظت آلاینده‌ها در آب‌های جاری منطقه مؤثر باشند. علاوه بر این، وجود مناطق شهری و حومه شهری، از جمله بخش‌هایی از شهر تبریز و شهرک‌های اطراف، تخلیه فاضلاب خانگی و صنعتی را به سیستم اضافه می‌کند و کیفیت آب را بیشتر کاهش می‌دهد. در حوضه آجی چای هم عوامل طبیعی و هم عوامل انسانی مسئول کیفیت پایین آب هستند (شکل ۴).

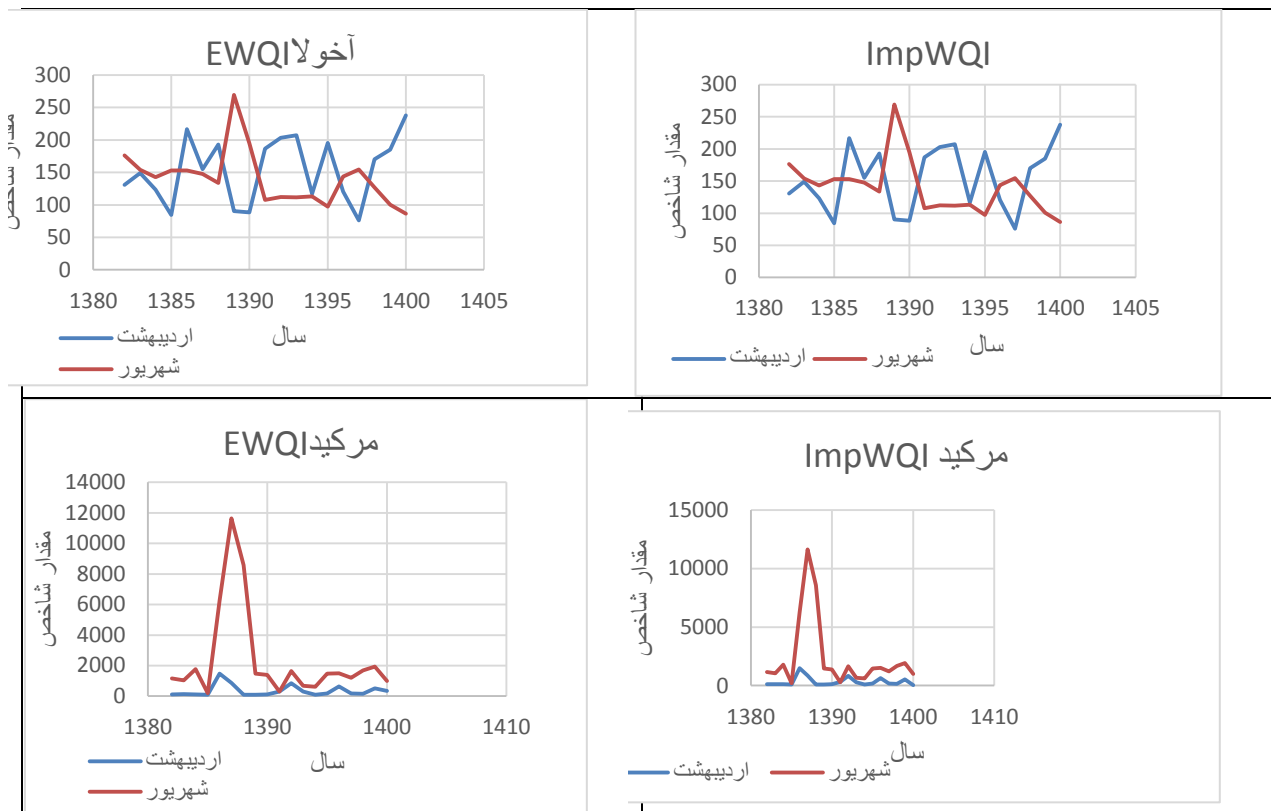


شکل ۴. نقشه کاربری اراضی حوضه رودخانه آجی چای

Fig 4. Land use map of the Aji Chai River Basin

شکل ۵ نمودار سری‌های زمانی سه شاخص مورد مطالعه (EWQI، WQI و ImpWQI) را در سه ایستگاه آب‌سنجی ارزنق، آخولا و مرکید واقع بر رودخانه آجی‌چای نشان می‌دهد. نتایج محاسبه سه شاخص EWQI، WQI و ImpWQI در دو ماه خشک (شهریور) و ماه مرطوب (اردیبهشت) در سه ایستگاه ارزنق، آخولا و مرکید نشان داد که نمودار مقادیر شاخص‌ها در ماه شهریور در هر سه شاخص، برای هر سه ایستگاه، بالاتر از نمودار مربوط به ماه اردیبهشت قرار دارد. این نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه در فصل کم آب در مقایسه با فصل مرطوب بدتر است. این امر منطقی است؛ زیرا در دوره خشک به دلیل کاهش دبی و افزایش تبخیر، غلظت آلاینده‌ها بیشتر می‌شود؛ البته چند مورد استثنا نیز در ایستگاه‌های آخولا و ارزنق وجود داشت. در ارزنق، دو نمودار در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۵ برهم منطبق شده‌اند که حاکی از مشابهت کیفیت آب در تابستان و بهار است. در آخولا، در برخی از سال‌ها مانند بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۰، ابتدا و انتهای دوره آماری نمودار شاخص در فصل مرطوب بالاتر از فصل خشک بود. این نشان می‌دهد که با وجود بارش‌های بهاره، کیفیت آب در بهار بدتر از کیفیت آب در شهریور بود. شاید دلیل آن ورود آلاینده‌ها و افزایش بار رسوبی ناشی از رواناب‌های سطحی در اثر بارش‌های بهاره باشد. موضوعی که در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است؛ به طوری که بارش‌های فصلی موجب افزایش ورود آلاینده‌ها و ذرات معلق به منابع آبی و در نتیجه کاهش کیفیت آب شده‌اند (Ariman & Kızılkaya, 2024; Benkov et al., 2023)؛ اما هنوز دلیل واقعی آن بر نگارندگان روشن نیست؛ بنابراین، با فرض ثبت دقیق داده‌ها توسط سازمان آب منطقه‌ای، احتمالاً ورود پساب‌های صنعتی (کارخانجات چرم‌سازی، غذایی ...) و فاضلاب شهر تبریز به رودخانه عامل بدتر شدن کیفیت آب در بهار سال‌های مذکور شده است؛ بنابراین، می‌توان استنباط کرد چنین نوساناتی نشان می‌دهد که کیفیت آب تنها تابع شرایط طبیعی (فصل و دبی جریان) نیست، بلکه به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نیز قرار دارد. در بقیه سال‌های دوره آماری، میزان این سه شاخص در ماه شهریور پایین‌تر از ماه اردیبهشت بوده که با توجه به ریزش‌های جوی زیاد در بهار امری طبیعی و بدیهی است.





شکل ۵. نمودار سری‌های زمانی شاخص‌های EWQI (ستون سمت چپ) و EWQI (ستون سمت راست) در فصول خشک (شهریور) و مرطوب (اردیبهشت) رودخانه آجی‌چای در سه ایستگاه ارزنق، آخولا و مرکید

Fig 5 Time series diagrams of EWQI (left column), EWQI (right column) in the dry (August), and wet (May) seasons in Ajichai River at three stations namely Arzanag, Akhola, and Markid

نتایج تجزیه به عامل‌ها

نتایج آزمون ضرایب همبستگی بین متغیرهای مورد استفاده برای تعیین کیفیت آب رودخانه آجی‌چای نشان داد که در هر سه ایستگاه، بین اغلب پارامترهای کیفی (به جز pH) همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد. جدول ۳ ماتریس همبستگی بین پارامترهای کیفی مورد مطالعه را در ایستگاه ارزنق (به عنوان نمونه) نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت رابطه بسیار قوی میان TDS و EC (ضریب همبستگی ۰/۹۹۶، در سطح یک درصد معنی‌دار) مشاهده شد که علاوه بر بدیهی بودن، نشان‌دهنده صحت داده‌ها و سازگاری نتایج اندازه‌گیری است؛ زیرا هر دو پارامتر بیانگر میزان نمک‌های محلول‌اند. در عین حال، همبستگی‌های بالای مشاهده‌شده میان سایر پارامترها نیز مهم است؛ به‌طور مثال، ارتباط قوی بین سختی کل (TH) با Mg^{2+} (با ضریب همبستگی معادل ۰/۹۶۹) و نیز با Ca^{2+} (در سطح یک درصد معنی‌دار) نشان‌دهنده نقش این یون‌ها در کنترل سختی آب و تغییرات کیفی آن است. به‌طور کلی، بالا بودن ضرایب همبستگی بین بیشتر پارامترها بیانگر ارتباط درونی قوی میان متغیرها بوده و مؤید آن است که روش تجزیه به عامل‌ها (FA) می‌تواند ابزاری کارآمد برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر کیفیت آب باشد.

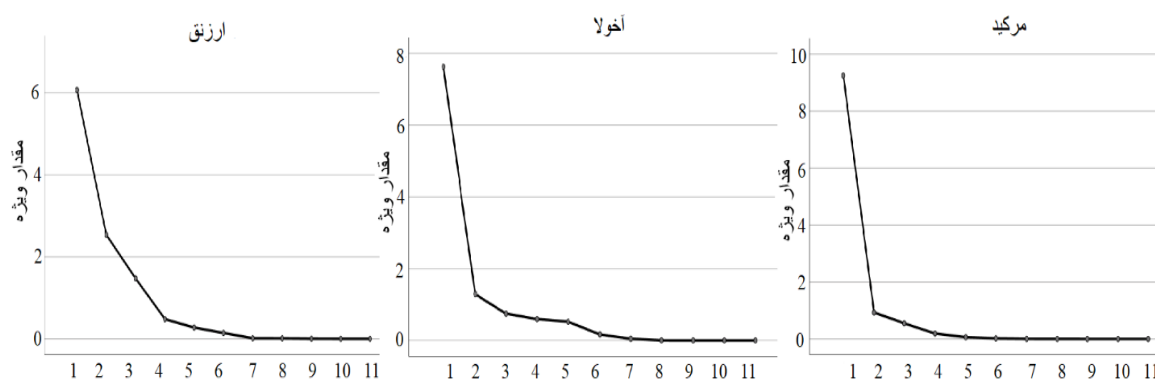
جدول ۳. ماتریس همبستگی بین متغیرهای مورد استفاده برای تعیین کیفیت آب در ایستگاه نمونه ارزنق واقع بر رودخانه آجی‌چای.

Table 3 Correlation matrix between the used variables in determining water quality at a representative station namely Arzanag at Ajichai River

	TDS	EC	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	TH
TDS	1										
EC	.996**	1									
PH	-0.115	-0.107	1								
HCO ₃ ⁻	0.149	0.140	-0.141	1							
Cl ⁻	.868**	.871**	0.143	-0.097	1						
SO ₄ ²⁻	.569*	.575**	-.461*	0.206	0.129	1					
Ca ²⁺	.555*	.542**	-0.176	.885**	0.316	0.379	1				
Mg ²⁺	.694**	.685**	-0.095	.607**	.508*	0.387	.853**	1			
Na ⁺	.870**	.883**	-0.073	-0.243	.820**	.548*	0.144	0.278	1		
K ⁺	.797**	.800**	-0.385	0.078	.588**	.682**	0.366	0.413	.790**	1	
TH	.654**	.643**	-0.137	.763**	0.436	0.398	.956**	.969**	0.225	0.407	1

توجه: نمادهای **، *، و * معنی داری را در سطوح ۱، ۵ و ۱۰ نشان می‌دهند

نتایج روش FA نشان داد قبل از چرخش محورها در ایستگاه ارزنق دو عامل اول به ترتیب واریانس برابر با ۵۵/۱۵ و ۷۸/۲۱ درصد را دارا بودند. پس از چرخش هرچند مقدار واریانس داده‌ها اندکی تغییر یافت؛ اما مجموع واریانس دو عامل منتخب ثابت ماند. شکل ۶ نمودار تغییرات مقادیر ویژه در مقابل تعداد عامل‌ها (نمودار صخره‌ای) را پس از چرخش وریماکس نشان می‌دهد. طبق این نمودار، در ایستگاه ارزنق دو عامل اول به ترتیب حدود ۴۳/۴۱ و ۳۴/۸ درصد واریانس کل را دارا بودند؛ بنابراین، دو عامل نخست در مجموع واریانس برابر با ۷۸/۲۱ درصد واریانس کل را توجیه کرد.



شکل ۶. نمودار صخره‌ای برای ایستگاه‌های ارزنق، آخولا و مرکید

Fig 6 Scree plot of Stations Arzanag, Akhola, and Markid

جدول ۴ مقادیر ویژه و واریانس توجیه‌شده با عامل‌های اصلی قبل و بعد از چرخش وریماکس را در ایستگاه ارزنق در رودخانه آجی‌چای نشان می‌دهد. در این جدول، تعداد کل عامل‌ها برابر با تعداد کل متغیرهای مورد استفاده (اینجا ۱۱) است. ستون اول تا چهارم از چپ، به ترتیب، شماره عامل، مقدار ویژه، واریانس و واریانس تراکمی را نشان می‌دهد؛ به طوری که از این جدول برمی‌آید هرچه شماره عامل افزایش می‌یابد، مقدار ویژه آن و به تبع آن

واریانس نظیرش کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار ویژه متعلق به عامل اول برابر با 67.067 و کمترین آن متعلق به عامل یازدهم عددی نزدیک به صفر به دست آمد. در ایستگاه ارزنق، عامل اول به‌تنهایی بیش از ۵۵ درصد واریانس و عامل دوم بیش از ۲۳ درصد واریانس کل داده‌ها را توجیه می‌کند. چون دو عامل نخست، در این ایستگاه، بیش از ۷۸ درصد واریانس داده‌ها را توجیه می‌کند؛ بنابراین، در مطالعه حاضر، دو عامل نخست برای ادامه تحلیل انتخاب شدند. پس از انتخاب تعداد عامل‌های اصلی، محورهای آنها به‌طور متعامد و با روش وریماکس چرخش داده شدند. ستون‌های چهار تا شش **جدول ۴** به‌ترتیب، متعلق به مقادیر ویژه، درصد واریانس هر عامل و درصد واریانس تراکمی عامل‌های منتخب قبل از چرخش است و ستون‌های هشت تا ده مقادیر مذکور را بعد از چرخش نشان می‌دهند. همانگونه که از ستون‌های نه و ده (دو ستون آخر) می‌توان دید، بعد از چرخش محورها، مقدار واریانس عامل‌های منتخب، نسبت به مقادیر نظیر قبل از چرخش، کمی تغییر کرده است؛ ولی مجموع واریانس عامل‌های منتخب (دو عامل اول معادل 78.215 درصد) ثابت باقی مانده است.

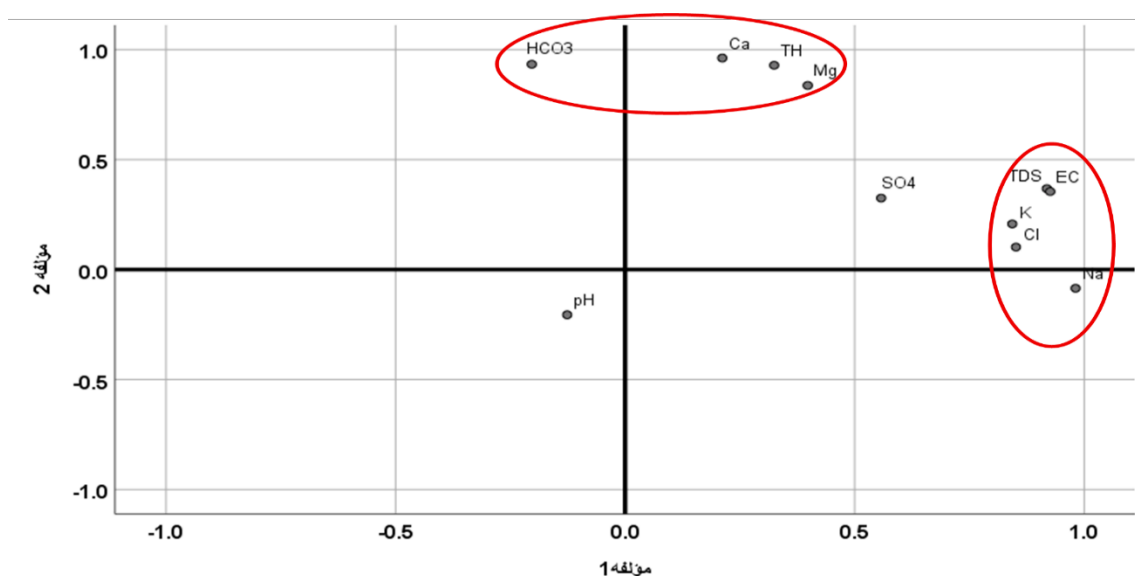
جدول ۴. مقادیر ویژه و واریانس توجیه شده با عامل‌ها قبل و بعد از چرخش وریماکس در ایستگاه ارزنق واقع بر رودخانه آجی‌چای

Table 4 Eigenvalues, variances accounted by factors before, and after the Varimax rotation in the station Arzanag located on Ajichai River

عامل	مقادیر ویژه و واریانس‌ها برای همه عامل‌ها			مقادیر ویژه و واریانس‌ها قبل از چرخش برای عامل‌های منتخب			مقادیر ویژه و واریانس‌ها بعد از چرخش برای عامل‌های منتخب		
	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی
1	6.067	55.151	55.151	6.067	55.151	55.151	4.776	43.414	43.414
2	2.537	23.064	78.215	2.537	23.064	78.215	3.828	34.801	78.215
3	1.474	13.400	91.615						
4	.479	4.355	95.969						
5	.274	2.494	98.463						
6	.143	1.299	99.762						
7	.013	.119	99.881						
8	.011	.101	99.982						
9	.002	.018	100.000						
10	9.052E-6	8.229E-5	100.000						
11	3.038E-16	2.762E-15	100.000						

شکل ۷ موقعیت متغیرهای هیدروشیمیایی را در نمونه آب ایستگاه ارزنق در صفحه عامل‌های اول و دوم، پس از چرخش نشان می‌دهد؛ به طوری که از این شکل می‌توان دید عامل اول دارای ضریب بزرگ‌تر از 0.9 برای چهار پارامتر به شرح Na^+ ، Cl^- ، EC و TDS است و عامل دوم، در همان ایستگاه، دارای ضریب نزدیک به یک برای پارامترهای سدیم، کلر، پتاسیم، EC و TDS است؛ بنابراین، عامل اول به‌نام «نمک‌های کلرور سدیم و پتاس» نام‌گذاری شد. عامل دوم، دارای ضرایب نزدیک به یک، برای متغیرهای Ca^{2+} ، TH و HCO_3^- و منیزیم است؛ بنابراین، عامل دوم، به‌نام «سختی با کربنات کلسیم و منیزیم» نام‌گذاری شد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب در ایستگاه

ارزنتق بیشتر تحت تأثیر نمک، کلر، سدیم و پتاسیم از یک سو و سختی با کربنات کلسیم و منیزیوم از دیگر سو است؛ بنابراین، با توجه به نتایج FA در ایستگاه ارزنتق، دو عامل اصلی که بیش از ۷۸٪ واریانس کل داده‌ها را در بر دارند، اثرگذاری قابل ملاحظه‌ای روی یون‌های Na^+ ، Cl^- ، EC و TDS داشتند. بالابودن مقدار غلظت این یون‌ها همگی در بالابودن شاخص شوری موثرند؛ بنابراین، عامل فوق، بیانگر «شوری و املاح محلول» است. عامل دوم با دارابودن ضریب بالا روی Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، TH و HCO_3^- مرتبط است و می‌توان آن را «سختی کربناته» نامید. این نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب در ارزنتق عمدتاً تحت کنترل املاح و سختی آب قرار دارد.



شکل ۷. موقعیت متغیرهای هیدروشیمیایی روی صفحه مربوط به عامل‌های اول و دوم پس از چرخش وریماکس در ایستگاه ارزنتق

Fig 7 Position of hydrochemical variables on two first factors plan after Varimax rotation in Arzanag station

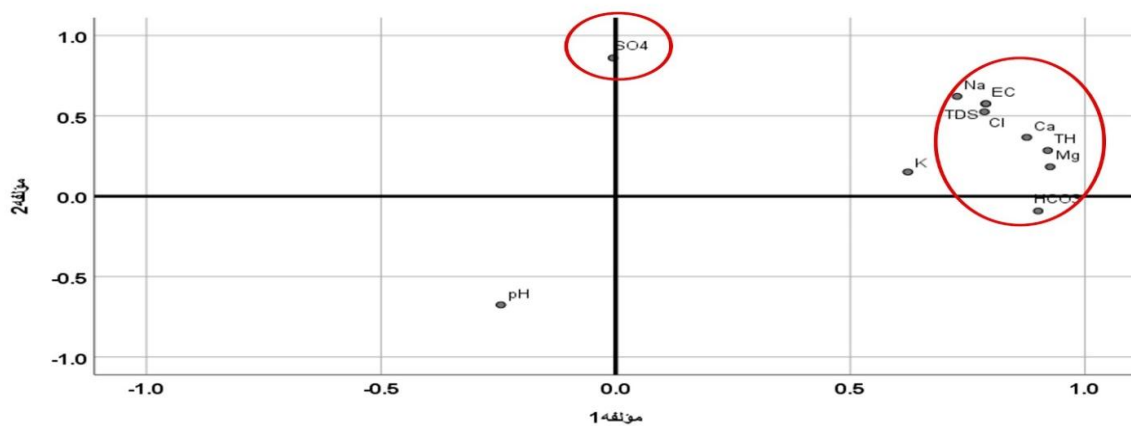
جدول ۵ مقادیر ویژه و واریانس توجیه‌شده با عامل‌های اصلی را قبل و بعد از چرخش وریماکس در ایستگاه آخولا واقع بر رودخانه آجی‌چای نشان می‌دهد؛ به طوری که از جدول مذکور برمی‌آید در آخولا، مقادیر ویژه نظیر دو عامل نخست به ترتیب معادل با ۷/۶۳ و ۱/۲۹۵ و مقدار ویژه سایر عامل‌ها همه از واحد کمتر است. عامل اول به تنهایی ۶۹/۳۶ درصد واریانس و عامل دوم ۱۱/۷۷ درصد واریانس داده‌ها را توجیه می‌کند. عامل‌های سوم و بالاتر در کل سهم ناچیزی از واریانس داده‌ها را در بر دارد. در ایستگاه آخولا، دو عامل نخست که در مجموع بیش از ۸۱/۱ درصد واریانس را توجیه می‌کرد، برای ادامه تحلیل، انتخاب شدند؛ بنابراین، در آخولا نیز دو عامل نخست برای تحلیل برگزیده شد.

جدول ۵. مقادیر ویژه، واریانس توجیه شده با عامل‌ها قبل و بعد از چرخش وریماکس در ایستگاه آخولا واقع بر رودخانه آجی چای

Table 5 Eigenvalues, variances accounted by factors before and after the Varimax rotation in station Akhola located on Ajichai River

عامل	مقادیر ویژه و واریانس‌ها برای همه عامل‌ها			مقادیر ویژه و واریانس‌ها قبل از چرخش برای عامل‌های منتخب			مقادیر ویژه و واریانس‌ها بعد از چرخش برای عامل‌های منتخب		
	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی
1	7.630	69.360	69.360	7.630	69.360	69.360	6.123	55.666	55.666
2	1.295	11.770	81.129	1.295	11.770	81.129	2.801	25.464	81.129
3	.746	6.782	87.912						
4	.593	5.394	93.306						
5	.522	4.742	98.048						
6	.166	1.513	99.561						
7	.046	.422	99.983						
8	.002	.017	100.000						
9	3.934E-5	.000	100.000						
10	1.654E-6	1.503E-5	100.000						
11	2.243E-16	2.039E-15	100.000						

شکل ۸ موقعیت متغیرهای هیدروشیمیایی را در نمونه آب ایستگاه آخولا در صفحه عامل‌های اول و دوم، پس از چرخش نشان می‌دهد؛ به طوری که از این شکل می‌توان دید تعداد هشت پارامتر کیفی دارای ضریب بزرگ‌تر از ۰/۷ برای عامل اول هستند. این متغیرها شامل Na^+ ، Cl^- ، EC ، TDS ، Ca^{2+} ، TH و HCO_3^- و منیزیم هستند. از سویی، تنها یک متغیر کیفی به نام سولفات دارای ضریب عامل بزرگ برای عامل دوم بود؛ بنابراین، عامل اول به نام «آنیون‌ها و کاتیون‌ها بجز سولفات» و عامل دوم، به نام «سولفات» نام‌گذاری شد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب در ایستگاه آخولا بیشتر تحت تأثیر اغلب متغیرها بجز سولفات و اسیدپته از یک سو و سولفات از دیگر سو است. این موضوع نشان می‌دهد که کیفیت آب در آخولا ترکیبی از تأثیر املاح عمومی و ورود منابع سولفات (احتمالاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی یا زمین‌شناسی محلی) است.



شکل ۸. موقعیت متغیرهای هیدروشیمیایی روی صفحه مربوط به عامل‌های اول و دوم پس از چرخش وریماکس در ایستگاه آخولا

Fig 8 Position of hydrochemical variables on two first factors plan after Varimax rotation in Akhola station

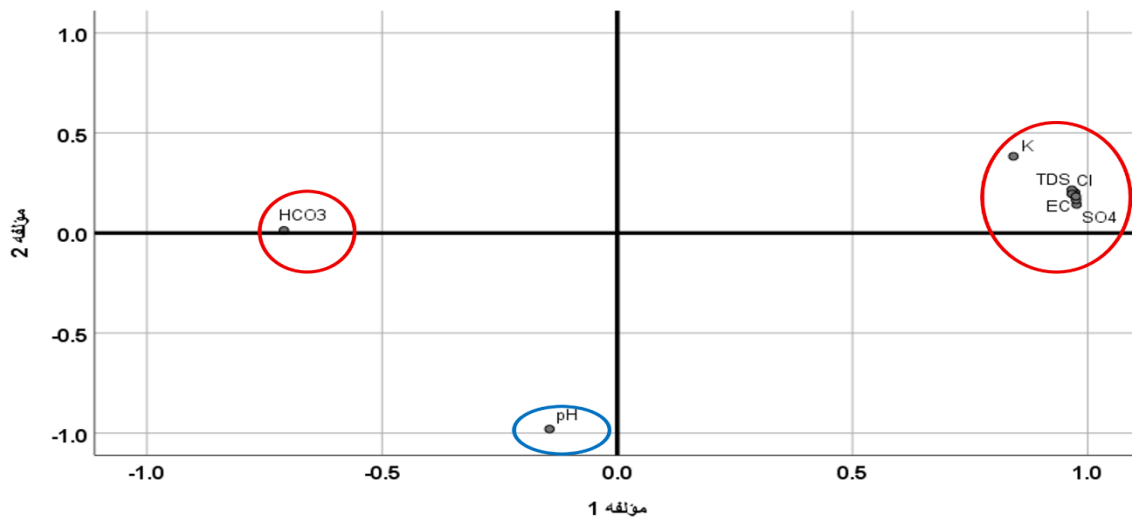
جدول ۶ مقادیر ویژه و واریانس توجیه‌شده با عامل‌های اصلی را قبل و بعد از چرخش وریماکس در ایستگاه مرکید واقع بر رودخانه آجی‌چای نشان می‌دهد؛ به طوری که از این جدول استنباط می‌شود در مرکید، مقدار ویژه نظیر عامل نخست حدود ۹/۲۴۸ است. مقادیر ویژه سایر عامل‌ها ناچیز و قابل اغماض هستند. در ایستگاه مرکید، عامل نخست به تنهایی بیش از ۸۴ درصد واریانس را توجیه می‌کند. در مرکید عامل دوم، حدود ۸/۴۳ درصد واریانس را در بر دارد. همانگونه که از **جدول ۶** می‌توان استنباط کرد عامل‌های سوم و بالاتر در کل، سهم ناچیزی (کمتر از ۰/۳٪) از واریانس داده‌های مرکید را در بر دارد. در این ایستگاه، دو عامل اصلی نخست در مجموع بیش از ۹۵/۵ درصد کل واریانس را توجیه می‌کند؛ بنابراین، در مرکید نیز مشابه دو ایستگاه قبل دو عامل برای ادامه تحلیل انتخاب شدند.

جدول ۶. مقادیر ویژه و واریانس توجیه‌شده با عامل‌ها قبل و بعد از چرخش وریماکس در ایستگاه مرکید واقع بر رودخانه آجی‌چای

Table 6 Eigenvalues, variances accounted by factors before and after the Varimax rotation in station Markid located on Ajichai River

عامل	مقادیر ویژه و واریانس‌ها برای همه عامل‌ها			مقادیر ویژه و واریانس‌ها قبل از چرخش برای عامل‌های منتخب			مقادیر ویژه و واریانس‌ها بعد از چرخش برای عامل‌های منتخب		
	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی
1	9.248	84.075	84.075	9.248	84.075	84.075	9.248	79.835	79.835
2	.927	8.428	92.503	.927	8.428	92.503	.927	12.668	92.503
3	.547	4.977	97.480						
4	.191	1.738	99.218						
5	.062	.561	99.780						
6	.020	.181	99.960						
7	.003	.029	99.989						
8	.001	.010	100.000						
9	2.066E-5	.000	100.000						
10	7.036E-6	6.397E-5	100.000						
11	-2.003E-16	-1.821E-15	100.000						

شکل ۹ موقعیت متغیرهای هیدروشیمیایی را در نمونه آب ایستگاه مرکید در صفحه عامل‌های اول و دوم، پس از چرخش نشان می‌دهد؛ به طوری که از این شکل می‌توان دید عامل اول، همه متغیرهای کیفی کاندیدا (بجز اسیدیت) را توصیف می‌کند، طوری که عامل اول دارای ضریب نزدیک به یک برای نه متغیر کیفی شامل Ca^{2+} ، TDS، EC، Cl^- ، TH، سولفات، پتاسیم، سدیم و منیزیم می‌باشند. از طرفی، عامل اول دارای ضریب عامل نزدیک به منهای یک برای سولفات بود. همچنین عامل دوم، دارای ضریب عامل نزدیک به منهای یک برای اسیدیت آب داشت؛ بنابراین، عامل اول به نام «همه آنیون‌ها و کاتیون‌ها» و عامل دوم، به نام «اسیدیت» نام‌گذاری شد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب در ایستگاه مرکید بیشتر تحت تأثیر همه متغیرها بجز اسیدیت از یک سو و اسیدیت از دیگر سو است. این نتایج نشان می‌دهد که در مرکید همه متغیرهای کیفی هم‌زمان افزایش می‌یابند که می‌تواند ناشی از ورود حجم عظیم پساب‌های شهری و صنعتی در این قسمت از رودخانه باشد.



شکل ۹. موقعیت متغیرهای هیدروشیمیایی روی صفحه مربوط به عامل‌های اول و دوم پس از چرخش وریماکس در ایستگاه مرکید

Fig 9 Position of hydrochemical variables on two first factors plan after Varimax rotation in Markid station

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی وضعیت منابع آب سطحی و مقایسه سه شاخص کیفیت آب شامل WQI، EWQI و ImpWQI در راستای رودخانه آجی چای واقع در استان آذربایجان شرقی، با بهره‌گیری از ۱۱ پارامتر کیفی در سه ایستگاه ارزنق، آخولا و مرکید طی دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۲ ارزیابی شد. مقادیر شاخص کیفیت آب محاسبه شده با سه شاخص (WQI، EWQI و ImpWQI) نشان داد که کیفیت آب رودخانه در هر سه ایستگاه ضعیف و برای آشامیدن نامناسب است. در برخی سال‌ها، کیفیت آب رودخانه در ماه مرطوب (اردیبهشت) بدتر از ماه خشک (شهریور) بود. علت آن می‌تواند ناشی از آن ورود پساب کارخانه‌ها و فاضلاب شهر تبریز به رودخانه بوده باشد. این پدیده، نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان عوامل طبیعی (دبی و بارش) و انسانی (تخلیه پساب‌ها و رواناب کشاورزی) بر کیفیت آب است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات سالانه شاخص‌های کیفیت آب (WQI، EWQI و ImpWQI) ارتباط معکوسی با دبی جریان دارند؛ به گونه‌ای که در سال‌های با دبی بالاتر، مقادیر شاخص‌ها کاهش یافته و کیفیت آب بهبود یافته است. رابطه معکوس بین دبی جریان و شاخص‌های کیفیت آب را می‌توان با فرآیند رقیق‌سازی آلاینده‌ها در زمان افزایش جریان توضیح داد. در دوره‌های پرآب، افزایش حجم جریان باعث کاهش غلظت یون‌ها و مواد محلول می‌شود و کیفیت آب بهبود می‌یابد؛ در حالی که در دوره‌های کم‌آبی، تمرکز آلاینده‌ها و تبخیر بیشتر موجب افزایش شاخص‌های آلودگی می‌شود. این نتایج، با مطالعات مشابه در ایران و سایر کشورها (Diwyanjalee et al., 2024; Arıman & Kızılkaya, 2024; Benkov et al., 2023; Pourfallah et al., 2021)؛

همخوانی دارد. تحلیل تصاویر Sentinel-2 نشان داد که کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در کاهش کیفیت آب دارند. ایستگاه‌های ارزنق و آخولا تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی و شهری هستند، در مقابل، ایستگاه مرکید با وجود وسعت کمتر کشاورزی، به دلیل تمرکز آلاینده‌ها و رواناب‌ها و دبی جریان پایین، بیشترین

میزان آلودگی را دارد. جیانگ و همکاران و خو و همکاران نیز نشان دادند که منابع آلاینده غیرنقطه‌ای ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و شهری، سهم عمده‌ای در تغییرات کیفیت آب رودخانه‌ها دارند (Jiang et Xu et al., 2022)؛ بنابراین، تخلیه فاضلاب‌های شهری، روستایی، پساب کارخانجات صنعتی و زهکش‌ها شدت آلودگی آب را در رودخانه آجی‌چای تشدید می‌کند. تجزیه به عامل‌های اصلی نشان داد که هر سه ایستگاه را می‌توان تنها با دو عامل اصلی ناهمبسته توجیه کرد. در این زمینه دو عامل نخست در ایستگاه‌های ارزنق، آخولا و مرکید به ترتیب، ۷۸/۲، ۸۱/۱ و ۹۲/۵ درصد واریانس را توجیه کردند؛ با این وصف، دو عامل در هر ایستگاه انتخاب شد و محورهای آنها به‌طور متعامد با روش وریماکس چرخش داده شدند. پس از چرخش، مجموع واریانس توجیه‌شده با عامل‌ها ثابت ماند؛ ولی واریانس عامل‌ها به‌طور منفرد با اندازه کمی تغییر یافت. چرخش محورها، تفسیرپذیری نتایج را آسان کرد. در ایستگاه ارزنق، کیفیت آب بیشتر تحت تأثیر نمک، کلر، سدیم و پتاسیم از یک سو و سختی با کربنات کلسیم و منیزیم از سوی دیگر است. این امر نشان می‌دهد که فرایندهای انحلال نمک و سختی موقت ناشی از سازندهای زمین‌شناسی محلی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در کیفیت آب هستند؛ در حالی که کیفیت آب در ایستگاه آخولا بیشتر تحت تأثیر اغلب متغیرها به‌جز سولفات و اسیدیت از یک سو و سولفات از دیگر سو است. کیفیت آب در ایستگاه مرکید نیز بیشتر تحت تأثیر همه متغیرها به‌جز اسیدیت از یک سو و اسیدیت از دیگر سو است که بیانگر تأثیر تخلیه پساب‌های صنعتی و خانگی در مسیر جریان رودخانه است. براساس شواهد موجود، علت اصلی پایین‌بودن کیفیت آب رودخانه آجی‌چای را می‌توان ترکیبی از عوامل طبیعی (عبور از مسیرهای نمکی در محدوده دوزدوزان) و عوامل انسان‌زاد (ورود پساب‌ها و فاضلاب‌های شهری و صنعتی شهر تبریز) دانست. ثانی‌خانی و همکاران و قزل‌سفلو و همکاران نیز نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی و کاهش دبی جریان در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها شده است (ثانی‌خانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ قزل‌سفلو و همکاران، ۱۳۹۱). یافته‌های ایشان با نتایج پژوهش فعلی مطابقت دارد. کرمی کیفیت آب را در بالادست حوضه آجی‌چای با بهره‌گیری از دیاگرام‌های کیفی در خرداد ۱۳۸۷ بر این نتیجه صحت گذاشته و تأکید کرده است که حدود ۴۰ درصد آب زیرزمینی از نظر کیفی شور و خیلی شور بوده و تنها آب‌های سطحی جاری در دامنه کوه‌ها در بالادست حوضه شیرین است (کرمی، ۱۳۹۰). نتیجه وی با یافته‌های مطالعه فعلی همخوانی دارد. پاشازاده‌لاله و همکاران آب رودخانه آجی‌چای را از نظر آلودگی با شاخص‌های کیفی IRWQI و NSFQI مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که مقادیر شاخص‌های کیفی در مسیر جریان رودخانه ضمن عبور از مناطق شهری، کشاورزی و صنعتی افزایش داشته است که حاکی از آلودگی آب رودخانه از مرکز دشت تبریز به سمت پایین آن است (پاشازاده‌لاله و همکاران، ۱۳۹۱). نتیجه ایشان با یافته‌های مطالعه فعلی کاملاً همخوانی دارد. جعفری و دین‌پژوه با روش تاپسیس و استفاده از دیاگرام شولر نشان دادند که آب ایستگاه ارزنق از نظر کیفیت آب برای استفاده در کشاورزی در حد متوسط بوده است؛ ولی آب ایستگاه آخولا در محدوده کیفیت نامناسب قرار دارد (جعفری و دین‌پژوه، ۱۴۰۲). ایشان کیفیت آب ایستگاه مرکید را غیرقابل شرب تشخیص دادند. این نتیجه با یافته‌های مطالعه حاضر همراستا است. کوراندی کیفیت آب رودخانه آجی‌چای را با روش WQI بررسی کرد و نشان داد که بدترین کیفیت آب در مسیر رود، متعلق به محل پل تبریز - مرند بوده است؛ در حالی که بهترین

کیفیت آب در ایستگاه بیوک‌چای در نزدیکی شهر سراب است (Kourandeh, 2012). ایشان علت آلودگی آب رود را به تخلیه فاضلاب شهری و صنعتی دانسته است. دین‌پژوه مقادیر پارامترهای کیفی آب در رودخانه آجی‌چای را با روش مان - کندال تحلیل کرد و نتیجه گرفت که در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی غلظت یون‌های مثبت و EC روند صعودی داشته است (دین‌پژوه، ۱۳۹۵). از دیدگاه مدیریتی، این نتایج تأکید می‌کند که مدیریت هم‌زمان منابع آب و آلودگی‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در حوضه آجی‌چای ضروری است. این اقدامات شامل کنترل آلاینده‌های اصلی (کلروها، سدیم، پتاسیم، کلسیم و سولفات‌ها)، پایش مستمر شاخص‌های کیفیت آب و استفاده از روش‌های مناسب تصفیه در مقیاس منطقه‌ای است. همچنین پیشنهاد می‌شود مسئولان محلی با برنامه‌ریزی جامع و مدیریت یکپارچه منابع آب، نسبت به بهبود کیفیت با جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به رود اقدام کنند. به‌منظور بهبود کیفیت آب رودخانه آجی‌چای، لازم است مدیریت جامع منابع آب، شامل کنترل دبی و رواناب سطحی و کاهش ورود آلاینده‌های انسانی و کشاورزی صورت گیرد. تصفیه و مدیریت فاضلاب شهری و صنعتی، استفاده از فنون کشاورزی پایدار، ساحل‌سازی و ایجاد کمربندهای سبز حفاظتی در حاشیه رودخانه می‌تواند اثرات آلودگی را کاهش دهد. همچنین، پایش مستمر کیفیت آب با شاخص‌های حساس مانند ImpWQI و بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، اندازه‌گیری مستمر کمیت و کیفیت آب رودخانه در طول آن و کاربرد GIS برای شناسایی مناطق بحرانی توصیه می‌شود.

سیاسگزاری

از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، به سبب در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز مطالعه حاضر قدردانی می‌شود.

منابع

آخونی پورحسینی، فاطمه، و ابراهیمی، کیومرث (۱۳۹۸). ارزیابی آنتروپی شانون در تعیین کیفیت آب های سطحی، مطالعات موردی: رودخانه‌های کارون و بابلرود. مدیریت آب و آبیاری، ۹(۲)، ۱۷۱-۱۸۳.

<https://doi.org/10.22059/jwim.2019.273226.653>

اللهویردی‌پور، پویا، و دین‌پژوه، یعقوب (۱۴۰۴). مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب حوزه آبخیز آجی‌چای با استفاده از روش‌های هوشمند. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۷(۱)، ۱۴-۲۸.

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.365227.2052>

پاشازاده لاله، زینب، جعفری، هادی، و واعظی‌هیر، عبدالرضا (۱۳۹۹). ارزیابی آلودگی رودخانه آجی‌چای در منطقه دشت تبریز با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب. آب و خاک، ۳۴(۶)، ۱۲۰۳-۱۲۱۸.

<https://doi.org/10.22067/jsw.v34i6.80732>

ثانی‌خانی، هادی، دین‌پژوه، یعقوب، پوریوسف، سعید، زمان زاد قویدل، سروین، و صولتی، بهاره (۱۳۹۲). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه های آبریز (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی‌چای در استان آذربایجان

شرقی). آب و خاک، ۲۷(۶)، ۱۲۲۵-۱۲۳۴. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.21513>

جعفری، ندا، حافظ‌پرست، مریم، و فرهادی، بهمن (۱۴۰۰). ارزیابی کیفی منابع آب برای مصارف شرب و کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز گاماسیاب، استان کرمانشاه). *مجله مطالعات علوم محیط زیست*، ۶(۲)، ۳۵۳۲-۳۵۲۵.
https://www.jess.ir/article_129049.html?lang=fa

جعفری، ندا، و دین‌پژوه، یعقوب (۱۴۰۲). کاربرد روش TOPSIS در بررسی کیفیت آب رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه آجی چای). *آب و خاک*، ۳۷(۶)، ۸۵۵-۸۶۹.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84882.1344>

حسینی، هاشم، شاکری، عطا، رضایی، محسن، دشتی برمکی، مجید، و شهرکی، مهدی (۱۳۹۷). کاربرد شاخص کیفیت آب (WQI) و هیدروژئوشیمی برای ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی، مخازن چاه نیمه در استان سیستان و بلوچستان. *فصلنامه سلامت و محیط زیست ایران*، ۱۱(۴)، ۵۷۸-۵۸۶.

<https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6141-en.html>

خلیلی، رضا، منتصری، حسین، و متقی، حامد (۱۴۰۰). ارزیابی کیفیت آب رودخانه چالوس با استفاده از تحلیل آماری و شاخص کیفیت آب (WQI). *مدیریت و مدل‌سازی آب و خاک*، ۱(۳)، ۳۸-۵۲.

<https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9300.1031>

خوش‌روش، مجتبی، دیوبند هفشجانی، لاله، مرادزاده، مصطفی، و اسکندری، طاهره (۱۴۰۴). رویکردی یکپارچه برای پایش کیفیت آب رودخانه سیاهرود با استفاده از روش‌های نوین تحلیل داده‌ها. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۹(۳)، ۴۵۳-۴۶۷.
https://idj.iaid.ir/article_222123.html?lang=en

دریکوندی، مرضیه، زینی‌وند، حسین، طهماسبی‌پور، ناصر، و حقی‌زاده، علی (۱۴۰۲). کاربرد اصل حداکثر آنتروپی در تعیین تعداد بهینه ایستگاه‌های پایش کیفیت آب‌های سطحی. *مجله تحقیقات خاک و آب ایران*، ۵۲(۳)، ۷۸۳-۷۹۴.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.315996.668848>

دین‌پژوه، یعقوب (۱۳۹۵). تحلیل روند کیفیت شیمیایی آب رودخانه‌های استان آذربایجان شرقی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۰(۵۵)، ۱۰۵-۱۲۴.
https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_4734.html

روحانی، حامد، زکی، الناز، کاشانی، مجتبی، و فتح‌آبادی، ابولحسن (۱۳۹۴). ارزیابی پایداری تغییرات کیفیت آب‌های سطحی در حوضه رودخانه گرگانرود. *مجله اکوهیدرولوژی ایران*، ۲(۲)، ۱۲۹-۱۴۰.

<https://doi.org/10.22059/ije.2015.56143>

صادقی، مهدی، نوروزی، نوشین، و شهبازی، علی (۱۳۹۹). بررسی تغییرات شاخص کیفیت آب رودخانه زیارت‌رگان در سال ۱۳۹۷. *مجله پژوهش در بهداشت محیط*، ۶(۳)، ۲۵۰-۲۵۹.

<https://doi.org/10.22038/jreh.2020.47107.1356>

عیسی‌زاده، محمد، فاخری‌فرد، احمد، و دربندی، صابره (۱۴۰۱). بررسی توسعه شهرک‌های گلخانه‌ای و تأثیر آن بر سطح آب‌های زیرزمینی سفره‌های آب زیرزمینی حوضه آجی‌چای با استفاده از مدل SWAT. *هیدروژئولوژی*، ۷(۲)، ۱۵-۲۹.
<https://doi.org/10.22034/hydro.2023.13880>

قدوسی، میثم، دلاور، مجید، و مرید، سعید (۱۳۹۳). اثر تغییرات کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه آبریز آجی‌چای و ورودی آن به دریاچه ارومیه. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۵(۲)، ۱۲۳-۱۳۳.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.51614>

- قره‌محمودلو، مجتبی، و شیرزادینا، جواد (۱۴۰۲). ارزیابی و مقایسه کیفیت منابع آب چشمه و چاه برای مصارف شرب و آبیاری (مطالعه موردی: شرق دشت گرگان). *فصلنامه رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۲(۱)، ۶۴۸.
<https://doi.org/10.22034/nawee.2023.392449.1037>
- قزل‌سفلو، مجتبی، دین‌پژوه، یعقوب، قربانی، محمدعلی، و فاخری فرد، احمد (۱۳۹۱). تحلیل روند جریان‌های رودخانه‌ای استان آذربایجان شرقی. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۵(۱)، ۷۱-۸۲.
https://journals.scu.ac.ir/article_10501.html
- کرمی، فریبا (۱۳۹۰). ارزیابی کیفی منابع آب در بالادست حوضه آبریز آجی‌چای. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۹(۲۵)، ۳۹-۵۸.
https://gdij.usb.ac.ir/article_501.html
- کمالی، اکبر، ساکی، احمد، مقدم، مصطفی، و دیوبند هفشجانی، لاله (۱۴۰۳). پیش‌بینی شاخص کیفیت آب آنتروپی وزنی برای مصارف کشاورزی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی ساده و ترکیبی. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۲)، ۵۹-۷۶.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141393>
- مروج، مجتبی، کریمی‌راد، ایمان، و ابراهیمی، کیومرث (۱۳۹۶). ارزیابی وضعیت کیفیت آب رودخانه کارون براساس شاخص کیفیت آب و با استفاده از محیط GIS. *مجله ایرانی اکوهیدرولوژی*، ۴(۱)، ۲۲۵-۲۳۵.
<https://doi.org/10.22059/ije.2017.60905>
- مقدم، محمد، محمدی شوطی، سیدابوالقاسم، و آقایی سربرزه، مصطفی (۱۳۸۷). آشنایی با روش‌های آماری چند متغیره. انتشارات پریور.
- منافی ملایوسفی، مرضیه، و ملکانی، لیلا (۱۴۰۱). ارزیابی کیفیت آب صوفی‌چای با استفاده از روش‌های آنتروپی شانون و AHP. *مهندسی آبیاری و آب*، ۱۳(۲)، ۲۲۹-۲۴۵.
<https://doi.org/10.22125/iwe.2022.162686>

References

- Akhoni Pourhosseini, F., & Ebrahimi, K. (2020). Shannon's Entropy evaluation on determination of surface water quality, Case studies: Karun and Babolrood rivers. *Water and Irrigation Management*, 9(2), 171-183. <https://doi.org/10.22059/jwim.2019.273226.653> [In Persian]
- Akter, T., Johura, F. T., Akter, F., Chowdhury, T. R., Mistry, S. K., Dey, D., ... & Rahman, M. (2016). Water quality index for measuring drinking water quality in rural Bangladesh: a cross-sectional study. *Journal of Health, Population and Nutrition*, 35, 1-12.
<https://doi.org/10.1186/s41043-016-0041-5>
- Ali, S., Verma, S., Agarwal, M. B., Islam, R., Mehrotra, M., Deolia, R. K., ... & Fattahi, M. (2024). Groundwater quality assessment using water quality index and principal component analysis in the Achnera block, Agra district, Uttar Pradesh, Northern India. *Scientific Reports*, 14(1), 5381.
<https://www.nature.com/articles/s41598-024-56056-8>
- Allahverdipour, P., & Dinpashoh, Y. (2025). Modeling the rainfall-runoff of Ajichai Basin using intelligent models. *Watershed Engineering and Management*, 17(1), 14-28.
<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.365227.2052> [In Persian]
- Alobaidy, A. H. M. J., Abid, H. S., & Maulood, B. K. (2010). Application of water quality index for assessment of Dokan Lake ecosystem, Kurdistan region, Iraq. *Journal of Water Resource and Protection*, 2(9), 792-798. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2010.29093>
- Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72, 3479-3490.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3255-0>

- Aouiti, S., Hamzaoui Azaza, F., El Melki, F., Hamdi, M., Celico, F., & Zammouri, M. (2021). Groundwater quality assessment for different uses using various water quality indices in semi-arid region of central Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 46669-46691. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11149-5>
- Appukuttan, A., Aju, C. D., Reghunath, R., Srinivas, R., & Krishnan, K. A. (2025). Exploring hydrochemical drivers of drinking water quality in a tropical river basin using self-organizing maps and explainable AI. *Water Research*, 284, 123884. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123884>
- Arıman, S., Soydan-Oksal, N. G., Beden, N., & Ahmadzai, H. (2024). Assessment of groundwater quality through hydrochemistry using principal component analysis (PCA) and Water Quality Index (WQI) in Kızılırmak delta, Turkey. *Water*, 16(11), 1570. <https://doi.org/10.3390/w16111570>
- Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A. & Tziritis, E. (2016). Assessing the hydrogeo-chemistry and water quality of the Aji-Chay River, northwest of Iran. *Environmental Earth Sciences* 75, 1486. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6302-1>
- Benkov, I., Varbanov, M., Venelinov, T., & Tsakovski, S. (2023). Principal component analysis and the water quality index—A powerful tool for surface water quality assessment: A case study on Struma River Catchment, Bulgaria. *Water*, 15(10), 1961. <https://doi.org/10.3390/w15101961>
- Bhat, S. A., & Pandit, A. K. (2014). Surface water quality assessment of Wular Lake, a Ramsar site in Kashmir Himalaya, using discriminant analysis and WQI. *Journal of Ecosystems*, 2014(1), 724728. <https://doi.org/10.1155/2014/724728>
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and Sewage Works*, 117(10), 339-343. <https://B2n.ir/nh3309>
- Das, A. (2024). Assessment of surface water quality using Entropy-WQI, Fuzzy-TOPSIS analysis, irrigation indices and spatial interpolation approaches in Mahanadi River basin, Odisha, India. *J. Environ. Nanotechnol*, 13(1), 182-212. <https://doi.org/10.13074/jent.2024.03.241526>
- Das, A. (2025). A comprehensive analysis, hydrogeochemical characterization and processes controlling surface water quality: entropy-based WQI, geospatial assessment, pis, NPI, and multivariate approaches in Mahanadi Basin, Odisha (India). *Water-Energy Nexus*, 8, 300-325. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.07.003>
- Derdour, A., Mahamat Ali, M. M., & Chabane Sari, S. M. (2020). Evaluation of the quality of groundwater for its appropriateness for drinking purposes in the watershed of Naâma, SW of Algeria, by using water quality index (WQI). *SN Applied Sciences*, 2(12), 1951. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03768-x>
- Derikvandi, M., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., & Haghizadeh, A. (2021). Application of principle of maximum Entropy in determining the optimum number of surface water quality monitoring stations. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), 783-794. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.315996.668848> [In Persian]
- Dinpazhouh, Y. (2016). Trend analysis of water chemical quality of East Azerbaijan rivers. *Journal of Geography and Planning*, 20(55), 105-124. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_4734.html [In Persian]
- Diwyanjalee, G. R., & Premarathne, W. A. P. J. (2024). Impact of rainfall on the water quality of a tropical river: based on the Nilwala River in the southern province of Sri Lanka between March and October 2019. *Water Practice & Technology*, 19(6), 2352-2363. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.119>
- Eid, M. H., Tamma, A. A., Saeed, O., Székács, A., Abukhadra, M. R., El-Sherbeeney, A. M., ... & Szűcs, P. (2024). Advanced approach combines integrated weight water quality index and potential toxic elements for environmental and health risk assessment supported by simulation technique in Oued Souf, Algeria. *Scientific Reports*, 14(1), 17805. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68854-1>
- Fatima, S. U., Khan, M. A., Siddiqui, F., Mahmood, N., Salman, N., Alamgir, A., & Shaukat, S. S. (2022). Geospatial assessment of water quality using principal components analysis (PCA) and water quality index (WQI) in Basho Valley, Gilgit Baltistan (Northern Areas of Pakistan). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 151. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09845-5>

- Gharemahmoodlu, M., & Shirzadnia, J. (2024). Assessment and comparison of the spring and well water resources quality for drinking and irrigation purposes (case study: East of Gorgan plain). *Journal of New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 2(1), 66-48. <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.392449.1037> [In Persian]
- Ghezel saflo, M., Dinpashoh, Y., Ghorbani, M., & Fakheri-Fard, A. (2012). Trend analysis of streamflows in East Azarbayjan province. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(1), 71-82. https://journals.scu.ac.ir/article_10501.html [In Persian]
- Ghodousi, M., Delavar, M., & Morid, S. (2014). Impact of Land Use Changes on Hydrology of Ajichai Basin and its Input to Urmia Lak. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2), 123-133. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.51614> [In Persian]
- Hammoumi, D., Al-Aizari, H. S., Alaraidh, I. A., Okla, M. K., Assal, M. E., Al-Aizari, A. R., ... & Bejjaji, Z. (2024). Seasonal variations and assessment of surface water quality using water quality index (WQI) and principal component analysis (PCA): A case study. *Sustainability*, 16(13), 5644. <https://doi.org/10.3390/su16135644>
- Hosseini, H., Shakeri, A., Rezaei, M., Dashti Barmaki, m., & Shahaki, M. (2019). Application of water quality index (WQI) and hydro-geochemistry for surface water quality assessment, Chahnimeh reservoirs in the Sistan and Baluchestan Province. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11(4), 575-585. <https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6141-en.html> [In Persian]
- Isazadeh, M., Fakheri Fard, A., & Darbandi, S. (2023). Study of the development of greenhouse estates and its impact on groundwater levels of Ajichay basin aquifers using SWAT model. *Hydrogeology*, 7(2), 15-29. <https://doi.org/10.22034/hydro.2023.13880> [In Persian]
- Jafari, N., & Dinpashoh, Y. (2024). Application of TOPSIS method in the investigation of river water quality (Case study: Aji Chai River). *Water and Soil*, 37(6), 855-869. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84882.1344> [In Persian]
- Jafari, N., Hafezparast, M. & Farhadi, B. (2021). Qualitative evaluation of water resources for drinking and agricultural uses (Case study: Gamasiab catchment, Kermanshah province). *Journal of Environmental Science Studies*, 6(2), 3525-3532. https://www.jess.ir/article_129049_en.html?lang=fa [In Persian]
- Jiang, T., Wang, M., Zhang, W., Zhu, C., & Wang, F. (2024). A comprehensive analysis of agricultural non-point source pollution in China: Current status, risk assessment and management strategies. *Sustainability*, 16(6), 2515. <https://doi.org/10.3390/su16062515>
- Kamali, A., Saki, A., Moghadam, M., & Divband H. (2024). Prediction of weighted entropy water quality index for agricultural uses using simple and hybrid artificial intelligence methods. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), 76-59. <https://doi:10.1016/j.chemosphere.2024.141393> [In Persian]
- Karami, F. (2012). Qualitative assessment of water resources in the upstream of the Ajichay River basin. *Geography and Development*, 9(25), 39-58. https://gdij.usb.ac.ir/article_501.html?lang=en [In Persian]
- Karunanidhi, D., Aravinthasamy, P., Subramani, T., & Muthusankar, G. (2021). Revealing drinking water quality issues and possible health risks based on water quality index (WQI) method in the Shanmuganadhi River basin of South India. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 931-948. <https://doi:10.1007/s10653-020-00613-3>
- Khalili, R., Montaseri, H., & Motaghi, H. (2021). Evaluation of water quality in the Chalus River using the statistical analysis and water quality index (WQI). *Water and Soil Management and Modelling*, 1(3), 38-52. <https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9300.1031> [In Persian]
- Khoshravesh, M., Divband Hafshejani, L., Moradzadeh, M. and Eskandari, T. (2025). An Integrated Approach to Monitoring Water Quality in the Siahroud River using Modern Data Analysis Methods. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(3), 453-467. https://idj.iaid.ir/article_222123.html?lang=en [In Persian]
- Kourandeh, H.H. (2012). Qualitative assessment and classification of Aji Chai River using water quality index (WQI). *World Journal of Fish and Marine Sciences*, 4(1), 50-53. <https://doi.org/10.5829/idosi.wjfm.2012.04.01.6193>

- Krishna Kumar, S., Logeshkumaran, A., Magesh, N. S., Godson, P. S., & Chandrasekar, N. (2015). Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 5, 335-343. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0196-4>
- Liu, Y., & Li, L. (2023). Multiple evaluations of the spatial and temporal characteristics of surface water quality in the typical area of the Yangtze River delta of China using the water quality index and multivariate statistical analysis: A case study in Shengzhou city. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 2883. <https://doi.org/10.3390/ijerph20042883>
- Mahato, J. K., Saw, S., Kant, N., Patel, R., & Yadav, B. (2023). GIS-based spatial variability and water quality Index (WQI) modeling of trace elements in groundwater of Jamshedpur, Eastern India. *Journal of the Geological Society of India*, 99(3), 415-420. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2325-x>
- Manafi Mollayousefi, M., & Malekani, L. (2022). Evaluation of the water quality of Soufi Chai by Shannon Entropy and AHP Methods. *Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 429-445. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.162686> [In Persian]
- Moghadam, M., Mohammadi, S.A., & Aghaei-Sarbarzeh, M. (2008). *Familiarity with multivariate statistical methods*. Parivar Publications. [In Persian]
- Moravej, M., Karimirad, I., & Ebrahimi, K. (2017). Evaluation of Karun River water quality status based on water quality index and involving GIS environment. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(1), 225-235. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.60905> [In Persian]
- Mukate, S., Wagh, V., Panaskar, D., Jacobs, J.A., & Sawant, A. (2019). Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water. *Ecological Indicators*, 101, 348-354. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034>
- Pashazadeh Laleh, Z., Jafari, H., & Vaezi Hir, A. (2021). Assessment of Aji-Chay River Pollution in Tabriz Plain Area Using Water Quality Indices. *Water and Soil*, 34(6), 1203-1218. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i6.80732> [In Persian]
- Pourfallah Koushali, H., Mastouri, R., & Khaledian, M. R. (2021). Impact of precipitation and flow rate changes on the water quality of a Coastal River. *Shock and Vibration*, 2021(1), 6557689. <https://doi.org/10.1155/2021/6557689>
- Prasun, A., & Singh, A. (2025). Assessment of groundwater contamination in Aurangabad, Bihar using WQI and geostatistical modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(2), 789-811. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02901-1>
- Rouhani, H., Zaki, E., Kashani, M., & Fathabadi, A. (2015). Evaluate the stability of surface water quality variation in Gorganrood River Basin. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2(2), 129-140. <https://doi.org/10.22059/ije.2015.56143> [In Persian]
- Sadeghi, M., Noroozi, N., & Shahbazi, A. (2020). Study of changes in water quality index of Ziarat River in Gorgan at 2018. *Journal of Research in Environmental Health*, 6(3), 250-259. <https://doi.org/10.22038/jreh.2020.47107.1356> [In Persian]
- Safari, M., Hezarkhani, A., & Mashhadi, S. R. (2020). Hydrogeochemical characteristics and water quality of Aji-Chay river, eastern catchment of Lake Urmia, Iran. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 199. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01469-y>
- Sanikhani, H., Dinpazhoh, Y., & Zamanzad Ghavidel, S. (2014). The impacts of climate change on runoff in watersheds (Case Study: Ajichay watershed in East Azerbaijan province, Iran). *Water and Soil*, 27(6), 1225-1234. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.21513> [In Persian]
- Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584, 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.102>
- Shaibur, M. R., Howlader, M., Ahmmed, I., Sarwar, S., & Hussam, A. (2024). Water quality index and health risk assessment for heavy metals in groundwater of Kashiani and Kotalipara upazila, Gopalganj, Bangladesh. *Applied Water Science*, 14(5), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02169-4>

- Simeonov, V., Stratis, J. A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., ... & Kouimtzis, T. (2003). Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research*, 37(17), 4119-4124. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00398-1)
- Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Varol, S., & Davraz, A. (2014). Evaluation of the groundwater quality with WQI (Water Quality Index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 73, 1725-1744. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3531-z>
- WHO. (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality-4th ed.* Geneva World Health Organization.
- Xu, H., Tan, X., Liang, J., Cui, Y., & Gao, Q. (2022). Impact of agricultural non-point source pollution on river water quality: evidence from China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 858822. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.858822>
- Zhang, Z., Guo, Y., Wu, J., & Su, F. (2022). Surface water quality and health risk assessment in Taizhou City, Zhejiang Province (China). *Exposure and health*, 14(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12403-021-00408-6>
- Zhang, Z., Tao, F., Du, J., Shi, P., Yu, D., Meng, Y., & Sun, Y. (2010). Surface water quality and its control in a river with intensive human impacts—a case study of the Xiangjiang River, China. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2483-2490. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.002>
- Zhang, Q., Xu, P., & Qian, H. (2020). Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of northwest China. *Exposure and health*, 12(3), 487-500. <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00345-w>.

