اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۲، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۴، ص ۱۴۰-۱۲۹

ارزیابی پایداری تغییرات کیفیت شیمیایی آب سطحی در رودخانهٔ گرگانرود

حامد روحانی[1*]، الناز زکی[2]، مجتبی کاشانی[3]، ابولحسن فتح‌آبادی[1]

۱. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۳. مربی گروه آمار، دانشگاه گنبد کاووس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹٤/۰۲/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹٤/۰٦/۱۵)

چکیده

اطلاعات در مورد کیفیت آب و منابع آلودگی نقطه‌ای برای اجرای راهبردهای منابع آب پایدار مهم است. هدف این تحقیق، به‌کارگیری روش‌های تحلیل چندمتغیرهٔ آماری و بررسی تغییرات عوامل مؤثر برای تجزیه‌وتحلیل کیفیت آب و توانایی نظریهٔ آنتروپی اطلاعات در تحلیل پایداری و قابلیت اعتمادپذیری داده‌های برداشت‌شدهٔ کیفیت آب در هفت ایستگاه واقع در حوضهٔ آبخیز گرگانرود است. نتایج تحلیل عاملی براساس مشخصه‌های کیفیت آب نشان داد که ۹۷/۸ درصد تغییرات کیفیت آب سطحی حوضهٔ گرگانرود با دو عامل کنترل می‌شود. درصد واریانس مربوط به هر کدام از عامل‌ها به‌ترتیب ۸٦/۲ و ۱۵/۷ درصد و بیشترین بار وزنی به‌ترتیب مربوط به پارامتر Ca و پارامتر pH است. نتایج نظریهٔ آنتروپی اطلاعات نشان‌دهندهٔ ناپایداری داده‌های ثبت‌شده در دو ایستگاه تمر و گالیکش است. همچنین در خوشهٔ دوم که دو پارامتر EC و TDS در آن قرار گرفته‌اند، ایستگاه لزوره بیشترین ناپایداری را دارد. از طرف دیگر، مقادیر زیاد وزن آنتروپی این دو پارامتر در مقایسه با دیگر پارامترهای کیفی بررسی‌شده نشان از تأثیرگذاری بیشتر نسبت به مشخصه‌های دیگر است. در ایستگاه تمر عامل SAR بیشترین آنتروپی را در طول ثبت داده‌ها داشت. در ایستگاه‌های گالیکش، تقی‌آباد، بصیرآباد، رامیان و تنگراه مقدار یون Mg دارای بیشترین وزن بود که نشان‌دهندهٔ تغییرات مداوم است و این تغییرات را می‌توان به ارتباط با تشکیلات زمین‌شناسی نسبت داد. به‌طور کلی عدم قطعیت نمونه‌برداری بیشتر به مکان نمونه‌برداری مربوط می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز خوشه‌ای، آنالیز واریانس، عدم قطعیت، کیفیت آب، گرگانرود.

* نویسندهٔ مسئول

Email: Rouhani.hamed@gonbad.ac.ir

مقدمه

آب‌های سطحی یا رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب هستند که تأثیر مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، شرب و تولید برق دارند. حفاظت و استفادهٔ بهینه از منابع آب از اصول توسعهٔ پایدار هر کشور است. آگاهی از کیفیت منابع آب یکی از نیازمندی‌های مهم در برنامه‌ریزی و توسعهٔ منابع آب و حفاظت و کنترل آنهاست [۷]. با توجه به کمبود منابع آب با کیفیت مناسب و افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا، امروزه بررسی پارامترهای کیفی آب از اهمیت زیادی برخوردار است. در ایران مطالعاتی به‌صورت پراکنده در زمینهٔ کیفیت سطحی آب انجام گرفته است که می‌توان به تحقیق در زمینهٔ تأثیرات فاضلاب‌های شهری و صنعتی بر کیفیت رودخانهٔ قشلاق سنندج [۵]، بررسی آلودگی‌های آب در مسیر رودخانهٔ کرج [۴]، تعیین غلظت نیترات و کلرید در آب‌های زیرزمینی گرگان [۳] و بررسی روند تغییرات بلندمدت متغیرهای کیفیت آب رودخانهٔ چهل‌چای (گلستان)[۲] اشاره کرد. همچنین مدلسازی کیفیت آب محدود است. در این خصوص می‌توان به نتایج تحقیقات یوان و میشل [۲۸] در مورد نبود رابطهٔ معنادار بین فسفر و دبی و نبود رابطهٔ مشخص بین نیتروژن و دبی در رودخانهٔ ایلینویز آمریکا اشاره کرد. یداند و همکاران [۲۷] در خصوص بهینه‌سازی و دسته‌بندی نمونه‌های آب در کالابریای ایتالیا، راگنو و همکاران [۱۹] در مورد کاربرد تحلیل خوشه‌ای و تحلیل عاملی بر روی داده‌های هیدروشیمیایی حوضهٔ آبریز آنکوبرا، و سینگ و همکاران [۲۳] در مورد کاربرد روش‌های مختلف آماری چندمتغیره شامل آنالیز خوشه‌ای و مؤلفه‌های اصلی برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب در رودخانهٔ گمتی در شمال هند تحقیقاتی انجام دادند.

اندازه‌گیری همهٔ پارامترهای کیفی آب به صرف وقت و هزینهٔ زیادی نیاز دارد. از طرفی اغلب روش‌های گرافیکی مورد استفاده، به محدودیت نمونه و پارامتر دچارند و هیچ‌یک از روش‌ها قادر به تمایز بین گروه‌ها و آزمایش حد شباهت گروه‌ها نیست. برخلاف روش‌های گرافیکی، روش‌های آماری امکان استفاده از همهٔ پارامترها را فراهم می‌کنند. اندازه‌گیری همهٔ پارامترهای کیفی آب به صرف وقت و هزینه‌ی زیادی نیاز دارد [۱۱] و بررسی کیفی وضعیت آب‌های سطحی به‌منظور تأمین آب برای مصارف شرب و صنعت و کشاورزی ضروری است، ازاین‌رو به‌کارگیری روش‌های آماری در این خصوص اهمیت فراوانی خواهد داشت. در این بین روش‌های تجزیه‌وتحلیل چندمتغیره در تجزیه‌وتحلیل داده‌های مربوط به تعداد زیادی متغیر بسیار مفید است. تجزیه‌وتحلیل از طریق این روش، نتایجی را که به‌راحتی تفسیرشدنی است ارائه می‌کند. انتخاب مناسب‌ترین روش تجزیه‌وتحلیل چندمتغیره، به طبیعت داده‌ها، اهداف و مسئلهٔ تحقیق بستگی دارد. موضوع اساسی در زمینهٔ بسیاری از روش‌های تجزیه‌وتحلیل چندمتغیره ساده‌سازی است. یکی از روش‌های آماری، تحلیل عاملی است که دارای سه مرحلهٔ تهیه ماتریس همبستگی از تمام متغیرها، استخراج عامل‌ها و تفسیر نتایج است [۱۱]. هدف تحلیل عاملی ساده‌سازی مسئله و همچنین یافتن متغیرهای جدید (اجزای مؤلفه) برای آسان‌تر کردن فهم داده‌هاست.

مقادیر متغیرهای کیفیت آب برای اجرای روش‌های چندمتغیرهٔ آماری براساس یک نمونه یا آمار در هر نقطهٔ نمونه‌گیری، اطلاعاتی دربارهٔ عدم قطعیت داده‌های اصلی نمی‌دهند. نتایج عمومی پردازش داده‌ها در مورد خصوصیات داده‌های کیفیت آب فقط اطلاعاتی در محدودهٔ زمان مورد بررسی می‌دهد. ازآنجا که کیفیت آب در طول زمان ثابت نیست، نتایج کلی واقع‌بینانه نیست. اطلاعات نادیده‌گرفته‌شده ممکن است مؤلفه‌های اثرگذار را تغییر دهند و از طرف دیگر اطلاعات مفیدی فراهم آورند [۱۶ ، ۱۵]، بنابراین در این مطالعه اثر فاکتور نیز در آنالیز داده‌ها لحاظ شد. مطالعات مختلفی در زمینهٔ ارزیابی عدم قطعیت متغیرهای هیدرولوژیکی و پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی صورت پذیرفته [۳]، اما تاکنون مطالعات اندکی برای توصیف و ارزیابی ویژگی‌های داده‌های کیفیت آب سطحی در مقیاس بزرگ انجام گرفته است. تئوری آنتروپی توانایی شناخت اطلاعات عدم اطمینان برای حل مسائل مدیریت منابع آب را می‌دهد [۱۷].

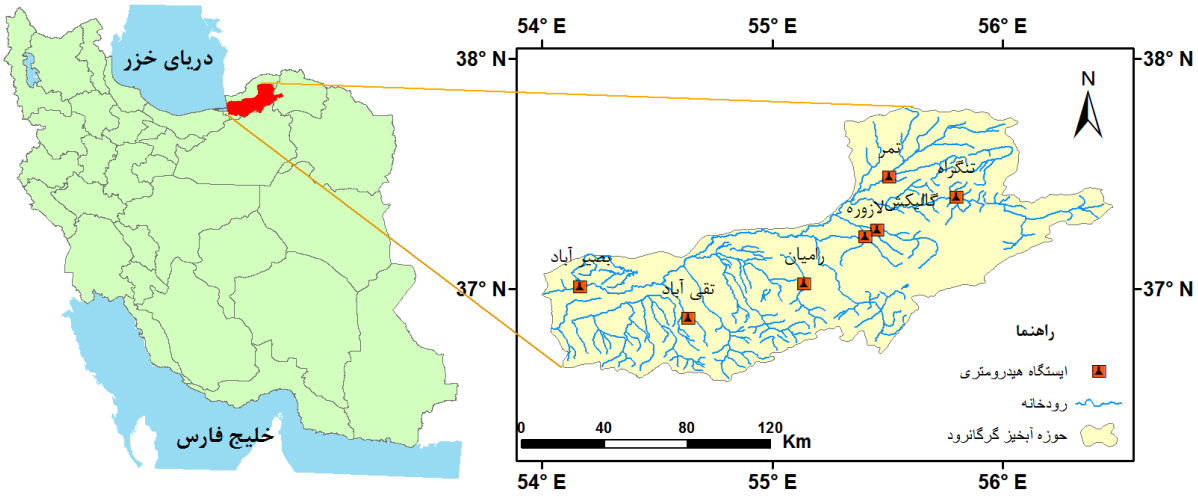
استان گلستان با توجه به موقعیت خاص جغرافیایی، نزدیکی به دریا و وجود رشته‌کوه البرز و شرایط خاص اقلیمی و اهمیت کشاورزی، بستر مناسبی برای زراعت‌های گوناگون و چهارفصل است، اما به‌دلیل استفاده از کودهای شیمیایی و سازندهای زمین‌شناسی، از آسیب‌پذیرترین

مناطق به تغییر کیفیت آب است. بخش کشاورزی تأثیر مهم و ویژه‌ای در توسعهٔ اقتصاد استان دارد. ۳/۴۷ درصد از ارزش افزودهٔ ایجادشده بخش کشاورزی و ۳/۳۷ درصد شیلات در کل کشور به استان گلستان تعلق داشته است [۷]. ازآنجا که بخش کشاورزی و تولید مواد غذایی از مهم ترین ابزارهای ترقی کشورهای در حال توسعه در تعامل با سیاست های جهانی شدن و روند رو به رشد این کشورهاست که کارکردهای فراوانی در عرصه های اقتصادی و حتی سیاست بین‌المللی دارد؛ ازاین‌رو هدف این تحقیق، به‌کارگیری روش‌های آماری چندمتغیره و بررسی تغییرات عوامل مؤثر برای تجزیه‌وتحلیل کیفیت آب و توانایی تئوری آنتروپی در تحلیل پایداری عوامل تأثیرگذار کیفی در هفت ایستگاه واقع در حوضهٔ آبخیزگرگانرود است.

مواد و روش‌ها

منطقه و روش اجرای پژوهش

حوضهٔ آبخیز گرگانرود با وسعت ۱۰۶۰۰ کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های شمال شرق کشور بوده و بخش وسیعی از آن در استان گلستان واقع است. این حوضه از جنوب مشرف به رشته‌کوه البرز شرقی، از شرق به کوه‌های آلاداغ و گلی‌داغ، از شمال به حوضهٔ آبخیز اترک و از غرب به دریای خزر و حوضهٔ آبخیز قره‌سو محدود می‌شود. طول رودخانهٔ اصلی آن به‌نام گرگانرود بالغ بر ۲۵۰ کیلومتر است که در امتداد عمومی شرقی ـ غربی جریان دارد و از جنوب شرق دریای خزر به این دریا می پیوندد و مهم‌ترین سرشاخه‌های آن دوغ، زاو، اوغان، چهل‌چای، زرین‌گل، رامیان، نوده، رودبار و محمدآباد است. براساس روش دومارتن دارای اقلیم متنوعی شامل خشک، نیمه‌خشک، معتدل مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و مرطوب بوده و میانگین بارندگی در این حوضه از ۲۸۷ میلی‌متر در تیل‌آباد تا ۹۵۳ میلی‌متر در پس‌پشته متغیر است. لس و نهشته‌های کواترنر بخش عمده‌ای از حوضه را شامل می‌شود. محل استقرار ایستگاه‌های منتخب نمونه‌برداری رودخانهٔ گرگانرود در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. پراکنش ایستگاه های نمونه‌برداری منتخب منطقهٔ مورد مطالعه (نگارندگان مقاله)

در این پژوهش از آمار ثبت‌شدهٔ کیفیت آب توسط سازمان آب استان گلستان در هفت ایستگاه هیدرومتری واقع در سرشاخه‌های گرگانرود که دارای آمار مناسب کیفیت آب بودند، استفاده شد. از میان پارامترهای کیفی آب ثبت‌شده بر روی رودخانهٔ اصلی یا سرشاخه‌های فرعی رودخانهٔ گرگانرود، ۱۰ مشخصهٔ کیفی پارامترهای جدول ۱ با توجه به تداوم اندازه‌گیری در مقیاس زمان و پراکندگی مناسب در منطقهٔ تحقیق درنظر گرفته شد. پارامترهای تحت مطالعه شامل سدیم (Na)، مواد محلول کل (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، کلر(Cl)، سولفات (So_4)، کلسیم

(Ca)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K)، نسبت سدیم جذبی (SAR) و pH هستند. براساس جدول ۱ غلظت pH از ۷/۳ تا ۷/۵، و TDS که یک معیار سنجش کیفیت است، بین ۲۴۳/۰ تا ۱۰۰۲/۵ با میانگین ۶۹۸/۹ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌کند. از این‌رو براساس طبقه‌بندی فطر [۹] تمام نمونه‌های گرفته‌شده جزء آب‌های شیرین (TDS<1000 mg/L) طبقه‌بندی می شوند. عامل EC بین حداقل ۳۷۲/۲ تا ۱۵۵۶/۲ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. SAR از عوامل تعیین‌کنندهٔ کیفیت آب برای مصارف کشاورزی است. آنالیز کاتیون‌ها و آنیون‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌ها محتوی Ca بین ۲/۱۲ تا ۳/۳۶ ، Mg بین حداقل ۱/۷۸ تا حداکثر ۴/۸۱، Na بین ۰/۴۳ تا ۰/۴۹، و K بین ۰/۰۳ تا حداکثر ۰/۱۰ میلی‌گرم بر لیتر هستند. Co_3 مهم‌ترین آنیون موجود درآب‌های طبیعی است که مقدار آن بین ۰/۴۱ تا ۰/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر است؛ مقدار Clحداقل ۰/۳۹ تا حداکثر ۷/۰۸ میلی‌گرم بر لیتر است و So_4 بین ۰/۶۳ تا ۴/۹۵ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. به‌منظور تفسیر و استخراج نتایج از داده‌های ذکرشده، این مطالعه در چهار مرحله، به‌ترتیب شامل تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای، تحلیل عاملی، تجزیه‌وتحلیل واریانس و تئوری آنتروپی اطلاعات انجام گرفت.

جدول ۱. آماره های توصیفی ۱۰ پارامترکیفی مطالعه‌شده در هفت ایستگاه هیدرومتری (منبع: آب منطقه‌ای گلستان)

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف	ضریب تغییرات
TDS	۲۴۳/۰	۱۰۰۲/۴۹	۴۵۳/۰۹	۲۶۲/۰۶	۰/۵۷
EC	۳۷۲/۲	۱۵۵۶/۲۴	۶۹۸/۹۱	۴۰۸/۷۶	۰/۵۸
pH	۷/۳	۷/۵۳۶	۷/۴۵	۰/۰۷	۰/۰۱۰
Cl	۰/۳۹	۷/۰۸	۲/۰۸۲	۲/۴۳	۱/۱۶
So_4	۰/۶۳	۴/۹۵	۱/۶۸۴	۱/۴۹	۰/۸۸
Ca	۲/۴	۳/۳۵	۲/۷۸	۰/۳۳	۰/۱۲
Mg	۱/۱۸	۴/۸۰	۲/۳۸	۱/۱۵	۰/۴۸
Na	۰/۴۳	۸/۴۹	۲/۴۴۰	۲/۸۹	۱/۱۸
K	۰/۰۳	۰/۱۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۳۶
SAR	۰/۳۲	۳/۶۵	۱/۲۹	۱/۲۲	۰/۹۴

تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای

تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای روشی آماری است که مشاهدات را به‌صورت گروه‌های مشابه طبقه‌بندی می‌کند. در این مطالعه برای آنالیز پارامترهای اندازه‌گیری‌شده از تحلیل عاملی استفاده شد. تحلیل عاملی نوعی روش طبقه‌بندی غیرپارامتریک است که فرضی در مورد توزیع آماری داده‌های تحت بررسی درنظر نمی‌گیرد [۲۶، ۱۲]. هدف اصلی تحلیل عاملی، بیان روابط کواریانس میان بسیاری از متغیرها براساس چند کمیت تصادفی غیرقابل‌مشاهده است که «عامل‌ها» نامیده می‌شوند. در تحلیل عاملی، هدف، یافتن کمترین تعداد متغیرها یا فاکتورهای پنهان مورد نیاز برای محاسبهٔ همبستگی بین آزمون‌هاست [۲۰].

ابتدا همهٔ عوامل به نمره‌های z استاندارد براساس رابطهٔ ۱ تبدیل می‌شوند:

$$z = \frac{x - x_i}{S} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا x مقدار عددی هر متغیر، x_i میانگین متغیرها، S انحراف معیار و z مقدار استانداردشدهٔ متغیر است. برای بررسی روابط بین عامل‌ها از آزمون همبستگی استفاده شد. دلیل استفاده از آزمون همبستگی، مقیاس متفاوت متغیرها [۱۴] و اهمیت مساوی متغیرها [۹] است. ضرایب مختلفی برای بررسی آزمون همبستگی وجود دارد. از جمله ضریب همبستگی کندال که برای داده‌های گسسته، و ضریب همبستگی اسپیرمن که برای بررسی داده‌های رتبه‌ای کاربرد دارد. در این پژوهش به‌دلیل

پیوسته بودن داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد [۱۳]. برای ارزیابی فاصلهٔ بین گروه‌های جداشده از روش وارد[1] به‌دلیل مبنا قرار دادن خود مشاهدات استفاده شد. در واقع از میانگین مؤثر برای تشخیص گروه‌های مشابه از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی استفاده می‌شود [۱۱]. در تحلیل عاملی هر عامل بر اساس همبستگی قوی چند شاخص تعریف می‌شود. به‌دلیل وجود وابستگی احتمالی عوامل، ممکن است شاخص‌ها به گونه‌ای همبستگی داشته باشند که مشخص نشود این شاخص‌ها مربوط به کدام عامل‌اند. ازاین‌رو دوران واریماکس برای مستقل کردن عوامل (متعامد کردن بردارها) استفاده شد. تعیین میزان تناسب تعداد عامل های انتخابی از آمارهٔ *KMO*[2] که براساس ضریب همبستگی جزئی بین شاخص‌هاست، استفاده شد.

تجزیه‌وتحلیل واریانس

برای بررسی سطح معناداری پارامترها در ایستگاه‌های مختلف، از روش تجزیه‌وتحلیل واریانس استفاده شد [۱۱]. تجزیه‌وتحلیل واریانس یا به‌طور مناسب‌تر، تجزیه‌وتحلیل تغییر نسبت به میانگین عبارت از افراز کل تغییرات موجود در مجموعهٔ داده‌ها به مؤلفه‌هاست. هر مؤلفه‌ای به یک علت قابل شناسایی است یا به یک منبع تغییر نسبت داده می‌شود. به‌علاوه یک مؤلفه، تغییر حاصل از عامل‌های کنترل‌نشده و خطاهای تصادفی مربوط به اندازه‌های پاسخ را نشان می‌دهد. به‌ویژه اگر مجموعهٔ داده‌ها شامل n اندازه $y_1, y_2, y_3, \ldots, y_n$ باشد، میانگین آنها با $\bar{y}$ نشان داده می‌شود. کل تغییر نسبت به میانگین به‌صورت مجموع توان‌های دوم انحراف‌ها $\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2$ در می‌آید که مجموع کل توان‌های دوم نامیده می‌شود.

آنتروپی شانون

در مرحلهٔ بعد تجزیه‌وتحلیل ثبات هر پارامتر با استفاده از تئوری آنتروپی اطلاعات برای بسط اطلاعات موجود در داده‌های ثبت‌شده مشخصهٔ کیفی آب در دورهٔ زمانی بلندمدت انجام گرفت. شانون آنتروپی [۲۲]، معیاری از عدم اطمینان است، نظریه‌ای که اخیراً در زمینه‌های مختلف استفاده شده است [۲۳]. آنتروپی در تئوری اطلاعات معیاری است برای مقدار عدم اطمینان بیان‌شده توسط یک توزیع احتمال گسسته (*P*i)، به‌گونه‌ای که این عدم اطمینان، در صورت پخش بودن توزیع، بیشتر از موردی است که توزیع فراوانی کشیدگی بیشتری داشته باشد که این عدم اطمینان به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$E = -K\sum_{i=0}^{n}[p_i.Lnp_i] \qquad (۲)$$

به‌طوری که K یک ثابت مثبت است به‌منظور تأمین $0 \le E \le 1$، E از توزیع احتمال (P_i) براساس سازوکار آماری محاسبه شده و مقدار آن در صورت تساویP_iها با یکدیگر حداکثر مقدار ممکن خواهد بود. اگر رخداد یک امر به‌صورت دقیق پیش‌بینی شود احتمال آن بیشتر خواهد بود و برعکس، آنتروپی شانون کوچک خواهد بود. در ادامه، مقدار d_j (j درجهٔ انحراف) که بیان می‌کند معیار مربوط (j) چقدر اطلاعات مفید در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود. هرچه مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ معیاری به صفر نزدیک باشد، نشان‌دهندهٔ آن است که گزینه‌های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. ازاین‌رو تأثیر آن شاخص در تصمیم‌گیری باید به همان اندازه کاهش یابد.

$$d_j = 1 - E_j \quad ;\forall_j \qquad (۳)$$

سپس مقدار اوزان هر پارامتر کیفی آب از رابطهٔ ۴ محاسبه شد:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \quad ;\forall_j \qquad (۴)$$

بر مبنای این روش، پارامتری که بیشترین وزن را دارد بیشترین ناپایداری را نیز دارد. آنتروپی یکی از راه‌های معنادار اندازه‌گیری مقدار عدم قطعیت در مجموعهٔ متناهی از شواهد به‌وسیلهٔ تابع توزیع احتمال آنهاست و می‌توان ناسازگاری میان توزیع‌های احتمال منابع شواهد را به‌وسیلهٔ آن بیان کرد.

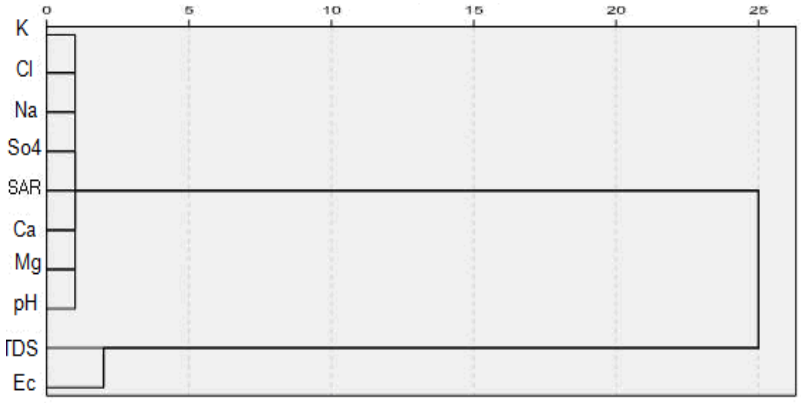
آنتروپی شانون ابتدا برای هر یک از مشخصه‌های کیفی آب سطحی و برای هر یک از ایستگاه‌های نمونه‌برداری و رتبه‌بندی آنها انجام گرفت. سپس رتبهٔ وزنی هر یک از ایستگاه‌های نمونه‌برداری برای هر پارامتر در دو عامل مشخص‌شده در تجزیه‌وتحلیل عاملی رتبه‌بندی شد. به‌دلیل خصوصیات مختلف مشخصه‌های کیفی آب، رتبهٔ

1. Ward`s method
2. *Kaiser-Meyer-Oklin*

آنها باید جایگزین جمع مقادیر آنتروپی شود. در نهایت جمع رتبه‌ها برای تعیین ثبات کیفیت آب مشخص شد که مقادیر کوچک‌تر نشان‌دهندهٔ کیفیت بی‌ثبات‌تر آب سطحی است.

نتایج و بحث

در ماتریس همبستگی رسم‌شده برای آنالیز روابط بین متغیرها طبق جدول ۲ پارامتر EC و TDS در سطح ۱ درصد بیشترین همبستگی را با هم دارند (R=۱) و پس از آن سدیم و کلر بیشترین همبستگی (R=۰/۹۹) را در این سطح دارند. برای گروه‌بندی پارامترهای کیفی که دارای همبستگی قوی تا متوسط بودند از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد (شکل ۲). گروه اول شامل پارامترهای *EC* و *TDS* هستند که به‌دلیل همبستگی قوی از دیگر پارامترها جدا شدند. بقیهٔ پارامترها در گروه دوم با *KMO* برابر با ۰/۷۶ قرار گرفتند که این نشان از همبستگی تغییرات هر چند جزئی در قالب یک خوشه در کل دورهٔ نمونه‌برداری دارد. برای تهیهٔ ماتریس ضرایب عاملی، آن تعداد از عامل‌ها که ریشهٔ مشخصهٔ آنها بزرگ‌تر از یک بود، انتخاب شدند. سپس از مقادیر نرمال‌شده ۱۰مشخصهٔ مربوط به نمونه‌ها برای تحلیل عاملی استفاده شد.



شکل ۲. تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای ۱۰ مشخصهٔ هیدروشیمیایی مطالعه‌شده

نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی هشت متغیر کیفیت آب که در گروه یک آنالیز خوشه‌ای قرار گرفتند در جدول ۳ نشان داده شده است. تحلیل عاملی براساس مشخصه‌های کیفیت آب نشان می‌دهد که ۹۷/۸ درصد تغییرات کیفیت آب سطحی حوضهٔ گرگانرود با دو عامل کنترل می‌شود که درصد واریانس هر کدام از عامل‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب ۸۶/۲۷ و ۱۵/۷۵ درصد است. به این ترتیب عامل‌های ۱و ۲ مقادیر بزرگ‌تر از یک را شامل می‌شوند. با استفاده از تحلیل دورانی واریماکس این دو عامل مشخص شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده برای عامل اول، بیشترین بار وزنی (۰/۹۹) مربوط به پارامتر Ca و برای عامل دوم، بیشترین بار وزنی (۰/۹۸) مربوط به پارامتر pH است. بنابراین این دو پارامتر، مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر کیفیت آب شناخته شدند. جدول ۳ نتایج تحلیل ماتریس دورانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است در مؤلفهٔ اول، پارامترهای Ca، So_4، Cl ، Mg ، Na و SAR و K دارای بیشترین ضرایب مثبت (۰/۹۹-۰/۸۸) هستند و پارامتر pH دارای ضریب مثبت کم است. درصورتی که در مؤلفهٔ دوم، پارامتر pH دارای ضریب مثبت زیاد و بقیهٔ پارامترها دارای ضریب مثبت کم هستند، که اثرگذاری این عامل در تغییر کیفیت آب سطحی منطقهٔ تحقیق ۱۵/۷۵ درصد کل عوامل مؤثر است. با توجه به اینکه دو مؤلفهٔ اول بیش از ۹۷ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کند، در صورت استفاده از معیار درصد واریانس دو مؤلفهٔ اول انتخاب می‌شوند. بررسی جدول همبستگی نشان‌دهندهٔ بیشترین همبستگی پارامترها بین خود است که بیانگر منشأ مشترک این دو مشخصه است. بین مشخصه‌های مورد بررسی ضرایب مثبت بالای پارامترها در مؤلفهٔ اول نشان‌دهندهٔ فرایندهای مختلف هیدروشیمیایی است. برای مثال غلظت مثبت زیاد یون Na^+ بیانگر تبادل یونی ذرات رس است. فرایند تجزیهٔ یون‌های Na^+ و Cl^- بیانگر فرایند هوازدگی زیاد در منطقه است. شیب هیدرولیکی کم در

حوضهٔ آبخیز تحت مطالعه [۱] سبب افزایش زمان ماندگاری برای آب و واکنش‌های بیشتر بین آب و رخنمون سنگی می‌شود، که غنی شدن بیشتر Na^{+} و Cl^{-} را در پی دارد.

جدول ۲. ماتریس ضرایب همبستگی مشخصه‌های هیدروشیمیایی

پارامتر	TDS	EC	pH	Co3	Cl	So4	Ca	Mg	Na	K	SAR
TDS	۱										
EC	۱/۰۰۰**	۱									
	۰/۰۰۰										
pH	۰/۴۵۶	۰/۴۵۴	۱								
	۰/۳۰۴	۰/۳۰۶									
Co3	۰/۳۶۱	۰/۳۵۷	۰/۷۹۵*	۱							
	۰/۴۲۷	۰/۴۳۱	۰/۰۳۲								
Cl	۰/۹۹۵**	۰/۹۹۵**	۰/۴۶۸	۰/۳۳۶	۱						
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۸۹	۰/۴۶۲							
So4	۰/۹۹۱**	۰/۹۹۱**	۰/۴۳۶	۰/۳۳۷	۰/۹۷۸**	۱					
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۲۸	۰/۴۵۹	۰/۰۰۰						
Ca	۰/۸۶۲*	۰/۸۶۲*	-۰/۰۵	-۰/۰۰۸	۰/۸۵۰*	۰/۸۵۰*	۱				
	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۹۱۵	۰/۹۸۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵					
Mg	۰/۹۸۰**	۰/۹۸۰**	۰/۴۶۴	۰/۴۴۵	۰/۹۵۶**	۰/۹۸۲**	۰/۸۳*	۱			
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۹۴	۰/۳۱۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۲۰				
Na	۰/۹۹۶**	۰/۹۹۶**	۰/۴۹۹	۰/۳۶۹	۰/۹۹۸**	۰/۹۸۵**	۰/۸۳۱*	۰/۹۶**	۱		
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۵۴	۰/۴۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰			
K	۰/۸۴۸*	۰/۸۴۸*	۰/۴۴۵	۰/۴۶۵	۰/۷۹۵*	۰/۸۷۶**	۰/۶۸۶	۰/۹۳۱**	۰/۸۱۵*	۱	
	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۳۱۷	۰/۲۹۳	۰/۰۳۳	۰/۰۱۰	۰/۰۸۹	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶		
SAR	۰/۹۸۰**	۰/۹۸۰**	۰/۵۰۷	۰/۳۵۵	۰/۹۹۱**	۰/۹۴۹**	۰/۸۱۹*	۰/۹۳۲**	۰/۹۸۷**	۰/۷۶۲*	۱
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۴۶	۰/۴۳۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۴۶	

* : معنادار در سطح ۱ درصد؛ * : معنادار در سطح ۵ درصد.

جدول ۳. ماتریس دورانی هشت پارامتر کیفی تحت مطالعه خوشهٔ اول در ایستگاه‌های هیدرومتری

پارامتر	مؤلفه‌های اصلی		
	I	II	درصد تجمعی
Ca	۰/۹۹۶	۰/۰۳۳	۸۶/۲۷۲
So_4	۰/۹۸۶	۰/۱۴۲	۹۷/۸۰۳
Mg	۰/۹۸۴	۰/۱۷۱	۹۹/۵۸۸
CL	۰/۹۸۴	۰/۱۶۴	۹۹/۹۸۳
Na	۰/۹۸۱	۰/۱۸۲	۹۹/۹۹۷
SAR	۰/۹۵۰	۰/۲۷۰	۱۰۰/۰۰
K	۰/۸۸۰	۰/۳۲۸	۱۰۰/۰۰
pH	۰/۱۵۷	۰/۹۸۵	۱۰۰/۰۰

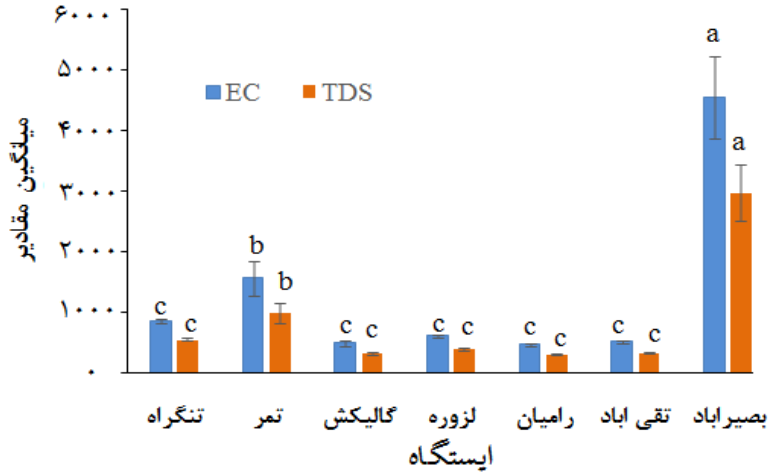
غلظت زیاد یون‌های K و Mg در مؤلفهٔ اول نشان‌دهندهٔ هوازدگی زیاد کانی‌های فلدسپات و فرومنگنز همراه با تأثیرات انسان است [۲۹ ، ۲۱]. از طرف دیگر دلیل زیاد بودن غلظت بی‌کربنات را علاوه‌بر ساختارهای زمین‌شناسی، می‌توان ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی به جریان سطحی و همچنین تصفیهٔ نادرست فاضلاب‌های صنعتی و وارد شدن آن به منابع آب زیرزمینی منطقه دانست.

در بررسی پارامترهای کیفیت آب ایستگاه‌ها، با توجه به آنالیز واریانس (ANOVA) (جدول ۴)، مقایسهٔ میانگین نمره‌ها نشان داد که به غیر از pH در بقیهٔ پارامترها اختلاف معناداری بین ایستگاه‌ها وجود دارد (p_{value}<۰/۰۵). بنابراین در مرحلهٔ بعد برای بررسی و مقایسهٔ ایستگاه‌ها از نظر اختلاف معنادار، از آزمون توکی برای بررسی دوبه‌دوِ واریانس‌های مساوی استفاده شد (شکل‌های ۳ و ۴). براساس این آزمون در ایستگاه تمر به‌غیر از پارامتر Ca بقیهٔ پارامترها اختلاف معناداری با ایستگاه‌های دیگر داشتند. همچنین در ایستگاه بصیرآباد مقادیر همهٔ پارامترها اختلاف معناداری با سایر ایستگاه‌ها داشتند. درصورتی که در بقیهٔ ایستگاه‌ها تفاوت معناداری بین پارامترهای بررسی‌شده وجود نداشت. در ایستگاه بصیرآباد که در آخرین نقطهٔ برداشت نمونه در رودخانهٔ گرگانرود قرار دارد، به‌دلیل عدم الحاق شاخهٔ فرعی رودخانه، شیب کم و مئاندری شدن رودخانه [۱]، رسوبات آبرفتی دانه‌ریز شده‌اند و در نهایت ته‌نشست یافته‌اند که سبب افزایش اختلاف معنادار در مقادیر پارامترهای کیفی آب در مقایسه با نقاط برداشت بالادست رودخانه می‌شود. در بقیهٔ ایستگاه‌ها، به‌دلیل اینکه ایستگاه‌های برداشت نمونه در سرشاخه‌های فرعی رودخانهٔ گرگانرود قرار دارند و در خروجی از ارتفاعات به‌علت شیب زیاد و زمان تماس کوتاه آب با سازندهای بستر آبراهه‌ها املاح محلول در آب‌ها اندک‌اند، اختلاف معناداری بین آنها وجود ندارد.

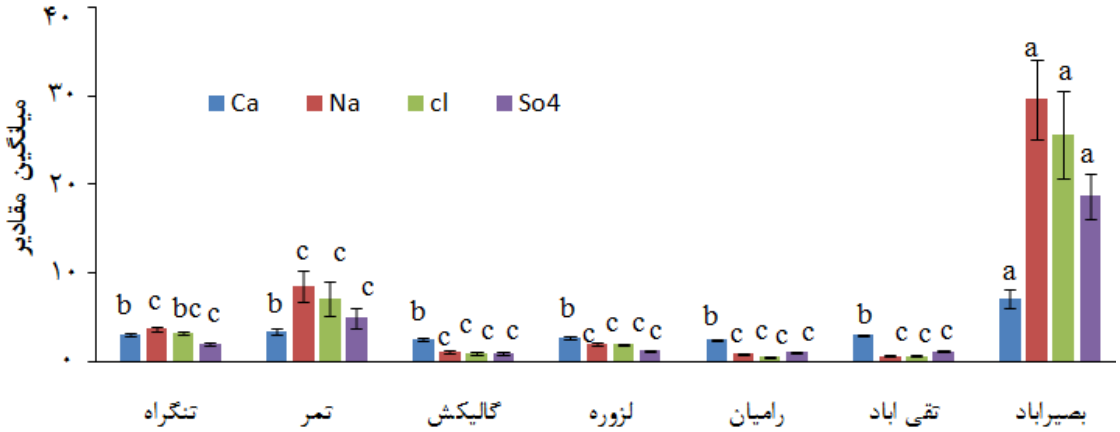
برای ارزیابی قابلیت اعتمادپذیری داده‌های برداشت‌شده کیفیت آب از نظریهٔ آنتروپی اطلاعات استفاده شد. به همین منظور آنتروپی اطلاعات برای هر نمونه و هر پارامتر محاسبه و در نهایت وزن آن تعیین شد. همچنین وزن هر نمونه برای هر مشخصه محاسبه شد و نقاط نمونه‌برداری طبق جمع وزن هر پارامتر در عامل‌های طبقه‌بندی‌شده رتبه‌بندی شدند. با توجه به خصوصیات متفاوت مشخصه‌های کیفی آب، رتبهٔ هر پارامتر در هر ایستگاه جمع و سپس ایستگاه‌ها رتبه‌بندی شدند (جدول‌های ۵ و ۶). طبق جدول ۵ در خوشهٔ دوم که دو پارامتر EC و TDS در آن قرار گرفته‌اند، داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه لزوره بیشترین ناپایداری را دارند، که ممکن است ناشی از عواملی نظیر تغییر کاربری اراضی و ورود زایدات ناشی از فعالیت‌های انسانی به رودخانه باشد [۲]. از طرف دیگر، مقادیر زیاد وزن آنتروپی این دو پارامتر در مقایسه با دیگر پارامترهای کیفی بررسی‌شده نشان از تأثیرگذاری بیشتر نسبت به دیگر مشخصه‌ها دارد. در نهایت بزرگی جمع رتبه‌ها برای تعیین پایداری کیفیت آب به‌کار برده شد. نتایج جدول ۶ بیانگر ناپایداری داده‌های ثبت‌شده و تغییرات مداوم پارامترهای کیفی آب ثبت‌شده در عامل اول دو ایستگاه تمر و گالیکش است. در ایستگاه تمر عامل SAR بیشترین آنتروپی را در طول ثبت داده‌ها داشت. در ایستگاه‌های گالیکش، تقی‌آباد، بصیرآباد، رامیان و تنگراه مقدار Mg دارای بیشترین وزن بود که نشان‌دهندهٔ تغییرات مداوم است و این تغییرات را می‌توان به ارتباط با تشکیلات زمین‌شناسی نسبت داد. با توجه به جمع وزن آنتروپی دو عامل ۱ و ۲، می‌توان استنباط کرد که عامل ۲ بیشترین تأثیر را در تغییر کیفیت و به‌عبارتی کاهش کیفیت آب سطحی در منطقهٔ تحقیق دارد.

جدول ۴. تجزیهٔ واریانس پارامترهای کیفی بررسی‌شده

پارامتر	جمع مربعات	درجهٔ آزادی	F	معناداری
TDS	۳/۶۱۲E8	۳۱۸	۱۰۰/۹۷	۰/۰۰
EC	۷/۵۲۱E۸	۳۰۱	۱۰۰/۷۹	۰/۰۰
pH	۶۴/۱۳۱	۳۲۷	۱/۱۳	۰/۳۴۲
CL	۳۳۶۴۴/۶۸	۳۲۶	۷۸/۱۱	۰/۰۰
SO4	۱۴۷۱۵/۵	۳۲۵	۱۳۶/۳۷	۰/۰۰
Ca	۱۳۵۶/۸۹	۳۲۸	۵۲/۰۲	۰/۰۰
Mg	۶۳۱۰/۰۴	۳۲۵	۱۲۱/۰۳	۰/۰۰
Na	۳۷۱۸۹/۸۱	۳۲۵	۱۲۲/۳۵	۰/۰۰
K	۰/۸۶۹	۳۱۵	۲۶/۰۳	۰/۰۰
SAR	۲۱۵۹/۹۷۶	۳۲۸	۳۱۷/۷۸	۰/۰۰



شکل ۳. مقایسهٔ میانگین‌های مقادیر پارامترهای کیفی بررسی‌شده در نقاط نمونه‌برداری (میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون توکی در سطح ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند)



شکل ۴. مقایسهٔ میانگین‌های مقادیر پارامترهای کیفی بررسی‌شده در نقاط نمونه‌برداری (میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون توکی در سطح ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند)

جدول ۵. مقادیر وزنی آنتروپی و رتبهٔ هر پارامتر (داخل پرانتز) درخوشهٔ دوم

ایستگاه	EC		TDS		جمع رتبه	رتبه در عامل ۲
لزوره	۰/۰۹۵۹۹	(۲)	۰/۰۹۶۰۰	(۱)	۳	۱
تنگراه	۰/۰۹۴۸۷	(۲)	۰/۰۹۴۸۵	(۳)	۵	۲
رامیان	۰/۰۹۴۴۱	(۲)	۰/۰۹۴۴۲	(۴)	۶	۳
تقی‌آباد	۰/۰۹۶۴۱	(۳)	۰/۰۹۶۳۸	(۴)	۷	۴
بصیرآباد	۰/۰۹۶۴۰	(۳)	۰/۰۹۶۳۸	(۴)	۷	۴
گالیکش	۰/۰۹۴۷۶	(۴)	۰/۰۹۴۶۴	(۵)	۹	۵
تمر	۰/۰۹۴۳۸	(۶)	۰/۹۴۴۲	(۵)	۱۱	۶
جمع	۰/۶۶۴۸	۲۲	۰/۶۶۴۵	۲۶		

جدول ۶. مقادیر وزنی آنتروپی و رتبهٔ هر پارامتر (داخل پرانتز) درخوشهٔ اول

ایستگاه	So_4		K		CL		Mg		Na		SAR		Ca		جمع رتبه	رتبه در عامل ۲
لزوره	۰/۰۹۵۷	(۶)	۰/۰۹۴۶	(۱۰)	۰/۰۹۵۶	(۱۰)	۰/۰۹۵۷	(۸)	۰/۰۹۵۵	(۹)	۰/۰۹۵۴	(۱۱)	۰/۰۹۵۸	(۷)	۵۶	۱
تنگراه	۰/۰۹۴۱	(۹)	۰/۰۹۴۱	(۱۰)	۰/۰۹۴۷	(۷)	۰/۰۹۵۱	(۴)	۰۹۴۵۰	(۸)	۰/۰۹۴۶	(۶)	۰/۰۹۵۰	(۵)	۴۹	۲
رامیان	۰/۰۹۳۵	(۹)	۰/۰۹۲۷	(۱۰)	۰/۰۹۳۶	(۸)	۰/۰۹۴۵	(۳)	۰/۰۹۳۷	(۷)	۰/۰۹۳۹	(۶)	۰/۰۹۴۴	(۵)	۴۸	۳
تقی‌آباد	۰/۰۹۵۷	(۷)	۰/۰۹۵۷	(۱۰)	۰/۰۹۵۸	(۶)	۰/۰۹۶۴	(۲)	۰/۰۹۵۴	(۹)	۰/۰۹۵۵	(۸)	۰/۰۹۵۲	(۵)	۴۷	۴
بصیرآباد	۰/۰۹۴۵	(۷)	۰/۰۹۲۴	(۱۰)	۰/۰۹۲۸	(۶)	۰/۰۹۴۲	(۲)	۰/۰۹۳۶	(۹)	۰/۰۹۵۴	(۸)	۰/۰۹۴۲	(۵)	۴۷	۴
گالیکش	۰/۰۹۱۲	(۹)	۰/۰۹۱۲	(۶)	۰/۰۹۲۵	(۸)	۰/۰۹۴۸	(۲)	۰/۰۹۱۱	(۱۰)	۰/۰۹۲۹	(۷)	۰/۰۹۵۰	(۳)	۴۵	۵
تمر	۰/۰۹۳۱	(۹)	۰/۹۴۴۲	(۵)	۰/۰۹۲۶	(۱۰)	۰/۰۹۴۸	(۴)	۰/۰۹۳۵	(۸)	۰/۰۹۵۱	(۳)	۰/۰۹۵۲	(۲)	۴۳	۶
جمع	۰/۶۵۷	۵۶	۰/۶۵۷	۶۳	۰/۶۵۸	۵۰	۰/۶۶۶	۲۵	۰/۶۵۷	۶۰	۰/۶۶۳	۴۹	۰/۶۱۲	۳۲		

نتیجه‌گیری کلی

کمبود آب شیرین یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی قرن حاضر است. کیفیت آب رودخانه از جنبهٔ اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بسیار اهمیت دارد. به‌منظور بهبود مدیریت آب و دستیابی به اهداف توافق‌شدهٔ بین‌المللی در زمینهٔ کیفیت آب، بررسی جامع‌تر تغییرات زیست‌محیطی ضروری است. از طرف دیگر شناسایی عدم قطعیت در مجموعهٔ داده‌ها یا شبکهٔ ثبت داده‌ها از اهداف اصلی تحلیلگران داده‌ها و برنامه‌ریزان برای سیاستگذاری و معرفی راهکارهای کوتاه‌مدت و بلندمدت با اطمینان زیاد برای مدیریت منابع آب است. در این تحقیق با استفاده از روش تحلیل عاملی، مهم‌ترین متغیرهای کیفی آب در طول رودخانهٔ گرگانرود تعیین شد؛ سپس پایداری عوامل تأثیرگذار کیفی با استفاده از تئوری آنتروپی شانون بررسی شد. نتایج تحلیل عاملی نشان داد که ۹۷/۸ درصد تغییرات کیفی آب سطحی را می‌توان با استفاده از دو عامل ارزیابی کرد. در مرحلهٔ بعد برای بررسی اختلاف معنادار بین مقادیر پارامترهای ثبت‌شده در نقاط نمونه‌برداری از آزمون توکی استفاده شد. بنابر این آزمون در ایستگاه تمر همهٔ پارامترهای بررسی‌شده به‌غیر از پارامتر Ca، اختلاف معناداری با ایستگاه‌های دیگر داشتند. همچنین در ایستگاه بصیرآباد مقادیر همهٔ پارامترها اختلاف معناداری با سایر ایستگاه‌ها داشتند. در بقیهٔ ایستگاه‌ها به‌دلیل اینکه ایستگاه‌های برداشت نمونه، در سرشاخه‌های فرعی رودخانهٔ گرگانرود واقع‌اند و در ارتفاعات بالادست به‌علت شیب زیاد در نتیجه آن زمان تماس کوتاه آب با سازندهای بستر آبراهه‌ها، املاح محلول در رودخانه پایین است، اختلاف معناداری بین آنها وجود ندارد. در نهایت آنتروپی اطلاعات برای تخمین عدم قطعیت متغیرهای کیفیت آب و همچنین نقاط نمونه‌برداری انجام گرفت. نتایج نشان‌دهندهٔ ناپایداری داده‌های ثبت‌شده و تغییرات مداوم پارامترهای کیفی آب ثبت‌شده در عامل اول در دو ایستگاه تمر و گالیکش است. در ایستگاه تمر عامل SAR بیشترین آنتروپی را در طول ثبت داده‌ها داشت. در ایستگاه‌های گالیکش، تقی‌آباد، بصیرآباد، رامیان و تنگراه مقدار Mg^{+2} دارای بیشترین وزن بود که نشان‌دهندهٔ تغییرات مداوم است و این تغییرات را می‌توان به ارتباط با تشکیلات زمین‌شناسی نسبت داد. در خوشهٔ دوم که دو پارامتر EC و TDS در آن قرار گرفته‌اند، داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه لزوره بیشترین ناپایداری را دارند. از طرف دیگر، مقادیر زیاد وزن آنتروپی این دو پارامتر در مقایسه با دیگر پارامترهای کیفی بررسی‌شده، بیانگر تأثیرگذاری بیشتر نسبت به سایر مشخصه‌هاست. البته باید توجه داشت که علاوه‌بر عوامل طبیعی، به‌احتمال زیاد فعالیت‌های انسانی از جمله تغییرات کاربری اراضی، فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در ناپایداری نمونه‌های برداشت‌شده در ایستگاه‌های مختلف تأثیر اساسی دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان این تحقیق بر خود لازم می‌دانند از همکاری صمیمانهٔ مسئولان شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان در خصوص آمار و اطلاعات ضروری برای اجرای این مطالعه تقدیر و تشکر کنند.

منابع

[۱]. خزایی موغانی، سولماز؛ نجفی‌نژاد، علی؛ محسنی، عظیم؛ شیخ، واحدبردی،۱۳۹۲، تغییرات مکانی و فصلی رسوب معلق درایستگاه‌های واقع‌درطول رودخانه گرگانرود، استان‌گلستان، پژوهشنامهٔ مدیریت حوضهٔ آبخیز، سال چهارم، شمارهٔ ۷: ۱۵-۱.

[۲]. زارع گاریزی، آرش؛ سعدالدین، امیر، شیخ، واحد بردی؛ سلمان ماهینی، عبدلرسول،۱۳۹۱، بررسی روند تغییرات بلندمدت متغیرهای کیفیت آب رودخانهٔ چهل‌چای (استان گلستان)، مجلهٔ پژوهش آب ایران، سال ششم، شمارهٔ ۱۰: ۱۶۵-۱۵۵.

[۳]. سید خادمی، مرتضی، ۱۳۷۹، پایش نیترات و بررسی نسبت کلرید به نیترات در آبهای زیرزمینی شهر گرگان، مجموعه مقالات چهارمین کارگاه آموزشی، تخصصی پایش کیفی منابع آب، شیراز.

[۴]. شیرازی، محمد رضا، ۱۳۷۹. پایش کیفی منابع آب تهران، مجموعه مقالات چهارمین کارگاه آموزشی، تخصصی پایش کیفی منابع آب، شیراز ، ایران.

[۵]. کبودوندپور، شهرام، ۱۳۷۳، اثرات فاضلاب‌های شهری و صنعتی بر کیفیت رودخانهٔ قشلاق سنندج، کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس نور.

[۶].کلانتری، نصرا..؛ رحیمی، محمد حسین؛ اکبری، اکبر، ۱۳۸۸، بررسی هیدروشیمیایی دشت میان آب با استفاده از روش‌های آماری، نمودارهای هیدروشیمیایی و منطق فازی. فصلنامهٔ زمین‌شناسی ایران، سال سوم، شمارهٔ نهم: ۲۵-۱۵.

[۷].معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۰، گزارش اقتصادی اجتماعی استان گلستان: ۳۹۶.

[۸]. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۸۸، راهنمای پایش کیفیت آب سطحی، نشریهٔ شمارهٔ ۵۲۲: ۲۰۳.

[9]. Chatfield, C. and A. J. Collin, 1980, Introduction to Multivariate Analysis. Published in the USA by Chapman and Hall, New York NY.

[10]. Fetter, C. W., 1990, Applied hydrogeology, 3rd Ed., MacMillan Pub, 592 p.

[11]. GÜler, C., G.D. Thyne, J. E. Mc Cary, and K. A. Turner, 2002, Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, Hydrogeology Journal, vol. 10, pp.455-474.

[12]. Helena, B., R. Pardo, M. Vega, E. Barrado, J. M. Fernandez, and L. Fernandez, 2000, Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) byprincipal component analysis, Water Research, vol 34 (3), pp. 807–816.

[13]. Jollife, I. T., 1986, Principal component analysis, Second Ed., Springer, 271. Pages.

[14]. Karpuzcu, M., S. Senes, and A. Akkoyunlu, 1987, Design of monitoring systems for water quality by principal component analysis and a case study. Proceedings of the International Symposium on Environmental Management (Environment 87), vol1, 673-690, Istanbul.

[15]. Liu, C. W., C. S. Jang, C. P. Chen, C. N. Lin, and K. L. Lou, 2008, Characterization of groundwater quality in Kinmen Island using multivariate analysis and geochemical modeling, Hydrological Processes, vol 22 (3), pp. 376-383.

[16]. Love, D., D. Hallbauer, A. Amos, and R. Hranova, 2004, Factor analysis as a tool in groundwater quality management: Two southern African case studies, Physics and Chemistry of the Earth, vol 29(15-18), pp. 1135-1143.

[17]. Mogheir, Y., V. P. Singh, and J. L. M. P. Lim, 2006, Spatial assessment and redesign of groundwater quality monitoring network entropy theory, Gaza Strip, Palestine, Hydrogeology Journal, vol 14, pp. 700-712.

[18]. Paliwal, R., P. Sharma, and A. Kansal, 2007, Water quality modeling of the river Yamuna (India) using QUAL2E-UNCAS, Journal of Environmental Management, vol 83, pp.131–144

[19]. Rango, G., M. De Luca, and G. Loele, 2007, An Application of Cluster Analysis and Multivariate Classification Methods to Spring Water Monitoring Data, Micro Chemical Journal, vol 87, pp. 19-127.

[20]. Ryberg, K. R., 2006, Cluster analysis of water-quality data for Lake Sakakawea, Audubon Lake, and Mc Clusky Canal, Central North Dakota, 1990-2003: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5202, 38 P.

[21]. Satyanarayana M. and P. Periakali, 2003, Geochemistry of ground water in ultra basic peninsular gneissic rocks, Salem district, Tamil Nadu, Journal of the Geological Society of India, vol 62, pp. 63–73.

[22]. Shannon, C. E., 1948, A mathematical theory of communication, Bell Syst. Tech. J., vol 27, pp. 379-423.

[23]. Singh, K. P., A. Malik, D. Mohan, and S. Sinha, 2004, Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River, India, Water Research, vol 38, pp. 3980–3992.

[24]. Singh, V. P., 1997, The use of entropy in hydrology and water resources, Hydrological Processes, vol 11, pp. 587-626

[25]. Wang, Y. and Z. Luo Tma, 2001, Geostatistical and geochemical analysis of surface water leakage into ground water on a regional scale: A case study in the Liulin karst system, northwestern China, Journal of Hydrology, vol 246, pp. 223–234.

[26]. Wunderlin, D.A., M. Diaz, M. M. V., Ame, S. F. Pesce, A. C. Hued, and M. Bistoni, 2001, Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia river basin (Cordoba-Artgentina), Water Research, vol 35 (12), pp. 2881–2894.

[27]. Yidand, S., M. D. Ophori, and B. Banoeng-Yakubo, 2008, A Multivariate Statistical Analysis of Surface Water Chemistry Data- the Ankobra Basin, Ghana, Journal of Environmental Management, vol. 86, pp.80-87.

[28]. Yuan, Y., and J. K. Mitchell, 1999, A Method to Evaluate Pollutant Loads from Tile Drains. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol 42(5), pp. 1313-1319.

[29]. Zhang J, W. W. Huang, R. Letolle, and C. Jusserand, 1995, Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China – Weathering processes and chemical fluxes, Journal of hydrology, vol 168, pp. 173–203.