مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۱۸۳-۱۷۱

ارزیابی کاربرد آنتروپی شانون در تعیین کیفیت آب‌های سطحی (مطالعه موردی: رودخانه‌های کارون و بابلرود)

فاطمه آخونی پورحسینی[۱]، کیومرث ابراهیمی[۲*]
۱. دانشجوی دکتری، مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸

چکیده
هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی کاربرد آنتروپی شانون در تعیین کیفیت آب‌های سطحی می‌باشد. به‌منظور تخصیص وزن به هر یک از پارامترهای کیفیت آب از روش آنتروپی شانون و وزن‌دهی‌های سازمان بهداشت جهانی استفاده شد. در این پژوهش داده‌های ماهانه کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، سدیم، سولفات، EC، pH و TDS از سال ۱۳۹۴-۱۳۴۷ برای رودخانه کارون در ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز، دارخوین، گتوند و ملاثانی و رودخانه بابلرود در ایستگاه‌های هیدرومتری قرآن تالار و کشتارگاه تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که آنتروپی شانون می‌تواند به‌خوبی وزن‌دهی را انجام دهد و اختلاف جزئی بین وزن‌دهی آنتروپی شانون و وزن‌دهی‌های سازمان بهداشت جهانی وجود دارد. وزن‌دهی‌های حاصل از آنتروپی شانون و پارامترهای مؤثر در کیفیت آب در رودخانه کارون در ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز pH=۰/۱۵، دارخوین TDS=۰/۱۱، گتوند EC=۰/۱۳ و ملاثانی pH=۰/۱۵، هم‌چنین در رودخانه بابلرود در ایستگاه هیدرومتری قرآن تالار و کشتارگاه وزن‌دهی‌ها بر طبق آنتروپی شانون و پارامترهای مؤثر در کیفیت آب به‌ترتیب pH=۰/۱۵ و TDS=۰/۱۴ می‌باشد. مقادیر شاخص کیفیت آب در رودخانه کارون با توجه به شاخص WQI در بازه عالی و خوب و برای رودخانه بابلرود در وضعیت عالی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: رده‌بندی، شاخص کیفیت آب، عدم قطعیت، وزن‌دهی.

Shannon's Entropy Evaluation on Determination of Surface Water Quality (Case Studies: Karun and Babolrood Rivers)

Fatemeh Akhoni Pourhosseini[1], Kumars Ebrahimi[2*]
1-PhD Student of Water Resources Engineering, University of Tehran, Karaj, IRAN
2- Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, IRAN
Received: January 13, 2019 Accepted: May 18, 2019

Abstract
The main purpose of this paper is to investigate the Shannon's Entropy in surface water quality evaluation. To achieve this aim, the Shannon's entropy and the World Health Organization methods have been used to assign weights of the water quality parameters. Monthly hydrometric data including; Ca, Mg, HCO_3, Na, SO_4, EC, pH, TDS were analyzed, form 1968-2015, which were measured and recorded at Ahwaz, Darkhovein, Gotvand and Molasani stations of Karun River and as well as; Quran-Talar and Koshtargah hydrometric statins of Babolrood River. The above mentioned rivers are flowing in south and north of IRAN, respectively. The result demonstrated the accuracy of the Shannon's Entropy performance. As the result showed, the Shannon's Entropy result gave an encouraging level of agreement with the WHO's result. However, there were small discrepancies between these two results. Shannon's entropy weights and the effective parameters of Karun River water quality at different hydrometric stations are Ahwaz pH=0.15, Darkhovein TDS=0.11, Gotvand EC=0.13 and Molasani pH=0.15, respectively, and in a same way for Babolrood River at stations; Quran-Talar pH=0.15 and Koshtargah TDS=0.14, respectively. According to the water quality index values of Karun River, its waters are classified in both excellent and good conditions. However, based on the mentioned values the Babolrood River is classified in excellent condition.

Keywords: Classification, Uncertainty, Water quality index, Weighting

* نویسنده مسئول Email:EbrahimiK@ut.ac.ir

مقدمه

نقش آب به‌عنوان شکل‌دهنده و ضامن بقای تمدن‌ها در طول تاریخ ثابت شده است. در سه دهه پایانی قرن بیستم نگرانی در خصوص کیفیت آب به‌طور گسترده‌ای افزایش یافت، به‌طوری‌که در حال حاضر کیفیت آب اهمیتی به اندازه کمیت آن پیدا کرده است (۲۳). آب‌های سطحی به‌ویژه رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع تأمین آب جهت مصارف شرب و صنعت می‌باشد (۵). پایش کیفی این منابع با توجه به خشکسالی‌های اخیر و توسعه شهری و روستایی یکی از موارد مهم در حیطه محیط زیست محسوب می‌گردد (۸). بنابراین ارزیابی مستمر پارامترهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آب بخش ضروری برنامه‌های کنترل کیفیت آب می‌باشد. از زمانی‌که داده‌های کیفیت آب از طریق نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل جمع آوری شد، نیاز به بیان به شکل قابل فهم احساس می‌شود. یک راه توصیف کیفیت آب، فهرست‌کردن غلظت پارامتر عناصری است که در نمونه آب موجود باشند. چنین فهرستی فقط برای متخصصین آب قابل استفاده است. فرمول‌بندی و استفاده از شاخص‌ها توسط سازمان‌های مسئول و کنترل کیفیت آب بسیار توصیه شده است (۱۹). اطلاع از وضعیت کیفی آب‌های سطحی این امکان را فراهم می‌سازد تا ضمن استفاده از آن در موارد مختلف شیوه‌هایی اتخاذ شود تا کم‌ترین آسیب به این منابع وارد شود. تکنیک‌های مختلفی برای سنجش کیفیت آب در دنیا مطرح شده است، که از این میان شاخص‌های کیفی یکی از روش‌های پرکاربرد و ساده می‌باشند. با توجه به این‌که ایران جزو کشورهای خشک محسوب می‌شود توسعه منابع آبی قابل استفاده، حفظ و بهبود کیفیت آن امری حیاتی است. به این ترتیب با ارائه تصویر صحیح از وضعیت کیفی آب‌های سطحی علاوه بر افزایش مشارکت مردمی در حفظ و سلامت و کیفیت آب‌های سطحی، ابزاری مفید در اختیار قرار داده است تا هرگونه تصمیم‌گیری مدیریتی با آگاهی بیش‌تر اتخاذ شود و ضرورت اعمال شیوه‌های مدیریتی منابع آب در هر نقطه مشخص گردد (۶). شاخص کیفیت آب[1] روشی شناخته‌شده برای بیان کمی سطح کیفیت آب ارائه می‌دهد (۲۵). روش شاخص کیفیت آب در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقی با بررسی کیفیت آب رودخانه دز در محل ایستگاه دزفول بر اساس نمودار شولر به این نتیجه رسیدند که آب از نظر شرب در وضعیت خوب قرار دارد و دلیل آن را کم‌بودن فعالیت‌های کشاورزی و مناطق مسکونی اطراف رودخانه تا قبل از این ایستگاه عنوان کردند (۱۰). در تحقیق دیگری کارایی ترکیب GIS و WQI در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان ساوه- نوبران بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که ۶۵ درصد از نمونه‌های آب در طبقه‌بندی بد، خیلی بد و نامناسب برای شرب قرار می‌گیرد (۲۸). اثر فاضلاب کارخانه صابون شهر خرمشهر بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از WQI ارزیابی شد که بر اساس نتایج، WQI در ورودی شهر ۵۴ و در خروجی ۴۵ محاسبه شد که به معنای تغییر طبقه کیفیت آب از متوسط به بد می‌باشد (۹). بررسی ارتباط بین پارامترهای کیفیت آب و تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز زاینده‌رود انجام و نتایج حاکی از کاهش کیفیت آب رودخانه زاینده‌رود به‌دنبال تغییرات کاربری اراضی در این حوضه بود (۱۴). برای سال‌های آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۰ غلظت نیترات و فسفات رودخانه بابلرود و تغییرات دبی آن بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان غلظت نیترات و فسفات به ترتیب ۱۴/۱ و ۰/۵۸۶ میلی‌گرم در لیتر بوده و کم‌تر از حد مجاز برای رهاسازی آن‌ها در آب سطحی می‌باشد (۲). در مطالعه‌ای دیگر بررسی اثرات آلودگی زیست‌محیطی بر

1. Water Quality Index

کیفیت آب رودخانه بابلرود نشان داد که رهاسازی آلودگی از بالادست به پایاب صورت می‌گیرد و وضع آب از نظر اکوسیستم آبزیان نامطلوب می‌باشد (۱۲). جهت مشخص‌نمودن معدل شاخص کیفیت آب آبخوان شهر تهران تعداد ۷۱ حلقه چاه انتخاب شد. عدد شاخص کیفیت آب زیرزمینی با روش سازمان بهداشت جهانی تعیین گردید. نتایج نشان داد که کیفیت در طول زمان کاهش پیداکرده است و نقاط شرقی و جنوبی‌تر شهر تهران دارای مقدار عددی شاخص بالاتری می‌باشند که بیان‌گر کیفیت پایین‌تر آب جهت شرب می باشد (۱۸). میزان تأثیرپذیری رودخانه دیناچال از آلودگی‌های محیطی با کاربرد چهار روش تجربی، جهت بررسی مدیریت کیفی منابع آبی مطالعه شد. نتایج نشان داد که روش عددی آپ استریم با استفاده از ضریب هوادهی بولتون بهترین جواب را ارائه می‌دهد (۱۶). در تحقیق دیگری یک شاخص کیفی آنتروپی برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی لنجانات اصفهان براساس استانداردهای WHO برای آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد که از روش EWQI به‌عنوان یک روش مفید جهت تعیین کیفیت آب زیرزمینی می‌توان استفاده کرد (۲۰).

تئوری آنتروپی شانون اولین بار توسط شانون[۱] توسعه داده شد و بعد از آن به‌طور گسترده در مسائل مختلف علمی مورد استفاده قرار گرفت (۳۱). در ایران تنها کاربرد آنتروپی شانون در بحث کیفیت آب (۱) در مطالعه کیفیت آب رودخانه صوفی‌چای انجام شده است که نتایج آن نشان داد مقادیر بزرگ شاخص WQI رابطه نزدیکی با مقادیر پایین مقدار آنتروپی یون‌های بی‌کربنات و منیزیم دارد (۱). در این مطالعه، روش آنتروپی شانون برای انتخاب معیارهای ارزیابی با درنظرگرفتن وزن‌دهی و هدف معیارها جهت استفاده از سیلاب در حوضه آبخیز شمشک مورد استفاده قرار گرفت. روش پیشنهادی شامل دو نوع تحلیل حساسیت برای بررسی اثرات تغییرات وزن معیارها می‌باشد. با توجه به مدل پیشنهاد شده Sh2 سیلاب می‌تواند به‌طور بالقوه در زمینه‌های مختلف با مدیریت آبخیزداری مورد استفاده قرار گیرد (۲۲). در مطالعه دیگری اصل حداکثر آنتروپی برای مدل‌سازی فرآیند بارش- رواناب به‌کار رفته است که در آن عبارت آنتروپی شرطی بر اساس قیود معین برای به‌دست‌آوردن توزیع شرطی جریان بر اساس رخداد بارش معین بیشینه شد. آنگاه پارامترهای تابع توزیع مذکور بر اساس اطلاعات موجود شامل میانگین سری زمانی داده‌های بارش و رواناب، کوواریانس آن‌ها تخمین زده شد (۳۰). کیفیت آب رودخانه تأثیر قابل‌توجهی بر جمعیت در منطقه دارد. در این مطالعه شش شاخص کیفیت آب از ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه برهمانی برای ارزیابی کیفیت آب منطقه بررسی شد. وزن شاخص‌ها با استفاده از آنتروپی شانون برآورد شد. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده کیفیت کلی آب در طول فصل‌های خشک بهبود یافته است، درحالی‌که در فصل‌های مرطوب به‌علت رقیق‌شدن آلاینده‌ها کیفیت آب کم می‌شود. ارزیابی جامع نشان می‌دهد که آب برای مناطق حفاظت‌شده جهت آشامیدنی قابل قبول می‌باشد (۲۹). تئوری آنتروپی انتقال اطلاعات در طراحی شبکه باران‌سنجی در تایوان نیز مورد استفاده قرارگرفت. مطالعه مذکور در مورد اثر تغییرات مکانی و زمانی بارش با محاسبه حداکثر آنتروپی مشترک انجام گرفت. نتایج بیانگر این بود که محاسبه حداکثر آنتروپی مشترک با توجه به اثر تغییرات مکانی و مقایسه با مقیاس‌های زمانی بارش در تعیین تعداد باران‌سنج-ها برای منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشد (۲۱). آنتروپی شانون به‌عنوان یک ابزار ارزیابی کیفیت آب، جهت بهینه‌سازی

۱. Shannon

سیستم تصفیه آب در رودخانه باکی آسام (هند) مورد مطالعه قرار گرفت. آنتروپی شانون و استانداردهای آبیاری جهت ساخت کانال‌های آبیاری استفاده شد. پارامترهایی مانند سدیم، کلر، کربنات، اسیدیته، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد معلق در این مطالعه ارزیابی گردید که نشان داد وجود عناصر سنگین مانند کروم و سرب به‌عنوان خطری برای سلامت انسان محسوب می‌شود. این مطالعه جامع، نشان‌دهنده اهمیت آنتروپی شانون در نظارت و مدیریت کیفیت آب می‌باشد (۳۴). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه پنجیانگ[۱] شمال‌غرب چین با استفاده از شاخص آنتروپی وزن‌دار نتایج قابل اعتماد و مناسبی را در اختیار قرار داد (۲۴).

همان‌طورکه در مرور تحقیقات بالا اشاره شد، در سال های اخیر کیفیت آب رودخانه‌های کارون و بابلرود مورد مطالعه قرار گرفته است و مشخص شده است که آلودگی این رودخانه‌ها تحت تأثیر آلاینده‌های مختلفی از جمله زه-آب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و صنعتی می‌باشد (۹، ۲ و ۱۲). لذا پایش وضعیت کیفیت آب‌های سطحی و روند تغییرات آن در طول زمان با هدف آگاهی از وضع حاکم و اتخاذ تمهیدات مختلف در راستای صیانت از کیفیت منابع آب ضروری است (۳، ۴، ۱۵، ۱۷، ۲۷، ۲۸ و ۳۰). باتوجه به کارآیی آنتروپی شانون به‌عنوان یک روش نوین در تعیین وزن پارامترها و هم‌چنین تعیین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت منابع آب سطحی که در مرجع (۱) به کاربرد آنتروپی شانون در تعیین کیفیت آب رودخانه صوفی‌چای اشاره شده است، در پژوهش حاضر به بررسی کارآیی آنتروپی شانون در مقایسه با رویکرد وزن‌دهی سازمان بهداشت جهانی (WHO) در شش ایستگاه از دو رودخانه کارون و بابلرود برای یک دوره زمانی بلندمدت پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه و داده‌های مورداستفاده

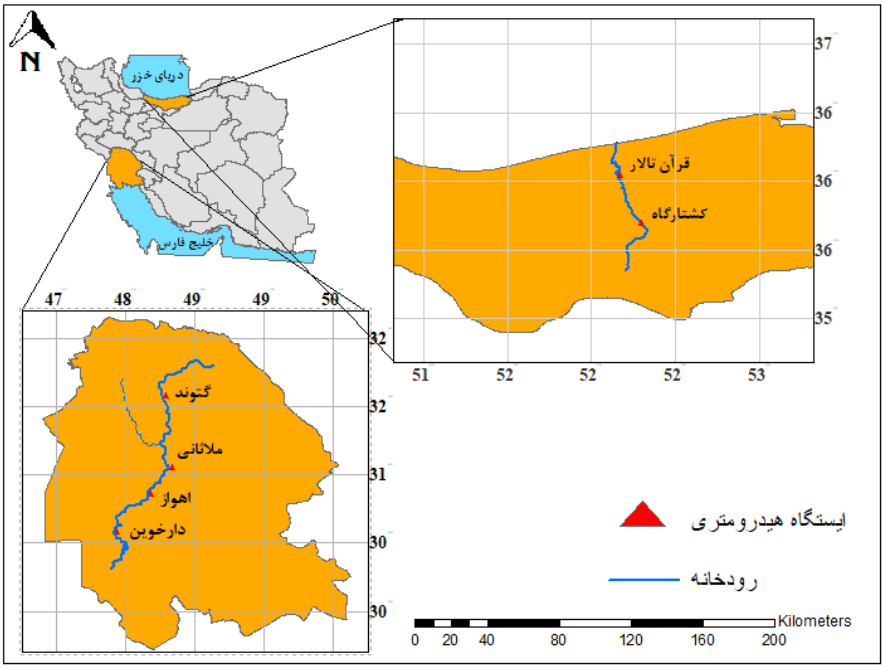
حوضه آبریز کارون یکی از ۳۰ حوضه آبریز درجه دو کشور و بخشی از حوضه آبریز اصلی خلیج فارس می‌باشد. از نقطه‌نظر موقعیت جغرافیایی، حوضه آبریز کارون در محدوده "۹۵ ´۲۲ °۴۹ تا "۳۸ °۵۲ طول شرقی و"۷۱ ´۱۶ °۳۰ تا "۱ ´۳۸ °۳۲ عرض شمالی واقع شده است که با مساحتی بالغ بر ۶۸۹۲۰ کیلومترمربع یکی از حوضه‌های آبریز بزرگ خلیج فارس می‌باشد و به‌ترتیب استان‌های چهارمحال و بختیاری، اصفهان، کهکیلویه و بویراحمد، خوزستان و فارس از سطح حوضه را در برمی‌گیرد. در حوضه آبریز کارون ۱۰۶ ایستگاه باران‌سنجی توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران احداث شده است که ۹۱ ایستگاه کماکان فعال می‌باشد. برای دست‌یابی به اطلاعات لازم در مورد ارزیابی کیفیت آب رودخانه کارون از داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران از سال ۱۳۹۴-۱۳۴۷ استفاده شد. ایستگاه‌های هیدرومتری شامل گتوند، ملاثانی، دارخوین و اهواز می‌باشد که جانمایی آن‌ها در شکل(۱) ارائه شده است.

رودخانه بابلرود یکی از رودهای پر آب شمال کشور می‌باشد که در استان مازندران قرار دارد. این رودخانه از کوه‌های البرز در شهرستان سوادکوه با حداکثر ارتفاع ۳۷۱۰ متری سرچشمه می‌گیرد. طول بابلرود ۷۸ کیلومتر می‌باشد و پس از گذر از جنگل‌های سوادکوه، شالیزارها و شهرهای بابل و بابلسر، در ارتفاع ۱۰- متری به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه حوضه‌ای به مساحت ۱۷۴۶/۴۲ کیلومترمربع را زهکشی می‌کند. برای دست‌یابی به اطلاعات لازم در مورد ارزیابی کیفیت آب بابلرود از داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران از ۱۳۹۴-۱۳۴۷ در ایستگاه‌های هیدرومتری قرآن‌تالار و کشتارگاه استفاده شد.

---

۱. Pengyang

جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری مذکور در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های موردمطالعه رودخانه‌های کارون و بابلرود

پارامترهای مورداستفاده در این مطالعه شامل سولفات (SO_4)، کل مواد جامد معلق (TDS)، منیزیم (Mg)، اسیدیته (pH)، کلسیم (Ca)، هدایت الکتریکی (EC)، کلراید (Cl)، بی‌کربنات (HCO_3) و سدیم (Na) می‌باشد.

شاخص‌های کیفیت آب

معمولاً برای مصارف آشامیدنی، صنعت و کشاورزی کیفیت منابع آب را به‌کمک یک عدد و در یک زمان و مکان مشخص و بر اساس پارامترهای کیفی مربوطه بیان می‌کنند (۲۸). با محاسبه زیر شاخص‌های مربوط و وزن‌دهی، یک مقدار نهایی برای شاخص‌ها محاسبه می‌شود. به‌طور نمونه یک روش علمی توسعه‌داده‌شده جهت ایجاد و ساخت شاخص‌های کیفی آب توسط استایگر و همکاران (۳۳) در قالب سه مرحله اصلی تشریح شد. مرحله انتخاب، شامل انتخاب تعدادی از پارامترهای کیفیت آب متناسب با هدف موردنظر می‌باشد. مرحله استانداردسازی نیز شامل توسعه یک منحنی رتبه‌بندی تجربی برای هر یک از پارامترهای انتخاب‌شده می‌باشد که گویای نوع رابطه میان هر یک از متغیرها با زیرشاخص‌های بی‌بعد مربوطه خواهد بود. این منحنی‌های تجربی معمولاً نتیجه مطالعات فردی و منطق-هایی بوده که به دلیل تعداد بالای فاکتورهای تأثیرگذار، همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه هستند. در مرحله بعدی مقادیر خرده‌شاخص به‌دست‌آمده در مرحله قبل از طریق یک عملگر ریاضی یا یکی از روش‌های میانگین‌گیری حسابی، هندسی و یا هارمونیک و با توجه به وزن نسبی مجزای هر پارامتر، در نهایت در یک پارامتر تجمیع‌یافته و مجزا تحت عنوان شاخص کیفی آب حاصل خواهند شد (۳۷).

محاسبه شاخص کیفی آب شامل سه مرحله زیر است:

۱) در مرحله اول، به هر یک از پارامترها، وزنی با عنوان i اختصاص می‌یابد. این وزن‌دهی می‌تواند از طریق رویکرد آنتروپی شانون صورت گیرد.

آنتروپی شانون

شانون (۱۹۴۸) نشان داد که وقایع با احتمال وقوع زیاد اطلاعات کم‌تری از خود نشان می‌دهند و برعکس هرچقدر احتمال وقوع یک رخداد کم‌تر باشد، اطلاعات حاصل از آن بیش‌تر می‌باشد (۳۱ و ۳۵). با به‌دست‌آوردن اطلاعات جدید، در واقع عدم قطعیت‌ها کاهش یافته و ارزش اطلاعات جدید برابر با مقداری است که از عدم قطعیت کاسته شده است. در نتیجه عدم قطعیت و اطلاعات پارامترها وابسته به هم هستند. به‌عبارت دیگر، از تئوری آنتروپی می‌توان به‌عنوان شاخصی برای کمی‌کردن میزان عدم آگاهی و دانش نسبت به مشخصات یک سامانه، استفاده کرد (۱۱). به مراحل محاسبه میزان آنتروپی شانون در ادامه اشاره شده است. طبق داده‌های واقعی ماتریس Y برای نمونه‌ها به‌صورت زیر ساخته می‌شود، نحوه تدوین ماتریس آنتروپی شانون به این صورت می‌باشد که ابتدا داده‌ها برای ایستگاه اول با توجه به پارامتر اول در ستون یک قرار می‌گیرد سپس در همان ایستگاه در ستون دوم پارامتر دوم قرار می‌گیرد و این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که پارامترهای ایستگاه مدنظرخاتمه یابد سپس به سراغ ایستگاه دوم در ماتریس دیگر خواهیم رفت (رابطه۱) (۳۲):

$$Y = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & . & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & . & x_{2n} \\ . & . & . & . \\ x_{m1} & x_{m2} & . & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در این رابطه، m نمونه برای ارزیابی (i=1, 2, … , m) وجود داشته باشد. به‌طوری‌که هر نمونه n پارامتر ارزیابی (1, 2, … ,n) داشته باشد.

باتوجه به این‌که پارامترهای ورودی دارای واحدهای یکسانی باشند معمولاً با استفاده از تابع نرمال‌سازی، داده‌ها آماده‌سازی می‌شوند. روش‌های متعددی به‌منظور نرمال‌سازی وجود دارند. در پژوهش حاضر از رابطه (۲) جهت نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij_{min}}}{x_{ij_{max}} - x_{ij_{min}}} \quad (۲)$$

در این رابطه، x_{ij} مقادیر داده‌های مشاهداتی، y_{ij} داده‌های استانداردشده، xij_{max} و xij_{min} به‌ترتیب معرف داده‌های حداکثر و حداقل می‌باشد.

ماتریس داده‌های خام پس از نرمال‌سازی به‌صورت رابطه (۳) خواهد بود:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & . & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & . & y_{2n} \\ . & . & . & . \\ y_{m1} & y_{m2} & . & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

سپس نسبت مقدار شاخص پارامتر j در نمونه i بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} y_{ij}} \quad (۴)$$

دراین رابطه، P_{ij} احتمال رخداد مشترک i و j می‌باشد. به‌منظور این‌که P_{ij} در معادله (۴) ممکن است صفر شود و صفرشدن این پارامتر در معادلات بعدی مشکل ایجاد کند تصحیح رابطه (۴) به‌صورت رابطه (۵) انجام می‌شود (۳۷).

$$P_{ij} = \frac{(y_{ij}+0.0001)}{\sum_{i=1}^{m}(y_{ij}+0.0001)} \quad (۵)$$

و سپس اطلاعات آنتروپی به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} P_{ij} \ln P_{ij} \quad (۶)$$

دراین رابطه، P_{ij} احتمال رخداد مشترک i و j می‌باشد.

سپس میزان آنتروپی می‌تواند از رابطه (۷) محاسبه شود:

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \quad (۷)$$

در این رابطه، e_j اطلاعات آنتروپی j می‌باشد.

۲) محاسبه نرخ کیفی (q_i) برای هر پارامتر به‌صورت نسبی بر اساس سازمان بهداشت جهانی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد (۳۵).

$$q_j = \frac{c_j}{s_j} * 100 \quad (۸)$$

در این رابطه، C_j غلظت هر پارامتر شیمیایی در هر نمونه آب برحسب میلی‌گرم بر لیتر و S_j غلظت استاندارد جهانی همان پارامتر برای کیفیت آب آشامیدنی برحسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

۳) نهایتاً محاسبه شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از رابطه (۹) امکان‌پذیر است.

$$WQI = \sum_{j=1}^{n} w_j . q_j \qquad (۹)$$

در این رابطه، q_j نسبت غلظت هر پارامتر به مقدار استاندارد آن برحسب درصد است و w_j میزان آنتروپی پارامتر j را توصیف می‌کند.

جدول ۱. پارامترهای کیفی آب و وزن‌دهی آن بر اساس سازمان بهداشت جهانی

ردیف	پارامتر	واحد	وزن
۱	کلسیم (Ca)	ppm	۰/۵
۲	منیزیم (Mg)	ppm	۰/۰۲
۳	سولفات (SO_4)	ppm	۰/۱۱
۴	کلراید (Cl)	ppm	۰/۰۸
۵	سدیم (Na)	ppm	۰/۰۵
۶	بی‌کربنات (HCO_3)	ppm	۰/۰۸
۷	کل مواد جامد معلق (TDS)	ppm	۰/۱۱
۸	اسیدیته (pH)	–	۰/۱۱
۹	هدایت الکتریکی (EC)	ds/m	۰/۱۱

شاخص سازمان بهداشت جهانی

این شاخص توسط سازمان بهداشت جهانی درسال ۱۹۹۳ تدوین شده است. جهت محاسبه این شاخص حداقل سه پارامتر کیفی مورد نیاز می‌باشد. با توجه به استانداردهای آب شرب که توسط سازمان بهداشت جهانی به‌وجود آمده است، کیفیت آب را بین اعداد صفر تا بی‌نهایت مشخص می‌نماید. هرچه عدد شاخص بیش‌تر باشد، آب کیفیت کم‌تری جهت مصرف شرب خواهد داشت. این شاخص در سه مرحله محاسبه می‌گردد. در مرحله اول هرکدام از پارامترهای مورد بررسی باید با توجه به استاندارد شاخص و رده اهمیت وزن‌دار شوند. جهت محاسبه اوزان از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود:

$$W_t = \frac{w_t}{\sum_{t=1}^{n} w_t} \times 100 \qquad (۱۰)$$

در رابطه فوق وزن پارامتر خواهد بود. در قسمت دوم محاسبات شاخص نسبت غلظت پارامترها نسبت به استاندارد WHOمورد سنجش قرار خواهد گرفت. این مقایسه توسط فرمول (۹) صورت می‌گیرد. در جدول (۱) میزان وزن‌دهی پارامترها برطبق سازمان جهانی بهداشت آورده شده است.

بعد از محاسبه شاخص WQI طبق جدول (۲) کیفیت منابع آب از نظر مصرف شرب طبقه‌بندی می‌شود (۲۶).

جدول ۲. کلاس‌بندی کیفی آب بر اساس شاخص WQI

کیفیت آب	رتبه	WQI
عالی	۱	۵۰>
خوب	۲	۵۰ – ۱۰۰
متوسط	۳	۱۰۰ – ۱۵۰
ضعیف	۴	۱۵۰ – ۲۰۰
خیلی ضعیف	۵	۲۰۰<

در مقاله حاضر، ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل نسخه ۲۰۱۶ و تعیین کیفیت آب و وزن هر پارامتر و مهم‌ترین پارامتر در تعیین شاخص WQI در محیط متلب ۲۰۱۴ کدنویسی شد.

برای مقایسه نتایج حاصل از وزن‌دهی روش‌های آنتروپی شانون و سازمان بهداشت جهانی از شاخص‌های آماری ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)[۱] و معیار میانگین مطلق خطا (MAE)[۲] استفاده گردید.

که در فرمول‌های (۱۱) و (۱۲)، x_i مقدار وزن‌دهی آنتروپی شانون، y_i مقدار وزن‌دهی سازمان بهداشت جهانی داده‌های متناظر می‌باشند. مدلی بهترین نتیجه را خواهد داشت که برای این دو معیار میزان کم‌تری داشته باشند.

۱. Root Mean Square Error

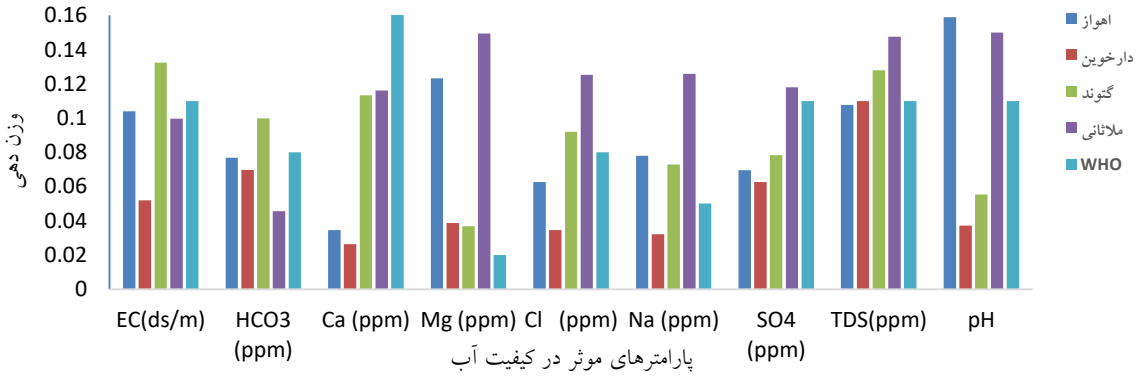
۲. Mean Absolute Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}{N}} \quad (۱۱)$$

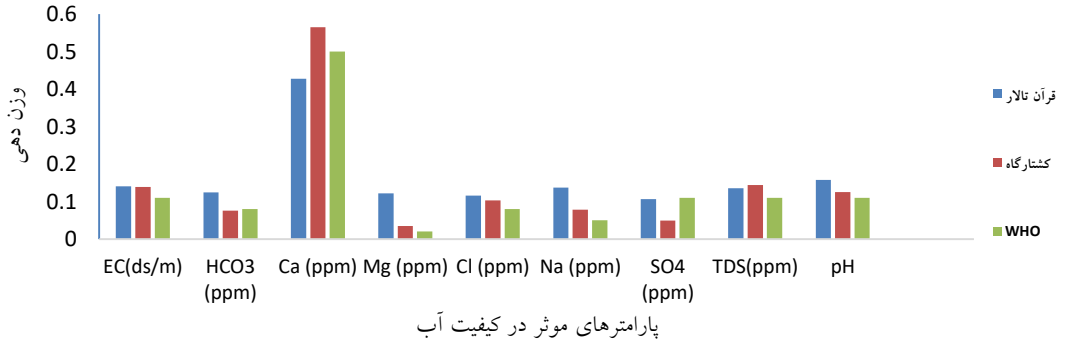
$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i| \quad (۱۲)$$

نتایج و بحث

همان‌طورکه در مواد و روش‌ها تشریح شد، به‌منظور تعیین کیفیت آب رودخانه‌های کارون و بابلرود، ابتدا برای مشخص‌کردن وزن هرکدام از پارامترها از آنتروپی شانون استفاده گردید. سپس نتایج به‌دست‌آمده با وزن‌دهی سازمان جهانی بهداشت مقایسه شد. پارامترهای مورداستفاده شامل سولفات (SO_4)، کل مواد جامد معلق (TDS)، منیزیم (Mg)، اسیدیته (pH)، کلسیم (Ca)، هدایت الکتریکی (EC)، کلراید (Cl)، بی‌کربنات (HCO_3)، سدیم (Na) می‌باشند. با توجه به آنتروپی شانون، مقادیر بیش‌تر وزن آنتروپی هر پارامتر نشان‌دهنده تأثیرگذاری بیش‌تر آن پارامتر نسبت به سایر پارامترها است (۲۰). بنابراین در رودخانه کارون به‌ترتیب در ایستگاه هیدرومتری اهواز pH، دارخوین TDS، گتوند EC و در ایستگاه هیدرومتری ملاثانی pH بیش‌ترین تأثیرگذاری را داشته‌اند. رودخانه بابلرود در ایستگاه هیدرومتری قرآن‌تالار pH و در ایستگاه هیدرومتری کشتارگاه TDS بیش‌ترین تأثیر را در کیفیت آب ایفا می‌کند. شکل (۲) وزن آنتروپی محاسبه‌شده پارامترهای کیفی رودخانه‌های کارون و بابلرود را نشان می‌دهد.



الف) رودخانه کارون



ب)رودخانه بابلرود

شکل۲. وزن‌های آنتروپی محاسبه‌شده پارامترهای کیفی رودخانه‌های کارون و بابلرود

مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۱۸۳-۱۹۷

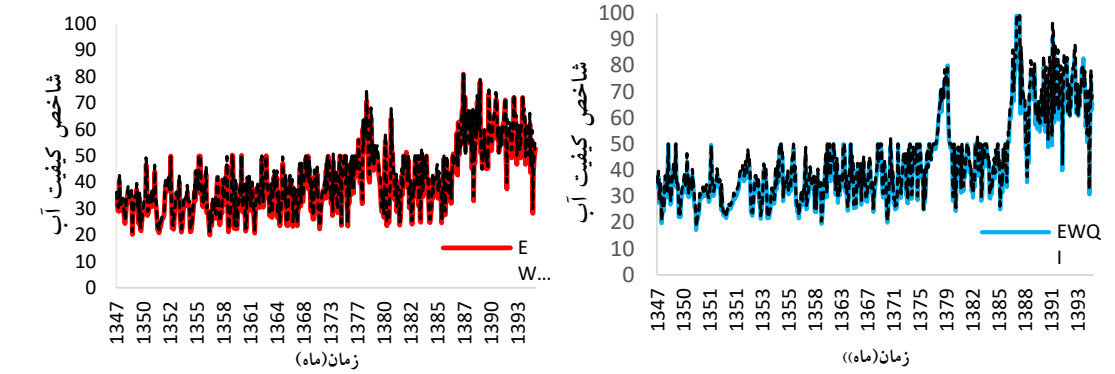
درشکل‌های (۳) و (۴)، شاخص کیفیت آب WQI برای رودخانه‌های کارون و بابلرود با استفاده از وزن‌های آنتروپی شانون (EWQI) و سازمان بهداشت جهانی (WHO)، در بازه زمانی ۱۳۹۴-۱۳۷۴ نشان ارائه شده است. همان‌طورکه از نتایج جدول ۳ مشخص هست میزان خطا کم‌تر می‌باشد که از شکل (۳) هم قابل‌مشاهده می‌باشد.

جدول ۳. نتایج وزن‌دهی آنتروپی شانون و سازمان بهداشت جهانی

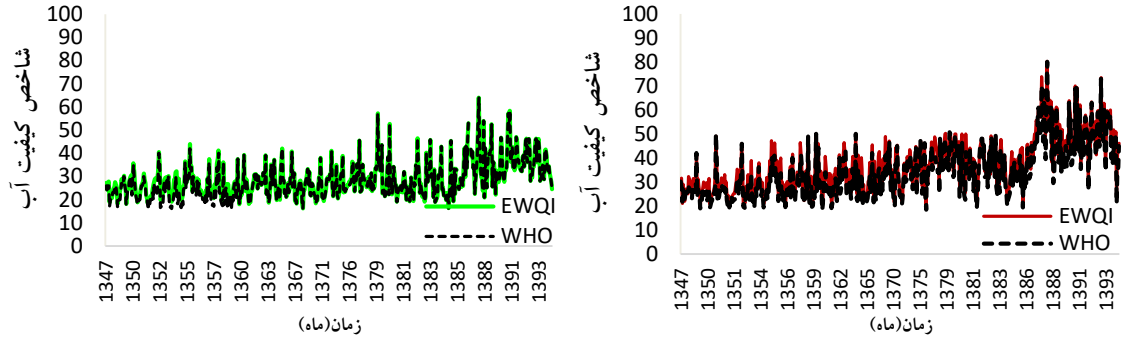
رودخانه	نام ایستگاه	RMSE	MAE
کارون	اهواز	۲/۹۸	۱/۹۹
	دارخوین	۲/۳۵	۲/۰۵
	گتوند	۱/۵۸	۰/۶۵
	ملاثانی	۳/۸۱	۲/۹۶
بابلرود	قرآن‌تالار	۱/۲۲	۱/۱۳
	کشتارگاه	۰/۶۵	۰/۴۶

همان‌طورکه از شکل (۳) مشاهده می‌شود در رودخانه کارون در ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز، دارخوین، گتوند و ملاثانی وزن‌های آنتروپی شانون مطابق سازمان بهداشت جهانی می‌باشد، در واقع مقایسه نتایج حاصل صحت و دقت وزن‌دهی‌های آنتروپی شانون را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) در هر چهار ایستگاه هیدرومتری شاخص کیفیت آب بین صفر تا ۱۰۰ قرار دارد که برطبق جدول (۲) کیفیت آب در بازه خوب و مناسب برای آشامیدن می‌باشد. هم‌چنین در هر چهار ایستگاه هیدرومتری، در انتهای دوره شاخص کیفیت آب از حالت عالی به حالت خوب تنزل پیدا کرده است که مهم‌ترین علت آن را می‌توان عوامل انسانی دانست، هم‌چنین نگاه شود به (۷) و (۱۵). در حالت کلی می‌توان گفت کیفیت آب در بازه زمانی بررسی‌شده با توجه به شاخص WQI در محدوده مناسب بوده و قابل‌شرب می‌باشد. براساس شکل (۴) در رودخانه بابلرود در ایستگاه‌های هیدرومتری قرآن‌تالار و کشتارگاه نیز وزن‌دهی‌های آنتروپی شانون مطابق سازمان بهداشت جهانی بوده، در واقع صحت و دقت وزن‌های آنتروپی شانون را نشان می‌دهد. هم‌چنین همه شاخص‌ها در بازه صفر تا ۵۰ قرار دارند که بر طبق جدول (۲) کیفیت آب در وضعیت عالی و قابل آشامیدن می‌باشد. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد، آنتروپی شانون توانسته است با دقت بالایی وزن‌دهی را انجام دهد و کیفیت آب هر دو رودخانه در بازه خوب و مناسب شرب قرار دارد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در این شاخص، سختی کل (TDS)، قلیاییت (pH) و شوری (EC) می‌باشد که با نتایج تحقیقات (۳)، (۱۳) و (۲) همخوانی دارد. با توجه به این‌که روند خاصی در سری‌های زمانی مربوط به ایستگاه‌های اندازه‌گیری‌شده وجود ندارد می‌توان نتیجه گرفت که آلاینده‌ها و سامانه رودخانه به نوعی تعادل رسیده‌اند. به‌بیان دیگر، حجم آلاینده‌های واردشده به رودخانه متناسب با توانایی خودپالایی رودخانه بوده است. نبود تناوب در مقادیر WQI نشان‌دهنده تأثیر نپذیرفتن غالب کیفیت آب رودخانه از عوامل طبیعی و تبعیت آن از عوامل انسانی می‌باشد. هم‌چنین افت نسبی زیادی در شاخص در بازه گتوند تا ملاثانی روی می‌دهد که می‌تواند بیانگر پایین‌تربودن کیفیت آب رودخانه دز باشد. این نتایج تأثیر کاهشی رودخانه دز بر کیفیت رودخانه کارون در فصل پر آبی این رودخانه بیش‌تر است. بیش‌تر آلودگی‌های رودخانه دز در پایین‌دست ایستگاه دزفول به آن وارد می‌شود. افزایش نسبی شاخص در بازه اهواز دارخوین می‌تواند نشان‌دهنده کاهش نرخ ورود مواد آلاینده و مؤثر واقع‌شدن توان خودپالایی رودخانه باشند (۱۵).

* نویسنده مسئول
Email:EbrahimiK@ut.ac.ir

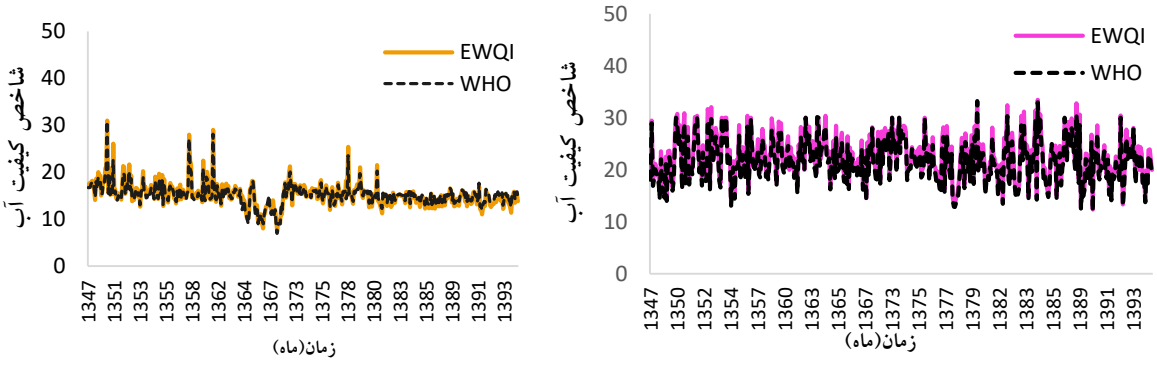


الف) ایستگاه اهواز ب) ایستگاه دارخوین



ج) ایستگاه گتوند د) ایستگاه ملاثانی

شکل۳. مقایسه مقادیر شاخص کیفیت آب برحسب آنتروپی (EWQI) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) رودخانه کارون



الف) ایستگاه قرآن تالار ب) کشتارگاه

شکل ۴. الف و ب) مقایسه مقادیر شاخص کیفیت آب برحسب آنتروپی (EWQI) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) رودخانه بابلرود

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج وزن‌دهی، آنتروپی شانون و سازمان بهداشت جهانی در رودخانه کارون برای ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز، دارخوین، گتوند و ملاثانی و در رودخانه بابلرود برای ایستگاه‌های هیدرومتری قرآن‌تالار و کشتارگاه مقایسه شد. نتایج نشان داد آنتروپی شانون توانسته است در

* نویسنده مسئول
Email:EbrahimiK@ut.ac.ir

وزن‌دهی پارامترهای کیفیت آب و تعیین شاخص کیفیت آب تخمین خوبی داشته باشد. پس می‌توان از آنتروپی شانون در تخمین شاخص کیفیت آب به‌عنوان یک روش نوین و کاربردی با دقت بالا در وزن‌دهی استفاده کرد. با توجه به نتایج شاخص کیفیت آب در رودخانه کارون و بابلرود مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذارسختی کل (TDS)، قلیاییت (pH) و شوری (EC) می‌باشند. بررسی تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون و بابلرود مشخص کرد که کیفیت آب در این دو رودخانه در بازه خوب قرار داشته و قابل شرب می‌باشد، هرچند که در سال‌های اخیر سطح کیفیت آب هر دو رودخانه‌ها کاسته شده است که علت اصلی آن عوامل انسانی می‌باشد (۷ و ۱۵).

سپاسگزاری

از دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب ایران برای فراهم‌کردن امکانات و داده‌های لازم به‌منظور انجام این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

۱. اسدی، ا.، اصولی، س. (۱۳۹۵). ارزیابی کیفی منابع آب سطحی حوضه صوفی‌چای با استفاده از شاخص کیفیت آب. دومین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار راهکارها و چالش‌ها. دانشگاه تبریز. ایران.

۲. درزی، ع.، و مشهدی، ف. (۱۳۹۴). بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب رودخانه بابلرود. دهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه ساری. ایران.

۳. حسینی پ.، ایلدورمی ع.ر. و حسینی ع.ر. (۱۳۹۲). بررسی کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از شاخص NSFWQI در بازه زرگان تا کوت امیر (طی پنج سال). انسان و محیط زیست. ۱۱(۲): ۱۱-۱.

۴. حمیدیان ل.، معراجی س.ح. فیجانی ا. و بطالبلویی ص. (۱۳۹۶). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استان بوشهر با استفاده از شاخص کیفی آب. هیدروژئولوژی. ۲(۱): ۴۴-۳۱.

۵. سلیمانی ساردو م.، ولی ع. قضاوی ر. وسعیدی گراغانی ح. (۱۳۹۲). آنالیز و روندیابی پارامترهای کیفیت شیمیایی آب (مطالعه موردی: رودخانه چم انجیر خرم‌آباد). مهندسی آبیاری و آب. ۱۲(۳): ۱۰۲-۹۵.

۶. شیخ ستانی، ن. (۱۳۸۰). تبیین شاخص‌های کیفی آب‌های سطحی و کاربرد آن در ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی و پهنه‌بندی رودخانه‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۷. شمسایی ا.، اورعی زارع ص. و سارنگ ا. (۱۳۸۴). بررسی تطبیقی شاخص‌های کیفی و پهنه‌بندی رودخانه کارون و دز.آب و فاضلاب. ۱۶(۳): ۴۸-۳۹.

۸. صمدی م.، ساقی م. رحمانی ع. و تراب‌زاده ح. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه دره مراد بیک همدان بر اساس شاخص NSFWQI و بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی. دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان. ۱۶(۳): ۴۳-۳۸.

۹. علی دادالهی س.، و ارجمند، ف. (۱۳۸۹). شاخص کیفیت (WQI) آب رودخانه کارون به‌عنوان نشان‌دهنده اثرات پساب صابون‌سازی خرمشهر. اقیانوس‌شناسی. ۴ (۱): ۲۷-۲۱.

۱۰. عبادتی ن.، و هوشمندزاده م. (۱۳۹۳). بررسی کیفیت آب رودخانه دز در ایستگاه آب‌سنجی دزفول. اکو هیدرولوژی. ۲(۱): ۸۱-۶۹.

۱۱. معصومی، ف.، و کراچیان، ر. (۱۳۸۶). طراحی بهینه سیستم‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با کاربرد تئوری آنتروپی گسسته مطالعه موردی: آبخوان تهران. سومین کنگره ملی مهندسی عمران. تهران. ایران.

۱۲. مهردادی ن.، عارف ح. واصغرنیا کبریا ا. (۱۳۸۹). بررسی اثرات آلودگی زیست‌محیطی بر کیفیت آب رودخانه بابلرود. اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی. دانشگاه ساری. ایران.

۱۳. مددی‌نیا م.، منوری س.م. کرباسی ع. نبوی س.م. و رجب‌زاده ا. (۱۳۹۳). بررسی کیفی آب رودخانه کارون در بازه اهواز با استفاده از شاخص کیفی آب. علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۶(۱): ۶۰-۵۰.

۱۴. میرزایی م.، سلگی ع. وسلمان ماهینی ع. (۱۳۹۵). بررسی ارتباط بین پارامترهای کیفی آب و تغییرات کاربری اراضی (حوضه آبخیز زاینده‌رود). مدیریت آب و آبیاری. ۶ (۲): ۱۹۱-۱۷۵.

۱۵. مروج م.، کریمی‌راد ا. و ابراهیمی ک. (۱۳۹۶). ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه کارون براساس شاخص کیفیت آب و استفاده از GIS. اکوهیدرولوژی. ۴ (۱): ۲۲۵-۲۳۵.

۱۶. نوری ر.، جعفری ف. فرمن اصغرزاده د. و اکبرزاده ع. (۱۳۹۰). ارائه چارچوبی مناسب جهت بررسی وضعیت کیفی رودخانه مرزی اترک. سلامت و محیط زیست. ۴(۲): ۱۷۰-۱۵۹.

۱۷. نصرآبادی ت.، عباسی مائده پ. (۱۳۹۲). بررسی کیفیت آب زیرزمینی شهر تهران با استفاده از شاخص کیفی سازمان بهداشت جهانی. انسان و محیط زیست. ۱۱(۳): ۱۲-۱.

18. Abbasi, T. & Abbasi, S.A. (2012). Water quality indices. *Environmental Earth Science*, 71(1), 4625-4628.
19. Amiri, V., Rezaei, M. & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Science*, 72(1), 3479-3490.
20. Chiang, W. & Hui-Chung, Y. (2014). Rawalpindi and Islamabad. *Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV*, 40(7), 33-47.
21. Malekian, A. & Azarnivand, A. (2016). Application of Integrated Shannon's Entropy and VIKOR Techniques in Prioritization of Flood Risk in the Shemshak Watershed. *Iran Water Resources Management*, 30(1), 409-425.
22. Milovanovic, M. (2007). Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios Vardar River. Southeastern Europe. *Desalination*, 213(1), 159-173.
23. Pei-Yue, L., Hui, Q. & Jian-Hua, W. (2010). Groundwater Quality Assessment Based on Improved Water Quality Index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China.*Chemistry*, 7(S1), S209-S216.
24. Remesan, R., Ahmadi, A. Shamim, M.A.& Han. D. (2010) . Effect of data time interval on real-time flood forecasting. *Hydroinformatics*, 12(4), 396-407.
25. Rosli, N.A., Zawawi, M. H. & Bustami, R.A. (2012). Salak river water quality identification and classification according to physico-chemical characteristics. In Proceedings of International Conference on Advances in Sciences and Contemporary Engineering, 69-77.
26. Ramos, M.A., de Oliveira ES Pião, A. de Oliveira Leite, D.A. & de Angelis, D.D. (2016). Water quality index (WQI) of Jaguari and Atibaia rivers in the region of Paulínia, São Paulo, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessmen*, 188 (5), 1-4.
27. Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K. & Liaghat, A.M. (2014). Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(9), 3827-3843.
28. Sahoo, M.M., Patra, K.C., Swain, J.B. & Khatua, K.K. (2017). Evaluation of water quality with application of Bayes' rule and entropy weight method. *Environmental and Civil Engineering*, 21(6), 730-752.
29. Sonuga, J. O., (1976). Entropy principle applied to the rainfall–runoff process. *Hydrology*, 30(1), 81-94.
30. Shannon, C.E., (1948). A mathematical theory of communications, I and II. The Bell System Technical, 379-423.
31. Shabbir, R. & Ahmad, S. (2015). Use of Geographic Information System and Water Quality Index to Assess Groundwater Quality in Spatiotemporal Scaling Effect on Rainfall Network Design Using Entropy.*Entropy*, 16(2), 4626-4647.

32. Stigter, T.Y., Ribeiro, L. & Dill A. M. M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with ground waters a linistio nand nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrology*, 14(1-2), 79-99.
33. Tiwari, T. N. & Mishra, M. A. (1985). Preliminary assignment to water quality index of major Indian rivers. *Environmental Protection*, 5(4), 276-279.
34. Wu, J., Li, P. & Qian, H. (2015). On the sensitivity of entropy weight to sample statistics in assessing water quality statistical analysis based on large stochastic samples. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 2185-2195.
35. Yogendra, K. P. (2008). Determination of water quality index and suitability of urban water body in Shimoga Town, Karnataka. Conference Proceedings of the 12th World Lake Conference Taal, India, 342:346.
36. Zhang, J. L. & Ren, J. (2011). The deficiencies and amendments of the calculation formulate of entropy and entropy weight in the theory of entropy. *Statistics and Information Forum*, 26(1), 1-5.