

ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه کارون براساس شاخص کیفیت آب و استفاده از GIS

مجتبی مروج^۱، ایمان کریمی راد^۲، کیومرث ابراهیمی^{۳*}

۱ و ۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۳/۱۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۰/۱۹)

چکیده

در سال‌های اخیر کیفیت آب رودخانه کارون تحت تأثیر آلاینده‌های مختلفی از جمله زه‌آب کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و صنعتی قرار داشته است. شاخص کیفیت آب و GIS، می‌توانند به منظور پشتیبانی اقدامات مدیریتی در این رودخانه استفاده شوند و از قابلیت مدل‌های سری زمانی نیز می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات کیفیت در آینده بهره برد. از این رو، هدف پژوهش حاضر ارزیابی کیفیت رودخانه کارون براساس شاخص کیفیت آب با استفاده از GIS و مدل‌سازی سری زمانی کیفیت آب است. در این پژوهش داده‌های ماهانه شامل pH، دما، DO، BOD، TDS، فسفات، نترات، کدورت و کالیفرم مدفوعی، طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ تجزیه و تحلیل شد. همه شاخص‌های محاسبه شده در طبقه متوسط قرار گرفتند که به معنای استفاده از آب رودخانه فقط با اعمال تصفیه پیشرفته است. توزیع مکانی-زمانی مقادیر شاخص کیفیت آب و معنادار نبودن روند تغییرات نشان‌دهنده به تعادل رسیدن آلاینده‌های ورودی و توان خودپالایی رودخانه است. نتایج مدل‌سازی مقادیر ضریب تبیین مناسب مدل‌ها بین ۰/۶۹ تا ۰/۸۵ را نشان داد. همچنین شرایط انسان‌ساز عامل غالب بر تغییرات کیفیت آب رودخانه شناخته شد. براساس این نتایج، کیفیت رودخانه کارون نسبت به گذشته اندکی افزایش یافته و با اتصال رودخانه دز، شاخص کیفیت آب به میزان نسبتاً زیادی کاهش می‌یابد که می‌تواند بیانگر پایین‌تر بودن کیفیت آب رودخانه دز به دلیل ورود آلودگی به آن در پایین دست ایستگاه دزفول باشد و اقدامات کنترلی را در این رودخانه ایجاب می‌کند.

کلیدواژه‌گان: پهنه‌بندی، دارخوین، گتوند، ملاتانی، WQI.

مقدمه

تأثیر مهم آب به‌عنوان شکل‌دهنده و ضامن بقای تمدن‌ها در طول تاریخ بشر ثابت شده است. در سه دهه پابانی قرن بیستم نگرانی در خصوص کیفیت آب به‌طور گسترده‌ای احساس شد، به‌طوری که در حال حاضر کیفیت آب اهمیتی به اندازه کمیت آن پیدا کرده است. آلودگی آب نه‌تنها کیفیت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد بلکه سلامت انسان، توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی را تهدید می‌کند [۱]. ارزیابی مستمر پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب بخش ضروری برنامه‌های کنترل کیفیت آب است. این کار به جمع‌آوری اطلاعات شایان توجهی منجر می‌شود که معمولاً نمی‌تواند به‌طور مستقیم کیفیت آب را تعیین کند. از زمانی که داده‌های کیفیت آب از طریق نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها جمع‌آوری شد، نیاز به بیان به شکل قابل فهم احساس شد. روش‌های متنوعی برای به‌کارگیری این داده‌ها استفاده شده است تا این مقادیر ثبت‌شده به‌طور مؤثرتری در همه زمین‌ها استفاده شود. یک راه توصیف کیفیت آب، فهرست کردن غلظت هر چیزی است که در آن نمونه آب موجود است. چنین فهرستی فقط برای متخصصان آب قابل استفاده است. فرمول‌بندی و استفاده از شاخص‌ها توسط سازمان‌های مسئول عرضه و کنترل کیفیت آب بسیار توصیه شده است [۲].

در سال ۱۹۶۵، هورتن در کمیسیون بهداشت آب دره رودخانه اوهاو در ایالات متحده، روش جدیدی به شکل یک عدد شاخص، برای رتبه‌بندی کیفیت آب ارائه کرد و آن را با انتخاب، وزن‌دهی و تلفیق پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب و استفاده از یک فرمول ریاضی ساده تعریف کرد [۳]. سازوکار شاخص کیفیت آب^۱ روش شناخته‌شده‌ای برای بیان کیفیت آب است که به تغییرات در خصوصیات آب واکنش نشان می‌دهد [۴]. این شاخص عددی است که کیفیت آب را با توجه به مجموع پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده بیان می‌کند. بنابراین، دولت‌ها می‌توانند از این شاخص برای توضیح عملکرد خود در کنترل آلودگی‌ها و چالش‌های موجود در مدیریت منابع آب استفاده کنند.

از سوی دیگر، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^۲ ابزار مناسبی برای ترکیب نقشه‌کشی و پایگاه‌های داده است [۵].

به‌طوری که تجزیه و تحلیل‌های مکانی و نقشه‌های تولیدشده در محیط GIS می‌تواند به کشف الگوهای پیچیده و ارتباطاتی که ممکن است در جدول‌ها و متن به چشم نیاید، کمک کند و به این‌صورت مدیریت سامانه‌های پیچیده را بهبود بخشد [۶ و ۷]. در مجموع، نرم‌افزار GIS ابزاری قوی برای مسائل منابع آب، ارزیابی کیفیت آب، جلوگیری از سیلاب، درک محیط زیست طبیعی و مدیریت منابع آب در مقیاس محلی و منطقه‌ای محسوب می‌شود [۸].

پیشینه تحقیق

از زمان ابداع WQI در سال ۱۹۶۵ مطالعات متعددی در سطح جهان روی کاربردهای مختلف آن صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از موارد اخیر آن اشاره شده است. در مطالعه‌های سادات نوری و همکارانش (۲۰۱۴) کارایی ترکیب GIS و WQI در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی را در آبخوان ساوه-نوبران واقع در شمال استان مرکزی بررسی کردند و نشان دادند ۶۵ درصد نمونه‌های آب در طبقه‌بندی «بد»، «خیلی بد» و «نامناسب برای شرب» قرار می‌گیرد [۹]. همچنین طی مطالعات متعدد در نقاط مختلف جهان، WQI برای دسته‌بندی رودخانه‌ها مفید شناخته شده است [۱۰-۱۲]. زلی و همکارانش (۲۰۱۲) براساس WQI به این نتیجه دست یافتند که رودخانه سالاک در مالزی کمی آلوده شده است و باید اقداماتی به‌منظور بهبود کیفیت آب آن انجام شود تا محیط زیست برای جوامع پیرامونی سالم‌تر شود [۱۳]. مظاهری و همکارانش (۲۰۱۳) اثر بالقوه پساب مزرعه پرورش ماهی را بر کیفیت آب رودخانه زرین‌گل براساس NSFQI^۳ و WQI ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق تغییرات مکانی و زمانی را نشان داد و آشکار شد که پساب‌های واردشده در بهار و تابستان دلیل افت کیفیت آب است و انجام عملیات تصفیه براساس استانداردهای زیست‌محیطی برای جلوگیری از خطرات الزامی است [۱۴]. صمدی و همکارانش (۲۰۱۵) نیز رودخانه مرادبیک را برای ۱۲ ماه سال مطالعه کردند و منطقه‌بندی رودخانه را از کیفیت متوسط تا بد، با استفاده از GIS، به انجام رساندند [۱۵]. راموس و همکارانش (۲۰۱۶) دو رودخانه را طی سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ مطالعه کردند و کیفیت آنها را متوسط و بد دانستند و گفتند که این وضعیت در فصول خشک و بارانی یکسان است [۱۶].

3. National Sanitation Foundation Water Quality Index

1. Water Quality Index (WQI)
2. Geographical Information System (GIS)

کیفیت متوسط محاسبه کردند [۲۵]. فائینی و همکارانش (۱۳۹۴) نیز با مطالعه کیفیت آب رودخانه چشمه گردو واقع در شهرستان نوشهر، کیفیت آن را در سه ایستگاه بالادست در محدوده متوسط و در سه ایستگاه پایین دست در وضعیت بد ارزیابی کردند [۲۶]. نصرالله زاده ساروی و همکارانش (۱۳۹۵) با بررسی آب دریاچه سد شهید رجایی ساری، نشان دادند کیفیت آن براساس WQI در همه ماهها خوب است [۲۷].

در سالهای اخیر کیفیت آب رودخانه کارون تحت تأثیر آلایندههای مختلفی از جمله زه آب کشاورزی و فاضلابهای شهری و صنعتی قرار داشته است. بنابراین، پایش وضعیت کیفیت رودخانه و روند تغییرات آن در طول زمان و مکان با هدف آگاهی از وضع حاکم و اتخاذ تمهیدات مورد نیاز احتمالی در آینده، ضروری به نظر می رسد. از این رو، براساس پیشینه تحقیقات، WQI به عنوان شاخصی شناخته شده و معتبر در سطح دنیا مطرح است که می توان از آن به منظور دسته بندی رودخانه ها، پایش کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی (رزلی و همکارانش (۲۰۱۲)، صمدی و همکارانش (۲۰۱۵)، راموس و همکارانش (۲۰۱۶)، شمسایی و همکارانش (۱۳۸۴)، صفاریان و مشایخی نیز (۱۳۸۶)، سالاری و همکارانش (۱۳۹۱)، حسینی و همکارانش (۱۳۹۲)، مددی نیا و همکارانش (۱۳۹۳)، کریمی جشنی و سالاری درگی (۱۳۹۳)، فائینی و همکارانش (۱۳۹۴)، نصرالله زاده ساروی و همکارانش (۱۳۹۵) و سادات نوری و همکارانش (۲۰۱۴)، ارزیابی اثر منابع آلاینده (مظاهری و همکارانش (۲۰۱۳)، داداللهی سهراب و همکارانش (۲۰۱۲) و صادقی و همکارانش (۱۳۹۴)) و از این قبیل بهره برد. با توجه با مطالعات قبلی، بررسی تغییرات کیفیت رودخانه کارون باید در یک دوره زمانی چندساله انجام شود که دربرگیرنده دوره های کم آبی و پرآبی و تغییرات فصلی کیفیت آب باشد. همچنین در هیچ یک از تحقیقات اشاره شده به منشأ تغییرات در کیفیت رودخانه پرداخته نشده که با مطالعه در بازه های طولانی از رودخانه که شامل شهر اهواز به عنوان مرکز استان و نیز محل اتصال شاخه مهمی همچون دز باشد و استفاده از روش های آماری، می توان تأثیر کارکرد هر یک از عوامل طبیعی و انسانی را بر رودخانه بررسی کرد. بدین منظور هدف پژوهش حاضر استفاده از شاخص کیفیت آب و GIS برای ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه کارون عوامل مؤثر بر آن و نیز

در داخل کشور نیز سطح تحقیقات انجام شده با استفاده از WQI گسترده بوده است که از آن جمله شمسایی و همکارانش (۱۳۸۴) ضمن بررسی و پهنه بندی کیفیت آب رودخانه های کارون و دز طی سال های ۱۳۸۱-۱۳۸۳، مقادیر شاخص کیفی را در ایستگاه های ملاتانی، اهواز و دارخوین به ترتیب ۵۵/۹۰، ۵۰/۱۰ و ۵۳/۹۰ محاسبه کردند. همچنین پایین ترین شاخص کیفی را در ایستگاه آب شیرین واقع در پایین دست رودخانه دز، برابر با ۴۱ معرفی کردند [۱۷]. صفاریان و مشایخی نیز (۱۳۸۶) کیفیت آب رودخانه کارون را در بازه زرگان تا ام التمیر با استفاده از GIS بررسی کردند و نشان دادند این بازه از رودخانه در بالادست کیفیت خوب و در پایین دست کیفیت متوسط دارد [۱۸]. داداللهی سهراب و همکارانش (۱۳۸۹) اثر فاضلاب کارخانه صابون شهر خرمشهر را بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از WQI ارزیابی کردند. براساس نتایج، WQI در ورودی شهر برابر ۵۴ و در خروجی ۴۵ است که به معنای تغییر طبقه کیفیت آب از متوسط به بد است [۱۹]. سالاری و همکارانش (۱۳۹۱) در مطالعه ای کیفیت آب رودخانه کارون در تابستان سال ۱۳۹۰ را در چهار ایستگاه آب سنجی از جمله اهواز و دارخوین، با استفاده از WQI ارزیابی و وضعیت آن را «بد» اعلام کردند [۲۰]. در تحقیق حسینی و همکارانش (۱۳۹۲) کیفیت آب کارون در سه ایستگاه واقع در بازه شهر اهواز را براساس WQI، در طبقه «متوسط» محاسبه کردند [۲۱] و مددی نیا و همکارانش (۱۳۹۳) نیز به نتیجه ای مشابه دست یافتند [۲۲]. کریمی جشنی و سالاری درگی (۱۳۹۳) کیفیت آب رودخانه کارون را در فصل کم آبی، از بالادست (ایستگاه گتوند) به پایین دست (ایستگاه اهواز)، کاهشی نشان دادند که در فصل پرآبی این روند در اواسط بازه و با پیوستن شاخه دز (ایستگاه ملاتانی) کیفیت آب دچار افت شده و پس از آن به سمت پایین دست با اندکی رشد مواجه می شود [۲۳]. همچنین عبادتی و هوشمندزاده (۱۳۹۳) با بررسی کیفیت آب رودخانه دز در محل ایستگاه دزفول براساس نمودار شولر به این نتیجه رسیدند که آب از نظر شرب در وضعیت خوب قرار دارد و دلیل آن را کم بودن فعالیت های کشاورزی و مناطق مسکونی در اطراف رودخانه تا قبل از این ایستگاه عنوان کردند [۲۴]. صادقی و همکارانش (۱۳۹۴) به منظور بررسی اثر زه آب کشاورزی، کیفیت آب رودخانه زرین گل استان گلستان را مطالعه کردند و مقادیر WQI را بین ۵۴ تا ۶۱ و در طبقه

رسوبی ۱۰ گرم بر لیتر است [۲۹]. در این پژوهش مقادیر ماهانه پارامترهای کیفیت آب شامل pH، دما، اکسیژن محلول^۱، اکسیژن خواهی بیولوژیک^۲ (پنج روزه)، کل جامدات، فسفات، نترات، کدورت و کالیفرم مدفوعی، طی سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ و در محل چهار ایستگاههای آبسنجی گتوند، ملاتانی، اهواز و دارخوین استفاده شد که توسط سازمان آب و برق استان خوزستان اندازه گیری شده است. مشخصات این ایستگاهها که در مجموع حدود ۳۰۰ کیلومتر از رودخانه کارون را دربر می گیرد و جانمایی آنها، به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است.

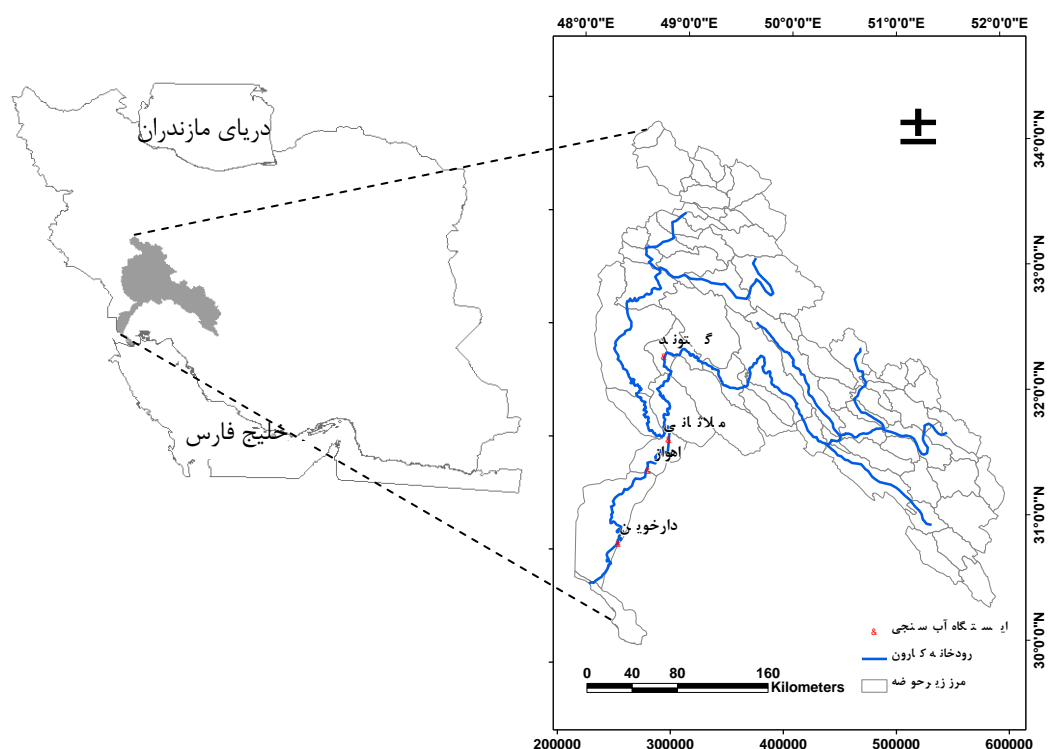
بهره بردن از قابلیت مدل های سری زمانی در پیش بینی تغییرات شاخص در آینده است.

مواد و روش ها

حوضه آبریز رودخانه کارون حدود ۶۵ هزار کیلومترمربع وسعت دارد و این رود با طول ۸۹۰ کیلومتر، طولانی ترین رود ایران است [۲۸]. متوسط بارندگی سالانه این حوضه ۶۲۰ میلی متر و ارتفاع بخش برفگیر آن، ۲ هزار متر از سطح دریاست. اقلیم این حوضه گرم با تابستان های خشک و زمستان های معتدل است [۲۳]. وضعیت پوشش بیشتر شامل استپ، جنگل های بلوط و کشاورزی و میزان بار

جدول ۱. مشخصات ایستگاه های مطالعه شده

| ردیف | نام | UTM-X | UTM-Y | ارتفاع |
|------|---------|--------|---------|--------|
| ۱ | گتوند | ۲۹۴۳۱۰ | ۳۵۷۰۱۱۶ | ۷۵ |
| ۲ | ملاتانی | ۲۹۸۶۲۳ | ۳۴۹۶۲۳۷ | ۲۸ |
| ۳ | اهواز | ۲۸۰۶۷۶ | ۳۴۶۹۳۳۳ | ۲۰ |
| ۴ | دارخوین | ۲۵۳۷۱۰ | ۳۴۰۴۷۵۵ | ۵ |



شکل ۱. جانمایی ایستگاه ها در ایران و حوضه آبریز رودخانه کارون

1. Dissolved Oxygen (DO)
2. Biochemical Oxygen Demand (BOD₅)

که در آن S نشان‌دهنده عدد رتبه‌بندی مختص به هر پارامتر و در دامنه ۰-۱۰۰ و w نیز عامل وزن‌دهی با مقدار عددی صفر تا یک است به طوری که $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1$ نیز تعداد پارامترهای استفاده‌شده برای محاسبه WQI است. در این روش رتبه مختص به هر پارامتر از منحنی رتبه‌بندی یا معادله مربوط به آن پارامتر به دست می‌آید. جدول ۲ نشان‌دهنده طبقه‌بندی کیفیت آب بر مبنای WQI است. وزن هر یک از پارامترها نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

نسخه ارتقا یافته WQI، توسط دینینگر و ماسیوناس (۱۹۷۱) و با پشتیبانی مؤسسه بهداشت ملی ایالات متحده پیشنهاد شد که به NSFQI شهرت یافت [۳۰]. این شاخص که در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است، دربرگیرنده پارامترهای فیزیکی-شیمیایی مانند DO، BOD₅، کدورت، کل جامدات معلق، نیترات، فسفات، pH، دما و کالیفرم مدفوعی است. بیان ریاضی این شاخص به صورت رابطه ۱ است [۳۰]:

$$WQI = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad (1)$$

جدول ۲. طبقه‌بندی آب براساس NSFQI [۳۰]

| طبقه‌بندی آب | خیلی بد | بد | متوسط | خوب | عالی |
|--------------------|---------|-------|-------|-------|--------|
| دامنه تغییرات شاخص | ۰-۲۵ | ۲۶-۵۰ | ۵۱-۷۰ | ۷۱-۹۰ | ۹۱-۱۰۰ |

جدول ۳. پارامترهای کیفیت آب و وزن آنها براساس NSFQI [۳۰]

| ردیف | پارامتر | واحد | وزن |
|------|------------------------|----------------|------|
| ۱ | درصد | DO | ۰/۱۷ |
| ۲ | تعداد در ۱۰۰ میلی‌لیتر | کالیفرم مدفوعی | ۰/۱۶ |
| ۳ | واحد استاندارد | pH | ۰/۱۱ |
| ۴ | میلی‌گرم در لیتر | BOD | ۰/۱۱ |
| ۵ | درجه سانتی‌گراد | تغییرات دما | ۰/۱۰ |
| ۶ | میلی‌گرم در لیتر | فسفات کل | ۰/۱۰ |
| ۷ | میلی‌گرم در لیتر | نیترات کل | ۰/۱۰ |
| ۸ | NTU ^۱ | کدورت | ۰/۰۸ |
| ۹ | میلی‌گرم در لیتر | کل جامدات | ۰/۰۷ |

ابتکاری سن^۳ [۳۲] استخراج شد. اگر دو سری نسبت به هم یکسان باشند، رسم این دو سری در مقابل هم نقاطی حول محور نیمساز اول ایجاد خواهد کرد که اساس روش ابتکاری سن است. اگر داده‌ها بالای خط ۱:۱ قرار بگیرند، روند افزایشی و اگر زیر این خط قرار بگیرند، روند کاهشی وجود دارد. قرارگیری نقاط رسم‌شده روی یک خط، نشان‌دهنده روند یکنواخت و حالت انحنا نمایانگر روند غیریکنواخت در داده‌هاست. از دیگر مزایای این روش، توانایی تعیین الگوی روند است. به این صورت که چه بخشی از داده‌ها روند افزایش یا کاهشی از خود نشان می‌دهند. هرچه داده‌ها از خط ۱:۱ فاصله داشته باشند، میزان (شیب) روند بیشتر است [۳۲]. در روش‌های پارامتری (از جمله مدل‌سازی

در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات شاخص WQI در طول زمان از تحلیل سری‌های زمانی استفاده شد. مراحل تحلیل سری‌های زمانی شامل شناسایی و حذف مؤلفه‌های قطعی (شامل روند و تناوب)، بررسی فرضیات اساسی سری‌های زمانی (شامل نرمال‌بودن و ایستایی داده‌ها)، تعیین نوع مدل (شامل نوع مدل، مرتبه و پارامترهای آن) و صحت‌سنجی مدل برآزش داده‌شده از مراحل مدل‌سازی به روش سری‌های زمانی است. بررسی وجود دوره یا تناوب در سری‌های زمانی با استفاده از تناوب‌نما^۲ و توسط نرم‌افزار ClimAn (نسخه ۵/۰۲۵) انجام گرفت. در پژوهش حاضر مؤلفه روند توسط دو آزمون من-کندال [۳۱] و روش

شده است و در آن \hat{x}_t ، x_t و \bar{x} به ترتیب داده‌های سری مشاهداتی، محاسباتی، میانگین و n تعداد داده‌هاست. هرچه مقدار RMSE کمتر و مقدار R^2 و NS بیشتر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل است [۳۹].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{x}_t - x_t)^2}{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{x}_t - x_t)^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (x_t - \hat{x}_t)^2}{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2} \quad (5)$$

یافته‌ها

نمودار سری زمانی اطلاعاتی اولیه از وجود روند، تناوب و پرش معنادار در سری داده‌ها ارائه می‌کند. در این تحقیق شاخص WQI محاسبه‌شده در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۱ در شکل ۲ رسم شده است.

مقادیر متوسط شاخص‌های محاسبه‌شده در طول دوره زمانی بررسی شده در ایستگاه‌های گتوند، ملاتانی، اهواز و دارخوین به ترتیب برابر ۰/۷۸، ۰/۴۰، ۰/۲۷ و ۰/۳۰ است. شایان یادآوری است که در بررسی تناوب با استفاده از تناوب‌نما مشخص شد سری‌های زمانی WQI در هر چهار ایستگاه فاقد تناوب است. در شکل ۳- الف نوسانات فصلی WQI در طول بازه مد نظر از رودخانه کارون نشان داده شده است. توزیع زمانی- مکانی مقادیر WQI نشان می‌دهد ایستگاه‌های گتوند و دارخوین در زمستان بهترین کیفیت آب را دارند و این در حالی است که ایستگاه‌های ملاتانی و اهواز در همین فصل در پایین‌ترین سطح کیفی قرار دارند. همچنین افت نسبتاً زیاد شاخص کیفیت در بازه گتوند تا ملاتانی رخ داده است و شایان یادآوری است که در این بازه محل اتصال رودخانه دز به کارون واقع شده است. در ادامه، به سمت پایین دست باز هم کیفیت آب اندکی کاهش می‌یابد و در بازه بین ایستگاه‌های اهواز و دارخوین مقدار اندکی به مقدار شاخص افزوده می‌شود. شکل ۳- ب تغییرات مکانی WQI در طول رودخانه را ارائه می‌دهد که در محیط GIS تهیه شده است. شایان یادآوری است در این شکل مقادیر به صورت متوسط سالانه است هرچند با توجه به شکل ۳ در فصول مختلف نیز تغییر چندانی روی

خودهمبسته سری‌های زمانی) فرضیاتی نظیر نرمال بودن، ایستایی و مستقل بودن متغیرها وجود داشته و این فرضیات برای متغیرهای هیدرولوژیکی اعتبار ندارد [۳۳]. بنابراین، ابتدا لازم است پیروی سری مورد تحقیق از توزیع نرمال بررسی شود و در صورتی که توزیع سری نرمال نباشد، لازم است سری زمانی قبل از مدل‌سازی، با استفاده از توابع انتقالی یا توابع تبدیل، نرمال شود.

تقریباً در همه روش‌های تحلیل سری‌های زمانی خطی یا غیرخطی، سری زمانی ایستا فرض می‌شود در حالی که اغلب سری‌های زمانی هیدرولوژیکی بنا به دلایل مختلف نایستا هستند که قبل از مدل‌سازی باید سری داده‌ها به حالت ایستا تبدیل شود و سپس مدل‌سازی صورت گیرد [۳۴]. از طرفی، گاهی بررسی نایستایی در سری می‌تواند کمک مؤثری به درک مکانیسم فیزیکی موجود کند که این امر اهمیت آزمون ایستایی را در آنالیز سری‌های زمانی هیدرولوژیکی نشان می‌دهد [۳۵]. روش‌های مختلفی برای آزمون ایستایی ارائه شده‌اند که این پژوهش از روش رایج ADF^۱ [۳۶] استفاده کرده است. به منظور بررسی ایستایی سری‌ها توسط آزمون یادشده، کد نوشته‌شده در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. برای تعیین مرتبه مدل سری‌های زمانی از روش معیار آکایکه اصلاح‌شده^۲ استفاده می‌شود که آماره آن به شرح رابطه ۲ قابل محاسبه است [۳۴]:

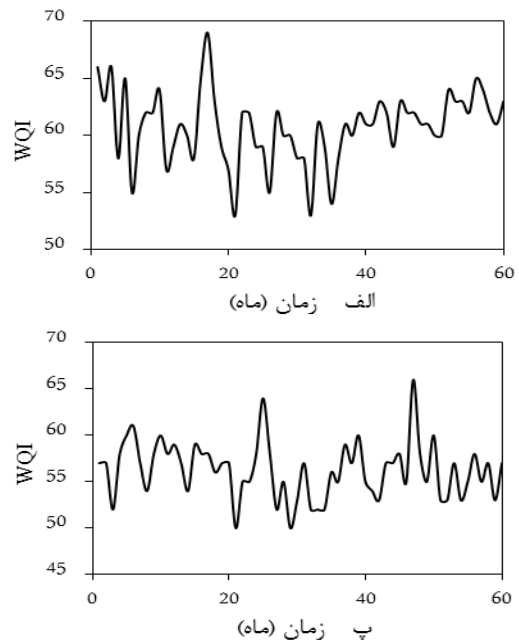
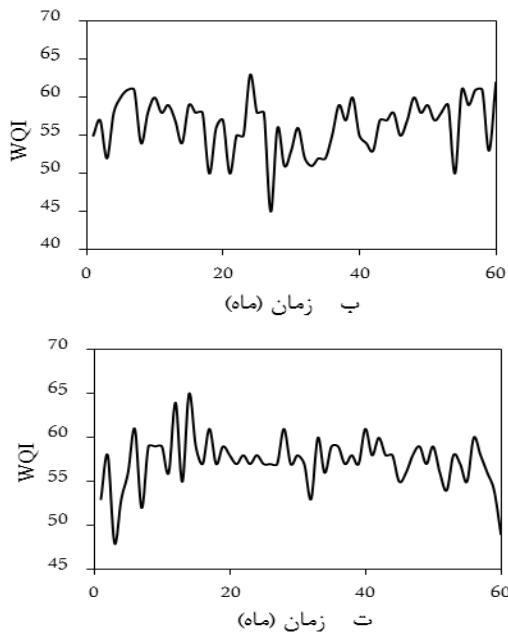
$$AICC(p,q) = n \ln(\hat{\sigma}_e^2) + \frac{2(p+q+1)n}{(n-p-q-2)} \quad (2)$$

که در آن n تعداد داده‌ها، p مرتبه مدل در بخش خودهمبسته، q مرتبه مدل در بخش میانگین متحرک و $\hat{\sigma}_e^2$ واریانس باقی‌مانده‌ها یا خطاهاست. در این روش هر مدلی که مقدار AICC کمتری داشته باشد، برازش بهتری دارد و به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود [۳۷]. در این پژوهش از نرم‌افزار ITSM2000 برای تعیین نوع، مرتبه و تخمین پارامترهای مدل استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل از سه معیار ضریب تبیین^۳ [۳۷]، جذر میانگین مربعات خطا^۴ [۳۷] و آماره نش- ساتکلیف^۵ (NS) [۳۸] استفاده شد که به ترتیب در روابط ۳- ۵ ارائه

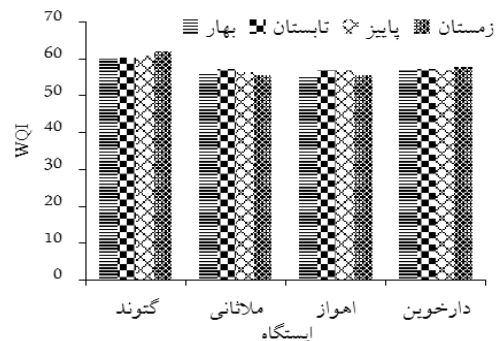
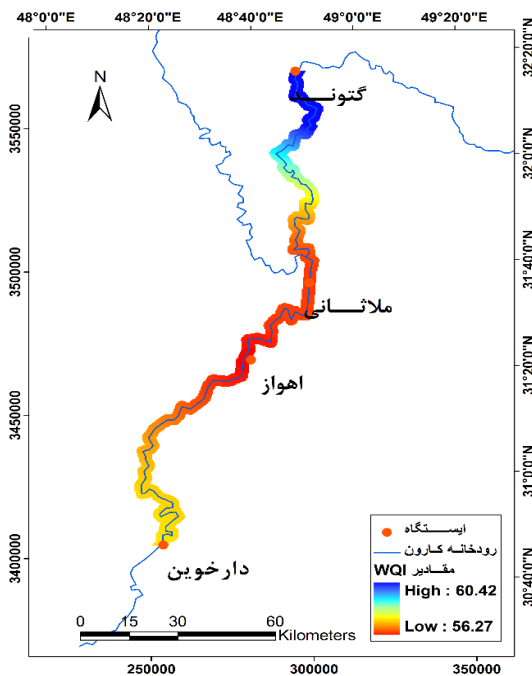
1. Augmented Dickey-Fuller test
2. Akaike Information Criterion Corrected (AICC)
3. Coefficient of Determination (R^2)
4. Root Mean Square Error (RMSE)
5. Nash-Sutcliffe Coefficient (NS)

است و فقط در بازه بین ایستگاه‌های اهواز و دارخوین مقداری اندکی افزایش در آن دیده می‌شود.

نمی‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، روند تغییرات کیفی رودخانه به سمت پایین دست همواره کاهشی



شکل ۲. سری زمانی شاخص WQI رودخانه کارون در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۱ (الف ایستگاه گتوند؛ ب ایستگاه ملاتانی؛ پ ایستگاه اهواز؛ ت ایستگاه دارخوین)



(ب)

(الف)

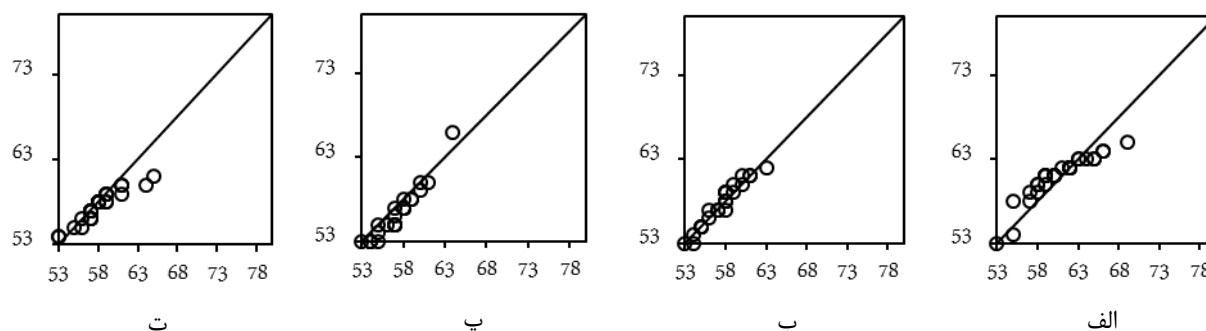
شکل ۳. تغییرات فصلی (سمت راست) و تغییرات مکانی (سمت چپ) مقادیر WQI در رودخانه کارون

در بخش مدل‌سازی، از ۸۳ درصد داده‌ها (۵۰ ماه) برای تخمین پارامترها و از ۱۰ ماه دیگر برای صحت‌سنجی مدل استفاده و مدل ARMA بر سری‌های زمانی برازش داده شد. نتایج این برازش در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار R^2 ، RMSE و NS در این جدول مختص به صحت‌سنجی مدل هاست. همچنین نتایج گرافیکی صحت‌سنجی مدل برای مقایسه بصری در شکل ۵ ارائه شد. کوچک بودن ضرایب مدل ARMA، همان‌طور که از نوسانات شدید و نامنظم شاخص WQI نشان داده شده در شکل ۲ نیز می‌توان دریافت، بیانگر پایین بودن حافظه سری زمانی این شاخص است که این امر با توجه به عوامل زیاد مؤثر بر آن قابل توجیه است.

نتایج آزمون من-کندال در جدول ۴ ارائه شد. ستون P در این جدول بیانگر احتمال است. در صورتی که این مقدار از ۰/۰۵ کمتر باشد، آزمون من-کندال در سطح ۹۵ درصد معنادار است و روند در سری زمانی وجود دارد. نتایج آزمون ابتکاری سن در شکل ۴ ارائه شد. در این شکل دیده می‌شود که داده‌ها به خوبی در اطراف خط نیمساز پراکنده شده‌اند که این امر بیانگر نبود روند در سری داده‌های WQI است. همچنین در بررسی ایستایی سری‌های زمانی نتایج آزمون ADF نیز در جدول ۴ ارائه شده است که طبق آن کلیه سری‌های زمانی شاخص WQI ایستا هستند. براساس نمودار توزیع احتمال نرمال شاخص WQI نیز مشخص شد که با اطمینان ۹۵ درصد سری‌های زمانی در هر چهار ایستگاه بررسی شده از توزیع نرمال پیروی می‌کنند.

جدول ۴. نتایج آزمون روند من-کندال و آزمون ایستایی ADF

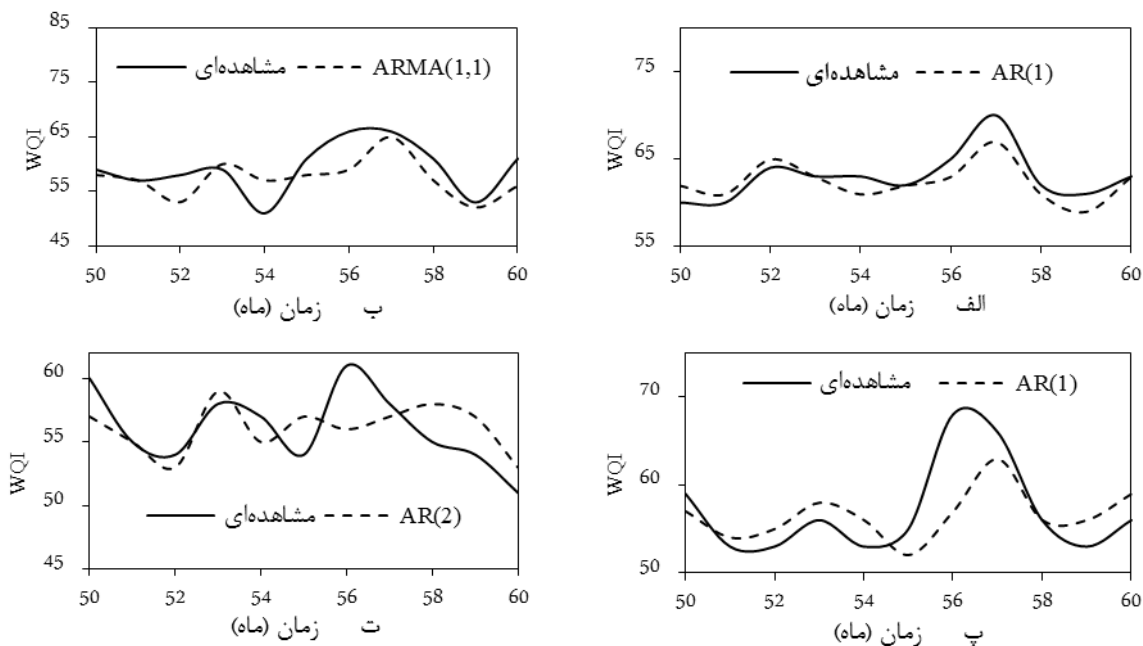
| آزمون ADF | | آزمون من-کندال | | |
|-----------|-----------|----------------|------|---------|
| نتیجه | آماره ADF | نتیجه | P | ایستگاه |
| ایستا | -۶/۳۳ | بدون روند | ۰/۲۱ | گتوند |
| ایستا | -۶/۴۳ | بدون روند | ۰/۴۰ | ملاثانی |
| ایستا | -۶/۲۳ | بدون روند | ۰/۱۳ | اهواز |
| ایستا | -۷/۳۵ | بدون روند | ۰/۴۷ | دارخوین |



شکل ۴. نمودار روش ابتکاری سن برای شاخص WQI در ایستگاه‌های الف (گتوند، ب) ملاثانی، پ) اهواز و ت) دارخوین

جدول ۵. مدل سری‌های زمانی خطی منتخب

| NS | RMSE | R^2 | AICC | رابطه | نوع مدل | ایستگاه |
|------|------|-------|--------|---|-----------|---------|
| ۰/۵۱ | ۳/۳۰ | ۰/۸۵۴ | ۱۶۹/۵۵ | $x_t = ۰/۲۴۶۷x_{t-1} + \varepsilon_t$ | AR(1) | گتوند |
| ۰/۳۳ | ۵/۹۳ | ۰/۶۹۲ | ۱۷۷/۳۸ | $x_t = ۰/۴۱۴۸x_{t-1} + \varepsilon_t - ۰/۴۶۴۸\varepsilon_{t-1}$ | ARMA(1,1) | ملاثانی |
| ۰/۴۳ | ۴/۸۳ | ۰/۶۹۴ | ۱۷۱/۱۴ | $x_t = ۰/۱۹۶۵x_{t-1} + \varepsilon_t$ | AR(1) | اهواز |
| ۰/۴۷ | ۲/۰۸ | ۰/۷۳۴ | ۱۷۱/۲۳ | $x_t = -۰/۰۱۳۶۶x_{t-1} + ۰/۲۴۷۹x_{t-2} + \varepsilon_t$ | AR(2) | دارخوین |



شکل ۵. نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده سری زمانی شاخص WQI رودخانه کارون در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ در محل ایستگاه‌های الف (گتوند؛ ب) ملاتانی؛ پ) اهواز؛ ت) دارخوین

به‌نوعی تعادل رسیده‌اند. به‌بیان دیگر، حجم آلاینده‌های وارد شده به رودخانه متناسب با توانایی خودپالایی رودخانه بوده است. نبود تناوب در مقادیر WQI نشان‌دهنده تأثیرپذیرفتن غالب کیفیت آب رودخانه از عوامل طبیعی (که ماهیت متناوب دارند) و تبعیت آن از عوامل انسانی است که توزیع زمانی- مکانی مقادیر WQI نیز تعیین‌کننده نبودن فصول کم‌آبی و پرآبی در تغییر کیفیت رودخانه را تأیید می‌کند. همچنین افت نسبتاً زیادی در شاخص در بازه گتوند تا ملاتانی روی می‌دهد که می‌تواند بیانگر پایین‌تر بودن کیفیت آب رودخانه دز و مؤید نتایج شمسایی و همکارانش (۱۳۸۴) باشد. این نتایج، از آنجا که تأثیر کاهشی رودخانه دز بر کیفیت رودخانه کارون در فصل پرآبی این رودخانه بیشتر است، با نتیجه کریمی جشنی و سالاری درگی (۱۳۹۳) هماهنگ است. همچنین با در نظر گرفتن نتایج پژوهش عبادتی و هوشمندزاده (۱۳۹۳) می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که بیشتر آلودگی 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 واقع شدن توان خودپالایی رودخانه باشد. از نتایج آزمون روند و آزمون ابتکاری سن که در هماهنگی کامل با آن است، می‌توان دریافت که در همه ایستگاه‌های

بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر در طول بازه‌ای نسبتاً طولانی از رودخانه کارون (حدود ۳۰۰ کیلومتر)، طی یک دوره زمانی بلندمدت (پنج‌ساله) و با استفاده از مقادیر پارامترهای کیفی در چهار ایستگاه انجام گرفت. براساس نتایج همه مقادیر شاخص محاسبه شده برای رودخانه در طبقه متوسط قرار گرفتند که با تحقیق حسینی و همکارانش (۱۳۹۲) و مددی‌نیا و همکارانش (۱۳۹۳) همخوانی داشت و نسبت به نتایج شمسایی و همکارانش (۱۳۸۴) اندکی افزایش کیفیت را نشان داد و به‌معنای آن است که آب رودخانه در این بازه فقط با اعمال تصفیه پیشرفته می‌تواند برای شرب استفاده شود؛ ولی در مقایسه با نتایج صفاریان و مشایخی (۱۳۸۶) که با استفاده از اطلاعات سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ انجام شده است، کاهش کیفیت را در ایستگاه اهواز نشان می‌دهد. از سوی دیگر، مقادیر WQI در محدوده شهر خرمشهر در پایین‌دست ایستگاه دارخوین که به‌دست آمده از بررسی داداللهی سهراب و همکارانش (۲۰۱۲) طی سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ است، با وضعیت کیفیت آب در ایستگاه دارخوین در تحقیق حاضر همخوانی دارد. در مجموع و با توجه به نبود روند در سری‌های زمانی مربوط به ایستگاه‌های اندازه‌گیری، می‌توان به این نتیجه دست یافت که آلاینده‌ها و سامانه رودخانه

- [7]. Liou SM, Lo SL, Wang SH. A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2004;96(1-3):35-52.
- [8]. Ketata-Rokbani M, Gueddari M, Bouhlila R. Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel). *Energy Environ. 2011;2(2):133-144*.
- [9]. Sadat-Noori SM, Ebrahimi K, Liaghat AM. Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2014;71(9):3827-3843.
- [10]. Al-Ami MY, Al-Nakib SM, Ritha NM, Nouri AM, Al-Assina A. Water quality index applied to the classification and zoning of Al-Jaysh canal, Bagdad, Iraq. *Environ. Sci. Health A*. 1987;22(4):305-319.
- [11]. Bhadra AK, Sahu B, Rout SP. A study of water quality index (WQI) of the river Brahmani, Odisha (India) to assess its potability. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2014;4(6):4270-4279.
- [12]. Palupi K, Sumengen S, Inswiasri S, Agustina L, Nunik KA, Sunaraya W, et al. River water quality study in the vicinity of Jakarta. *Water Sci Technol*. 1995;39(9):17-25.
- [13]. Rosli NA, Zawawi MH, Bustami RA. Salak river water quality identification and classification according to physico-chemical characteristics. In *Proceedings of International Conference on Advances in Sciences and Contemporary Engineering*. 2012; 69 - 77.
- [14]. Mazaheri-Kohanestani Z, Ghorbani R, Hajimoradloo A, Naeimi A. The effect of trout farm effluents on the water quality parameters of Zaringol Stream (Golestan, Iran) based on NSFQI and WQI indexes. *International Journal of Environmental Resources Research*, 2013;1(2):191-201.
- [15]. Samadi MT, Sadeghi S, Rahmani A, Saghi MH. Survey of water quality in Moradbeik river basis on WQI index by GIS. *Environmental Health Engineering and Management*. 2015;2(1):7-11.
- [16]. Ramos MA, de Oliveira ES, Pião AC, de Oliveira Leite DA, de Angelis DD. Water quality index (WQI) of Jaguari and Atibaia rivers in the region of Paulínia, São Paulo, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016;188(5):1-4.

اندازه‌گیری، آلاینده‌ها و سامانه رودخانه به تعادل رسیده‌اند. به‌بیان دیگر، حجم آلاینده‌های واردشده به رودخانه در این بازه متناسب با توانایی خودپالایی رودخانه بوده است. مقادیر ضریب تبیین برای مدل‌های خودهمبسته برآزش داده‌شده در ایستگاه‌ها بین ۰/۶۹ تا ۰/۸۵ محاسبه شد که دقت مناسب این مدل‌ها را نشان می‌دهد. نکته شایان توجه در محدوده مطالعاتی، یکنواختی شاخص WQI در دو مقیاس زمانی و مکانی است که پایداری رودخانه و به‌تعادل‌رسیدن آلاینده‌های ورودی و توان خودپالایی رودخانه کارون را تأیید می‌کند. از سوی دیگر، این امر نشان‌دهنده توزیع مناسب نقاط ورود آلاینده به رودخانه است به‌شکلی که در طول سال، هیچ‌یک از چهار بازه بررسی‌شده تغییرات شدیدی در کیفیت رودخانه دیده نمی‌شود. در کل پایداری وضعیت کیفیت رودخانه کارون در طول بازه زمانی بررسی‌شده نشان می‌دهد که مدیریت کیفی رودخانه کارون متناسب با مقدار بار آلاینده ورودی به رودخانه بوده است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه تهران و شرکت آب و برق خوزستان برای فراهم‌کردن امکانات و داده‌های لازم به‌منظور انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوط به آن تشکر می‌شود.

منابع

- [1]. Milovanovic M. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. *Desalination*. 2007;213(1):159-173.
- [2]. Abbasi T, Abbasi SA. *Water quality indices*. Elsevier; 2012.
- [3]. Horton RK. An index number system for rating water quality. *Water Pollut Control Fed*. 1965;37(3):300-306.
- [4]. Brown RM, McLelland NI, Deininger RA, O'Connor MF. *Indicators of environmental quality: a water quality index-crashing the psychological barrier*. New York: Plenum; 1972.
- [5]. Nemeth T, Szabo J, Pasztor L, Bakacsi Z. Elaboration of a complex GIS application in a catchment area. *Water Sci Technol*. 2002;45(9):133-140.
- [6]. Izonfuo LWA, Bariweni AP. The effect of urban runoff water and human activities on some physico-chemical parameters of the Epie Creek in the Niger delta. *Applied Science and Environmental Management*. 2001;5(1):47-55.

- [17]. Shamsaie A, Oreei S, Sarang A. The comparison of water indices and zoning quality in Keroon and Dez rivers. *Water Wastewater*. 2004;16(3):39-48. [*Persian*]
- [18]. Safarian R, Mashayekhi N. Investigation and categorization of Karun river's quality (between Zargan and Ome-tamir) comparing with water quality index status of Marun and Zohre rivers. 10th national conference on Environment Health, Hamedan. [*Persian*]
- [19]. Dadolahi-sohrab A, Arjomand F. Quality index of Karun river water as an indicator of wastewater of Khorramshahr soap factory. *Oceanology*. 2011;1(4):21-27. [*Persian*]
- [20]. Salari M, Radmanesh F, Zarei H. Evaluation of quantity and quality of Karun river water resource using NSFQI and AHP method. *Human and the Environment*. 2013;10(4):13-22. [*Persian*]
- [21]. Hoseini P, Ildorumi AR, Hoseini AR. Investigation of quality of Karun river using NSFQI between Zargan and Kut-e-amir (in 5 years). *Human and the Environment*. 2013;11(2):1-11. [*Persian*]
- [22]. Madadinia M, Monavari SM, Karbasi A, Nabavi SMB, Rajabzade E. Investigation of quality of Karun river in Ahwaz city using quality index. *Sci Environ Techno*. 2014;16(1):49-60. [*Persian*]
- [23]. Karimi-Jashni A, Salari-Dargi M. Quality categorization of river water (case study: Karun, Dez and Karkhe rivers). *Environment and Development*. 2015;5(10):29-38. [*Persian*]
- [24]. Ebadati N, Houshmandzade M. Investigation of Dez river's quality in Dezful hydrometric station. *Eco-hydrology*. 2014;1(2):69-81. [*Persian*]
- [25]. Sadeghi M, Bay A, Bay N, Soflaie N, Mehdinejad MH, Mallah M. The effect of agriculture drainage on water quality of the Zaringol in Golestan Province by the water quality index. *Research in Environmental Health*. 2015;1(3):177-185. [*Persian*]
- [26]. Ghaeni Gh, Nassehinia H, Dadban-Shahamat Y. Zoning of Cheshmeh Gerdoo river of Noshahr with NSFQI index in autumn 1391. *Health Research in Community*. 2015;1(2):38-46. [*Persian*]
- [27]. Nasrollahzadeh-Saravi H, Makhloogh A, Yaghobzadeh Z, Ghiyasi M. Comparative study of water quality indices in Shahid Rajaee dam reservoir (Sari, Mazandarn Province). *Water and wastewater*. Accepted. 2016. [*Persian*]
- [28]. Seif A, Najmi N. Detecting changes of meanders in Karun river using multi-temporal images of IRS and Landsat. *Geographical researches*. 2013;28(3):211-226. [*Persian*]
- [29]. Yousefi S, Pourghasemi HR, Hooke J, Navartil O, Kidova A. Changes in morphometric meander parameters identified on the Karoon River, Iran, using remote sensing data. *Geomorphology*. 2016;271:55-64.
- [30]. Deininger RA, Maciunas JM. Water quality index for public water supplies. Department of Environment and Industrial Health. Michigan: University of Michigan; 1971.
- [31]. Mann HB. Nonparametric test against trend. *Econometrica*. 1945;13:245-259.
- [32]. Şen Z. Innovative trend analysis methodology. *Hydrologic Engineering*. 2011;17(9):1042-1046.
- [33]. Khalili K, Fakherifard A, Dinpajhoh Y, Ghorbani MA. Trend analysis and stationary of river flow rate in order to hydrological time series modeling. *Soil and Water Science*, 2010;20.1(1):61-72. [*Persian*]
- [34]. Salas JD, Delleur JW, Yevjevich V, Lane WL. Applied modeling of hydrologic time series. Littleton: Water Resources Publications; 1980.
- [35]. Wang W, Van Gelder PHAJM, Vrijling JK. Trend and stationary analysis for stream flow processes of rivers in Western Europe in 20th century. In Proceedings of IWA International Conference on Water Economics, Statistics and Finance. Rethymno, Greece. 2005;810:451-461.
- [36]. Dickey DA, Fuller WA. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *American Statistical Association*. 1979;74:423-431.
- [37]. Khalili K, Nazeri-Tahrudi M. Modeling of annual water level changes of Urmia Lake with linear time series models. *Water Management in Arid Lands*. 2014;1(1):25-35. [*Persian*]
- [38]. Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models. 1: Discussion of principles. *Hydrology*, 1970;10(3):282-290.
- [39]. Sharifan H, Dehghani AA, Karimirad I. Correction factor for Hargreaves-Samani method to estimate ETo (case study: Gorgan synoptic station). *Water and Soil Conservation*. 2012;19(3):227-235. [*Persian*]