

## مقاله علمی-پژوهشی

# ارزیابی ماهیانه روند و همگنی شاخص کیفیت آب شرب در حوضه‌ی پایین‌دست سد سفیدرود

محمدصادق عنبرسوز<sup>۱</sup>، کیومرث ابراهیمی<sup>۲\*</sup> و محمد شجاعی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

## چکیده

اطلاع از تغییرات کیفی رودخانه‌ها به‌عنوان منابع مهم آب سطحی در دوره‌های بلندمدت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف مقاله حاضر بررسی و شناسایی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب سفیدرود و سه شاخه فرعی آن در پایین‌دست سد سفیدرود بوده است. از داده‌های ماهیانه پارامترهای کیفیت آب شامل pH، TDS،  $\text{Cl}^-$ ،  $\text{SO}_4^{2-}$ ،  $\text{Na}^+$ ،  $\text{K}^+$ ،  $\text{HCO}_3^-$ ،  $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$  مربوط به سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۷ جهت محاسبه شاخص کیفیت آب شرب استفاده شد. به‌منظور شناسایی روند در سری زمانی شاخص کیفیت آب از آزمون‌های من-کندال و تخمین‌گر شیب‌سن و جهت شناسایی جهش در سری زمانی از آزمون همگنی پتیت استفاده گردید. تغییرات مثبت شاخص مورد استفاده نشان از کاهش کیفیت آب دارد و کاهش مقدار شاخص نشان دهنده بهبود کیفیت آب است. شاخص ایستگاه رودبار در شش‌ماه اول سال و همچنین در ماه‌های دی و اسفند روند افزایشی داشته است. روند صعودی شاخص فروردین‌ماه در ایستگاه رودبار با مقدار پارامتر شیب‌سن برابر ۱/۵۴، موجب کاهش طبقه کیفی آب از خوب به ضعیف در بعد از سال ۱۳۸۲ شده است. شاخص کیفی ایستگاه آستانه در ماه‌های آبان تا اسفند با مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۲، روند صعودی داشته و در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد با P-Value کمتر از ۰/۰۱ روند کاهشی تجربه کرده است.

واژه‌های کلیدی: آزمون روند و ناهمگنی، تغییرات بلندمدت، شاخص کیفیت آب WHO

## مقدمه

رودخانه‌ها و آب‌های سطحی از دسترس‌ترین منابع آب هستند. به‌طوریکه اغلب شهرها و فعالیت‌های انسانی در نزدیکی رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند (FAO, 2011). در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت و گسترش شهرها و فعالیت‌های انسانی موجب افزایش بهره‌برداری از منابع آب شده است. بنابراین مدیریت کیفیت رودخانه‌ها و اطلاع از روند تغییرات آن به‌عنوان منبع حیاتی تأمین آب همواره موردتوجه سازمان‌های ملی و بین‌المللی بوده است. آزمون من-کندال (Mann-Kendall) به‌عنوان یک روش آماری غیر پارامتریک، به‌طور گسترده برای تشخیص روند در سری‌های زمانی داده‌های محیطی، به‌ویژه در مطالعات کیفیت آب رودخانه‌ها، مورد استفاده قرار گرفته است (Helsel

et al., 2020). این آزمون به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها و مقاومت در برابر داده‌های پرت، در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی کاربرد فراوانی دارد (Yue et al., 2002). تاکنون به‌منظور شناسایی روند تغییرات کیفیت آب مطالعات مختلفی انجام شده است. هیرش و همکاران (۱۹۹۱) از آزمون من-کندال برای تحلیل روندهای بلندمدت کیفیت آب رودخانه‌های ایالات متحده استفاده کردند و نشان دادند که این آزمون در شناسایی تغییرات تدریجی پارامترهای کیفیت آب مؤثر است (Hirsch et al., 1991). همچنین، ژانگ و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای بر روی رودخانه یانگ‌تسه در چین، با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب‌سن (Sen's Slope Estimator)، به بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفیت آب پرداختند (Zhang et al., 2006). طبری و همکاران کیفیت آب رودخانه مارون را در بازه زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۸۷ بررسی کرده و با استفاده از آزمون من-کندال، روند نزولی کیفیت آب را تأیید کردند که عمدتاً به افزایش ورود آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی نسبت داده شد (Tabari et al., 2011). کاویان و همکاران (۱۳۹۴) نیز با استفاده از آزمون من-کندال و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS، تغییرات کیفیت آب رودخانه هزار را بررسی کردند و کاهش کیفیت آب در جهت پایین‌دست را گزارش نمودند. دیلم و همکاران

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران  
۲- استاد، گروه آموزشی علوم و فناوری‌های محیطی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکوهیدرولوژی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
(\*) نویسنده مسئول: (Email: EbrahimiK@ut.ac.ir)

سفیدرود در محدوده متوسط قرار دارد. میرمشتاقی و همکاران (۱۳۹۰) با نمونه‌برداری از پنج نقطه در امتداد سفیدرود در ماه بهمن ۱۳۸۹ و ماه‌های فروردین، خرداد و مرداد ۱۳۹۰، کیفیت آب سفیدرود را با استفاده از شاخص NSFQI ارزیابی کرده و دریافتند که کیفیت آب سفیدرود نامناسب است. محمدی قلعه‌نی (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای بر روی رودخانه سفیدرود، با استفاده از آزمون من-کندال، روندهای زمانی پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه را طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ بررسی کرد. نتایج نشان داد که پارامتر SAR در ایستگاه رودبار روند صعودی معنادار و پارامترهای EC، TDS و TH در ایستگاه آستانه روند کاهشی معنادار داشته‌اند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحقیقات انجام‌شده بر روی کیفیت آب سفیدرود مربوط به دوره‌های کوتاه و میان‌مدت بوده و تاکنون مطالعه‌ای جهت شناسایی تغییرات احتمالی کیفیت آب سفیدرود در بلندمدت انجام نشده است. در مقاله حاضر با استفاده از شاخص کیفیت آب شرب و بهره‌گیری از آزمون‌های من-کندال و تخمین گر شیب سن (Sen's slope estimator)، روند تغییرات بلندمدت کیفیت آب سفیدرود با تحلیل داده‌های ماهیانه کیفیت آب طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۷ مورد بررسی گرفته‌است. همچنین با بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب، تأثیر رودخانه‌های فرعی توتکابن، زیلکی و دیسام بر تغییرات کیفیت آب سفیدرود بررسی و تحلیل شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در مقاله حاضر تغییرات کیفیت آب شرب سفیدرود در ایستگاه‌های رودبار و آستانه به ترتیب در پایاب سد سفیدرود و پایین‌دست سفیدرود بررسی شد. جهت تعیین نقش رودخانه‌های فرعی توتکابن، زیلکی و دیسام در تغییرات کیفیت آب سفیدرود، داده‌های کیفیت آب ایستگاه‌های چله‌بر، شهربیجار و پاشاکی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه که در حوضه آبریز سفیدرود بزرگ قرار دارند در جدول ۱ ارائه شده است.

(۱۳۹۵) با استفاده از آزمون‌های آماری من-کندال و تخمین گر شیب سن به بررسی وجود روند در سری زمانی سالانه داده‌های کیفیت آب گرگانرود از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۸ پرداختند. بیاتی خطیبی و حیدری (۱۳۹۳) در پژوهشی تغییرات درازمدت کیفیت آب رودخانه اهر (یکی از رودخانه‌های مهم دامنه‌های غربی سیلان) را با استفاده از آزمون آماری من-کندال مورد بررسی قرار دادند. انصاری و یوسفی (۱۴۰۳) با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال به تحلیل روند کیفیت آب رودخانه کارون در چهار ایستگاه هیدرومتری شامل گتوند، شوشتر، ملاثانی و اهواز در بازه زمانی ۲۰ ساله (۱۳۹۶-۱۳۷۷) پرداختند. ارزیابی کیفی آب نیازمند اندازه‌گیری و بررسی مقادیر تعداد زیادی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کیفیت آب است که سبب پیچیدگی تعیین طبقه کیفی آب می‌شود. برای غلبه بر این مشکل و طبقه‌بندی کارآمد کیفیت آب، شاخص‌های متنوعی بر اساس مجموعه‌ای از پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب معرفی و در مطالعات زیادی استفاده شده است. از طرفی تحلیل‌های مکانی بر پایه نقشه‌های تولیدشده در محیط نرم‌افزار GIS می‌تواند به کشف الگوهای پیچیده و اطلاعاتی که ممکن است در جدول‌ها و متن به چشم نیاید کمک کند. مروج و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از شاخص کیفیت آب، آزمون روند من-کندال و نرم‌افزار GIS تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب رودخانه کارون را از ایستگاه گتوند تا دارخوین بررسی و اظهار کردند که کیفیت آب رودخانه کارون متوسط بوده است. آن‌ها همچنین دریافتند که یکنواختی شاخص کیفیت آب در دو مقیاس زمانی و مکانی، بیان‌گر به تعادل رسیدن آلاینده‌ها با توان خودپالایی رودخانه است.

رودخانه سفیدرود مهم‌ترین و باارزش‌ترین منبع آب سطحی در استان گیلان محسوب می‌شود و لذا بررسی کیفیت آب این رودخانه مورد توجه محققان زیادی بوده است. آخونی پورحسینی و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای به ارزیابی دقت مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی کیفیت آب سفیدرود پرداختند. مروت‌دوست و همکاران (۱۳۹۴) تغییرات کیفیت آب سفیدرود را طی ماه‌های اسفندماه ۱۳۹۱ تا بهمن‌ماه ۱۳۹۲ بررسی و اظهار نمودند به‌طور میانگین کیفیت آب

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

ایستگاه	رودخانه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
رودبار	سفیدرود	۱۹۵	۴۹-۲۳-۴۹	۱۹-۴۶-۳۶
آستانه	سفیدرود	۷۰	۰۲-۵۶-۴۹	۴۱-۱۶-۳۷
پاشاکی	دیسام	۴۰	۵۳-۴۷-۴۹	۱۶-۰۸-۳۷
چله بر	توتکابن	۲۳۰	۵۵-۳۳-۴۹	۰۴-۵۱-۳۶
شهربیجار	زیلکی رود	۱۰۰	۲۲-۳۹-۴۹	۰۵-۰۰-۳۷

داده شده است. حداکثر وزن تأثیر به پارامترهای کل جامدات محلول و یون‌های کلر و سولفات به دلیل اهمیت بالای آن‌ها در کیفیت آب شرب اختصاص دارد (Srinivasamoorthy et al. 2008). همچنین حداقل وزن تأثیر به یون بی‌کربنات به دلیل نقش کم آن در کیفیت آب شرب نسبت داده شده است. برای سایر پارامترها مانند یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم و مقدار pH بسته به اهمیت آن‌ها در کیفیت کلی آب برای مصارف آشامیدنی، عددی بین ۱ تا ۵ به‌عنوان وزن تأثیر اختصاص یافته است (Ketata-Rokbani et al. 2011). مرحله بعد به منظور تعیین این شاخص، وزن تأثیر نسبی (Wi) هر پارامتر با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$Wi = \frac{wi}{\sum_{i=1}^n wi} \quad (1)$$

ایستگاه‌های رودبار و آستانه به ترتیب در ارتفاع ۲۵۰ و ۷- متر، بیشترین و کمترین ارتفاع را دارند. رودخانه‌های توتکابن، زیلکی رود و دیسام از ساحل راست و در محدوده روستاهای به ترتیب توتکابن، شهربیجار و گیسوم به سفیدرود می‌پیوندند.

### شاخص کیفیت آب شرب

به منظور ارزیابی کیفیت آب شرب در ایستگاه‌های مورد مطالعه از شاخص کیفیت آب معرفی شده توسط سازمان بهداشت جهانی استفاده شد (WHO, 2004). این شاخص با استفاده از ۹ پارامتر کیفیت آب شامل pH، کل جامدات محلول، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم به دست می‌آید. در این روش به هر یک از ۹ پارامتر کیفیت آب بر اساس اثرات یافته شده آن‌ها بر سلامت انسان، مطابق جدول ۲ یک وزن تأثیر (wi) اختصاص

جدول ۲- مقادیر استاندارد و وزن تأثیر پارامترهای کیفیت آب (WHO, 2004)

پارامترها	مقدار استاندارد*	وزن تأثیر	پارامترها	مقدار استاندارد	وزن تأثیر
pH	۸/۵	۳	K <sup>+</sup>	۱۲	۲
TDS	۵۰۰	۵	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	۱۲۰	۱
Cl <sup>-</sup>	۲۵۰	۵	Ca <sup>2+</sup>	۷۵	۳
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	۲۵۰	۵	Mg <sup>2+</sup>	۵۰	۳
Na <sup>+</sup>	۲۰۰	۴			

\* بر اساس استاندارد کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی، واحد مقادیر تمامی پارامترها به‌جز مقدار pH، میلی‌گرم در لیتر است.

ترتیب برابر مقادیر اندازه‌گیری شده و استاندارد هریک از پارامترهای کیفیت آب هستند. در جدول ۳ مقادیر استاندارد هریک از پارامترها بر اساس استاندارد آب آشامیدنی WHO ارائه شده است. در ادامه با محاسبه کمیت SI برای هر پارامتر با استفاده از معادله ۳، مقدار شاخص کیفیت آب با استفاده از معادله ۴ به دست می‌آید.

$$SI = Wi * qi \quad (3)$$

$$WQI = \sum SI_i \quad (4)$$

مقدار wi در معادله ۱ برابر وزن تأثیر هر پارامتر، n تعداد پارامترها و Wi وزن تأثیر نسبی هر پارامتر است. سپس یک مقیاس درجه‌بندی کیفیت (qi) برای هر پارامتر با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$qi = \frac{Ci}{Si} * 100 \quad (2)$$

در معادله ۲ مقدار qi رتبه‌بندی کیفی است. مقادیر Ci و Si نیز به

جدول ۳. طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس مقدار WQI

شاخص کیفیت آب	طبقه کیفی آب
<۵۰	عالی
۵۰ - ۱۰۰	خوب
۱۰۰/۱ - ۲۰۰	ضعیف
۲۰۰/۱ - ۳۰۰	بسیار ضعیف
>۳۰۰	نامناسب برای مصارف شرب

روند در سری زمانی از نظر آماری با سطح اطمینان انتخابی معنادار بوده و در غیر این صورت روندی وجود ندارد. در صورت معناداری روند در سری زمانی داده‌ها، شیب خط روند با روش تخمین گر سن مطابق معادله ۸ محاسبه می‌شود (Sen, 1968). در این روش شیب خط روند برابر میانه شیب‌های محاسبه شده با استفاده از هر دو زوج داده است.

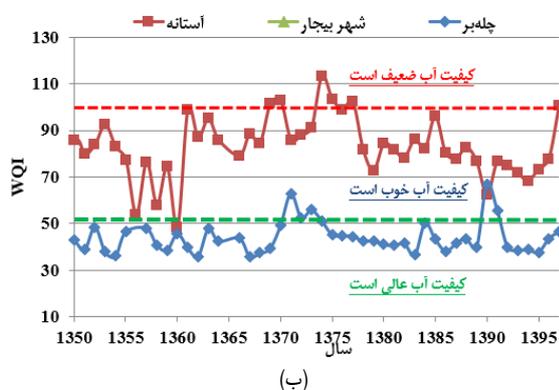
$$Sen's\ slope = Median \left[ \frac{X_j - X_i}{j - i} \right] \quad (8)$$

به منظور تشخیص جهش در سری زمانی شاخص کیفیت آب، از آزمون همگنی پتیت (Pettitte Homogeneity Test) استفاده شد. این آزمون نیازمند پیروی داده‌ها از یک توزیع آماری مشخص نیست و در صورتی که آماره مقدار احتمال آن از یک سطح معناداری مشخص کمتر باشد، داده‌ها ناهمگن خواهند بود (Pettitt, 1979).

### نتایج و بحث

#### تغییرات میانگین سالانه شاخص کیفیت آب شرب

تغییرات میانگین سالانه شاخص کیفیت آب شرب در ایستگاه‌های مورد مطالعه طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۷ در شکل ۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۱-الف مقدار شاخص کیفیت آب در ایستگاه رودبار در سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۵ در مرز کیفیت ضعیف و خوب متغیر بوده است. از سال ۱۳۸۱ به بعد میانگین شاخص کیفیت آب به مقدار ۳۱ واحد افزایش یافته است که به موجب آن شاخص کیفیت آب ضمن تجربه کردن تغییرات نوسانی، همواره بیش تر از ۱۰۰ بوده و کیفیت آب رودخانه به طبقه ضعیف تنزل یافته است.



شکل ۱- تغییرات میانگین سالانه شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه

بر اساس مقدار WQI، کیفیت آب شرب مطابق جدول ۳ در پنج دسته عالی، خوب، ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب طبقه‌بندی می‌شود (Sahu and Sikdar, 2008).

#### آزمون‌های آماری

آزمون من-کندال یک روش آماری غیر پارامتریک است که برای شناسایی روندهای در سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون ابتدا توسط (Mann, 1945) ارائه شد و سپس توسط (Kendall, 1975) بسط توسعه یافت. به منظور بررسی معناداری روند در سری‌های زمانی شاخص کیفیت آب از آزمون نا پارامتریک من-کندال که به نرمال نبودن داده‌ها و وجود داده‌های پرت حساس نیست استفاده شد. برای یک سری زمانی  $x_1, x_2, \dots, x_n$  پارامتر S آزمون من-کندال از معادله ۵ به دست می‌آید.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

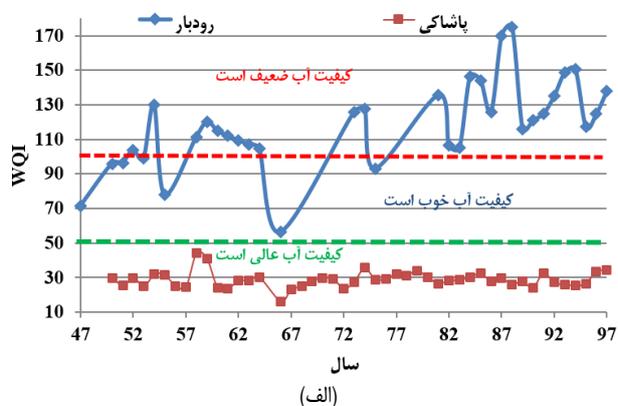
متغیر n در معادله ۵ برابر تعداد داده‌ها است. سپس واریانس پارامتر S از معادله محاسبه می‌شود.

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

آماره استاندارد Z نیز از معادله ۷ به دست می‌آید.

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

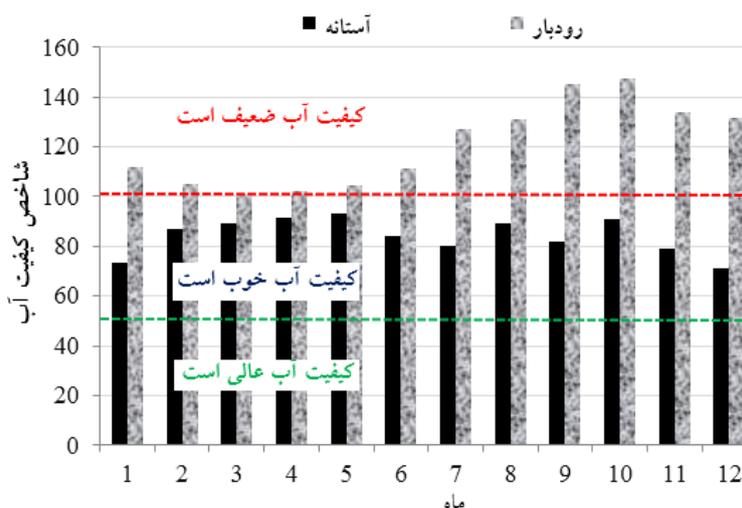
در صورتی که مقدار P-Value متناظر با آماره استاندارد Z از یک سطح اطمینان مشخص (معمولاً ۰/۰۱ یا ۰/۰۵) کوچک تر باشد، وجود



به‌منظور بررسی تغییرات مکانی شاخص کیفیت آب می‌توان از متوسط سالانه شاخص کیفیت آب در هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه که در شکل ۱ ارائه شده است، استفاده نمود. همانطور که مشاهده می‌شود کیفیت آب در ایستگاه آستانه عمدتاً دارای کیفیت خوبی بوده است و تنها در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۷ کیفیت آب برای شرب ضعیف بوده است. باین‌حال آب رودخانه در ایستگاه رودبار از سال ۱۳۸۱ به بعد دارای طبقه کیفی ضعیف بوده است. لذا از سال ۱۳۸۱ به بعد کیفیت آب در ایستگاه آستانه بهتر از کیفیت آب در ایستگاه رودبار بوده است. در سه ایستگاه واقع بر رودخانه‌های فرعی، طبقه کیفی آب همواره عالی و در برخی سال‌ها خوب بوده است. همچنین کیفیت آب رودخانه‌های فرعی به مراتب بهتر از کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه می‌باشد.

#### میانگین بلندمدت ماهیانه شاخص کیفیت آب

در شکل ۲ میانگین بلندمدت شاخص کیفیت آب ماهیانه برای دو ایستگاه رودبار و آستانه ارائه شده است.

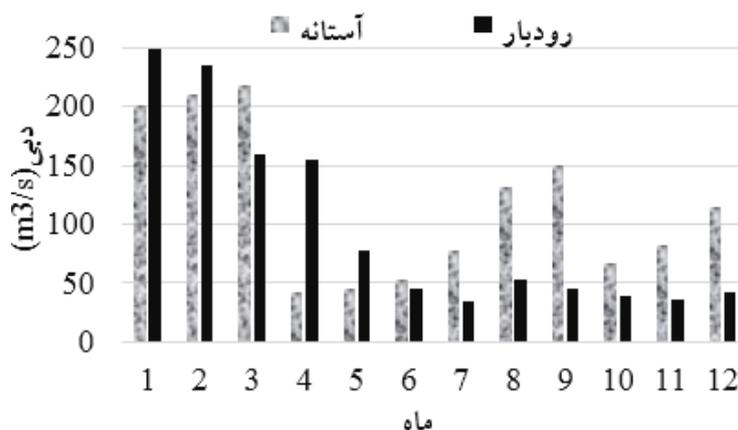


شکل ۲- شاخص کیفیت آب ماهیانه در ایستگاه‌های رودبار و آستانه

آشامیدن برخوردار بوده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، بررسی مقادیر متوسط ماهیانه شاخص کیفیت آب نیز نشان می‌دهد که متوسط ماهیانه شاخص کیفیت آب در ایستگاه آستانه در ماه‌های مختلف سال کمتر از مقادیر شاخص در ایستگاه رودبار است و لذا مطابق شکل ۳ به‌طور متوسط ایستگاه آستانه در ماه‌های مختلف نسبت به ایستگاه رودبار کیفیت آب بهتری داشته است. در شکل ۳ میانگین بلندمدت دبی در هر ماه برای ایستگاه‌های رودبار و آستانه ارائه شده است.

افزایش فعالیت‌های انسانی در نزدیکی ایستگاه رودبار در دو دهه اخیر نظیر برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه و تخلیه پساب کارخانه‌ها به آن را می‌توان از دلایل کاهش کیفیت آب طی این سال‌ها دانست. مطابق شکل‌های ۱-الف و ۱-ب در ایستگاه‌های پاشاکی و شهر بیجار مقدار شاخص همواره کم‌تر از ۵۰ و کلاس کیفی آب عالی بوده است. همچنین روند خاصی در میانگین سالانه شاخص کیفیت آب در این دو ایستگاه مشاهده نمی‌شود. مقدار شاخص در ایستگاه چله‌بر به‌جز در چند سال که بیش از ۵۰ (طبقه کیفی خوب) بوده است، همواره در محدوده ۳۰ تا ۵۰ و کیفیت آب در طبقه عالی بوده است. در ایستگاه آستانه، کلاس کیفی آب از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۱ در اکثر سال‌ها خوب و در سال‌های ۱۳۵۶ و ۱۳۶۰ به مرز عالی نیز رسیده است. از سال ۱۳۶۱ به بعد ضمن قرارگیری مقدار شاخص در محدوده خوب، کیفیت آب به مرز ضعیف نزدیک‌تر شده و در سال ۱۳۷۰ و سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۷ کیفیت آب برای شرب ضعیف بوده است. در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۷ نیز مقادیر شاخص بین اعداد ۵۰ تا ۱۰۰ و کیفیت آب در طبقه خوب بوده است.

در ماه‌های خرداد و دی به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر شاخص کیفیت آب در ایستگاه رودبار با مقادیر به ترتیب ۱۰۰/۹ و ۱۴۷/۵ ثبت شده است و با وجود اینکه در تمام ماه‌ها شاخص کیفیت آب در دسته ضعیف قرار دارد، در شش ماه دوم سال نسبت به شش ماه اول، کیفیت آب نامناسب‌تر است. شاخص کیفیت آب در ایستگاه آستانه در ماه‌های اسفند و مرداد به ترتیب کمترین (۷۱) و بیشترین (۹۳) مقادیر را ثبت نموده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مقدار شاخص در ایستگاه آستانه برای ماه‌های مختلف سال تفاوت زیادی نداشته و در تمام ماه‌ها آب از کیفیت خوبی برای



شکل ۳- متوسط ماهیانه بلندمدت دبی در ایستگاه‌های رودبار و آستانه

که با وجود تغییرات زیاد دبی در ایستگاه آستانه، مقدار شاخص کیفیت آب در این ایستگاه تغییرات زیادی نداشته است. در شکل ۴ میانگین بلندمدت شاخص کیفیت آب ماهیانه برای ایستگاه‌های چله‌بر، شهربیجار و پاشاکی ارائه شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در تمام ماه‌ها مقادیر شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های شهر بیجار و پاشاکی بسیار نزدیک به یکدیگر و از مقادیر شاخص در ایستگاه چله‌بر کمتر است.

کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر شاخص کیفیت آب در ایستگاه چله‌بر به ترتیب در ماه‌های اسفند و دی با مقادیر به ترتیب ۳۸/۵ و ۴۹ ثبت شده است و همواره شاخص کیفیت آب در دسته عالی بوده است. کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر شاخص کیفیت آب در ایستگاه شهربیجار با مقادیر به ترتیب ۲۶/۵ و ۳۴/۶ در ماه‌های اسفند و خرداد ثبت شده است و کیفیت آب در تمام ماه‌ها عالی بوده است. شاخص کیفیت آب در ایستگاه پاشاکی در مردادماه کم‌ترین مقدار (۲۲/۶) و در بهمن‌ماه بیش‌ترین مقدار (۳۷/۸) را داشته است و با وجود اینکه کیفیت آب در تمام ماه‌ها عالی است، در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد کیفیت آب نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است. مطابق جدول ۴، در ایستگاه‌های پاشاکی و شهربیجار پارامترهای دبی و شاخص کیفیت آب در سطح اطمینان ۹۹ درصد و با ضرایب به ترتیب ۰/۸۴- و ۰/۸۰- همبسته هستند. این رابطه در ایستگاه چله‌بر با سطح اطمینان ۹۵ درصد و با ضریب ۰/۶۶- برقرار است. اما در ایستگاه آستانه مقدار P-Value آزمون یرسون بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است و از نظر آماری رابطه‌ای میان دبی و شاخص کیفیت آب وجود نداشته است.

#### تغییرات مکانی کیفیت آب شرب

به‌منظور بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب سفیدرود، از داده‌های شهریورماه ۱۳۹۷ برای محاسبه شاخص کیفیت آب و از نرم‌افزار Arc

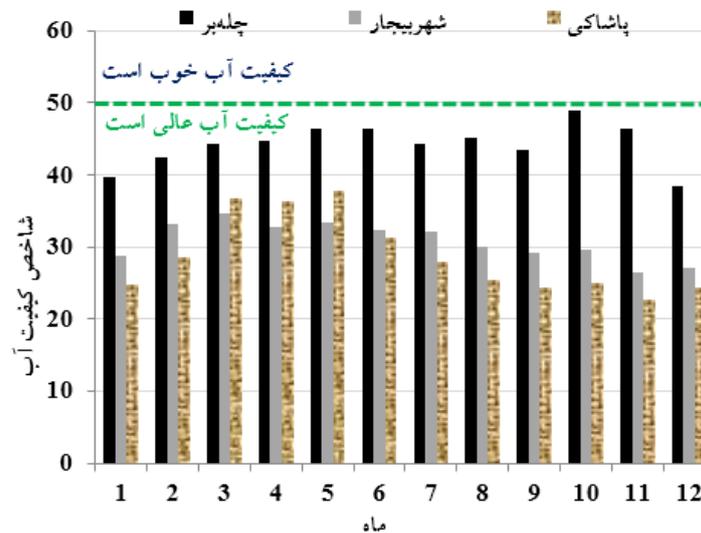
در چهار ماه اول سال که میانگین جریان سفیدرود در ایستگاه رودبار حدود ۱۹۹ مترمکعب در ثانیه و بیشتر از جریان رودخانه در سایر ماه‌ها است، مقدار شاخص کیفیت آب نسبت به سایر ماه‌ها کمتر و آب رودخانه از کیفیت بیشتری برخوردار است (شکل‌های ۲ و ۳). از طرفی در شش ماه دوم سال که میانگین جریان سفیدرود در ایستگاه رودبار حدود ۴۲ مترمکعب در ثانیه و کمتر از ماه‌های ابتدایی سال است، کیفیت آب نسبت به ماه‌های ابتدایی سال نامناسب‌تر است. در جدول ۴ نتایج آزمون همبستگی پیرسون برای میانگین بلندمدت دبی و شاخص کیفیت آب ماهیانه برای ایستگاه‌های رودبار و آستانه ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمون همبستگی پیرسون برای داده‌های دبی و شاخص کیفیت آب ماهیانه

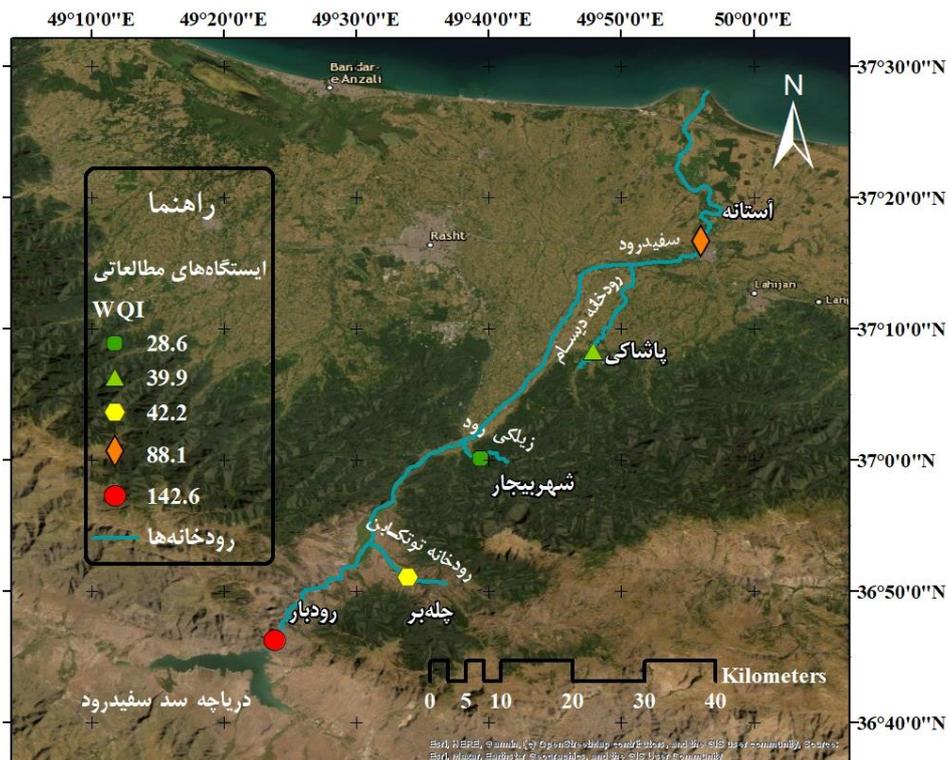
ایستگاه	ضریب همبستگی	مقادیر احتمال (P-Value)
رودبار	-۰/۶۷	۰/۰۱۸
آستانه	-۰/۲۵	۰/۴۳۱
چله‌بر	-۰/۶۶	۰/۰۲۱
شهر بیجار	-۰/۸۰	۰/۰۰۲
پاشاکی	-۰/۸۴	۰/۰۰۱

در جدول ۴ مقادیر P-Value آزمون پیرسون و ضریب همبستگی دبی و شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. بر اساس جدول ۴ دبی و شاخص کیفیت آب در ایستگاه رودبار با ضریب ۰/۶۷- و در سطح اطمینان ۹۵ درصد همبسته هستند که بیان‌گر رابطه مستقیم دبی سفیدرود با کیفیت آب شرب در ایستگاه رودبار است. در ایستگاه آستانه مقدار P-Value آزمون پیرسون بیش از ۰/۰۵ و در این ایستگاه از نظر آماری رابطه‌ای میان دبی و شاخص کیفیت آب وجود ندارد. با مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود

GIS 10.9 جهت نمایش ایستگاه‌ها در امتداد رودخانه استفاده شد. بر اساس شکل ۵ مقدار شاخص در ایستگاه رودبار برابر ۱۴۲/۶ و کیفیت آب جهت کاربری شرب ضعیف است.



شکل ۴- شاخص کیفیت آب ماهیانه در ایستگاه‌های چله‌بر، شهر بیجار و پاشاکی



شکل ۵- تغییرات مکانی شاخص کیفیت آب

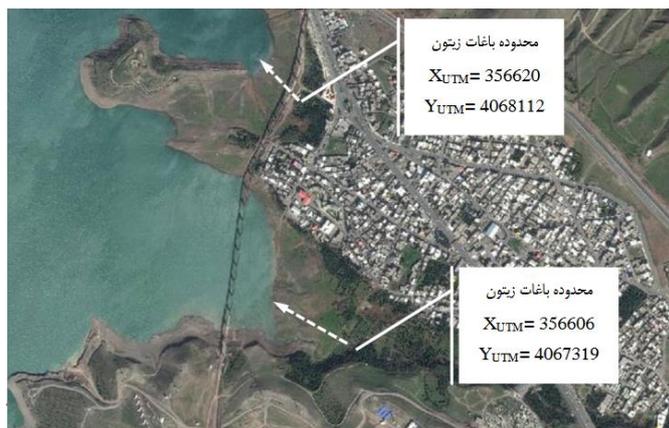
۶). با توجه به نزدیکی ایستگاه رودبار به محل سد و عدم پیوستن شاخه‌های فرعی به سفیدرود در این فاصله، کیفیت آب در ایستگاه رودبار ضعیف بوده است. شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های چله‌بر،

از آنجایی که شیب زمین‌های اطراف مخزن سد سفیدرود به سمت دریاچه آن است و کودهای شیمیایی مورد استفاده در باغات زیتون همراه رواناب به داخل مخزن سد سفیدرود زهکش می‌شوند (شکل

### بررسی وجود روند در شاخص کیفیت آب ماهیانه

در جدول‌های ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر P-Value آزمون من-کندال و مقادیر شیب سن برای شاخص کیفیت آب ماهیانه ایستگاه‌ها ارائه شده است. در ادامه به بررسی وجود روند در شاخص کیفیت آب ماهیانه ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است.

شهر بیجار و پاشاکی کمتر از ۵۰ و آب از کیفیت عالی برخوردار بوده است. در ایستگاه آستانه شاخص کیفیت آب برابر ۸۸ و کیفیت آب سفیدرود در دسته خوب قرار داشته است. بنابراین اتصال رودخانه‌های فرعی با کیفیت آب عالی به سفیدرود منجر به افزایش مقدار جریان در سفیدرود، کاهش غلظت یون‌های محلول در آب و در نتیجه ارتقاء قابل ملاحظه کیفیت آب از دسته ضعیف در ایستگاه رودبار به طبقه خوب در ایستگاه آستانه شده است.



شکل ۶- تخلیه زه‌آب باغات زیتون به مخزن سد سفیدرود

جدول ۵- مقادیر P-Value آزمون من-کندال برای سری‌های زمانی شاخص کیفیت آب ماهیانه

ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
رودبار	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۳	۱/۰۰	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۳۳	۰/۰۱
چله‌بر	۰/۶۵	۰/۳۸	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۶۹	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۵۱	۰/۲۲
شهر بیجار	۰/۶۹	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۴۳	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۴۱	۰/۹۰
پاشاکی	۰/۹۷	۰/۲۶	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۹۳	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۰۲	۰/۳۰	۰/۵۷	۰/۸۶	۰/۹۶
آستانه	۰/۴۰	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۸	<۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	<۰/۰۱	۰/۰۱

جدول ۶- مقادیر شیب سن برای شاخص کیفی در ماه‌های مختلف سال

ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
رودبار	۱/۵۴	۱/۲۷	۱/۳۲	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۳۴	۰/۰۱	۰/۳۶	۰/۸۱	۰/۴۱	۰/۶۸
چله‌بر	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۰۶	-۰/۰۹	-۰/۰۲	۰/۰۴	-۰/۰۲	۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۸
شهر بیجار	-۰/۰۲	-۰/۱۱	-۰/۰۹	-۰/۰۴	-۰/۱۳	-۰/۰۸	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۱۱	۰/۰۳	۰/۰۰
پاشاکی	۰/۰۰	۰/۰۸	-۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۱۵	-۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰
آستانه	-۰/۳۸	۰/۷۰	۰/۷۶	۰/۷۰	۰/۵۷	۰/۳۵	-۰/۵۳	-۱/۶۶	-۱/۱۷	-۱/۱۲	-۱/۵۵	-۰/۸۲

### ایستگاه رودبار

مطابق جدول ۶ مقدار شیب سن برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد بزرگ‌تر از یک و شاخص کیفیت آب در این ماه‌ها به‌طور متوسط سالانه یک واحد افزایش یافته است.

### ایستگاه‌های چله‌بر، شهر بیجار و پاشاکی

شاخص کیفیت آب در ایستگاه چله‌بر، در هیچ‌یک از ماه‌های سال

مطابق جدول‌های ۵ و ۶، شاخص کیفیت آب در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، مرداد و شهریور با سطح اطمینان ۹۹ درصد و در ماه‌های دی و اسفند با سطح اطمینان ۹۵ درصد روند افزایشی داشته است. این یافته بیان‌گر این است که کیفیت آب در ایستگاه رودبار در هفت ماه از سال روند کاهشی داشته است. همچنین

به ذکر است با توجه به تعریف شاخص کیفیت آب مورد استفاده، افزایش مقدار شاخص نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب است و کاهش مقدار شاخص نیز بیان‌گر بهبود کیفیت آب می‌باشد. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، در بازه زمانی مورد مطالعه کیفیت آب در برخی از ایستگاه‌ها کاهش و در برخی دیگر افزایش یافته است. نکته حائز اهمیت آن است که در ایستگاه آستانه به‌طور متوسط کیفیت آب در بهمن‌ماه افزایش محسوس داشته است در حالی که در تیرماه کیفیت آب اندکی کاهش یافته است. همچنین در تیرماه کیفیت آب ایستگاه رودبار نیز کاهش یافته است. بیشترین تغییرات شاخص کیفیت آب مربوط به کاهش کیفیت آب در ایستگاه رودبار طی فروردین‌ماه می‌باشد که به‌منظور بررسی روند کاهش کیفیت آب در این ایستگاه شکل ۷ ارائه گردیده است. شاخص کیفیت آب در فروردین‌ماه در ایستگاه رودبار طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۴ مقادیری بین ۵۰ و ۱۰۰ داشته و آب از کیفیت خوبی برخوردار بوده است. بر اساس نتایج آزمون من - کندال، مقدار P-Value مربوط به این آزمون برای شاخص کیفیت آب ایستگاه رودبار در فروردین‌ماه کمتر از ۰/۰۱ می‌باشد (جدول ۵) و لذا شاخص کیفیت آب با سطح اطمینان ۹۹ درصد روند صعودی با شیب ۱/۵۴ داشته است. در تصدیق این یافته چنانچه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، شاخص کیفیت آب که قبل از سال ۱۳۸۲ دارای مقادیر کمتر از ۱۰۰ بوده است، از سال ۱۳۸۲ به بعد همواره شاخص کیفیت آب بیش از ۱۰۰ بوده و طبقه کیفی آب به دسته ضعیف تغییر کرده است.

بر اساس مقدار P-Value آزمون من کندال، شاخص کیفیت آب تیرماه در ایستگاه آستانه با سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای روند افزایشی با شیب ۰/۷ می‌باشد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، شاخص کیفیت آب تیرماه طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۷ (به‌غیر از سال ۱۳۶۷) در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ بوده و طبقه کیفی آب خوب بوده است. روند صعودی شاخص کیفیت آب باعث شده است تا طبقه کیفی آب از خوب در ابتدای بازه زمانی مورد مطالعه به ضعیف در اکثر سال‌های انتهایی بازه زمانی کاهش یابد. لازم به ذکر است که استثنائاً در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ شاخص کیفیت آب کمترین مقدار را در طول بازه زمانی (۱۳۵۰ تا ۱۳۹۷) داشته و طبقه کیفی آب عالی بوده است.

روند معناداری نداشته که نشان‌دهنده تعادل آلاینده‌های ورودی و سامانه رودخانه است. در ایستگاه شهر بیجار شاخص کیفیت آب در مردادماه با سطح اطمینان ۹۵ درصد روندی نزولی با شیب ۰/۱۳- داشته است.

شاخص کیفیت آب در ایستگاه پاشاکی در هر دو ماه شهریور و آبان با سطح اطمینان ۹۵ درصد روند نزولی داشته است. با این تفاوت که مطابق جدول ۶ شیب‌خط روند در آبان ماه برابر ۰/۱۵- و قدرمطلق آن بیش از سه برابر شیب‌خط روند در شهریورماه است. در نتیجه کیفیت آب در ایستگاه پاشاکی در آبان ماه نسبت به شهریورماه، با سرعت بیشتری رو به بهبود بوده است.

### ایستگاه آستانه

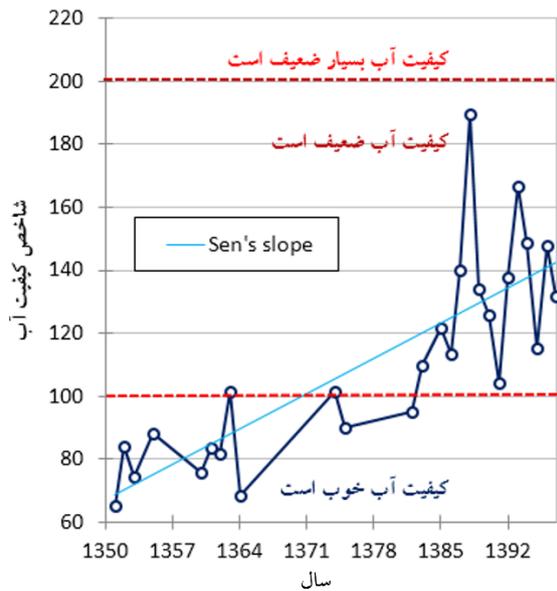
روند تغییرات شاخص کیفیت آب در ایستگاه آستانه غیریکنواخت بوده است. به‌طوریکه در بازه زمانی مطالعه شده کیفیت آب در بعضی از ماه‌ها افزایش و در برخی ماه‌های دیگر کاهش یافته است. شاخص کیفیت آب در ماه‌های آبان، بهمن، اسفند و فروردین با سطح اطمینان ۹۹ درصد و در ماه‌های آذر و دی با سطح اطمینان ۹۵ درصد روند کاهشی داشته است. مطابق جدول ۶ قدرمطلق شیب‌خط روند شاخص کیفیت آب در ماه‌های فروردین و بهمن به ترتیب کم‌ترین (۰/۳۸) و بیشترین (۱/۵۵) مقادیر را داشته و در ماه‌های آبان، آذر، دی و بهمن بیش‌تر از ۱/۱ بوده است که نشان‌دهنده روند افزایشی قابل‌ملاحظه کیفیت آب در این ماه‌ها است. مقدار شاخص کیفیت آب در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد با سطح اطمینان ۹۹ درصد روندی صعودی تجربه کرده است. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود شیب‌خط روند شاخص کیفیت آب در ماه‌های خرداد و مرداد به ترتیب بیش‌ترین (۰/۷۶) و کم‌ترین (۰/۵۷) مقادیر را داشته است که نشان از کاهش قابل‌ملاحظه کیفیت آب در ایستگاه آستانه در این ماه‌ها دارد.

### تغییرات زمانی کیفیت آب در ماه‌های با بیشترین تغییرات شاخص کیفیت آب

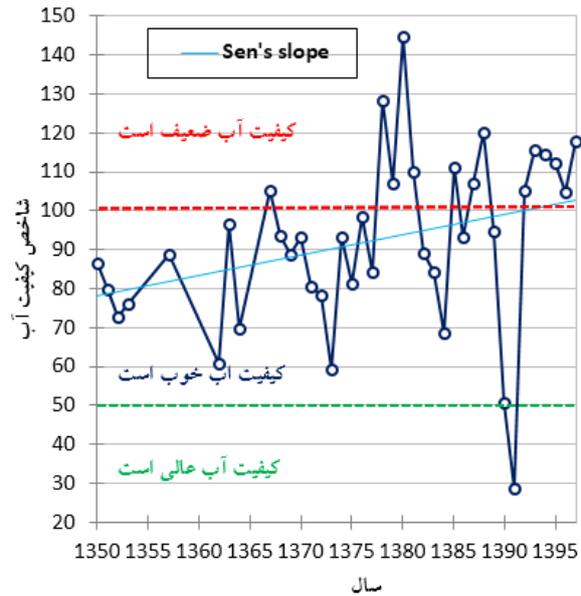
از حاصل‌ضرب شیب خط روند شاخص در طول بازه زمانی مورد مطالعه تغییرات کلی شاخص کیفیت آب ماهیانه محاسبه و بیش‌ترین مقادیر تغییرات شاخص در جدول ۷ ارائه شده است. لازم

جدول ۷- بیشترین تغییرات زمانی شاخص کیفیت آب ماهیانه طی دوره زمانی مطالعه شده

ایستگاه	ماه	مقدار تغییرات بلندمدت شاخص
رودبار	فروردین	۷۰/۸
رودبار	تیر	۴۳/۸
آستانه	تیر	۳۲/۹
آستانه	بهمن	-۶۹/۸
شهر بیجار	مرداد	-۵/۸



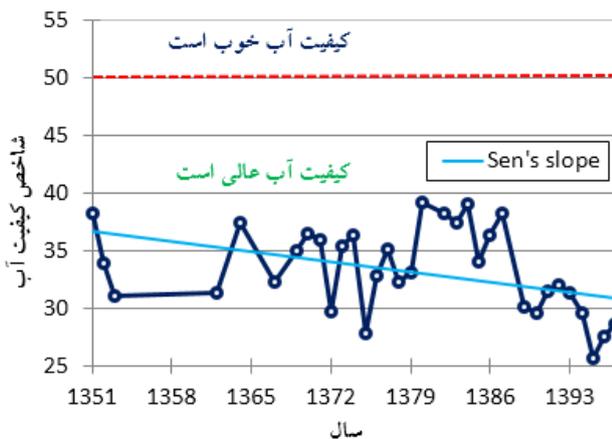
شکل ۷- تغییرات شاخص کیفیت آب فروردین ماه در ایستگاه رودبار طی بازه زمانی مورد مطالعه



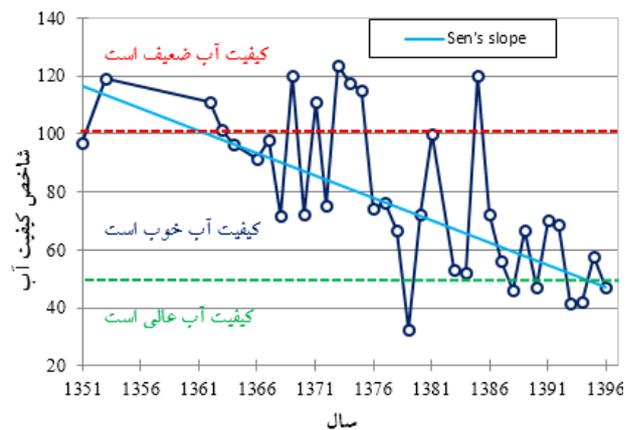
شکل ۸- تغییرات شاخص کیفیت آب تیرماه در ایستگاه آستانه طی دوره زمانی مورد مطالعه

شاخص کیفیت آب بهمن ماه در ایستگاه آستانه کمتر از  $0/01$  است و همانطور که مشاهده می شود شاخص کیفیت آب دارای روند کاهشی با شیب  $-1/55$  است. با توجه به نوع تعریف شاخص کیفیت آب مورد استفاده، کاهش شاخص معادل افزایش کیفیت آب می باشد. روند نزولی شاخص کیفیت آب باعث شده تا از سال ۱۳۷۶ به بعد (به غیر از سال ۱۳۸۵) طبقه کیفی آب به خوب و عالی بهبود یابد. تا حدی که در سال های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ کیفیت آب در طبقه کیفی عالی قرار گرفته است.

در شکل ۹ تغییرات زمانی شاخص کیفیت آب مردادماه در ایستگاه شهر بیجار ترسیم شده است. مقدار P-Value آزمون من کندال برای شاخص مردادماه در ایستگاه شهر بیجار برابر  $0/04$  است و شاخص کیفیت آب با سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای روند است. با این حال روند کاهشی شاخص کیفیت آب با شیب ملایم  $-0/13$  اتفاق افتاده و به موجب آن در ۸ سال پایانی بازه مورد مطالعه، شاخص کیفی آب کمتر از ۳۳ بوده طبقه کیفی آب نیز همواره عالی بوده است. تغییرات زمانی شاخص کیفیت آب بهمن ماه در ایستگاه آستانه در شکل ۱۰ ارائه شده است. مقدار p-value آزمون من کندال برای



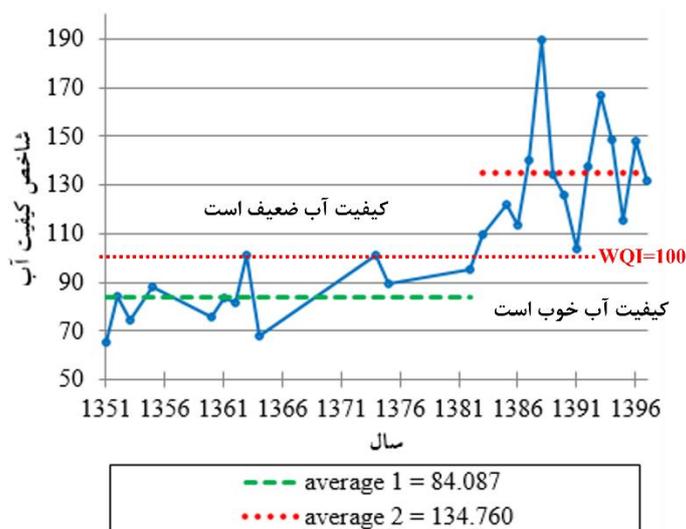
شکل ۹- تغییرات شاخص کیفیت آب مردادماه در ایستگاه شهر بیجار طی دوره زمانی مورد مطالعه



شکل ۱۰- تغییرات شاخص کیفیت آب بهمن ماه در ایستگاه آستانه طی دوره زمانی مورد مطالعه

نقطه تغییر است که از سال ۱۳۸۲ به بعد اتفاق افتاده است. به نحویکه میانگین شاخص کیفیت آب از مقدار ۸۴/۱ در قبل از سال ۱۳۸۲ به مقدار ۱۳۴/۸ در بعد از سال ۱۳۸۲ تغییر کرده است. افزایش میانگین شاخص کیفیت آب به بیش از ۱۰۰ (مرز کیفیت خوب و ضعیف آب) نشان می‌دهد که به‌طور متوسط از سال ۱۳۸۲ به بعد کیفیت آب در ایستگاه رودبار و در فروردین‌ماه، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای را نسبت به گذشته تجربه کرده است.

در شکل ۱۱ نتایج آزمون همگنی پتیت برای شاخص کیفیت آب فروردین‌ماه در ایستگاه رودبار ارائه شده است. آزمون همگنی پتیت به‌منظور شناسایی نقاط تغییر در روند داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمون بررسی می‌کند که آیا در داده‌های سری زمانی، نقطه‌ای وجود دارد که قبل و بعد از آن، رفتار داده‌ها متفاوت باشد. همانطور که به صورت شهودی قابل تشخیص است، بر اساس آزمون همگنی پتیت، میانگین شاخص کیفیت آب فروردین‌ماه در ایستگاه رودبار در بازه زمانی مورد مطالعه با سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای



شکل ۱۱- آزمون همگنی پتیت برای شاخص کیفیت آب فروردین‌ماه در ایستگاه رودبار

به‌منظور بررسی تغییرات بلندمدت کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه، شاخص کیفیت آب ماهیانه در بازه زمانی ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۷ با استفاده از آزمون‌های آماری من-کندال و تخمین گر شیب سن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی شاخص کیفیت آب ماهیانه در سه ایستگاه واقع بر شاخه‌های فرعی که در پایین‌دست سد سفیدرود به این رودخانه می‌پیوندند نشان می‌دهد که تنها در ایستگاه پاشاکی در ماه‌های شهریور و آبان و در ایستگاه شهر بیجار در مردادماه تغییرات کیفیت آب روند افزایشی با شیب کم داشته است و مقدار شاخص در ایستگاه چله‌بر در هیچ‌یک از ماه‌های سال روند معناداری نداشته که نشان‌دهنده تعادل آلاینده‌های ورودی و سامانه رودخانه است.

کیفیت آب سفیدرود در ایستگاه رودبار در ماه‌های دی و اسفند و همچنین در شش‌ماهه اول سال روند نزولی داشته و در ماه‌های فروردین تا خرداد شیب خط روند شاخص کیفیت آب بیش از ۱/۳ بوده است. بر اساس نتایج آزمون همگنی پتیت روند کاهش کیفیت آب در ایستگاه رودبار در فروردین‌ماه باعث شده است تا از سال ۱۳۸۲ به بعد طبقه کیفی آب از خوب به ضعیف تنزل یابد. لذا در صورت عدم اتخاذ

## نتیجه‌گیری

بررسی متوسط سالانه شاخص کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که کیفیت آب در سه ایستگاه واقع بر رودهای فرعی عالی بوده است. در ایستگاه آستانه طبقه کیفی آب عمدتاً خوب و در چند سال ضعیف بوده است. کیفیت آب در ایستگاه رودبار در ابتدای بازه زمانی مطالعاتی بین خوب و ضعیف در نوسان بوده اما در ۱۷ سال منتهی به سال ۱۳۹۷ کیفیت آب در این ایستگاه ضعیف بوده است. به منظور بررسی ارتباط کیفیت آب با دبی رودخانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه، ضریب همبستگی پیرسون برای داده‌های متوسط بلندمدت شاخص کیفیت آب و دبی در ماه‌های مختلف سال تعیین شده و مشخص شد در ایستگاه رودبار با سطح اطمینان ۹۵ درصد و ضریب ۰/۶۷-، کیفیت آب وابسته به تغییرات در دبی رودخانه است. با این حال مطابق با یافته‌های تحقیق محمدی قلعه‌نی (۱۳۹۹)، در ایستگاه آستانه همبستگی میان دبی و شاخص کیفیت آب مشاهده نگردید.

دیلیم، م.، تیموری، م. و روحانی، ح. ۱۳۹۵. روند تغییرات رواناب و کیفیت آب سطحی در رودخانه گرگانرود، فصلنامه ترویج و توسعه آبخیزداری. ۴(۱۵): ۱-۱۶.

کاویان، ع.، اسلامی پریخانی، ه. و حبیب نژاد، م. ۱۳۹۴. تغییر پذیری مکانی کیفیت آب رودخانه هراز در جهت پایین دست. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۰(۳۲): ۸۲-۷۷.

محمدی قلعه‌نی، م.، ۱۳۹۹. تحلیل آماری رابطه بین دبی و پارامترهای کیفیت آب در رودخانه‌های تنظیمی (مطالعه موردی: پایین دست سد سفیدرود). نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، بهمن ماه، دانشگاه فردوسی مشهد.

مروت دوست انارکولی، م.، حایری پور، س. و امیرنژاد، ر. ۱۳۹۴. بررسی کیفیت آب رودخانه سفیدرود در محدوده شهرستان رودبار. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۷(۲۵): ۴۲-۳۳.

مروج، م.، کریمی‌راد، ا. و ابراهیمی، ک. ۱۳۹۶. ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه کارون بر اساس شاخص کیفیت آب و استفاده از GIS. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۴(۱): ۲۳۵-۲۲۵.

میرمشتاقی، س.م.، امیرنژاد، ر. و خالدیان، م.ر. ۱۳۹۰. بررسی کیفیت آب رودخانه سفیدرود و پهنه بندی آن با استفاده از شاخص‌های کیفی NSFQI و OWQI. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۳(۱۷): ۴۲-۳۳.

FAO, 2011. The State of the World's h Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW) – Managing Systems at Risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.

Helsel, D.R., Hirsch, R.M., Ryberg, K.R., Archfield, S.A. and Gilroy, E.J., 2020, Statistical methods in water resources: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. A3, 458 p., <https://doi.org/10.3133/tm4a3>. [Supersedes USGS Techniques of Water-Resources Investigations, book 4, chap. A3, version 1.1.]

Hirsch, R. M., Alexander, R. B. and Smith, R. A. 1991. Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. Water Resources Research. 27(5): 803-813.

Kendall M. (1975). Multivariate Analysis. Charles Griffin & Company, London.

Ketata-Rokbani M, Gueddari M. and Bouhlila R. 2011. Use of geographical information system and Water Quality Index to assess groundwater quality in El Khairat Deep Aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel). Iranica Journal of Energy and Environment. 2(2):133-144

Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against

تصمیمات مدیریتی در راستای ارتقا و مدیریت کیفیت آب، با توجه به روند کاهش کیفیت آب، انتظار می‌رود در سال‌های آینده کیفیت آب به طبقه خیلی ضعیف نیز تنزل یابد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات کیفیت آب در ایستگاه آستانه طی بازه زمانی مورد مطالعه در ماه‌های مختلف سال متفاوت بوده و در برخی از ماه‌ها روند کاهش و در برخی ماه‌های دیگر روند افزایشی تجربه کرده است. شاخص کیفیت آب ایستگاه آستانه در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد با سطح اطمینان ۹۹ درصد روند صعودی داشته و در خردادماه شیب‌خط روند بیش‌ترین مقدار (۰/۷۶) را داشته است. از سو دیگر مقدار شاخص در ماه‌های آبان تا اسفند روند نزولی داشته و در آبان ماه شیب‌خط روند کمترین مقدار (۱/۶۶-) را داشته است. شاخص کیفیت آب بهمن‌ماه در ایستگاه آستانه طی بازه زمانی مطالعه شده به‌طور متوسط ۳۲/۹ افزایش‌یافته و طبقه کیفی آب از خوب در ابتدای بازه زمانی به ضعیف در شش سال منتهی به سال ۱۳۹۷، کاهش یافته است.

در راستای تکمیل مطالعه حاضر، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده عوامل تأثیرگذار بر تغییرات کیفیت آب در منطقه مطالعاتی، نظیر فعالیت‌های کشاورزی و تخلیه پساب‌های صنعتی و شهری به رودخانه مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به‌منظور بررسی وضعیت کیفی رودخانه در آینده، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی روندهای آتی کیفیت آب، به‌ویژه در ایستگاه‌های رودبار و آستانه که در برخی از ماه‌های سال کیفیت آب روند کاهشی معنی‌دار داشته است، توصیه می‌شود.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم جهت انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

انصاری، م.ر. و یوسفی، ا. ۱۴۰۳. تحلیل روند تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون با بهره‌گیری از آزمون ناپارامتری من-کندال و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مجله مدل‌سازی و مدیریت آب‌و‌خاک. ۴(۲). ۳۲۷-۳۴۲.

آخونی پورحسینی، ف.، ابراهیمی، ک. و امید، م.ح. ۱۴۰۱. کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی در شبیه‌سازی کیفیت آب بالرود و سفیدرود. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۵۸(۵۳): ۵۳-۶۲.

بیاتی خطیبی، م.، شهبازی، م. و حیدری، م.ا. ۱۳۹۳. پیش‌بینی و تحلیل روند تغییرات کیفیت آب رودخانه اهر و بررسی تأثیر احتمالی آن بر سلامت انسان. مجله هیدروژئومورفولوژی. ۱(۱): ۹۳-۱۰۹.

- case study from Mettur taluk, Salem district, Tamilnadu, India. *Journal of Earth System Science*. 117(1):49–58
- Tabari, H., Marofi, S. and Ahmadi, M. 2011. Long-term variations of water quality parameters in the Maroon River, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 177(1): 273-287.
- WHO. 2004. Guidelines for drinking water quality: training pack. WHO, Geneva, Switzerland.
- Yue, S., Pilon, P. and Cavadias, G. 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of hydrology*. 259(1-4): 254-271.
- Zhang, Q., Xu, C. Y., Becker, S. and Jiang, T. 2006. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years. *Journal of hydrology*. 331(3-4): 511-523.
- trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*. 245-259.
- Pettitt, A. N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. 28(2): 126-135.
- Sahu, P. and Sikdar, PK. 2008. Hydrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata wetlands, West Bengal, India. *Environmental Geology*. 55:823–835
- Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*. 63(324): 1379-1389.
- Srinivasamoorthy K, Chidambaram M, Prasanna MV, Vasanthavigar M, John Peter A. and Anandhan P 2008. Identification of major sources controlling groundwater chemistry from a hard rock terrain—a

## Monthly Evaluation of Trends and Homogeneity of Drinking Water Quality Index in the Downstream Basin of the Sefidrud Dam, IRAN

M. Sadegh Anbarsouz<sup>1</sup>, K. Ebrahimi<sup>2\*</sup> and M. Shojaei<sup>3</sup>

Received: May.14, 2025

Accepted: Aug.26, 2025

### Abstract

Understanding long-term changes in the quality of rivers, as critical surface water resources, is of paramount importance. This study was aimed to investigate and identify the temporal and spatial variations in the water quality of the Sefidrud River and its three tributaries downstream of the Sefidrud Dam. Monthly data of water quality parameters, including pH, TDS, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, and Mg<sup>2+</sup>, from 1971 to 2018 were used to calculate the drinking water quality index (WQI). The Mann-Kendall test and Sen's slope estimator were employed to detect trends in the time series of the WQI, while the Pettitt homogeneity test was used to identify change points in the time series. A positive trend in the index indicates a decline in water quality, whereas a negative trend reflects an improvement. The WQI at the Rudbar station exhibited an increasing trend during the first six months of the year, as well as in January and March. The increasing trend in the index for April at the Rudbar station, with a Sen's slope value of 1.54, led to a decline in water quality classification from good to poor after 2003. At the Astaneh station, the (WQI) showed an increasing trend from November to March (p-value<0.02) and a decreasing trend from May to August (p-value<0.01).

**Keywords:** Long-term changes, Trend and heterogeneity test, WHO water quality index

1- Graduated MSc. of Hydraulic Structures Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Professor, Department of Environmental Sciences and Technologies, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- MSc Student in Ecohydrology Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(\*- Corresponding author Email: EbrahimiK@ut.ac.ir)