

ارزیابی تغییرات مکانی - زمانی پارامترهای کیفی رودخانه کرخه و تناسب کیفیت آن جهت اهداف آبیاری

چکیده

کاهش کیفیت منابع آب سطحی در سال‌های اخیر به یک نگرانی اساسی تبدیل شده است. بنابراین، نیاز به ارزیابی تغییرات مکانی - زمانی کیفیت آب رودخانه‌ها و نیز بررسی و شناسایی مهم‌ترین پارامترها و عوامل مؤثر بر کیفیت آب رودخانه‌ها جهت مصارف مختلف ایجاد شده است. در مطالعه حاضر به منظور پایش کیفیت آب سطحی رودخانه کرخه، مجموعه‌ای از داده‌های کیفیت آب رودخانه کرخه حاوی ۱۶ پارامتر ثبت شده در طی ۱۷ سال (۱۳۹۸-۱۳۸۲) از هفت ایستگاه پایش مختلف از سازمان آب و برق استان خوزستان تهیه شد. جهت بررسی و تفسیر این ماتریس داده پیچیده و عظیم متشکل از تعداد زیادی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی از برنامه‌های پایش طولانی‌مدت از آنالیز روند، تکنیک‌های آماری چند متغیره و نیز به کارگیری برخی از شاخص‌ها جهت ارزیابی تناسب کیفیت آب رودخانه برای اهداف آبیاری استفاده شد. نتایج بررسی روند نشان داد که الگوی تغییرات پارامترها در مقیاس‌های سالانه و فصلی مشابه هم بوده است، و به جز پارامتر pH، سایر پارامترهای کیفیت آب از قبیل EC، TDS، SO_4^{2-} ، Ca^{2+} و سختی کلسیم به طور معنی‌داری افزایش یافتند. تجزیه و تحلیل PCA سه مؤلفه اصلی را به عنوان مسئول ساختار داده‌ها شناسایی کرد که ۷۷/۶۵ درصد از واریانس کل کیفیت آب را توضیح می‌دهند. بر اساس نتایج این آنالیز، HCO_3^- ، EC، TDS و pH مهم‌ترین پارامترهای این مؤلفه‌ها بودند که سهم قابل توجهی در تغییرات فضایی کیفیت آب سطحی رودخانه کرخه دارند. نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای نیز سه گروه مشابه را در بین ۷ سایت پایش نشان داد. به علاوه، در این مطالعه بررسی و آنالیز رگرسیون خطی کاتیون‌ها، آنیون‌ها و سایر پارامترها به عنوان متغیر وابسته در مقابل دبی رودخانه به عنوان متغیر مستقل، همبستگی منفی را نشان داد. در این مطالعه کیفیت آب رودخانه به منظور آبیاری از طریق شاخص‌های مختلف آبیاری مانند EC، درصد سدیم (SP)، نسبت جذب سدیم (SAR)، شاخص نفوذپذیری (PI)، خطر منیزیم (MH) و شاخص Kelly (KI) ارزیابی شد. نتایج تفسیر شده نشان داد که به طور کلی کیفیت آب سطحی در ایستگاه‌های مختلف بر اساس شاخص‌های محاسبه شده (به جز EC) برای آبیاری مناسب است. یافته‌های این مطالعه اطلاعات مفیدی را در تفسیر مجموعه داده‌های پیچیده در خصوص ارزیابی کیفیت آب، شناسایی منابع آلودگی و درک تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب رودخانه فراهم می‌کند که می‌تواند به طور مستقیم برای پروژه‌های مدیریتی در راستای بهبود کیفیت آب سطحی در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: کیفیت آب، تکنیک‌های آماری چند متغیره، آنالیز روند، شاخص‌های کیفیت آبیاری،

رودخانه کرخه.

مقدمه

رودخانه‌ها منبع مهمی از آب‌های سطحی هستند و در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند؛ زیرا نه تنها منابع آب را برای توسعه اقتصادی فراهم می‌کنند، بلکه در یکپارچگی محیط‌زیست نیز نقش مهمی دارند (Zhang et al., 2018; Matta et al., 2018). به عبارتی می‌توان گفت کیفیت آب سطحی رودخانه‌ها نقش مهمی در بهره‌وری و افزایش کیفیت زندگی جوامع بشری اطراف آن دارد. با این حال وخامت کیفیت آب در رودخانه‌ها به دلایل مختلف در کشورهای در حال توسعه بسیار جدی است (Gazzaz et al., 2012; Wu et al., 2018). در واقع

علیرضا ایلدرمی^{۱*}

نسرین حسن‌زاده^۲

فریبا هدایت‌زاده^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
۲. استادیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
۳. دانشجوی دکتری محیط‌زیست، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

*مسئول مکاتبات:

ildoromi@gmail.com

کدمقاله: ۱۴۰۰۴۰۹۳۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

این مقاله پژوهشی و برگرفته از طرح پژوهشی است.



رودخانه‌ها سیستم‌های پویایی هستند که کیفیت آب در طول یک رودخانه به شدت تحت تأثیر هر دو منابع طبیعی و انسانی قرار می‌گیرد (Bakan *et al.*, 2010). ولی فعالیت‌های انسانی مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده‌ی کیفیت آب سطحی رودخانه‌ها از طریق تخلیه انواع پساب‌ها، استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی، فرسایش خاک‌ها و تغییرات کاربری اراضی است (Najafpour *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2016; Mena-Rivera *et al.*, 2017). در نتیجه زیست‌بوم رودخانه‌ها به‌طور مداوم، دستخوش تغییرات شیمیایی و بیولوژیکی می‌شوند و به این ترتیب خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی آب که مستقیماً با کیفیت آب رودخانه‌ها ارتباط دارند، تحت تأثیر واقع می‌شوند (Alam *et al.*, 2007; Sharma and Kansal, 2011). در نتیجه‌ی این تغییرات، منابع آب موجود در رودخانه‌ها در حال کاهش و از نظر کیفی و کمی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Desai and Tank, 2010; Shrivastava *et al.*, 2013). همچنین به دلیل بار زیاد آلودگی و تداوم ورودی آلودگی، رودخانه‌ها قادر به خود پالایی خود نیستند و توانایی تصفیه رودخانه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه کارکرد آن‌ها برای اهداف مختلف از جمله آشامیدن، کشاورزی و همچنین سایر مقاصد خانگی مختل می‌گردد (Sarkar and Pandey, 2015). از این نظر، مدیریت کیفیت آب نقش مهمی در کنترل آلودگی آب و برنامه‌ریزی حوضه رودخانه‌ها دارد (Ouyang, 2005). به‌علاوه از آنجا که اهمیت کیفیت آب برای مباحث آشامیدنی، زندگی آزیان و غیره احساس می‌شود، لزوم ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و درک کیفیت آب آن‌ها یک پیش‌نیاز برای مدیریت این منابع است که در صورت لزوم اقدامات اصلاحی صورت گیرد (Schneider *et al.*, 2018).

کیفیت آب رودخانه‌ها در طول زمان بسیار متغیر است و نه تنها به توزیع مکانی آن‌ها بلکه به گذشت زمان نیز بستگی دارد (Shetty *et al.*, 2013) و پایش کیفیت آب در بازه زمانی طولانی، رایج‌ترین و مؤثرترین روش برای ارزیابی مشکلات محیطی است، زیرا تغییرات مکانی و زمانی این پارامترهای فیزیکوشیمیایی به‌روشنی ارائه می‌شود و می‌تواند به محققان کمک بیشتری در زمینه‌ی ارزیابی وضعیت آلودگی داشته باشد (Wu *et al.*, 2016). در این زمینه، محققان زیادی تجزیه و تحلیل روند را با استفاده از روش‌های مختلف پارامتری و ناپارامتری در نظر گرفتند (سبزواری و همکاران، ۱۳۹۸؛ نامداری و هوشمندزاده، ۱۳۹۸؛ Kumar *et al.*, 2021؛ Mahmoodabadi and Rezaei Arshad, 2018). باین وجود، تفسیر یک ماتریس داده پیچیده و عظیم متشکل از تعداد زیادی پارامترهای فیزیکوشیمیایی از برنامه‌های پایش طولانی‌مدت، مشکل است (Koklu *et al.*, 2010). در این میان استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره مختلف در سال‌های اخیر به‌ویژه در تجزیه و تحلیل داده‌های محیط زیستی به طرز چشمگیری افزایش یافته است تا اطلاعات معنی‌داری از آن‌ها به دست آید (Alkarkhi *et al.*, 2008). تکنیک‌های چند متغیره در شناسایی منابع و عوامل احتمالی تأثیرگذار بر سیستم‌های آب، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مطمئن در مورد منابع آب و همچنین حل سریع مشکلات مربوط به آلودگی کمک می‌کنند (Gu *et al.*, 2016). در این میان روش‌های آماری چند متغیره مختلف شامل؛ آنالیز خوشه‌ای (CA)، تجزیه و تحلیل به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل عاملی (FA) و تحلیل تشخیص (DA) گزارش شده است که روش‌های مؤثر آسان کردن ماتریس مجموع داده‌ها برای توصیف و ارزیابی کیفیت آب می‌باشند و آن‌ها همچنین در تفسیر تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفیت آب ناشی از عوامل طبیعی و انسانی مفید هستند (Mena-Rivera *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017). این روش‌ها به‌عنوان یک ابزار باارزش برای ارزیابی و مدیریت مطمئن منابع آب به‌منظور کمک به توسعه راه‌حل‌های سریع برای رفع آلودگی در نظر گرفته شده‌اند. این نوع تجزیه و تحلیل در ارزیابی آب‌های سطحی در بسیاری از نقاط جهان مورد توجه قرار گرفته است که در تفسیر مجموعه ماتریس‌های داده به درک بهتر کیفیت آب و وضعیت اکولوژیکی سیستم‌های مورد مطالعه کمک کرده است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۳؛ قاسمی‌دهنوی و همکاران، ۱۳۹۵؛ باب‌الحکمی و غلامی‌سفید کوهی، ۱۳۹۷؛ Sharma *et al.*, 2015; Keraga *et al.*, 2017; Aydin; Sayemuzzaman *et al.*, 2018). علاوه بر موارد ذکر شده، ارزیابی کیفیت آب جهت مصارف مختلف را می‌توان بر اساس انواع شاخص‌ها و فاکتورهای کیفیت آب، بررسی و توصیف کرد. در این زمینه تعدادی از شاخص‌های کیفیت آب برای ارزیابی تناسب آبیاری توسعه یافته‌اند و به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، از جمله متداول‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت آب برای اهداف آبیاری، هدایت الکتریکی (Wilcox, 1955)، نسبت جذب سدیم (Richard, 1954)، شاخص نفوذپذیری (Doneen, 1975)، شاخص Kelly (Kelly, 1940)، درصد سدیم (Todd, 1980) و خطر

منیزیم (Paliwal, 1972) هستند. اساساً این شاخص‌ها مقادیر کیفی را ارائه می‌دهند که در زمینه‌ی برنامه‌های مدیریت منابع آب که توسط مقامات ذی‌ربط تدوین می‌شوند، بسیار مؤثر هستند (Barik and Pattanayak, 2019; Kumari and Rai, 2020; Hasan et al., 2020). لذا در این پژوهش غلظت پارامترهای مختلف با استفاده از این شاخص‌های آبیاری تفسیر و بررسی می‌گردد.

رودخانه‌ی کرخه که از رودخانه‌های مهم ورودی به محیط دریایی خلیج فارس در استان خوزستان است، منبع تأمین آب شرب برای نقاط شهری و همچنین آب موردنیاز فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی است. در واقع شهرها و صنایع متعدد شامل فولاد، نفت، پتروشیمی، نیشکر، کاغذ، سیمان و همچنین اراضی کشاورزی تحت آبیاری زیاد از آب رودخانه کرخه و سرشاخه‌های آن استفاده نموده و فاضلاب خود را به آن تخلیه می‌کنند. در این راستا، تخلیه فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی منجر به تخریب جدی کیفیت آب به‌خصوص در پایین‌دست صنایع در رودخانه شده است (رائی‌نظامی و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به اینکه کمیت و کیفیت رودخانه کرخه نقش مهمی را در توسعه پایدار صنعتی و کشاورزی استان‌های واقع در حوضه آبخیز آن ایفا می‌کند، بنابراین پایش کیفی آب و کنترل منابع انتشار آلودگی آب رودخانه باید موردتوجه و تأکید قرار گیرد. مطالعه حاضر باهدف بررسی تغییرات مکانی - زمانی پارامترهای کیفیت آب رودخانه کرخه، تعیین مهم‌ترین پارامترهای کیفیت آب رودخانه، شناسایی ایستگاه‌های کلیدی در پایش و نظارت کیفیت آب رودخانه و نیز تعیین کیفیت آب رودخانه کرخه برای اهداف آبیاری با بهره‌گیری از شاخص‌های مختلف در این زمینه صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

حوزه آبریز رودخانه کرخه به وسعت حدود ۴۳ هزار کیلومترمربع، بین ۴۶ درجه، ۵۷ دقیقه تا ۴۹ درجه، ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه، ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه، ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. متوسط آبدهی درازمدت سالیانه در این ایستگاه معادل ۱۸۸ مترمکعب بر ثانیه است (کریمی جشنی و سالاری درگی، ۱۳۹۳). در حال حاضر حجم بسیار بالایی از زه‌آب اراضی کشاورزی و همچنین فاضلاب صنعتی به این محیط آبی تخلیه می‌گردد و این نشان می‌دهد که نه تنها آب شرب مردم بلکه حتی کیفیت آب برای کشاورزی و تولید محصول باکیفیت و کمیت مطلوب با مشکلات جدی مواجه خواهد بود (کریمی جشنی و سالاری درگی، ۱۳۹۳).

در این پژوهش، به‌منظور پایش کیفیت آب سطحی، از آمار و اطلاعات کیفی هفت ایستگاه کیفیت‌سنجی حوضه رودخانه کرخه (کانال وصیله (ST1)، حمیدیه (ST2)، کانال قدس (ST3)، یزد نو (ST4)، جلوگیر (ST5)، پای پل (ST6)، عبدالخان (ST7)) در یک دوره ۱۷ ساله (۱۳۹۸-۱۳۸۲) اخذشده از سازمان آب و برق استان خوزستان استفاده شد. پارامترهای موردبررسی در مطالعه حاضر به‌صورت ماهانه تهیه شدند و شامل دبی، دما، کل جامدات محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، بیکربنات (HCO_3^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+)، کلراید (Cl^-)، کدورت (Turb)، نسبت جذب سدیمی (SAR)، سختی منیزیم، سختی کلسیم می‌باشند. در نهایت میانگین داده‌های کیفی آب ایستگاه‌های مختلف برای فصول و در هر سال استخراج و ماتریسی از داده‌ها تهیه شد و با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SPSS 22، SYSTAT 13 و شاخص‌های مختلف آبیاری ارزیابی شدند. در شکل (۱) موقعیت حوضه کرخه و ۷ ایستگاه کیفیت‌سنجی مورد مطالعه ارائه گردیده است.

جدول ۱: کیفیت آب آبیاری بر اساس مقادیر EC.

وضعیت کیفیت	طبقات EC	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
کم (کیفیت عالی)	C1	۲۵۰-۰۰
متوسط (کیفیت خوب)	C2	۷۵۰-۲۵۱
زیاد (کیفیت مجاز)	C3	۲۲۵۰-۷۵۱
بسیار زیاد	C4, C5	۶۰۰۰-۲۲۵۱

SAR نسبت بین میزان سدیم و مجموع مقادیر کلسیم و منیزیم آب است که نشان‌دهنده‌ی خطر سدیم آب آبیاری است (رابطه ۱) (Richards, 1954).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} \quad \text{رابطه ۱}$$

طبقه‌بندی آب آبیاری بر اساس SAR در جدول ۲ ارائه شده است (Richards, 1954).

جدول ۲: طبقه‌بندی آب سطحی برای آبیاری بر اساس مقادیر SAR.

وضعیت خطر	طبقات SAR	میزان SAR
خطر قلیایی شدن کم (کیفیت عالی)	S1	$SAR < 10$
خطر قلیایی شدن متوسط (کیفیت خوب)	S2	$SAR = 18-10$
خطر قلیایی شدن زیاد (کیفیت نسبتاً خوب)	S3	$SAR = 26-18$
خطر قلیایی شدن خیلی زیاد (کیفیت ضعیف)	S4	$SAR > 26$

درصد سدیم نشان‌دهنده‌ی درصد یون‌های سدیم نسبت به سایر کاتیون‌های آب است (رابطه ۲) که تمام غلظت‌ها برحسب meq/l بیان می‌شوند (Todd, 1995). این شاخص با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Na = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

طبقه‌بندی برای SP در جدول ۳ آورده شده است (Wilcox, 1955).

جدول ۳: طبقه‌بندی آب سطحی برای آبیاری بر اساس مقادیر SP.

وضعیت کیفیت	SP (%)
عالی	< 20
خوب	$40-20$
مجاز	$60-40$

وضعیت کیفیت	SP (%)
مشکوک	۸۰-۶۰
نامناسب	>۸۰

خطر منیزیم به عنوان کسری بین منیزیم و مجموع کل منیزیم و کلسیم (meq/l) از یک نمونه آب محاسبه می شود. Paliwal (۱۹۷۲) رابطه زیر را برای محاسبه خطر منیزیم شدن برحسب درصد ارائه کرد:

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100 \quad \text{رابطه ۳:}$$

طبقه بندی آب سطحی بر اساس درصد MH در جدول ۴ آورده شده است (Handa, 1969).

جدول ۴: طبقه بندی بر اساس نسبت خطر منیزیمی شدن (MH).

رتبه	طبقه بندی آب	نسبت خطر منیزیمی (%)
۵	مناسب	۵۰-۰
۴	در مرز مناسب و نامناسب	۶۰-۵۰
۳	نامناسب	بیشتر از ۶۵

استفاده پایدار از آب غنی شده با Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، K^+ و HCO_3^- برای اهداف آبیاری نفوذپذیری خاک را کاهش و در نهایت عملکرد را تحت تأثیر قرار می دهد. شاخص نفوذپذیری به طور کلی از طریق معادله زیر محاسبه می شود (Doneen, 1975):

$$PI = \frac{Na^+ + K^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100 \quad \text{رابطه ۴:}$$

بر اساس PI کیفیت آب می تواند به صورت کلاس I، کلاس II و کلاس III طبقه بندی شود. آب در کلاس I و II برای حداکثر نفوذپذیری ۷۵ تا ۲۵ درصد یا بیشتر برای آبیاری طبقه بندی می شود که یعنی برای آبیاری خوب و متوسط هستند. آب در کلاس III با میزان کمتر از ۲۵ درصد نفوذپذیری در طبقه نامناسب است.

شاخص Kelly نسبت بین سدیم و مجموع کلسیم و منیزیم است که مناسب بودن آب آبیاری را خوب، متوسط و نامناسب توصیف می کند. شاخص Kelly با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود (Kelly, 1963):

$$PI = \frac{Na^+ + K^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100 \quad \text{رابطه ۵:}$$

بر اساس شاخص Kelly (Kelly, 1963) آب سطحی برای آبیاری به این صورت طبقه بندی می شود؛ که مقادیر $KI > 1$ نشانگر یک کلاس آب عالی، مقادیر $1 < KI < 2$ کلاس متوسط و $KI > 2$ نشان دهنده نامناسب بودن برای اهداف آبیاری است (Kelly, 1940).

نتایج

میانگین (\pm انحراف معیار) پارامترهای مختلف نمونه‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف در رودخانه کرخه طی دوره آماری ۱۳۸۲-۱۳۹۸ در جدول ۵ ارائه گردیده است. میانگین دبی و دما در رودخانه کرخه تقریباً برابر ۵۸/۷۳ مترمکعب در ثانیه و ۲۰/۹۲ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. میانگین کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) به ترتیب برابر ۱۱۷۸/۰۴ میلی‌گرم در لیتر و ۱۸۰۵/۱۹ میکروموس در سانتی‌متر و میانگین pH و Turb به ترتیب برابر با ۷/۸۱ و ۱۲۳/۴۷ NTU و اندازه‌گیری گردیده است. میانگین غلظت یون‌های Ca^{+2} ، K^+ ، Na^+ و Mg^{+2} نمونه‌های آب رودخانه کرخه به ترتیب برابر ۸/۵۸، ۰/۰۹، ۶/۵۲ و ۳/۷۱ میلی‌اکی‌والان در لیتر و میانگین غلظت یون‌های Cl^- ، SO_4^{2-} و HCO_3^- نیز به ترتیب برابر با ۷/۵۸، ۸/۳۳ و ۲/۸۰ میلی‌اکی‌والان در لیتر مشاهده شد. SAR، سختی Mg و سختی Ca نیز به ترتیب دارای میانگینی برابر با ۳/۵۸، ۱۴۰/۶۹ و ۵۱۲/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر بوده است.

جدول ۵: میانگین \pm انحراف معیار پارامترهای مختلف در بین ایستگاه‌های مختلف در رودخانه کرخه طی دوره آماری ۱۳۸۲-۱۳۹۸.

عبدالخان	پای پل	جلوگیر	یزد نو	کانال قدس	حمیدیه	کانال وصیله	
۱۱۱/۳۸±۵۹/۶ ^a	۱۰۳/۳۴±۴۱/۷ ^a	۷۶/۰۴±۳۳ ^{ab}	۵/۸۱±۲/۵ ^b	۲/۶۴±۱/۲ ^b	۹۴±۴۳/۱ ^a	۱۷/۵۷±۳/۸ ^b	دبی (m ³ /s)
۲۰/۸۳±۱/۶ ^a	۱۸/۳۲±۰/۹ ^c	۱۹/۷۶±۲/۴ ^b	۲۱/۸۷±۱/۸ ^a	۲۱/۸۵±۱/۸ ^a	۲۲/۰۷±۱/۷ ^a	۲۱/۸۳±۱/۴ ^a	دما (°C)
۸۳۸/۵±۱۶۱/۵ ^c	۸۳۱/۱±۱۴۶/۹ ^c	۱۱۱۳/۸±۳۶۴/۱ ^b	۲۰۹۲/۷±۵۶۴/۸ ^a	۱۰۵۷/۴±۱۹۵/۴ ^b	۱۱۹۸/۸±۲۴۸/۸ ^b	۱۱۰/۱۶±۱۸۲/۳ ^b	TDS (mg/l)
۱۲۵۶/۵±۳۳۷/۳ ^c	۱۲۳۸/۱±۲۲۶/۵ ^c	۱۷۵۶/۷±۱۷۵ ^b	۳۲۶۴/۲±۸۸۴/۹ ^a	۱۶۰۸/۴±۲۹۴/۳ ^b	۱۸۳۵/۶±۳۸۶/۴ ^b	۱۶۶۲/۵±۲۹۱ ^b	EC (μs/cm)
۷/۷۳±۰/۲۳ ^d	۷/۷۳±۰/۲۰ ^{cd}	۷/۷۲±۰/۲۵ ^{bcd}	۷/۹۰±۰/۱۳ ^a	۷/۹۰±۰/۱۶ ^a	۷/۸۶±۰/۱۷ ^{abc}	۷/۸۷±۰/۱۶ ^{ab}	pH
۲۸/۴۹±۱۶/۹ ^b	۲۱/۱۷±۱۳/۴ ^b	۶۷۳/۰۸±۳۶۵/۹ ^a	۸۲/۵۱±۶۶/۹ ^b	۶۶/۰۲±۳۸/۱ ^b	۳۱/۸۵±۲۳/۵ ^b	۳۱/۴±۲/۰۵ ^b	Turb (NTU)
۵/۶۶±۱/۷ ^c	۵/۴۲±۱/۳ ^c	۵/۳۶±۱/۶ ^c	۱۳/۲۶±۳/۶ ^a	۷/۳۶±۱/۷ ^b	۸/۰۷±۲ ^b	۷/۶۹±۱/۸ ^b	SO ₄ (meq/l)
۲/۸۰±۰/۳ ^{bc}	۲/۷۸±۰/۱ ^{bcd}	۳/۲۸±۰/۳ ^a	۲/۹۷±۰/۳ ^b	۲/۵۸±۰/۳ ^d	۲/۶۳±۰/۳ ^{cd}	۲/۶۳±۰/۳ ^{cd}	HCO ₃ (meq/l)
۴/۶۸±۱/۱ ^d	۴/۶۵±۱/۴ ^d	۸/۹۸±۴/۱ ^b	۱۷/۹۶±۶/۴ ^a	۶/۷۳±۱/۷ ^{bc}	۸/۳۲±۲/۵ ^b	۶/۹۸±۱/۸ ^{bc}	Cl (meq/l)
۵/۷۳±۱/۲ ^b	۶/۰۴±۱/۲ ^b	۵/۹۸±۱/۴ ^b	۹/۰۳±۲/۱ ^a	۶/۰۸±۱/۱ ^b	۶/۴۰±۱/۲ ^b	۶/۳۱±۱/۰۷ ^b	Ca (meq/l)
۲/۶۵±۰/۵ ^{de}	۲/۳۸±۰/۴ ^e	۲/۸۱±۰/۵ ^{cde}	۷/۳۶±۲/۱ ^a	۳/۳۸±۰/۷ ^{bcd}	۳/۸۱±۱/۰۴ ^b	۳/۴۷±۰/۹ ^{bc}	Mg (meq/l)
۴/۸۵±۱/۳ ^c	۴/۵۳±۱/۳ ^c	۸/۹۲±۴/۳ ^b	۱۷/۸۵±۵/۶ ^a	۷/۳۳±۱/۹ ^b	۸/۹۷±۲/۶ ^b	۷/۶۲±۲/۰۱ ^b	Na (meq/l)
۰/۰۷±۰/۰۱ ^a	۰/۰۷±۰/۰۱ ^a	۰/۰۸±۰/۰۱ ^a	۰/۱۳±۰/۰۵ ^a	۰/۰۷±۰/۰۱ ^a	۰/۰۸±۰/۰۳ ^a	۰/۱۲±۰/۰۷ ^a	K (meq/l)
۲/۳۵±۰/۴ ^c	۲/۲۰±۰/۵ ^c	۳/۹۶±۱/۴ ^b	۶±۱/۰۱ ^a	۳/۳۳±۰/۷ ^b	۳/۹±۰/۹ ^b	۳/۴±۰/۷ ^b	SAR (mg/l)
۱۴۰/۳۱±۸/۷ ^{bc}	۱۳۹/۰۹±۷/۳ ^{cd}	۱۶۴/۴۲±۱۱/۳ ^a	۱۴۹/۳۰±۱۶ ^b	۱۲۹/۷۵±۱۷/۳ ^d	۱۳۲±۱۲/۵ ^{cd}	۱۳۳/۳±۱۶/۲ ^{cd}	سختی Mg (mg/l)
۴۱۹/۶۰±۷۴/۹ ^c	۴۲۱/۵۸±۶۱/۷ ^c	۴۳۹/۷۵±۸۵/۱ ^c	۸۲۰±۲۰/۱ ^a	۴۷۳/۴۳±۷۰/۳ ^{bc}	۵۱۱/۱۵±۸۵/۶ ^b	۴۸۹/۶±۷۲/۰۴ ^{bc}	سختی Ca (mg/l)

به‌منظور بررسی روند تغییرات سری زمانی پارامترهای کیفی رودخانه کرخه از تحلیل ناپارامتریک من - کندال استفاده شد. جدول ۶ نشان‌دهنده‌ی مقدار آماره‌ی من - کندال برای سری زمانی سالانه و فصلی پارامترهای کیفیت آب و دبی رودخانه کرخه می‌باشد. با توجه به نتایج این تحلیل، مشخص گردید که روند تغییرات پارامترهای TDS، EC، SO₄، Ca و سختی Ca در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ به دلیل دارا بودن

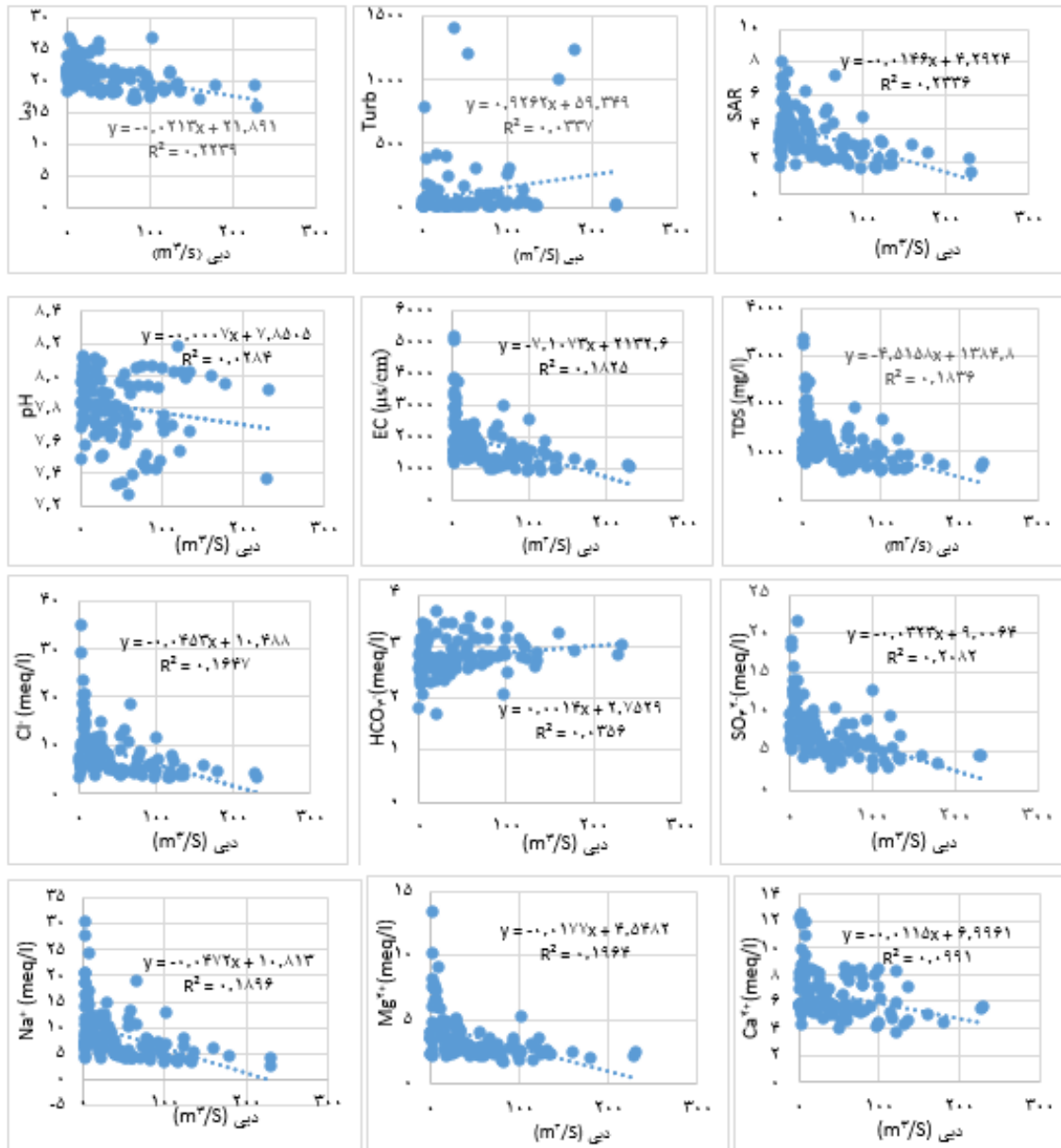
H.K	H.Mg	SAR	K	Na	Mg	Ca	Cl	HCO3	SO4	Turb	pH	Ec	TDS	Tem	Debi	
							۱/۰۰	-۰/۲۱۵	-۰/۸۴۶	-۰/۰۵۵	-۰/۰۲۴	-۰/۹۸۳	-۰/۹۷۲	-۰/۲۳۶	-۰/۳۰۰	Cl
							۱/۰۰	-۰/۷۶۴	-۰/۸۸۳	-۰/۰۴۳	-۰/۰۳۰۳	-۰/۸۳۲	-۰/۸۶۲	-۰/۰۷۳	-۰/۰۴۵	Ca
					۱/۰۰	-۰/۶۹۱	-۰/۹۲۵	-۰/۰۶۶	-۰/۸۸۶	-۰/۱۱۰	-۰/۱۰۷	-۰/۹۳۷	-۰/۹۲۳	-۰/۳۲۴	-۰/۳۰۴	Mg
				۱/۰۰	-۰/۹۲۸	-۰/۷۷۵	-۰/۹۹۰	-۰/۱۹۷	-۰/۸۸۵	-۰/۰۴۱	-۰/۰۱۶	-۰/۹۸۶	-۰/۹۷۸	-۰/۲۸۱	-۰/۳۱۰	Na
			۱/۰۰	-۰/۳۲۱	-۰/۳۰۰	-۰/۲۴۹	-۰/۳۰۷	-۰/۱۳۳	-۰/۳۰۱	-۰/۱۲	-۰/۰۳۲	-۰/۳۰۷	-۰/۲۹۷	-۰/۱۷۰	-۰/۱۶۹	K
		۱/۰۰	-۰/۳۳۸	-۰/۹۶۸	-۰/۸۶۳	-۰/۶۶۳	-۰/۹۴۵	-۰/۲۰۷	-۰/۸۰۸	-۰/۰۹۰	-۰/۰۰۹	-۰/۹۳۹	-۰/۹۱۵	-۰/۳۵۸	-۰/۳۲۴	SAR
	۱/۰۰	-۰/۲۱۴	-۰/۱۳۶	-۰/۲۰۳	-۰/۰۷۴	-۰/۱۸۲	-۰/۲۲۱	-۰/۹۹۸	-۰/۰۰۲	-۰/۴۱۲	-۰/۲۶۸	-۰/۱۷۷	-۰/۱۷۲	-۰/۲۱۳	-۰/۰۵۳	H.Mg
۱/۰۰	-۰/۱۳۷	-۰/۸۳۴	-۰/۳۰۰	-۰/۹۲۹	-۰/۹۲۷	-۰/۹۱۲	-۰/۹۲۲	-۰/۱۳۳	-۰/۹۶۶	-۰/۰۸۴	-۰/۰۹۷	-۰/۹۶۴	-۰/۹۷۱	-۰/۲۲۲	-۰/۱۹۶	H.Ca

نتایج حاصل از ماتریس همبستگی میان پارامترهای کیفیت آب در مرحله اول PCA (جدول ۷) نمایانگر آن است که بین اکثر پارامترهای موردبررسی، همبستگی زیادی وجود دارد که حاکی از همپوشانی قوی میان پارامترهای اندازه‌گیری شده در دوره مورد مطالعه است. این امر، تناسب اطلاعات موجود برای ورود به PCA و تعیین مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده برای هدفمند نمودن و کاهش حجم داده‌های موجود را تأیید می‌نماید. در این پژوهش میزان KMO برابر ۰/۷۹ و کای اسکوار آزمون بارتلت برابر ۵۱۲۰/۸۰ به دست آمد. نتایج PCA نشان داد که طبق معیار مقدار ویژه (مقادیر ویژه بیشتر از ۱)، ۳ عامل اول دارای بیشترین مقادیر ویژه هستند؛ به گونه‌ای که این مؤلفه‌ها به ترتیب ۵۳/۳۶، ۱۶/۱۵ و ۸/۱۴ درصد از واریانس جامعه را توصیف می‌نمایند و در مجموع، ۷۷/۶۵ درصد تغییرات و واریانس جامعه را بیان می‌کنند. بنابراین، سه مؤلفه اول به‌عنوان بهترین مؤلفه‌ها در توصیف تغییرات کیفیت آب رودخانه کرخه انتخاب شدند. برای استخراج پارامترهای اصلی کیفیت آب از درون این عامل‌ها، از بار عاملی چرخانده شده با دوران واریماکس استفاده شد. بر این اساس در هر عامل، پارامترهایی که دارای بیشترین بار عاملی (مثبت یا منفی) هستند، بهترین نماینده برای توصیف آن عامل می‌باشند. جدول ۸ بار عاملی هر کدام از پارامترها را برای عضویت در سه عامل نشان می‌دهد. بار عاملی نشان‌دهنده‌ی همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب و عامل‌های معرفی شده است.

جدول ۸: بار عاملی برای هر یک از مؤلفه‌های اصلی با چرخش Varimax.

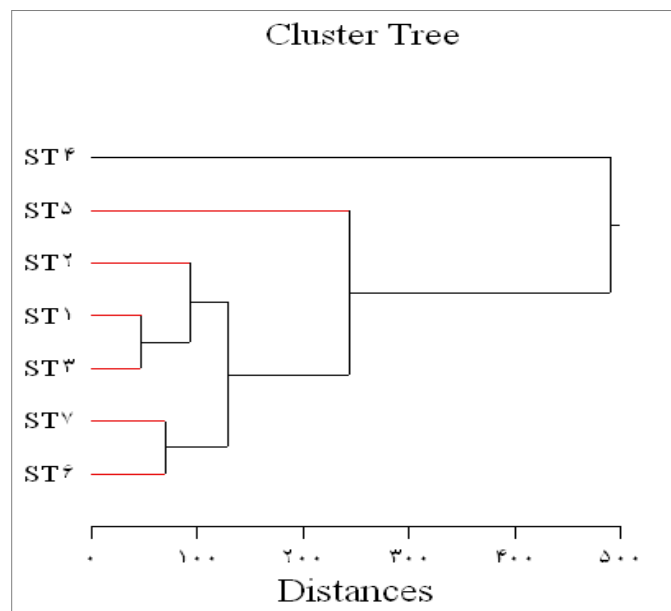
مؤلفه‌های اصلی	مؤلفه‌های اصلی		
	۳	۲	۱
Debi	-۰/۴۱۱	۰/۱۸۴	-۰/۲۹۷
Tem	-۰/۴۴۲	-۰/۴۸۸	۰/۲۷۶
TDS	-۰/۰۶۰	-۰/۰۰۷	۰/۹۹۱
EC	-۰/۰۲۱	-۰/۰۱۱	۰/۹۹۱
pH	-۰/۵۶۱	-۰/۵۰۳	-۰/۰۳۷
Turb	-۰/۳۷۳	۰/۸۵۷	-۰/۰۰۲
SO4	-۰/۱۹۲	-۰/۱۶۹	۰/۹۳۳
HCO3	-۰/۱۸۷	۰/۹۱۰	۰/۲۰۶
Cl	-۰/۰۵۲	۰/۰۳۵	۰/۹۷۳
Ca	-۰/۴۰۱	۰/۱۱۵	۰/۸۴۳
Mg	-۰/۰۴۶	-۰/۱۶۴	۰/۹۳۹
Na	-۰/۰۶۱	۰/۰۰۶	۰/۹۸۵
K	-۰/۳۵۲	۰/۰۳۷	۰/۳۵۴
SAR	-۰/۲۰۵	۰/۰۰۷	۰/۹۳۳
H.Mg	-۰/۲۰۳	۰/۹۰۲	۰/۲۱۰
H.Ca	-۰/۱۸۱	-۰/۰۳۳	۰/۹۷۲

نتایج رگرسیون ساده بین هر پارامتر کیفیت آب (متغیر وابسته) و دبی رودخانه (به‌عنوان متغیر مستقل) برای رودخانه کرخه در شکل ۲ ارائه شده است. اگرچه، پارامترهای pH، Turb، HCO_3^- هیچ ارتباط معنی‌داری را با دبی رودخانه نشان ندادند، سایر پارامترهای کیفیت آب با افزایش دبی آب کاهش یافتند.



شکل ۲: رگرسیون خطی بین دبی و پارامترهای کیفیت آب شامل (a) SAR، (b) Turb، (c) دما، (d) TDS، (e) EC، (f) pH، (g) SO_4^{2-} ، (h) HCO_3^- ، (i) Cl^- ، (j) Ca^{2+} ، (k) Mg^{2+} ، (l) Na^+ در رودخانه کرخه طی دوره آماری ۱۳۸۲-۱۳۹۸.

جهت بررسی دقیق کیفیت آب در ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی در رودخانه کرخه، تفکیک و گروه‌بندی آن‌ها بر مبنای مشابهت اطلاعات ثبت‌شده‌ی مربوط به پارامترهای مختلف در منطقه مورد مطالعه، از آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) استفاده گردید. نتایج حاصل از این آنالیز توانسته است ایستگاه‌ها را در گروه‌ها و زیرگروه‌های جداگانه تفکیک نماید. نمودار شکل ۳، دندروگرام به‌دست‌آمده از آنالیز خوشه‌ای ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی مورد نظر را از لحاظ کیفیت آب در رودخانه کرخه نمایش می‌دهد. مبنای گروه‌بندی در این مطالعه، تشابه فاصله است و محور X فواصل بین گروه‌های همگن و محور Y کد مربوط به ایستگاه‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، ایستگاه‌ها را از نظر کیفیت آب به سه خوشه تقسیم کرد؛ خوشه ۱، شامل ایستگاه‌های کانال وصیله، کانال قدس، عبدالخان، پای پل و حمیدیه؛ خوشه ۲، شامل ایستگاه جلوگیر؛ و خوشه ۳ شامل ایستگاه یزد نو است.



شکل ۳: دندوگرام حاصل از آنالیز خوشه‌ای ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی در رودخانه کرخه.

(ST1=کانال وصیله، ST2=حمیدیه، ST3=کانال قدس، ST4=یزد نو، ST5=جلوگیر، ST6=پای پل، ST7=عبدالخان)

جهت بررسی کیفیت آب رودخانه کرخه از نظر مصرف در بخش کشاورزی، غلظت پارامترهای مختلف بر اساس شاخص‌های مختلف آبیاری تفسیر و بررسی شدند و نتایج حاصل از محاسبه آن‌ها در جدول ۹ ارائه گردیده است.

جدول ۹: میانگین شاخص‌ها در ایستگاه‌های مختلف جهت بررسی کیفیت آب رودخانه کرخه از نظر آبیاری.

ایستگاه	شاخص‌ها					
	MH (%)	KR (meq/l)	PI (%)	SAR	SP (%)	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
St1 کانال وصیله	۳۵/۷۹	۰/۷۷	۵۹/۰۱	۳/۳۵	۴۳/۹۹	۱۶۳۴/۴۵
St2 حمیدیه	۳۷/۳۱	۰/۸۷	۶۰/۳۷	۳/۸۹	۴۶/۸۵	۱۳۹۸/۱۳
St3 کانال قدس	۳۵/۷۵	۰/۷۷	۵۹/۰۲	۳/۳۳	۴۳/۹۰	۱۶۰۸/۴۲
St4 یزدنو	۴۴/۸۹	۱/۰۹	۶۰/۸۰	۶	۵۲/۳۱	۳۲۶۴/۲۸
St5 جلوگیر	۳۱/۹۴	۰/۹۷	۶۸/۴۹	۳/۷۱	۴۹/۴۱	۱۶۶۹/۲۱
St6 پای پل	۲۸/۲۵	۰/۵۴	۵۶/۴۲	۲/۲۰	۳۵/۳۳	۱۲۳۸/۱۳

St7	عبدالخان	۱۲۵۶/۵۰	۳۶/۹۶	۲/۳۵	۵۷/۸۰	۰/۵۸	۳۱/۶۲
	میانگین	۱۷۸۶/۶۶	۴۴/۱۱	۳/۵۵	۶۰/۲۷	۰/۸۰	۳۵/۰۸

بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه میانگین (\pm انحراف معیار) پارامترهای مختلف نمونه‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف در رودخانه کرخه طی دوره آماری ۱۳۸۲-۱۳۹۸ نشان داد از میان یون‌های مورد مطالعه حداقل و حداکثر میانگین مقادیر غلظت مربوط به پتاسیم (۰/۰۹ meq/l) و سدیم (meq/l) ۸/۵۸ می‌باشد. بر اساس ضریب تغییرات (CV) محاسبه شده برای غلظت یون‌های مورد مطالعه نیز مشخص گردید که یون‌های بی‌کربنات و پتاسیم، به ترتیب حداقل و حداکثر تغییرات در رودخانه کرخه را دارند. در میان سایر پارامترهای مورد بررسی نیز، pH کمترین ضریب تغییرات و Turb بیشترین ضریب تغییرات را داشته است. به‌طور مشابه در این زمینه، مطالعه قاسمی‌دهنوی و همکاران (۱۳۹۵) در ارزیابی کیفیت رودخانه ازنا بر اساس پارامترهای مختلف نیز نشان داد که از میان یون‌های مورد مطالعه حداقل و حداکثر میانگین مقادیر غلظت مربوط به پتاسیم (meq/l) ۰/۰۸۳ و بی‌کربنات (۳/۸۹ meq/l) و حداقل و حداکثر ضریب تغییرات نیز مربوط به یون‌های کلسیم و پتاسیم در این رودخانه بوده است که مشابه نتایج مطالعه حاضر در میان یون‌های مختلف، حداقل میانگین غلظت و حداکثر ضریب تغییرات مربوط به پتاسیم بوده است. مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی بین ایستگاه‌های مختلف کیفیت‌سنجی در رودخانه کرخه طی دوره آماری مورد مطالعه نشان داد که اختلاف معنی‌دار آماری از نظر پارامترهای مختلف (به‌استثنا K) بین ایستگاه‌های مختلف وجود دارد ($P < 0/05$). نتایج ارائه شده در جدول (۵) حاکی از آن است که بیشترین میزان اکثر پارامترهای مورد مطالعه در ایستگاه‌های یزدنو و حمیدیه و کمترین میزان اکثر پارامترها در ایستگاه‌های عبدالخان و پای پل بوده است. در خصوص پارامتر دبی این ترتیب متفاوت بوده است و بیشترین میزان دبی در ایستگاه‌های عبدالخان و پای پل قابل مشاهده است. در پژوهش Garizi و همکاران (۲۰۱۱) در ارزیابی تغییرات فصلی پارامترهای کیفی در آب سطحی حوضه آبخیز چهل چای نشان داد که مقادیر پارامترها از الگوی معکوس با تخلیه (دبی) رودخانه پیروی می‌کند که اثر رقت را نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل روند نشان داد روند تغییرات پارامترهای Ca, SO₄, EC, TDS و سختی Ca در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۸ به‌صورت سالانه و در تمامی فصول دارای روندی افزایشی و pH دارای منفی بوده است. از بین این پارامترها، قوی‌ترین روند افزایشی مربوط به Ca و قوی‌ترین روند کاهش‌ی مربوط به pH می‌باشد. در این زمینه، سبزواری و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی تغییرات بلندمدت سالانه و فصلی کیفیت آب رودخانه الشتر با استفاده از آزمون من-کندال پرداختند. نتایج نشان داد که مشابه پژوهش حاضر، الگوی تغییرات پارامترها در مقیاس‌های سالانه و فصلی مشابه هم بوده است. در این مطالعه روند غلظت پارامترهای Na, HCO₃, pH, SAR و به‌صورت کاهش‌ی و روند غلظت عناصر Ca, Mg, TH, TDS, EC, Cl و SO₄ به‌صورت افزایشی مشاهده شد. در مطالعه سبزواری و همکاران (۱۳۹۸) نیز مشابه مطالعه حاضر در فصول تابستان نسبت به سایر فصول روندهای افزایشی شدیدتر و روندهای کاهش‌ی ملایم‌تر رخ داده است. در مطالعه مذکور دلیل به این صورت عنوان شده است که در فصل تابستان به دلیل کاهش نزولات جوی در منطقه منجر به کاهش دبی می‌گردد و از طرفی در نتیجه افزایش فعالیت‌های کشاورزی، از مواد شیمیایی و کودها بیشتر استفاده می‌شود و در نتیجه افزایش روند صعودی برخی پارامترها را دربردارد. در پژوهش Mahmoodabadi و Rezaei Arshad (۲۰۱۸) در ارزیابی طولانی‌مدت روند پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون طی دوره ۴۸ ساله (۲۰۱۵-۱۹۶۸)، نتایج نشان داد که مشابه نتایج مطالعه حاضر، دبی آب با روند کاهش‌ی در دوره ۴۸ ساله در نوسان است. ولی به‌جز پارامتر pH، سایر پارامترهای کیفیت آب از قبیل EC, TDS, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ و Na⁺ به‌طور قابل توجهی افزایش یافتند. این روند افزایش چشمگیر در طول سال‌ها برای پارامترهای کیفیت آب مورد مطالعه در طول رودخانه ممکن است تا حدودی به دلیل کشاورزی سریع و توسعه صنعتی طی سال‌های اخیر در حوضه رودخانه کارون باشد (Naddafi et al., 2007). نامداری و هوشمندزاده (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی روند و تحلیل آماری کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه آب‌سنجی ملاثانی پرداختند. نتایج نشان داد در طول دوره آماری مورد مطالعه (۱۳۹۵-

۱۳۴۶)، پارامترهای TH، EC و TDS روند افزایشی داشته‌اند و سبب کاهش کیفیت آب رودخانه کارون گردیده‌اند. Niazi و همکاران (۲۰۱۴) نیز در پژوهشی به ارزیابی و تحلیل روند تغییرات زمانی دبی و پارامترهای کیفیت آب رودخانه آجی چای پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش روند دبی، تمام پارامترهای کیفیت آب انتخاب شده در هر فصل مرطوب و خشک روند افزایشی دارند. به علاوه در این مطالعه افزایش روند Na، EC، CI و SAR در فصول خشک سریع‌تر از روند آن‌ها در فصول مرطوب بوده است. در پژوهش Zare Garizi و همکاران (۲۰۱۱) در ارزیابی تغییرات فصلی پارامترهای کیفی در رودخانه چهل چای، مقادیر زیاد EC و TDS در فصل تابستان را در نتیجه کاهش بارندگی / تخلیه و افزایش کاربری کشاورزی و ساختمان‌سازی در حوضه آبریز رودخانه عنوان کردند. رفتار Cl^- به صورت دقیق بررسی و توصیف می‌شود، زیرا گردش آن از طریق چرخه هیدرولوژیکی توسط فرآیندهای فیزیکی نسبت به فرآیندهای شیمیایی تعیین می‌شود (Grasby et al., 1997). افزایش روند صعودی Cl^- در پاییز و زمستان نشان‌دهنده اثر هیدرولوژیک و آلودگی انسانی با NaCl است، همان‌طور که در مقایسه با غلظت Na^+ مشاهده می‌شود. SO_4^{2-} محلول می‌تواند از تجزیه مواد معدنی SO_4 از قبیل اکسیداسیون پیریت و سایر اشکال S کاهش یافته، اکسیداسیون سولفیدهای آلی در فرآیندهای طبیعی خاک و ورودی‌های انسان‌ساخت، یعنی کودها حاصل گردد (Hem, 1985; Grasby et al., 1997). تغییرات فصلی SO_4^{2-} را می‌توان به تغییر در شدت روند هوازدگی نسبت داد (Garizi et al., 2011). در مطالعه Chiueh و همکاران (۲۰۱۱) در استفاده از آزمون فصلی Man-Kendall برای بررسی الگوی فضایی پارامترهای کیفیت آب در حوضه آبریز Feitsui، بیان شد که روند فصلی قابل توجه ممکن است با افزایش فعالیت‌های کشاورزی در همان منطقه مطابقت داشته باشد. همچنین نتایج نشان داد که درصد کاربری اراضی بر کیفیت آب تأثیر دارد. Ahmadi و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به ارزیابی روند کیفیت آب رودخانه زهره با استفاده از آزمون Man-Kendall طی دوره آماری ۲۰۱۲-۱۹۶۷ پرداختند. نتایج نشان داد در چهار ایستگاه پایش (چم‌بستان، خیرآباد، ده‌ملا و پل فلور) Ca^{2+} و Mg^{2+} به دلیل فعالیت‌های کشاورزی به‌ویژه زهکشی نیشکر روند صعودی داشته است. همچنین در پژوهش Sayemuzzaman و همکاران (۲۰۱۸) در تجزیه و تحلیل آماری و روند چند متغیره کیفیت آب سطحی در منطقه رودخانه هند مرکزی در فلوریدا طی دوره ۲۰۱۳-۱۹۹۸، روندها و تغییر روندها برای پارامترهای مختلف به تغییرات کاربری اراضی و شرایط آب و هوایی نسبت داده شد.

همبستگی بین پارامترهای مختلف آب حوضه رودخانه کرخه نشان داد بین تمامی پارامترها کیفیت آب رودخانه به‌جز در رابطه با دبی و pH، روابط مثبت وجود دارد که نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین پارامترهای اندازه‌گیری است. مجموعه داده‌هایی که بسیار باهم همبستگی دارند می‌توانند وجود یک منشأ طبیعی را برای این اجزا در آب حوضه آبریز کرخه نشان دهند. به‌طور کلی می‌توان گفت پارامترهایی که $r > 0.7$ بیانگر همبستگی قوی، $0.5 < r < 0.7$ همبستگی متوسط و $r < 0.5$ همبستگی ضعیف در نظر گرفته می‌شوند (Oinam et al., 2012). در مطالعه Mahmoodabadi و Rezaei Arshad (۲۰۱۸) در ارزیابی پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون طی دوره ۴۸ ساله (۱۹۶۸-۲۰۱۵)، نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی ساده در میان پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده نشان داد که مشابه نتایج مطالعه حاضر بین پارامترهای کیفیت آب رودخانه به‌جز در رابطه با Q، pH و HCO_3^- ، روابط مثبت وجود دارد. در این مطالعه عنوان شد که روابط منفی بین Q و بسیاری دیگر از پارامترهای کیفیت آب پیدا شد و این بدان معنی است که تخلیه جریان کمتری از رودخانه با غلظت‌های زیادتر نمک‌های محلول همراه است. در مطالعه قاسمی‌دهنوی و همکاران (۱۳۹۵) نیز همبستگی زیادی بین مجموع املاح محلول و کلر، بین TDS با بی‌کربنات و منیزیم، بین یون‌های منیزیم و کلر و همین‌طور بی‌کربنات و کلسیم، و بین سدیم با کلر و بی‌کربنات با منیزیم مشاهده شد. در این مطالعه عنوان شد همبستگی‌ها می‌تواند نشان‌دهنده آلودگی از منابع یکسان باشد. در این زمینه، همچنین نتایج پژوهش باب‌الحکمی و غلامی‌سفیدکوهی (۱۳۹۷) در بررسی کیفیت آب رودخانه تالار نشان داد که رابطه معنی‌دار بین پارامترهای HCO_3^- ، Cl، SO_4 ، Ca، Mg، Na و K می‌تواند بیان‌کننده این مسئله باشد که این پارامترها منابع انتشار مشابهی دارند. در این پژوهش عنوان گردید که رابطه Cl با Ca، Na، Mg می‌تواند به دلیل وجود نمک‌های کلرور سدیم (NaCl)، کلرور کلسیم ($CaCl_2$) و کلرور منیزیم ($MgCl_2$) که جزء نمک‌های با حلالیت بالا هستند باشد و ارتباط قوی بین Mg و Cl می‌تواند

به دلیل ورود زباله‌های خانگی و ضایعات شهری حاوی نمک و شوینده‌ها که شامل $MgCl_2$ هستند نام برد. همچنین ارتباط قوی بین یون Mg و SO_4 را می‌توان به استفاده از کودهای آلی و شیمیایی ارتباط داد.

نتایج حاصل از PCA نشان داد که در مؤلفه اول که دارای بیشترین درصد توصیف واریانس بوده است، پارامترهای TDS، EC، K^+ ، Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، SO_4^{2-} ، SAR و سختی Ca بیشترین همبستگی را با این مؤلفه داشتند. بر اساس جدول شماره (۸)، در میان پارامترهای موجود در مؤلفه اول؛ TDS و EC دارای بیشترین بار عاملی است (برابر با ۰/۹۹) و به‌عنوان پارامتر اصلی این مؤلفه انتخاب شده‌اند. در مؤلفه دوم؛ پارامترهای Tem، Turb، HCO_3^- و سختی Mg بیشترین بار عاملی را داشته‌اند (به ترتیب ۰/۴۸، ۰/۸۵، ۰/۹۱ و ۰/۹۰) و بیکربنات به علت داشتن بیشترین بار عاملی، به‌عنوان نماینده این مؤلفه معرفی شده است. نتایج حاصل از مؤلفه سوم بیانگر آن است که دبی و pH بیشترین میزان بار عاملی (به ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۵۶) را در این مؤلفه داشته‌اند و بر اساس بار عاملی آن‌ها می‌توان pH را به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در نمایش اطلاعات این مؤلفه دانست.

شایان‌ذکر است که استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در تعیین پارامترهای اصلی کیفیت آب رودخانه‌ها، در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است و به‌عنوان رویکردی رایج در مطالعات هیدرولوژی است. در مطالعه حاضر، مهم‌ترین پارامترهای کیفیت آب که توسط PCA تعیین شدند، شامل TDS، EC، HCO_3^- و pH بوده است. این در حالی است که پارامترهای اصلی معرفی شده در مطالعه میرزایی و همکاران (۱۳۹۳) برای توصیف کیفیت آب رودخانه‌های استان مازندران، شامل پارامترهای TDS، pH، SO_4^{2-} ، NO_3^- بوده‌اند که در مقایسه با مطالعه حاضر در پارامترهای TDS و pH مشترک بوده‌اند. باب‌الحکمی و غلامی سفیدکوهی (۱۳۹۷) در پژوهشی به تجزیه و تحلیل کیفیت آب رودخانه تالار با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره پرداختند. نتایج نشان داد که ۸۰ درصد تغییرات کیفیت آب توسط سه عامل اول اتفاق می‌افتد. همچنین در این مطالعه اشاره گردید عامل اول که ۵۹/۱ درصد از تغییرات کیفیت آب حوضه رودخانه تالار را توضیح می‌دهد شامل پارامترهای TDS، EC، Cl، SO_4 ، Ca، Mg، Na، K، SAR و TH است. عامل به وجود آورنده‌ی این پارامترها در رودخانه تالار می‌تواند تداخل آب زهکش کشاورزی با آب رودخانه تالار باشد. عامل دوم که ۱۲/۶ درصد از تغییرات کیفیت آب حوضه رودخانه تالار را سبب می‌شود آلودگی فسفات (PO_4) و نترات (NO_3) است که عواملی همچون ورود فاضلاب‌های انسانی، بیمارستانی و کشاورزی می‌تواند از عوامل به وجود آورنده این نوع آلودگی باشد. عامل سوم وجود بیکربنات (HCO_3) است که ۸/۳ درصد از تغییرات کیفی رودخانه تالار را نشان می‌دهد. غالباً عواملی همچون عبور آب از سازندهای آهکی و یا هوازدگی سیلیکات‌ها دلیل افزایش بی‌کربنات کلسیم است (باب‌الحکمی و غلامی سفیدکوهی، ۱۳۹۷). Giri و همکاران (۲۰۱۹) از اطلاعات ۲۵ متغیر در بررسی کیفیت آب رودخانه Indus در منطقه Trans-Himalayan در هند در دو فصل تابستان و زمستان استفاده نموده‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان که تجزیه و تحلیل ماتریس داده‌های فصل تابستان هفت عامل ایجاد کرد که در مجموع ۷۷/۰۵ درصد از واریانس کل را تشکیل می‌دهند، درحالی‌که تجزیه و تحلیل ماتریس داده‌های فصل زمستان هشت عامل را ایجاد کرد که ۷۶/۹۰ درصد از واریانس را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش اولین عامل (که ۲۴/۵۶ درصد از کل واریانس را تشکیل داد) با بارهای عاملی بیشتر برای Fe، Mg، Ca، Mn، K، Na و با بارهای متوسط از فسفات توصیف شد. دلیل این امر به تأثیر منابع غیر نقطه‌ای مانند رواناب کشاورزی یا ته‌نشست‌های اتمسفری در اثر هوازدگی طبیعی نسبت داده شد (Huang et al., 2013). رواناب کشاورزی یا فرایند هوازدگی، تبادل یونی و شرایط کاهش - اکسایش را افزایش می‌دهد که در نهایت این موارد به‌طور تجمعی حلالیت مواد مغذی را منجر می‌شوند (Bohlke et al., 2007). Molla و همکاران (۲۰۱۵) نیز در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب سطحی و زیرزمینی بر اساس تکنیک‌های آماری چند متغیره در مجاورت Mohanpur در بنگلادش پرداختند. در این مطالعه تجزیه و تحلیل PCA مشخص کرد که دو مؤلفه اصلی مسئول ساختار داده‌ها هستند که ۷۲/۵۳ درصد از واریانس کل کیفیت آب را توضیح می‌دهد. به‌علاوه نتایج PCA نشان داد که تغییرات کیفیت آب عمدتاً از منابع انسانی از طریق تخلیه‌های کشاورزی و شهری نشأت می‌گیرد. در مطالعه‌ی دیگری Mostafaei (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی کیفیت آب رودخانه کشکان با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره طی دوره آماری ۳۶ ساله (۱۹۷۴-۲۰۰۹) پرداختند. بر اساس نتایج PCA سه عامل اول استخراج شد که عامل اول (PC1) شامل پارامترهای

EC، Ca^{2+} ، Na^+ ، Cl^- و SO_4^{2-} ، عامل دوم (PC2) شامل HCO_3^- ، Mg^{2+} و K^+ و عامل سوم (PC3) نیز توسط دو پارامتر CO_3^{2-} و pH پوشش داده شد. Lotfi و همکاران (۲۰۱۴) نیز ارزیابی پارامترهای کیفیت آب را با استفاده از روش‌های آماری تحلیل عاملی و خوشه‌بندی در دشت ساری انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که پارامترهای TH و anion دارای بیشترین بار عاملی بوده‌اند از همین رو این پارامترها برای برنامه‌ریزی و مدیریت در مقایسه با دیگر پارامترها اولویت دارند.

بررسی رگرسیون ساده بین هر پارامتر کیفیت آب (متغیر وابسته) و دبی رودخانه (به‌عنوان متغیر مستقل) برای رودخانه کرخه نشان داد که تمام پارامترهای کیفی آب به‌جز پارامترهای pH، Turb و HCO_3^- که هیچ ارتباط معنی‌داری را با دبی رودخانه نشان ندادند، با افزایش دبی آب کاهش یافتند. بر اساس ضریب تعیین (R^2)، بهترین مدل‌های رگرسیون متناسب با داده‌های به‌دست‌آمده برای پارامترهای دما، SAR، SO_4^{2-} و Mg^{2+} نسبت به سایر پارامترها بود. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که وقتی دبی رودخانه به کمتر از $100 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش یابد، مقادیر شوری آب و همچنین نمک‌های محلول به‌شدت افزایش می‌یابند. Mahmoodabadi و Rezaei Arshad (۲۰۱۸) نیز در پژوهشی به ارزیابی طولانی‌مدت روند پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون طی دوره ۴۸ ساله (۱۹۶۸-۲۰۱۵) پرداختند. نتایج نشان داد که دبی آب می‌تواند یک پیش‌بینی کننده رضایت‌بخش از پارامترهای کیفیت آب در این رودخانه باشد. در این مطالعه مشابه نتایج پژوهش حاضر pH و HCO_3^- هیچ ارتباط معنی‌داری را با Q نشان ندادند، ولی سایر پارامترهای کیفیت آب از جمله EC، TDS، Cl^- ، SO_4^{2-} ، Na^+ ، Mg^{2+} و Ca^{2+} با افزایش دبی آب به‌صورت غیرخطی کاهش یافتند. در نهایت نتیجه‌گیری شد که با تخلیه آب رودخانه کمتر از $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ، مقدار شوری آب (EC و TDS) و نمک‌های محلول به‌شدت افزایش می‌یابد. در حقیقت نتایج مطالعات این واقعیت را نشان می‌دهد که در فصول خشک که دبی رودخانه‌ها به کمتر از مقدار بحرانی می‌رسد، پارامترهای شوری آب به‌طور جدی افزایش می‌یابند.

نتایج حاصل از بررسی کیفیت آب در ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی در رودخانه کرخه بر اساس آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA)، ایستگاه‌ها را از نظر کیفیت آب به سه خوشه تقسیم کرد؛ خوشه ۱، شامل ایستگاه‌های کانال وصیله، کانال قدس، عبدالخان، پای پل و حمیدیه؛ خوشه ۲، شامل ایستگاه جلوگیر؛ و خوشه ۳ شامل ایستگاه یزد نو است. کیفیت آب در خوشه ۳ که تنها ایستگاه یزد نو در آن واقع است، پایین‌ترین کیفیت را نسبت به دیگر ایستگاه‌ها داشته است. به طوری که میانگین پارامترهای EC، TDS، Ca، Mg، K در این ایستگاه بیشتر از مقادیر این پارامترها در خوشه ۱ و ۲ بوده است. در مقایسه با مطالعات مشابه در کشور، میرمشتاقی و همکاران (۱۳۹۰) دریافتند که تغییرات کیفیت آب سفیدرود دارای تغییرات نامنظم مکانی در طول رودخانه است که ورود آلاینده‌ها از منابع مختلف و نیز توان خود پالایی رودخانه را می‌توان از دلایل این امر دانست. در پژوهش میرزایی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی کیفیت آب رودخانه‌های استان مازندران، نتایج گروه‌بندی ایستگاه‌ها، کیفیت نسبی آب رودخانه‌ها در نواحی غربی استان را پایین‌تر نمایش داد و وضعیت نسبی برخی ایستگاه‌ها (شامل بلیران، دوآب، پل مرگن، پل سفید و کرچا) را بحرانی برآورد کرد. در این مطالعه، کاربری‌های مسکونی و کشاورزی و پساب‌ها و فاضلاب حاصل از آن‌ها را عامل افت کیفیت برخی از ایستگاه‌ها که در پایین دست این کاربری‌ها قرار دارند، دانسته‌اند. باب‌الحکمی و غلامی‌سفیدکوهی (۱۳۹۷) نیز در پژوهشی به تجزیه و تحلیل کیفیت آب رودخانه تالار با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره پرداختند. نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای، ایستگاه‌ها را از نظر کیفیت آب به سه گروه تقسیم نمود؛ گروه اول شامل ایستگاه‌های پالندردبار، کریکلا و تجون، گروه دوم شامل ایستگاه‌های شرگاه و کیاکلا و گروه سوم شامل ایستگاه پل سفید بود. همچنین نتایج نشان داد که جریان پساب‌های صنعتی، خانگی، بیمارستان و کشاورزی از علل عمده نامناسب شدن کیفیت ایستگاه‌های واقع در پایین دست رودخانه تالار نسبت به بالادست می‌باشد.

در راستای بررسی کیفیت آب رودخانه کرخه از نظر مصرف در بخش کشاورزی نیز، نتایج تفسیر شده نشان داد که بر اساس EC، کیفیت آب در رده زیاد (C3) تا بسیار زیاد (C4) پارامتر EC قرار دارد. در واقع بیانگر این است که از نظر پارامتر EC، کیفیت آب رودخانه برای کشاورزی نامناسب است. اثر اصلی میزان EC زیاد آب بر بهره‌وری محصول، عدم رقابت گیاه با یون‌های محلول در خاک است. هرچقدر میزان EC بیشتر باشد، آب در دسترس گیاهان کمتر است، حتی اگر خاک مرطوب باشد، زیرا گیاهان فقط می‌توانند آب خالص را جذب کنند. آب قابل استفاده گیاه

در محلول خاک با افزایش EC به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و در نهایت منجر به کاهش پتانسیل عملکرد در گیاهان می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، از نظر فاکتور SAR تمام نمونه‌های آب دارای مقادیر SAR در طبقه عالی و قابل‌قبول (S1) برای آبیاری هستند و از نظر شاخص درصد سدیم (SP) نیز کیفیت آب در طبقه خوب تا مجاز مشاهده شد. خطر سدیم فاکتور مهمی در کیفیت آب آبیاری است و در واقع این موارد پارامترهای مهمی برای تعیین مناسب بودن آب آبیاری است، زیرا سدیم اضافی در آب اثرات نامطلوب تغییر خصوصیات خاک و کاهش نفوذپذیری خاک را ایجاد می‌کند (Biswas *et al.*, 2002). در واقع در نتیجه استفاده از آب با درصد زیادی سدیم برای آبیاری، سدیم جایگزین کلسیم و منیزیم جذب شده می‌شود و در نهایت باعث آسیب به ساختار خاک می‌شود و آن را متراکم و غیر قابل نفوذ می‌سازد (Joshi *et al.*, 2009). هر چه بافت خاک ریز تر و مواد آلی بیشتر باشد، تأثیر سدیم بر نفوذ آب و هوادهی بیشتر است. سطوح زیاد سدیم ممکن است در اثر انحلال و هوازدگی مواد معدنی رس مانند هالیت باشد (Vasanthavigar *et al.*, 2010). معیار دیگری برای ارزیابی مناسب بودن آب برای آبیاری بر اساس درصد شاخص نفوذپذیری (PI) آب است. در منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر میزان نفوذپذیری در ایستگاه‌های مختلف کیفیت‌سنجی ۵۶/۴۲ تا ۶۸/۴۹ درصد محاسبه شد، از این‌رو، کیفیت آب رودخانه کرخه برای آبیاری مناسب است. بر اساس نسبت‌های Kelly (KR) نیز کیفیت آب رودخانه برای آبیاری طبقه‌بندی و بررسی گردید و نتایج نشان داد که به‌جز در ایستگاه یزد نو (که مقدار KR در آن بیشتر از ۱ است)، در سایر ایستگاه‌ها مقادیر KR در طبقه ایمن (<۱) قرار دارد و از این‌رو، کیفیت آب رودخانه کرخه برای آبیاری مناسب است. از نظر شاخص درصد مقدار خطر منیزیم (MH) نیز مقدار آن در ایستگاه‌های مختلف بین ۲۸/۲۵ تا ۴۴/۸۹ و با میانگین کلی ۳۵/۰۸ درصد محاسبه شد. لذا کیفیت آب در حد مطلوب و مناسب به جهت مصرف آبیاری کشاورزی در مطالعات مختلفی از این فاکتورها جهت بررسی کیفیت منابع آبی جهت آبیاری استفاده گردیده است. قاسمی دهنوی و همکاران (۱۳۹۵) جهت ارزیابی کیفیت آب رودخانه ازنا لرستان جهت آبیاری از دو معیار خطر سدیم و خطر شوری (EC و TDS) در طبقه‌بندی آب رودخانه استفاده کردند. نتایج نشان داد طبق جدول ویلکاکس در دوره خشک بعضی از نمونه‌ها به دلیل بالا بودن مقادیر TDS در کلاس C3S1 (کمی شور که با تمهیدات برای کشاورزی مناسب می‌شود) قرار دارند و نمونه‌های دیگر در کلاس C2S1 (تقریباً مناسب) قرار می‌گیرند. در دوره مرطوب تمامی نمونه‌ها در کلاس C2S1 قرار می‌گیرد. عباسی تشنیزی و نوری امام زاده‌ئی (۱۳۹۶) در پژوهشی در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت کبودر آهنگ با انجام تحلیل خوشه‌ای بر روی ۳۰ چاه آب مورد بررسی در این منطقه، چاه‌ها به سه گروه تقسیم شدند که از نظر کاربرد آب در بخش کشاورزی هر سه گروه در رده C3S1 قرار گرفتند. در پژوهش نامداری و هوشمندزاده (۱۳۹۸) در بررسی کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه آب‌سنجی ملاثانی، نتایج نشان داد در طول دوره آماری مورد مطالعه (۱۳۴۶-۱۳۹۵)، مقدار متغیر Kelly برابر ۰/۹۸ به دست آمد که بیشتر از میانگین KI در مطالعه حاضر است؛ بنابراین کیفیت آب در مرز مطلوب و نامطلوب است. مقدار نسبت خطر منیزیمی نیز ۱۷/۸۲ درصد محاسبه شد که کمتر از میانگین درصد MH در مطالعه حاضر است. لذا کیفیت آب در حد مطلوب به جهت شرب و کشاورزی می‌باشد. به‌علاوه در این مطالعه، مقدار متوسط هدایت الکتریکی آب رودخانه کارون در ملاثانی از مقدار مجاز استاندارد سازمان بهداشت جهانی بیشتر بود که دلیل آن قرارگیری سازند زمین‌شناسی گچساران در بالادست رودخانه کارون به‌خصوص در محدوده سدهای گتوند علیا و شهید عباسپور عنوان گردید. دامنه تغییرات نسبت Kelly توسط Kanwar و Khanna (۲۰۱۴) بین ۰/۴۱ تا ۶/۵۸ به دست آمد که متوسط آن خیلی بیشتر از رودخانه کرخه است. Reddy (۲۰۱۳) نیز در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری حوضه آبخیز Nalgonda District. Bhaskar Rao Kunta در هند پرداخت. در این پژوهش غلظت پارامترهای مختلف با شاخص‌های مختلف آبیاری مانند EC، درصد سدیم (SP)، نسبت جذب سدیم (SAR)، شاخص نفوذپذیری (PI) و شاخص Kelly (KR) تفسیر و بررسی شد. نتایج تفسیر شده نشان داد که بر اساس EC در فصول قبل و بعد از مونسون ۲۰ و ۸۰ درصد نمونه‌ها در رده شوری متوسط تا زیاد قرار دارند و بر اساس درصد سدیم (SP) ۲۵ و ۷۵ درصد نمونه‌ها در هر دو فصل در رده عالی تا خوب قرار دارند. مقادیر شاخص‌های SAR و KR نشان داد که در ۱۰۰ درصد نمونه‌ها و در هر دو فصل در رده عالی و عالی تا خوب قرار دارند. از این‌رو، بر اساس نتایج شاخص‌ها نتیجه‌گیری شد که کیفیت آب‌های زیرزمینی به‌طور کلی برای آبیاری مناسب است. Hossain و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به بررسی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه Birbhum.

هند از نظر مناسب بودن برای آبیاری با استفاده از شاخص‌های نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم (SP)، خطر منیزیم (MH)، شاخص نفوذپذیری (PI) و شاخص Kelly (KI) پرداختند. نتایج نشان داد مقادیر SAR از ۰/۴۱ تا ۴۴/۳۵ با میانگین ۷/۲۱ متغیر بود و حداکثر نمونه‌ها دارای مقادیر SAR در محدوده امن و به‌عنوان خوب تا مرزی طبقه‌بندی می‌شوند. با این حال، ۱۰ درصد نمونه‌ها دارای مقادیر SAR بیشتر از ۱۵ هستند که به‌عنوان نامناسب برای هدف آبیاری در نظر گرفته می‌شوند زیرا می‌تواند بر نفوذپذیری تأثیر بگذارد و فقط برخی از محصولات محدود را می‌توان آنجا کشت کرد (Awais *et al.*, 2017). در این پژوهش درصد سدیم (SP) در محدوده ۴/۲۹ تا ۵۳۰/۳۵ درصد متغیر بود و میزان خطر منیزیم (MH) نیز از ۲/۳۹ تا ۵۴/۲۳ با یک مقدار میانگین ۳۳/۵۱ با ۹۷ درصد نمونه در طبقه ایمن مشاهده شد. به‌علاوه، نتایج نشان داد که از نظر PI، ۹۹/۵ درصد از نمونه‌های مورد مطالعه از کلاس I و II هستند، یعنی برای آبیاری خوب یا متوسط هستند و بر اساس شاخص KI نیز ۸۵ درصد از نمونه‌ها در طبقه مناسب برای آبیاری مشاهده شدند ($KI < 1$).

یافته‌های این مطالعه اطلاعات مفیدی را در تفسیر مجموعه داده‌های پیچیده در خصوص ارزیابی کیفیت آب، شناسایی منابع آلودگی و درک تغییرات مکانی و روند کیفیت آب رودخانه کرخه فراهم می‌کند که می‌تواند به‌طور مستقیم برای پروژه‌های مدیریتی برای بهبود کیفیت آب سطحی در منطقه مورد مطالعه مورداستفاده قرار گیرد. به‌عنوان مثال بر اساس تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره در این مطالعه، مهم‌ترین پارامترهای کیفیت آب که توسط PCA تعیین شدند، شامل EC، TDS، HCO_3^- و pH بوده است. به‌علاوه می‌توان نتیجه گرفت که منابع انسانی (از قبیل کشاورزی و خانگی) و هیدروژئوشیمیایی به‌طور قابل توجهی بر کیفیت آب رودخانه کرخه تأثیر می‌گذارند. همچنین نتایج این مطالعه برای مدیریت و استفاده مناسب از آب‌های سطحی برای اهداف آبیاری مفید خواهد بود و می‌توان برای بررسی کیفیت آب در مناطق دیگر نیز از این تکنیک‌ها و شاخص‌ها استفاده کرد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از طرح پژوهشی تحت عنوان ارزیابی تغییرات زمانی - مکانی و روند کیفیت آب سطحی رودخانه‌های ورودی به خلیج فارس با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره و شاخص‌های کیفیت آب (مطالعه موردی: رودخانه‌های کارون، دز و کرخه) مصوب دانشگاه ملایر در سال ۱۴۰۰ با شماره قرارداد ۸۳۱-۱-۸۴/۹ است که از حمایت دانشگاه ملایر در اجرای این پروژه قدردانی به عمل می‌آید. به‌علاوه نویسندگان مقاله از سازمان آب و فاضلاب اهواز برای همکاری در خصوص ارائه اطلاعات مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی رادارند.

منابع

- باب‌الحکمی، ع. و غلامی سفیدکوهی، م. ع.، ۱۳۹۷. تجزیه و تحلیل کیفیت آب رودخانه تالار با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره. پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، ۹ (۱۸): صفحات ۲۵۹-۲۵۰.
- خسروی، ح.، مرادی، ا. و دارابی، ح.، ۱۳۹۴. شناسایی مناطق همگن از نظر کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل عاملی و خوشه‌ای؛ مطالعه موردی دشت قیر استان فارس. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۶ (۱): صفحات ۱۳۳-۱۱۹.
- رائی نظامی، س.، نظری‌ها، م.، باغوند، ا. و مریدی، ع.، ۱۳۹۱. بررسی کیفیت آب رودخانه کرخه با استفاده از آنالیز آماری چند متغیره بر پایه همبستگی و تغییرات داده‌های کیفی. مجله تحقیقات نظام سلامت، ۸ (۷): صفحات ۱۲۹۲-۱۲۸۰.
- سبزواری، ی.، حیدری مطلق، آ. و نصرالهی، ح.، ۱۳۹۸. بررسی تغییرات بلندمدت سالانه و فصلی کیفیت آب رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه الشتر). مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۵ (۴): صفحات ۳۰۳-۲۹۲.
- عباسی تشنیزی، ف. و نوری امام زاده‌ئی، م. ر.، ۱۳۹۶. ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت کبودرآهنگ با استفاده از تحلیل عاملی و خوشه‌ای. مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۳ (۳): صفحات ۲۷۹-۲۷۲.

- قاسمی دهنوی، آ.، ساریخانی، ر.، حسینی، س. ح.، احمدنژاد، ز. و ابراهیمی، ب.، ۱۳۹۵. ارزیابی کیفی و کمی آب‌های سطحی با استفاده از آنالیز آماری در رودخانه ازنا لرستان. مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۲ (۴): ۳۰۶-۳۲۱.
- کریمی‌جشنی، ا. و سالاری‌درگی، م.، ۱۳۹۳. طبقه‌بندی کیفی آب رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه‌های کارون، دز و کرخه). مجله محیط‌زیست و توسعه، ۵ (۱۰): صفحات ۲۹-۳۸.
- میرزایی، م.، ریاحی‌بختیاری، ع. ر.، سلمان‌ماهینی، ع. ر. و غلامعلی‌فرد، م.، ۱۳۹۲. آنالیز کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب رودخانه‌های استان مازندران با استفاده از روش‌های چند متغیره آماری. مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۳۳ (۱۰۸): صفحات ۴۱-۵۲.
- میرمشتاقی، س. م.، امیرنژاد، ر. و خالدیان، م. ر.، ۱۳۹۰. بررسی کیفیت آب رودخانه‌ی سفیدرود و پهنه‌بندی آن با استفاده از شاخص‌های کیفی NSFQI و OWQI. فصلنامه علمی پژوهشی اکو بیولوژی تالاب - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، ۳ (۹): صفحات ۲۳-۳۴.
- نامداری، ح. و هوشمندزاده، م.، ۱۳۹۸. روند یابی و تحلیل آماری کیفیت آب رودخانه کارون در ایستگاه آب‌سنجی ملائانی. نشریه علمی اکو بیولوژی تالاب - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، ۱۱ (۳۸): صفحات ۲۲-۵.

Ahmadi, M., Ravanbakhsh, M., Ahmadi, K. and Ramavandi, B., 2015. Trend analysis of long-term water quality for Zohre River water, Iran. *Pollution Research*, 34 (3): 489-496.

Alam, J. B., Hossain, A., Khan, S. K., Banik, B. K., Islam, M. R., Muyen, Z. and Habibur Rahman, M., 2007. Deterioration of water quality of Surma River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 134(1-3): 233-242.

Alkarkhi, A. F. M., Ahmad, A., Ismail, N., Easa, A. and Omar, K., 2008. Assessment of surface water through multivariate analysis. *Journal of sustainable development*, 1(3): 27-33.

Awais, M., Arshad, M., Shah, S. H. H., Anwar-ul-Haq, M., 2017. Evaluating groundwater 759 quality for irrigated agriculture: spatio-temporal investigations using GIS and 760 geostatistics in Punjab, Pakistan. *Arab J Geosci*, 10 (23): 510.

Aydin, H., Ustaoglu, F., Tepe, Y. and Soyulu, E.N., 2021. Assessment of water quality of streams in northeast Turkey by water quality index and multiple statistical methods. *Environmental Forensics*, 22(1-2): 270-287.

Bakan, G., Özkoç, H.B., Tülek, S. and Cüce, H., 2010. Integrated environmental quality assessment of the Kızılırmak River and its coastal environment. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 10(4): 453-462.

Barik, R. and Pattanayak, S. K., 2019. Assessment of groundwater quality for irrigation of green spaces in the Rourkela city of Odisha, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 8(2): 428-438.

Biswas, S. N., Mohabey, H. and Malik, M. L., 2002. Assessment of the irrigation water quality of River Ganga in Haridwar District. *RASĀYAN Journal of Chemistry*, 2(2): 285-292.

Bohlke, J. K., Verstraeten, I. M. and Kraemer, T. F., 2007. Effects of surface-water irrigation on sources, fluxes, and residence times of water, nitrate, and uranium in an alluvial aquifer. *Applied Geochemistry*, 22(1): 152-174.

Chiueh, P. T., Wu, H. T. and Lo, S. L., 2011. Seasonal water quality trends in the Feitsui Reservoir watershed, Taiwan. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 5(10): 581-584.

Desai, J. and Tank, S. K., 2010. Deterioration of water quality due to immersion of Ganesh idols in the river Tapti at Surat (India). *Journal of Environmental Research and Development*, 4(4): 999-1007.

Doneen, L.D., 1975. Water quality for irrigated agriculture. *Plants in saline environments*, pp.56- 76. Springer, Berlin, Heidelberg.

Gazzaz, N. M., Yusoff, M. K., Ramli, M. F., Aris, A. Z. and Juahir, H., 2012. Characterization of spatial patterns in river water quality using chemometric pattern recognition techniques. *Marine Pollution Bulletin*, 64(4): 688-698.

Giri, A., Bharti, V. K., Kalia, S., Kumar, K., Raj, T. and Chaurasia, O. P., 2019. Utility of multivariate statistical analysis to identify factors contributing river water quality in two different seasons in cold-arid high-altitude region of Leh-Ladakh, India. *Applied Water Science*, 9: 26.

Gopal, V. and Joseph, S., 2015. Irrigational quality of Vamanapuram River, Kerala, India, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(10): 803-811.

- Grasby, S. E., Hutcheon, I. and Krouse, H. R., 1997.** Application of the stable isotope composition of SO₄²⁻ to tracing anomalous TDS in Nose Creek, southern Alberta, Canada. *Applied Geochemistry*, 12 (5): 567-575.
- Gu, Q., Zhang, Y., Ma, L., Li, J., Wang, K., Zheng, K., Zhang, X. and Sheng, L., 2016.** Assessment of reservoir water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Qiandao Lake, China. *Sustainability*, 8(3): 243.
- Handa, B.K., 1969.** Description and Classification of Media for Hydrogeochemical Investigation. Symposium on Groundwater Studies in Arid and Semi-arid Regions.
- Hasan, Md. Y., Islam, Md. K., Monir, M. U., Hkan, M. F. H., Hasan, Md. M., Samad, Md. A. and Ahmed, M. T., 2020.** Dataset on the evaluation of hydrochemical properties and groundwater suitability for irrigation purposes: South-western part of Jashore, Bangladesh. *Data in Brief*, 32, 106315.
- Hejam, S., Skhoshkho, Y. and Shams Al-Din Vrindi, R., 2008.** Analyzing the trend of seasonal and annual rainfall variations of several selected stations in the center of Iran using non-parametric methods. *Geography Resources*, 40(64): 168-157.
- Hem, J. D., 1985.** Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. United States Geological Survey Water Supply Paper # WSP 2254.
- Hossain, M., Patra, P. K., Begum, S. N. and Rahaman, C. H., 2020.** Spatial and sensitivity analysis of integrated groundwater quality index towards irrigational suitability investigation. *Applied Geochemistry*, 123: 104782
- Huang, G., Sun, J., Zhang, Y., Chen, Z. and Liu, F., 2013.** Impact of anthropogenic and natural processes on the evolution of groundwater chemistry in a rapidly urbanized coastal area, South China. *Science of the Total Environment*, 1(463-464): 209-221.
- Joshi, D. M., Kumar, A. and Agrawal, N., 2009.** Assessment of the Irrigation Water Quality of River Ganga in Haridwar District India. *Rasayan Journal of Chemistry*, 2(2): 285-292.
- Kanwar, P. and Khanna, P., 2014.** Appraisal of groundwater quality for irrigation in outer plains of kathuadistrict, J&K, India. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, 4(3): 74-80.
- Kelly, W. P., 1940.** Permissible composition and concentration of irrigated waters. In: *Proceedings of the ASCF* 607,607-613.
- Kelly, W. P., 1963.** Use of Saline Irrigation Water. *Soil science*, 95(4): 355-39.
- Keraga, A. S., Kiflie, Z. and Engida, A. N., 2017.** Spatial and temporal water quality dynamics of Awash River using multivariate statistical techniques. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 11(11): 565-577.
- Khosravi, H., Moradi, E. and Darabi, H., 2015.** Identification of homogeneous groundwater quality regions using factor and cluster analysis: A Case Study of Ghir plain of Fars province. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 6(1): 119-133.
- Koklu, R., Sengorur, B. and Topal, B., 2010.** Water quality assessment using multivariate statistical methods— a case study: Melen River System (Turkey). *Water resources management*, 24(5), pp.959-978.
- Kumar, A., Taxak, A.K., Mishra, S. and Pandey, R., 2021.** Long term trend analysis and suitability of water quality of River Ganga at Himalayan hills of Uttarakhand, India. *Environmental Technology and Innovation*, 22: 101405.
- Kumari, A. and Rai, S. C., 2020.** Hydrogeochemical Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes Using Water Quality Index in Semi-Arid Region of India. *Journal Geological Society of India*, 95: 159-168.
- Lotfi, A., Shahedi, K. and Darabi, H., 2014.** Assessment of groundwater quality parameters using statistical methods (case study Sari-Neka). The first national conference on new issues in agriculture. Hamedan.
- Mahmoodabadi, M. and Rezaei Arshad, R., 2018.** Long-term evaluation of water quality parameters of the Karoun River using a regression approach and the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Marine Pollution Bulletin*, 126: 372–380.
- Matta, G. Naik, P. K., Machell, J., Kumar, A., Gjyli, L., Tiwari, A. K. and Kumar, A., 2018.** Comparative study on seasonal variation in hydro-chemical parameters of Ganga River water using comprehensive pollution index (CPI) at Rishikesh (Uttarakhand) India. *Desalination and Water Treatment*, 118: 87-95.

- Mena-Rivera, L., Salgado-Silva, V., Benavides-Benavides, C., Coto-Campos, J. and Swinscoe, T., 2017.** Thomas Swinscoe Spatial and Seasonal Surface Water Quality Assessment in a Tropical Urban Catchment: Burío River, Costa Rica. *Water*, 9: 558.
- Mirmoshaghi, S. M., Amirnezhad, R. and Khaledian, M., 2011.** Sefidroud river water quality assessment and its mapping according to NSFQI and OWQI water quality indicators. *Wetland*, 3(9): 23-34.
- Molla, M. A., Saha, N., Salam, S. A. and Rakib-uz-Zaman, M., 2015.** Surface and groundwater quality assessment based on multivariate statistical techniques in the vicinity of Mohanpur, Bangladesh. *International Journal of Environmental Health Engineering (IJEHE)*, 4: 18.
- Mostafaei, A., 2014.** Application of Multivariate Statistical Methods and Water- Quality Index to Evaluation of Water Quality in the Kashkan River. *Environmental Management*, 53: 865-881.
- Naddafi, K., Honari, H. and Ahmadi, M., 2007.** Water quality trend analysis for the Karoun River in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 134: 305-312.
- Najafpour, S., Alkarkhi, A. F. M., Kadir, M. O. A. and Najafpour, G. D., 2008.** Evaluation of spatial and temporal variation in river water quality. *International Journal of Environmental Research*, 2 (4): 349-358.
- Niazi, F., Mofid, H. and Fazel Modares, N., 2014.** Trend Analysis of Temporal Changes of Discharge and Water Quality Parameters of Ajichay River in Four Recent Decades. *Water Quality, Exposure and Health*, 6: 89-95.
- Nosrati, K., Derafshi, K. H., Ghareh Chahi, S. and Rahimi K. H., 2011.** Assessment the quality of surface water catchment area from Harz-Gharehsou using multivariate statistical techniques. *Research in Earth Sciences*, 2(5): 41-55.
- Oinam, J. D., Ramanathan, A. L. and Jayalakshmi, S. G., 2012.** Geochemical and statistical evaluation of groundwater in Imphaland Thoubal district of Manipur, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48: 136-149.
- Ouyang, Y., 2005.** Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12): 2621-2635.
- Paliwal, K. V., 1972.** Irrigation with Saline Water. Water Technology Centre, Indian Agriculture Research Institute, New Delhi, pp. 769.
- Reddy, K. S., 2013.** Assessment of groundwater quality for irrigation of Bhaskar Rao Kunta watershed, Nalgonda District, India. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 5(7): 418-425.
- Richards, L. A., 1954.** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. *Agricultural Handbook 60*, USDA and IBH Publishing Co. Ltd. New Delhi, India pp.98-99.
- Sayemuzzaman, M., Ye, M., Zhang, F. and Zhu, M., 2018.** Multivariate statistical and trend analyses of surface water quality in the central Indian River Lagoon area, Florida. *Environmental Earth Sciences*, 77:127
- Schaider, L. A., Swetschinski, L. and Rudel, R., 2018.** Environmental Justice and Drinking Water Quality in US Public Water Supplies. *International Society for Environmental Epidemiology (ISEE)*, Abstracts.
- Sharma, D. and Kansal, A., 2011.** Water quality analysis of River Yamuna using water quality index in the national capital territory, India (2000-2009). *Applied Water Science*, 1:147-157.
- Sharma, M., Kansal, A., Jain, S. and Sharma, P., 2015.** Application of Multivariate Statistical Techniques in Determining the Spatial Temporal Water Quality Variation of Ganga and Yamuna Rivers Present in Uttarakhand State, India. *Water Quality, Exposure and Health*, 7: 567-581.
- Shetty, S., Tharavathy, N. C., Lobo, R. O. and Shafakatullah, N., 2013.** Seasonal variation in the physico-chemical characteristics along the upstream of Tungabhadra River, Western Ghats, India. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 3(1):242-246.
- Shrivastava, N., Mishra, D. D., Mishra, P. K. and Bajpai A., 2013.** Water quality deterioration of Machna River due to sewage disposal, Betul, Madhya Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 3(6):1-5.
- Todd, D. K., 1995.** *Groundwater Hydrology*. John Wiley and Sons Publications, 3rd Ed, New York.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Ganthi, R. R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R. and Vasudevan, S., 2010.** Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental monitoring and assessment*, 171(1), pp.595-609.

Wang, J., Liu, G., Liu, H. and Lam, P. K. S., 2017. Multivariate statistical evaluation of dissolved trace elements and a water quality assessment in the middle reaches of Huaihe River, Anhui, China. *Science of the Total Environment*, 583: 421-431.

Wang, X. L., Lu, Y. L., Han, J. Y., He, G. Z. and Wang, T. Y., 2007. Identification of anthropogenic influences on water quality of Rivers in Taihu watershed. *Journal of Environmental Sciences*, 19(4):475-481.

Wilcox, L.V., 1955. Classification and Use of Irrigation Water, Washington: US Department of Agriculture. Circular No.969, p. 19.

Wu, M. L., Wang, Y.S., Wang, Y. T., Sun, F. L., Sun, C. C., Cheng, H. and Dong, J. D., 2016. Seasonal and spatial variations of water quality and trophic status in Daya Bay, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 112 (1-2): 341-348.

Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y. and Deng, J., 2018. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612: 914-922.

Xu, H. S., Xu, Z. X., Wu, W. and Tang, F. F., 2012. Assessment and spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan River Basin, China. *Procedia Environmental Sciences*, 13:1641-1652.

Zare Garizi, A., Sheikh, V. and Sadoddin, A., 2011. Assessment of seasonal variations of chemical characteristics in surface water using multivariate statistical methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8 (3): 581-592.

Zhang, Y., Li, Y., Da, W., Yu, M., Quan, Q. and Li, Y., 2018. Application of multivariate statistical methods in the assessment of water quality in selected locations in Jialing river basin in guangyuan, China. *Water Science and Technology Water Supply*, 19(1): ws2018058.

