

ارزیابی کارکرد تغییرپذیری اقلیم و تغییر کاربری اراضی در تغییرات کیفیت آب رودخانه هراز (استان مازندران)

عبدالله پیرنیا^۱، کریم سلیمانی^{۲*}، محمود حبیب‌نژاد روشن^۲، علی اصغر بسالت پور^۳

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

۲. استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده منابع طبیعی ساری، ساری

۳. استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۴/۱۲)

چکیده

شناخت روند پارامترهای کیفی آب و عوامل مؤثر بر تغییرات آن، همانند آنالیز کمی منابع آب، از ملزومات مدیریت پایدار و تأمین سلامت حوضه‌های آبخیز است. با توجه به اهمیت منابع آب سطحی برای مصارف مختلف در حوضه آبخیز هراز، ضروری است تا درک صحیحی از کیفیت این منابع و شناخت عوامل تأثیرگذار بر آن صورت گیرد. به این منظور برای ارزیابی کیفیت آب سطحی رودخانه هراز، داده‌های ۱۲ متغیر کیفیت آب به همراه پارامترهای هیدرواقليمی با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال (Mann-Kendall) طی دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۴ آنالیز شدند. برای تعیین آثار احتمالی تغییرات کاربری اراضی، این تغییرات نیز با استفاده از GIS برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۴ ارزیابی شدند. نتایج نشان داد بیشتر سری‌های زمانی کیفیت آب روند افزایشی معناداری طی دوره داشته‌اند که بیان‌کننده کاهش شدید کیفیت آب رودخانه هراز است. با توجه به نتایج آزمون من-کندال (آنالیز روند پارامترهای هیدرواقليمی، تعیین نقطه تغییر ناگهانی، آنالیز همبستگی کندال) و همچنین روند تغییرات کاربری اراضی، نتیجه گرفته شد که هر دو عوامل اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی می‌توانند در کاهش کیفیت منابع آب تأثیرگذار باشند به طوری که افزایش دما و کاهش بارندگی از یک طرف می‌تواند به کاهش پارامترهایی نظیر کلسیم، بی‌کربنات و سختی کل (TH) منجر شود و از طرف دیگر، این تغییرات به همراه تغییرات کاربری اراضی می‌تواند دلیل اصلی افزایش بیشتر سری‌های زمانی مانند کل مواد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، سدیم، کلرید، نسبت جذب سدیم (SAR) و غیره باشد.

کلیدواژگان: آنالیز روند، تغییرپذیری اقلیم، تغییر کاربری اراضی، حوضه آبخیز رودخانه هراز، کیفیت آب.

مقدمه

به دلیل رشد روزافزون جمعیت و توسعه صنعتی و کشاورزی، استفاده از منابع آب به گونه چشمگیری در حال افزایش است. از سوی دیگر، فعالیت‌های مختلف انسانی موجب افزایش ورود آلودگی به منابع آب می‌شود به گونه‌ای که پیش از استفاده از آب برای مصرف خاص باید ویژگی‌های آن برای مقایسه با استانداردهای مربوط به آن تعیین شود [۱].

علاوه بر مواد آلوده‌کننده، مواردی مانند افزایش تقاضای آب، معیارهای سطح بالای زندگی و کاهش منابع قابل قبول آب سبب ایجاد وضعیت نامناسب اجتماعی و زیست‌محیطی در سراسر جهان شده است [۲]. از میان سامانه‌های آبی، رودخانه‌ها به دلیل حمل پساب‌های شهری و صنعتی و زه‌آب کشاورزی از آسیب‌پذیرترین منابع آبی به‌شمار می‌روند [۳]. بنابراین، ارزیابی کیفی آب رودخانه‌ها از نظر زیست‌محیطی یک مسئله بسیار پراهمیت است [۴]. رودخانه‌ها از منابع آب در دسترس انسان هستند و از دیرباز همواره جوامع انسانی و مراکز صنعتی در مجاورت آنها برپا شده است. امروزه یکی از بحران‌ها و نابسامانی‌های موجود در سطح جهان، آلودگی این منابع خدادادی و بالارزش است و در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت، گسترش صنایع و تولید انواع آلاینده‌ها در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی، آلودگی رودخانه‌ها را افزایش داده است. ضرورت توجه و کنترل آلودگی وارد شده به آنها، در مدیریت منابع آبی اهمیت ویژه‌ای یافته و در برنامه‌ریزی‌های کاربردی از این منابع مهم اقتصادی تأثیر بسزایی دارد. از مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی در حوضه‌های آبخیز، تغییر کاربری اراضی است که به طور قابل توجهی بر کمیت و کیفیت منابع آب تأثیر می‌گذارد. اگرچه نوع استفاده از زمین (کاربری اراضی) می‌تواند به دو صورت مثبت و منفی بر کیفیت آب تأثیرگذار باشد، تغییرات کاربری اراضی بیشتر منفی است و بهره‌برداری از منابع آبی را به شدت محدود می‌کند [۵]. علاوه بر دخالت انسان در تغییرات کیفیت آب، عوامل اقلیمی نیز اهمیت دارد. خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها یا دوره‌های کم‌آبی و پرآبی تأثیرات مهمی در کیفیت منابع آب دارند؛ به گونه‌ای که به طور کلی در مواقع خشکسالی و کم‌آبی، غلظت املاح مختلف افزایش و در نتیجه کیفیت آب با کاهش همراه

است و در مواقع ترسالی و پرآبی، به عکس، غلظت املاح مؤثر در کیفیت آب کاهش می‌یابد که در نتیجه افزایش کیفیت منابع آب را در پی دارد. بنابراین، با توجه به مطالب یادشده، در زمینه آنالیز کیفیت منابع آب، در نظر گرفتن عوامل اقلیمی و عوامل انسانی به خصوص تغییر کاربری اراضی ضروری است. این امر در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب و همچنین ارزیابی سلامت حوضه‌های آبخیز و ایجاد تغییرات مدیریتی در آن اهمیت خاصی دارد [۶].

پیشینه تحقیق

در زمینه ارزیابی کیفیت منابع آب، مطالعات مختلفی در داخل و خارج از کشور انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. اصغری مقدم و آدی‌گوزل‌پور [۷] غلظت عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز، کروم و کادمیوم را در آب زیرزمینی دشت اشنویه آنالیز کردند و نتیجه گرفتند که به جز آلومینیوم، آلودگی دشت به فلزات سنگین در مرز خطر نیست؛ ولی به علت عمق کم آب زیرزمینی و فعالیت‌های شدید کشاورزی، به طور قطع در آینده خطرهای زیست‌محیطی زیادی در پی خواهد داشت. نوروزی و همکارانش [۸] آلودگی آب زیرزمینی دشت ملکان را به آرسنیک بررسی کردند و دریافتند که پارامترهایی مانند مقدار قابلیت انتقال، نترات، هدایت هیدرولیکی و وجود شهرها بیشترین تأثیر را در وجود آرسنیک دارند. همچنین نتایج آنها نشان داد در آلودگی آب زیرزمینی منطقه، هر دو عامل انسانی (تولید نترات) و زمین‌شناسی منطقه تأثیر دارند. یوسفی و همکارانش [۱] با بررسی کیفیت منابع آب سطحی حوضه آبخیز هیو در غرب شهر هشتگرد نشان دادند آب‌های سطحی منطقه با توجه به نمودارهای ویلکوکس، شولر به ترتیب برای مصارف کشاورزی و شرب مناسب و قابل قبول است. همچنین دریافتند که با توجه به نمودار پایپر، منابع آب سطحی منطقه سختی زیادی دارند. زارع‌گاریزی و همکارانش [۹] با بررسی روند تغییرات بلندمدت متغیرهای کیفی آب رودخانه چهل‌چای در استان گلستان نشان دادند در میان متغیرهای مطالعه شده، هفت متغیر روند افزایشی معنادار، چهار متغیر بدون روند و فقط بی‌کربنات روند کاهشی معناداری داشته‌اند و کاهش کیفیت آب رودخانه را ناشی

ثابت شده است [۱۵]. تشخیص روند بلندمدت کیفیت آب رودخانه‌ها برای پی‌بردن به تغییرات به‌وقوع‌پیوسته در گذشته و پیش‌بینی آینده اهمیت بسزایی دارد. شناسایی روند، همچنین اطلاعات ارزشمندی را برای ادراک تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی و برهم‌کنش این عوامل در سطح آبخیز فراهم می‌آورد. بنابراین، در مطالعه حاضر، اهداف زیر دنبال می‌شود:

۱. آنالیز روند پارامترهای کیفیت آب با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال؛ ۲. آنالیز روند پارامترهای هیدرو-اقلیمی با استفاده از آزمون من-کندال و ۳. بررسی روند تغییر کاربری اراضی برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۴ برای تعیین آثار احتمالی تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب.

مواد و روش‌ها

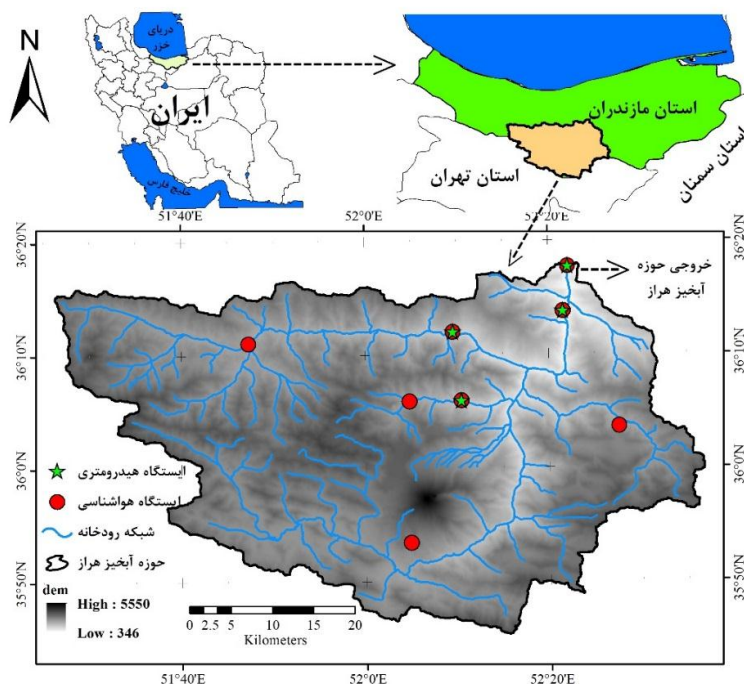
منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبخیز هراز بین $43^{\circ} 51'$ تا $36^{\circ} 52'$ طول شرقی و $45^{\circ} 35'$ تا $22^{\circ} 36'$ عرض شمالی واقع شده است. وسعت حوضه آبخیز $4014/075$ کیلومترمربع، کمترین ارتفاع حوضه 300 متر و بیشترین ارتفاع آن 5600 متر است. متوسط میزان بارندگی سالانه ایستگاه‌های منتخب از حداقل 302 میلی‌متر در بخش تقریباً مرکزی منطقه تا حداکثر 1069 میلی‌متر در بخش شرقی منطقه در نوسان است. همچنین متوسط دمای ایستگاه‌های مطالعاتی از حداقل 5 درجه سانتی‌گراد در ایستگاه فیروزکوه تا حداکثر $23/1$ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه رینه لاریجان متغیر است. از نظر اقلیمی در بخش کوهستانی حوضه، بیشتر بارش‌ها به‌صورت برف و در بخش دشتی به‌صورت باران است [۶]. اقلیم بخش کوهستانی آن نیمه‌مرطوب و در بخش دشتی آن مرطوب است [۱۶]. بیشترین سطح پوشش حوضه آبخیز هراز را مراتع و بیشه‌زارهای متراکم تشکیل می‌دهد. همچنین قسمت شمال شرقی حوضه را جنگل‌های متراکم و نیمه‌متراکم پوشانده است و به‌علت وجود رودخانه‌های متعددی مثل رودخانه هراز در سراسر حوضه، کاربری غالب اطراف این رودخانه‌ها زراعت آبی و باغ‌هاست. موقعیت منطقه مطالعه‌شده در کشور و استان مازندران در شکل ۱ نشان داده شده است.

از عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، فرسایش خاک و ورود زائدات به رودخانه دانستند. سلاجقه و همکارانش [۱۰] آثار تغییر کاربری اراضی را بر کیفیت آب رودخانه کرخه بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تغییرات کاربری اراضی در این حوضه به سمت کاهش اراضی مرتعی، جنگلی، باغ‌ها و اراضی زراعی و افزایش اراضی بایر و مسکونی پیش رفته است. آنها دریافتند که تغییرات کاربری اراضی به کاهش شدید کیفیت آب رودخانه کرخه منجر شده است و از طرف دیگر، وقوع خشکسالی نیز با کاهش دادن دبی آب رودخانه سبب تشدید کاهش کیفیت آب شده است. وفاخواه و صادقی [۶] با بررسی ارتباط بین پارامترهای کیفی و دبی رودخانه هراز، نشان دادند ارتباط بین پارامترهای کیفی و دبی رودخانه در حالت لگاریتمی معنادار است و کیفیت آب، خوب تا قابل قبول و برای کشاورزی کاملاً مناسب است.

بویاسیگلو [۱۱] روند تغییرات پنج فاکتور مهم کیفیت آب را در هفت ایستگاه در حوضه آبخیز تاهتالی ترکیه بررسی کردند و نشان دادند بیشتر عناصر یادشده کاهش غلظت و در نتیجه روند کاهشی داشته‌اند. کافمن و بلدن [۲]، کیفیت آب را در 30 رودخانه آمریکا تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند کیفیت آب در 69 درصد ایستگاه‌ها ثابت مانده یا بهبود پیدا کرده است. کتاتا و همکارانش [۱۲] با بررسی روند تغییرات برخی متغیرهای کیفی آب در منطقه‌ای واقع در جنوب شرقی تونس، دریافتند که تغییرات کمی بر سری‌های زمانی رخ داده است و وضعیت کیفیت آب بیشتر تحت تأثیر جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده سفره قرار دارد. پاتل و همکارانش [۱۳] کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه سارناموکی هندوستان را بررسی کردند و نشان دادند مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی برای مصارف کشاورزی و نفوذ فاضلاب شهری به داخل زمین، به‌شدت کیفیت آب این منطقه را تحت تأثیر قرار داده است.

در پی بروز تغییرات اقلیمی و دخالت‌های گسترده انسان در محیط زیست، توجه زیادی به مدیریت پایدار منابع آب در سطح جهان معطوف شده است [۱۴]. خصوصیات کیفی آب از مؤلفه‌هایی است که ضرورت در نظر گرفتن آن در مدیریت منابع آب و همچنین ارزیابی سلامت حوضه‌های آبخیز و اعمال تغییرات مدیریتی کاملاً



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز هراز در سطح استان و کشور

داده‌های استفاده‌شده

در این مطالعه، از داده‌های مربوط به ۱۲ متغیر کیفیت آب در چهار ایستگاه هیدرومتری پنجاب، رزن، چلاو و کره‌سنگ واقع در طول رودخانه هراز طی دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۴ استفاده شد. این پارامترها شامل پتاسیم (K^+)، منیزیم (Mg^{2+})، کلسیم (Ca^{2+})، سدیم (Na^+)، سولفات (SO_4^{2-})، کلرید (Cl^-)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، اسیدیته (pH)، کل مواد جامد محلول در آب (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل (TH) و نسبت جذب سدیم (SAR) هستند. نمونه‌برداری‌ها ماهی یکبار انجام می‌شود. این داده‌ها از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران دریافت شد. در این تحقیق، میانگین نمونه‌برداری‌های ماه‌های مهر تا فروردین و همچنین ماه‌های اردیبهشت تا شهریور به ترتیب به‌عنوان فصل پرآب (دوره مرطوب) و کم‌آب (دوره خشک) در نظر گرفته شد و طی دوره آماری یادشده آنالیز شد. داده‌های اقلیمی دما و بارندگی و همچنین داده‌های جریان رودخانه به ترتیب از اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران دریافت شدند. برای تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز هراز، تصاویر ماهواره لندست ۵، ۷ و ۸ که به ترتیب سنجنده‌های TM (۱۳۷۰)، ETM+ (۱۳۸۵) و سنجنده OLI (۱۳۹۴) دارند، استفاده شد.

روش انجام پژوهش

آزمون همبستگی پیاپی

شناسایی روند بدون توجه به همبستگی پیاپی بین داده‌ها، سبب اشتباه در تعیین روند می‌شود و در همه مطالعات روی روندهای زمانی باید به این خصوصیت توجه کافی کرد [۱۷]. برای بررسی وجود رابطه بین مشاهدات نزدیک به هم و یا همبستگی پیاپی در هر سری زمانی، می‌توان از آزمون Durbin-Watson استفاده کرد [۱۸]. از آنجا که همبستگی پیاپی بر آماره من-کندال هنگامی که اندازه نمونه بیشتر از ۵۰ باشد، اثر کمی دارد [۱۹]، و با توجه به اینکه در این تحقیق، دوره مطالعه شده ۲۵ سال است، همه سری‌های زمانی در این مطالعه مورد این آزمون قرار گرفتند و مشخص شد که تعداد کمی از سری‌ها همبستگی پیاپی دارند که در نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه تأثیری نداشتند.

آزمون‌های آنالیز روند

آزمون تعیین روند من-کندال (Mann-Kendall)

آزمون من-کندال جزء متداول‌ترین روش‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرواقلیمی به‌شمار می‌رود که به‌طور گسترده در علوم محیطی استفاده می‌شود (۲۰-۲۳). از مزایای اصلی روش‌های ناپارامتری این است که

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (5)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad 1 \leq j < i \quad (6)$$

شاخص آماری UF بر اساس معادله زیر بیان می‌شود:

$$UF = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (8)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (9)$$

شاخص UF که توزیع نرمالی استاندارد دارد، یک توالی رو به جلو از سری‌های زمانی دارد و شاخص UB یک توالی رو به عقب و معکوس از سری‌های زمانی دارند. طریقه محاسبه شاخص UB شبیه به UF است با این تفاوت که داده‌های معکوس سری‌های زمانی را در نظر می‌گیرد. تلاقی منحنی‌های UF و UB همراه با روند معنادار سری‌های زمانی، نقطه تغییر ناگهانی سری زمانی را نشان می‌دهد. هنگامی که فرضیه H_0 رد شود (یعنی هر نقطه‌ای در توالی رو به جلو، در خارج از فاصله سطوح اطمینان قرار گیرد)، بیان‌کننده یک روند افزایشی ($UF > 0$) یا کاهش ($UF < 0$) است.

آزمون همبستگی Kendall τ

آزمون Kendall τ یک آزمون غیرپارامتریک برای آزمون همبستگی است [۲۷] که در این تحقیق همانند برخی از تحقیقات در این زمینه [۲۸]، برای آزمون همبستگی بین سری‌های زمانی پارامترهای کیفی آب، دما و بارندگی استفاده شده است.

تهیه نقشه کاربری اراضی

لازمه اجرای این تحقیق، دراختیارداشتن نقشه کاربری اراضی از سه مقطع زمانی است. به این منظور با توجه به کاربری‌های موجود در منطقه، اهداف تحقیق و قابلیت تصاویر استفاده شده در استخراج اطلاعات به‌ویژه تهیه نقشه کاربری اراضی، با استفاده از بازبینی میدانی، تفسیر بصری و نرم‌افزار Google Earth نمونه‌های تعلیمی با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی ساده برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده هفت طبقه کاربری اراضی شامل جنگل، مرتع، زراعت آبی، باغ‌ها، مسکونی، اراضی فاقد پوشش گیاهی و مخازن آبی را شامل شد. پس از اعمال

وجود داده‌های پرت، نتیجه روند داده‌ها را کمتر از روش‌های پارامتری تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزون بر این، برای سری داده‌هایی که طول آنها کم و توزیع آماری آنها نرمال نیست و یا داده‌های گمشده دارند، مناسب‌تر است [۲۴]. این روش بر اساس آماره آزمون من-کندال (Z) تفسیر می‌شود که برابر است با:

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

که در آن، S برابر است با:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

در رابطه یادشده، n تعداد مشاهدات سری و x_j و x_i به ترتیب داده‌های j ام و i ام سری هستند. تابع علامت $\text{sgn}(x_j - x_i)$ نیز برابر است با:

$$\text{Sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

همچنین واریانس S ($\text{Var}(s)$) در رابطه محاسبه آماره آزمون (Z)، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^q t_k(t_k-1)(2t_i+5)}{18} \quad (4)$$

که در آن، n تعداد داده‌های مشاهداتی است؛ و پارامتر t بیان‌کننده فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است [۲۴]. وجود روند معنادار آماری با استفاده از مقدار آماره آزمون من-کندال (Z) (رابطه ۱) مشخص می‌شود که توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یک دارد. اگر برای Z مقداری مثبت به دست آید، بیان‌کننده یک روند افزایش در سری زمانی است، در حالی که مقدار منفی، نشان‌دهنده روند نزولی در سری زمانی است. همچنین اگر قدر مطلق Z ، بزرگ‌تر از ۱/۹۶ باشد، در سطح احتمالی ۵ درصد دارای روند مشخص و معنادار است و برای قدر مطلق Z بزرگ‌تر از ۲/۵۷۵، روند در سطح ۱ درصد معنادار است [۲۵].

آزمون تعیین نقطه تغییر ناگهانی من-کندال

آزمون من-کندال بر اساس نسخه رتبه‌ای یا ترتیبی آن، برای تعیین نقطه تغییر ناگهانی سری‌های زمانی استفاده می‌شود. آماره این آزمون به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

یافته‌ها و بحث

آنالیز روند پارامترهای کیفی آب

به‌منظور تعیین روند تغییرات پارامترهای کیفی آب در رودخانه هراز از آزمون من-کندال استفاده و نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پتاسیم فقط در فصل کم‌آب ایستگاه چلاو به مقدار ۰/۰۱ در سال کاهش یافته است و در سایر سری‌های زمانی افزایش داشته است که در ایستگاه کره‌سنگ بارزتر است و به مقدار ۰/۰۳ در سال در فصل پرآب می‌رسد. منشأ طبیعی پتاسیم کانی‌های سیلیکاتی هستند؛ ولی استعمال کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی و فرسایش خاک نیز می‌تواند علت روند افزایش پتاسیم در رودخانه هراز باشد. عنصر منیزیم به‌رغم اینکه در بیشتر موارد به مقدار صفر تا ۰/۳۴ افزایش یافته است، اما در هیچ‌یک از سری‌های زمانی در ایستگاه‌ها روند معنادار نیست. سولفات نیز در بیشتر سری‌های زمانی افزایش یافته است؛ ولی در هیچ‌یک روند معناداری مشاهده نشد. سولفات از طریق اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی، باران‌های اسیدی، فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و پسماندهای انسانی و دامی به آب‌های سطحی وارد می‌شود [۹].

متغیرهای سدیم، کلرید و نسبت جذب سدیم، روند افزایشی معناداری در بیشتر سری‌های زمانی بررسی شده داشته‌اند. مقدار سدیم از ۰/۶۵ در فصل کم‌آب ایستگاه چلاو تا ۱/۵۳ در فصل پرآب ایستگاه کره‌سنگ، مقدار CI از ۰/۰۹ در سال در فصل پرآب ایستگاه رزن تا ۰/۷۳ در سال در فصل کم‌آب ایستگاه کره‌سنگ و مقدار نسبت جذب سدیم (SAR) از ۰/۰۷ در فصل پرآب ایستگاه رزن تا ۰/۹۴ در فصل پرآب ایستگاه کره‌سنگ متغیرند. در آب‌های سطحی سدیم و کلرید ارتباط نزدیکی با هم دارند. منشأ این یون‌ها، انحلال رسوبات تبخیری، هوازدگی سنگ‌ها، انتقال از دریاها و اقیانوس‌ها (از طریق جریان‌های اتمسفری) و طیف وسیعی از فعالیت‌های انسانی است [۲۳]. افزایش سدیم و کلرید بر اثر فعالیت‌های انسانی به قدری گسترده و چشمگیر بوده است که غلظت این دو یون در بسیاری از رودخانه‌های جهان ۱۰ تا ۲۰ برابر شده است [۳۳]. به احتمال زیاد فعالیت‌های انسانی از جمله تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در افزایش این دو یون تأثیر اساسی داشته‌اند.

پیش‌پردازش‌های مورد نیاز مانند تصحیحات اتمسفری و رادیومتریک به‌منظور استخراج نقشه‌های کاربری اراضی الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده و روش بیشترین احتمال در محیط نرم‌افزار ENVI4.8 استفاده شدند. الگوریتم یادشده بر پایه انتخاب نمونه‌های تعلیمی توسط کاربر و بازدیدهای میدانی استوار است [۲۹]. به این منظور، آنالیز وابستگی باندها و همچنین حذف باندهای اضافه نیز انجام شد. در تحقیق حاضر به‌جز روش PCA، روش MNF نیز برای حذف وابستگی باندها و همچنین کشف باندها با محتوای اطلاعاتی کم استفاده می‌شوند [۳۰]. همچنین برای انتخاب بهترین ترکیب باندی برای طبقه‌بندی از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی با استفاده از ضریب کاپا^۱ و صحت کلی^۲ استفاده شد. به این صورت که ترکیب باندی که بیشترین ضرایب مد نظر را ارائه دهد به‌عنوان بهترین ترکیب باندی در نظر گرفته می‌شود.

ارزیابی نقشه‌های کاربری اراضی

تک‌پارامترهایی نظیر ضریب کاپا و صحت کلی فقط با کل طبقه‌بندی سر و کار دارند و اطلاعاتی دربارهٔ تک‌تک کلاس‌ها و یا توزیع مکانی خطا ارائه نمی‌دهند [۳۰]. بنابراین، برای برآورد دقت کلی و دقت تک‌تک کلاس‌ها از عوامل آماری ماتریس خطا یعنی دقت تولیدکننده^۳، دقت کاربر^۴، خطای گماشته‌شده^۵ و خطای حذف‌شده^۶ استفاده شد [۳۱].

تعیین بهترین ترکیب باندی

برای انتخاب بهترین ترکیب باندی از مقادیر ضریب کاپا و صحت کلی استفاده شد. نتایج نشان داد سنجنده TM با ترکیب باندی ۱، ۲ و ۴ (دارای ضریب کاپا و صحت کلی ۰/۷۸ و ۸۴/۷۷)، سنجنده ETM+ با ترکیب باندی ۴، PCA_۱ و MNF_۱ (دارای ضریب کاپا و صحت کلی ۰/۷۵ و ۸۲/۹۶) و سنجنده OLI با ترکیب باندی ۲، MNF_۱ و NDVI (دارای ضریب کاپا و صحت کلی ۰/۷۷ و ۸۱/۳۴) که به ترتیب در RGB قرار می‌گیرند، بیشترین ضرایب را ارائه می‌دهند، بنابراین به‌عنوان بهترین ترکیب باندی معرفی شدند.

1. Kappa coefficient
2. Overall Accuracy
3. Producers Accuracy
4. User Accuracy
5. Commission
6. Omission

سری‌های زمانی کاهشی است. البته درباره بی‌کربنات، هیچ روند معناداری مشاهده نشد. برای کلسیم به‌رغم کاهش در بیشتر سری‌های زمانی، فقط در فصل پرآب ایستگاه پنجاب (۰/۱۹ در سال) و فصل پرآب ایستگاه کره‌سنگ (۰/۳ در سال) روند کاهشی معنادار است. سختی کل (TH) نیز به‌رغم کاهش در بیشتر سری‌های زمانی، فقط در فصل کم‌آب ایستگاه پنجاب (۱۹/۳ در سال) و فصل کم‌آب ایستگاه چلاو (۶/۹۸ در سال) و فصل کم‌آب ایستگاه کره‌سنگ (۱۶/۸ در سال) روند کاهشی معنادار است. در بالادست حوضه جنس غالب سازند آهکی است، بنابراین میزان کلسیم و بی‌کربنات در آب رودخانه می‌تواند ناشی از فرایند انحلال آهکی باشد. با توجه به اینکه آنالیز روند بیان‌کننده افزایش دما در منطقه است و از طرف دیگر، انحلال آهک از طریق اسید کربنیک (CO₂) با دما رابطه معکوس دارد [۳۴]. در نتیجه یکی از دلایل روند کاهشی کلسیم و بی‌کربنات و سختی کل (TH) می‌تواند به دلیل افزایش دما باشد.

درباره هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول در آب، روند افزایشی معناداری در همه سری‌های زمانی مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های واقع در خروجی حوضه یعنی چلاو و کره‌سنگ، روند معنادار در سطح احتمال ۹۹ درصد است که شیب روند هدایت الکتریکی (EC) برای ایستگاه چلاو برای فصول پرآب و کم‌آب به ترتیب به مقدار ۶۲/۳ و ۶۴/۹ در سال و برای ایستگاه کره‌سنگ به مقدار ۸۵/۶ و ۹۷ در سال به ترتیب برای فصول پرآب و کم‌آب می‌رسد. شیب روند کل مواد محلول (TDS) برای ایستگاه چلاو برای فصول پرآب و کم‌آب به ترتیب به مقدار ۸۲/۱ و ۹۳/۴ در سال و برای ایستگاه کره‌سنگ به مقدار ۱۱۴/۵ و ۱۲۶/۹ در سال به ترتیب برای فصول پرآب و کم‌آب است. این دو متغیر برآیند مجموع یون‌های موجود در آب هستند. تغییرات افزایشی یا کاهشی آنیون‌ها و کاتیون‌ها در دوره زمانی بررسی شده با یکدیگر اثر تعدیلی داشته و در نهایت موجب روند افزایشی برای این دو متغیر شده است. برای کلسیم، بی‌کربنات و سختی کل، روند در بیشتر

جدول ۱. مقادیر آماره آزمون ناپارامتری من-کندال (Z) بر پارامترهای کیفی جریان رودخانه هراز

ایستگاه	دوره	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	TDS	EC	TH	SAR
پنجاب	پرآب	۱/۱	۱/۹	-۲/۲*	۲*	-۰/۴	۱/۹	-۱/۱	۰/۷	۱/۸	۲/۱*	-۱/۹	۲/۱*
	کم‌آب	۱/۱	۱/۴	-۱/۹	۲/۱*	۰/۶	۲/۲*	-۰/۵	-۰/۴	۱/۵	۲*	-۲/۱*	۲/۳*
رزن	پرآب	۲/۱*	-۰/۴	۱/۳	۱/۷	۰/۸	۲/۲*	۰/۶	۰/۴	۲/۴*	۲*	۱/۴	۱/۶
	کم‌آب	۱/۳	۰/۶	-۱/۴	۲/۳*	۰/۹	۱/۵	-۱/۲	۱/۶	۲/۳*	۲/۱*	-۱/۷	۲*
چلاو	پرآب	۲*	۱/۲	۰/۴	۲/۲*	-۰/۷	۱/۸	-۰/۳	-۰/۵	۲/۳*	۲*	۰/۷	۱/۹
	کم‌آب	-۰/۲	۱/۷	۰/۶	۲/۳*	۱/۸	۱/۸	۰/۴	-۰/۷	۲/۱**	۲/۶**	-۲/۱*	۲/۲*
کره‌سنگ	پرآب	۲/۳*	۰/۹	-۲/۱*	۲/۴*	۱/۴	۲/۲*	-۰/۹	۱/۲	۲/۶**	۲/۱**	-۱/۲	۲/۱*
	کم‌آب	۲/۴*	-۰/۴	-۰/۱	۲/۹**	۱/۱	۲/۴*	-۰/۵	۱/۴	۳/۲**	۳**	-۲*	۲/۶**

* معناداری را در سطح احتمال ۵٪ و ** معناداری را در سطح احتمال ۱٪ نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقادیر شیب خط روند یا آماره β بر پارامترهای کیفی (بر حسب واحد متغیر در سال) جریان رودخانه هراز

ایستگاه	دوره	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	TDS	EC	TH	SAR
پنجاب	پرآب	۰/۰۱	۰/۱۲	-۰/۱۹	۱/۲	-۰/۰۳	۰/۳۶	-۰/۲۴	۰/۰۸	۶۲/۸	۴۲/۵	-۲۵/۳	۰/۸۲
	کم‌آب	۰/۰۲	۰/۱۹	-۰/۲۳	۰/۹	۰/۰۳۶	۰/۴۹	-۰/۱۲	-۰/۰۶	۵۳/۶	۳۷/۳	-۱۹/۳	۰/۶۹
رزن	پرآب	۰/۰۱	۰	۰/۱	۰/۸	۰/۲۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۲	۴۶/۴	۳۵/۳	۱۵/۲	۰/۰۷
	کم‌آب	۰	۰	-۰/۰۸	۱/۱۲	۰/۳۵	۰/۱۵	-۰/۱	۰/۰۱	۷۶/۸	۵۷/۲	-۲۰/۳	۰/۱۳
چلاو	پرآب	۰	۰/۲	۰/۰۸	۰/۷۵	-۰/۰۹	۰/۲۹	-۰/۱۴	-۰/۰۴	۸۲/۱	۶۲/۳	۹/۸۴	۰/۴۳
	کم‌آب	-۰/۰۱	۰/۳۴	۰/۰۶	۰/۶۵	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۲۲	-۰/۰۱	۹۳/۴	۶۴/۹	-۶/۹۸	۰/۵۱
کره‌سنگ	پرآب	۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۲۲	۱/۵۳	۰/۶	۰/۴۷	-۰/۱۵	۰/۰۱	۱۱۴/۵	۸۵/۶	-۲۶/۴	۰/۹۴
	کم‌آب	۰/۰۱	-۰/۰۳	-۰/۳	۱/۳۶	۰/۳۲	۰/۷۳	-۰/۳۱	۰/۰۳	۱۲۶/۹	۹۷	-۱۶/۸	۰/۸۲

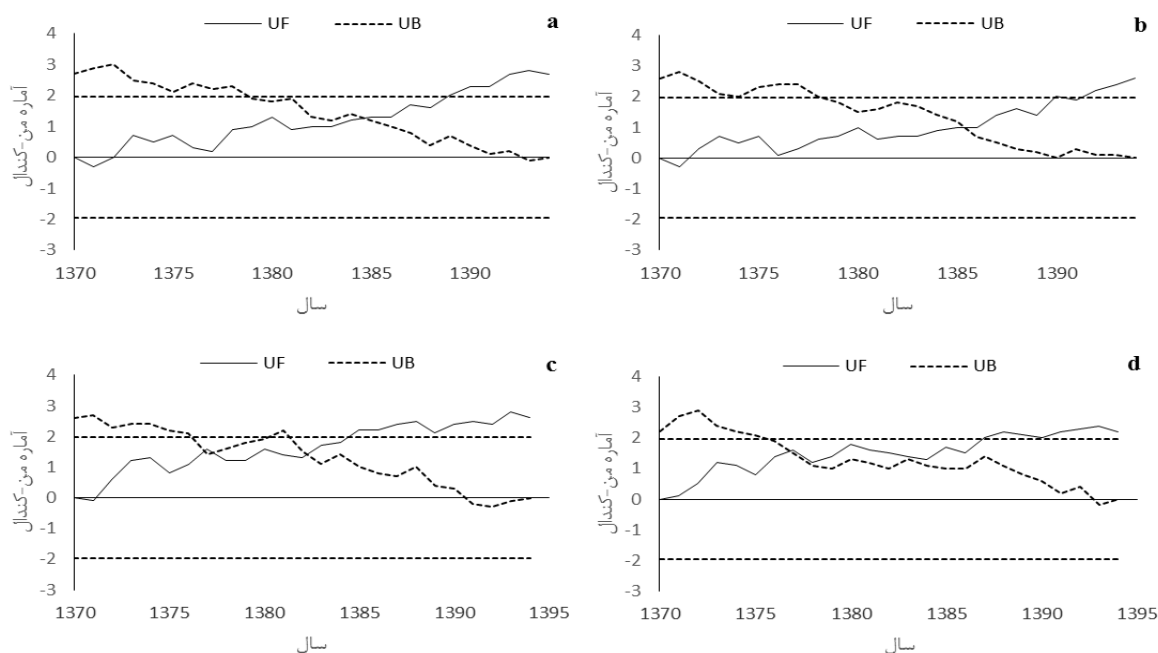
معمولاً از نیمه دهه ۸۰ به بعد تغییرات شدیدتر و معناداری را تجربه کرده‌اند.

بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی در تغییرات کیفیت آب

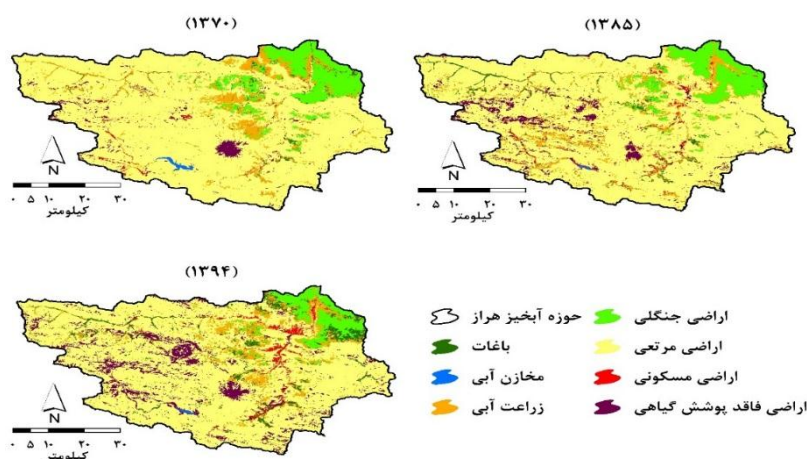
با توجه به اینکه شرایط زمین‌شناسی و خاک‌شناسی طی چند دهه ثابت نسبی دارند، دو عامل اصلی یعنی عوامل اقلیمی و عوامل انسانی، خصوصیات شیمیایی آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۹]. برای تعیین تأثیرات تغییر کاربری اراضی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل انسانی بر پارامترهای کیفیت آب، روند تغییرات کاربری اراضی در حوضه بررسی شد. در حال حاضر حوضه آبخیز هراز یکی از حوضه‌های بحرانی استان مازندران از نظر تغییر کاربری اراضی و توسعه صنایع و معادن به‌شمار می‌رود. برای بررسی روند تغییرات کاربری اراضی رخ داده در حوضه آبخیز هراز از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۴ استفاده شد. به این ترتیب نقشه‌های پوشش اراضی در این سال‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. مساحت انواع کاربری‌ها نیز طی سال‌های مطالعه‌شده با استفاده از آشکارسازی تغییرات در محیط نرم‌افزار ARC GIS 9.3 به‌دست آمد که در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

تعیین نقطه تغییر ناگهانی پارامترهای کیفی آب

همان‌طور که گفته شد، بیشتر پارامترهای کیفی آب در هر دو دوره خشک و مرطوب، روند صعودی معنادار دارند که این امر کاهش قابل توجه کیفیت آب را نشان می‌دهد. در این بخش و در شکل ۲، تعیین نقاط تغییر ناگهانی دو پارامتر هدایت الکتریکی و کل مواد محلول در ایستگاه کره‌سنگ نشان داده شده است که بیشترین افزایش روند را در بین پارامترهای کیفی آب دارند و آنالیز سایر پارامتر در اینجا به دلیل حجم زیاد اشکال نشان داده نشده است. نتایج تعیین نقطه تغییر ناگهانی برای پارامتر هدایت الکتریکی نشان داد سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ به ترتیب برای فصول کم‌آب و پرآب به‌عنوان سال‌هایی تعیین شدند که این پارامترها در آن تغییر ناگهانی داشتند و از سال‌های ۱۳۸۹ به بعد برای این پارامتر در فصل کم‌آب و ۱۳۹۰ به بعد برای فصل پرآب روند معنادار می‌شود. همچنین برای پارامتر کل مواد محلول، سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۳ برای فصل کم‌آب و سال ۱۳۷۷ برای فصل پرآب به‌عنوان سال‌های تغییر ناگهانی این پارامتر کیفی آب تعیین شدند. از سال ۱۳۸۵ به بعد برای فصل کم‌آب و سال ۱۳۸۷ به بعد برای فصل پرآب شاهد روند معنادار هستیم. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که پارامترهای بررسی‌شده



شکل ۲. تعیین نقطه تغییر ناگهانی پارامتر هدایت الکتریکی (EC) در ایستگاه کره سنگ طی فصل کم‌آب (a) و فصل پرآب (b) و تعیین نقطه تغییر ناگهانی پارامتر کل مواد محلول (TDS) در ایستگاه یادشده طی فصل کم‌آب (c) و فصل پرآب (d)



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه شده

(الف) مربوط به سال ۱۳۷۰ (سنجده TM)؛ (ب) مربوط به سال ۱۳۸۵ (سنجده ETM+) و (پ) مربوط به سال ۱۳۹۴ (سنجده OLI)

جدول ۳. مساحت انواع کاربری‌های اراضی مربوط به سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۴

نوع کاربری	سال ۱۳۷۰		سال ۱۳۸۵		سال ۱۳۹۴	
	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع
باغ‌ها	۰/۷۲۱	۳۹/۸۸۵	۱/۰۹۲	۵۴/۷۸۴	۲/۹۲۲	۱۲۸/۲۴۹
مخازن آبی	۰/۱۲۵	۱۰/۴۴۱	۰/۰۵۲	۳/۷۷۵	۰/۰۲۸	۳/۰۴۸
زراعت آبی	۴/۱۱۶	۱۷۰/۷۲۰	۳/۰۸۹	۱۲۹/۴۷۱	۳/۴۷۹	۱۴۵/۱۳۶
اراضی جنگلی	۱۰/۴۷۶	۴۱۳/۳۵۷	۸/۹۰۲	۳۵۱/۸۶۵	۶/۲۳۴	۲۴۴/۷۸۹
اراضی مرتعی	۸۱/۱۰۰	۳۲۴۹/۹۸۱	۸۰/۴۴۰	۳۲۲۳/۴۶۹	۷۶/۰۰۷	۳۰۴۵/۵۲۷
اراضی مسکونی	۱/۰۲۴	۳۵/۵۷۵	۱/۸۱۹	۶۷/۵۰۱	۲/۳۱۱	۸۷/۲۲۶
اراضی بدون پوشش گیاهی	۲/۴۸۰	۹۴/۱۱۶	۴/۷۰۰	۱۸۳/۲۱۰	۹/۱۰۷	۳۶۰/۱۰۰
جمع کل	۱۰۰	۴۰۱۴/۰۷۵	۱۰۰	۴۰۱۴/۰۷۵	۱۰۰	۴۰۱۴/۰۷۵

زراعت آبی تغییر قابل توجهی نداشته است. همان طور که ملاحظه می‌شود، کاربری باغ‌ها در سال ۱۳۹۴ نسبت به سال ۱۳۷۰ افزایش تقریباً ۲ درصدی داشته است. اراضی جنگلی طی دوره مطالعه شده، روند کاهشی داشته است که این تغییر در سال ۱۳۹۴ نسبت به ۱۳۷۰ تقریباً ۴ درصد است. در مقابل، اراضی بدون پوشش گیاهی، در بین انواع کاربری‌ها با افزایش تقریباً ۶/۵ درصدی بیشترین تغییر را در بین انواع کاربری‌ها داشته است.

تغییرات به دست آمده در کاربری‌های اراضی، می‌تواند با ازدست رفتن حاصل خیزی خاک رها شده بر اثر نیروهای فرسایشی و انتقال خاک و بقایای مواد شیمیایی (کودها و سموم) به آبراهه‌ها همراه باشد که در نتیجه سبب تأثیرات منفی شدید بر کیفیت آب می‌شوند. این نتایج با نتایج

با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که بیشترین مساحت کاربری اراضی در هر سه دوره مربوط به اراضی مرتعی است که وسعت آن یک روند کاهشی داشته است، به طوری که در سال ۱۳۷۰، ۸۱/۱۰۰ درصد، در سال ۱۳۸۵، ۸۰/۴۴۰ درصد و در سال ۱۳۹۴، ۷۶/۰۰۷ درصد از مساحت کل حوضه را تشکیل می‌دهد. همچنین کمترین مساحت کاربری اراضی در هر سه دوره مربوط به مخازن آبی است که وسعت آن یک روند کاهشی داشته است به طوری که در سال ۱۳۷۰، ۰/۱۲۵ درصد، در سال ۱۳۸۵، ۰/۰۵۲ درصد و در سال ۱۳۹۴، ۰/۰۲۸ درصد از مساحت کل است. اراضی کشاورزی به رغم کاهش تقریباً یک درصدی در سال ۱۳۸۵ نسبت به سال ۱۳۷۰، دوباره در سال ۱۳۹۴ به مقدار کمتر از ۰/۵ درصد افزایش پیدا کرده است و به طور کلی کاربری

رودخانه است که کاهش کیفیت منابع آب سطحی را در پی داشته است و با نتایج مطالعات یادشده مطابقت دارد.

آنالیز رابطه پارامترهای اقلیمی و پارامترهای کیفی آب
به منظور تعیین ارتباط بین تغییرات پارامترهای کیفی آب در رودخانه هراز و پارامترهای اقلیمی، از آزمون ناپارامتری کندال (τ Kendall) استفاده و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شد. همان طور که مشاهده می شود، بین تغییرات پارامترهای اقلیمی و پارامترهای کیفی آب، در بیشتر سری های زمانی همبستگی معنادار وجود دارد. این ارتباط درباره برخی پارامترها مانند کلر، مواد محلول کل، هدایت الکتریکی، سختی کل، نسبت جذب سدیم، منیزیم و کلسیم بسیار قابل توجه است و در برخی از آنها این ارتباط در سطح احتمال ۹۹ درصد معنادار است. همچنین همبستگی بین این پارامترها در دوره کم آب بارزتر است. این امر در زمینه پارامتر دما مشهودتر است. دلیل آن را این گونه می توان توضیح داد که با افزایش دما طی دوره و متعاقب آن افزایش تبخیر و کم شدن حجم آب رودخانه، غلظت پارامترهای کیفی آب افزایش می یابد و بنابراین همبستگی بیشتری را به وجود می آورد. اما اثر بارندگی بر پارامترهای کیفی آب، متفاوت است و به دو شکل می تواند بر مقادیر پارامترهای کیفی آب تأثیر گذار باشد؛ به طوری که از یک طرف، با کاهش بارندگی طی دوره، حجم آب رودخانه نیز کاهش و در نتیجه غلظت املاح موجود در آب افزایش می یابد که این امر همبستگی منفی معناداری را به وجود آورده است. از طرف دیگر، اگرچه بارندگی طی دوره کاهش یافته است، از آنجا که سطح کاربری های نظیر مرتع و جنگل کاهش و اراضی مسکونی، بایر و باغ ها افزایش یافته اند، این امر به آب شویی شدیدتر این املاح منجر می شود و با شسته شدن زمین های کشاورزی و اراضی فاقد پوشش گیاهی و تولید رسوبات بیشتر، غلظت املاح جریان رودخانه هراز افزایش یافته است. این نتایج با نتایج پژوهش وفاخواه و صادقی [۶]، زارع و سعادت [۳۷] مطابقت دارد که نشان داده اند با کاهش حجم دبی رودخانه، غلظت مواد محلول در آن افزایش یافته اند. همچنین، با نتایج مطالعه سلاجقه و همکارانش [۱۰] و زارع گاریزی و همکارانش [۱۰] مطابقت دارد که کاهش کیفیت آب رودخانه را ناشی از عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، فرسایش خاک و ورود زائدات به رودخانه دانستند.

مطالعات هات و همکارانش [۳۵]، والش و نیوال [۳۶] و سلاجقه و همکارانش [۱۰] مطابقت دارد که نشان دادند تغییرات کاربری اراضی به خصوص افزایش مناطق مسکونی و زمین های بایر و بدون پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی در افزایش شوری و کاهش کیفیت آب می گذارد. با توجه به نتایج تغییر ناگهانی برخی پارامترهای کیفی آب و همچنین نتایج تغییر کاربری اراضی، می توان گفت که تغییرات کاربری اراضی به عنوان یکی از فاکتورهای مهم فعالیت های انسانی، در دوره ۱۳۸۵-۱۳۹۴ شدیدتر از دوره ۱۳۷۰-۱۳۸۵ است که تقریباً با زمان تغییرات ناگهانی پارامترهای کیفی هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد محلول (TDS) مطابقت دارد و این امر نشان می دهد تغییر کاربری اراضی به همراه تغییرپذیری اقلیم، در کاهش کیفیت آب تأثیر مهمی داشته است.

آنالیز روند پارامترهای هیدرواقلیمی

خصوصیات شیمیایی آب به صورت مستقیم و غیرمستقیم از فرایندهای طبیعی و فعالیت های انسانی (مانند صنعت، کشاورزی و توسعه شهری) تأثیر می پذیرد، ولی به علت تعدد عوامل مؤثر بر کیفیت آب، مدل سازی دقیق این تأثیرات پیچیده و دشوار است [۹]. در این پژوهش، به دلیل دسترسی نداشتن به سری های زمانی مربوط به متغیرهای جمعیتی، اقتصادی و اطلاعات مربوط به آلودگی ها و مواد زائد تولید شده در حوضه آبخیز هراز، بررسی جامع علل تنزل کیفیت آب رودخانه در قالب روابط رگرسیونی میسر نشد؛ ولی به منظور شناسایی برخی علل احتمالی، تغییرات بلندمدت دمای متوسط، بارندگی، تبخیر، دبی در بازه زمانی تحقیق بررسی شد و نتایج آن در جدول ۴ مشاهده می شود. همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، افزایش دما و تبخیر و همچنین کاهش بارندگی و رواناب را می توان یکی از دلایل اصلی کاهش کیفیت منابع آب مشاهده شده به شمار آورد. به طور مثال، همان طور که اشاره شد، افزایش دما می تواند سبب کاهش برخی پارامترهای کیفیت آب از جمله کلسیم، بی کربنات و سختی کل (TH) شده باشد. از طرف دیگر، افزایش دما و تبخیر و همچنین کاهش بارندگی و رواناب، سبب کاهش غلظت املاح محلول مؤثر در کیفیت آب می شود [۶] و [۳۷]. نتایج در اینجا نیز بیان کننده افزایش غلظت املاح محلول آب در نتیجه تغییرات اقلیم و مقادیر جریان

جدول ۴. نتایج آنالیز روند پارامترهای هیدرواقليمی در حوضه آبخیز هراز با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال

پارامتر	آماره من-کندال (Z)	شیب روند (Sen Slope)	معنی داری (p-value)
دمای متوسط (درجه سانتی‌گراد)	۱/۴۷	۰/۰۴	۰/۰۸۶
بارندگی (میلی‌متر)	-۱/۹۸*	-۵/۱۶	۰/۰۵
تبخیر (میلی‌متر)	۱/۸۱	۷/۳۲	۰/۰۵۸
رواناب (میلی‌متر)	-۲/۳۶*	-۳/۸۹	۰/۰۳۱

* معناداری را در سطح احتمال ۵٪ نشان می‌دهد.

جدول ۵. نتایج آنالیز همبستگی میان پارامترهای اقلیمی و پارامترهای کیفی آب با استفاده از آزمون ناپارامتری کندال (Kendall τ)

متغیر اقلیمی	دوره	همبستگی	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	TDS	EC	TH	SAR
دما	پرآب	R	۰/۳۸	-۰/۵۳	-۰/۵۸	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۷۱	-۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۶۲	-۰/۷۰	۰/۴۰
	کم‌آب	p-value	۰/۲	۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۲۱	۱/۱	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۲۸	۰/۰۲	۰/۱۳
بارندگی	پرآب	R	۰/۳۷	-۰/۵۷	-۰/۵۸	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۷۴	-۰/۳۷	۰/۶۰	۰/۶۴	۰/۳۹	-۰/۴۸	۰/۶۵
	کم‌آب	p-value	۰/۲	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۱۹	-۰/۶۱	۰/۰۳۲
بارندگی	پرآب	R	۰/۲۹	-۰/۵۵	-۰/۵۹	-۰/۳۰	۰/۴۸	-۰/۷۲	-۰/۳۲	۰/۶۱	-۰/۶۴	-۰/۷۰	-۰/۶۲	۰/۳۷
	کم‌آب	p-value	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۴	۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۳۶	۰/۱۹
بارندگی	پرآب	R	۰/۶۲	-۰/۵۸	-۰/۶۰	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۶۹	-۰/۴۰	-۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۶۴	-۰/۶۰	-۰/۶۹
	کم‌آب	p-value	۰/۰۳۵	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶	۰/۰۹	۰/۰۲۲	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۰۳۹	۰/۰۲۱	۰/۰۳۷	۰/۰۲۱

اعداد پررنگ‌شده، معناداری را در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آنالیز روند پارامترهای مهم کیفیت آب در حوضه آبخیز هراز و همچنین عوامل مؤثر بر کیفیت آب از طریق بررسی روند متغیرهای اقلیمی، جریان رودخانه و روند تغییر کاربری اراضی طی دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۴ انجام شد. به‌طور کلی نتیجه‌گیری‌های زیر به‌دست آمد:

با توجه به نتایج آزمون من-کندال، کاهش شدید کیفیت آب در منطقه مشاهده شد؛ به‌طوری که بیشتر این پارامترها به‌طور معناداری تغییر داشتند. به‌طور مثال، پارامترهایی مانند کل مواد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سدیم و کلر به‌طور چشمگیری افزایش یافته‌اند و از طرف دیگر، پارامترهایی نظیر کلسیم و سختی کل (TH) کاهش یافته‌اند. این تغییرات کاهش شدید کیفیت منابع آب را نشان می‌دهد. آنالیز روند متغیرهای هیدرواقليمی، افزایش دما و تبخیر و کاهش معنادار بارندگی و جریان رودخانه را نشان می‌دهد. این تغییرات بیان می‌کنند که عوامل محیطی در کاهش کیفیت آب می‌توانند تأثیر مهمی داشته باشند به‌طوری که

افزایش دما می‌تواند دلیل کاهش پارامترهایی نظیر Ca²⁺ و TH و کاهش بارندگی و رواناب می‌تواند دلیل افزایش غلظت پارامترهایی نظیر هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد محلول (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR) ... و روند افزایشی معنادار آنها باشد. برای تعیین آثار تغییرات کاربری اراضی بر پارامترهای کیفیت آب، تغییر کاربری اراضی طی سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۴ مطالعه شد. روند تغییرات کاربری اراضی به‌طور کلی بیان‌کننده کاهش سطح اراضی مرتعی و جنگلی و افزایش سطح اراضی مسکونی و اراضی بدون پوشش گیاهی است. این تغییرات می‌تواند سبب افزایش فرسایش و تولید رسوب و انتقال بقایای مواد شیمیایی (کودها و سموم) به آبراه‌ها و کاهش کیفیت منابع آب شود. آنالیز همبستگی بین متغیرهای دما و بارندگی با پارامترهای کیفی آب با استفاده از آزمون کندال (Kendall τ)، نشان داد به‌طور کلی تغییرپذیری اقلیم بر کیفیت آب رودخانه هراز تأثیرگذار بوده است به‌طوری که افزایش دما به افزایش تبخیر و کاهش حجم جریان رودخانه منجر شده است و این امر می‌تواند افزایش غلظت پارامترهای کیفی آب

منابع

- را در پی داشته باشد. همچنین کاهش بارندگی می‌تواند به افزایش غلظت پارامترهای کیفی آب منجر شود و از طرف دیگر، با تغییر برخی از انواع کاربری‌ها به‌خصوص افزایش زمین‌های بدون پوشش گیاهی و اراضی مسکونی، آب‌شویی بیشتری صورت می‌گیرد که این امر می‌تواند به افزایش غلظت پارامترهای کیفی آب منجر شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو عامل تغییرپذیری اقلیم و تغییر کاربری اراضی می‌توانند در افزایش پارامترهای کیفی و در نتیجه کاهش کیفیت آب رودخانه هراز مؤثر باشند. بنابراین، با توجه به شرایط مشاهده‌شده، اگر در آینده اقداماتی برای کنترل عوامل آلاینده (به‌خصوص پساب‌های کشاورزی و مناطق مسکونی و همچنین انتقال بقایای مواد شیمیایی ناشی از فرسایش و تولید رسوب) صورت نگیرد، با ادامه روند یادشده، سلامت اکوسیستم رودخانه هراز و متعاقب آن زندگی جوامع بهره‌بردار با مشکل مواجه خواهد شد و در نهایت مسائل اقتصادی و اجتماعی مختلفی را به وجود خواهد آورد. بنابراین به موازات پایش کیفی منابع آب، انجام اقدامات حفاظت کیفی و کنترل عوامل آلاینده ضرورت دارد. با توجه به شرایط منطقه مطالعه‌شده، راهکارهای زیر برای بهبود شرایط کیفیت آب پیشنهاد می‌شود: ۱. از تخریب جنگل‌ها و تبدیل آنها به زمین‌های کشاورزی و رهاسازی بدون پوشش گیاهی به‌خصوص در حاشیه آبراهه‌ها و رودخانه‌ها جلوگیری شود؛ ۲. از ورود فاضلاب‌های مناطق مسکونی و سایر آلاینده‌های انسانی به رودخانه جلوگیری شود؛ ۳. در منطقه مطالعه‌شده وجود معادن گسترده و بهره‌برداری وسیع از آنها، می‌تواند در کاهش کیفیت منابع آب تأثیر چشمگیری داشته باشد، بنابراین در این خصوص نیز باید مطالعات لازم انجام شود تا مدیریت جامع و بهتری برای بهره‌برداری از این معادن صورت گیرد. همچنین با توجه به مشخص شدن تأثیر توأم عوامل اقلیمی و تغییر کاربری اراضی بر کاهش کیفیت آب، پیشنهاد می‌شود که برای تعیین کارکرد عوامل مؤثر در تغییرات کیفیت آب، آنالیز کمی سهم عوامل مؤثر در تغییرات کیفیت آب مانند فعالیت‌های انسانی و تغییرپذیری اقلیم به عنوان دو عامل اصلی مؤثر در این تغییرات با استفاده از روش‌های آماری و گرافیکی انجام شود تا شناخت بهتری از چگونگی تغییرات کیفیت آب برای مدیریت و تصمیم‌گیری بهتر مدیران به‌منظور بهبود کیفیت منابع آب صورت گیرد.
- [1]. Yousefi H, Mohamadi A, Nourollahi Y, Sadatinejad SJ. Evaluation of surface water resources quality in Hiou Basin, Iranian Journal of Ecohydrology, 2016; 3 (2): 141-149. [Persian]
 - [2]. Kauffman GJ, Belden AC. Water quality trends (1970 to 2005) along Delaware streams in the Delaware and Chesapeake Bay watersheds, USA. Water Air Soil Pollut, 2010; 208: 345-375.
 - [3]. Ramazani Moghadam J, Moazed H, Hamzeh S, Khoubyari A, Vatanara M. Detection of a regression model between the Total Dissolved Salts (TDS) and Karun River discharge for different time series. The eight international conference in river engineering. Chamran Shahid University, 2009. [Persian]
 - [4]. Ye L, Li DF, Tang T, Chu XD, Cai QH. Spatial distribution of water quality in Xiangxi River, China. Chinese J. Appl. Ecolo. 2003; 14: 1959-1962.
 - [5]. Moradi H, Taghavi N, Bahramifar N. Effect of different land use on surface water quality (Case study: Siahrood Ghaemshahr Watershed). Environmental Erosion Research Journal. 2011; 4: 24-32. [Persian]
 - [6]. Vafakhah M, Sadeghi SH. Relationship between water quality chemical parameters and discharge in Haraz River. The fifth national conference on watershed management (Sustainable Management of Natural Disasters). 2009; 1-9. [Persian]
 - [7]. Asghari Moghadam A, Adi Gouzalpour A. Investigation of the concentration of aluminum, iron, manganese, chromium and cadmium in groundwater of Oshnavieh Plain. Iranian Journal of Ecohydrology. 2016; 3 (2): 167-179. [Persian]
 - [8]. Norouzi H, Nadiri A, Asghari Moghadam A. Investigation of groundwater contamination in Malekan Plain due to Arsenic, Iranian Journal of Ecohydrology, 2016; 3 (2): 151-166. [Persian]
 - [9]. Zare Garizi A, Sadodin A, Vahed Bordi Sh, Salman Mahini A. Investigation of the trend of long-term changes in river water quality variables in Chehel Chay River (Golestan Province), Iranian Water Research Journal (IWRJ), 2012; 6 (10): 155-165. [Persian]
 - [10]. Salajagheh A, Razavizadeh S, Khorasani N, Hamidifar M, Salajagheh S. Land use changes and its effects on river water quality (Case study: Karkheh Basin). Journal of Environmental Studies. 2011; 58: 81-86. [Persian]
 - [11]. Boyacioglu H. Investigation of temporal trends in hydrochemical quality of surface water in western Turkey. Bull. Environ. Contam. 2008; 80: 469-474.

- [12]. Ketata M, Hamzaoui F, Gueddari M, Bouhila R, Riberio L. Hydrochemical and statistical study of groundwater in Gabes-South deep aquifer (South-eastern Tunisia). *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010; 36: 187-196.
- [13]. Patil PN, Sawant DV, Deshmukh RN. Physico-chemical parameters for testing of water, A review. *International Journal of Environmental Sciences*. 2012; 3 (3): 1194-1207.
- [14]. Meybeck M. Global analysis of river systems: from earth system controls to anthropocene syndromes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 2003; 358: 1935-1955.
- [15]. Khadam IM, Kaluarachchi JJ. Water quality modeling under hydrologic variability and parameter uncertainty using erosion-scaled export coefficients. *Journal of Hydrology*, 2006; 330: 354-367.
- [16]. Joukar Sarhangi A. Geomorphology on the Haraz River basin. Msc Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran. 1993; p 242. [Persian]
- [17]. Khaliq MN, Ouarda TBM J, Gachon P, Sushama L, St-Hilaire A. Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 2009; 368: 117-130.
- [18]. Durbin J, Watson GS. Testing for serial correlation in least squares regression. III. *Biometrika*, 1971; 58: 1-19.
- [19]. Yue S, Wang CY. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 2002; 38 (6): 1068.
- [20]. Chen Y, Xu Ch, Hao X, Li W, Chen Y, Zhu Ch, Ye Zh. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin, China. *Quaternary International*, 2009; 208: 53-61.
- [21]. Kendall MG. Rank Correlation Measures. London: Charles Griffin. 1975.
- [22]. Mann HB. Non-parametric tests against trend, *Econometric*, 1945; 13: 245-259.
- [23]. Yang Y, Chen Y, Li W, Wang M, Sun G. Impact of Climate Change on River Runoff in Northern Xinjiang of China over Last Fifty Years, *Chinese Geographical Science*, 2010; 20 (3): 193-201.
- [24]. Sabziparvar A, Mirmasoudi S Sh, Nazemosadat MJ. Investigation of evapotranspiration long term changes in few country warm climatic instances, *Natural Geography Researches*. 2011; 75: 1-17. [Persian]
- [25]. Yu PS, Yang TC, Wu CK. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. *Journal of Hydrology*, 2002; 260 (1): 161-175.
- [26]. Xu C, Li J, Gao S, Chen Y. Climate variations in northern Xinjiang of China over the past 50 years under global warming. *Quaternary International*, 2015; 358: 83-92.
- [27]. Kendall MG. A new measure of rank correlation. *Biometrika*. 1938; 30: 81-93.
- [28]. Chen H, Guo S, Xu C, Singh V P. Historical temporal trends of hydroclimatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. *Journal of Hydrology*. 2007; 344: 171-184.
- [29]. Darabi H, Shahedi K, Solaimani K, Miryaghoubzadeh M. Prioritization of subwatersheds based on flooding conditions using hydrological model, multivariate analysis and remote sensing technique. *Water and Environment Journal*, 2014; 28 (3): 382-392
- [30]. Fatemi, SB, Rezaei Y. Principle of Remote Sensing. Azadeh Press, 2010; pp 257. [Persian]
- [31]. Li X, Yeh A. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002; 16 (4): 323-343.
- [32]. Hem JD. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, third ed. U.S. Geol. Surv, 1985; 2254: 263pp.
- [33]. Global Environment Monitoring System-GEMS. Salts and salinization of surface waters. <http://www.gemswater.org/atlasgwq/salts.html>, 2007.
- [34]. Langmuir D. Aqueous Environmental Geochemistry, Prentice-Hall Inc, 1997; 600 pp.
- [35]. Hatt BE, Fletcher TD, Walsh CJ, Taylor SL. The influence of urban density and drainage infrastructure on the concentrations and loads of pollutants in small streams. *Environmental Management*. 2004; 34: 112-124.
- [36]. Newall P, Walsh CJ. Response of epileptic diatom assemblages to urbanization influences. *Hydrobiologia*. 2005; 532: 53-67.
- [37]. Zare N, Saadati N. Drought effects on water resources of Karoon and Dez rivers in Khoozestan province. The first national conference on investigation of strategies to meet with water-scarce and drought, Academic Center for Education, Culture and Research in Kerman province. 2000. [Persian]