

مطالعه برخی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد در یک دوره آماری ۲۰ ساله

نوید راد بروجنی^۱، سید حسن طباطبائی^۲، مهدی رادفر^۳، رسول میرعباسی نجف آبادی^{۴*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

* نویسنده مسئول: mirabbasi@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

چکیده

آب‌های زیرزمینی منابع با ارزشی برای تامین آب مورد نیاز مصارف مختلف در اکثر مناطق به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور ایران می‌باشد و نظارت بر کیفیت آب زیرزمینی بطور مستمر ضروری است. در این مطالعه، تغییرات زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت شهرکرد در دوره ۲۰ ساله اخیر بررسی شد، بدین منظور از متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در ۱۱ حلقه چاه در دشت شهرکرد طی دوره آماری ۱۳۸۰-۱۴۰۰ استفاده شد. روند تغییرات با استفاده از آزمون ناپارامتری Mann-Kendall اصلاح شده و با حذف ساختار کامل خودهمبستگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در مناطق غربی و مرکزی دشت شهرکرد طی سال‌های اخیر با کاهش جزئی همراه بوده و اکثر متغیرها روند معنی‌داری نداشتند، در مناطق شرقی و جنوبی دشت متغیرهای Na و SAR دارای روند کاهشی معنی‌دار بوده‌اند. همچنین در مناطق شمالی و جنوبی دشت متغیر TH دارای روند کاهشی معنی‌دار بوده است. با این حال، روند این متغیر در چاه عبدالله در مرکز دشت در سطح معنی‌داری ۵ درصد افزایشی بوده است که با توجه به تغذیه دشت با فاضلاب شهری در این محل مرتبط می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشانگر اهمیت پایش درازمدت کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مرکزی دشت شهرکرد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، آزمون ناپارامتری، سری زمانی، روند، تخمین گر شیب Sen.

مقدمه

طبیعی کشور یک چالش جدی محسوب می‌شود (Dorgham, 2004).

شناخت و تحلیل روند در داده‌های هیدرولوژیکی مشاهده شده یکی از ملزومات توسعه سیاست‌های آبی مناسب است (پناهی و همکاران، ۱۳۹۶). بدین منظور محققین روش‌های مختلف پارامتری و ناپارامتری را جهت بررسی روند ارائه دادند (Hamed and Rao, 1998). در روش‌های پارامتری لازم است که داده‌ها مستقل بوده و از توزیع نرمال پیروی کنند. در صورتی که در روش‌های ناپارامتری پیروی داده‌ها از توزیع نرمال الزامی نیست و این دسته از آزمون‌ها به داده‌های پرت و مفقود حساسیت کمتری دارند (Hamed, 2007). نقطه اشتراک آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری، الزام به مستقل بودن داده‌ها

امروزه بیشتر نیاز آبی مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به دلیل عدم وجود آب‌های سطحی پایدار و کافی، از منابع آب زیرزمینی و اغلب از طریق چاه‌های حفر شده تامین می‌گردد (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۱). کیفیت آب زیرزمینی یکی از جنبه‌های هیدروژئوشیمیایی می‌باشد که درباره توصیف شیمیایی آب، توزیع مکانی آن‌ها و قابلیت مصرف آب برای اهداف مختلف، مانند مصارف شرب، کشاورزی و صنعت بحث می‌نماید (Alley, 1993). در چند دهه اخیر، وقوع خشکسالی‌های شدید و برداشت بیش از حد، نه تنها بر کمیت و میزان منابع آب زیرزمینی تأثیر گذاشته، بلکه بر کیفیت شیمیایی آن نیز مؤثر بوده است که بدون شک برای منابع

بررسی، روند معنی‌دار افزایشی داشته است و تعداد سری‌های با روند معنی‌دار مثبت، بیشتر از تعداد سری‌های با روند معنی‌دار منفی بوده است. شعبانی (۱۴۰۰) در بررسی تغییرات کیفی آبهای زیرزمینی دشت ارسنجان به این نتیجه رسید که بیش از ۷۵ درصد آب‌های زیرزمینی این دشت از نظر درجه ایجاد مشکل در استفاده برای کشاورزی دارای مشکل کم تا متوسط هستند. نصیری و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی روند تغییرات متغیرهای کمی و کیفی چاه‌های مشاهده‌ای در دشت نکا ساری را در دوره آماری ۲۴ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۴) مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آزمون‌های ناپارامتری Mann-Kendall و تخمین‌گر شیب سن در دو سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای بررسی شده در این مطالعه در بخش کیفی شامل یون‌های Ca، Mg، K، Na و Cl و در بخش کمی تغییرات تراز آب زیرزمینی بود. نتایج روند تراز آب زیرزمینی در ۱۶ چاه مشاهده‌ای بیانگر روند افزایشی در ۵ چاه مشاهده‌ای، روند کاهشی در ۲ چاه مشاهده‌ای و عدم روند معنی‌دار در ۹ چاه مشاهده‌ای بود. تحلیل روند کیفی برای ۱۹ چاه مشاهده‌ای نشان داد که به جز متغیر Ca که دارای روند معنی‌دار افزایشی بود، سایر متغیرهای کیفی از روند کاهشی یا عدم وجود روند معنی‌دار تبعیت کردند.

Hashim et al. (2021) روند ۶ شاخص کیفی آب بالادست حوضه برنامه مالزی را با استفاده از آزمون Mann-Kendall و تخمین‌گر شیب Sen تحلیل کردند. نتایج نشان داد که متغیرهای DO، BOD، NH₃-N و pH دارای روند افزایشی و متغیرهای COD و TSS دارای روند منفی بوده‌اند. ایشان بیان داشتند که روند افزایشی برعکس روند کاهشی، نشان از بهبود متغیرهای کیفی آب دارد. Wang and Wan (2023) تغییرات کیفیت آب آشامیدنی مخزن شانکسی چین را با آزمون Mann-Kendall بررسی کردند. نتایج نشان داد هرچند هنوز کیفیت آب از لحاظ مصارف شرب عالی است، ولی شاخص‌های آلودگی روند افزایشی را نشان داد.

مدیریت پایدار منابع آب از جمله چالش‌های اساسی در عصر حاضر می‌باشد که نیاز به مطالعات جامع و دقیق کیفیت آب دارد (جعفری و طویلی، ۱۳۹۹؛ جبرائیلی اندریان و همکاران، ۱۴۰۳). با در نظر گرفتن کمبود منابع آب در دسترس در آینده نزدیک و خطرات موجود، بررسی میزان کاهش سطح ایستابی و نیز تأثیرپذیری کیفیت آب زیرزمینی از آن، لزوم پایش مستمر کیفیت آب‌های زیرزمینی و ارائه راهکارهایی در جهت حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از این منابع را دوچندان

از یکدیگر است. از مشهورترین آزمون‌های آماری ناپارامتری می‌توان به آزمون‌های اسپیرمن (Spearman's rho test) و آزمون مان-کندال (Mann-Kendall) برای تعیین روند در سری داده‌ها اشاره کرد. همچنین روش تخمین‌گر شیب سن (Sen) نیز برای تخمین شیب خط روند استفاده می‌شود (Sen, 1968). از بین آزمون‌های روند ناپارامتری، روش Mann-Kendall برای سری‌های زمانی هیدرولوژیکی مناسب‌تر است (Khaliq et al., 2009). همچنین (Marsick et al., 2024) مزایای کاربرد آزمون Mann-Kendall در تحلیل روند را بررسی کردند و از این آزمون ناپارامتری به عنوان چارچوبی جذاب در تحلیل روند داده‌ها یاد کردند.

تاکنون مطالعات زیادی به بررسی روند کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. غلامی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از اطلاعات ۱۵ حلقه چاه مشاهده‌ای در دشت تویسرکان طی دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۴-۱۳۹۴) روند تغییرات کیفی آب زیرزمینی را با آزمون ناپارامتری Mann-Kendall بررسی کردند و برای هر سری زمانی با استفاده از روش تخمین‌گر سن، شیب خط روند محاسبه شد. نتایج نشان داد که آب زیرزمینی در این دشت از لحاظ کیفی دچار افت شده است. همچنین سطح ایستابی روند کاهشی معنی‌دار داشته است و بطور متوسط سالانه ۵۳ سانتی‌متر و در ۲۲ سال اخیر، بیش از ۱۱ متر افت داشته است. ارشاد حسینی و همکاران (۱۴۰۰) روند تغییرات کیفی آب زیرزمینی را در دشت یزد-اردکان با استفاده از آزمون ناپارامتری Mann-Kendall و تخمین‌گر شیب سن برای آمار و اطلاعات ۲۵ محل اندازه‌گیری (چاه، چشمه و قنات) در بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۳-۱۳۹۳) بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد روند تغییرات تمامی متغیرهای کیفی بررسی‌شده در این دشت رو به افزایش بوده است و این روند در زمان‌های تخلیه یا برداشت نسبت به زمان‌های تغذیه بیشتر بوده که ناشی از کاهش بارش‌ها و پیرو آن کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی بوده است.

نادری اشکفتکی و همکاران (۱۴۰۱) روند متغیرهای کیفی اندازه‌گیری شده در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری در سفیددشت در استان چهارمحال و بختیاری در دوره آماری ۲۹ ساله (۱۳۹۸-۱۳۷۰) را با استفاده از آزمون ناپارامتری Mann-Kendall اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد دشت سفیددشت در اکثر متغیرهای کیفی و نقاط نمونه‌برداری مورد

سمت دشت هدایت می‌کنند. این آبراهه‌ها در اغلب ماه‌های سال فاقد جریان بوده و نقش آن‌ها بیشتر در تغذیه موقت آبخوان و انتقال رواناب‌های سطحی در دوره‌های ترسالی است. در سال‌های اخیر، بخش عمده آب شرب شهرکرد از منابع آب سطحی خارج از دشت و از طریق رودخانه زاینده‌رود، به‌وسیله خط انتقال موسوم به بن- بروجن تأمین می‌شود. علاوه بر این، تعدادی چشمه در محدوده دشت شهرکرد و ارتفاعات پیرامونی آن وجود دارد که عمدتاً ماهیتی فصلی داشته و دبی آن‌ها در فصول پربارش افزایش یافته و در سایر ماه‌های سال کاهش چشمگیر یافته یا به‌طور کامل خشک می‌شوند. از مهم‌ترین چشمه‌های استان چهارمحال و بختیاری می‌توان به چشمه کوه‌رنگ اشاره کرد که در گذشته سهم قابل توجهی در تأمین آب شرب شهرکرد داشته است. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر دبی این چشمه به‌طور محسوسی کاهش یافته است که این امر عمدتاً ناشی از تداوم خشکسالی‌ها، کاهش ذخیره برفی ارتفاعات، تغییر الگوی بارش و افزایش برداشت‌های بالادست می‌باشد. همچنین در برخی مقاطع زمانی، به‌دلیل افزایش کدورت آب، امکان بهره‌برداری مستقیم از آب این چشمه برای مصارف شرب با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. در شکل ۳ شبکه آبراهه‌های اصلی در دشت شهرکرد و جهت جریان آب زیرزمینی و ورودی و همچنین خروجی‌های زیرزمینی به آبخوان شهرکرد نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، جهت غالب جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب و همچنین از جنوب شرق دشت به سمت مرکز دشت است. به‌علت برداشت آب توسط چاه‌های کشاورزی در محدوده مرکز و جنوب دشت، پایین‌ترین تراز آب زیرزمینی در این ناحیه مشاهده می‌شود. در این مطالعه، از نتایج نمونه‌برداری ۱۱ چاه واقع در دشت شهرکرد در دوره آماری ۲۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۰) استفاده شد. داده‌های مورد نیاز از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری دریافت شد. موقعیت قرارگیری این نقاط در دشت شهرکرد در شکل ۱ نشان داده شده است که دارای پراکندگی مناسب می‌باشد. برای ارزیابی تغییرات مکانی متغیرهای کیفی (Na^+ ، TDS، TH، SAR، EC، Total Anion و Total Cation) آب زیرزمینی دشت شهرکرد با روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، از جعبه ابزار Geostatistic نرم افزار Arc GIS استفاده گردید. سپس نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی برای ابتدا (۱۳۸۰) و انتهای (۱۳۹۹) دوره آماری در محیط GIS رسم و با یکدیگر مقایسه شدند. در این مطالعه،

می‌کند. آب زیرزمینی یکی منابع اصلی تامین آب کشاورزی و شرب در دشت شهرکرد است. لذا بررسی روند تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی در این دشت از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی روند تغییرات زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت شهرکرد در دوره آماری ۲۰ ساله با استفاده از روش Mann-Kendall اصلاح شده می‌باشد تا بتوان نقاط مهم و بحرانی دشت را بر اساس روند ۲۰ ساله گذشته مشخص نمود و در اختیار تصمیم‌گیران قرار داد.

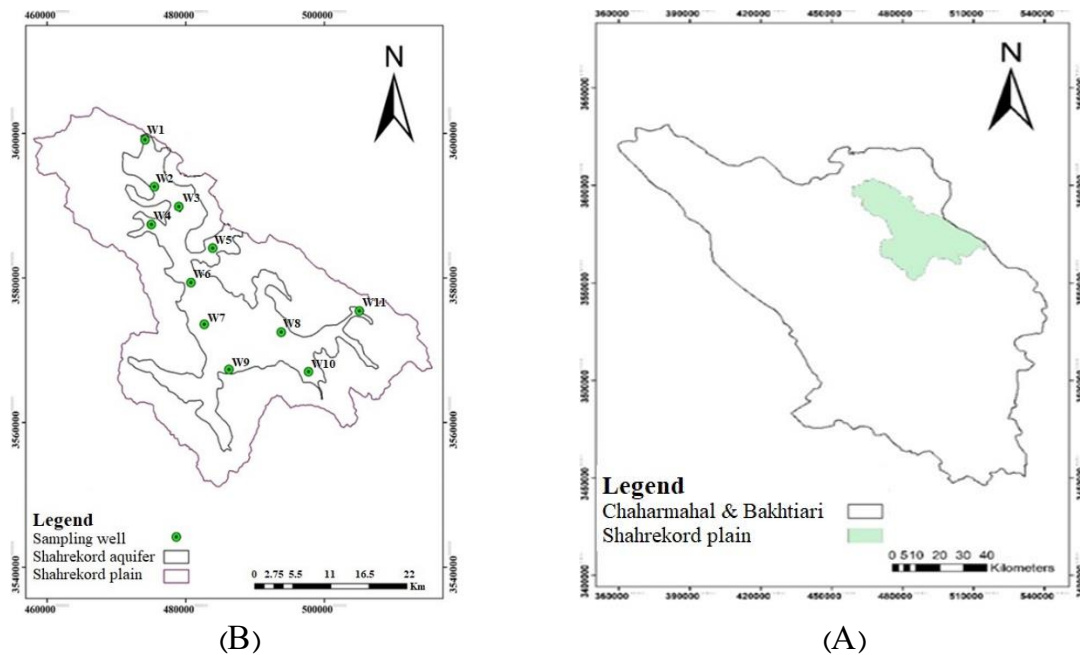
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

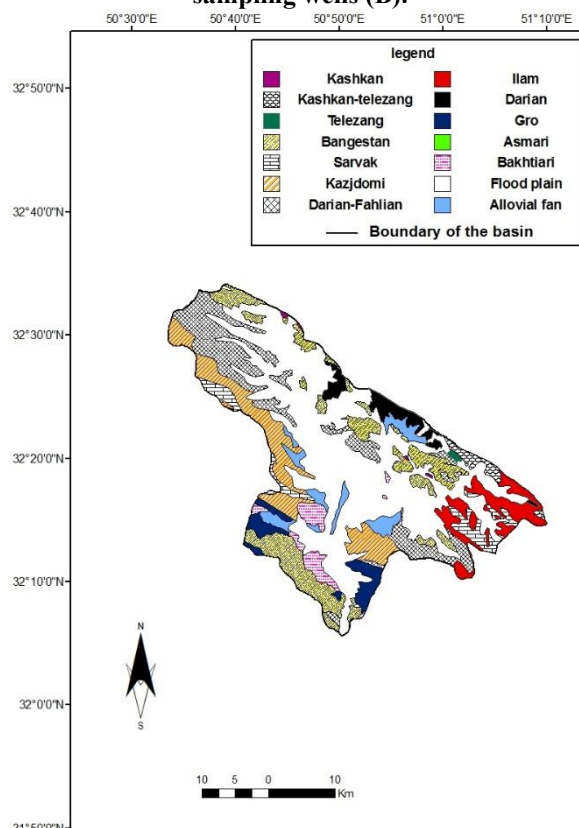
دشت شهرکرد با ارتفاع ۲۰۶۰ متر از سطح دریا دارای مساحت ۵۵۱ کیلومتر مربع می‌باشد. مطابق شکل ۱ سطح حوضه آبریز این دشت دارای مساحتی در حدود ۱۴۳۵ کیلومتر مربع می‌باشد (لاله زاری و همکاران، ۱۳۸۸). از نظر هواشناسی، در مناطق مرتفع بارش معمولاً به صورت برف است و ارتفاعات پوشیده از برف یکی از ویژگی‌های اقلیمی این منطقه بشمار می‌آید. با توجه به تقسیم‌بندی دوماتین و آمبرژه، اقلیم منطقه جزء اقلیم‌های نیمه‌خشک و سرد و بر اساس طبقه‌بندی کوپن جز اقلیم معتدل سرد با تابستان‌های گرم و خشک است. از نظر ژئومورفولوژیکی دشت شهرکرد یکی از دشت‌های فشاری میانکوهستانی بوده که تقریباً با روند شمال غرب به جنوب شرق به موازات الگوی اصلی رشته کوه‌های زاگرس گسترش یافته است. دشت شهرکرد توسط رسوبات آبرفتی جوان و قدیمی دوره کواترنری پوشیده شده است که بیشترین گسترش سنگ‌شناسی متعلق به کرتاسه می‌باشد. علاوه بر کرتاسه به میزان کمتری واحدهای سنگی ائوسن نیز مشاهده می‌شود که شامل کنگلومرا، آهک کنگلومرای و آهک نومولیتی بوده که به ویژه در قسمت‌های شمال شرق دشت رخنمون می‌باشند. نقشه زمین‌شناسی دشت شهرکرد با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در شکل ۲ ارائه شده است. در دشت شهرکرد عمده کشت بصورت زراعی است و محصولات شامل گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، یونجه و سیب‌زمینی کشت می‌شود و عمدتاً کودهای پرمصرف ازت، فسفر و پتاسیم در این مزارع استفاده می‌شوند که یکی از عوامل موثر بر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی، بویژه در مناطق مرکزی و جنوبی این دشت است.

در محدوده دشت شهرکرد رودخانه دائمی جریان ندارد و شبکه آب‌های سطحی عمدتاً شامل مسیل‌ها و آبراهه‌های فصلی است که در زمان وقوع بارش، رواناب حاصل از ارتفاعات اطراف را به

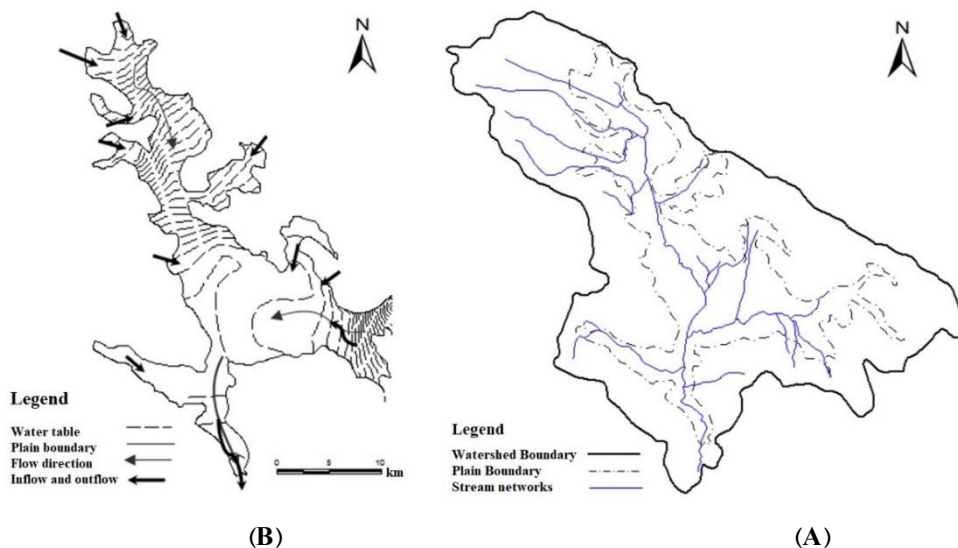
بررسی روند متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد با روش Mann-Kendall و با استفاده از کد نوشته شده در نرم افزار Matlab انجام شد.



شکل ۱- موقعیت دشت شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری (الف) و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری (ب).
Figure 1- Location of Shahrekord Plain in Chaharmahal and Bakhtiari Province (A) and location of sampling wells (B).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی دشت شهرکرد با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰.
Figure 2- Geological map of Shahrekord Plain with a scale of 1:250,000.



شکل ۳- شبکه آبراهه‌های اصلی در دشت شهرکرد (الف) و جهت جریان آب زیرزمینی (ب).

Figure 3- The network of mainstream in the Shahrekord Plain (a) and the direction of groundwater flow (b).

جدول ۱- مشخصات چاه‌های اندازه‌گیری کیفیت آب در دشت شهرکرد.

Table 1- Characteristics of water quality measurement wells in Shahrekord Plain.

| Well no. | UTM X | UTM Y | Well Name | Well code |
|----------|--------|---------|--------------|-----------|
| 1 | 474129 | 3599119 | Hosseinali | W1 |
| 2 | 475490 | 3592626 | Sayyed Jamal | W2 |
| 3 | 479011 | 3589891 | Alirahm | W3 |
| 4 | 475037 | 3585399 | Abbasgholi | W4 |
| 5 | 483906 | 3584124 | Nader | W5 |
| 6 | 480750 | 3579369 | Safarpour | W6 |
| 7 | 482687 | 3573589 | Seifollah | W7 |
| 8 | 476011 | 3589891 | Abdullah | W8 |
| 9 | 486246 | 3567346 | Mehran | W9 |
| 10 | 497727 | 3567040 | Mehrab | W10 |
| 11 | 505054 | 3775440 | Sarjangaldar | W11 |

Mann-Kendall به صورت معادله ۱ محاسبه می‌شود که در این معادله، n تعداد داده‌های موجود در سری، X_i و X_j به ترتیب داده‌های i ام و j ام در سری هستند. $sgn(\theta)$ تابع علامت است که به صورت معادله ۲ تعریف شده است. در نهایت آماره Z آزمون Mann-Kendall با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌شود که در آن، $VAR(S)$ از معادله ۴ بدست می‌آید:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(X_j - X_i) \quad (1)$$

$$sgn(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

آزمون Mann-Kendall

در این مطالعه، روند تغییرات سری‌های متغیرهای کیفی با استفاده از آزمون ناپارامتری Mann-Kendall مورد بررسی قرار گرفت. شرط لازم برای استفاده از این آزمون عدم وجود خودهمبستگی معنی دار در سری زمانی داده‌ها می‌باشد، با این حال ممکن است داده‌ها دارای خودهمبستگی معنی دار باشند. بنابراین، ابتدا باید خودهمبستگی داده‌ها حذف گردد تا بتوان از آزمون MK استفاده نمود. بدین منظور تاکنون ویرایش‌های مختلفی از آزمون مان-کندال (MK) ارائه شده است (Kumar et al., 2009).

آزمون Mann-Kendall بدون در نظر گرفتن خودهمبستگی داده‌ها (MK1)

آزمون Mann-Kendall یکی از متداول‌ترین آزمون‌های آماری تشخیص روند در سری‌های زمانی است. آماره S آزمون

می‌گیرد که از معادله‌های ۵ و ۶ بدست می‌آید که در آن، r_i ضریب خودهمبستگی با تاخیر i است و از معادله ۷ محاسبه می‌شود.

(۵)

$$VAR(S)^* = VAR(S) \cdot \frac{n}{n^*}$$

$$\frac{n}{n^*} =$$

$$1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \cdot r_i$$

(۷)

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

که در آن، x_i و x_{i+k} به ترتیب مقادیر متغیر یا داده‌های سری زمانی در گام زمانی i و با تاخیر زمانی k و \bar{x} مقدار میانگین متغیر x است. برای محاسبه Z ، در معادله ۳ مقدار $VAR(S)^*$ جایگزین مقدار $VAR(S)$ می‌شود. (Hamed and Rao (1998) نشان دادند که تشخیص روند معنی‌دار در سری زمانی با روش MK3 دقیق‌تر از روش Mann-Kendall مرسوم (MK1) می‌باشد. لذا ویرایش آزمون Mann-Kendall، شامل حذف ساختار کامل خودهمبستگی (MK3) داده‌ها است که در این مقاله از این ویرایش آزمون Mann-Kendall استفاده شد.

شیب خط روند

تخمین‌گر شیب روند Sen یک شاخص مفید در بررسی تغییرات سری‌های زمانی است که بزرگی روند یکنواخت را نشان می‌دهد. مقدار شیب روند با استفاده از معادله ۸ محاسبه می‌شود (Sen, 1968).

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_l}{j - l} \right) \quad \forall l < j$$

که در آن، β برآوردگر شیب خط روند که مقدار مثبت آن روند افزایشی و مقدار منفی آن روند کاهشی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی روند متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد

جدول ۲ مقادیر Z آزمون ناپارامتری Mann-Kendall اصلاح شده (MK3) متغیرهای کیفی (شامل Na، TDS، TH، SAR، Total Cations، Total Anions و EC) آب زیرزمینی دشت شهرکرد را در طی دوره آماری ۲۰ ساله نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، از ۱۱ چاه مورد بررسی، ۵ حلقه چاه سید جمال، چاه علی رحم، چاه عباسقلی، چاه صفرپور و چاه سیف الله در هیچ یک از متغیرهای کیفی

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۳)$$

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (۴)$$

که در آن، q معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t_p نیز بیانگر تعداد داده‌ها با ارزش یکسان است. آماره آزمون Mann-Kendall (Z) تقریباً از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک تبعیت می‌کند. فرض H_0 (فقدان روند در سطح معنی‌داری α) به شرطی پذیرفته می‌شود که قدرمطلق آماره Z از مقدار متغیر استاندارد در سطح معنی‌داری α کوچک‌تر شود؛ در غیر این صورت، فرض صفر رد و فرض مخالف (وجود روند در سطح معنی‌داری α) پذیرفته می‌شود. به بیان دیگر، فرض صفر به شرطی پذیرفته می‌شود که معادله $-Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq Z \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ برقرار باشد. در این تحقیق، سطوح معنی‌داری ۱، ۵ و ۱۰ درصد برای هر یک از سری‌های متغیرهای کیفی آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت.

آزمون Mann-Kendall با حذف اثر خودهمبستگی مرتبه اول داده‌ها (MK2)

در یک ویرایش از این آزمون که در این پژوهش MK2 نامیده می‌شود، ابتدا ضریب خودهمبستگی مرتبه اول برای داده‌ها محاسبه می‌شود. در مواردی که خودهمبستگی داده‌ها در سطح موردنظر معنی‌دار باشد، ابتدا اثر خودهمبستگی داده‌ها روی روند حذف شده، سپس داده‌های جدید تولید و روند آنها با آزمون Mann-Kendall مورد بررسی قرار می‌گیرد.

آزمون Mann-Kendall با حذف کامل اثر خودهمبستگی داده‌ها (MK3)

آزمون Mann-Kendall اصلاح شده توسط Hamed and Rao (1998) ارائه گردید. در این آزمون همه ساختار خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی بررسی و حذف می‌شود. در این روش، واریانس اصلاح شده $VAR(S)^*$ در محاسبه آماره Z آزمون Mann-Kendall مورد استفاده قرار

و سفید دشت (نادری اشکفتکی و همکاران، ۱۴۰۱) درباره روند متغیر کیفی Na در گذشته انجام شده بود و نتایج مشابهی مبنی بر روند کاهشی متغیر Na گزارش شده است. شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی Na⁺ را در دشت شهرکرد در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ و تغییرات طی ۲۰ سال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ میزان اختلاف متغیر کیفی Na⁺ طی دوره آماری مورد بررسی (۱۴۰۰-۱۳۸۰) در سطح آبخوان شهرکرد در ۴۸/۲۰ درصد از مساحت آبخوان کاهشی بوده است و در نواحی شمالی و جنوب شرقی که شامل ۵۱/۸۰ درصد از مساحت آبخوان می‌باشد، بدون تغییر بوده است. جدول ۳ درصد تغییرات را برای متغیرهای مختلف نشان می‌دهد.

مورد بررسی دارای روند معنی‌دار در سطح ۵ درصد و کمتر نبوده‌اند. همچنین در متغیرهای کیفی EC و TDS همه حلقه چاه‌های مورد بررسی بدون روند معنی‌دار می‌باشند. همانطور که در جدول ۲ قابل مشاهده است، متغیر Na⁺ در سطح دشت شهرکرد در اکثر نقاط بدون روند معنی‌دار می‌باشد. در این بین ۲ ایستگاه چاه سرچنگلدار و چاه عبدالله دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۱ درصد، چاه نادر دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۵ درصد می‌باشد. این چاه‌ها در بخش شرقی و جنوبی دشت شهرکرد واقع شده‌اند. مطالعات مشابهی در دشت لردگان (موسوی سردشتی و همکاران، ۱۳۹۹)، دشت خانمیرزا (حسنی و همکاران، ۱۳۹۷)

جدول ۲- مقادیر آماره Z آزمون Mann-Kendall متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد.

Table 2- Mann-Kendall Z-statistic values of groundwater quality variables of Shahrekord Plain.

| Variable | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 | W6 | W7 | W8 | W9 | W10 | W11 |
|----------|--------------|-------|-------|------|----------------|-------|-------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Na | 1.31 | 0.36 | -0.35 | 0.61 | -1.96* | 1.45 | -0.73 | -3.13** | -1.72 | -1.58 | -2.79** |
| EC | -1.42 | 0.05 | 0.30 | 0.89 | -0.71 | 1.50 | -0.23 | -0.88 | 1.30 | -1.59 | 0.29 |
| SAR | -1.03 | 0.34 | -0.71 | 0.66 | -2.40** | 1.38 | -1.06 | -3.11** | -1.91 | -1.02 | -2.16* |
| TDS | -1.36 | 0.13 | 0.28 | 0.93 | -0.71 | 1.17 | -0.25 | -0.80 | 1.45 | -1.56 | 0.33 |
| TH | -1.86 | -1.12 | 0.30 | 0.47 | 0.56 | 0.20 | -0.89 | 2.02* | 0.50 | -1.72 | 0.96 |
| Cations | -1.08 | -0.16 | 0.16 | 1.31 | -0.94 | 0.63 | 0.09 | -0.36 | -0.06 | -1.82 | 0.21 |
| Anions | -1.77 | 0.13 | -0.13 | 0.60 | 0.60 | -0.68 | 1.57 | 0.00 | -0.25 | -1.57 | 0.30 |

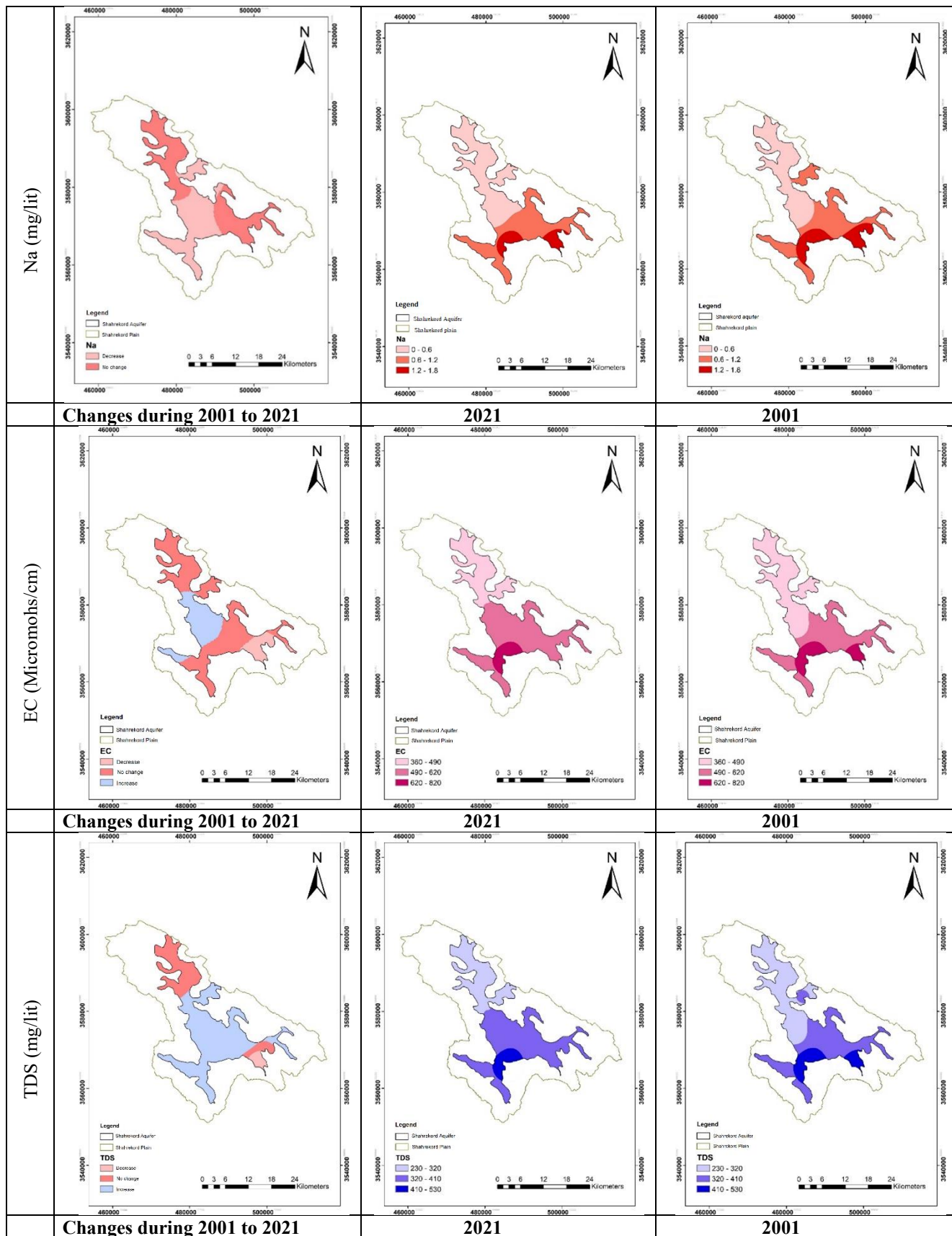
*Significant trends at the 10% level are marked in bold, and at the 5% and 1% levels are marked in bold with one and two stars, respectively.

*روند معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد به صورت پررنگ و بدون ستاره، در سطح معنی‌داری ۵ درصد به صورت پررنگ به همراه یک ستاره و در سطح معنی‌داری ۱ درصد به صورت پررنگ با دو ستاره مشخص شده‌اند.

جدول ۳- درصد مساحت تحت تاثیر روند متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰.

Table 3- Percentage of area affected by trends in groundwater quality variables from 2001 to 2021.

| Variable | Increasing | Decreasing | No change |
|----------|------------|------------|-----------|
| Na | 0 | 48.2 | 51.8 |
| EC | 22.9 | 11.4 | 65.8 |
| SAR | 0 | 43.7 | 56.3 |
| TDS | 68 | 4 | 28 |
| TH | 68 | 3 | 28 |
| Cations | 30 | 34 | 35 |
| Anions | 30 | 34 | 35 |



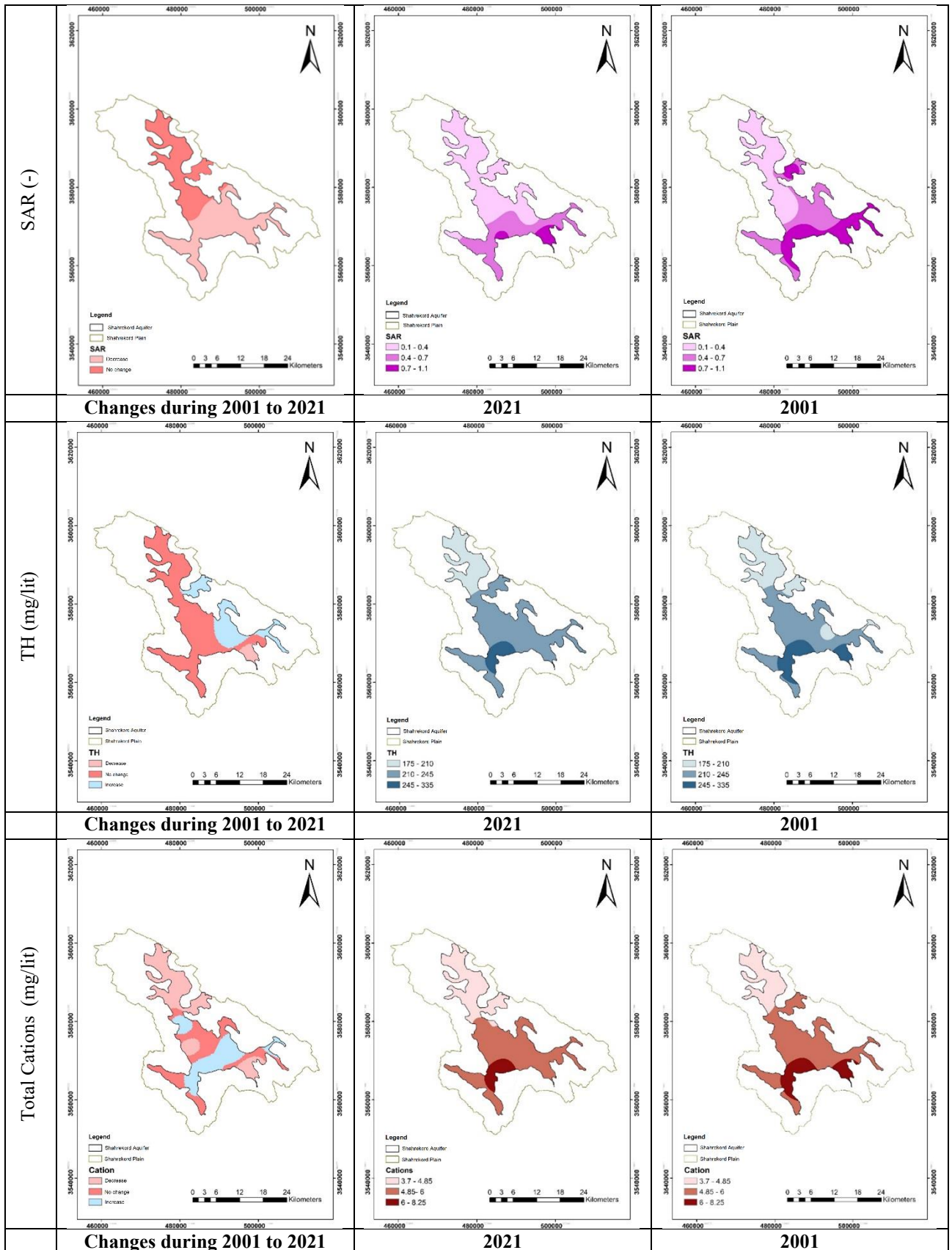
شکل ۴- نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای Na، EC و TDS در سطح دشت شهرکرد و میزان تغییرات آنها در دوره ۱۴۰۰-۱۳۸۰.
 Figure 4- Zoning maps of Na, EC, and TDS variables in the Shahrekord plain and their changes during the period 2001-2021.

می‌باشد و تنها چاه مهرباب واقع در جنوب دشت دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد می‌باشد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که متغیر Total Anions در سطح دشت شهرکرد در اکثر نقاط بدون روند معنی‌دار می‌باشد و تنها چاه حسینعلی واقع در شمال دشت دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد می‌باشد. تراپی پوده و همکاران (۱۳۹۹) نیز نتایج مشابهی از روند متغیرهای کیفی Total Cations و Total Anions در محدوده چهل‌خانه (در بالادست زاینده‌رود) گزارش کرده‌اند.

الگوی تغییرات کاتیون‌ها و آنیون‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد نشان می‌دهد که حضور و نوسانات این عناصر عمدتاً تحت تأثیر ترکیبی از عوامل زمین‌شناسی (منشأ سازندی) و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و شهری، قرار دارد. غالب بودن یون‌های کلسیم و منیزیم و نقش آن‌ها در افزایش متغیر TH را می‌توان به انحلال سازندهای کربناته نظیر آهک و دولومیت که بخش وسیعی از واحدهای زمین‌شناسی منطقه را تشکیل می‌دهند، نسبت داد. افت سطح ایستابی و افزایش زمان ماند آب در آبخوان، این فرآیند انحلال را تشدید کرده و موجب افزایش غلظت این کاتیون‌ها در برخی چاه‌ها شده است. در مقابل، حضور یون سدیم و تغییرات متغیرهایی نظیر Na و SAR علاوه بر منشأ سازندی (مانند تبادل یونی با کانی‌های رسی)، می‌تواند تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی قرار داشته باشد. استفاده از کودهای شیمیایی و بازگشت آب آبیاری به آبخوان از جمله عوامل بالقوه افزایش این یون‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، مشاهده روندهای کاهشی Na و SAR در برخی نقاط بیانگر کاهش آب بازگشتی آبیاری، بدلیل تغییر سیستم آبیاری از غرقابی به تحت فشار، در دوره مورد مطالعه است.

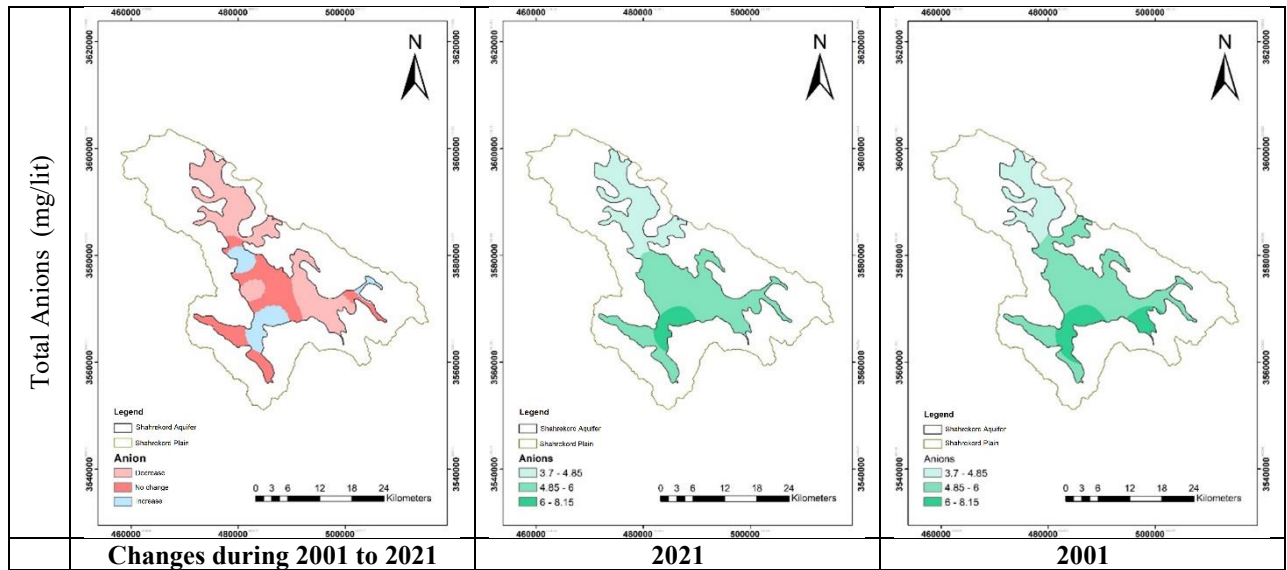
در جدول ۲ مشاهده می‌شود، متغیرهای EC و TDS در تمام ایستگاه‌ها روند معنی‌دار ندارند. مطالعات مشابهی در بالادست زاینده‌رود توسط تراپی پوده و همکاران (۱۳۹۹) در محدوده چهل‌خانه درباره روند تغییرات کیفی TDS در گذشته انجام شده که نتیجه مشابهی مبنی بر عدم وجود روند معنی‌دار متغیر TDS گزارش شده است. مطابق جدول ۲ متغیر SAR در سطح دشت شهرکرد در برخی نقاط معنی‌دار می‌باشد. از ایستگاه‌هایی که دارای روند معنی‌دار هستند، ۲ حلقه چاه نادر و چاه عبدالله دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۱ درصد، چاه سرچنگلدار دارای روند معنی‌داری کاهشی در سطح معنی‌داری ۵ درصد می‌باشد. این چاه‌ها در مناطق شرقی و جنوبی دشت شهرکرد واقع شده‌اند (شکل ۵). مطالعات مشابهی در دشت‌های خانمیرزا (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷)، سفیددشت (نادری اشکفتکی و همکاران، ۱۴۰۱) و لردگان (موسوی سردشتی و همکاران، ۱۳۹۹) درباره روند متغیر کیفی SAR انجام شده که روند کاهشی متغیر SAR را گزارش کرده‌اند.

متغیر TH در سطح دشت شهرکرد در اکثر نقاط بدون روند معنی‌دار می‌باشد. در این بین چاه عبدالله دارای روند معنی‌داری افزایشی در سطح معنی‌داری ۵ درصد و چاه‌های مهرباب (جنوب دشت) و حسینعلی (شمال دشت) دارای روند معنی‌داری کاهشی در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد می‌باشند (شکل ۵). مطالعات دیگر در دشت سفید دشت (نادری اشکفتکی و همکاران، ۱۴۰۱) حاکی از روند افزایشی در متغیر کیفی TH بوده و در تحقیق تراپی پوده و همکاران (۱۳۹۹) در بالادست زاینده‌رود حاکی از روند کاهشی در متغیر کیفی TH بوده‌اند. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که متغیر Total Cations در سطح دشت شهرکرد در اکثر نقاط بدون روند معنی‌دار



شکل ۵- نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی SAR، TH و Total Cations در سطح دشت شهرکرد و میزان تغییرات آنها در دوره ۱۳۸۰-۱۴۰۰.

Figure 5- Zoning maps of qualitative variables SAR, TH and Total Cations in the Shahrekord plain and their changes during the period 2001-2021.



شکل ۶- نقشه‌های پهنه‌بندی متغیر کیفی **Total Anions** در سطح دشت شهرکرد و میزان تغییرات آنها در دوره ۱۴۰۰-۱۳۸۰.
Figure 6- Zoning maps of the qualitative variable Total Anions in the Shahrekord Plain and their changes during the period 2001-2021.

صورت تداوم می‌تواند محدودیت‌هایی را برای بهره‌برداری کشاورزی ایجاد نماید.

از سوی دیگر، با توجه به شرایط خاص استان چهارمحال و بختیاری و بروز تنش‌های جدی در تأمین آب شرب در سال‌های اخیر، بررسی کیفیت آب زیرزمینی صرفاً از دیدگاه کشاورزی کافی نبوده و ملاحظات شرب، به‌ویژه در شرایط اضطراری، اهمیت ویژه‌ای دارد. در چنین شرایطی، برخی چاه‌های کشاورزی ممکن است به‌طور موقت وارد مدار تأمین آب شرب شوند؛ از این‌رو، حتی مقادیری که از نظر کشاورزی مجاز تلقی می‌شوند، ممکن است از دیدگاه شرب نیازمند بررسی دقیق‌تر باشند.

بر این اساس، نتایج این مطالعه بر ضرورت پایش هم‌زمان کیفیت آب زیرزمینی بر اساس معیارهای کشاورزی و شرب تأکید دارد، به‌ویژه در چاه‌هایی که روند افزایشی برخی عناصر را نشان می‌دهند. این رویکرد می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت ریسک کیفی آبخوان و تصمیم‌گیری آگاهانه در شرایط بحرانی و اضطراری ایفا نماید.

نتایج حاصل از این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در دشت شهرکرد از نظر وضعیت و تغییرات کیفی آب زیرزمینی همخوانی قابل‌توجهی دارد. حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱) در پژوهشی با هدف پهنه‌بندی کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد برای مصارف کشاورزی، شاخص‌هایی نظیر EC، TDS، SAR، Na، pH و سختی کل را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه کیفیت آب زیرزمینی در بخش

در خصوص آنیون‌ها، تغییرات یون‌هایی نظیر کلر و سایر آنیون‌ها می‌تواند ناشی از ترکیب منابع طبیعی و انسانی باشد. منشأ سازندی این آنیون‌ها به انحلال تبخیری‌ها و انتقال املاح از واحدهای زمین‌شناسی مرتبط است، در حالی‌که منابع انسانی شامل نفوذ پساب‌های کشاورزی، فاضلاب‌های شهری و رواناب‌های آلوده می‌باشد. نبود روند معنی‌دار در بخش قابل‌توجهی از چاه‌ها نشان می‌دهد که در دوره زمانی مورد مطالعه، تأثیر منابع انسانی در بسیاری از نقاط با فرآیندهای طبیعی آبخوان در حالت تعادل قرار داشته است. به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت شهرکرد تحت کنترل غالب شرایط زمین‌شناسی منطقه است، اما در نواحی مرکزی و جنوبی دشت، نقش فعالیت‌های کشاورزی و شهری در تغییر ترکیب یونی آب زیرزمینی پررنگ‌تر بوده و این مناطق نیازمند پایش دقیق‌تر و مدیریت هدفمند منابع آلودگی می‌باشند.

به‌منظور ارزیابی پیامدهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد، مقادیر متغیرهای مورد بررسی با حدود مجاز متداول برای مصارف کشاورزی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که در اغلب چاه‌های مورد مطالعه، مقادیر پارامترهایی نظیر EC، SAR، Na و TDS در محدوده قابل‌قبول برای آبیاری قرار داشته و شواهدی دال بر آلودگی شدید آبخوان از دیدگاه کشاورزی مشاهده نمی‌شود. با این حال، افزایش نسبی برخی پارامترها در تعدادی از چاه‌ها، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت، بیانگر فشارهای کیفی بالقوه بر آبخوان است که در

می‌دهد. شیب متغیر کیفی Na برای اکثر چاه‌ها برابر صفر است و برای ۵ ایستگاه چاه نادر، چاه عبدالله، چاه مهران، چاه مهرباب و چاه سرچنگلدار منفی و کاهشی است. شیب متغیر کیفی EC در اکثر چاه‌ها مثبت و افزایشی است و به جز چاه سید جمال که دارای مقدار صفر است، در ۴ چاه حسینعلی، چاه نادر، چاه سیفالله و چاه عبدالله دارای مقدار منفی و کاهشی است. شیب متغیر SAR در اکثر چاه‌ها مثبت و افزایشی است و به جز ایستگاه‌های چاه حسینعلی و چاه سید جمال که دارای مقدار صفر است، در ۴ چاه نادر، چاه سیفالله، چاه عبدالله و چاه مهرباب دارای مقدار منفی است. شیب متغیر کیفی TDS در ۵ حلقه چاه علی رحم، چاه عباسقلی، چاه صفرپور، چاه مهران و چاه سرچنگلدار دارای مقدار مثبت و افزایشی، در چاه سیدجمال دارای مقدار صفر و در سایر چاه‌ها دارای مقدار منفی و کاهشی است. شیب متغیر کیفی TH در ۵ حلقه چاه عباسقلی، چاه نادر، چاه عبدالله، چاه مهران و چاه سرچنگلدار دارای مقدار مثبت و افزایشی، در چاه صفرپور دارای مقدار صفر و در سایر چاه‌ها دارای مقدار منفی و کاهشی است. شیب متغیر کیفی Total Cations در اکثر چاه‌ها دارای مقدار صفر می‌باشد و تنها در ۲ چاه نادر و چاه مهرباب دارای مقدار منفی و کاهشی است. شیب متغیر کیفی Total Anions در اکثر چاه‌ها دارای مقدار صفر می‌باشد و تنها در ۲ چاه نادر و چاه مهرباب دارای مقدار منفی و کاهشی است.

عمده‌ای از دشت از نظر کشاورزی در محدوده قابل قبول قرار دارد، اما در بخش‌های جنوبی دشت مقادیر EC و TDS افزایش یافته و خطر شوری و مشکلات کیفی بیشتر است. این الگوی مکانی با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد، به طوری که در این تحقیق نیز تغییرات و روندهای معنی‌دار برخی متغیرهای کیفی عمدتاً در بخش‌های مرکزی، شرقی و جنوبی دشت مشاهده شده است که می‌تواند ناشی از تمرکز برداشت آب، فعالیت‌های کشاورزی و ورود آلاینده‌های انسانی باشد. همچنین فتوحی هفشجانی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۲) با بررسی توزیع مکانی نیترات و فسفات در آبخوان دشت شهرکرد نشان دادند که میانگین غلظت نیترات و فسفات آب زیرزمینی به ترتیب حدود ۹/۲۵ و ۰۹/۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده و بیشترین مقادیر این آلاینده‌ها عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی دشت مشاهده شده است. ایشان دلیل اصلی افزایش غلظت نیترات و فسفات در این نواحی را فعالیت‌های کشاورزی، استفاده از کودهای شیمیایی و همچنین تأثیر فاضلاب شهری و کم‌عمق بودن سطح ایستابی عنوان کردند. این نتایج با یافته‌های مطالعه حاضر، به‌ویژه افزایش یا رفتار متفاوت برخی متغیرهای کیفی در نواحی مرکزی و جنوبی دشت، همخوانی دارد و نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این مناطق نسبت به فشارهای انسانی است.

نتایج شیب خط روند متغیرهای کیفی

جدول ۴ شیب خط روند متغیرهای کیفی چاه‌های مورد بررسی در دشت شهرکرد را در دوره آماری ۲۰ ساله نشان

جدول ۴- مقادیر شیب خط روند متغیرهای کیفی دشت شهرکرد (۱۴۰۰-۱۳۸۰).

Table 4- Trend line slope values of water quality variables of Shahrekord plain (2001-2021).

| Variable | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 | W6 | W7 | W8 | W9 | W10 | W11 |
|----------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Na | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 | 0.00 | 0.00 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | -0.01 |
| EC | -0.40 | 0.00 | 0.08 | 0.30 | -0.71 | 0.54 | -0.05 | -0.20 | 0.60 | 2.67 | 0.13 |
| SAR | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.30 | -0.71 | 0.54 | -0.05 | -0.21 | 0.60 | -2.67 | -0.14 |
| TDS | -0.25 | 0.00 | 0.04 | 0.20 | -0.45 | 0.34 | -0.04 | -0.13 | 0.48 | -1.73 | 0.12 |
| TH | -0.25 | -0.15 | -0.02 | 0.07 | 0.18 | 0.00 | -0.16 | 0.35 | 0.14 | -1.00 | 0.50 |
| Cations | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 | 0.00 |
| Anions | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 | 0.00 |

در مقابل، افزایش شیب خط روند برخی متغیرها به‌ویژه متغیر TH در چاه عبدالله واقع در مرکز دشت، می‌تواند به افت سطح ایستابی، افزایش زمان ماند آب در آبخوان و در نتیجه افزایش انحلال مواد معدنی سازندهای کربناته مرتبط باشد. علاوه بر این، ورود فاضلاب شهری و پساب‌های خانگی و همچنین نفوذ آب آبیاری حاوی کودهای شیمیایی در محدوده مرکزی دشت، به‌عنوان یکی از منابع بالقوه افزایش یون‌های کلسیم و منیزیم، نقش مهمی در افزایش سختی کل آب زیرزمینی ایفا می‌کند.

تغییرات مثبت و منفی شیب خط روند متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد را می‌توان حاصل اثر همزمان عوامل هیدروژئولوژیکی و انسانی دانست. کاهش شیب خط روند برخی متغیرها نظیر Na و SAR، به‌ویژه در بخش‌های شرقی و جنوبی دشت، احتمالاً ناشی از رقیق شدن آب زیرزمینی در اثر تغذیه آبخوان، کاهش نسبی برداشت در برخی سال‌ها و بهبود روش‌های آبیاری و مصرف کودهای کشاورزی است که منجر به کاهش بار نمکی ورودی به آبخوان شده است.

پایش، استفاده از روش‌های پیشرفته زمین‌آمار و تلفیق تحلیل روند با مدل‌های فرآیندی هیدروژئوشیمیایی، عدم قطعیت‌ها کاهش یافته و تفسیر دقیق‌تری از مکانیزم‌های مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی ارائه شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روند زمانی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از داده‌های چاه کشاورزی در دوره آماری ۲۰ ساله استفاده شد. روند زمانی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از آزمون ناپارامتری Mann-Kendall اصلاح شده (MK3) و در دو سطح معنی‌داری ۵ و ۱ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی نشان داد که در ۵ چاه، شامل چاه‌های سید جمال، علی‌رحم، عباسقلی، صفرپور و سیف‌الله، هیچ‌گونه روند معنی‌داری در متغیرهای کیفی مورد بررسی (Na, TDS, TH, SAR, Total Cations, Total Anions و EC) مشاهده نشده است. این چاه‌ها عمدتاً در مناطق غربی و مرکزی دشت واقع شده‌اند. با این حال در برخی از نقاط متغیرهای کیفی دارای تغییرات معنی‌دار بوده‌اند. به عنوان مثال، در متغیرهای Na, EC و TDS، چاه‌های سرچنگلدار، عبدالله، نادر و مهران دارای کاهش معنی‌دار در طی دوره آماری بوده‌اند. با توجه به نقشه‌های مکانی مشخص شد که نقاط مختلف دارای تغییرات متفاوتی در متغیرهای کیفی بوده‌اند. در بررسی تغییرات متغیرهای کیفی مانند Na, EC, SAR, TDS, TH, Total Cations و Total Anions مشاهده می‌شود که در بعضی از چاه‌ها تغییرات معنی‌دار وجود دارد که این چاه‌ها عمدتاً در مناطق شرقی و جنوبی دشت واقع شده‌اند. بطور کلی می‌توان گفت که دشت شهرکرد در طول دوره زمانی مورد بررسی تحت تأثیر تغییرات مختلف متغیرهای کیفی آب زیرزمینی قرار گرفته است.

سپاسگزاری

نویسندگان بدینوسیله از شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری بدلیل در اختیار قرار دادن آمار مورد نیاز، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

ارشاد حسینی، م.، کشتکار، م. الف.، حسینی، س.م.، افضلی، ع.، ۱۴۰۰. تجزیه و تحلیل روند تغییرات زمانی کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال

شیب‌های نزدیک به صفر که در بخش قابل توجهی از چاه‌ها مشاهده شده‌اند، بیانگر پایداری نسبی شرایط کیفی آب زیرزمینی و تعادل میان تغذیه و برداشت آبخوان در دوره مورد مطالعه است. به‌طور کلی، الگوی مکانی شیب خط روند نشان می‌دهد که مناطق مرکزی، شرقی و جنوبی دشت حساسیت بیشتری نسبت به فعالیت‌های انسانی و افت سطح آب زیرزمینی دارند که این موضوع ضرورت مدیریت هدفمند و پایش مستمر کیفیت آب زیرزمینی را برجسته می‌سازد.

عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های تحقیق

با وجود تلاش برای ارائه تحلیلی جامع از روند تغییرات زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت شهرکرد، نتایج این مطالعه با برخی منابع عدم قطعیت و محدودیت‌ها همراه است که باید در تفسیر یافته‌ها مورد توجه قرار گیرد. نخست، کیفیت و دقت داده‌های مورد استفاده وابسته به نتایج نمونه‌برداری‌های دوره‌ای و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی انجام شده بوده و هرگونه خطا در فرآیند نمونه‌برداری، نگهداری نمونه‌ها یا آنالیز آزمایشگاهی می‌تواند منجر به ایجاد عدم قطعیت در مقادیر متغیرهای کیفی شود.

دوم، تعداد محدود چاه‌های مورد بررسی (۱۱ حلقه چاه) و پراکنش مکانی آنها در سطح دشت ممکن است به‌طور کامل ناهمگنی مکانی کیفیت آب زیرزمینی را منعکس نکند. از این‌رو، نتایج پهنه‌بندی مکانی متغیرهای کیفی که با روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) تهیه شده‌اند، تحت تأثیر تراکم و توزیع مکانی داده‌ها قرار دارند و این موضوع یکی از منابع اصلی عدم قطعیت در تحلیل‌های مکانی محسوب می‌شود.

سوم، آزمون Mann-Kendall اصلاح شده (MK3) اگرچه اثر خودهمبستگی سری‌های زمانی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، اما همچنان فرض می‌کند که ساختار روند در طول دوره آماری یکنواخت است. در حالی که تغییرات ناگهانی کاربری اراضی، افزایش برداشت آب زیرزمینی، ورود فاضلاب شهری یا وقوع خشکسالی‌های شدید می‌توانند منجر به جهش ناگهانی در سری‌های زمانی متغیرهای کیفی شوند که در این مطالعه به‌صورت صریح بررسی نشده‌اند.

در نهایت، در این پژوهش تمرکز اصلی بر تحلیل روند آماری متغیرهای کیفی بوده و اثر مستقیم عوامل مؤثر، نظیر تغییرات سطح ایستابی، شدت برداشت چاه‌ها، تغییرات اقلیمی و ورودی‌های آلاینده به‌صورت کمی لحاظ نشده است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با افزایش تعداد ایستگاه‌های

- و روش تخمینگر شیب سن نمونه پژوهش: دشت یزد- اردکان. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۲(۴): ۷۸-۱۰۶.
- پناهی، م.، میثاقی، ف.، قنبری، ف.، ۱۳۹۶. تعیین روند تغییرات پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی دشت شبستر. فصلنامه علوم محیطی، (۳): ۱۹-۳۸.
- ترابی پوده، ح.، یونسی، ح.، ارشیا، آ.، ۱۳۹۹. بررسی روند تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی و ارزیابی شاخص IRWQIGC در بالا دست سد زاینده رود. نشریه علوم آب و خاک، (۲): ۲۷-۴۰.
- جبرائیلی اندریان، ن.، ندیری، ع.، قره خانی، م.، ۱۴۰۳. بررسی کمیت و کیفیت آب زیرزمینی و تاثیر آن بر هیدروژئوشیمی آبخوان دشت آذرشهر و تعیین منشاء محتمل آلودگی‌ها. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۳۸): ۶۰-۷۹.
- جعفری، م.، طویلی، ع.، ۱۳۹۹. احیای مناطق خشک و کوهستانی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۶۲ ص.
- حسینی، ز.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، قاسمی، ا.، ۱۳۹۷. پیش بینی کیفیت آب‌زیرزمینی دشت خانمیرزا با استفاده از روش تصمیم گیری درختی. هیدروژئولوژی، ۳(۱): ۹۹-۱۱۰.
- حشمتی، س.س.، بیگی هرچگانی، ح.، ۱۳۹۱. پهنه بندی شاخص های کیفی آب‌زیرزمینی شهرکرد به منظور استفاده در طراحی سامانه‌های آبیاری. پژوهش آب در کشاورزی، (۱): ۲۶-۵۹.
- شعبانی، م.، ۱۴۰۰. بررسی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان. فصلنامه جغرافیای طبیعی، (۳): ۷۱-۸۲.
- غلامی، ف.، زارعی، ح.، معروفی، ص.، ۱۴۰۰. تحلیل روند تغییرات پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت توپسرکان با آزمون ناپارامتری من کندال. مجله علوم و مهندسی آبیاری، (۱): ۱۲۷-۱۴۰.
- فتحی هفشجانی، ا.، بیگی هرچگانی، ح.، ۱۳۹۲. الگوهای تغییرات مکانی و پهنه بندی زمین آماری نیترا و فسفات در آب زیرزمینی دشت شهرکرد. علوم مهندسی آبیاری، (۱): ۳۶-۱۱۲.
- کلانتری، ن.، ایرانی اصل، ا.، محمدی، ه.، ۱۴۰۱. بررسی کمی و کیفی آبخوان باغملک با استفاده از روش تحلیل آماری، روش‌های هیدروشمیایی و GIS. هیدروژئولوژی، (۱): ۷-۱۱-۲۴.
- لاله زاری، ر.، طباطبایی، س.ح.، یارعلی، ن.، ۱۳۸۸. بررسی تغییرات ماهانه نیترا در آب زیرزمینی دشت شهرکرد و پهنه‌بندی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله پژوهش آب ایران، (۴): ۹-۱۷.
- موسوی سردشتی، ع.، سلیمانی، ک.، شکران، ف.، روشن، ح.، ۱۳۹۹. بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی لردگان با استفاده از روش های زمین آمار. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۰(۳): ۲۶۲-۲۷۵.
- نادری اشکفتکی، م.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، نصر اصفهانی، م.ع.، فتاحی نافچی، ر.، ۱۴۰۱. بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفیددشت و ارزیابی آن برای استفاده در مصارف کشاورزی. مجله هیدروژئولوژی، (۲): ۷-۹۱.
- نصیری، م.، حمیدی، م.، کاردان مقدم، ح.، ۱۳۹۸. ارزیابی روند تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان ساری- نکا). مجله آبخوان و قنات، (۲): ۱۰۹-۱۲۲.

Reference

- Alley, W.M. (Ed). 1993. Regional Ground –Water Quality. Van Nostrand Reinhold, New York, 634 p.
- Dorgham, M.M., Abdel-Aziz, N.E., El-Deeb, K.Z., Okbah, M.A., 2004. Eutrophication Problems in the Western Harbour of Alexandria. Egypt. Oceanologia, 46(1): 25-44.
- Ershad Hosseini, M., Keshtkar, A., Hosseini, S., Afzali, A., 2021. Analysis of temporal trend of groundwater quality using nonparametric Mann-Kendall and Sen's methods (Case study: Yazd-Ardakan Plain). Geography and Environmental Planning, 32(4): 87-106. doi: 10.22108/gep.2021.127620.1404. [In Persian]
- Fathihafshejani, E., Beygiharchegani, H., 2012. Spatial variability of Nitrate and Phosphate and their mapping in the Shahrekord groundwater. Irrigation Sciences and Engineering, 36(1): 103-112. [In Persian]
- Gholami, F., Zarei, H., Marofi, S., 2021. Trend analysis of groundwater quantity and quality parameters (Case study: Tuyserkhan Plain). Irrigation Sciences and Engineering, 44(1): 127-140. doi: 10.22055/jise.2021.20618.1487. [In Persian]
- Hamed, K.H., 2007. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of Hydrology, 349: 350-363.
- Hamed, K.H., Rao, A.R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, 204: 182-196.

- Marsick, A., André, H., Khelf, I., Leclère, Q., Antoni, J., 2024. Benefits of Mann–Kendall trend analysis for vibration-based condition monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 216, 111486.
- Mousavi, A., Solaimani, K., Shokrian, F., Roshun, S.H., 2020. Investigation of spatio-temporal variation in groundwater resource quality using geo-statistical methods (Case study: Lordegan Plain, Chaharmahal and Bakhtiyari Province). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 10(3), 262-275. [In Persian]
- Naderi Eshkaftaki, M., Mirabbasi, R., Nasr Esfahani, M.A., 2023. Investigation of temporal and spatial variations of groundwater quality in Sefiddasht Plain and suitability evaluation for agricultural use. *Hydrogeology*, 7(2), 91-108. doi: 10.22034/hydro.2022.51732.1266. [In Persian]
- Nasiri, M., Hamidi, M., Kardan Moghaddam, H., 2023. Investigation of groundwater quantitative and qualitative variations trends (Case study: Sari-Neka aquifer). *Journal of Aquifer and Qanat*, 3(2): 109-122. doi: 10.22077/jaaq.2019.1949.1012. [In Persian]
- Panahi, M., Misaqi, F., Ghanbari, F. 2017. Determining of trend variation in quality parameters of Shabestar plain underground water. *Advanced Environmental Sciences*, 15(3): 19-38. [In Persian]
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficients based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1380.
- Shabani, M., 2021. Study of changes in groundwater quality in Arsanjan Plain. *Quarterly Journal of Physical Geography*, 3: 71-82. [In Persian]
- Torabipoudeh, H., Yonesi, H., Arshia, A., 2020. Evaluation of Quality Changes in the Groundwater Resources and IRWQIGC Upstream of Zayandehrood Dam. *Journal of Water and Soil Science*, 24 (2): 27-40. [In Persian]
- Wang, S., Wan, Z.H., 2023. Water quality trends based on Mann-Kendall test and rescaled extreme difference analysis: a case study of Shanxi reservoir, China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 21(4): 2793-2803.
- Hasani, Z., Mirabbasi, R., Ghasemi, A.R., 2018. Prediction of groundwater quality in Khanmirza plain using decision tree method. *Hydrogeology*, 3(1): 99-110. doi: 10.22034/hydro.2018.5568. [In Persian]
- Hashim, M., Nayan, N., Liesnoor Setyowati, D., Mat Said, N., Mahat, H., Saleh, Y., 2021. Analysis of water quality trends using the Mann-Kendall test and Sen's estimator of slope in a Tropical River Basin. *Pollution*, 7(4): 933-942. doi:10.22059/poll.2021.325794.1118
- Heshmati, S., Beigi, H., 2012. Spatial variability and mapping of Shahrekord groundwater quality for use in the design of irrigation systems. *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(1): 43-59. doi: 10.22092/jwra.2012.118950. [In Persian]
- Jabraili Andarian, N., Nadiri, A.A., Gharekhani, M., 2024. Investigating the quantity and quality of groundwater and its effect on the hydrogeochemistry of the Azarshahr plain aquifer and identifying the possible source of contamination. *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(38): 79-60. doi: 10.22034/hyd.2024.58969.1710. [In Persian]
- Jafari, M., Tavili, A., 2020. Reclamation of Aridlands. University of Tehran Press. 362p. [In Persian]
- Kalantari, N., Irani Asl, E., Mohammadi, H., 2022. Assessment of quality and quantity of Baghmalek aquifer using Statistical analysis hydrochemical method and GIS. *Hydrogeology*, 7(1), 11-24. doi: 10.22034/hydro.2022.12423. [In Persian]
- Khaliq, M.N., Ouarda, T., Gachon, P., Sushama, L., St-Hilaire, A., 2009. 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*, 368: 117-130.
- Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., Thurner, K., 2009. Stream flow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*, 374: 171–183.
- Lalehzari, R., Tabatabaei, S., Yarali, N., 2009. Variation of nitrate contamination in Shahrekord aquifer and its mapping using GIS. *Iranian Water Research Journal*, 3(1): 9-17. [In Persian]