



بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت و ارزیابی آن برای استفاده در مصارف کشاورزی

محسن نادری اشکنکی^۱، رسول میرعباسی نجف آبادی^{۲*}، محمدعلی نصر اصفهانی^۳

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

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

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

* نویسنده مسئول: mirabbasi_r@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲

چکیده

آب‌های زیرزمینی از منابع با ارزش برای تأمین آب موردنیاز مصارف مختلف در تمام مناطق، به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت سفیددشت واقع در استان چهارمحال و بختیاری و قابلیت استفاده آن برای مصارف کشاورزی پرداخته شده است. بدین منظور، از سری زمانی متغیرهای کیفی اندازه‌گیری شده در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری (شامل ۶ چاه، ۲ قنات و یک چشمه) در سطح دشت سفید دشت در طی دوره آماری ۲۹ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۸) استفاده شد. روند تغییرات متغیرهای کیفی آب زیرزمینی این دشت با استفاده از آزمون ناپارامتری مان-کندال اصلاح شده (پس از حذف کامل اثر خودهمبستگی) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای هر سری زمانی شیب خط روند با استفاده از تخمین‌گر شیب Sen محاسبه شد. نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی طی سال‌های اخیر در برخی نقاط به خصوص بخش‌های جنوبی سفید دشت کاهش یافته است. به منظور ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی در ابتدا و انتهای دوره آماری، دقت روش‌های زمین آماری مختلف، از جمله روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، کریجینگ (Kriging)، کوکریجینگ (Co-Kriging) و غیره برای سفید دشت مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان داد روش IDW برای این دشت از دقت بالاتری برخوردار است. مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد مطالعه نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی این دشت طی این ۲۹ سال افت کرده است. در نهایت، قابلیت استفاده آب زیرزمینی دشت سفید دشت برای مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام USSL برای ابتدا و انتهای دوره آماری مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج حاکی از کاهش کیفیت و کلاس طبقه‌بندی آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی می‌باشد، که این کاهش کیفیت در بخش‌های جنوبی دشت محسوس‌تر است.

واژه‌های کلیدی: دیاگرام USSL، روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، روند، کیفیت آب زیرزمینی، مان-کندال.

مقدمه

اقتصادی یک منطقه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش بسزایی داشته باشد (معمدی راد و همکاران، ۱۴۰۰). امروزه بیشتر نیاز آبی مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به دلیل عدم وجود آب‌های سطحی مستمر و مناسب، از منابع آب زیرزمینی و از طریق چاه‌های حفر شده تأمین می‌گردد (ولایتی، ۱۳۷۸).

مصرف آب از زمان انقلاب صنعتی با توسعه روزافزون شهرها و بالا رفتن جمعیت بطور مداوم افزایش یافته است. با توجه به این که منابع آب زیرزمینی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به شمار می‌روند، شناخت صحیح و با کیفیت مناسب منابع آبی می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و

دقیق‌تر، با صرف هزینه و زمان کمتر انجام گیرد. سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) یکی از ابزارهای متداول برای این منظور است و تکنیک‌های زمین‌آماري یکی از مهمترین قابلیت‌های این سامانه است. زمین‌آمار با استفاده از روش‌های میان‌یابی، سطوحی از داده‌ها ارائه می‌نماید که دارای همبستگی مکانی هستند. نقشه‌های حاصل از تکنیک‌های زمین‌آمار به عنوان ابزارهای گزینش اولیه برای اعمال سامانه‌های تصمیم‌گیری در استراتژی‌های مدیریت آب زیرزمینی در مقیاس محلی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Samson et al., 2010؛ نکوآمال کرمانی و میرعباسی نجف-آبادی، ۱۳۹۶). معمولاً جهت تعیین مناسب بودن کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف مختلف، پس از نمونه‌گیری، آزمایش‌های تجزیه شیمیایی روی نمونه‌ها انجام شده و با مقایسه نتایج آنها با مقادیر استاندارد، مناسب بودن کیفیت آب جهت هر نوع مصرف مشخص می‌گردد (طباطبائی، ۱۳۷۹). برای تعیین کیفیت آب از نظر قابلیت استفاده در مصارف کشاورزی از طبقه‌بندی USSL که یکی از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌ها در این زمینه می‌باشد، استفاده می‌شود (Wilcox, 1984).

تاکنون مطالعات بسیاری بر روی تغییرات زمانی و مکانی آب زیرزمینی و کیفیت آن انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود:

تابنده سیده و همکاران (۱۴۰۰) روش‌های مختلف درون‌یابی را در آبخوان کم‌عمق آمل-بابل با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی آن مورد ارزیابی قرار دادند. پارامتر کل جامدات محلول (TDS) در آبخوان کم‌عمق ساحلی بابل-آمل در مجاورت دریای خزر در شمال ایران در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. پس از پردازش اولیه اطلاعات جهت انتخاب روش درون‌یابی مناسب، چند روش درون‌یابی قطعی و زمین-آمار با عملکرد خطی و غیرخطی از جمله روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) مورد استفاده قرار گرفت. کمون و همکاران (۲۰۲۲) کیفیت آب‌های زیرزمینی آبخوان Enfidha در کشور تونس را با هدف مصارف کشاورزی و شرب مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در این مطالعه از روش‌های آماری و نمایش گرافیکی برای ارزیابی مناسب بودن کیفیت آب زیرزمینی برای اهداف کشاورزی و شرب استفاده کردند و از

کیفیت آب زیرزمینی یکی از جنبه‌های هیدروژئوشیمیایی می‌باشد که درباره توصیف شیمیایی آب، توزیع مکانی انواع متشکله‌های شیمیایی و قابلیت مصرف آب برای اهداف مختلف مانند مصارف شرب، کشاورزی و صنعت بحث می‌نماید (آلی، ۱۹۹۳). وقوع خشکسالی‌های شدید و برداشت بیش از حد، نه تنها بر کمیت و میزان منابع آب زیرزمینی تأثیر گذاشته، بلکه بر کیفیت پارامترهای شیمیایی آن نیز مؤثر بوده است که بدون شک برای منابع طبیعی کشور یک چالش جدی محسوب می‌شود (Dorgham et al., 2004). با در نظر گرفتن کمبود منابع آب در دسترس در آینده نزدیک و خطرات موجود، بررسی میزان کاهش سطح ایستایی و نیز تأثیرپذیری کیفیت آب زیرزمینی از آن، معنی‌دار بودن تغییرات آنها و آشکارسازی روند و یافتن عوامل مؤثر در این مسئله به عنوان ضرورتی برای عموم دست‌اندرکاران بخش کشاورزی به ویژه پژوهشگران علوم آب درآمده است که با بررسی آن، امکان تشخیص حدود استفاده قانون‌مند توسط مجریان، ارائه راهکارهایی در جهت حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب‌های زیرزمینی این بخش مشخص می‌شود. شناخت و تحلیل روند در داده‌های هیدروژئولوژیکی مشاهده شده یکی از ملزومات توسعه سیاست‌های آبی مناسب است (پناهی و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه تغییرات زمانی متغیرهای هیدرومتئورولوژیکی اغلب از روش‌های ناپارامتری برای بررسی وجود روند استفاده می‌شود، زیرا آزمون‌های ناپارامتری نسبت به آزمون‌های پارامتری برای سری داده‌هایی که توزیع آماری آنها نرمال نیست و یا دارای داده‌های پرت یا مفقود باشد، مناسب‌تر هستند. اغلب سری‌های زمانی مربوط به متغیرهای هیدرومتئورولوژیکی جزو این قبیل سری‌ها است. شرط استفاده از این آزمون‌ها عدم وجود خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی داده‌ها می‌باشد. از مشهورترین آزمون‌های آماری ناپارامتری می‌توان به آزمون‌های اسپیرمن و مان-کندال (Mann-Kendall) برای تعیین روند سری داده‌ها و روش تخمین‌گر شیب سن (Sen) برای تخمین شیب خط روند اشاره کرد.

مطالعات بسیاری در ارتباط با به کارگیری ابزارها و روش‌های مدرن جهت بررسی و ارزیابی منابع آب صورت گرفته است. در این مطالعات سعی شده تا بررسی کیفی منابع آب به‌طور

نمونه آب در مهر و موم‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ (۴ دوره)، از چاه-های مورد بهره‌برداری در نقاط مختلف استان جمع‌آوری کردند. نتایج نشان داد به‌طور کلی، روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در استان بوشهر در طی مهر و موم‌های مورد مطالعه منفی است و مدیریت منابع آب زیرزمینی در استان بوشهر ضروری به نظر می‌رسد. همچنین آب شهرستان جم بهترین کیفیت را دارد. طاهری تیزرو و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی کاربرد تکنیک زمین‌آمار برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت فومنات استان گیلان پرداختند. آنها از اطلاعات کیفی ۴۲ حلقه چاه مشاهداتی برای سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۳ به‌منظور تعیین بهترین روش میان‌یابی و تحلیل مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی استفاده کردند. کیفیت آب منطقه بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس در رده کمی شور و شور قرار گرفت. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای بین روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس وزنی فاصله) نشان داد که روش کوکریجینگ نتایج بهتری در برآورد غلظت پارامترهای کیفی در منطقه مورد بررسی داشت. با بررسی نقشه تغییرات مکانی EC و SAR در بازه ۵ ساله (۱۳۸۷-۱۳۸۲ و ۱۳۹۲-۱۳۸۷) مشخص شد که غلظت آنها در شرق دشت بیشتر از غرب و در مرکز دشت دارای روند افزایش غلظت بوده است. همچنین حاشیه‌های غرب و جنوب غربی دشت بهترین مناطق برای مصارف کشاورزی از نظر غلظت کمتر EC و SAR می‌باشند. (Hagage et al. (2022) در مطالعه‌ای به بررسی مناسب بودن سفره آب زیرزمینی کواترنری منطقه Akhmim واقع در کشور مصر برای مصارف شرب پرداختند. ایشان در این مطالعه از تکنیک‌های شاخص کیفیت آب و GIS استفاده کردند. همچنین برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، میانگین وزنی شاخص کیفیت آب (WAWQI) به‌کار گرفته شده است و طبق استانداردهای مصر و سازمان بهداشت جهانی به طبقه-بندی پارامترهای فیزیکی‌شیمیایی نمونه‌برداری شده، پرداختند. به‌منظور بررسی تغییرات مکانی WAWQI در منطقه Akhmim از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) استفاده شد. سفره آب زیرزمینی کواترنری، به نواحی عالی، خوب، ضعیف، بسیار فقیر و نامناسب تقسیم شد. نتایج نشان داد حدود ۵۰ درصد از چاه‌های منطقه Akhmim برای مصارف

طبقه‌بندی ویلکوکس^۱ برای بررسی مناسب بودن نمونه‌ها برای مصارف کشاورزی استفاده کردند. احمدپور و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی هیدروژئوشیمی منابع آب زیرزمینی قسمت شرقی آبخوان تهران پرداختند. نمونه‌های کیفیت آب برداشت شده با استفاده از روش‌های گرافیکی از جمله ویلکوکس مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب برای مصارف کشاورزی در محیط Arc GIS تهیه گردید. برای مصارف کشاورزی، نقشه پهنه‌بندی EC نشان داد که عمده کلاس آب مربوط به C3 و C4 است، اما وضعیت آب زیرزمینی از نظر مقادیر SAR و Na% مطلوب است. بر اساس دیگرام ویلکوکس بیشترین درصد کلاس‌ها متعلق به C3S1، C3S2 و C4S2 بود. خدادادی مهابادی و کوشافر (۱۴۰۰) کیفیت شیمیایی و میکروبی منابع آب زیرزمینی منطقه مهاباد را از نظر قابلیت استفاده در مصارف کشاورزی مورد ارزیابی قرار دادند. در این راستا از ۷ حلقه چاه در مناطق مختلف مهاباد که جهت آبیاری و کشاورزی استفاده می‌گردید نمونه-برداری صورت گرفت و پارامترهای مختلف فیزیکی‌شیمیایی همچون هدایت الکتریکی، اسیدیته، کدورت، دما، کلسیم، منیزیم و دیگر یون‌های اصلی اندازه‌گیری و سپس نتایج آن جهت مصارف شرب و کشاورزی با استفاده از شاخص‌های مختلف بررسی و علاوه بر آن کلیه پارامترها با استانداردهای ارائه شده توسط سازمان جهانی و استاندارد ملی ایران مقایسه گردید. در نهایت از شاخص کیفیت آب به عنوان یک شاخص اصلی تصمیم‌گیری جهت مناسب بودن آب جهت مصارف آبیاری استفاده شد. بر اساس نتایج آزمایش مناطق جنوبی به خصوص جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه دارای کیفیت نامناسب‌تری در اکثریت پارامترهای مورد اندازه‌گیری بوده اند که علت آن را به ساختار زمین شناسی منطقه از جمله قرارگیری بر روی سازندهای گچی و انحلال ژئوپس و نزدیکی به مراکز آلاینده صنعتی می‌توان نسبت داد. حمیدیان و همکاران (۱۳۹۶) با آزمایش و تعیین پارامترهای شیمیایی نمونه آب‌های برداشتی از چاه‌های آب شرب در طی مهر و موم‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰، شاخص‌های کیفی آب (WQI) و سایر پارامترهای شیمیایی موثر را محاسبه و به ارزیابی وضعیت کیفی آب زیرزمینی استان بوشهر پرداختند. آنها تعداد ۳۶۰

^۱ Willcox

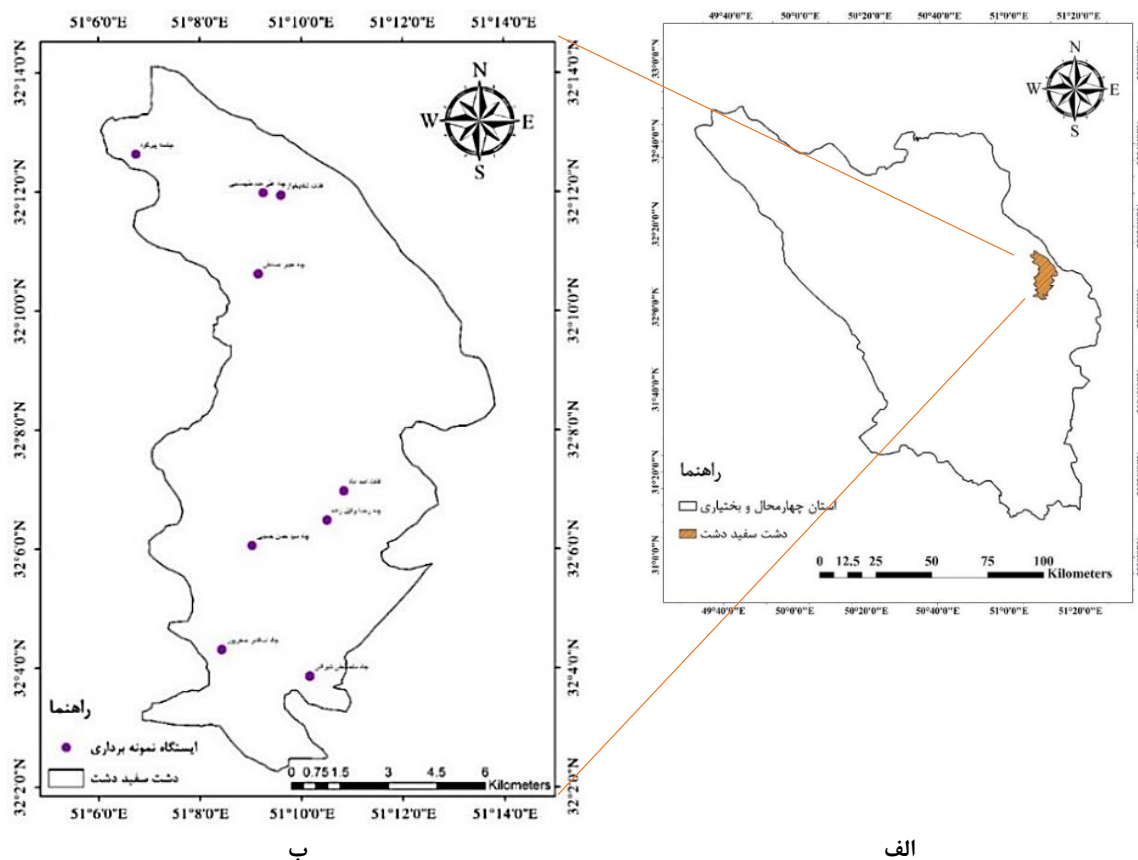
دشت سفیددشت از لحاظ تقسیمات کشوری، بخشی از استان چهارمحال و بختیاری، در حد فاصل شهرهای بروجن و شهرکرد در عرض‌های ۳۲ درجه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱ الف). این دشت واقع در شمال شهرستان بروجن و در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرکرد قرار گرفته که از قسمت غرب به دهنو، از شمال به شهرستان شهرکرد، از شرق به زرین شهر استان اصفهان و از قسمت جنوب به شهرستان بروجن منتهی می‌شود. دشت سفید دشت با مساحتی برابر ۱۳۴ کیلومتر مربع حدود ۰/۸۱ درصد از وسعت استان چهارمحال و بختیاری را به خود اختصاص داده است. همچنین ارتفاع متوسط این دشت در حوالی روستای سفیددشت ۱۱۹۰ متر از سطح دریاست. آب و هوای کوهستانی، غالب آب و هوا در منطقه مورد مطالعه است. رودخانه بیژگرد، خروجی و محل تخلیه آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت سفیددشت می‌باشد. آبخوان سفیددشت در یک ناودیس متقارن که می‌توان محور آن را در امتداد شمال-جنوب و در امتداد جاده شهرکرد به بروجن در نظر گرفت، گسترش دارد. با توجه به تقسیم‌بندی دومارتن و آمبرژه اقلیم منطقه جزو اقلیم‌های نیمه‌خشک و سرد و بر اساس طبقه‌بندی کوپن جزو اقلیم معتدل سرد با تابستان‌های گرم و خشک است. مقدار آب زیرزمینی در این دشت به عواملی چون مقدار بارش، تخلخل، جنس سنگ و نفوذپذیری بستگی دارد. دشت سفیددشت جزو وسیع‌ترین دشت‌های آبرفتی استان چهارمحال و بختیاری به شمار می‌رود. به دلیل برداشت‌های مازاد و بی‌رویه، کمبود بارش در سال‌های اخیر، خشکسالی‌ها و تغییر بارش که نوع عمده آن به صورت مایع است، حجم آب‌های زیرزمینی در این دشت به شدت کاهش یافته است. بادرفت‌ها، واریزه‌ها و پادگان‌های آبرفتی جز رسوبات آبرفتی این دشت می‌باشد که تحت‌تاثیر فعالیت‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی تولید شده و در مناطق پست حوضه بر روی هم انباشته شده‌اند. ضخامت آبرفت‌های موجود در این دشت از ۲۵ متر تا ۱۱۰ متر متغیر است. قدیمی‌ترین سازندهای زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه مربوط به دوران دوم زمین‌شناسی (کرتاسه) و جدیدترین آن‌ها بادرفت-ها، آبرفت‌ها، واریزه‌ها و تراس‌های آبرفتی می‌باشند.

شرب توصیه نمی‌شوند و در نواحی ضعیف تا نامناسب قرار دارند. همچنین برای استفاده از آب زیرزمینی از نظر مصارف شرب باید منابع آلوده‌ای که باعث کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌شوند، کاهش داده شوند و آب مورد استفاده قبل از شرب تصفیه شود. (Neissi et al. (2020 از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به منظور تخمین نسبت جذب سدیمی در دشت کشاورزی رامهرمز طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۹ استفاده کردند. متغیرهای اصلی کیفیت آب منطقه با توجه به تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون Na^+ و کل مواد جامد محلول (TDS) بودند. برای این منظور، از روش کریجینگ و روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای بررسی توزیع مکانی SAR در این دشت استفاده شد. یونسی و همکاران (۱۳۹۹) روند تغییرات بلندمدت کیفیت منابع آب زیرزمینی و همچنین محاسبه و پهنه‌بندی شاخص $IRWQI_{GC}$ و نیترات را در آبخوان‌های زیرحوضه جنوبی زاینده‌رود مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها از ۲۹۳۵ نمونه آزمایشگاهی در فصل‌های تر و خشک استفاده کردند. از آزمون مان-کندال برای بررسی روند تغییرات متغیرهای کیفی استفاده شد که نتایج نشان دهنده کاهش معنی‌دار کیفیت آب در طی زمان بود. همچنین با استفاده از روش کریجینگ، متوسط شاخص $IRWQI_{GC}$ و پهنه‌بندی نیترات انجام شد که نتایج شبیه‌سازی مطلوبی را به همراه داشت.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده به نظر می‌رسد که تاکنون مطالعات جامع و کاملی در مورد روند تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت انجام نشده است. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه بررسی روند زمانی و مکانی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی سفید دشت در دوره آماری ۲۹ ساله (۱۳۹۸-۱۳۷۰) به ترتیب با استفاده از روش مان-کندال و روش‌های زمین‌آماری با استفاده از نرم افزار Arc GIS می‌باشد. همچنین قابلیت استفاده از منابع آب زیرزمینی دشت سفید دشت برای مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام (USSL) United States Salinity Laboratory در دوره آماری ۲۹ ساله (۱۳۹۸-۱۳۷۰) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده



شکل ۱- الف) موقعیت دشت سفید دشت در استان چهارمحال و بختیاری و محدوده دشت سفید دشت و ب) موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری.

روش‌های مورد استفاده

بنابراین بهترین روش برای پهنه‌بندی می باشد. نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی برای ابتدا (۱۳۷۰) و انتهای (۱۳۹۸) دوره آماری مورد بررسی در محیط GIS برای متغیرهای کیفی فوق‌الذکر رسم و با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۱ (ب) محدوده دشت سفید دشت و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری مورد بررسی را نشان می دهد. روند تغییرات سری‌های زمانی متغیرهای کیفی منتخب در منطقه مورد مطالعه با استفاده از آزمون ناپارامتری مان-کندال (MK) و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون به‌طور وسیعی در مطالعات هیدروژئولوژی، هواشناسی و اقلیم‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرط لازم برای استفاده از این آزمون عدم وجود خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی داده‌ها می‌باشد، با این حال ممکن است داده‌ها دارای خودهمبستگی معنی‌دار باشند. بنابراین

در این مطالعه، جهت پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نتایج نمونه‌برداری ۹ ایستگاه (شامل ۶ چاه، ۲ قنات و یک چشمه) واقع در دشت استفاده شد. بدین منظور از جعبه ابزار Geostatistic نرم‌افزار Arc GIS برای پهنه‌بندی متغیرهای کیفی (TDS، TH، SAR، EC، Total Cations و Total Anions) آب زیرزمینی سفید دشت با روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) استفاده شد. روش IDW پس از مقایسه دقت روش‌های مختلف زمین‌آماري شامل وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، کریجینگ (Kriging)، کوکریجینگ (Co-Kriging) و غیره. برای این منظور استفاده شد، به‌صورتی که پس از مقایسه این روش با سایر روش‌های زمین‌آماري مشخص شد که درصد خطای استاندارد در روش IDW برای دشت سفیددشت کمتر از سایر روش‌ها بوده و

ارزش یکسان است. آماره آزمون مان-کندال (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 قدر مطلق 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 می‌توان گفت که فرض صفر به شرطی پذیرفته می‌شود که رابطه $-Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \leq Z \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ برقرار باشد.

آزمون مان-کندال با حذف کامل اثر خودهمبستگی داده‌ها (MMK)

آزمون مان-کندال اصلاح شده (MMK) توسط Hamed and Rao (1998) ارائه گردید. در این آزمون همه ساختار خودهمبستگی معنی‌دار در سری زمانی بررسی و حذف می‌گردد. در این روش، واریانس اصلاح شده $VAR(S)^*$ در محاسبه Z مان-کندال مورد استفاده قرار می‌گیرد که از معادله‌های زیر بدست می‌آید.

$$VAR(S)^* = VAR(S) \cdot \frac{n}{n^*} \quad (5)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(N-i-1)(n-i-2) \cdot r_i \quad (6)$$

که در آن، r_i ضریب خودهمبستگی با تاخیر i است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

در این رابطه، 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 مان-کندال، در رابطه (۳) مقدار $VAR(S)^*$ جایگزین مقدار $VAR(S)$ می‌گردد. Hamed and Rao (1998) نشان دادند که تشخیص روند معنی‌دار در سری با روش MMK دقیق‌تر از روش مان-کندال مرسوم (MK) می‌باشد. آزمون MMK در مطالعات متعددی از جمله Kumar et al. (2009) و همچنین Khaliq et al. (2009) برای تشخیص روند معنی‌دار در سری‌های زمانی هیدرومتئورولوژیک به کار رفته است.

ابتدا باید اثر خودهمبستگی داده‌ها حذف گردد تا بتوان از آزمون MK استفاده نمود، سپس داده‌های جدید تولید و روند آنها با آزمون مان-کندال مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمون مان-کندال با حذف ساختار کامل خودهمبستگی به صورت MMK نشان داده می‌شود.

آزمون مان-کندال بدون در نظر گرفتن خودهمبستگی داده‌ها (MK)

آزمون مان-کندال یکی از متداول‌ترین آزمون‌های آماری تشخیص روند در سری‌های زمانی است. از نقاط قوت این آزمون می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره نمود. تاثیرناپذیری این روش از مقادیر پرت که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردد، از دیگر مزایای استفاده از این آزمون است. در این آزمون فرض صفر (H_0) و فرض مقابل (H_1) به ترتیب معادل عدم وجود روند و وجود روند معنی‌دار در سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای است. روابط مربوطه جهت تعیین مقادیر آماره مان-کندال به صورت زیر است.

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

در این رابطه، n تعداد داده‌های موجود در سری، X_i و X_j به ترتیب داده‌های i ام و j ام در سری هستند. $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت است که به صورت زیر تعریف شده است.

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

در نهایت آماره Z آزمون مان-کندال با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه، $VAR(S)$ از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)] - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \quad (4)$$

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

در مطالعه حاضر، سطوح معنی‌داری ۱، ۵ و ۱۰ درصد برای تحلیل روند هر یک از سری‌های متغیر کیفی آب زیرزمینی سفید دشت در نظر گرفته شده است.

شیب خط روند

تخمین‌گر شیب روند Sen یک شاخص بسیار مفید در بررسی تغییرات سری‌های زمانی است که بزرگی روند یکنواخت را نشان می‌دهد. مقدار شیب روند با استفاده از شیوه ارائه شده توسط Sen (1968) و Theil (1950) با رابطه زیر برآورد می‌شود.

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_l}{j - l} \right) \quad \forall l < j \quad (8)$$

که در آن، β برآوردگر شیب خط روند و x_l مقدار مشاهده شماره l ام می‌باشد. مقادیر مثبت β نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی آن روند کاهشی را نشان می‌دهد. این روش در مطالعات هیدرولوژیکی بطور وسیعی استفاده شده است. در این مطالعه نیز شیب خط روند با استفاده از روش Sen محاسبه و در سطح معنی‌داری ۱، ۵ و ۱۰ درصد مورد آزمون قرار خواهد گرفت. در این مطالعه، ابتدا روند تغییرات متغیرهای کیفی آب زیرزمینی (EC، SAR، TH، TDS، Total Cations و Total Anions) دشت سفید دشت با استفاده از آزمون ناپارامتری مان-کندال اصلاح شده (MMK) مورد بررسی قرار گرفت. برای هر سری زمانی شیب خط روند با استفاده از روش تخمین‌گر شیب Sen محاسبه شد. سپس نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی در ابتدا و انتهای دوره آماری مورد بررسی (۱۳۷۰-۱۳۹۸) با استفاده از نرم‌افزار GIS و روش زمین‌آمار وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای دشت سفید دشت ترسیم شد. در نهایت، قابلیت استفاده آب زیرزمینی دشت سفید دشت برای مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام USSL برای ابتدا و انتهای دوره آماری مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی روند متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت

جدول ۱ مقادیر آماره Z مان-کندال اصلاح شده (MMK) متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت را طی دوره آماری ۲۹ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۸) نشان می‌دهد. در اکثر

ایستگاه‌های نمونه‌برداری، روند اغلب متغیرهای کیفی افزایشی است و تنها متغیر کیفی SAR در بیشتر ایستگاه‌های نمونه-برداری روند کاهشی معنی‌دار دارد؛ زیرا به دلیل اضافه برداشت از چاه‌های موجود، کاهش نزولات جوی و بحران‌های بوجود آمده ناشی از خشکسالی‌های اخیر حجم منابع زیرزمینی با تغییراتی مواجه بوده که این تغییرات بر متغیرهای کیفی نیز تأثیرگذار بوده است. همچنین تعداد سری‌های با روند مثبت و افزایشی در هر سه سطح معنی‌داری ۱۰، ۵ و ۱ درصد بیشتر از سری‌های با روند معنی‌دار کاهشی است.

نتایج حاصل از بررسی روند متغیر کیفی هدایت الکتریکی (EC)

همان‌طور که از جدول ۱ و شکل ۲ می‌توان استنباط کرد، متغیر EC در سطح دشت سفید دشت در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی بدون روند معنی‌دار بوده است که از این میان، ایستگاه‌های چشمه پیرکوه، چاه اسکندر صفرپور، چاه خیبر صادقی، قنات شادبخوار و چاه رضا وکیل‌زاده بدون روند معنی‌دار هستند و بقیه ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌دار افزایشی می‌باشند. چاه سیدحسن حسینی دارای روند معنی‌دار افزایشی در سطح معنی‌داری ۱ درصد و ۳ ایستگاه چاه علی مدد طهماسبی، چاه سلطانعلی شیرانی و قنات اسدآباد دارای روند معنی‌دار افزایشی در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد می‌باشند. همچنین چاه سیدحسن حسینی با داشتن آماره Z برابر با ۲/۳۶ بیشترین روند معنی‌دار افزایشی و قنات اسدآباد با داشتن آماره Z برابر با ۱/۷۳ کمترین روند معنی‌دار افزایشی را دارد.

نتایج حاصل از بررسی روند متغیر کیفی نسبت جذبی سدیم (SAR)

همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۲ مشاهده می‌شود، متغیر SAR در سطح دشت سفید دشت در اکثر ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌دار کاهشی بوده و تنها در ۳ ایستگاه چاه اسکندر صفرپور، چاه سیدحسن حسینی و چاه خیبر صادقی بدون روند معنی‌دار بوده است. ۴ ایستگاه چاه علی مدد طهماسبی، قنات شادبخوار، چاه سلطانعلی شیرانی و قنات اسدآباد دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۱ درصد و همچنین ۲ ایستگاه چشمه پیرکوه و چاه رضا وکیل-زاده دارای روند معنی‌دار کاهشی در سطح معنی‌داری ۵ درصد می‌باشند. شدیدترین روند معنی‌دار کاهشی مربوط به چاه علی

و تنها ۳ ایستگاه چاه خیبر صادقی، قنات شادیکوار و چاه رضا و کیل زاده بدون روند معنی دار می باشند. چشمه پیرکوه دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱ درصد، ۲ ایستگاه چاه اسکندر صفرپور و چاه سیدحسن حسینی دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۵ درصد و ۳ ایستگاه چاه علی مدد طهماسبی، چاه سلطانعلی شیرانی و قنات اسداباد دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱۰ درصد می باشند. شدیدترین و کمترین روند معنی دار مثبت و افزایشی به ترتیب به چشمه پیرکوه و قنات اسداباد اختصاص دارد.

نتایج حاصل از بررسی روند متغیر کیفی کل آنیون ها (Total Anions)

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱ و شکل ۲، مشاهده می شود که کل آنیون ها در ۴ ایستگاه چاه خیبر صادقی، قنات شادیکوار، چاه رضا و کیل زاده و قنات اسداباد بدون روند معنی دار بوده و ۵ ایستگاه دارای روند معنی دار افزایشی هستند که از این ایستگاهها چشمه پیرکوه دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱ درصد، چاه سید حسن حسینی دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۵ درصد و ۳ ایستگاه چاه اسکندر صفرپور، چاه علی مدد طهماسبی و چاه سلطانعلی شیرانی دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱۰ درصد می باشند. شدیدترین و کمترین روند معنی دار مثبت و افزایشی به ترتیب به چشمه پیرکوه و چاه سلطانعلی شیرانی اختصاص دارد.

نتایج حاصل از بررسی شیب خط روند متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت

جدول ۲ شیب خط روند را برای متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت در طی دوره آماری ۲۹ ساله مورد بررسی (۱۳۹۸-۱۳۷۰) نشان می دهد. میانه شیب متغیرهای کیفی مختلف به جز تعداد محدودی که صفر یا منفی است، برای همه ایستگاهها مثبت و افزایشی است. بیشترین روند افزایشی مربوط به ایستگاه چاه علی مدد طهماسبی از نظر متغیر کیفی EC و TH است که در شمال دشت سفید دشت قرار دارد و بیشترین روند کاهش و منفی نیز مربوط به ایستگاه چاه رضا و کیل زاده از نظر متغیر کیفی EC و TDS است.

مدد طهماسبی و کمترین روند معنی دار کاهش و مربوط به چاه رضا و کیل زاده می باشد.

نتایج حاصل از بررسی روند متغیر کیفی کل مواد جامد محلول (TDS)

با توجه به نتایج جدول ۱ و شکل ۲ مشاهده می شود که متغیر TDS در سطح دشت سفید دشت در اکثر ایستگاهها دارای روند معنی دار افزایشی بوده و تنها در ۳ ایستگاه چاه خیبر صادقی، قنات شادیکوار و چاه رضا و کیل زاده بدون روند معنی دار بوده است. ۲ ایستگاه چشمه پیرکوه و چاه سیدحسن حسینی دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱ درصد، چاه علی مدد طهماسبی دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۵ درصد و ۳ ایستگاه چاه اسکندر صفرپور، چاه سلطانعلی شیرانی و قنات اسداباد دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱۰ درصد می باشند. چشمه پیرکوه شدیدترین روند معنی دار افزایشی و قنات اسداباد کمترین روند معنی دار افزایشی را دارند.

نتایج حاصل از بررسی روند متغیر کیفی سختی کل (TH)

همان طور که از جدول ۱ و شکل ۲ می توان استنباط کرد، متغیر TH در سطح دشت سفید دشت در اکثر ایستگاهها دارای روند معنی دار افزایشی بوده و تنها در ۲ ایستگاه قنات شادیکوار و چاه رضا و کیل زاده بدون روند معنی دار بوده است. چشمه پیرکوه دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱ درصد، ۲ ایستگاه چاه اسکندر صفرپور و چاه سلطانعلی شیرانی دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۵ درصد و همچنین ۴ ایستگاه چاه سیدحسن حسینی، چاه خیبر صادقی، چاه علی مدد طهماسبی و قنات اسداباد دارای روند معنی دار افزایشی در سطح معنی داری ۱۰ درصد می باشند. چشمه پیرکوه شدیدترین روند معنی دار افزایشی و قنات اسداباد کمترین روند معنی دار افزایشی را دارند.

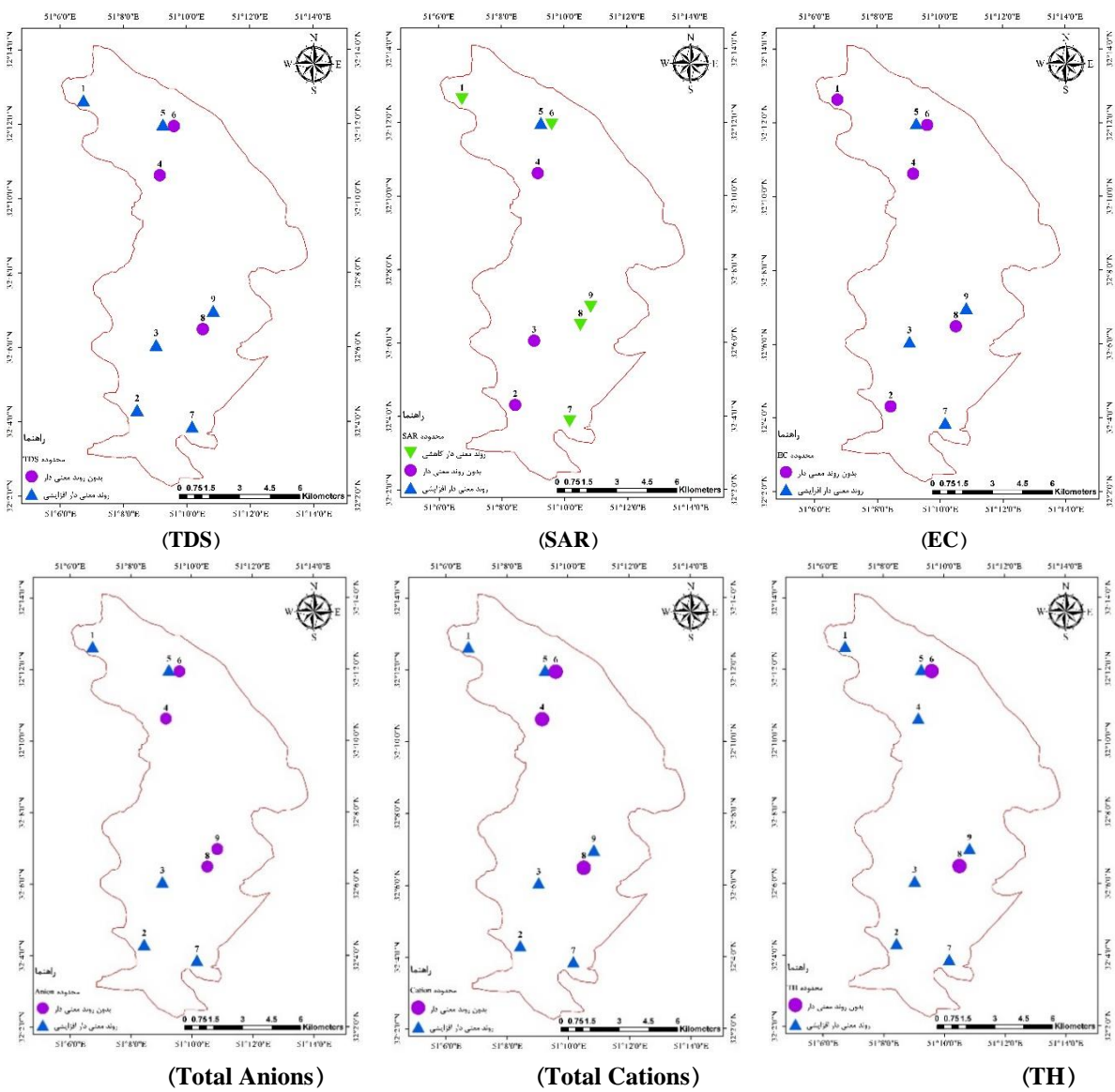
نتایج حاصل از بررسی روند متغیر کیفی کل کاتیون ها (Total Cations)

همان طور که در جدول ۱ و شکل ۲ مشاهده می شود، بررسی کل کاتیون ها در سطح دشت سفید دشت بیانگر این است که اکثر ایستگاهها دارای روند معنی دار افزایشی هستند

جدول ۱- آماره Z مان-کندال متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت (۱۳۷۰-۱۳۹۸).

ایستگاه	(W9)	(W8)	(W7)	(W6)	(W5)	(W4)	(W3)	(W2)	(W1)
منظیر کیفی	قنات اسداباد	چاه رضا وکیل زاده	چاه سلطانی شیرازی	قنات شادپخور	چاه علی محمد طهماسبی	چاه خبیر صادقی	چاه سید حسن حسینی	چاه اسکندر صفرپور	چشمه پیرزاده
EC	1.73	-0.64	1.77	0.95	1.91	1.40	2.36**	-0.48	-0.48
TDS	1.71	-0.64	1.79	1.00	2.02*	1.56	2.35**	1.95	2.53**
TH	1.72	1.47	1.96*	1.36	1.76	1.83	1.82	2.24*	2.47**
SAR	-2.73**	-2.19*	-2.37**	-2.68**	-2.76**	1.18	-0.67	0.00	-2.26*
Cations	1.69	0.01	1.80	1.03	1.82	1.43	2.18*	2.02*	2.47**
Anions	1.58	0.06	1.77	1.11	1.89	1.48	2.15*	1.89	2.47**

*روند معنی دار در سطح معنی داری ۱۰ درصد به صورت بولد و بدون ستاره، در سطح معنی داری ۵ درصد به صورت بولد همراه با یک ستاره و در سطح معنی داری ۱ درصد به صورت بولد همراه با دو ستاره مشخص شده است.



شکل ۲- روند تغییرات متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت در سطح معنی داری ۱۰ درصد (۱۳۷۰-۱۳۹۸).

جدول ۲- مقادیر آماره تخمین‌گر شیب Sen (β) شیب خط روند متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت (۱۳۷۰-۱۳۹۸).

متغیر کیفی	چشمه پیرکوه	چاه اسکندر صفربور	چاه سبید حسن حسینی	چاه خبیر صادقی	طهماسبی چاه علی محمد	فئات شادپنجوار	چاه سلطانعلی شیرانی	چاه رضا وکیل زاده	فئات اسدآباد
EC	0.00	0.00	1.75	3.63	1.09	0.29	7.11	-0.73	0.90
TDS	0.32	5.97	1.17	2.37	0.69	0.19	1.79	-0.48	0.58
TH	0.43	2.25	0.93	1.01	0.56	0.29	4.54	0.51	0.57
SAR	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
Cations	0.01	0.10	0.03	0.04	0.02	0.01	0.08	0.00	0.01
Anions	0.01	0.10	0.03	0.04	0.02	0.01	0.08	0.00	0.01

نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت

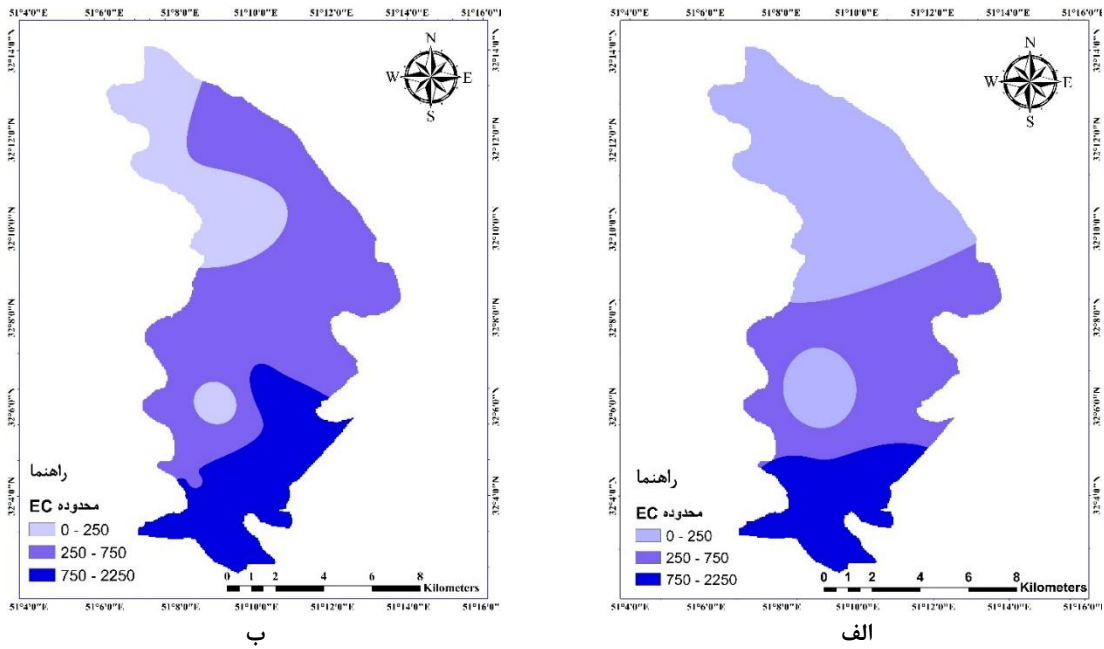
تغییرات مکانی متغیرهای کیفی (EC, SAR, TDS, TH, Total Anions و Total Cations) مربوط به دشت سفیددشت در ابتدای دوره مورد مطالعه (سال ۱۳۷۰) و انتهای دوره (سال ۱۳۹۸) بررسی شدند و با استفاده از نرم‌افزار GIS نقشه‌های پهنه‌بندی مربوط به آن‌ها رسم گردید. که در ادامه نتایج مربوط به هر متغیر کیفی و نقشه‌های مربوط به آن به تفکیک ارائه شده است.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیر کیفی هدایت الکتریکی (EC)

شکل ۳ نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی EC را در سطح دشت سفید دشت در ابتدا (۱۳۷۰) و انتهای (۱۳۹۸) دوره آماری مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل قابل استنباط است، در سال ۱۳۷۰ از بخش‌های شمالی دشت به سمت بخش‌های جنوبی دشت، به تدریج بر غلظت متغیر کیفی EC افزوده شده و بیشترین غلظت این متغیر کیفی در قسمت جنوبی دشت مشاهده شده است. مقدار EC در بخش شمال غربی دشت از (micromhos/cm) ۲۵۰ کمتر بوده و با توجه به دیگرام USSL کیفیت این بخش از دشت در کلاس کیفی C1 و رده عالی قرار می‌گیرد. در بخش‌های شمال شرقی و مرکزی دشت مقدار EC بین (micromhos/cm) ۲۵۰ تا

(micromhos/cm) ۷۵۰ تغییر می‌کند که با توجه به دیگرام USSL، کیفیت این بخش از دشت در کلاس کیفی C2 قرار می‌گیرد. همچنین بخش‌های جنوب و جنوب شرقی دشت با داشتن مقدار EC بین (micromhos/cm) ۷۵۰ تا (micromhos/cm) ۲۲۵۰، با توجه به دیگرام USSL در کلاس کیفی C3 قرار دارد.

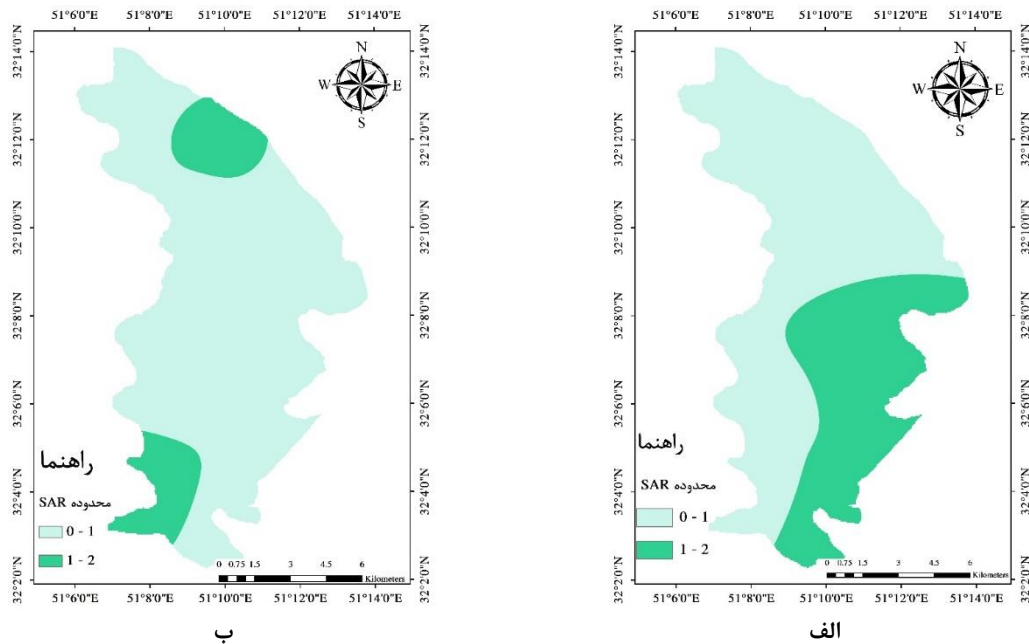
در سال ۱۳۹۸ نیز غلظت EC از سمت شمال دشت به طرف بخش‌های جنوبی دشت افزایش یافته است و بیشترین غلظت این متغیر کیفی در قسمت جنوبی دشت مشاهده شده است. با مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی EC در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از لحاظ متغیر کیفی EC کاهش پیدا کرده است، چون از مساحت بخش‌هایی از دشت که مقدار EC آنها در رده عالی و خوب قرار دارد، کاسته شده و همچنین بر مساحت بخش‌هایی که کیفیت آن در رده متوسط قرار دارد، افزوده شده است. در تحقیقی خدابخشی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان سفید دشت با استفاده از GIS پرداختند و نتایج آنها نشان داد روند تغییرات کیفی این آبخوان از سمت شمال به سمت جنوب افزایش می‌باشد و بیشترین غلظت در نواحی جنوبی آبخوان سفید دشت مشاهده گردید که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز مطابقت دارد.



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی EC در سطح دشت سفید دشت، (الف) سال ۱۳۷۰ و (ب) سال ۱۳۹۸.

عالی و کلاس کیفی S1 قرار می‌گیرد. با توجه به این متغیر کیفی و همچنین متغیر کیفی EC که در قسمت قبل به طور کامل شرح داده شد، می‌توان کلاس کیفی هر نقطه از دشت را برای مصارف کشاورزی را با توجه به دیاگرام USSL مشخص کرد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیر کیفی نسبت جذبی سدیم (SAR)
شکل ۴ نقشه‌های پهنه‌بندی متغیر کیفی SAR را برای سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. آب زیرزمینی دشت سفید دشت از لحاظ متغیر کیفی SAR از سال ۱۳۷۰ تا سال ۱۳۹۸ در بازه ۰ تا ۲ قرار دارد. با توجه به دیاگرام USSL، کیفیت آب زیرزمینی دشت بر اساس این متغیر کیفی در رده



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی SAR در سطح دشت سفید دشت، (الف) سال ۱۳۷۰ و (ب) سال ۱۳۹۸.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیر کیفی سختی کل (TH)

شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی سختی کل (TH) را در سطح دشت سفید دشت برای سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. در سال ۱۳۷۰ سختی کل آب زیرزمینی دشت سفید دشت بین ۰ تا ۲۵۰ قرار داشته است. همچنین به مرور زمان و در سال ۱۳۹۸ سختی کل (TH) افزایش یافته و بیشترین مقدار این متغیر در قسمت جنوبی و جنوب شرقی دشت سفید دشت مشاهده شده که با رنگ تیره‌تر در شکل قابل مشاهده است.

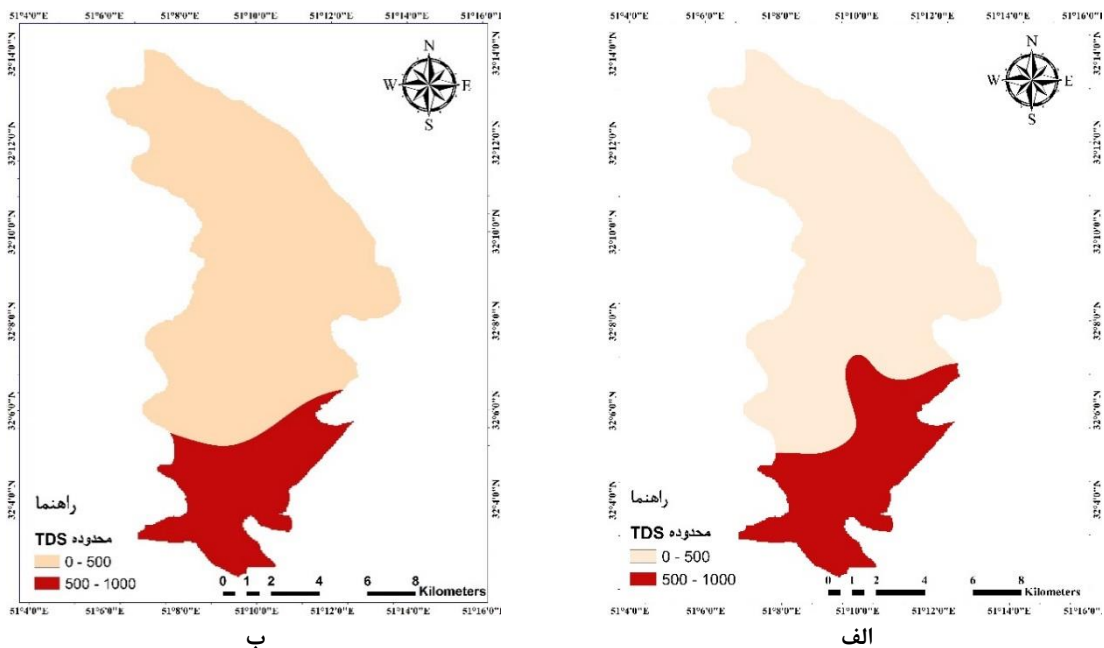
نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیر کیفی کل کاتیون‌ها (Total Cations)

شکل ۷ نقشه‌های پهنه‌بندی متغیر کیفی Total Cations را برای سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که نقشه‌ها نشان می‌دهند، مقدار کل کاتیون‌های موجود در آب زیرزمینی دشت سفیددشت در طی این ۲۹ سال افزایش پیدا کرده است، به طوری که این افزایش از شمال دشت به سمت جنوب آن بیشتر بوده و تغییرات در بخش جنوب دشت محسوس‌تر است. همچنین بیشترین غلظت کل کاتیون‌ها در قسمت جنوبی دشت مشاهده شده است.

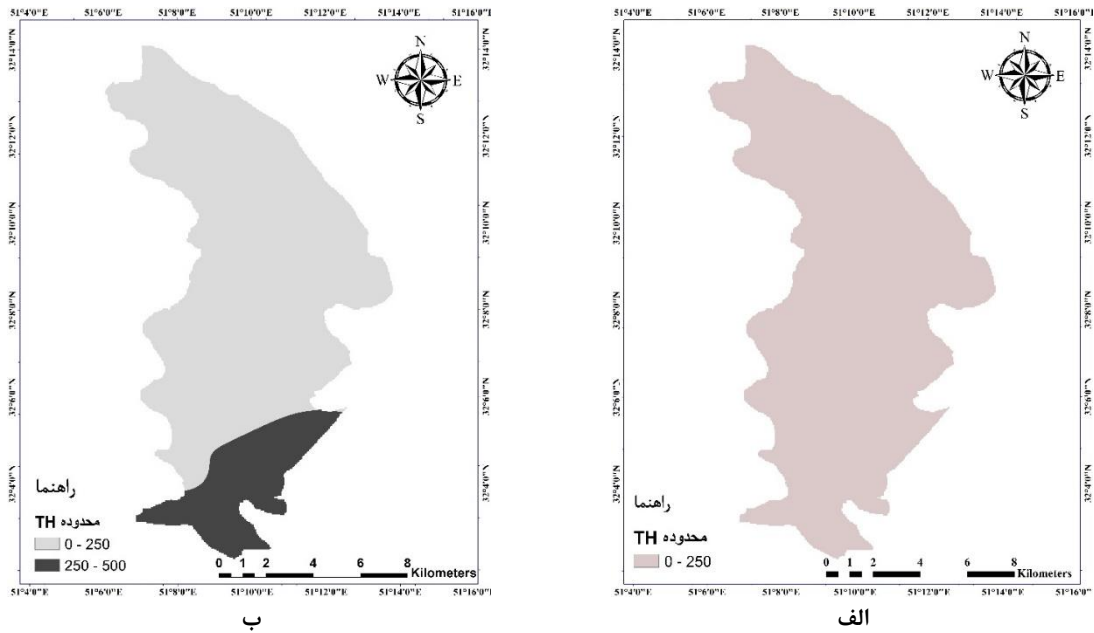
نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیر کیفی کل مواد جامد (TDS)

شکل ۵ نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی TDS را در سطح دشت سفید دشت برای سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در سال ۱۳۷۰ بیشترین غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) در آب زیرزمینی دشت سفید دشت در قسمت جنوبی و جنوب شرقی آن قرار دارد که با رنگ قرمز پررنگ در شکل قابل مشاهده است. همچنین در سال ۱۳۹۸ بیشترین غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) در آب زیرزمینی دشت سفید دشت در قسمت جنوبی آن قرار دارد.

با مقایسه سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ می‌توان استنباط کرد که به مرور زمان کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از لحاظ متغیر کیفی کل مواد جامد محلول (TDS) کاهش پیدا کرده است، چون اعدادی که ایستگاه‌های مورد بررسی در رابطه با این متغیر کیفی در سال ۱۳۹۸ به خود اختصاص داده اند از مقادیری که برای آنها در ابتدای دوره آماری (سال ۱۳۷۰) به ثبت رسیده است، بیشتر است.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی TDS در سطح دشت سفید دشت، الف) سال ۱۳۷۰ و ب) سال ۱۳۹۸.

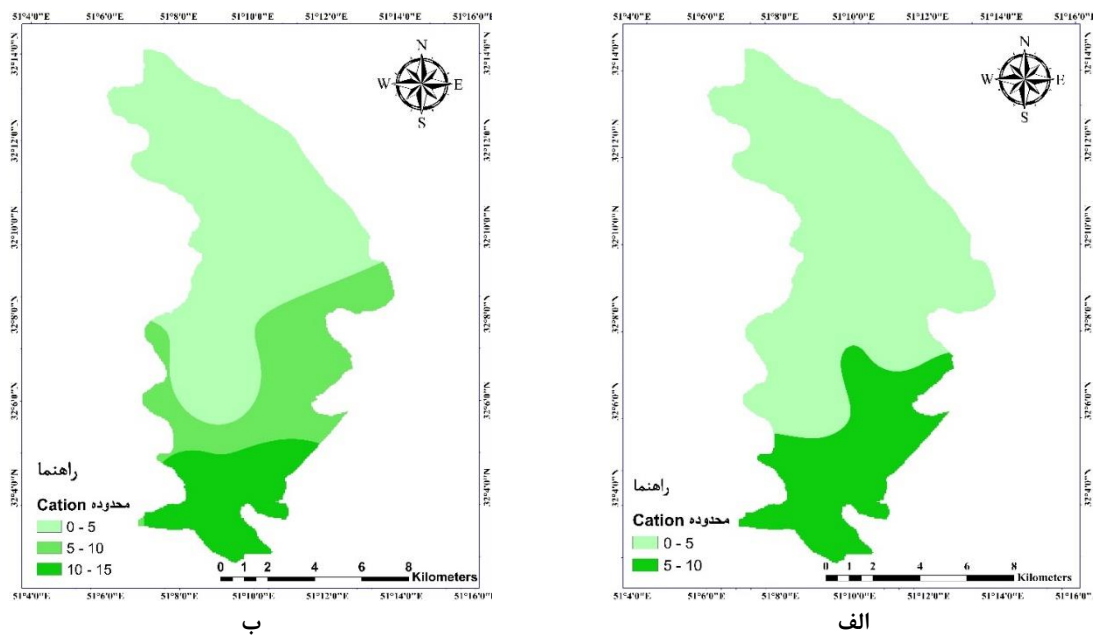


شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی TH در سطح دشت سفید دشت، الف) سال ۱۳۷۰ و ب) سال ۱۳۹۸.

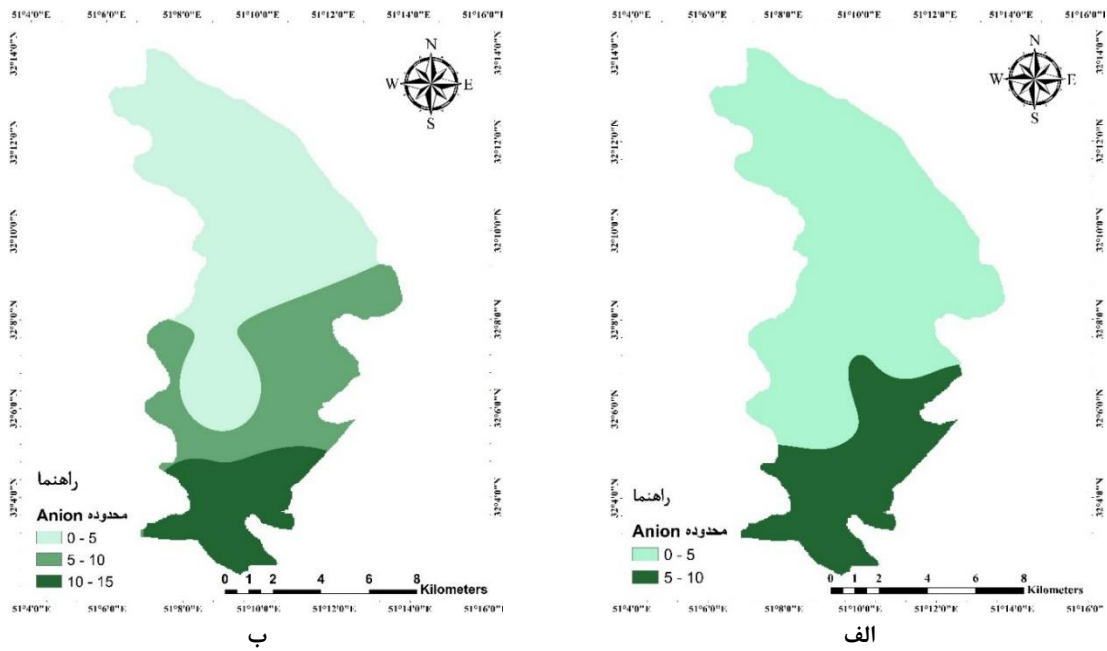
کاتیون‌ها بوده است. مقدار کل آنیون‌های موجود در آب زیرزمینی دشت سفید دشت در طی این ۲۹ سال افزایش پیدا کرده است، به طوری که از سمت شمال دشت به سمت جنوب، این افزایش بیشتر بوده و تغییرات در بخش جنوب دشت محسوس‌تر است. همچنین بیشترین غلظت کل آنیون‌ها در قسمت جنوبی دشت اندازه‌گیری شده است.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی متغیر کیفی کل آنیون‌ها (Total Anions)

شکل ۸ نقشه‌های پهنه‌بندی متغیر کیفی Total Anions را برای سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همان‌طور که نقشه‌ها نشان می‌دهند، تغییرات مقدار کل آنیون‌های موجود در آب زیرزمینی دشت سفید دشت کاملاً مشابه تغییرات کل



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی Total Cations در سطح دشت سفید دشت الف) سال ۱۳۷۰ و ب) سال ۱۳۹۸.

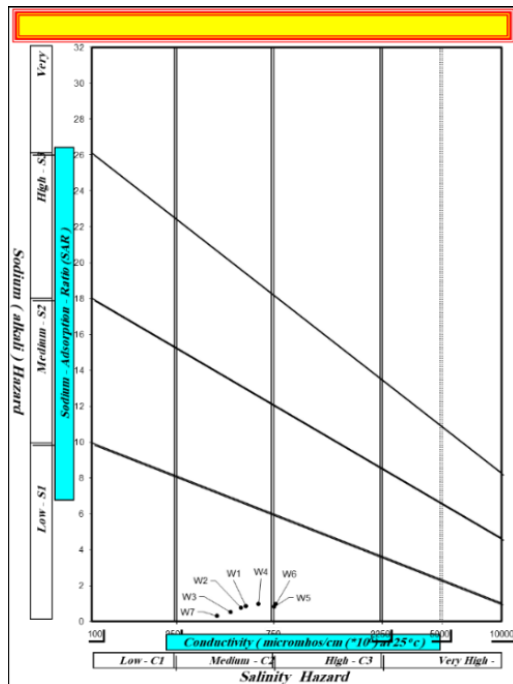


شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی متغیر کیفی Total Anions در سطح دشت سفید دشت، (الف) سال ۱۳۷۰ و (ب) سال ۱۳۹۸.

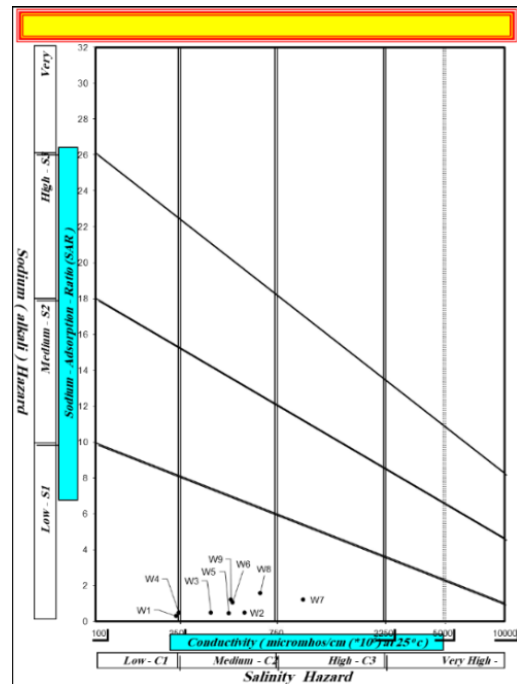
۱۳۷۰ و ۱۳۹۸ مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۹ و جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. قابل ذکر است که نام اختصاری نقاط نمونه‌برداری در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نظر قابلیت مصارف کشاورزی

کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از لحاظ قابلیت مصارف کشاورزی بر اساس دیاگرام USSL برای سال‌های



ب



الف

شکل ۹- طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نظر قابلیت استفاده در مصارف کشاورزی بر اساس دیاگرام USSL در، (الف) سال ۱۳۷۰ و (ب) سال ۱۳۹۸.

جدول ۳- طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نظر قابلیت استفاده در مصارف کشاورزی بر اساس دیاگرام USSL در سال ۱۳۷۰.

ردیف	محل نمونه برداری	نام اختصاری	کلاس کیفیت آب	رده کیفیت آب برای مصارف کشاورزی
۱	چشمه پیرکوه	W1	C1-S1	شیرین - کاملاً بی‌ضرر
۲	چاه اسکندر صفرپور	W2	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۳	چاه سید حسن حسینی	W3	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۴	چاه خیبر صادقی	W4	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۵	چاه علی مدد طهماسبی	W5	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۶	قنات شادبخوار	W6	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۷	چاه سلطانعلی شیرانی	W7	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۸	چاه رضا وکیل زاده	W8	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۹	قنات اسداباد	W9	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی

جدول ۴- طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نظر قابلیت استفاده در مصارف کشاورزی بر اساس دیاگرام USSL در سال ۱۳۹۸.

ردیف	محل نمونه برداری	نام اختصاری	کلاس کیفیت آب	رده کیفیت آب برای مصارف کشاورزی
۱	چشمه پیرکوه	W1	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۲	چاه اسکندر صفرپور	W2	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۳	چاه سید حسن حسینی	W3	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۴	چاه خیبر صادقی	W4	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۵	چاه علی مدد طهماسبی	W5	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۶	قنات شادبخوار	W6	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۷	چاه سلطانعلی شیرانی	W7	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی

بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفیددشت از نظر قابلیت مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام USSL در انتهای دوره آماری مورد بررسی (سال ۱۳۹۸) نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در این سال در کلاس کیفیت C2-S1 و در رده کیفیت کمی شور و خوب قرار گرفته‌اند و از نظر کشاورزی مناسب بوده و هیچ‌گونه محدودیتی ندارند. چاه علی مدد طهماسبی (W5) و قنات شادبخوار (W6) با قرار گرفتن در کلاس کیفیت آب C3-S1 و رده کیفیت شور و متوسط، ضعیف‌ترین کیفیت آب زیرزمینی از نظر قابلیت مصارف کشاورزی را در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در این سال به خود اختصاص داده‌اند، هرچند برای مصارف کشاورزی قابل استفاده می‌باشند. همچنین ایستگاه‌های نمونه‌برداری W8 و W9 که به ترتیب نشان دهنده چاه رضا وکیل زاده و قنات شادبخوار هستند، در دیاگرام USSL ای که برای مصارف کشاورزی در سال ۱۳۹۸ رسم شده است، موجود نمی‌باشند، زیرا این دو ایستگاه با توجه به بررسی‌های انجام شده و با توجه

بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نظر قابلیت مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام USSL در ابتدای دوره آماری مورد بررسی (سال ۱۳۷۰) نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در این سال در کلاس کیفیت C2-S1 و در رده کیفیت کمی شور و خوب قرار گرفته‌اند و از نظر کشاورزی مناسب بوده و هیچ‌گونه محدودیتی ندارند. در ابتدای دوره آماری مورد بررسی چشمه پیرکوه (W1) با قرار گرفتن در کلاس کیفیت C1-S1 و رده کیفیت شیرین و خیلی خوب، برای مصارف کشاورزی کاملاً بی‌ضرر بوده و بهترین کیفیت آب را در بین سایر ایستگاه‌های مورد بررسی دارا می‌باشد. همچنین چاه سلطانعلی شیرانی (W7) با قرار گرفتن در کلاس کیفیت C3-S1 و رده کیفیت شور و متوسط ضعیف‌ترین کیفیت آب زیرزمینی از نظر قابلیت مصارف کشاورزی را در بین ایستگاه‌های مورد بررسی به خود اختصاص داده است، اما برای مصارف کشاورزی قابل استفاده می‌باشد (شکل ۹).

صادقی در متغیر کیفی TH دارای روند معنی‌دار مثبت بوده و قنات شادیخوار و چاه رضا وکیل زاده تنها در متغیر کیفی SAR دارای روند معنی‌دار منفی می‌باشند. همچنین چاه علی مدد طهماسبی، چاه سلطانعلی شیرانی در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در همه متغیرهای کیفی مورد بررسی (TH، TDS، EC، SAR و Total Anions و Total Cations) به جز SAR که در آن روند معنی‌دار کاهش یافته، دارای روند معنی‌دار افزایشی هستند.

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای کیفی برای ابتدا (۱۳۷۰) و انتهای (۱۳۹۸) دوره آماری مورد بررسی ترسیم و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد از سال ۱۳۷۰ تا سال ۱۳۹۸ کیفیت آب زیرزمینی دشت سفیددشت دچار تغییراتی شده است و افزایش غلظت متغیرهای کیفی در بخش‌های جنوبی دشت سفید دشت از سایر قسمت‌های آن بیشتر بوده و از سمت شمال این دشت به جنوب آن، غلظت متغیرهای کیفی افزایش یافته و کیفیت آب زیرزمینی دشت کاهش یافته است.

همچنین کیفیت آب زیرزمینی دشت سفید دشت از نظر قابلیت مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام USSL مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد در ابتدای دوره آماری مورد بررسی (سال ۱۳۷۰)، در دشت سفید دشت کیفیت آب زیرزمینی اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در این سال در کلاس کیفیت C2-S1 و در رده کیفیت کمی شور و خوب قرار گرفته‌اند و از نظر کشاورزی مناسب بوده و هیچ‌گونه محدودیتی ندارند. در ابتدای دوره آماری مورد بررسی چشمه پیرکوه با قرار گرفتن در کلاس کیفیت C1-S1 و رده کیفیت شیرین و خیلی خوب، برای مصارف کشاورزی کاملاً بی‌ضرر بوده و بهترین کیفیت آب را در بین سایر ایستگاه‌های مورد بررسی در این دشت دارا می‌باشد. همچنین چاه سلطانعلی شیرانی با قرار گرفتن در کلاس کیفیت C3-S1 و رده کیفیت شور و متوسط ضعیف‌ترین کیفیت آب زیرزمینی از نظر قابلیت مصارف کشاورزی را در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در دشت سفید دشت به‌خود اختصاص داده است و برای مصارف کشاورزی قابل استفاده می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که در انتهای دوره آماری مورد بررسی (سال ۱۳۹۸) کیفیت آب زیرزمینی اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در این سال در کلاس

به گزارش شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری، خشک شده‌اند.

به‌طورکلی خشکسالی‌های شدیدی که در سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی رخ داده است، به همراه اضافه برداشت از چاه‌های موجود در دشت سفیددشت، منطقه را با بحران شدید کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه کرده که کاهش کیفیت آب و فرورفتن زمین را در پی داشته است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۸). لذا می‌توان این‌گونه استنباط کرد که روند معنی‌دار کاهش تراز و کیفیت منابع آب زیرزمینی در دشت مورد مطالعه به دلیل اضافه برداشت از چاه‌های موجود، کاهش نزولات جوی و خشکسالی‌های متوالی در سال‌های اخیر است. همچنین در طی دوره آماری ۲۹ ساله مورد بررسی ملاحظه می‌شود که علی‌رغم اینکه کیفیت آب زیرزمینی در دشت سفید دشت کاهش پیدا کرده است، اما کلاس کیفی اکثر ایستگاه‌ها در دوره مورد مطالعه تفاوتی نکرده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روند زمانی و مکانی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی و همچنین قابلیت کاربرد آب‌های زیرزمینی دشت سفید دشت برای مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام USSL مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور برای دشت سفید دشت از داده‌های کیفی ۹ ایستگاه نمونه‌برداری شامل ۶ چاه، ۲ قنات و یک چشمه در دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۸ استفاده شد.

روند زمانی تغییرات متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت سفید دشت طی دوره آماری ۲۹ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۸) با استفاده از آزمون ناپارامتری مان-کندال اصلاح شده (MMK) و در سه سطح معنی‌داری ۱۰، ۵ و ۱ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد دشت سفید دشت در اکثر متغیرهای کیفی و نقاط نمونه‌برداری مورد بررسی روند معنی‌دار افزایشی داشته است و تعداد سری‌های با روند معنی‌دار مثبت بیشتر از تعداد سری‌های با روند معنی‌دار منفی بوده است. چاه خیبر صادقی، قنات شادیخوار و چاه رضا وکیل‌زاده در اکثر متغیرهای کیفی آب زیرزمینی (TH، TDS، SAR، EC، Total Cations و Total Anions) بدون روند معنی‌دار بوده و تنها چاه خیبر

استفاده از شاخص کیفی آب. نشریه هیدروژئولوژی، (۱): ۳۱-۴۴.

خدابخشی، ن.، اسدا... فردی، غ. و حیدرزاده، ن. ۱۳۹۳. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان سفید دشت با استفاده از GIS و شاخص GQI. پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ۱۱ شهریور ماه ۱۳۹۳، دانشگاه ارومیه.

خدادادی مهابادی، ف. و کوشافر، م. ۱۴۰۰. ارزیابی کیفیت میکروبی و شیمیایی سفره های آب زیرزمینی اردستان جهت مصارف کشاورزی. پنجمین کنگره بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران. ۱۹ تا ۲۱ مرداد ۱۴۰۰. دبیرخانه دائمی کنفرانس با همکاری دانشگاه یاسوج، دانشگاه شیراز و دانشگاه مازندران، تبریز.

خسروی دهکردی، خ.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، صمدی بروجنی، ح. و قاسمی دستگردی، ا. ۱۳۹۸. پایش و پیش بینی خشکسالی های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکف. نشریه هیدروژئولوژی، (۱)۴: ۱۱۲-۱۲۵.

طاهری تیزرو، ع.، نوایان، م. و بدخشان، آ. ۱۳۹۵. کاربرد تکنیک زمین آمار برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت فومنات استان گیلان. نشریه هیدروژئولوژی، (۱): ۴۴-۵۶.

طباطبائی، س.ح. ۱۳۷۹. رفع آلودگی فلزات سنگین فاضلاب- های شهری با استفاده از ژئولیت های طبیعی ایران. درس گروهی دکتری آبیاری و زهکشی. دانشگاه تهران. ۳۵ص. معتمدی راد، م.، مختاری، ل.گ.، بهرامی، ش. و زنگنه اسدی، م.ع. ۱۴۰۰. ارزیابی کیفیت منابع آبی از نظر شرب، کشاورزی و صنعت در آبخوان کارستی روئین اسفراین استان خراسان شمالی. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۶۲): ۷۳-۹۳.

نکوا مال کرمانی، م.، میرعباسی نجف آبادی، ر. ۱۳۹۶. ارزیابی روش های درون یابی در تخمین سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سرخون). نشریه هیدروژئولوژی، (۲)۲: ۸۴-۹۵.

کیفیت C2-S1 و در رده کیفیت کمی شور و خوب قرار گرفته- اند و از نظر کشاورزی مناسب بوده و هیچ گونه محدودیتی ندارند. چاه علی مدد طهماسبی و قنات شادیکوار با قرار گرفتن در کلاس کیفیت C3-S1 و رده کیفیت شور و متوسط، ضعیف- ترین کیفیت آب زیرزمینی از نظر قابلیت مصارف کشاورزی را در بین سایر ایستگاه های مورد بررسی در این سال به خود اختصاص داده اند، اما برای مصارف کشاورزی قابل استفاده می باشند. بنابراین به طور کلی در طی دوره آماری ۲۹ ساله مورد بررسی ملاحظه می شود که علی رغم این که کیفیت آب زیرزمینی در دشت سفید دشت کاهش پیدا کرده است، اما کلاس کیفی اکثر ایستگاه ها تغییری نداشته و این مسئله از نظر قابلیت استفاده آب زیرزمینی دشت برای مصارف کشاورزی محدودیتی ایجاد نمی کند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بدینوسیله از در اختیار قرار دادن آمار مورد نیاز و همچنین حمایت مالی شرکت آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

احمدپور، ع.، فیجانی، ا. و مظفری، م. ۱۴۰۰. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: قسمت شرقی آبخوان تهران). چهارمین کنفرانس بین المللی توسعه فناوری مهندسی مواد، معدن و زمین شناسی. ۳۰ تیر ۱۴۰۰. انجمن مدیریت و مهندسی توسعه فناوری، تهران.

پناهی، م.، میثاقی، ف. و قنبری، ف. ۱۳۹۶. تعیین روند تغییرات پارامتر های کیفی آب های زیرزمینی دشت شبستر. فصلنامه علوم محیطی، (۳): ۱۹-۳۸.

تابنده، س.م.، خلقی، م. و حسینی، س.ع. ۱۴۰۰. مقایسه ی عملکرد روش های درون یابی برای ارزیابی کیفی آب زیرزمینی بر مبنای خصوصیات آبخوان های کم عمق (مطالعه موردی: آبخوان بابل-آمل). نشریه آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، (۱): ۲۴۹-۲۳۷.

حمیدیان، ل.، معراجی، س.ح.، فیجانی، ا. و بطالبویی، ص. ۱۳۹۶. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استان بوشهر با

- rivers: The effect of short- and long-term persistence. *Journal of Hydrology*, 369, 183-197.
- Kumar S., Merwade V., Kam J., and Thurner K. (2009). Streamflow trends in Indiana: Effects of longterm persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*, 374(1-2): 171-183.
- Neissi, L. Golabi, M. Gorman, J.M. (2020). Spatial interpolation of sodium absorption ratio: A study combining a decision tree model and GIS. *Ecological Indicators*, 117, 106611.
- Samson, M. G. Swaminathan and N. Venkat Kumar. (2010). Assessing groundwater quality for potability using a Fuzzy logic and GIS- A case study for Tiruchirappalli City India. *Computer Modeling and New Technologies*, 14(2): 58-68.
- Sen P.K. (1968). Estimates of the regression coefficients based on Kendalls tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389
- Theil H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3; confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. *Stichting Mathematisch Centrum. Statistische Afdeling*, 53: 1-16.
- Wilcox, DL. V. (1948): *The Quality of Water Irrigation Use*, U. S. Department of Agriculture, Bull. 962. Washington D.C., 40 p.
- ولایتی، س. ۱۳۷۸. پیامد های ناشی از اضافه برداشت آبخوان - های زیرزمینی. *مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد*، (۱): ۱۰۷-۱۲۴.
- Alley, W.M. (Ed.). (1993) *Regional Ground -Water Quality*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Dorgham, M.M. et al. (2004). Eutrophication Problems in the Western Harbour of Alexandria. *Egypt. Oceanologia*, 46(1): 25-44.
- Hagage, M. Madani, A.A. Elbeih, S.F. (2022). Quaternary groundwater aquifer suitability for drinking in Akhmim, Upper Egypt: an assessment using water quality index and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 196.
- Hamed, K.H., Rao, A.R., (1998). A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204: 182–196.
- Kammoun, A. Abidi, M. Zairi, M. (2022). Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment for irrigation and drinking purposes: a case of Enfidha aquifer system, Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, 81, 41.
- Khaliq M.N., Ouarda T.B.M.J., and Gachon P., (2009). Identification of temporal trends in annual and seasonal low flows occurring in Canadian