

مکانیسم آلوده شدن آبخوان دشت کاشان با تأکید بر آلودگی نیترات و نیتريت

محمد میرزاوند^۱، هدی قاسمیه^{۲*}، سید جواد ساداتی نژاد^۳، رحیم باقری^۴، ایان داگلاس کلارک^۵

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان

۲. دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان

۳. دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۴. استادیار دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود

۵. استاد، دانشکده علوم محیطی و زمین، دانشگاه اتاوا، اتاوا، کانادا

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۰۴)

چکیده

در تحقیق حاضر، آلودگی آبخوان دشت کاشان از نظر نیترات و نیتريت و مکانیسم آن بررسی شد. به این منظور، ۴۲ نمونه آب از آبخوان تهیه و آنالیز شد. نتایج پژوهش نشان داد کلراید و سولفات، آنیون‌های غالب و سدیم و کلسیم، کاتیون‌های غالب‌اند. نتایج بررسی حد مجاز متغیرهای pH، TDS، Na^+ ، K^+ ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، NO_3^- ، NO_2^- ، Ca^{2+} و Mg^{2+} نشان داد به ترتیب ۹۷/۶۱، ۴۰/۴۷، ۱۰۰، ۰، ۹۷/۶۱، ۹۵/۲۳، ۳۸/۰۹، ۹۵/۲۴، ۸۳/۳۴ و ۹۵/۲۳ درصد از منابع آب منطقه براساس استانداردهای WHO و JSIRI وضعیت غیرمجاز دارند. همچنین، نیترات با Na^+ ، K^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^- ، HCO_3^- ، SO_4^{2-} ، NO_2^- و TDS و EC به ترتیب همبستگی ۰/۶۸، ۰/۵۰، ۰/۶۳، ۰/۵۲، ۰/۶۴، -۰/۳۴، ۰/۳۲، ۰/۶۴، ۰/۶۴ و ۰/۶۵ دارد. سایر نتایج نشان داد نیترات، دامنه تغییرات ۱/۸۶ تا ۱۰۳۴ و میانگین ۱۱۸/۷۶ میلی‌گرم بر لیتر دارد. همچنین، ۴۰/۴۹، ۲۱/۴۲ و ۳۸/۰۹ درصد از نمونه‌ها از نظر نیترات به ترتیب، کمی آلوده، آلوده و بسیار آلوده‌اند. به منظور بررسی دقیق‌تر آلودگی آبخوان طبق توصیه WHO، نتایج ترکیبی نیترات و نیتريت نشان داد ۹۵/۲۳ درصد از نمونه‌ها، غلظت بیش از حد مجاز دارند. بنابراین، فقط بخش‌های جزئی از آبخوان در جنوب، جنوب غرب و غرب، وضعیت قابل قبولی دارند.

کلیدواژه‌گان: آبخوان کاشان، شور شدن، مکانیسم آلودگی، نیترات، نیتريت.

مقدمه

تغییر کیفیت آب زیرزمینی در یک منطقه، تابعی از متغیرهای فیزیکی و شیمیایی است که بیشتر تحت تأثیر سازندهای شیمیایی و فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است [۱]. این منابع علاوه بر آلودگی‌های صنعتی (حاصل فعالیت‌های انسانی) می‌توانند آلودگی‌هایی با منشأ طبیعی نیز داشته باشند. آب‌های زیرزمینی از طریق فرایندهای مختلف آلوده می‌شوند. یکی از آلاینده‌های مهم، آلودگی آب زیرزمینی به نیتрат و نیتريت است [۲]. نیترات پس از ورود به منابع آب زیرزمینی، در جهت جریان آب زیرزمینی هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی (تغذیه قائم^۱)، گسترش می‌یابد. به طور کلی، با افزایش عمق آب زیرزمینی و حرکت در جهت جریان، به دلیل فرایندهایی همچون انتشار، اختلاط و رقیق‌شدگی با آب‌های دارای آلودگی کمتر نسبت به نیترات، مقدار نیترات کاهش می‌یابد [۳]. طبق استاندارد ملی ایران و استاندارد سازمان جهانی بهداشت، حد مجاز نیترات و نیتريت منابع آب، به ترتیب برابر ۵۰ میلی‌گرم و سه میلی‌گرم در لیتر پیشنهاد شده است. همچنین، سازمان بهداشت جهانی، مقدار ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر را برای عوارض مزمن نیتريت توصیه کرده است [۴-۶]. افزایش غلظت نیترات بیش از حد مجاز در آب شرب، سبب بروز بیماری مت‌هموگلوبینما^۲ و یا سندرم بچه آبی در نوزادان می‌شود [۷]. همچنین، افزایش نیترات در افراد بزرگسال، به ایجاد ترکیبی سرطان‌زا به نام نیتروزآمین منجر می‌شود که افزایش احتمال سرطان‌های دستگاه گوارش و مثانه را در پی دارد. علاوه بر این موارد، افزایش نیترات موجب افزایش بیماری‌های نقص مادرزادی، گواتر، سرطان معده و متاگلوبین می‌شود [۸]. بنابراین، بررسی وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی از نظر آلودگی نیترات و نیتريت، بسیار اهمیت دارد. از جمله مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهش انجام‌شده توسط جعفری ملک‌آبادی و همکارانش به منظور بررسی نیترات آب‌های زیرزمینی استان اصفهان اشاره کرد. آنها به این نتیجه رسیدند که میانگین غلظت نیتروژن نیتراتی در آب‌های زیرزمینی مناطق نجف‌آباد، شهرضا، اصفهان، نطنز و کاشان به ترتیب

۱۷/۵۶، ۱۴/۶، ۱۶/۰۴ و ۸/۲۴ میلی‌گرم در لیتر بود و ۹۵/۵، ۱۰۰، ۸۴ و ۳۳/۳ درصد از کل چاه‌های این مناطق، غلظت نیترات بیشتر از حد استاندارد داشتند [۹]. خسروی دهکردی و همکارانش در تحقیقی تغییرات غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی حاشیه زاینده‌رود در استان اصفهان را بررسی کردند. در پژوهش یادشده، حد استاندارد ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان حد مجاز نیترات در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد بیشترین مقدار غلظت نیترات، در حاشیه ساحل زاینده‌رود به میزان ۷۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. همچنین، سایر نتایج این محققان نشان داد غلظت نیترات با هیچ یک از متغیرهای هیدروژئوشیمیایی، رابطه معناداری نداشته است [۱۰]. خدایی و همکارانش با استفاده از مطالعات هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپ‌های ^{15}N و ^{18}O ، آلودگی نیترات آب‌های زیرزمینی دشت دزفول - اندیمشک را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت نیترات در بخش شمالی و شمال شرقی آبخوان، بیش از حد مجاز (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) است و از شمال به سمت جنوب آبخوان، از غلظت نیترات کاسته شده است. همچنین، نتایج ایزوتوپی پژوهش یادشده نشان داد منشأ اصلی آلودگی نیترات در دشت دزفول - اندیمشک، کودهای نیتروژن‌دار است و بر اثر نیترات‌زدایی توسط باکتری‌ها، ^{15}N و ^{18}O در جهت جریان آب زیرزمینی غنی می‌شوند [۷]. عمارلویی و همکارانش در تحقیقی میزان نیترات و نیتريت در آب‌های زیرزمینی شهر ایلام را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت یون‌های نیترات و نیتريت در ۹۸/۳۳ درصد نمونه‌ها، کمتر از مقدار استاندارد و در ۱/۶۷ درصد نمونه‌ها، بیشتر از مقدار استاندارد پیشنهادی سازمان جهانی بهداشت (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین غلظت ثبت‌شده برای یون نیترات توسط این محققان، معادل ۱۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر برحسب نیتروژن و برای یون نیتريت، معادل ۱/۱۹ میلی‌گرم در لیتر برحسب نیتروژن در منطقه کشاورزی بود. همچنین، بین نوع کاربری اراضی و غلظت نیترات و نیتريت، همبستگی معناداری وجود نداشته است [۶]. سلک و یتیس^۳ در پژوهشی، آلودگی نیترات منابع آب زیرزمینی مشترک بین سوریه و ترکیه در

1. Vertical Recharge
2. Methemoglobinemia

آن و اراضی کشاورزی واقع در دشت را شامل می‌شود. تقریباً همه بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی دشت کاشان نیز در همین محدوده انجام می‌گیرد [۱۲]. دشت کاشان به صورت یک دره باریک، امتداد شمال غربی - جنوب شرقی دارد. عرض این دره، حدود ۳۰ کیلومتر و طول آن، ۸۰ تا ۹۰ کیلومتر است که در شمال، به دشت قم و در جنوب، به ارتفاعات مجاور منطقه نطنز و از غرب، به کوهستان و از شرق، به محدوده دریاچه نمک محدود می‌شود. آبخوان دشت کاشان به دلیل افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، با افت متوسط سالانه حدود یک متر و با بیلان منفی ۴۰ میلیون مترمکعب، وضعیت بحرانی دارد و به دلیل وجود سنگ بستر ماری و شور شدن آبخوان و نیز برگشت آب مصرفی مزارع و باغ‌ها و نبود سیستم فاضلاب شهری و روستایی، از نظر کیفی نیز با مشکل جدی مواجه است [۱۳].

روش تحقیق

نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها

در مردادماه ۱۳۹۶، تعداد ۴۲ نمونه آب از قنات (یک رشته)، چاه‌های بهره‌برداری (۲۸ حلقه)، چاه‌های پیژومتری کم‌عمق و عمیق (هشت حلقه)، دریاچه نمک کاشان (یک نمونه) و کفه نمکی سراج (یک نمونه)، چاه دستی حفاری شده در حاشیه دریاچه نمک (سه حلقه) به منظور بررسی کیفیت آب‌های دشت مطالعه شده و نیز آلودگی نیترات و نیتريت جمع‌آوری شد. انتخاب نمونه‌ها به صورت سیستماتیک صورت گرفت تا همه بخش‌های دشت و منابع آب موجود در منطقه نمونه‌برداری صورت گیرد. قبل از نمونه‌برداری، ظروف ۲۵۰ میلی‌لیتری (یک نمونه آبیون و یک نمونه کاتیون) با آب مقطر چند بار شسته و در محل نمونه‌برداری نیز، چند بار با آب منطقه مد نظر شسته و سپس نمونه‌برداری شد. همچنین، در محل نمونه‌برداری، متغیرهای دما، اسیدیته و هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌های کاتیونی با فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر شد و با اسید کلریدریک خالص، pH نمونه‌ها به کمتر از دو رسید. سپس، نمونه‌ها به آزمایشگاه ژئوشیمی مرکز تحقیقات پیشرفته دانشکده علوم زمین و محیط زیست دانشگاه اتاوا کانادا منتقل شد و با استفاده از

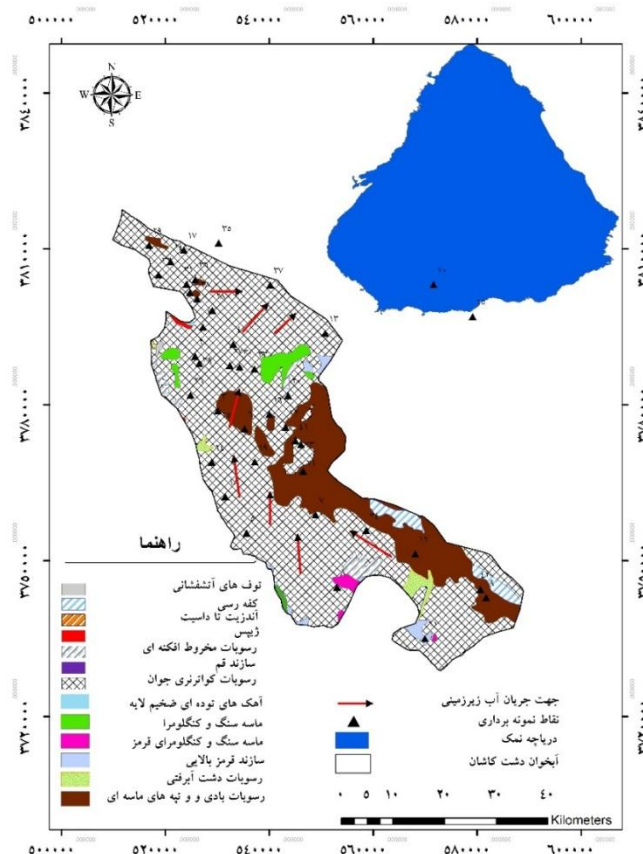
دشت سیلانپینار^۱ را بررسی کردند. همچنین، آنها توزیع مکانی نیترات و پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان را تعیین کرده و تغییرات فصلی آلودگی نیترات را در بازه زمانی آوریل ۲۰۱۲ تا ژانویه ۲۰۱۳ بررسی کردند. سپس، نتایج به دست آمده را با استانداردهای ملی و بین‌المللی مقایسه و طبقه‌بندی کردند. در نهایت، نتایج پژوهش آنها نشان داد مقدار نیترات فقط در دو چاه، فراتر از حد مجاز آب شرب است و سایر منابع آب، مشکلی از نظر آلودگی نیترات ندارند [۱۱]. در تحقیق یادشده آبخوان دشت کاشان به عنوان منطقه مطالعه شده در نظر گرفته شده است. این آبخوان به عنوان منبع اصلی آب مصرفی ساکنان منطقه یادشده، در نتیجه پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی با مشکل جدی کمبود منابع آب و نیز کاهش کیفیت آب مواجه است. از طرفی، به دلیل استفاده بیش از حد کودهای نیتراژ در امر کشاورزی و تغذیه قائم آبخوان توسط پساب برگشتی از مزارع کشاورزی و باغ‌ها در این دشت و همچنین تخلیه فاضلاب خانگی در نتیجه نبود سیستم فاضلاب، آبخوان یادشده در معرض خطر جدی افزایش نیترات در منابع آب زیرزمینی است. بنابراین، با توجه به اینکه مطالعه جدیدی در این زمینه در دشت ممنوعه بحرانی یادشده صورت نگرفته است، در پژوهش حاضر تلاش شده است با انجام نمونه‌برداری جدید و ارائه وضعیت هیدروژئوشیمیایی منابع آب دشت کاشان، بررسی پراکنش مکانی و غلظت نیترات و نیتريت موجود در منابع آب دشت کاشان صورت گیرد و ضمن بررسی خطر آلودگی نیترات، منابع احتمالی آلاینده شناسایی و راه کارهای مناسب برای جلوگیری از تخریب بیشتر منابع آب منطقه ارائه شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

دشت کاشان در دامنه کوه‌های کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران حدود ۲۴۰ کیلومتری جنوب تهران و بین طول‌های جغرافیایی ۵۱/۰۵ و ۵۱/۵۴ درجه شرقی و عرض‌های ۳۳/۴۵ و ۳۴/۲۳ درجه شمالی قرار دارد (شکل ۱). این دشت به وسعت ۲۲۰۰ کیلومترمربع، شهر کاشان و بخش مرکزی آن و شهر آران و بیدگل و همه بخش‌های

1. Ceylanpinar



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی، موقعیت نمونه‌برداری و جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت کاشان

که این معیار، مثبت باشد؛ نشان می‌دهد که نمونه آب غلظت بیشتر کاتیون نسبت به آنیون را دارد. به عکس، در صورت منفی بودن این معیار، نمونه آب غلظت بیشتر آنیون نسبت به کاتیون را دارد. بنابراین، آنالیز قابل پذیرش آب، CBE کمتر از $\pm 5\%$ دارد [۱۵].

بررسی نرمال‌بودن، همبستگی داده‌های هیدروژئوشیمیایی و مقایسه مقدار آنها با حد مجاز
به منظور بررسی آزمون نرمالیت داده‌های هیدروژئوشیمیایی دشت کاشان، به دلیل آنکه تعداد داده‌های هر متغیر کمتر از دو هزار عدد است، از آزمون شاپیروویلک^۲ استفاده شد. درخور یادآوری است که اگر تعداد داده‌ها بیش از دو هزار عدد باشد، از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف استفاده می‌شود [۱۶]. پس از آزمون نرمالیت، به منظور بررسی رابطه همبستگی داده‌های هیدروژئوشیمیایی، از آزمون همبستگی^۳ استفاده شد. همچنین، به منظور بررسی وضعیت کیفی آبخوان

دستگاه‌های ICP-MS و IC و تیتراسیون دیجیتال، به ترتیب کاتیون‌ها، آنیون‌ها و در نهایت کربنات و بی‌کربنات اندازه‌گیری و آنالیز شد. در پژوهش یادشده به منظور بررسی دقت آنالیزهای هیدروشیمیایی، خطای تعادل بار یونی (CBE^۱) با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد [۱۴].

$$CBE(\%) = \frac{\sum cations - \left| \sum anions \right|}{\sum cations + \left| \sum anions \right|} \times 100 \quad (1)$$

که در رابطه یادشده، $\sum cations$ و $\sum anions$ به ترتیب نشان‌دهنده کاتیون‌ها و آنیون‌ها هستند. یک قانون اساسی در طبیعت این است که انحلال‌های آبی، باید از نظر الکتریسیته خنثی باشند. به این معنا که در انحلال‌های واقعی، مجموع کل کاتیون‌ها باید برابر با مجموع کل آنیون‌ها باشد. با این حال، خطاهای تحلیلی و ترکیبات غیرقابل تجزیه، سبب عدم تعادل الکتریکی می‌شوند. خطای تعادل بار یونی، یک معیار برای بررسی این متوازن نبودن است [۱۵]. CBE می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در صورتی

2. Shapiro–Wilk
3. Correlation

1. CBE: Charge Balance Error

$$\frac{NO_3^-}{50} + \frac{NO_2^-}{3} \leq 1 \quad (2)$$

بررسی توزیع مکانی هدایت الکتریکی، کلراید و آلودگی منابع آب

با توجه به اینکه تمرکز مقاله حاضر بر تغییرات مکانی آلودگی نیترات و نیتريت در آبخوان دشت کاشان است، ابتدا به منظور بررسی مکانیسم‌های کلی حاکم بر کیفیت آبخوان، توزیع مکانی هدایت الکتریکی و کلراید به عنوان دو شاخص اصلی شوری آب‌های زیرزمینی بررسی شد. در نهایت، به منظور بررسی آلودگی آبخوان (براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی)، از روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW) استفاده شد.

یافته‌ها

نتایج آنالیز داده‌ها

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، خلاصه آماری نتایج هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های بررسی شده و مقدار حد مجاز هر متغیر نسبت به استانداردهای ارائه شده توسط سازمان بهداشت جهانی (۲۰۰۴ و ۲۰۰۸) و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (۱۳۹۲) ارائه شده است [۴ و ۵].

براساس نتایج آنالیز هیدروژئوشیمیایی (جدول ۱)، هدایت الکتریکی منابع آب دشت کاشان از ۱۴۶۲ تا ۲۱۲۰۰۰ و با میانگین ۲۵۸۲۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. همچنین، براساس استاندارد ISIRI و WHO، ۹۷/۶۱ درصد نمونه‌های برداشت شده غلظت کل املاح محلول (TDS) بیشتر از حد مجاز دارند. طبق جدول ۱، pH منطقه از ۳/۱۶ تا ۸/۱۱ با میانگین ۷/۱۲ متغیر است. اسیدیته برابر ۳/۱۶ در برخی از نمونه‌ها، به‌ویژه در شمال شرق آبخوان می‌تواند به دلیل وجود شرایط اکسیداسیون باشد که به دلیل برخی فرایندها مانند اکسایش سولفات به وجود آمده است، چرا که در این بخش از آبخوان، یون بی‌کربنات و اسیدیته نیز کاهش یافته است که می‌تواند نشان‌دهنده اکسیداسیون سولفات باشد. براساس نتایج به‌دست آمده، کلراید و سولفات به‌عنوان آنیون غالب ($Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^- > HCO_3^-$) و سدیم و کلسیم به‌عنوان کاتیون غالب ($Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$) هستند. غلظت کلسیم از ۸۴/۵۳ تا ۳۳۸۷۳ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است و براساس

از استانداردهای روش سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO) و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران^۲ استفاده شده است [۴ و ۵].

طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی از نظر آلودگی نیترات

در این مرحله، آب‌های زیرزمینی با توجه به غلظت نیترات به سه گروه تقسیم شدند که عبارت‌اند از:

۱. آب‌های بسیار آلوده (غلظت نیترات بیشتر از ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر)؛
۲. آب‌های آلوده (غلظت نیترات بین ۲۰ تا ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر)؛
۳. آب‌های کمی آلوده (غلظت نیترات کمتر از ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر) [۱۷].

بررسی توزیع مکانی نیترات و نیتريت

استفاده از نیترات و نیتريت در کودهای نیتروژن، وجود چاه‌های جذبی و نبود سیستم کامل فاضلاب شهری و روستایی، از جمله دلایل مهم آلودگی منابع آب زیرزمینی‌اند [۱۸]. همان‌طور که در مقدمه پژوهش حاضر بیان شد، نیترات و نیتريت تأثیر بسیار جدی بر سلامت مصرف‌کنندگان منابع آب آلوده دارد [۳]. دشت کاشان به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای نیتروژن و همچنین نبود سیستم فاضلاب شهری و روستایی، به‌شدت تحت تأثیر نفوذ آلاینده‌های نیترات و نیتريت است. بنابراین، به‌منظور بررسی اثر جریان برگشتی به آبخوان (پساب مزارع و فاضلاب خانگی) بر کیفیت منابع آب دشت کاشان، میزان نیترات و نیتريت در ۴۲ نمونه آب اندازه‌گیری شد. سپس، به‌منظور بررسی آلودگی آبخوان ناشی از نیترات و نیتريت و تحلیل مناسب نتایج آن، از نرم‌افزار ARC GIS و روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW^3) به عنوان روشی پرکاربرد و دارای کمترین مقدار خطا نسبت به دیگر روش‌های درون‌یابی، برای درون‌یابی پارامترهای کیفی آب، استفاده شد. در نهایت، طبق توصیه سازمان بهداشت جهانی و نیز به‌منظور قضاوت در خصوص میزان غلظت نیترات و نیتريت اندازه‌گیری شده، از رابطه ۲ استفاده شد [۴ و ۵].

1. WHO: World Health Organization

2. ISIRI: Institute of Standards and Industrial Research of Iran

3. IDW: Inverse Distance Weighting

جدول ۱. خلاصه آماری نتایج هیدروژئوشیمیایی و مقدار حد مجاز هر متغیر در آبخوان دشت کاشان

متغیرها	حداقل	حداکثر	میانگین	WHO	ISIRI	درصد نمونه‌هایی بیش از حد مجاز استاندارد
EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	۱۴۶۲	۲۱۲۰۰۰	۲۵۸۲۶	---	---	---
TDS (mg/l)	۸۹۸/۱۷	۲۹۶۷۳۱	۳۰۱۴۹	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۹۷/۶۱
pH	۳/۱۶	۸/۱۱	۷/۱۲	۶/۵-۶/۵-۸/۵	۶/۵-۸/۵	۴۰/۴۷
Na ⁺ (mg/l)	۲۰۲/۱۵	۸۳۵۹۷	۷۳۹۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰
K ⁺ (mg/l)	۰/۰۰۱	۱/۸۹	۰/۰۹	۲۰	۲۰	۰
Cl ⁻ (mg/l)	۷۱	۲۰۴۸۰۰	۱۸۷۴۱	۲۵۰	۲۵۰	۹۷/۶۱
Ca ²⁺ (mg/l)	۸۴/۵۳	۳۳۸۷۳	۱۶۱۵	۲۰۰	۳۰۰	۸۳/۳۴ ^a
Mg ²⁺ (mg/l)	۹/۴۹	۱۴۵۸۰	۷۲۲	۱۵۰	۳۰	۹۵/۲۳ ^b
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	۰	۳۰/۸۵	۱۲/۶۱	---	---	---
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	۵/۳۰	۱۰۰۸۰	۱۶۷۱/۳۹	۲۵۰	۲۵۰	۹۵/۲۳
NO ₃ (mg/l)	۱/۸۶	۱۰۳۴	۱۱۸/۷۶	۵۰	۵۰	۳۸/۰۹
NO ₂ (mg/l)	۰	۱۰۴۸	۲۰۲/۲۸	۳	۳	۹۵/۲۴

a: درصد نمونه‌های بیش از حد مجاز استاندارد WHO، b: درصد نمونه‌های بیش از حد مجاز استاندارد مؤسسه تحقیقات صنعتی ایران

منابع آب دشت کاشان، به‌ترتیب میانگین ۱۱۸/۷۶ و ۲۰۲/۲۸ میلی‌گرم بر لیتر دارند که براساس استاندارد WHO (حد مجاز ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر)، ۳۸/۰۹ و ۹۵/۲۴ درصد نمونه‌ها به‌ترتیب دارای غلظت بیش از حد مجاز نیترات و نیتريت هستند. همچنین، با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۱، غلظت نیترات از ۱/۸۶ تا ۱۰۳۴ میلی‌گرم بر لیتر و غلظت نیتريت از صفر تا ۱۰۴۸ میلی‌گرم بر لیتر در منطقه مطالعه‌شده متغیر است.

نتایج نرمال‌کردن داده‌ها و همبستگی بین متغیرهای کیفی

با توجه به بررسی نرمال‌بودن داده‌ها براساس آزمون شاپیروویلک، کلیه متغیرهای بررسی‌شده به‌جز بی‌کربنات، سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ دارند. بنابراین، همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، همه متغیرها به‌جز بی‌کربنات، توزیع غیرنرمال دارند. درخور یادآوری است که آزمون نرمالیت، فقط یک آزمون پیش‌نیاز برای بعضی از ارزیابی‌های پارامتریک است [۱۶].

با توجه به نرمال‌نبودن داده‌ها، به‌منظور بررسی همبستگی بین متغیرهای هیدروژئوشیمیایی به‌ویژه نیترات و نیتريت، از آزمون همبستگی اسپیرمن استفاده شد (جدول ۳). درخور یادآوری است که برای انجام درون‌یابی داده‌های مورد استفاده نرمال شده و سپس درون‌یابی صورت گرفته است. براساس جدول ۳، EC و TDS همبستگی معناداری با سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلراید، سولفات، نیترات و نیتريت دارند. به‌طور معمول

استاندارد WHO، ۸۳/۳۴ درصد نمونه‌ها کلسیم بیش از حد مجاز دارند. مقدار غلظت سدیم بین ۲۰۲/۱۵ تا ۸۳۵۹۷ و با میانگین ۷۳۹۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است که مطابق با استاندارد ISIRI و WHO، ۱۰۰ درصد نمونه‌ها غلظت بیش از حد مجاز دارند. با توجه به نتایج جدول ۱، غلظت کلراید از ۷۱ تا ۲۰۴۸۰۰ و با میانگین ۱۸۷۴۱ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است و براساس استاندارد WHO و ISIRI، ۹۷/۶۱ درصد نمونه‌ها غلظت بیش از حد استاندارد کلراید دارند. از طرف دیگر، غلظت سولفات به‌عنوان دومین آنیون غالب در منابع آب منطقه مطالعه‌شده، از ۵/۳ تا ۱۰۰۸۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است که طبق استاندارد WHO و ISIRI، ۹۵/۲۳ درصد نمونه‌ها غلظت بیش از حد مجاز یون سولفات دارند. غلظت منیزیم در آبخوان دشت کاشان از ۹/۴۹ تا ۱۴۵۸۰ میلی‌گرم در لیتر تغییر می‌کند و طبق استاندارد ISIRI، ۹۵/۲۳ درصد آبخوان دارای غلظت منیزیم بیش از حد مجاز است که هم‌پوشانی کامل با نتایج سولفات دارد. غلظت پتاسیم در آبخوان کم بوده و طبق استاندارد WHO و ISIRI، در حد قابل قبول است. همچنین، میانگین غلظت بی‌کربنات در آبخوان، ۱۲/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر است. وجود بی‌کربنات در آبخوان باید به دلیل وجود سازندهای کربناته در غرب دشت کاشان و همچنین رسوبات کربناته در رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان باشد [۱۶]. یکی از روش‌های مهمی که کیفیت آب را به خوبی می‌تواند ارزیابی کند، بررسی آلودگی آبخوان نسبت به نیترات و نیتريت است [۱۹] و [۲۰]. براساس نتایج جدول ۱، غلظت نیترات و نیتريت در

جدول ۲. آزمون نرمالیتة برای متغیرهای هیدروژئوشیمیایی در آبخوان دشت کاشان

متغیر	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk	
	آماره	سطح معناداری	آماره	سطح معناداری
Na	۰/۴۵	.	۰/۳۹	.
K	۰/۴۰	.	۰/۲۹	.
Ca	۰/۴۳	.	۰/۲۶	.
Mg	۰/۴۰	.	۰/۳۰	.
Cl	۰/۴۴	.	۰/۳۸	.
HCO ₃	۰/۰۸	۰/۲	۰/۹۵	۰/۱
SO ₄	۰/۳۲	.	۰/۵۳	.
NO ₃	۰/۳۰	.	۰/۵۸	.
NO ₂	۰/۴۲	.	۰/۳۸	.
TDS	۰/۴۱	.	۰/۴۴	.
EC	۰/۴۰	.	۰/۵۸	.

زیاد شده است [۲۳ و ۲۴]. انحلال کربنات‌ها، سبب آزاد شدن کلسیم به داخل محلول می‌شود، اما به دلیل تغذیه کم آبخوان توسط جریان‌های نفوذی از مناطق تغذیه و وجود همبستگی منفی بین کلسیم و بی‌کربنات، کلسیم نمی‌تواند فقط از کربنات‌های بخش غربی آبخوان نشئت گرفته باشد و باید منشأ دیگری مانند تبادل کاتیونی و دولومیتی شدن داشته باشد [۲۵]. وجود رابطه همبستگی زیاد بین کلسیم و منیزیم (۰/۶۹) می‌تواند تأییدی بر این تحلیل باشد. همچنین، همبستگی زیادی بین نیترات و کلراید (۰/۶۴) و نیز نیتريت و کلراید (۰/۶۹) وجود دارد. شکل ۲ رابطه بین غلظت کلراید و نیتريت را نشان می‌دهد. همبستگی زیاد و نیز نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۲ نشان می‌دهد که منابع آب زیرزمینی دشت کاشان، چندین بار پمپاژ شده و پس از استفاده در امور کشاورزی، صنعتی و شهری، دوباره به آبخوان برگشته است و همچنین تغذیه قائم در این منطقه مهم است [۲۶].

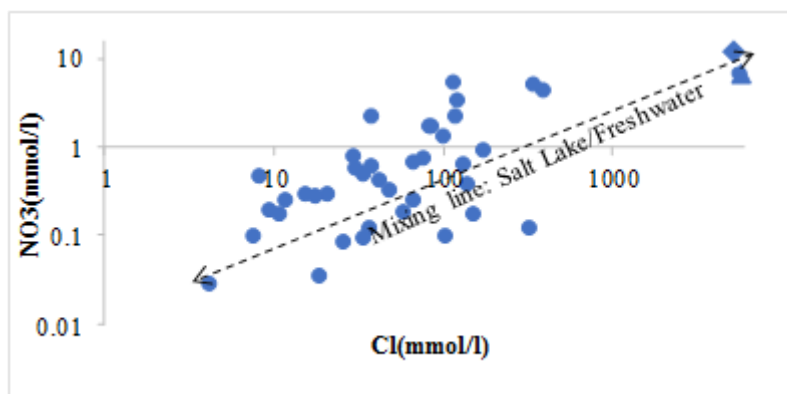
نتایج آلودگی آب‌های زیرزمینی از نظر نیترات و نیتريت براساس توصیه سازمان بهداشت جهانی و نیز مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مقدار مجاز نیتريت و نیتريت در آب به ترتیب برابر ۵۰ و ۳ میلی‌گرم بر لیتر است [۴ و ۵]. براساس جدول ۱، ۳۸/۰۹ و ۹۵/۲۴ درصد از نمونه‌ها از نظر استاندارد ISIRI و WHO، به ترتیب به نیتريت و نیتريت آلوده‌اند، ولی به منظور بررسی بهتر این نوع آلاینده‌ها، طبق استاندارد WHO، نتایج بررسی غلظت نیتريت و نیتريت با همدیگر تلفیق و به طور هم‌زمان در پهنه‌بندی کیفیت منابع آب استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از اعمال رابطه ۲ در جدول ۵ ارائه شده است.

از همبستگی بین سدیم و کلراید به منظور تعیین کارکرد انحلال هالیت در شور شدن منابع آب استفاده می‌شود [۲۱ و ۲۲]. بنابراین، همبستگی زیاد بین کلراید و سدیم ($R=۰/۹۴$) در تحقیق حاضر، بیان‌کننده انحلال سازندهای حاوی نمک هالیت در منطقه مطالعه شده است. از آنجا که مارن میوسن و گاه سازند قرمز بالایی در بستر آبخوان وجود دارد، وجود لایه‌های ژپس و نمک هالیت در این سازندها می‌تواند منشأ مهمی برای افزایش غلظت سدیم و کلراید در منطقه به حساب آید. ضعیف بودن همبستگی بین کلسیم و سولفات (۰/۳۸) و نیز سولفات و منیزیم (۰/۴۰)، نشان می‌دهد کلسیم و سولفات و منیزیم نمی‌توانند فقط از یک منبع نشئت گرفته باشند و می‌توان منابعی همچون انحلال سازندهای کربناته [کلسیت (CaCO_3) و دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) و تبخیری [ژپس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) و انیدریت (CaSO_4 بدون آب)] را در تغییرات غلظت آنها مهم دانست. به نظر می‌رسد که سولفات موجود در آبخوان، از شورابه‌های کف آبخوان با فرآیند آپکنینگ بالا آمده و پس از ترکیب شدن با آب‌های با شوری کمتر، مقداری رقیق شده است و با حرکت در جهت جریان آب زیرزمینی، بر غلظت آن افزوده شده است؛ چرا که در همه نمونه‌ها مقدار $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ بزرگ‌تر از پنج میلی‌اکی‌والانت بر لیتر به‌دست آمده که نشان‌دهنده انحلال ژپس در آبخوان است و از طرفی منبع اصلی سولفات در دشت کاشان با توجه به نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی، مارن میوسن و سازند قرمز بالایی موجود در کف آبخوان است. از طرفی، به دلیل افزایش تبخیر در شمال شرق آبخوان (به دلیل نزدیک بودن سطح ایستابی به سطح زمین)، غلظت بیشتر متغیرهای هیدروژئوشیمیایی از جمله سولفات به شدت

جدول ۳. ماتریس همبستگی (اسپیرمن) بین متغیرهای هیدروژئوشیمیایی منابع آب در آبخوان دشت کاشان

بارامتها	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO3	SO4	NO3	NO2	TDS	EC
Na	۱	۰/۶۸**	۰/۸۰**	۰/۵۷**	۰/۹۴**	-۰/۶۷**	۰/۵۵**	۰/۶۸**	۰/۷۱**	۰/۹۵**	۰/۹۲**
K		۱	۰/۶۳**	۰/۷۴**	۰/۷۰**	-۰/۳۶*	۰/۴۴**	۰/۵۰**	۰/۶۷**	۰/۷۳**	۰/۷۱**
Ca			۱	۰/۶۹**	۰/۸۸**	-۰/۵۸**	۰/۳۸*	۰/۶۳**	۰/۶۷**	۰/۸۸**	۰/۸۲**
Mg				۱	۰/۶۳**	-۰/۳۲*	۰/۴۰**	۰/۵۲**	۰/۵۳**	۰/۶۶**	۰/۵۸**
Cl					۱	-۰/۷۳**	۰/۴۹**	۰/۶۴**	۰/۶۹**	۰/۹۸**	۰/۹۳**
HCO3						۱	-۰/۳۵*	-۰/۳۴*	۰/۴۷**	-۰/۶۹**	-۰/۷۴**
SO4							۱	۰/۳۲*	۰/۲۶	۰/۵۸**	۰/۵۴**
NO3								۱	۰/۶۴**	۰/۶۴**	۰/۶۵**
NO2									۱	۰/۶۸**	۰/۷۴**
TDS										۱	۰/۹۴**
EC											۱

**همبستگی معنادار در سطح یک درصد، *همبستگی معنادار در سطح پنج درصد



شکل ۲. رابطه بین غلظت کلراید و نیترات موجود در منابع آب آبخوان دشت کاشان (لوزی قرمزنگ: دریاچه نمک، مثلث قرمزنگ، کفه نمکی سراجیه)

جدول ۴. طبقه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت‌شده از نظر آلودگی نیترات

درصد نمونه‌ها	میزان آلودگی
۴۰/۴۹	کمی آلوده (غلظت نیترات کمتر از ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر)
۲۱/۴۲	آلوده (غلظت نیترات بین ۲۰ تا ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر)
۳۸/۰۹	بسیار آلوده (غلظت نیترات بیشتر از ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر)

جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از اعمال غلظت نیترات و نیتريت در معادله ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی

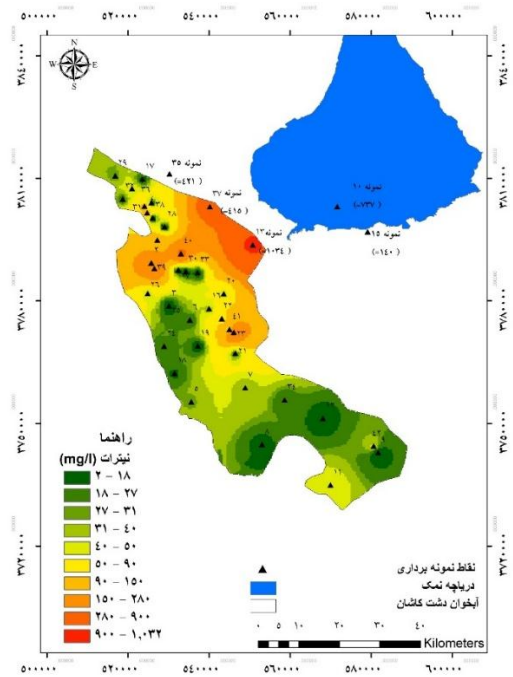
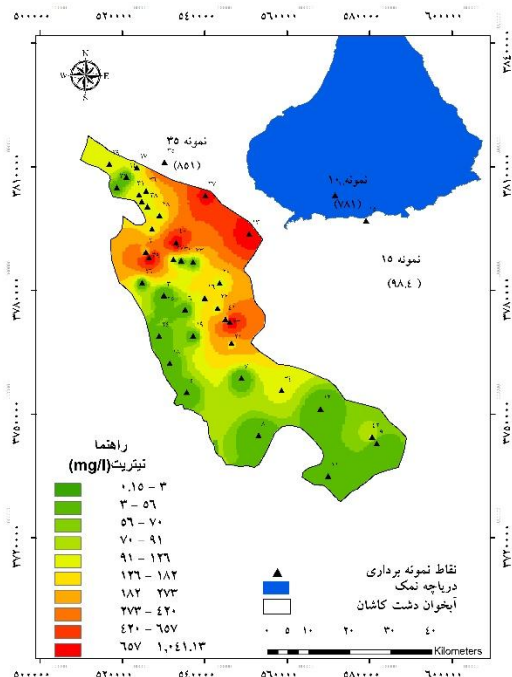
WHO	مقدار به‌دست آمده از اعمال معادله ۲	کد نمونه
مناسب	۰/۹۴ و ۰/۱۵	۱۴ و ۳
نامناسب	۵/۴۳، ۷/۹۸، ۲۷۵/۰۷، ۶/۱۶، ۶/۸۰، ۴/۶۸، ۹/۱۲، ۹/۹۶، ۳۳/۷۳، ۳۷/۵۷، ۳۷/۱۸	۱۵، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۲، ۱
	۳۵۱/۱۹، ۳۲/۱، ۵۵/۸۴، ۳۳/۶۳، ۱۰/۴۶، ۹/۳۰، ۳۶/۴۴، ۴۲/۳۵، ۱۹/۵۹، ۳۲۹/۰۱	۲۵، ۲۴، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶
	۳۲/۴۱، ۷/۹۱، ۷/۳۵، ۳۳/۵۲، ۶/۳۶، ۳۳/۹۳، ۳۰/۹۹، ۲۴/۵۵، ۵/۷۸، ۸/۴۰، ۸/۲۳	۳۵، ۳۴، ۳۳، ۳۲، ۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۶
	۳۲/۴۵ و ۳۳/۶۷، ۳۲۲/۳۲، ۳۵۴/۸۳، ۳۱/۵۹، ۲۶۰/۶۳، ۳۳/۴۵، ۲۹۲/۰۸	۴۲ و ۴۱، ۴۰، ۳۹، ۳۸، ۳۷، ۳۶

کرده است. در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی آبخوان، به دلیل کم‌تربودن فعالیت‌های کشاورزی و فاضلاب شهری نسبت به مناطق مرکزی آبخوان، آلودگی نیترات کمتری مشاهده می‌شود. از طرفی، دلیل کمبود نیترات در بخش غربی آبخوان را می‌توان به این صورت تحلیل کرد که به دلیل عمق زیاد آب‌های زیرزمینی و فاصله زیاد سطح ایستابی از سطح زمین در منطقه یادشده، بخش درخور توجهی از نیترات در منطقه غیراشباع به نیتريت و در نهایت به گاز N_2 تبدیل شده و دوباره به جو برگشته است. ولی در بخش‌های مرکزی آبخوان که فاصله سطح ایستابی تا سطح زمین نسبت به غرب آبخوان کمتر است، پساب فعالیت کشاورزی و فاضلاب شهری وارد بخش غیراشباع شده و بخش عمده نیترات به منطقه اشباع آبخوان رسیده و در نهایت با جریان آب زیرزمینی به منطقه شمال شرقی آبخوان منتقل شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بخش عمده چاه‌های بهره‌برداری و مناطق مسکونی در میانه دشت واقع شده که با تغذیه قائم آبخوان توسط پساب برگشتی از مناطق کشاورزی و شهری، آلاینده‌های نیترات و نیتريت به آبخوان تزریق شده و با حرکت در جهت جریان آب زیرزمینی، مقدار غلظت این آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه تفکیک اثر هر کاربری بر میزان آلودگی آبخوان به نیترات و نیتريت به مطالعات ایزوتوپی به‌ویژه آنالیز ^{15}N نیاز دارد و بسیار پیچیده و هزینه‌بر است، در پژوهش حاضر به کارکرد هر یک از کاربری‌ها و درصد اثرگذاری آنها پرداخته نشده است. نتایج به‌دست آمده از بررسی آلودگی منابع آب آبخوان دشت کاشان براساس غلظت نیترات و استاندارد سازمان بهداشت جهانی (جدول‌های ۴ و ۵) نشان می‌دهد به ترتیب ۴۰/۴۹، ۲۱/۴۲ و ۳۸/۰۹ درصد از آبخوان دشت کاشان به ترتیب در طبقه آب‌های کمی آلوده، آلوده و بسیار آلوده قرار دارند و در مجموع می‌توان بیان کرد که فقط براساس غلظت نیترات، ۵۹/۵۱ درصد آبخوان از نظر WHO، آلوده است. از طرف دیگر، به‌منظور بررسی دقیق‌تر آلودگی آبخوان، طبق توصیه سازمان بهداشت جهانی، نتایج ترکیبی نیترات و نیتريت (رابطه ۲)، نشان داد ۹۵/۲۳ درصد از نمونه‌ها نامناسب و فقط ۴/۷۷ درصد نمونه‌ها وضعیت مناسب دارند. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، فقط بخش‌های جزئی از آبخوان در جنوب، جنوب غرب و غرب آبخوان وضعیت مناسبی دارند و باقی بخش‌های آبخوان از نظر WHO، آلوده‌اند.

نتایج بررسی توزیع مکانی نیترات، نیتريت، هدایت الکتریکی، کلراید و آلودگی منابع آب

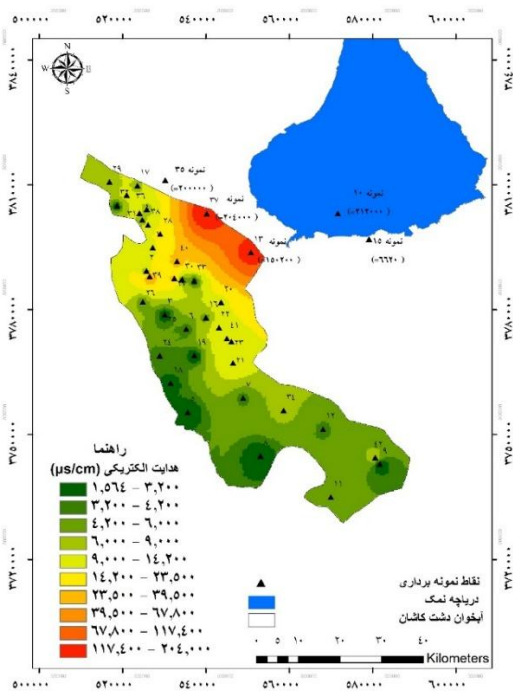
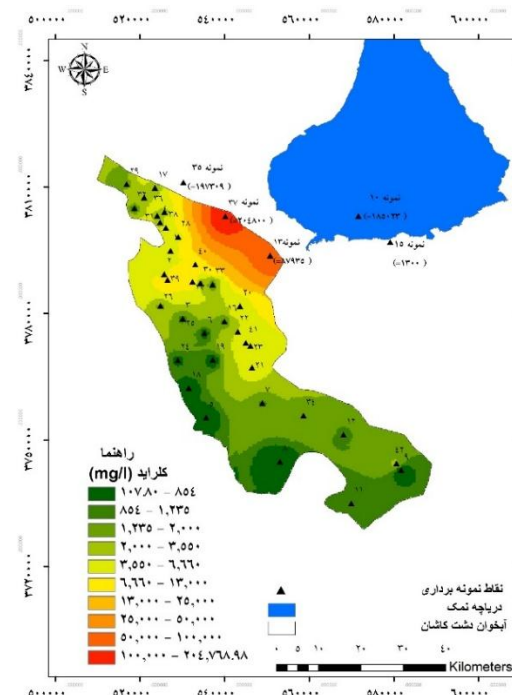
نتایج بررسی تغییرات مکانی نیترات و نیتريت در آبخوان دشت کاشان در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین، به‌منظور تحلیل مناسب‌تر تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی، از داده‌های هدایت الکتریکی و کلراید استفاده شد (شکل‌های ۵ و ۶). در نهایت، پهنه‌بندی آلودگی منابع آب منطقه مطالعه شده براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، کمترین مقدار نیترات و نیتريت مربوط به جنوب و جنوب غربی آبخوان است و با حرکت به سمت شمال شرق آبخوان، غلظت آن افزایش می‌یابد. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۳، نیترات در بسیاری از منابع، به‌ویژه با حرکت به سمت شمال آبخوان (در دریاچه نمک و کفه نمکی موجود در سراج) غلظت بسیار زیادی دارد که با توجه به جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب غرب آبخوان به سمت شمال شرق آن (شکل ۱)، کاملاً واضح است که هجوم آب شور از شورابه‌های آبخوان به داخل دریاچه نمک و کفه نمکی است و دریاچه نمک و کفه نمکی، منشأ آب‌های شور در آبخوان نیستند. نتایج غلظت بسیار زیاد نیترات در منابع آبی منطقه، بیان‌کننده تأثیر زیاد پساب برگشتی کشاورزی و چاه‌های جذبی در این منطقه است [۲۷]. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با حرکت به سمت خروجی آبخوان، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد.

همچنین، با توجه به شکل ۶، غلظت کلراید با حرکت در جهت جریان آب زیرزمینی افزایش می‌یابد و در شمال شرق آبخوان به بیشترین حد خود می‌رسد. بنابراین، طبق تحقیقات برخی پژوهشگران [۲۷، ۲۸]، می‌توان غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را به‌عنوان مرز آب شور و شیرین در نظر گرفت که با در نظر گرفتن این موضوع، بیش از ۹۰ درصد آبخوان شور شده است (شکل ۴). با توجه به جهت جریان آب زیرزمینی به داخل دریاچه نمک و همبستگی بین غلظت کلراید و نیترات (شکل ۲) و نیز وجود سنگ بستر مارن میوسن در کف آبخوان (با سولفات زیاد)، می‌توان نتیجه گرفت که شورابه‌های کف آبخوان به دلیل پمپاژ بیش از حد با فرایند آپکنینگ بالا آمده، با آب‌های با شوری کمتر حاوی نیترات ترکیب شده و در نتیجه شیب هیدرولیکی، به شمال شرق آبخوان تخلیه شده است. در نتیجه، با تبخیر شورابه‌های این منطقه، غلظت افزایش پیدا



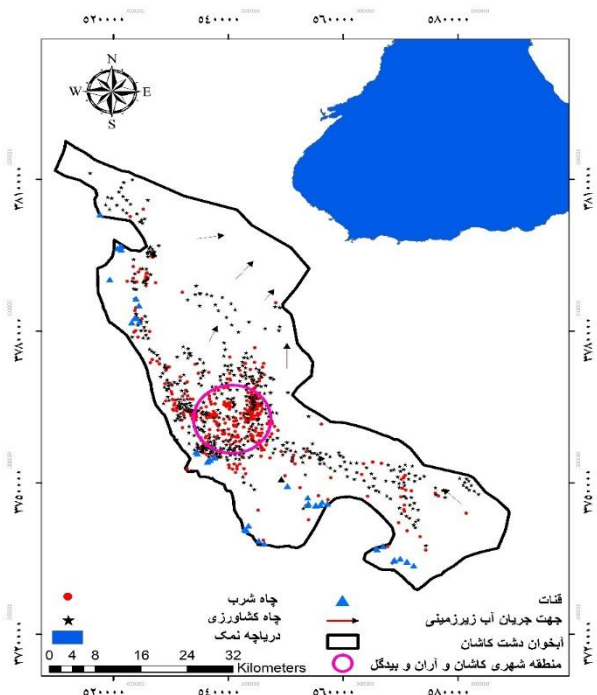
شکل ۳. نقشه پراکنش مکانی غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت کاشان

شکل ۴. نقشه پراکنش مکانی غلظت نیترات در منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت کاشان

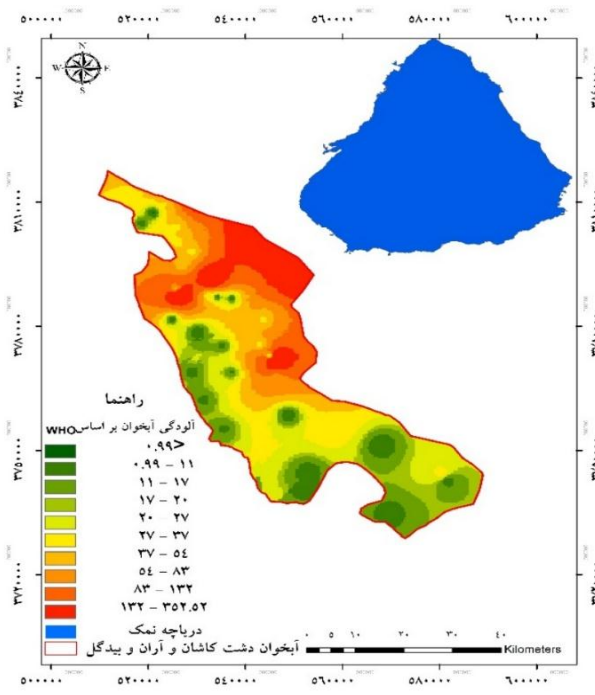


شکل ۵. نقشه پراکنش مکانی هدایت الکتریکی در منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت کاشان و آران و بیدگل

شکل ۶. نقشه پراکنش مکانی کلراید (میلی گرم بر لیتر) در منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت کاشان



شکل ۸. پراکنش چاه‌های بهره‌برداری، شرب، مناطق مسکونی و جهت جریان آب زیرزمینی در دشت کاشان



شکل ۷. نقشه پراکنش مکانی آلودگی منابع آب آبخوان دشت کاشان با توجه به غلظت نیترات و نیتريت براساس استاندارد بهداشت جهانی

پهنه‌بندی شد که با توجه به نتایج به دست آمده، ۹۵/۲۳ درصد از نمونه‌ها نامناسب و فقط ۴/۷۷ درصد نمونه‌ها دارای وضعیت مناسب تشخیص داده شد. بنابراین، فقط بخش‌های جزئی از آبخوان در جنوب، جنوب غرب و غرب آبخوان وضعیت مناسبی دارند و باقی بخش‌های آبخوان از نظر استاندارد WHO، آلوده‌اند. بنابراین، با توجه به اینکه منبع آب مصرفی در دشت کاشان آب‌های زیرزمینی هستند، آلوده بودن آبخوان به نیترات و نیتريت می‌تواند سبب بروز بیماری متهموگلوبینما^۱ و یا سندرم بچه آبی در نوزادان و ایجاد ترکیبی سرطان‌زا به نام نیتروزآمین در بزرگسالان شود که افزایش احتمال سرطان‌های دستگاه گوارش و مثانه را موجب می‌شود. علاوه بر این موارد، مصرف این منابع آلوده می‌تواند موجب افزایش بیماری‌های نقص مادرزادی، گواتر، سرطان معده و متاگلوبین شود. بنابراین، در سال‌های گذشته با افزایش جمعیت و تقاضای آب و به‌کارگیری استراتژی‌های ناکارآمد در بحث مدیریت مصرف آب، مشکل آب در دشت کاشان به‌عنوان یکی از دشت‌های ممنوعه بحرانی کشور، بسیار جدی شده است. آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین منبع آبی در دشت کاشان به

بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش نتایج اشاره شد، ابتدا وضعیت هیدروژئوشیمی آبخوان دشت کاشان و سپس ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان با توجه به استاندارد WHO و ISIRI بررسی شد. از نظر استاندارد WHO و ISIRI، به ترتیب ۹۷/۶۱، ۴۰/۴۷، ۱۰۰، ۰، ۹۷/۶۱، ۸۳/۳۴، ۹۵/۲۳، ۹۵/۲۳، ۳۸/۰۹، ۹۵/۲۴ درصد از آبخوان از نظر TDS، pH، این آلودگی مربوط به هجوم آب شور به صورت آپکینینگ و انحلال ژپس و هالیت در سازندهای قرمز پایینی و بالایی و مارن میوسن و بخشی دیگر نیز مربوط به آلاینده‌های مدرن مانند آلودگی آبخوان به نیترات و نیتريت است که به دلیل وجود چاه‌های جذبی بسیاری زیاد و برگشت پساب برگشتی اراضی کشاورزی در دشت کاشان، آبخوان آلوده شده است. همبستگی معنادار نیترات با Na^+ ، K^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^- ، NO_2^- و TDS، EC به ترتیب همبستگی ۰/۶۸، ۰/۵۰، ۰/۶۳، ۰/۵۲، ۰/۶۴، ۰/۶۴، ۰/۶۴ و ۰/۶۵ تأییدکننده این موضوع است. از طرف دیگر، به منظور بررسی جامع‌تر آلودگی آبخوان به نیترات و نیتريت، طبق رابطه ارائه‌شده توسط WHO، آلودگی آبخوان محاسبه و در سطح دشت کاشان

1. Methemoglobinemia

- [2]. Karami GH, Jafari H, Ghanaatian H. Contamination of groundwater resources in the agricultural land of Magan plain, Semnan province. *Journal of Advanced Applied Geology*. 2016; 21:45-55 [Persian].
- [3]. Pawar N., Sheikh I. Nitrate pollution of ground waters from shallow basaltic aquifers, Deccan Trap Hydrologic Province, India. *Environmental Geology*. 1995;25(3):197-204.
- [4]. Gordon B, Callan P, Vickers C. WHO guidelines for drinking-water quality. World Health Organization (WHO). 4th ed. Geneva. Switzerland. 2008;38(3): 564 p.
- [5]. ISIRI. Drinking water physical and chemical specification. Institute of Standard and Industrial Research of Iran, Tehran. 1053. 5th revision. 2013;26p [Persian].
- [6]. Amarlooei A, Nazeri M, Sayeh miri K, Nourmoradi H, Sayehmiri K, Khodarahmi F. Investigation on the concentration of nitrate and nitrite in Ilam ground waters. *Scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences (sjimu)*. 2014;22(4):34-41 [Persian].
- [7]. Khodai K, Mohammadzadeh H, Nasseri H, Shahsavari AH. Evaluating of nitrate contamination in Dezful-Andimeshk plain and identifying of nitrate sources using 15N and 18O Isotopes. *Iranian Journal of Geology*. 2012; 22(6):93-111 [Persian].
- [8]. Majumdar D, Gupta N. Nitrate pollution of ground water and associated human health disorders. *Indian Journal of Environmental Health*. 2000;42(1):28-39.
- [9]. Jafari Malekabadi A, Afyuni M, Mousavi S.F, Khosravi A. Nitrate concentration In groundwater In Isfahan province. *Journal of Water and Soil Science (JWSS)*. 2004;8(3):69-82 [Persian].
- [10]. Khosravi Dehkordi A, Afyuni M, Mousavi S.F. Investigation of nitrate concentration changes of groundwater in Zayandehroud margin in Isfahan province. *Journal of Environmental Studies*. 2006;32(39):33-40 [Persian].
- [11]. Selek Z, Yetis A. Assessment of nitrate contamination in a transnational groundwater basin: a case study in the Ceylanpınar Plain, Turkey. *Environ Earth Science*. 2017;76:698: 1-11.
- [12]. Mirzavand M, Ghazavi R, Sadatinejad S., Ghasemieh H, Vali A. Investigation of Kashan aquifer situation using electric resistance method with Shelomberje arrangement. *Desert Ecosystem Engineering Journal*. 2014;3(4):43-56 [Persian].

دلیل برداشت‌های بیش از حد، با کاهش سالانه یک‌متری سطح ایستابی و نیز با هجوم آب‌های شور به صورت پدیده آپکنینگ مواجه‌اند. از طرفی، به دلیل نبود سیستم فاضلاب شهری و روستایی، وجود چاه‌های جذبی و استفاده از کودهای شیمیایی به‌ویژه کود نیتروژن در فعالیت‌های کشاورزی و برگشت پساب مصرفی به آبخوان، بیش از ۹۵ درصد آبخوان آلوده به نترات و نیتريت است. بنابراین، با توجه به وضعیت بحرانی آبخوان دشت کاشان، موارد زیر به‌عنوان فعالیت‌های ضروری برای جلوگیری از تخریب هرچه بیشتر آبخوان، پیشنهاد می‌شود:

۱. اجرای سند آمایش سرزمین با تأکید بر آب مجازی؛
۲. تکمیل سیستم فاضلاب شهری، روستایی و صنعتی؛
۳. انتقال کارخانه‌های آب‌بر و جدید به خروجی آبخوان (شمال شرق آبخوان) برای حفظ جهت جریان و تخلیه شورابه‌ها به داخل دریاچه نمک؛
۴. جلوگیری از پمپاژ آب‌های زیرزمینی به‌منظور استفاده در امر کشاورزی؛
۵. دادن سهام غیر قابل غیر به کشاورزان و دادن آموزش و کمک لازم برای تغییر الگوی کشت و ایجاد کشت‌های گلخانه‌ای با مصرف کم آب؛
۶. احداث شرکت تصفیه آب در شمال شرق آبخوان به منظور تأمین آب مورد نیاز کارخانه‌ها از آب‌های شور این منطقه و حفظ جهت جریان در آنجا.

سپاسگزاری

با توجه به اینکه پژوهش حاضر با کد WRE1-80449 مورد حمایت مؤسسه تحقیقات آب بوده است، نویسندگان مقاله حاضر از همکاری صمیمانه این مؤسسه کمال تشکر و قدردانی را دارند. از طرفی، با توجه به اینکه آنالیزهای مورد نیاز پژوهش حاضر در دانشگاه اتاوی کانادا انجام شده است، لازم می‌دانیم از پروفیسور Ian Douglas Clark به دلیل فراهم کردن هزینه و شرایط مورد نیاز انجام این آنالیزها، تشکر کنیم.

منابع

- [1]. Singh ET, Gupta A, Singh NR. Groundwater quality in Imphal West district, Manipur, India, with multivariate statistical analysis of data. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2013; 20:2421-30.

- [13]. Mirzavand M, Ghazavi R. A stochastic modelling technique for groundwater level forecasting in an arid environment using time series methods. *Water Resources Management*. 2015;29(4):1315–1328.
- [14]. Clark ID. *Groundwater geochemistry and isotopes*. Taylor & Francis Group; 2015. 471 p.
- [15]. <http://www.aqion.de/site/92>.
- [16]. Amiri V, Nakhaei M, Lak R, Kholghi M. Assessment of seasonal groundwater quality and potential saltwater intrusion: a study case in Urmia coastal aquifer (NW Iran) using the groundwater quality index (GQI) and hydrochemical facies evolution diagram (HFE-D). *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2016;30(5):1473–1484.
- [17]. Mehdinia SM, Nikravesh SH. Determining contamination of drinking water distribution network in Damghan city. *Journal of Water & Wastewater*. 2002;43:60-1 [Persian].
- [18]. Menció A, Mas-pla J, Otero N, Regàs O, Boyroura M, Puig R, et al. Nitrate pollution of groundwater; all right ... , but nothing else? *Science of Total Environment*. 2015; 539:241-251.
- [19]. Xing L, Guo H, Zhan Y. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China plain. *Journal of Assian Earth Science*. 2013;70-71:250-64.