

بررسی عوامل مؤثر بر هیدروژئوشیمی آبخوان زاهدان با استفاده از روش‌های تحلیل عاملی، نمایه‌های اشیاع و نمودارهای ترکیبی

جواد دولتی^{1*} - غلامرضا لشکری پور² - ناصر حافظی مقدس³

تاریخ دریافت: 1392/5/6

تاریخ پذیرش: 1393/5/27

چکیده

آبخوان زاهدان در شمال حوضه آبریز زاهدان قرار دارد. بررسی کیفی منابع آب زیرزمینی این آبخوان به دلیل تأمین بخشی از آب شرب، کشاورزی و صنعتی این شهر ضروری است. به منظور اجرای برنامه پایش منابع آب زیرزمینی و بررسی فرآیندهای کنترل‌کننده و تعیین منشأ کاتیون‌ها و آنیون‌های آب زیرزمینی این آبخوان، از 26 حلقه چاه بهره‌برداری نمونه‌برداری شد. سدیم، کلر و سولفات به ترتیب کاتیون و آنیون‌های غالب بوده و تیپ آب سدیم-کلروره و سدیم-سولفات تیپ‌های غالب آب زیرزمینی این آبخوان هستند. تحلیل عاملی نتایج نمونه‌ها نشان می‌دهد که دو عامل اصلی طبیعی و انسانی در مهرماه به ترتیب 65/25 و 18/5 درصد و در بهمن‌ماه به ترتیب 58/82 و 15/56 درصد تغییرات کیفی آب زیرزمینی را کنترل می‌کند. عامل اول که مرتبط با فرآیندهای طبیعی تبادل یونی و انحلال است، با یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، Cl^- ، K^+ و SO_4^{2-} ارتباط داشته و عامل دوم که با یون‌های NO_3^- و Ca^{2+} ارتباط دارد، به فعالیت انسانی بستگی دارد. در نمونه‌های مهرماه شاخص‌های اشیاع کانی‌های کلسیت، ژپس و دولومیت حالت تحت اشیاع داشته و در بهمن‌ماه شاخص‌های کلسیت و دولومیت به ترتیب در بیش از 60 و 90 درصد نمونه‌ها حالت اشیاع داشته ولی شاخص ژپس در تمامی نمونه‌ها حالت تحت اشیاع دارد. اشیاع نبودن آب زیرزمینی آبخوان زاهدان نشان‌دهنده کافی نبودن زمان ماندگاری آب در آبخوان برای انحلال کانی‌ها می‌باشد. با توجه به عدم احداث شبکه جمع‌آوری فاضلاب در شهر زاهدان و دفع پساب توسط چاه‌های جذبی یون‌های SO_4^{2-} و NO_3^- در بیش از 70 درصد نمونه‌های آبریززمینی منشأ غیرطبیعی (نفوذ فاضلاب) دارند.

واژه‌های کلیدی: هیدروژئوشیمی، آبخوان زاهدان، تحلیل عاملی، نمودارهای ترکیبی، نمایه‌های اشیاع

مقدمه

شیمیایی آن‌ها را ممکن می‌سازد (25). بررسی تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که این روش برای مطالعه و دسته‌بندی فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است. کلوئیر و همکاران (28) روش تحلیل عاملی را برای بررسی روند تکامل هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی آبخوان سازندی Bases-Laurextides در کبک کانادا با استفاده از داده‌های نمونه‌های آب مورد استفاده قرار دادند. بلخاری و همکاران (25 و 26) با استفاده از این روش خصوصیات هیدروژئوشیمی آبخوان AinAzel در شمال الجزایر و روابط واکنشی بین آب‌های زیرزمینی و سنگ‌های منطقه را بررسی کردند. چن و همکاران (27) روش تحلیل عاملی را برای ارزیابی فراوانی عناصر کمیاب آب‌های زیرزمینی در منطقه ساحلی Shenzhen چین مورد استفاده قرار داده و نشان دادند که عناصر W, MO, AS, Cr, V و U با شرایط اکسیداسیونی آب زیرزمینی منطقه ارتباط مثبت داشته و با استفاده از تحلیل عاملی مهم‌ترین عامل مؤثر بر کیفیت آبخوان را اکسیداسیون تعیین کردند. محمدی و همکاران (21) با استفاده از روش تحلیل عاملی، هیدروژئوشیمی آبخوان ساحلی

عوامل متعددی از جمله زمین‌شناسی، فرآیند هوازدگی (شیمیایی)، شرایط هیدروژئولوژیکی، اختلاط آب‌ها، شرایط جوی و تبخیر در فراوانی و غلظت یون‌ها در منابع آب (سطحی و زیرسطحی) مؤثر هستند (19). با استفاده از تجزیه و تحلیل غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، نمودارهای ترکیبی، مدل‌های کیفی، نمایه‌های اشیاع مختلف و فاکتور عاملی⁴ که نوعی روش آماری چندمتغیره است، می‌توان عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب‌های زیرزمینی را شناسایی کرد.

روش تحلیل عاملی برای بررسی پدیده‌های زیست‌محیطی به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است (30). استفاده از این روش، گروه‌بندی نمونه‌های آب در گروه‌های مستقل بر اساس خصوصیات

1، 2 و 3- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

* - نویسنده مسئول: (Email: jdownlati@yahoo.co.uk)

4- FA: Factor Analysis

ضخامت آبرفت آبخوان نشان می‌دهد که در دشت تعدادی گودی پر شده توسط آبرفت وجود دارد. در مقاطع ژئوفیزیک گسل‌هایی که سنگ کف را تحت تأثیر قرار داده باشند، شناسایی نشده است (10). مهم‌ترین این گودی‌ها در جنوب غرب شهر قرار دارد که بیشتر چاه‌های آب شرب شهر زاهدان در آن حفر شده و یکی از ضخیم‌ترین بخش‌های آبخوان با ضخامت حدود 70 متر است. بخشش مالی این گودی به ارتفاعات منفرد غرب شهر و شمال غرب آن به گودی دورین که یکی از ورودی‌های آب سطحی به آبخوان است ختم می‌شود. ضخامت رسوبات در این بخش حدود 50 متر و در جنوب شرقی دشت حدود 60 متر می‌باشد (15).

سنگ کف آبخوان در شمال غرب از فلیش‌های قدیمی، در نواحی غربی و جنوب غربی از گرانیت و در جنوب، شرق و جنوب شرق از فلیش‌های جوان و رسوبات نئوژن تشکیل شده است. جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان از غرب به شرق و در مناطق جنوبی به سمت شمال بوده و در نهایت از شمال شرق آبخوان خارج می‌شود و کیفیت آب زیرزمینی از ارتفاعات غربی به سمت شرق، شدیداً کاهش می‌یابد (15).

بررسی وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آبخوان زاهدان نشان می‌دهد که بر اساس آخرین آماربرداری سالانه (1388) در این آبخوان 67/8 میلیون مترمکعب آبریززمینی برداشت می‌شود که سهم مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب 8/22، 0/37 و 0/8 میلیون مترمکعب است. لازم به ذکر است که سالانه 25 میلیون مترمکعب آب سطحی از چاه نیمه‌های زابل برای تأمین آب شرب شهر منتقل می‌شود.

در مطالعه صورت گرفته در سال 1380 توسط خزاعی و همکاران (30) از 41 حلقه چاه نمونه‌برداری شده و اثرات فعالیت‌های انسانی به‌ویژه دفع پساب توسط چاه‌های جذبی بر کیفیت آب زیرزمینی بررسی شده است. در این بررسی مشخص شد که هدایت الکتریکی در برخی نقاط آبخوان در طی 25 سال (1355 تا 1380)، 7500 میکرومهموس بر سانتی‌متر افزایش یافته و غلظت نیترات در چاه‌های مرکز شهر به بیش از 240 میلی‌گرم بر لیتر رسیده است.

بررسی روند تغییرات نقشه‌های هدایت الکتریکی، باقیمانده خشک (TDS) و کلر این آبخوان نشان می‌دهد که میزان هدایت الکتریکی، باقیمانده خشک و کلر در غرب آبخوان حداقل بوده و در جهت حرکت آب زیرزمینی به سمت شرق شدیداً افزایش می‌یابد به‌طوری‌که هدایت الکتریکی از 1500 به بیش از 13500 میکرومهموس بر سانتی‌متر، باقیمانده خشک املاح محلول از 650 تا بیش از 6000 میلی‌گرم بر لیتر و غلظت کلر از 130 تا بیش از 2800 میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. علت کاهش شدید کیفیت آب زیرزمینی را می‌توان وجود رسوبات تبخیری و کاهش دهنده کیفیت در رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان در نظر گرفت (15).

آبدان - دیر را بررسی نموده و سه فرآیند اصلی تبخیر، نفوذ آب‌های آهکی و آب‌های برگشتی کشاورزی را به‌عنوان عوامل اصلی کنترل‌کننده کیفیت آبخوان معرفی کردند.

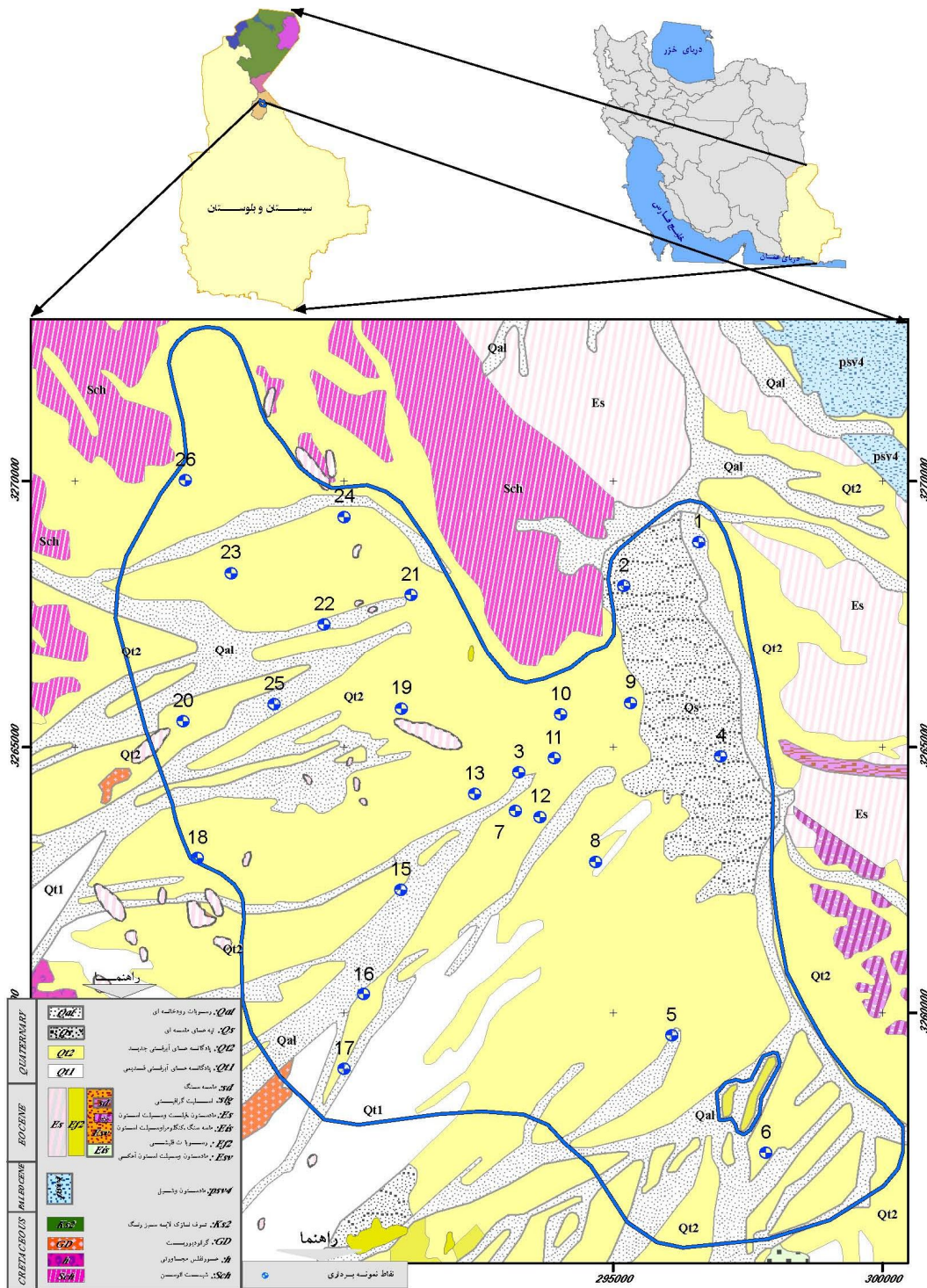
علاوه بر این روش تحلیل عاملی در دشت‌های سرچاهان توسط گیومیان و همکاران (15)، قروه توسط زراعی و همکاران (8) و خوی توسط جلالی و اصغری مقدم (2)، معدن گل‌گهر توسط حسینی سبزواری و همکاران (3) و منابع آب شهر گرگان توسط قره محمدلو و همکاران (18) برای بررسی هیدروژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفته و کارایی خود را به‌خوبی نشان داده است. رضایی (6) عوامل کنترل‌کننده شوری آبخوان آبرفتی دشت مند استان بوشهر را با استفاده از روش تحلیل عاملی و نمودارهای ترکیبی مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که سه عامل انحلال کانی‌های سولفات‌ها سازندهای گروه فارس، انحلال هالیت گنبد نمکی شرق دشت، نفوذ آب دریا و انحلال گازکربنیک در آب نفوذی آبخوان مهم‌ترین عوامل کنترل کیفیت بوده و سهم هر یک به ترتیب 40، 28 و 15 درصد است. همچنین از نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی مختلف توسط محمدزاده و همکاران (4 و 20)، فاریابی و همکاران (17) و رضایی (7) برای شناخت فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی استفاده شده و کارایی آن‌ها برای تعیین منشأ عناصر و فرآیندهای مؤثر بر آبخوان اثبات شده است. در این تحقیق نیز هیدروژئوشیمی آبخوان زاهدان با استفاده از روش تحلیل عاملی، نسبت‌های یونی، نمودارهای ترکیبی و نمایه‌های اشباع با هدف تعیین عوامل مؤثر در کیفیت آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است.

موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زاهدان با مساحت 2261 کیلومترمربع در شرق ایران و شمال استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. این حوضه اقلیمی خشک داشته و متوسط بارندگی 48 ساله (1344-45 تا 1389-90) آن بر اساس آمار ایستگاه سینوپتیک زاهدان حدود 78 میلی‌متر است و تابستان گرم و زمستان سرد و خشک دارد (15).

از نظر زمین‌شناسی این محدوده قسمتی از واحد تکتونیکی زاهدان - خاش است که از سه واحد سنگی فلیش‌های قدیمی، توده گرانودیوریتی و فلیش‌ها و آبرفت‌های جوان تشکیل شده است. دشت زاهدان فروافتادگی کوچک محصور بین ارتفاعات است که مسیل‌های زیارت و گوربند از غرب، حاجی‌آباد از جنوب غرب و کلات زاده از جنوب وارد آن شده و پس از پیمودن دشت از شمال شرقی آن خارج می‌شوند. متوسط ارتفاع دشت زاهدان حدود 1400 متر و شیب عمومی دشت از سمت غرب و جنوب غرب به سمت شرق و شمال شرق است (13).

آبخوان زاهدان با مساحت 133 کیلومترمربع در بخش شمالی دشت واقع شده و سنگ کف آنتوپوگرافی ناهمواری دارد. بررسی نقشه



شکل 1- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (22) و موقعیت چاه های نمونه برداری آبخوان زاهدان

مواد و روش‌ها

در هر دو دوره نمونه‌های آبی‌زیمینی آبخوان از نظر تیپ در 3 گروه بی کربناته، سولفات و کلروره قرار می‌گیرند. در جدول 3 نوع تیپ و فراوانی آن‌ها ارائه شده است. تیپ آب در این آبخوان در جهت جریان آب زیرزمینی از کربناته سدیک در بخش غربی به سولفات سدیک در بخش غربی و مرکزی و در نهایت کلروره سدیک در بخش شرقی تغییر می‌کند.

با توجه به نتایج آنالیز نمونه‌های آب زیرزمینی (جدول 2)، کاتیون غالب در هر دو دوره Na^+ و آمیون غالب در نمونه‌های مهرماه در 40 درصد نمونه‌ها Cl^- و در 56 درصد SO_4^{2-} و در نمونه‌های بهمن‌ماه در 64 درصد نمونه‌ها Cl^- و در 32 درصد SO_4^{2-} است. تیپ غالب آب زیرزمینی کلرور سدیک بوده ولی در بخش مهمی از آبخوان تیپ سولفات سدیک و در بخش کوچکی از آن تیپ کربناته سدیک گسترش دارد.

تحلیل عاملی

انجام تحلیل عاملی دارای سه مرحله تهیه ماتریس همبستگی از تمام متغیرها، استخراج عامل‌ها و تفسیر نتایج است. با انجام آزمون KMO^1 بر روی داده‌ها (جدول 4) می‌توان از مناسب بودن داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی اطمینان حاصل کرد. در صورتی که مقدار KMO کم‌تر از 0/5 باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نبوده و اگر مقدار آن بین 0/5 تا 0/69 باشد، می‌توان با احتیاط از تحلیل عاملی استفاده نمود و اگر بیش از 0/7 باشد، همبستگی موجود بین داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب بوده و تحلیل عاملی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها قابل استفاده است (9). بررسی مقدار KMO محاسبه شده برای داده‌های آبخوان زاهدان (جدول 5) نشان می‌دهد که این ضریب برای داده‌های مهر، بهمن و کل داده به ترتیب 0/69، 0/70 و 0/71 است، لذا از تحلیل عاملی برای تجزیه و تحلیل این داده‌ها می‌توان استفاده نمود. آزمون بارتلت انجام شده نیز فرض یک بودن ماتریس ضرایب همبستگی داده‌ها را نشان می‌دهد. با رد فرض یک بودن ماتریس، همبسته بودن داده‌ها تأیید شده و صحت داده‌ها برای تحلیل عاملی نیز تأیید می‌شود.

به منظور انجام پایش کیفی آبخوان زاهدان در مهرماه و بهمن‌ماه 1391 از 26 حلقه چاه نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه مهندسی مشاور خاک آزما نگین آنالیز شده است. موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری در شکل 1 ارائه شده است (14). پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، درجه حرارت (T) و PH در هنگام نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد و سایر پارامترهای کیفی با استفاده از روش‌های ذکر شده در جدول 1 ارائه شده است. محاسبه درصد خطای موازنه یونی اختلاف کاتیون‌ها و آمیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان گرم بر لیتر نشان می‌دهد که خطای انجام آزمایش در تمام نمونه‌ها در حد استاندارد تعیین شده برای صحت داده‌ها است. لازم به ذکر است که به جز نمونه چاه شماره 16 مربوط به نمونه‌برداری بهمن‌ماه که خطای انجام آزمایش آن بین 5 تا 10 درصد است، خطای انجام آزمایش سایر نمونه‌ها کم‌تر از 5 درصد است (جدول 2).

برای شناسایی عوامل حاکم بر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی و روابط بین متغیرها از روش تحلیل عاملی، نمودارهای ترکیبی و نمایه‌های اشباع استفاده شده و برای ترسیم نقشه و نمودارهای ترکیبی، انجام تحلیل عاملی، محاسبه نمایه‌های اشباع کانی‌ها به ترتیب از نرم‌افزارهای Arc GIS 9.3، Excel، SPSS 13.2007 و PHREEQC-Ver. 2.18 استفاده شده است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های برداشت شده آبخوان زاهدان و میانگین پارامترها در دو دوره مهرماه و بهمن‌ماه در جدول 2 ارائه شده است (11 و 12). بررسی نتایج آنالیز نمونه‌های دو مرحله نمونه‌برداری نشان می‌دهد که تقریباً تمامی نمونه‌ها (به جز نمونه مربوط به نیروگاه گاز) خیلی شور بوده، حداکثر، حداقل و میانگین هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در مهرماه 1359، 12620 و 6887 میکرومهموس بر سانتی‌متر و در بهمن‌ماه 2141، 12771 و 7026 میکرومهموس بر سانتی‌متر است. همچنین حداقل و حداکثر غلظت باقیمانده خشک املاح محلول (TDS) در مهرماه 652 و 6890 میلی‌گرم بر لیتر و در بهمن‌ماه 982 و 7080 میلی‌گرم بر لیتر است.

جدول 1- روش‌ها و استانداردهای مورد استفاده در آزمایشگاه برای تجزیه نمونه‌ها

ردیف	نام دستگاه	استاندارد	شماره استاندارد	کاربرد
1	جذب اتمی کوره گرافیتی	نشریه روشها و بررسیهای آزمایشگاهی	168	برای سنجش کاتیونها و آمیونها
2	پتانسیومتری	استاندارد متد	4500NH3-	برای سنجش نیترات
3	PH متر قابل حمل	استاندارد متد	4500-168	اندازه گیری EC در صحرا
4	Ec متر قابل حمل	نشریه روشها و بررسیهای آزمایشگاهی	4500-168	اندازه گیری EC در صحرا

جدول 3- نوع و فراوانی تیپ آب زیرزمینی آبخوان زاهدان

تیپ آب زیرزمینی	مهر 1391		بهمن 1391	
	تعداد چاه ها	درصد	تعداد چاه ها	درصد
کلور سدیک	19	62	14	54
سولفات سدیک	9	34	11	42
بی کربناته سدیک	1	4	1	4

جدول 4- ارزیابی داده‌ها براساس مقادیر ضریب KMO (9)

مقدار KMO	تناسب داده‌ها برای تحلیل عاملی
بزرگتر یا مساوی 9/0	عالی
089-80/0	خیلی خوب
79/0-70/0	خوب
69/0-60/0	متوسط
59/0-50/0	ضعیف
کمتر از 5/0	غیر قابل پذیرش

جدول 5- مقادیر ضرایب KMO و آزمون بارتلت محاسبه شده برای داده‌های آبخوان زاهدان

کفایت داده‌ها برای تحلیل عاملی KMO آزمون	مهر 1392		کل نتایج
	0.71	0.66	
تقریب مجذور کای	450.9	279.2	635.5
آزمون کرویت بارتلت	55	55	55
سطح معنی داری	0.0	0.0	0.0

محدوده شهری قرار دارد) و عدم تکمیل و بهره‌برداری شبکه جمع‌آوری فاضلاب در آن، انتقال 25 میلیون مترمکعب آب سطحی از چاه نیمه‌های زابل برای شرب شهر و توسعه کم کشاورزی بر روی آبخوان (با مصرف سالانه 8 میلیون مترمکعب آب زیرزمینی برای آبیاری اراضی کشاورزی که عمدتاً در بخش غربی دشت قرار دارند)، می‌توان آن را ناشی از فعالیت انسانی دانست.

بررسی تحلیل عاملی انجام شده بر روی داده‌های بهمن ماه نشان می‌دهد که در این دوره نیز 2 عامل اصلی، 74/37 درصد تغییرات کیفی آبخوان را کنترل می‌کنند. عامل اول که مانند عامل اول اطلاعات مهرماه با یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، Cl^- و K^+ و SO_4^{2-} همبستگی بالایی دارد 58/82 درصد تغییرات کیفی آبخوان را کنترل می‌کند. عامل دوم نیز با یون‌های NO_3^- و Ca^{2+} ارتباط داشته و حدود 15/56 درصد تغییرات کیفی را در برمی‌گیرد و با فعالیت انسانی ارتباط دارد. با توجه به این که نمونه‌های مهرماه در فصل خشک و نمونه‌های بهمن ماه در فصل تر برداشته شده‌اند، دلیل افزایش درصد عامل اول و کاهش درصد عامل دوم در بهمن ماه نسبت به مهرماه را نفوذ آب‌های سطحی و رواناب در سطح حوضه و افزایش تغذیه عمودی و افقی می‌توان در نظر گرفت. در ادامه هر یک از عوامل محیطی و انسانی مؤثر بر کیفیت آبخوان به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به پیچیده بودن بررسی و شناخت عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت زاهدان، جهت تشخیص سهم هر یک از عوامل از روش تحلیل عاملی (4 و 23) استفاده و جدول همبستگی متغیرها (کاتیون‌ها و آنیون‌ها، TDS) تهیه شده است. بررسی ماتریس همبستگی داده‌ها (جدول 6-الف و ب) که با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده‌اند، نیز نشان می‌دهد که در هر دو دوره بین یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، Cl^- ، K^+ ، SO_4^{2-} و NO_3^- TDS همبستگی بالایی وجود داشته و تحلیل عاملی را بر اساس آن‌ها می‌توان انجام داد.

بررسی محاسبات تعیین عامل‌های مؤثر با استفاده از روش تعیین مقدار ویژه داده‌های آبخوان زاهدان (جدول 7) نشان می‌دهد که در هر دو داده مهرماه و بهمن ماه دو عامل اصلی مؤثر بر کیفیت آبخوان وجود دارد. تحلیل عاملی بر اساس داده‌های مهرماه آبخوان زاهدان نشان می‌دهد که 2 عامل اصلی، 83/3 درصد از تغییرات کیفی آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند. عامل اول که با یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، Cl^- ، K^+ و SO_4^{2-} ارتباط دارد، 65/25 درصد تغییرات کیفی آب زیرزمینی را کنترل کرده و به عوامل طبیعی (تبادل یونی، انحلال کانی‌ها و ...) بستگی دارد.

عامل دوم که با یون NO_3^- و Ca^{2+} مرتبط است، حدود 18/5 درصد تغییرات کیفی را کنترل کرده و با توجه به گسترش شهر در بخش اعظم آبخوان (حدود 70 کیلومتر مربع از سطح آبخوان در

جدول 6- جدول همبستگی متغیرها در آبخوان زاهدان الف: داده‌های مهرماه و ب: داده‌های بهمن‌ماه

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CL ⁻	SO ₄ ²⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	EC
Ca ²⁺	1.00									
Mg ²⁺	0.70	1.00								
Na ⁺	0.54	0.91	1.00							
K ⁺	0.28	0.80	0.76	1.00						
CL ⁻	0.66	0.90	0.90	0.70	1.00					
SO ₄ ²⁺	0.66	0.86	0.93	0.59	0.78	1.00				
HCO ₃ ⁻	0.02-	0.41	0.42	0.63	0.30	0.21	1.00			
NO ₃ ⁻	0.46	0.24	0.11	0.03-	0.11	0.34	0.20-	1.00		
TDS	0.62	0.93	0.99	0.76	0.92	0.92	0.40	0.15	1.00	

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CL ⁻	SO ₄ ²⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS
Ca ²⁺	1.00								
Mg ²⁺	0.51	1.00							
Na ⁺	0.40	0.80	1.00						
K ⁺	0.42	0.60	0.54	1.00					
CL ⁻	0.57	0.81	0.92	0.54	1.00				
SO ₄ ²⁺	0.58	0.75	0.91	0.51	0.83	1.00			
HCO ₃ ⁻	0.08-	0.37	0.39	0.20	0.27	0.11	1.00		
NO ₃ ⁻	0.47	0.10	0.02-	0.13	0.04	0.24	0.25-	1.00	
TDS	0.49	0.82	0.97	0.61	0.94	0.88	0.36	0.04	1.00

حاصله در ادامه به تفصیل ارائه شده‌اند. نتایج محاسبه نسبت‌های یونی مختلف برای نمونه‌برداری‌های مهرماه و بهمن‌ماه آبخوان زاهدان در جدول 8 ارائه شده و این نسبت‌ها بر اساس منابع (17) و (29) تفسیر شده‌اند. با توجه به نسبت‌های یونی محاسبه شده، عوامل طبیعی مؤثر بر وضعیت کیفی آب زیرزمینی آبخوان در جدول 8 ارائه شده است.

عوامل طبیعی کنترل‌کننده شیمی آب زیرزمینی آبخوان زاهدان

با توجه به اینکه بر اساس تحلیل عاملی، بیش از 50 درصد عوامل مؤثر بر کیفیت آبخوان، عوامل طبیعی است، با استفاده از نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی منشأ املاح و یون‌ها و فرآیندهای مؤثر بر هیدروژنوشیمی آبخوان، بررسی شده که نتایج

جدول 7- الگوی عاملی به دست آمده برای آبخوان زاهدان بر اساس داده‌های مهرماه و بهمن‌ماه

متغیرها	مهر 1391		بهمن 1391		کل نتایج	
	1	2	1	2	1	2
Ca ²⁺	0/653	0/583	0/625	0/482	0/596	0/619
Mg ²⁺	0/971	0/079	0/874	-0/003	0/934	0/067
Na ⁺	0/971	-0/033	0/952	-0/143	0/965	-0/043
K ⁺	0/824	-0/381	0/648	0/063	0/758	-0/163
CL ⁻	0/924	0/062	0/961	-0/058	0/927	0/072
SO ₄ ²⁺	0/898	0/258	0/907	0/15	0/883	0/275
Hco ₃ ⁻	0/473	-0/675	0/337	-0/378	0/448	-0/649
NO ₃ ⁻	0/181	0/778	0/108	0/983	0/115	0/815
TDS	0/982	0/019	0/971	-0/084	0/978	0/014
درصد واریانس هر عامل	65/25	18/05	58/82	15/56	61/56	17/58
درصد تجمعی واریانس	65/25	83/30	58/82	74/37	61/56	79/14

جدول 8- نتایج تحلیل نسبت‌های یونی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان زاهدان

نسبت یونی	مقادیر	مفهوم	مهر 1391	بهمن 1391
$(Na+K)/(\text{Cl}^-+K^++Na)$ (Cl^-+Ca)	بین 2/0 تا 8/0	هوازگی پلاژیوکلاز	19 نمونه: بین 2/0 تا 8/0	19 نمونه: بین 2/0 تا 8/0
$(\text{Cl}^-+Na)/Na$	5/0 <	منشاء سدیم آلیت یا تبادل یونی	هر 25 نمونه: بیش از 5/0	هر 25 نمونه: بیش از 5/0
$(\text{Mg}^{2+}+Ca)/\text{Mg}^{2+}$	5/0 >	هوازگی گرانیت	22 نمونه: بیش از 5/0	21 نمونه: بیش از 5/0
$(\text{SO}_4^{2-}+Ca)/Ca$	5/0 < 0.5 5/0 >	منشاء کلسیم غیر از انحلال ژپس است منشاء کلسیم انحلال ژپس است خروج کلسیم بر اثر تبادل یونی یا رسوب کلسیت	هر 25 نمونه: کم تر از 5/0	هر 25 نمونه: کم تر از 5/0
$2-\text{SO}_4/(2+\text{Mg}^{2+}+Ca)$	بین 2/0 تا 8/0 8/0 <	فرآیند ددولومیتزاسیون ددولومیتزاسیون	15 نمونه: بین 2/0 تا 8/0 10 نمونه: بیش از 8/0	15 نمونه: بین 2/0 تا 8/0 11 نمونه: بیش از 8/0
Sum Anions/Cl	8/0 >	هوازگی سنگها	هر 25 نمونه: کم تر از 8/0	هر 25 نمونه: کم تر از 8/0
Sum Anions/Hco3	8/0 > میزان سولفات کم 8/0 > میزان سولفات زیاد	تبخیرها یا شورآبه انحلال ژپس	هر 25 نمونه: کم تر از 8/0	هر 25 نمونه: کم تر از 8/0

تبادل یونی¹

Na^+-Cl^- در برابر $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ نیز نشان می‌دهد که تقریباً تمامی نمونه‌ها در طول خط دارای شیب 1- جمع شده‌اند و فرآیند تبادل یونی عادی در تمام نمونه‌های آب زیرزمینی مشاهده می‌شود (شکل 2- ج). در نمودار $(Na+K)/(Na-K+Ca)$ در مقابل TDS (شکل 2- د) افزایش نسبت کاتیونی با افزایش TDS نیز بیانگر تأثیر تبادل کاتیونی است.

یکی از فرآیندهای مهم که نقش بارزی در غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب زیرزمینی داشته و بررسی آن در مباحث مربوط به هیدروژئوشیمی اهمیت ویژه‌ای دارد فرآیند تبادل یونی (عادی و معکوس) است. این فرآیند در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم مانند مونت‌موریلونیت بر اساس رابطه 1 با کلسیم و منیزیم آب زیرزمینی وارد واکنش شده و باعث ورود سدیم به آب زیرزمینی می‌شوند (19).

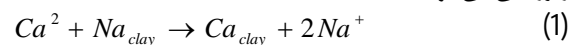
هوازگی سنگها

برای شناسایی فرآیندهای کنترل‌کننده شیمی آب‌های سطحی نمودارهایی بر مبنای نسبت‌های فاکتورهای $\frac{Na}{Ca^{2+} + Na^+}$ ،

$\frac{Cl^-}{HCO_3^- + Cl^-}$ و TDS توسط گیبس در سال 1970 ارائه شد (27)

که به‌طور وسیعی در بررسی آب‌های زیرزمینی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس این نمودارها عوامل کنترل‌کننده شیمی آب‌ها ریزش‌های جوی (بارندگی)، هوازگی سنگ‌ها و تبخیر و تبلور معرفی شده است. ترسیم این نمودارها برای آبخوان زاهدان (شکل 3- الف و ب) نشان می‌دهد که هر دو سری نمونه‌برداری، نمونه‌ها عمدتاً در محدوده تبخیر و تبلور قرار گرفته و این عامل اصلی‌ترین کنترل‌کننده ترکیب آب زیرزمینی آبخوان است که با توجه به جنس سنگ‌ها و توپوگرافی منطقی به نظر می‌رسد.

با ترسیم نمودارهای ترکیبی Mg^{2+}/Na^+ و HCO_3^-/Na^+



وجود فرآیند تبادل یونی در یک آبخوان را با استفاده از نمودارهای ترکیبی مختلفی می‌توان بررسی کرد که مهم‌ترین آن‌ها برای آبخوان زاهدان ترسیم شده است (شکل 2). بررسی نمودار $\frac{Na^+}{Cl^-}$ در برابر EC (شکل 2- الف) نشان می‌دهد که تمام نمونه‌ها در بالای خط $\frac{Na^+}{Cl^-}=1$ واقع شده و نمونه‌ها تحت تأثیر منشأ دوگانه (تبادل یونی یا انحلال یک کانی سدیم دار) قرار دارند. در نمودار ترسیم شده $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در برابر $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ (شکل 2 ب) که خط 1 نشان‌دهنده فرآیند انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس است، تمامی نمونه‌ها در زیر خط و در بیش از 10meq/lit قرار گرفته که نشان‌دهنده تأثیر انحلال ژپس همزمان با پدیده تبادل کاتیونی در ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی است. بررسی نمودار ترسیم شده

رابطه خطی بین این عناصر و نقش انحلال هالیت در ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی منطقه است، ولی برابر نبودن غلظت کلر و سدیم (برحسب اکی والان گرم) در نمونه‌های آنالیز شده آبخوان زاهدان نشان‌دهنده وجود منشأ دیگر (تجزیه آلیت یا تبادل یونی) برای این دو یون بوده و بررسی نسبت یونی $Na^+/(Na^++Cl^-)$ که در تمامی نمونه‌ها بیش از 0/5 است نیز تأییدکننده این مطلب است. برای پی بردن به منشأ سدیم (طبیعی یا انسان‌زاد) می‌توان از نمودار ترکیبی Na^+ در مقابل Cl^- استفاده کرد (20). در آبخوان زاهدان نسبت Na^+/Cl^- در کلیه نمونه‌های آب بیش از 1 است که نشان‌دهنده منشأ طبیعی Na بوده (شکل 4-الف) و به‌غیر از انحلال کانی‌های تبخیری، انحلال رس‌های سدیم دار مانند مونت‌موریلونیت $(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$ 0/33(Na,Ca) و یا فرآیند تبادل یونی در افزایش Na^+ مؤثر است (21).

سایر فرآیندها

بررسی نسبت یونی $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/Ca^{2+}$ در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان زاهدان نشان می‌دهد که در بیش از 60 درصد نمونه‌ها این نسبت بین 0/2 تا 0/8 بوده و فرآیند دولومیتزاسیون نیز می‌تواند رخ دهد.

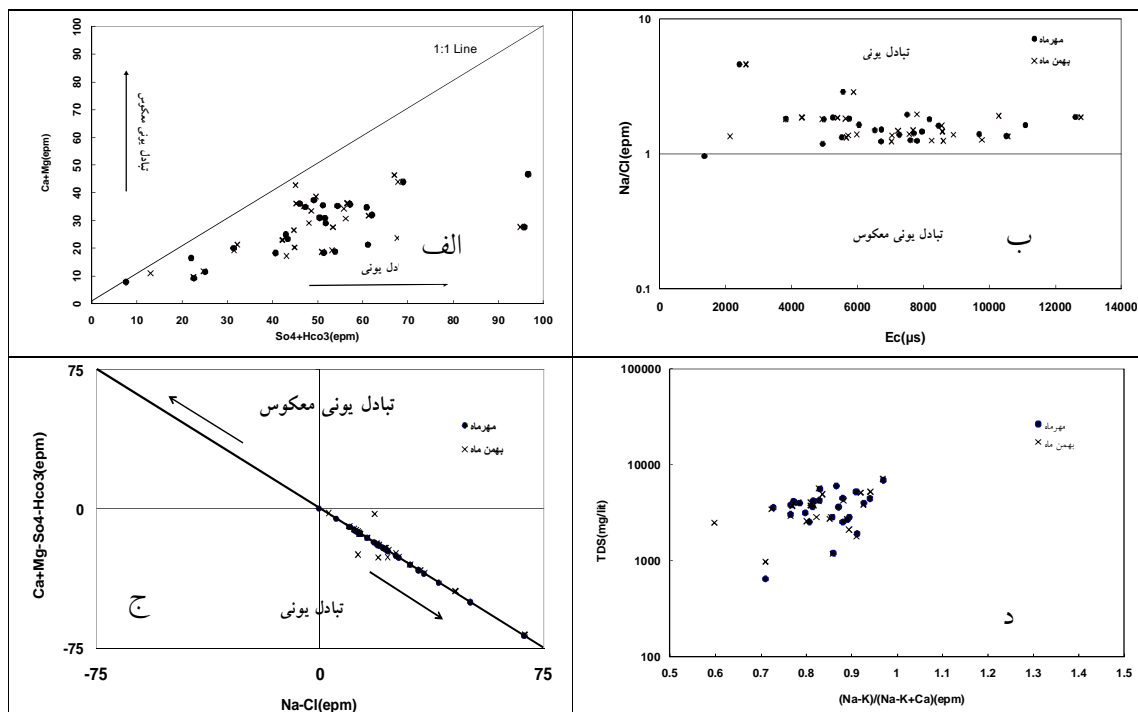
مقابل Ca^{2+}/Na^+ نیز می‌توان حاکم بودن فرآیندهای انحلال سنگ‌های تبخیری و کربناته و هوازگی سیلیکات‌ها مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی را تشخیص داد (31). ترسیم این نمودارها (شکل 3-ج و د) برای آبخوان زاهدان نیز نشان می‌دهد که در هر دو سری نمونه برداری هوازگی سیلیکات‌ها و انحلال تبخیری‌ها مهم‌ترین فرآیند غالب واکنش سنگ و آب هستند.

بررسی نسبت یونی $(Na^++k^+-Cl^-)/(Na^++k^+-Cl^-+Ca^{2+})$ در بین نمونه‌های آب زیرزمینی (جدول 8) نشان می‌دهد که در بخش اعظم نمونه‌های آبخوان (18 نمونه از نمونه برداری مهرماه و 19 نمونه از نمونه برداری بهمن‌ماه) این نسبت بین 0/2 تا 0/8 بوده و هوازگی پلاژیوکلازها در کیفیت آب زیرزمینی نقش مؤثری دارد که نسبت یونی $(Na^+/(Na^++Cl^-))$ نیز به‌خوبی وجود این فرآیند را تأیید کرده و پلاژیوکلاز می‌تواند از نوع غنی از سدیم (احتمالاً آلیت) باشد.

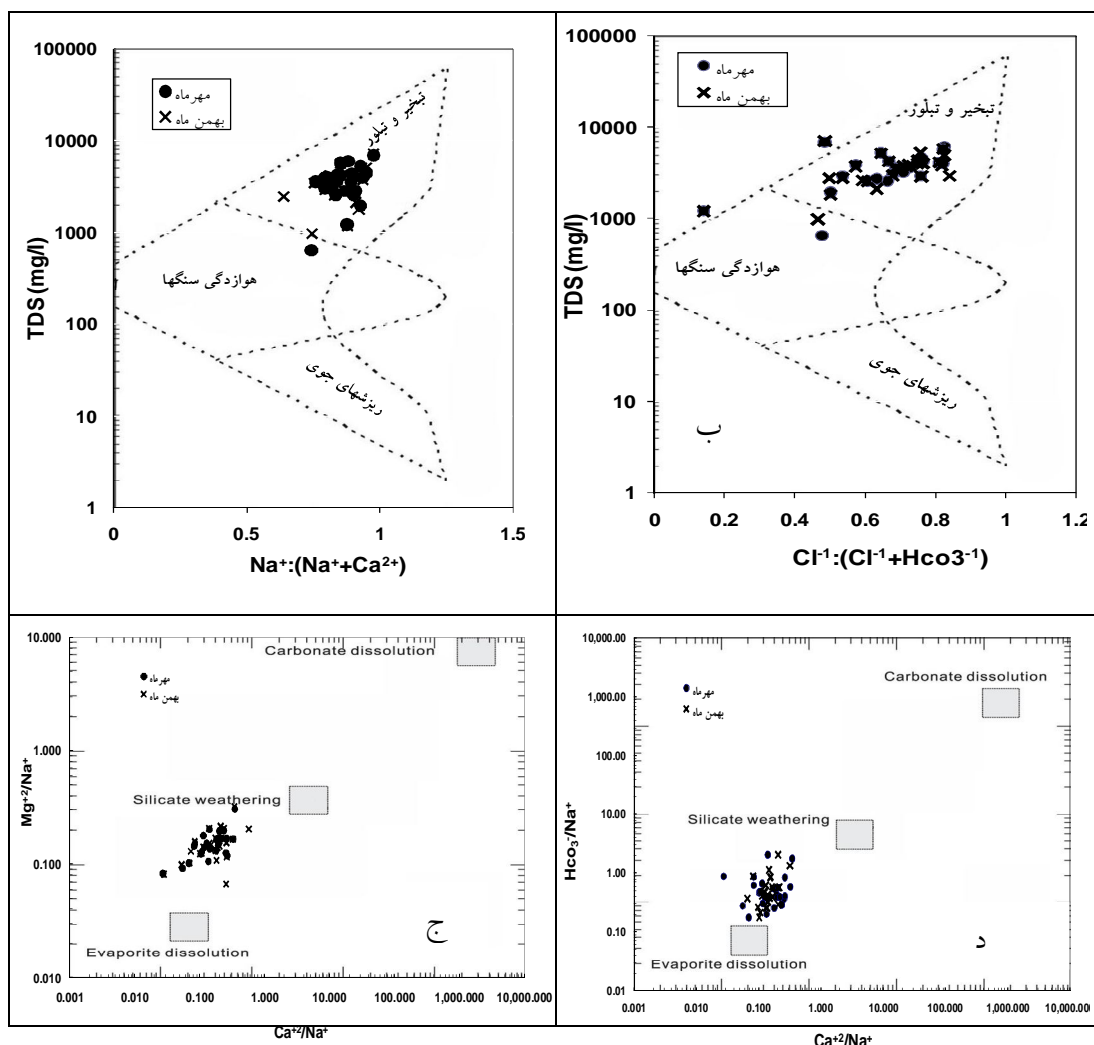
وضعیت سنگ‌شناسی منطقه (وجود سنگ‌های آذرین و دگرگونی در پیرامون آبخوان) و منشأگیری رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان از فرسایش آن‌ها نیز مؤید این مطلب است.

منشأ سدیم و کلر

وجود همبستگی بالا بین یون‌های کلر و سدیم (برای داده‌های مهرماه و بهمن‌ماه به ترتیب $R^2=0.92$ و $R^2=0.9$) نشان‌دهنده وجود



شکل 2- نمودارهای ترکیبی چند متغیره غلظت یون‌های آبخوان زاهدان



شکل 3- محل قرار گرفتن نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان زاهدان بر روی مدل گیبس (الف و ب) نمودارهای ترکیبی Mg^{2+}/Na^{+} و HCO_{3}^{-}/Na^{+} در مقابل Ca^{2+}/Na^{+} (ج و د)

نمونه‌ها حالت تحت اشباع داشته و فرآیند ددولومیتزاسیون در این آبخوان رخ نمی‌دهد.

اشباع بودن آب زیرزمینی آبخوان نسبت به کلسیت و دولومیت در بهمن‌ماه نشان‌دهنده انحلال سنگ‌های دارای کانی‌های کلسیت و دولومیت توسط جریان‌های سطحی و تغذیه آبخوان در فصل بارندگی (زمستان و پائیز) بوده و تشکیل کانی‌های کلسیت و دولومیت در دوره خشک‌سال (تابستان) در رسوبات آبخوان بر اثر فرآیندهای رسوب زایی و یا تبادل یونی می‌تواند باعث غیراشباع شدن آب زیرزمینی آبخوان و منفی شدن شاخص‌های اشباع کلسیت و دولومیت در مهرماه گردد. مقدار متوسط نسبت یونی $Ca^{+2}/(Ca^{+2}+So_{4}^{-2})$ در تمام نقاط نمونه‌برداری هر دو دوره کمتر از 0/5 است (جدول 8) که نشان‌دهنده خروجی و نکلسیتاز طریق رسوب و یا تبادل یونی است (29).

یا توجه به این که در صورت حاکم بودن این فرآیند در آبخوان باید کانی کلسیت حالت اشباع- فوق اشباع و کانی‌های ژپیس و دولومیت حالت تحت اشباع باشند (16 و 19)، نمایه‌های اشباع نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان برای کانی‌های کلسیت (Si_c)، دولومیت (Si_d)، ژپیس (Si_g) ایندزیت (Si_{an})، آراگونیت (Si_{ar}) و هالیت (Si_h) با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC 2.18 محاسبه شده که نتایج آن در جدول 9 ارائه شده است. بررسی شاخص‌های اشباع کانی‌ها در آب زیرزمینی آبخوان زاهدان نشان می‌دهد که تقریباً در تمامی نمونه‌های مهرماه کانی‌های کلسیت، ژپیس و دولومیت تحت اشباع بوده و در نمونه‌های بهمن‌ماه آبخوان نیز هرچند در بیش از 60 درصد نمونه‌ها شاخص اشباع کلسیت و در بیش از 90 درصد نمونه‌ها شاخص دولومیت حالت اشباع داشته ولی شاخص اشباع ژپیس در تمامی

جدول 9- اندیس اشباع آب زیرزمینی نسبت به کانی‌های مختلف

شماره ایستگاه	مهر 1392						بهمن 1392					
	SI _c	SI _d	SI _{an}	SI _{ag}	SI _g	SI _h	SI _c	SI _d	SI _{an}	SI _{ag}	SI _g	SI _h
W1	0.22-	0.09	0.98-	0.37-	0.75-	4.18-	0.19-	0.22	0.95-	0.33-	0.73-	4.16-
W2	0.63-	1.00-	0.66-	0.78-	0.43-	4.31-	0.40	1.12	0.66-	0.26	0.44-	4.32-
W3	0.40-	0.68-	0.65-	0.55-	0.42-	4.44-	0.64	1.40	0.67-	0.50	0.45-	4.44-
W4	0.75-	1.28-	0.38-	0.89-	0.16-	3.85-	0.36	0.96	0.49-	0.21	0.27-	3.94-
W5	0.66-	0.52-	1.23-	0.80-	1.00-	3.80-	0.40	1.60	1.21-	0.25	1.00-	3.80-
W6	0.66-	0.75-	0.94-	0.80-	0.71-	4.04-	0.35	1.29	1.02-	0.20	0.80-	4.04-
W7	0.78-	1.37-	0.66-	0.93-	0.43-	4.43-	0.25	0.71	0.68-	0.11	0.46-	4.43-
W8	0.72-	1.26-	0.47-	0.87-	0.24-	4.00-	0.32	0.85	0.47-	0.17	0.25-	4.01-
W9	0.77-	1.29-	0.68-	0.91-	0.45-	4.29-	0.29	0.84	0.67-	0.14	0.45-	4.30-
W10	0.92-	1.46-	0.80-	1.07-	0.57-	4.34-	0.31	0.80	0.58-	0.16	0.36-	4.35-
W11	0.54-	1.04-	0.57-	0.68-	0.34-	4.46-	0.51	1.07	0.56-	0.37	0.35-	4.46-
W12	0.67-	1.34-	0.49-	0.82-	0.27-	4.33-	0.37	0.49	0.48-	0.23	0.26-	4.33-
W13	0.88-	1.56-	0.63-	1.02-	0.40-	4.56-	0.53	0.96	0.39-	0.39	0.17-	4.83-
W14	0.90-	1.85-	0.63-	1.05-	0.40-	4.76-	0.14	0.25	0.64-	0.00	0.42-	4.77-
W15	1.10-	1.91-	0.99-	1.25-	0.76-	4.56-	0.07-	0.22	0.98-	0.21-	0.76-	4.57-
W16	1.14-	1.77-	1.39-	1.29-	1.16-	4.75-	0.37	1.06	1.00-	0.22	0.78-	4.63-
W17	0.30-	0.02-	1.48-	0.44-	1.25-	5.06-	0.25-	0.11	1.48-	0.39-	1.26-	5.07-
W18	0.32-	0.38-	2.02-	0.47-	1.79-	5.89-	0.21-	0.12-	1.44-	0.36-	1.23-	5.79-
W19	0.13-	0.12	0.91-	0.28-	0.68-	4.80-	0.06-	0.26	0.88-	0.21-	0.67-	4.81-
W20	0.12-	0.24	1.60-	0.27-	1.37-	5.93-	0.07-	0.37	1.59-	0.22-	1.38-	5.93-
W21	0.96-	1.53-	0.72-	1.11-	0.49-	4.24-	0.10	0.62	0.73-	0.04-	0.51-	4.24-
W22	0.94-	1.59-	0.80-	1.08-	0.57-	4.82-	0.12	0.58	0.78-	0.02-	0.56-	4.84-
W23	0.09	0.41	0.60-	0.06-	0.37-	4.39-	0.13	0.55	0.59-	0.01-	0.38-	4.39-
W24	1.12-	1.85-	1.01-	1.27-	0.79-	4.68-	0.11-	0.19	1.01-	0.26-	0.79-	4.69-
W25	0.53-	0.60-	0.98-	0.68-	0.75-	4.44-	0.49-	0.48-	0.97-	0.63-	0.76-	4.45-
W26	0	0	0	0	0	0	0.23-	0.36-	0.83-	0.37-	0.62-	4.61-
میانگین	0.62-	0.93-	0.86-	0.76-	0.64-	4.36-	0.15	0.60	0.84-	0.01	0.62-	4.55-

جدول 10- متوسط غلظت و فراوانی بعضی از ترکیبات در فاضلاب خانگی تصفیه نشده (5)

کم	متوسط	زیاد	اجزای فاضلاب
4	8	15	فسفر (کل بر حسب Pmg/lit)
20	40	85	نیترات (کل بر حسب Nmg/lit)
صد هزار تا یک میلیون	یک تا ده میلیون		کلی فرم (کل بر حسب MPN/100 ml)

تخلیه شده در آبخوان‌ها توسط چاه‌های جذبی میزان بار نیترات و فسفات بالا بوده (جدول 10) و می‌تواند باعث آلودگی آب زیرزمینی گردد (5).

مقایسه حداکثر غلظت نیترات در مطالعه حاضر (366 و 486 میلی‌گرم بر لیتر در مهرماه و بهمن‌ماه) با مطالعه صورت گرفته توسط خزاعی و همکاران (5 و 30) که حداکثر غلظت نیترات آب زیرزمینی را 290 میلی‌گرم گزارش نموده‌اند، نشان‌دهنده افزایش شدید غلظت نیترات آب زیرزمینی در طی 10 سال است.

عوامل غیرطبیعی (انسان‌زاد) کنترل‌کننده شیمی آب زیرزمینی آبخوان زاهدان

با توجه به گسترش شهر زاهدان بر روی آبخوان و دفع فاضلاب شهر توسط چاه‌های جذبی و نبود سیستم جمع‌آوری فاضلاب، آلودگی آب زیرزمینی در محدوده شهر طبیعی است. بررسی صورت گرفته توسط محققین مختلف نیز نشان می‌دهد که در فاضلاب خام

جدول 7 نشان می‌دهد که برای این یون می‌توان منشأ طبیعی و منشأ مصنوعی (انسانی) در نظر گرفت. مقایسه غلظت کلسیم و سولفات بر حسب میلی‌اکی‌والان گرم نشان می‌دهد که در تمام نمونه‌ها نسبت Ca^{2+}/SO_4^{2-} کمتر از 1 است. کمتر از 1 بودن این نسبت نشان‌دهنده اکسیداسیون کانی‌های سولفوردار یا خروج کلسیم از محیط به دلیل رسوب کلسیم یا پدیده سختی گیری طبیعی آبریزمینی است (29). با توجه به این که منشأ کلسیم ناشی از فعالیت‌های انسانی پساب کارخانه‌های لبنی است که در شهر زاهدان وجود ندارد، در نظر گرفتن منشأ آلی برای این یون در آبخوان زاهدان کمی دور از ذهن بوده و نیازمند بررسی مجدد و دقیق‌تر موقعیت نمونه‌ها و نتایج آنالیز آن‌ها است.

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان زاهدان نشان می‌دهد که کاتیون و آنیون غالب به ترتیب Na^+ و Cl^- و SO_4^{2-} بوده و تیپ آب در جهت جریان آب زیرزمینی از بی کربناته سدیک به سولفات سدیک و در نهایت به کلرور سدیک تغییر می‌کند.

تحلیل عاملی نمونه‌ها بر اساس مجموع کل نمونه‌ها نشان می‌دهد که 76/48 درصد از تغییرات کیفی آب زیرزمینی توسط 2 عامل کنترل می‌شود. عامل اول که با یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، Cl^- ، K^+ و SO_4^{2-} ارتباط دارد، 59/74 درصد تغییرات کیفی را کنترل کرده و به عوامل طبیعی (تبادل یونی، انحلال کانی‌ها) بستگی دارد. عامل دوم که با یون NO_3^- و Ca^{2+} بستگی دارد، 16/74 درصد تغییرات کیفی را کنترل کرده و ناشی از فعالیت انسانی است.

با توجه به نمودارهای گیبس و ترکیبی هوازدگی سیلیکات‌ها و انحلال تبخیری‌ها مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده شیمی آب زیرزمینی آبخوان است. وجود همبستگی بالا بین یون‌های کلر و سدیم نشان‌دهنده تأثیر انحلال هالیت است، ولی برابر نبودن غلظت آن‌ها نشان‌دهنده منشأ دیگر (تجزیه آلیت یا تبادل یونی) برای این دو یون است.

در نمونه‌های مهرماه کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژپس تحت اشباع بوده، ولی در نمونه‌های بهمن‌ماه شاخص اشباع کلسیت و دولومیت به ترتیب در بیش از 60 و 90 درصد نمونه‌ها حالت اشباع داشته ولی شاخص اشباع ژپس حالت تحت اشباع دارد. این وضعیت نشان‌دهنده انحلال سنگ‌های دارای کانی‌های کلسیت و دولومیت توسط جریان‌های سطحی و تغذیه آبخوان در فصل بارندگی (زمستان و پائیز) و غیراشباع شدن آب زیرزمینی و منفی شدن شاخص‌های اشباع کلسیت و دولومیت در مهرماه به دلیل تشکیل

با توجه به اینکه بر اساس تحلیل عاملی، دومین عامل مهم مؤثر بر کیفیت آبخوان وجود یون‌های Ca^{2+} و NO_3^- است، لذا علاوه بر عوامل طبیعی عوامل انسانی نیز بر روی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان زاهدان تأثیر داشته و نقش مهمی در تولید نیترات دارد. معمولاً یون‌های سولفات، کلر، نیترات در بررسی آلودگی‌های غیرطبیعی مورد بررسی قرار می‌گیرند. به منظور بررسی این یون‌ها و منشأ آن‌ها، نمودارهای ترکیبی مختلف استفاده شده توسط حیدری‌زاد و محمدزاده (4) ترسیم شده است که نتایج حاصله در ادامه ارائه شده‌اند.

منشأ یون SO_4^{2-}

در هر دو دوره نمونه‌برداری در بیش از 40 درصد نمونه‌ها سولفات، فراوان‌ترین آنیون بوده و در بقیه نمونه‌ها بعد از کلر فراوان‌ترین آنیون است. دی‌گرام ترکیبی Cl^- در مقابل SO_4^{2-} (شکل 4-ب) نشان می‌دهد که منشأ سولفات در بیش از 70 درصد نمونه‌ها (18 نمونه) غیرطبیعی و ناشی از دفع فاضلاب به صورت جذبی است. همچنین بررسی نمودار سولفات در مقابل نیترات نرمالیزه شده با یون سدیم (شکل 4-ج) نشان‌دهنده وجود ارتباط ضعیف بین این دو نسبت بوده و می‌توان نتیجه گرفت که بخش اعظم یون سولفات منشأ غیرطبیعی داشته و ناشی از دفع فاضلاب خانگی است.

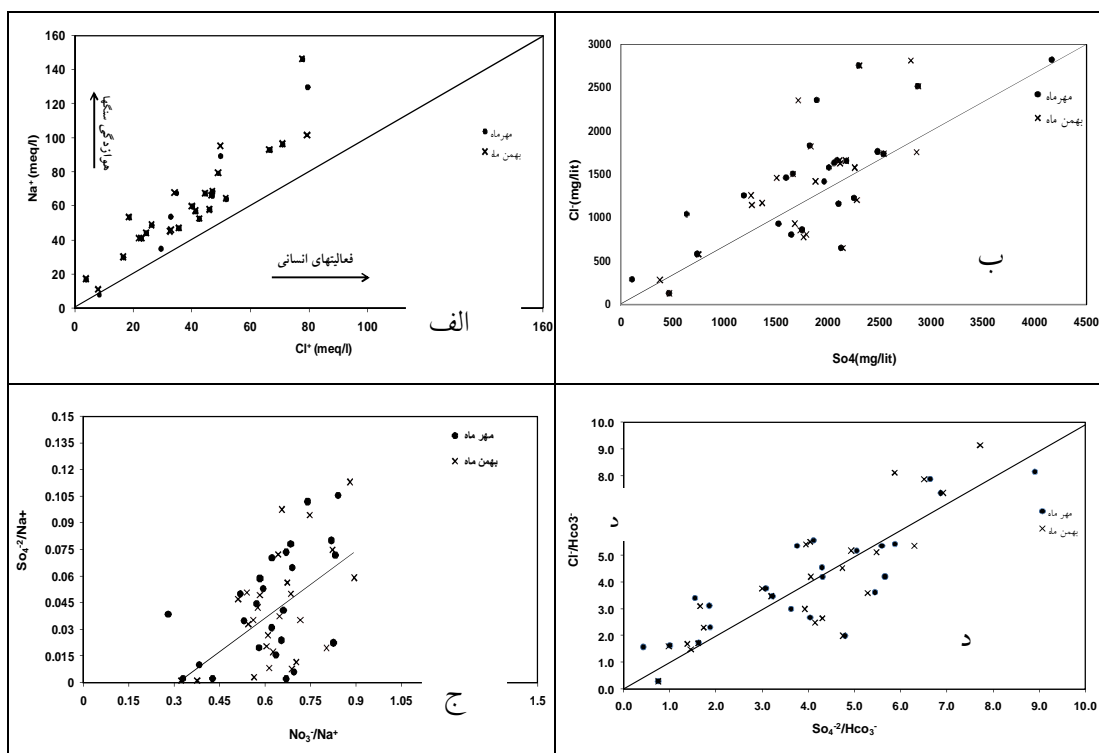
منشأ یون NO_3^-

بررسی غلظت نیترات در دو مرحله نمونه‌برداری آب زیرزمینی نشان می‌دهد که در بیش از 70 درصد نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان نیترات بیش از حد استاندارد 45 میلی‌گرم در لیتر (1) است. توسعه محدود کشاورزی بر روی آبخوان و تمرکز چاه‌های دارای بیشترین غلظت نیترات در هسته اولیه و قدیمی شهر (چاه‌های W9، W10، W19، W21 و W22) به خوبی نشان‌دهنده اثر توسعه شهر بر آبخوان و منشأ غیرطبیعی این یون در آب زیرزمینی آبخوان است. نبود سیستم جمع‌آوری فاضلاب و دفع فاضلاب شهر توسط چاه‌های جذبی مهم‌ترین عامل آلودگی نیترات آب زیرزمینی است.

مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با بررسی صورت گرفته توسط خزاعی (5 و 30) در مورد غلظت نیترات در محدوده شهر زاهدان ضمن تأیید آلودگی نیترات در آب زیرزمینی آبخوان زاهدان بر اثر دفع فاضلاب توسط چاه‌های جذبی، نشان‌دهنده افزایش میزان نیترات آب زیرزمینی در طی 10 سال گذشته است.

منشأ یون Ca^{2+}

بررسی بار عاملی یون کلسیم در هر دو مرحله نمونه‌برداری در



شکل 4- نمودارهای ترابی: الف) Na^+ در مقابل Cl^- ، ب) Cl^- در مقابل SO_4^{2-} ،

ج) SO_4^{2-} در مقابل NO_3^- نرمالیزه شده با یون Na^+ و د) SO_4^{2-} در مقابل Cl^- نرمالیزه شده با یون HCO_3^-

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مدیریت محترم بخش محیط‌زیست شرکت مهندسی مشاور طوس آب و سرپرست محترم پروژه پایش کیفی زاهدان به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات جهت انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

کانی‌های کلسیت و دولومیت در دوره خشک‌سال (تابستان) در رسوبات آبخوان بر اثر فرآیندهای رسوب زایی و یا تبادل یونی است. منشأ سولفات در بیش از 70 درصد نمونه‌ها غیرطبیعی بوده و ناشی از دفع جذبی فاضلاب است و نیترات موجود در آب زیرزمینی آبخوان زاهدان ناشی از دفع فاضلاب شهر توسط چاه‌های جذبی در آبخوان و عدم بهره‌برداری از سیستم جمع‌آوری فاضلاب در سطح شهر است.

منابع

- 1- استاندارد ملی ایران، 1388. آب آشامیدنی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (استاندارد 1053). ویرایش 5، ص 18-1.
- 2- جلالی ل. و اصغری مقدم ا. 1390. تعیین عوامل مؤثر بر شوری آب زیرزمینی با مدل هیدروژنوشیمیایی مطالعه موردی دشت خوی. سومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی ایران.
- 3- حسینی سبزواری س.م.، نعمتی م.، و شایسته فر م.ر. 1391. بررسی عوامل مؤثر بر هیدروژنوشیمی آب‌های زیرزمینی معدن گلگهر سیرجان با استفاده از تحلیل‌های عاملی و خوشه‌ای. شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- 4- حیدری‌زاد م.، و محمدزاده ح. 1391. مطالعه مکانی و فصلی تغییرات هیدروژنوشیمیایی و بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت آب رودخانه کارده (شمال شهر مشهد). نشریه آب‌و‌خاک. شماره 26.
- 5- خزاعی ا. 1380. تأثیر گسترش شهری بر کیفیت آب زیرزمینی زاهدان. نشریه آب و فاضلاب. شماره 37.

- 6- رضایی م. 1390. مطالعه عوامل کنترل‌کننده شوری در آبخوان آبرفتی دشت مند، استان بوشهر. محیط‌شناسی. شماره 37.
- 7- رضایی م. 1388. کاربرد آنالیزهای چند متغیره، اندیس‌های اشباع و دیاگرام‌های ترکیبی در تحلیل کیفی آبخوان آبرفتی دشت کرمان. تحقیقات منابع آب ایران شماره 30.
- 8- 8- زراعی و، حسینی م، و شکل‌آبادی م. 1391. ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت قروه با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره. ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست. تهران.
- 9- زارع چاهوکی م.ع. 1389. تجزیه و تحلیل داده‌ها در پژوهش‌های منابع طبیعی با نرم‌افزار SPSS، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران، تهران.
- 10- شرکت مهندسین مشاور پارس کنسولت. 1353. بررسی‌های ژئوفیزیک دشت زاهدان.
- 11- شرکت مهندسین مشاور خاک آزما نگین. 1391. نتایج نمونه‌برداری منابع آب زیرزمینی زاهدان (سری اول مهرماه). شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان.
- 12- شرکت مهندسین مشاور خاک آزما نگین. 1391. نتایج نمونه‌برداری منابع آب زیرزمینی زاهدان (سری دوم بهمن‌ماه). شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان.
- 13- شرکت مهندسین مشاور ری آب. 1387. مطالعات تأمین آب بلندمدت شهر زاهدان. گزارش هیدروژئولوژی. شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان.
- 14- شرکت مهندسین مشاور طوس آب. 1389. مطالعات شناسایی و پایش منابع آب زیرزمینی دشت زاهدان، گزارش شناسایی منابع آب زیرزمینی. شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان.
- 15- شرکت مهندسین مشاور طوس آب. 1391. مطالعات اجرای پایش و تجزیه و تحلیل کیفی آبخوان زاهدان، گزارش بازنگری منابع آب زیرزمینی. شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان.
- 16- غومیان ج، حسینی پور ح، قاسمی ا.ر. و پیروان ح.ر. 1384. کاربرد آنالیزهای چند متغیره در تحلیل هیدروژئوشیمی دشت سرچاهان هرمزگان. نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. دانشگاه تربیت معلم تهران.
- 17- فریابی م، کلانتری ن، و نگارستانی ا. 1389. ارزیابی عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت جیرفت با استفاده از روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. نشریه علوم زمین شماره 77.
- 18- قره محمودلو م، رقیمی م، و حشمت پور ع. 1386. بررسی هیدروژئوشیمی منابع آب شهر گرگان با استفاده از روش تحلیل عاملی و روش تحلیل خوشه‌ای. نشریه محیط‌شناسی شماره 43.
- 19- کلانتری ن، پوراگری س، محمدی بهزاد ح، و عقدکی ی. 1391. بررسی هیدروژئوشیمیایی منابع آب تاقدیس کارستی کی نو، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین. تهران.
- 20- محمدزاده ح، و ابراهیم پور ص. 1391. کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار و هیدروژئوشیمی به منظور بررسی منشأ و تغییرات کیفی منابع آب حوضه‌ی آبریز دریاچه زریوار. نشریه آب‌و خاک شماره 1031.
- 21- محمدی ض، زارع م، و شریف‌زاده ب. 1388. کاربرد تحلیل آماری چندمتغیره جهت مدیریت آب‌های زیرزمینی در یک سفره ساحلی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. شیراز.

22- Behruzi A. and Eftekharneshad J. 1993. Geological map of Zahedan(1:250000).

23- Belkhir L., Boudoukha A., Mouni L. and Baouz T. 2010. Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain. Algeria, African Journal of Environmental Science and Technology, 4(8): 526-534.

24- Belkhir L., Mouni L. and Tiri A. 2012. Water-rock interaction and geochemistry of groundwater from the Ain Azel aquifer, Algeria, Environmental Geochemistry and Health, 34: 1-13

25- Chen K., Jiao J.J., Huang J. and Huang R. 2007. Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen China, Environmental Pollution, 147: 771-780.

26- Cloutier V., Lefebvre R., Therrien R. and Savard M.M. 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system, Journal of Hydrology, 353: 294-313.

27- Gibbs R.J. 1970. Mechanisms controlling World's Water Chemistry, Science, 170 : 1089-1090.

28- Güler C., Thyne G.D., McCray J.E. and Turner A.K. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, Hydrogeology Journal, 10: 455-474.

29- Hounslow A.W. 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation, Lewis Publishers, 397 p.

- 30- Khazaei E., Stednick J.D., Sanford W.E. and Warner J.W. 2006. Hydrochemical changes over time in the Zahedan Aquifer.Iran, Environmental Monitoring and Assessment, 114: 123–143.
- 31- Zhu B., Yang X., Rioual P.,Qin X., Liu Z., Xiong H. and Yu J. 2011. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarer and Yili) in northern Xinjiang, NW, Applied Geochemistry, 26:1535–1548



Investigating the Factors Affecting the Zahedan's Aquifer Hydrogeochemistry Using Factor Analysis, Saturation Indices and Composite Diagrams' Methods

J. Dowlati^{1*}- Gh. Lashkaripour²- N. Hafezi Moghadas³

Received:08-07-2013

Accepted:18-08-2014

Abstract

Zahedan aquifer is located in the northern of Zahedan watershed. It is essential to evaluate the quality of groundwater resources due to providing some part of drinking water, agricultural and industrial waters of this city. In order to carry out ground water quality monitoring, and assess the controlling processes and determine cations and anions sources of the groundwater, 26 wells were sampled and water quality parameters were measured. The results of the analysis showed that almost all of the samples proved very saline and electrical conductivity varied from 1,359 to 12,620 $\mu\text{S cm}^{-1}$. In the Zahedan aquifer, sodium, chloride and sulfate were predominant Cation and Anions respectively, and sodium-chloride (Na-Cl) and sodium - sulfate (Na- SO_4) were dominant types of the groundwater. The factor analysis of samples results indicates that the two natural and human factors controlled about the 83/30% and 74/37% of the quality variations of the groundwater respectively in October and February. The first and major factor related to the natural processes of ion exchange and dissolution had a correlation with positive loadings of EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , K^+ and SO_4^{2-} and controls the 65.25% of the quality variations of the ground water in October and the 58.82% in February. The second factor related to Ca^{2+} , NO_3^- constituted the 18.05% of the quality variations in October and 15.56% in February, and given the urban development and less agricultural development in the aquifer, is dependent on human activities. For the samples collected in October, the saturation indices of calcite, gypsum and dolomite minerals showed saturated condition and calcite and dolomite in February showed saturated condition for more than 60% and 90% of samples and gypsum index revealed under-saturated condition for almost all samples. The unsaturated condition of Zahedan groundwater aquifer is resulted from the insufficient time for retaining water in the aquifer to dissolve the minerals. SO_4^{2-} and NO_3^- ions in more than 70 percent samples showed unnatural sources (the sewer infiltration).

Keywords: Hydrogeochemistry, Zahedan aquifer, Factor analysis, Composite diagrams, Saturation indices

1,2,3- PhD Student and Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(*- Corresponding Author Email: jdowlati@yahoo.co.uk)