

## ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی محدوده شمال غرب کبودرآهنگ جهت سنجش پارامترهای هیدروژئوشیمیایی

مهین کردی<sup>۱</sup>، عبدالناصر فضل‌نیا<sup>۲\*</sup>، حسین پیرخراطی<sup>۳</sup>، بهروز رفیعی<sup>۴</sup> و هوشنگ وفائی<sup>۵</sup>

۱ و ۲ - دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

۴ - دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

۵ - سازمان آب منطقه ای استان همدان

نویسنده مسئول: nafazlnia@yahoo.com

دریافت: ۹۲/۸/۶ پذیرش: ۹۳/۱/۲۷

### چکیده

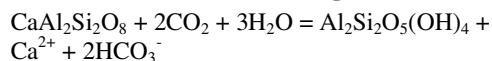
به منظور بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی شمال غرب دشت کبودرآهنگ، از پارامترهای هدایت الکتریکی، کلسیم، کلرور، منیزیم، سدیم، سولفات، و بی‌کربنات، TDS و SAR حاصل از تجزیه شیمیایی آب زیرزمینی، استفاده گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های کیفیت شیمیایی ۱۸ نمونه آب از شبکه توزیع روستاهای انتخابی موجود در منطقه مورد مطالعه در دو دوره (آبان ۸۷ و مرداد ۸۸) با استفاده از نمودارهای شولر، پایپر، ویلکوکس، دورو و نقشه‌های هیدروژئوشیمیایی انجام شد. مطالعات نشان داده است که اکثر منابع آب از نظر کشاورزی در طبقه  $C_3S_1$  و  $C_2S_1$  قرار دارند. بنابراین، کیفیت مناسب تا قابل قبول را برای مصارف کشاورزی دارا هستند. علاوه بر این، آب برای شرب در این دشت، سختی (۲۷۹ تا ۵۰۰) قابل قبول دارد. آب از لحاظ مصارف صنعتی خاصیت خوردگی دارد.

واژه‌های کلیدی: هیدروژئوشیمی، کیفیت آب، کبودرآهنگ، همدان.

### ۱- مقدمه

اثر آب حاوی هیدرواکسیدکربن بر کانی‌های آذرین برای تولید کانی‌های رسی و یون‌های حل شونده را نشان می‌دهد. به علاوه قسمتی از سازنده‌های دیگر آب‌های زیرزمینی، مانند  $Ca^{2+}$ ،  $Na^+$ ،  $SO_4^{2-}$  و  $Cl^-$  گاهی به وسیله نمک‌های دریایی، از طریق چرخه‌های متوالی انحلال، ته‌نشست و خشک شدن و هم‌چنین قسمتی نیز در نتیجه هوازدگی سنگ‌ها به آب‌های زیرزمینی اضافه شده‌اند [۱]. کلارک نشان داد که شوری‌های واقعی آب‌ها (آب‌های جاری و زیرزمینی) بسیار متغیرند. به صورتی که غلظت‌های کربنات، کلسیم و منیزیم به سرعت با شوری بالا می‌روند تا اینکه به مقدارهای محدود کننده‌ای حدود ppm ۲۰۰ برسند. شوری‌های بالاتر عمدتاً به دلیل افزایش در مقادیر سدیم، سولفات و کلرور اتفاق می‌افتد [۱۱]. آب‌های با شوری تا ppm ۵۰ نواحی را زهکشی می‌کنند که اساساً از سنگ‌های آذرین یا دگرگونی ساخته شده‌اند؛ در حالی که برای شوری‌های ppm ۵۰۰-۲۰۰، این زهکشی عمدتاً در سنگ‌های رسوبی رخ می‌دهد.

عوامل عمده آلودگی آب زیرزمینی شامل آلودگی‌های شهری، صنعتی، کشاورزی و به میزان کمتر آلودگی‌های زمین‌زاد (Geogenic) می‌باشد [۱]. آنیون اصلی در آب‌های موجود در خشکی، یون بی‌کربنات ( $HCO_3^-$ ) است و از انحلال  $CO_2$  موجود در هوا در آب باران و افزایش  $CO_2$  به وسیله فعالیت آلی در خاک‌ها به وجود می‌آید. این ترکیب در نهایت باعث تولید اسید کربنیک می‌شود. آب متئوریک حاوی اسید کربنیک، در تماس با سنگ‌ها، باعث هوازدگی آن‌ها می‌شود. ترکیب آب‌های زیرزمینی که در تماس با سنگ‌های آذرین می‌باشند، توسط واکنش آب‌های متئوریک سرشار از  $CO_2$  با فلدسپات (پلاژیوکلاز) و کانی‌های تیره (مانند هورنبلند، پیروکسن و بیوتیت) تعیین می‌شود. این عمل، باعث هوازدگی سنگ‌های آذرین خواهد شد. برای مثال واکنش هوازدگی فلدسپار پلاژیوکلاز زیر به کانی‌های ثانویه و مواد محلول:



کبودرآهنگ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بعلاوه به اثرات زیست‌محیطی که چنین آلودگی‌ها را ایجاد نموده‌اند پرداخته می‌شود. ره‌یافت این تحقیق به استفاده آب‌های زیرزمینی در فعالیت‌های شرب و کشاورزی منجر خواهد شد.

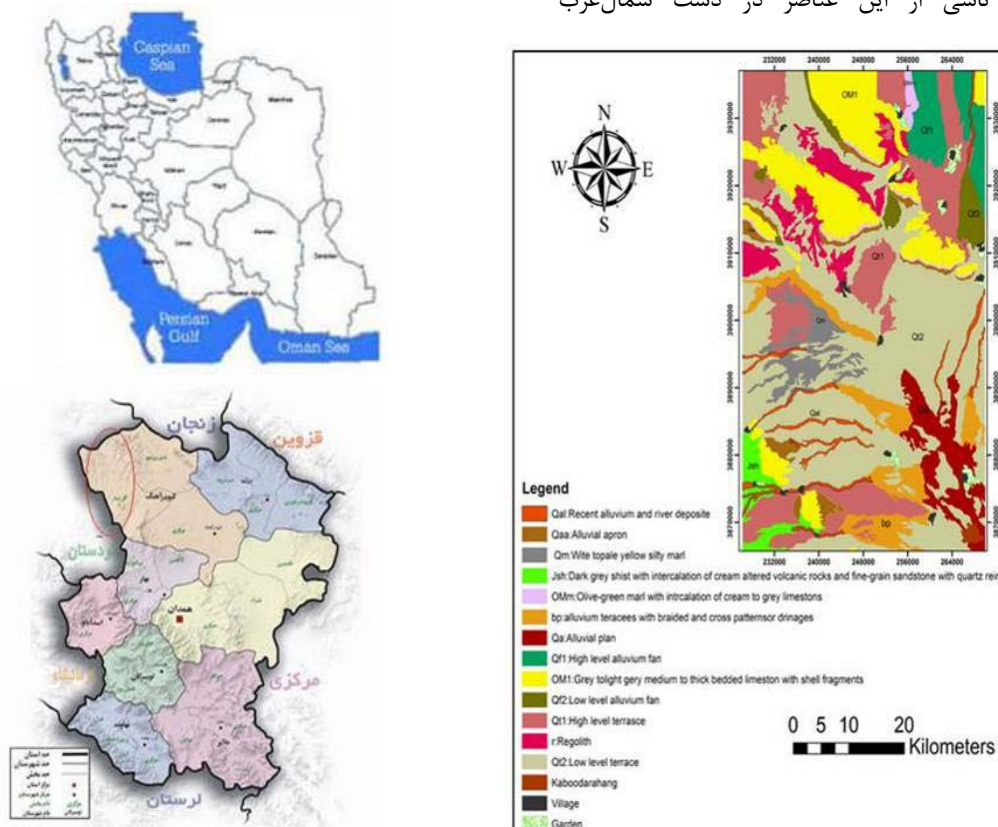
## ۲- موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در غرب ایران و در شمال‌غرب شهرستان کبودرآهنگ، بین طول‌های جغرافیایی  $48^{\circ}28'35''$  و  $47^{\circ}58'39''$  و عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ}32'25''$  و  $34^{\circ}54'35''$  (شکل ۱) با میانگین ارتفاع ۱۶۷۵ متر از سطح دریا در استان همدان واقع شده است. شهرستان کبودرآهنگ از نظر آب و هوایی عموماً سرد و خشک و نسبت به آب و هوای سایر شهرستان‌های استان همدان در تابستان، گرم‌ترین نقطه و در زمستان سردترین منطقه استان را به خود اختصاص داده است.

رقم‌های بزرگ‌تر، آلودگی بزرگ مقیاس را به وسیله انسان یا زهکشی نواحی خشک که در آن خاک‌های شور زیاد هستند نشان می‌دهند [۱].

از جمله پارامترهای تعیین کیفیت آب شرب عبارتند از سختی، کلیتیت، اسیدیته، TSS (Total Suspension Solids)، pH، غلظت مواد شیمیایی از قبیل کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، آهن، منگنز، کلر و مواد رادیواکتیو [۷]. منیزیم به همراه کلسیم تشکیل دهنده سختی آب بوده و اغلب به صورت ترکیباتی چون کربنات، بی‌کربنات، کلرور و سولفات موجود می‌باشند [۶]. در هر حال مطالعه موارد ذکر شده، می‌توان برای بررسی کیفیت آب به منظور مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی مد نظر قرار گیرند. با مقایسه مقادیر هر عنصر در آب زیرزمینی با استانداردهای موجود می‌توان به این هدف دست یافت. به همین منظور می‌توان مطالعات کیفیت آب زیرزمینی را از لحاظ باکتریایی و ویروس‌ها مورد ارزیابی قرار داد.

در این تحقیق غلظت‌های این عناصر همراه با توزیع آلودگی ناشی از این عناصر در دشت شمال‌غرب



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

## ۳- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه از شیست‌هایی با درجه دگرگونی ضعیف و مارن با رنگ سبز زیتونی و سنگ‌آهک خاکستری تا خاکستری روشن، متوسط تا ضخیم لایه، همراه با خرده‌هایی از پوسته صدف (بخشی از سازند قم)، دشت‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه تشکیل شده است. نهشته‌های موجود در دشت‌های آبرفتی از فرسایش سازنده‌های احاطه کننده منطقه ایجاد شده‌اند. شیل‌ها و شیست‌های دگرگون شده ژوراسیک قدیمی‌ترین سنگ‌های هستند که در منطقه شناخته شده‌اند. تراورتن‌ها همراه با چشمه‌های فعال در بخش شمال‌غربی این دشت توسعه قابل توجهی دارند. این تشکیلات همراه روانه‌های بازالتی کواترنری دیده می‌شوند.

## ۴- مواد و روش‌ها

در این مطالعه داده‌های شیمیایی مربوط به ۱۸ نمونه آب شمال‌غرب دشت کبودرآهنگ در دو دوره (دوره خشک و دوره تر) بدست آمده است. موقعیت این چاه‌ها و راه‌های دسترسی در شکل ۲ مشخص شده است. مطالعه داده‌های شیمیایی مربوط به ۱۸ نمونه آب شمال‌غرب دشت کبودرآهنگ، نمودارهای پایپر (شکل ۳)، دورو، ویلکوکس در محیط نرم‌افزار (Rock Work (Chemistry) تهیه و از نقشه‌های هم‌پارامتری که توسط نرم‌افزار ArcGIS (Version 9.3) ترسیم شده‌اند، استفاده گردیده است. هم‌چنین با استفاده از نمودارهای شولر و ویلکوکس قابلیت شرب و کشاورزی آب‌ها معین شد. به منظور مصرف صنعتی نیز ضرایب اشباع شدن لانتزلیه و پایداری رایزتر آن‌ها محاسبه گردید.

نمونه آب از شبکه توزیع روستاهای انتخابی و با توجه به روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و در ظروف پلی‌اتیلنی تیره ۱/۵ لیتری برداشت گردید. جهت آماده‌سازی و شستشوی بطری‌های نمونه‌برداری از اسید نیتریک رقیق به همراه آبکشی با آب مقطر استفاده شد. نمونه‌های برداشت شده کد گذاری شده و در فاصله زمانی کمتر از ۱۲ ساعت به آزمایشگاه شیمی آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان منتقل گردید. روش‌های آزمایش به کار گرفته شده در این تحقیق کلاً بر اساس دستورالعمل‌های کتاب استاندارد متد می‌باشد [۱۰ و ۱۶]. در مرحله اول سدیم، پتاسیم، کلسیم،

منیزیم و آنیون‌های، بی‌کربنات، سولفات و کلرور اندازه‌گیری و سپس عناصری مثل فلزات سنگین، مواد آلی و نفتی مورد آزمایش قرار گرفتند [۵]. با تفسیر نقشه‌ها و نمودارهای مربوطه می‌توان تاثیر سازندهای زمین‌شناسی موجود، که آب در تماس با آن‌ها قرار داشته است را مشخص نمود [۲].

## ۵- نتایج و بحث

داده‌های مربوط به تجزیه شیمیایی نمونه آب‌های شمال‌غرب کبودرآهنگ بر حسب میلی‌اکی‌والان در لیتر (epm) برای هر دو دوره ترسالی و خشک‌سالی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

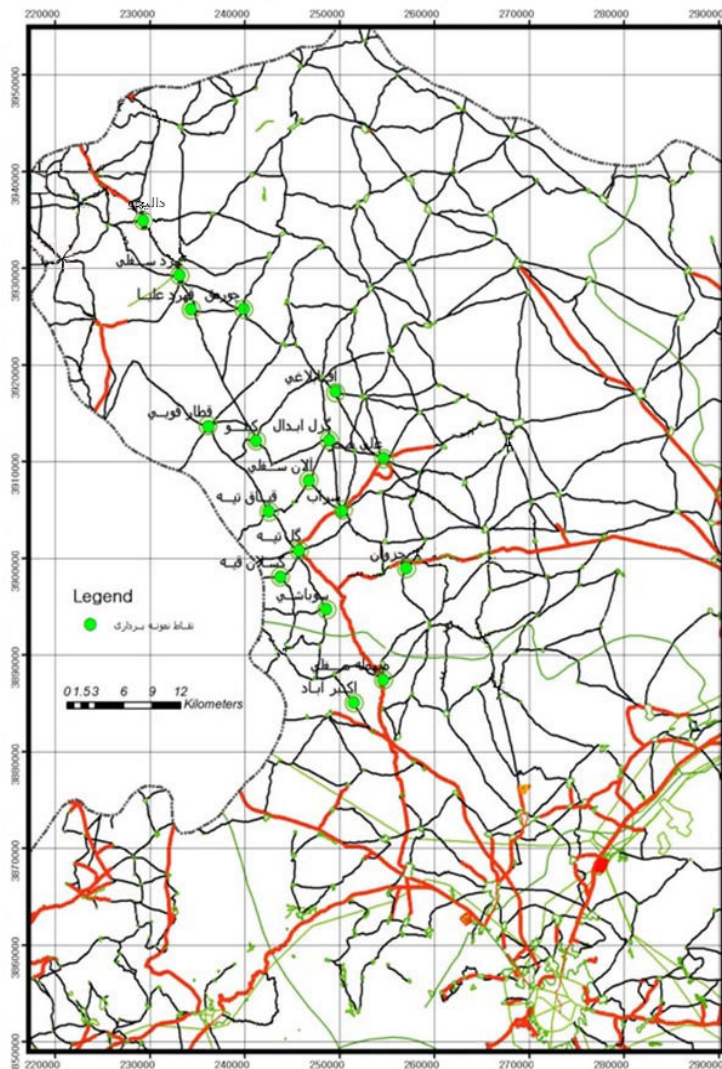
## ۵-۱- طبقه‌بندی آب از نظر شرب

به منظور طبقه‌بندی آب از نظر شرب از نمودار شولر (شکل ۴) استفاده می‌شود. بر اساس این نمودار، منابع آب بر حسب متغیرهای اصلی شیمیایی محلول در آن در یکی از طبقات شش‌گانه قرار می‌گیرند. طبقات یک تا شش به ترتیب معرف آب خوب، قابل قبول، متوسط، نامناسب، کاملاً نامطبوع، و غیر قابل شرب می‌باشند [۱۸]. جهت بررسی قابلیت شرب منابع آب زیرزمینی، تک تک نمونه‌ها در هر دو دوره با استفاده از نمودار شولر مورد سنجش قرار گرفتند (شکل ۴) و نتایج بر حسب درصد در جداول ۳ و ۴ برای دو دوره نمونه‌برداری گردآوری شده است. همانطور که در این جداول مشخص است، آب‌های زیرزمینی منطقه از لحاظ شرب تقریباً در طبقه خوب تا متوسط قرار دارند. درصد هر یک از کلاس‌های شولر در آبان ۸۷ به ترتیب شامل: ۶۵/۷۴ درصد خوب، ۲۳/۱۴ درصد قابل قبول، ۷/۴۰ درصد متوسط، ۳/۷۰ درصد نامناسب و ۰/۰۰۱ درصد غیرقابل شرب می‌باشند (شکل ۳). برای نیمه دوم سال آبی (مرداد-۸۸)، ۸۹/۸۱ درصد خوب، ۳/۷۰ قابل قبول، ۴/۶۳ درصد متوسط و ۰/۹۲ درصد کاملاً نامطبوع می‌باشند (جدول ۳ و ۴). سختی و TDS مهم‌ترین عوامل تاثیر گذار در کیفیت آب در هر دو دوره می‌باشند. در هر حال چنین مشخصاتی در هر دو دوره نشان می‌دهد که در دوره ترسالی، به علت افزایش شیب گرادیان جریان آب و در نتیجه افزایش انحلال‌پذیری و بالا رفتن غلظت کاتیون‌ها، کیفیت آب تنزل یافته در بعضی از مناطق و

زیرزمینی معمولاً از  $\text{CO}_2$  منطقه خاک و انحلال کلسیت و دولومیت ناشی می‌گردد. فشارهای جزئی  $\text{CO}_2$  تولید شده در منطقه خاک و قابلیت انحلال کلسیت و دولومیت معمولاً میزان کل جامدات محلول آب‌های زیرزمینی را محدود می‌نماید. از آنجائی‌که کلسیت و دولومیت به میزان قابل ملاحظه‌ای در اکثر حوضه‌های رسوبی وجود دارند و به دلیل آنکه این کانی‌ها در هنگام تماس با آب زیرزمینی غنی از  $\text{CO}_2$  حل می‌شوند، بی‌کربنات، آنیون غالب در اکثر نواحی تغذیه می‌باشد. بر اساس جدول ۷ نحوه توسعه تیپ و رخساره، در کل محدوده در آبان ماه ۸۷، ۳۸/۸۹ درصد دارای توسعه انتقالی و ۶۱/۱۱ درصد دارای توسعه اساسی می‌باشد. در مرداد ماه ۸۸ توسعه انتقالی ۲۲/۲۲ درصد و توسعه اساسی ۷۷/۷۸ درصد در کل محدوده می‌باشد.

در طبقه نامناسب و کاملاً نامطبوع و غیر قابل شرب قرار می‌گیرند. بنابراین، بالا بودن میزان سختی و TDS و pH آب عامل اصلی این مشخصات می‌باشد.

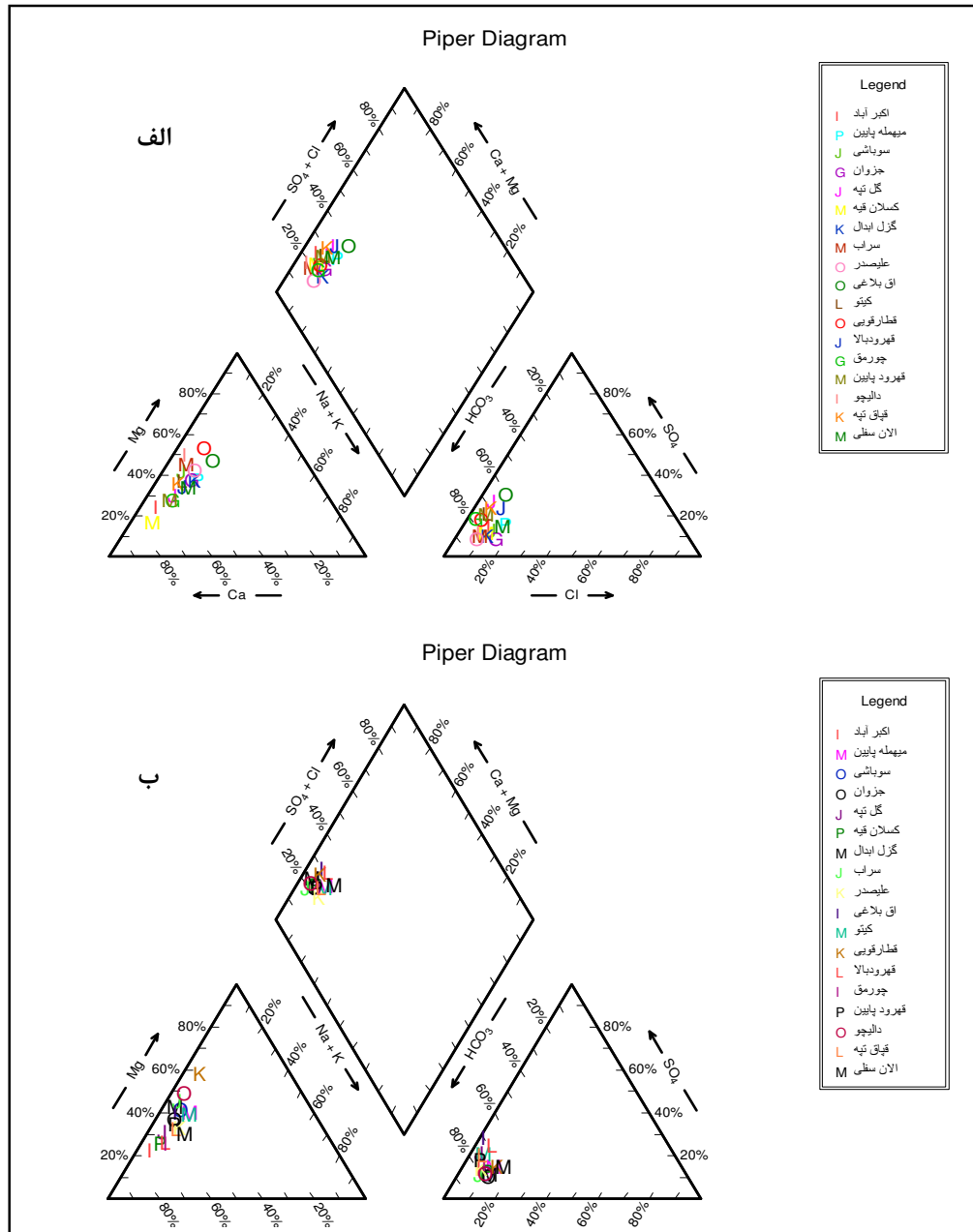
رخساره‌های هیدروشیمیایی آب زیرزمینی، معین‌کننده توده‌های آبی با ماهیت ژئوشیمی متفاوت می‌باشند. اساس طبقه‌بندی این رخساره‌ها، مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های عمده (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر) آب زیرزمینی می‌باشد [۱۵]. بر اساس توأثر یونی (جدول‌های ۵ و ۶) برای ۱۸ نمونه آب در هر دو دوره، تیپ آب در کل محدوده بی‌کربناته می‌باشد و رخساره آب در کل محدوده، کاملاً کلسیک و منیزیک می‌باشند. از دیدگاه ژئوشیمی، توألی توصیف شده می‌تواند ناشی از دو متغییر عمده، یعنی قابلیت دسترس بودن کانی‌ها و قابلیت انحلال کانی‌ها تشریح گردد. مقدار بی‌کربنات آب‌های



شکل ۲. نقشه موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری و راه‌های دسترسی.

بیماری تسلب‌شرايين را بیشتر می‌کند [۱۲]. از نظر استاندارد سختی که بنا به توصیه سازمان بهداشت جهانی (WHO) برابر  $500 \text{ mg/l as CaCO}_3$  به عنوان حداکثر غلظت مجاز برای شرب در نظر گرفته شده است، آب‌ها در محدوده کاملاً سخت قرار دارند (جدول ۸). از دیگر مشکلات آب‌های سخت، نامناسب بودن آن‌ها در مصارف خانگی می‌باشد؛ زیرا برای ایجاد کف، مقدار صابون زیادی به کار برده می‌شود.

یکی دیگر از معیارهای مناسب برای مصرف شرب سختی می‌باشد. سختی بیانی از میزان تمایل آب به پوسته‌گذاری است و تقریباً تمام سختی آب ناشی از یون‌های کلسیم و منیزیم محلول می‌باشد. کیفیت آب‌های زیرزمینی کل منطقه از لحاظ سختی (جدول ۸) در آبان کاملاً سخت می‌باشد ولی در دوره مرداد ماه ۸۸ کیفیت سبک می‌باشد. از لحاظ سختی، آب‌های سبک ( $\text{mg/l as CaCO}_3 < 75$ ) برای شرب مضر تلقی می‌شوند. زیرا خطر



شکل ۳. نمودار پایپر، الف) آبان ماه سال ۱۳۸۷ و ب) مردادماه سال ۱۳۸۸.

جدول ۱. مقادیر تجزیه شیمیایی برای ۱۸ حلقه چاه در نیمه اول سال آبی (آبان ۱۳۸۷). غلظت یون‌ها بر اساس meq/l و هدایت الکتریکی (EC) بر حسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر و TDS بر حسب mg/l می‌باشد.

علامت اختصاری	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	pH	T.D.S	EC
w1	1.41	1.07	6.31	0.10	0.61	2.33	6.03	7.40	475.00	689.00
w2	1.64	1.64	6.48	0.20	1.44	3.95	4.54	7.49	419.00	785.00
w3	1.33	1.27	6.89	0.15	0.70	4.28	4.89	7.59	480.00	925.00
w4	0.94	1.55	7.15	0.26	1.22	4.24	5.19	6.84	453.00	785.00
w5	3.12	0.68	7.17	0.18	1.09	3.63	6.79	7.69	563.00	857.00
w6	0.81	0.68	4.84	0.13	0.44	1.18	4.89	6.78	345.00	531.00
w7	1.19	1.35	8.28	0.36	1.35	4.38	5.29	6.83	487.00	918.00
w8	1.16	0.96	8.28	0.10	0.70	4.97	4.95	7.43	523.00	721.00
w9	0.75	0.68	6.23	0.15	0.83	3.49	3.55	7.68	232.00	461.00
w10	5.60	1.58	10.40	0.36	2.65	8.58	6.19	7.24	683.00	1298.00
w11	2.20	0.73	7.05	0.13	1.00	4.00	5.29	6.99	452.00	857.00
w12	1.16	0.34	4.48	0.18	0.52	3.57	2.30	7.92	224.00	445.00
w13	2.68	1.27	6.89	0.23	1.22	4.04	5.99	7.15	530.00	986.00
w14	1.56	0.28	6.15	0.15	0.78	2.39	4.97	7.20	340.00	597.00
w15	2.43	0.71	8.10	0.18	0.96	3.35	7.19	7.43	453.00	895.00
w16	1.23	0.93	7.56	0.10	0.57	5.19	4.35	7.60	273.00	540.00
w17	2.89	0.82	7.89	0.08	1.04	4.36	6.33	7.64	538.00	1068.00
w18	1.21	1.21	5.26	0.13	1.00	2.86	4.23	7.21	321.00	631.00

جدول ۲. مقادیر تجزیه شیمیایی برای ۱۸ حلقه چاه در نیمه دوم سال آبی (مرداد ۱۳۸۸).

علامت اختصاری	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	pH	T.D.S	EC
w1	1.27	0.76	6.40	0.08	0.52	2.01	5.95	7.80	435.00	638.00
w2	1.52	1.13	6.72	0.18	1.04	4.36	4.99	7.40	403.00	698.00
w3	1.00	0.87	5.99	0.10	0.52	3.57	4.14	7.10	429.00	780.00
w4	0.96	1.02	6.38	0.08	0.61	3.49	4.99	7.70	418.00	698.00
w5	2.06	0.42	6.67	0.13	0.52	3.10	5.84	7.10	452.00	634.00
w6	0.98	0.79	5.25	0.10	0.48	1.97	4.79	7.20	339.00	476.00
w7	1.16	1.16	7.08	0.15	0.30	4.32	5.09	7.60	432.00	598.00
w8	1.19	0.90	7.63	0.10	0.44	4.70	4.85	6.70	389.00	626.00
w9	1.08	0.59	5.48	0.13	0.74	2.49	3.95	7.70	236.00	416.00
w10	3.87	0.42	8.76	0.18	0.87	5.46	6.71	7.20	483.00	644.00
w11	2.12	0.48	6.99	0.20	0.96	4.08	4.81	7.10	393.00	720.00
w12	0.89	0.79	4.02	0.08	0.35	3.53	2.00	7.30	205.00	394.00
w13	2.43	0.68	6.23	0.10	0.91	2.68	6.19	7.40	487.00	733.00
w14	1.54	0.85	6.40	0.15	0.91	2.45	5.71	7.30	385.00	626.00
w15	2.00	0.59	7.71	0.20	0.78	3.85	5.99	7.70	440.00	700.00
w16	1.12	0.96	6.90	0.05	0.44	4.71	4.19	7.60	269.00	381.00
w17	2.27	0.65	7.82	0.20	1.04	3.69	6.17	7.60	465.00	891.00
w18	1.12	1.10	4.76	0.15	0.91	2.27	3.89	7.70	254.00	483.00

جدول ۳. درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شولر برای مصرف شرب در کل محدوده (آبان-۸۷).

طبقه بندی آب	TDS	TH	PH	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
خوب	72.22	0	33.33	100	100	88.89
قابل قبول	27.78	77.78	22.22	0	0	11.11
متوسط	0	22.22	22.22	0	0	0
نامناسب	0	0	22.22	0	0	0
کاملاً نامطبوع	0	0	0	0	0	0
غیر قابل شرب	0	0	0.01	0	0	0

جدول ۴. درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شولر برای مصرف شرب در کل محدوده (مرداد-۸۸).

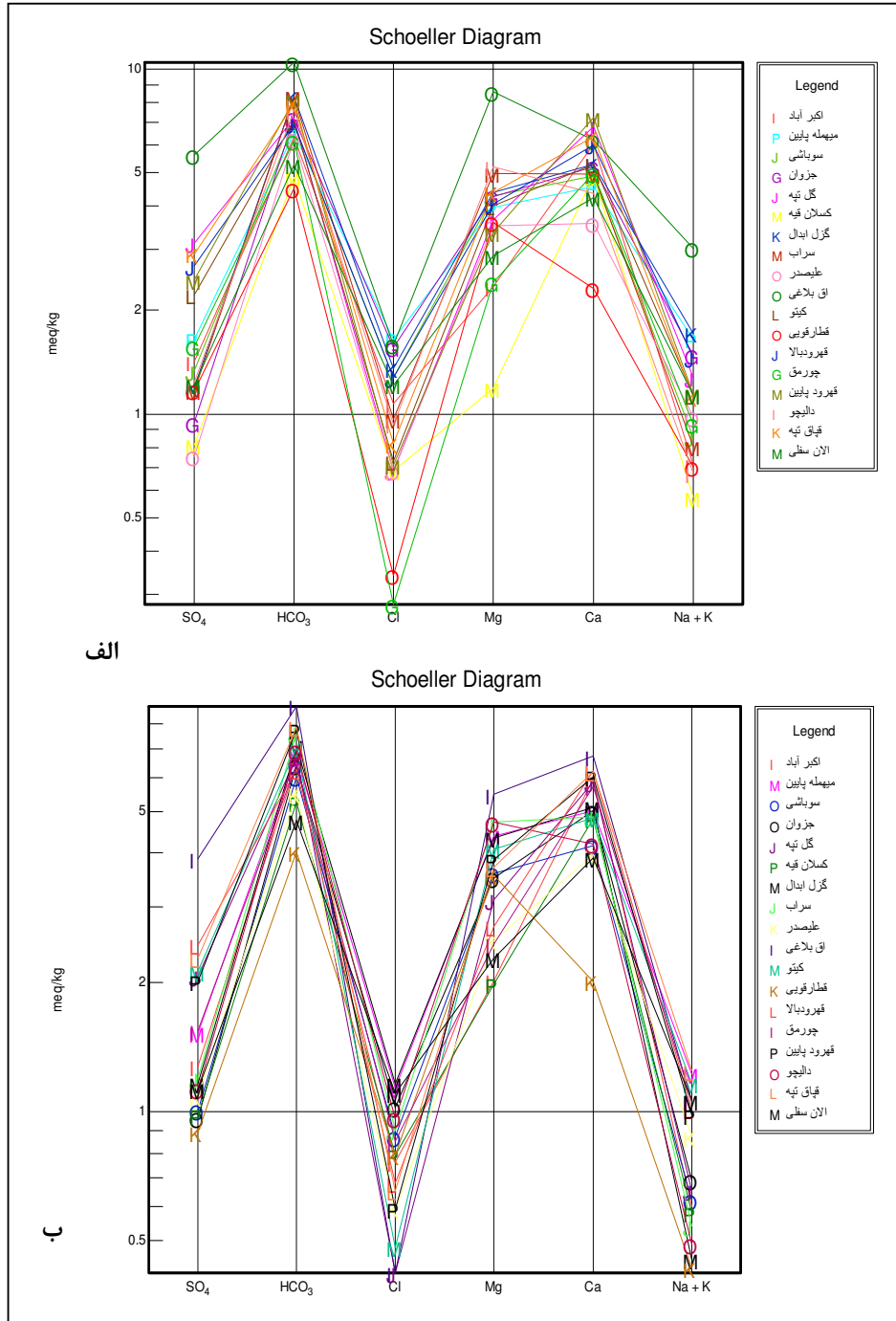
طبقه‌بندی آب	TDS	TH	pH	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
خوب	100	0	44.44	100	100	94.44
قابل قبول	0	94.44	22.22	0	0	5.56
متوسط	0	5.56	27.78	0	0	0
نامناسب	0	0	0	0	0	0
کاملاً نامطبوع	0	0	5.56	0	0	0
غیر قابل شرب	0	0	0	0	0	0

جدول ۵. تواتر یونی، تیپ و رخساره آب و نحوه توسعه آن (آبان-۸۷).

غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	نحوه توسعه تیپ و رخساره
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی

جدول ۶. تواتر یونی، تیپ و رخساره آب و نحوه توسعه آن (مرداد-۸۸).

غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	نحوه توسعه تیپ و رخساره
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه انتقالی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی
HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Ca > Mg > Na+K	بی کربناته	کلسیک	توسعه اساسی



شکل ۴. نمودار شولر. الف) آبان ماه سال ۱۳۸۷ و ب) مردادماه سال ۱۳۸۸.

جدول ۷. درصد هر یک از رده‌های نحوه توسعه تیپ و رخساره برای هر دو دوره در کل محدوده.

درصد	نحوه توسعه تیپ و رخساره (مرداد-۸۸)	درصد	نحوه توسعه تیپ و رخساره (آبان-۸۷)
22.22	توسعه انتقالی	38.89	توسعه انتقالی
0	توسعه مخلوط	0	توسعه مخلوط
77.78	توسعه اساسی	61.11	توسعه اساسی



جدول ۸. طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس سختی کل برای هر دو دوره در کل محدوده.

محل نمونه برداری	سختی کل (نیمه اول)	کیفیت آب بر اساس سختی کل	سختی کل (نیمه دوم)	کیفیت آب بر اساس سختی کل
اکبر آباد	415.99	کاملاً سخت	23.13	سبک
میهمله پایین	421.61	کاملاً سخت	30.4	سبک
سوباشی	455.61	کاملاً سخت	25.04	سبک
جزوان	468.61	کاملاً سخت	26.83	سبک
گل تپه	518.16	کاملاً سخت	27.32	سبک
کسلان قیه	302.67	کاملاً سخت	20.08	سبک
گزل ابدال	480.42	کاملاً سخت	30.49	سبک
سراب	492.7	کاملاً سخت	31.43	سبک
علیصدر	349.86	کاملاً سخت	20.1	سبک
اق بلاغی	732.77	کاملاً سخت	39.23	سبک
کیتو	461.91	کاملاً سخت	28.82	سبک
قطارقویی	290.96	سخت	19.52	سبک
قهرودبالا	498.75	کاملاً سخت	26.49	سبک
چورمق	366.08	کاملاً سخت	24.32	سبک
قهرود پایین	524.46	کاملاً سخت	30.78	سبک
دالیچو	473.52	کاملاً سخت	29.84	سبک
قیاق تپه	531.42	کاملاً سخت	30.58	سبک
الان سفلی	352.47	کاملاً سخت	19.05	سبک

کلاس‌های مختلف آب در جداول ۹ و ۱۰ ارائه شده است. غلظت زیاد نمک در آب باعث شوری خاک و مقدار زیاد سدیم منجر به تولید خاک قلیایی همراه با کمبود کلسیم خاک، و نهایتاً نفوذناپذیر شدن خاک‌های منطقه و کاهش محصولات می‌شود. لذا در مصارف کشاورزی آب با SAR کم توصیه می‌شود؛ زیرا به ازای مقدار معینی از کاتیون سدیم، افزایش کاتیون‌های کلسیم و منیزیم آب منجر به قابلیت جذب سدیم توسط خاک شده و در نتیجه زیان آن برای گیاه کمتر می‌شود. علاوه بر این، خطر بی‌کربنات از دیگر استانداردهای آب آبیاری است که با نمایه کربنات سدیم باقی‌مانده<sup>۱</sup> (RSC) نشان داده می‌شود. غلظت‌های زیاد بی‌کربنات در آب زیرزمینی می‌تواند رشد گیاهان را مختل نموده و منجر به رسوب کلسیت، کاهش نفوذپذیری خاک، پایین آوردن نرخ نفوذ و افزایش فرسایش خاک شود. خطر RSC به وسیله رابطه زیر

محاسبه می‌گردد [۱۳].

رابطه (۲)  $RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{+2} + Mg^{+2})$  غلظت یون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌باشد. آب‌های دارای مقادیر RSC کمتر از ۱/۲۵ epm برای آبیاری مناسب هستند. در حالی که آب‌های دارای مقادیر RSC بیش از ۲/۵ epm برای آبیاری نامناسب می‌باشند.

#### ۵-۲- طبقه‌بندی آب برای مصارف کشاورزی

استانداردهای کیفی آب آبیاری بر اساس سه عامل ذیل بنیان‌گذاری شده است [۱۳]:

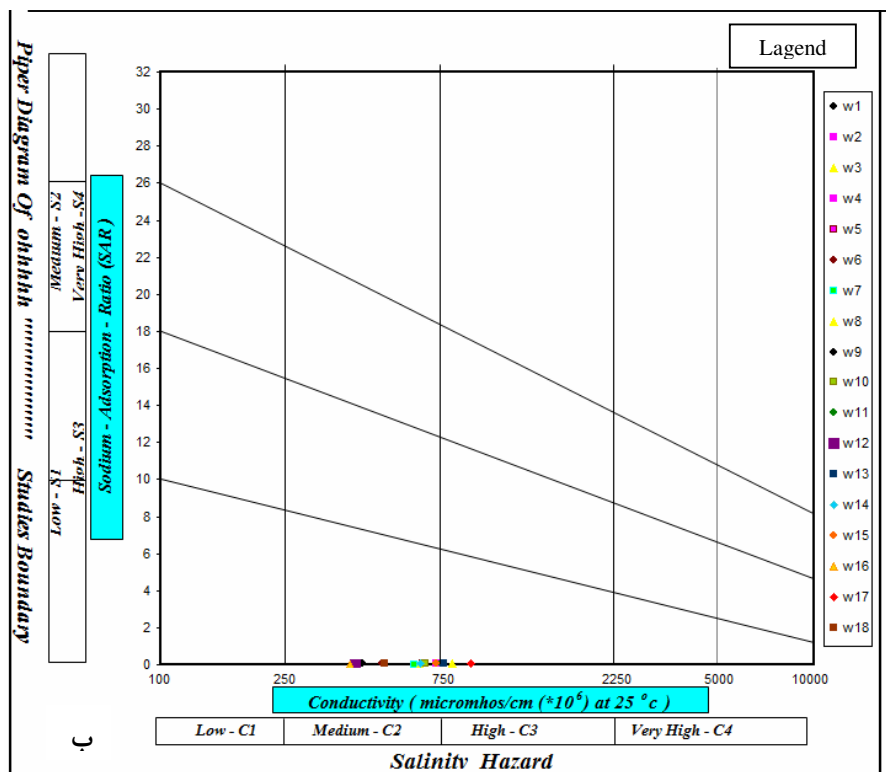
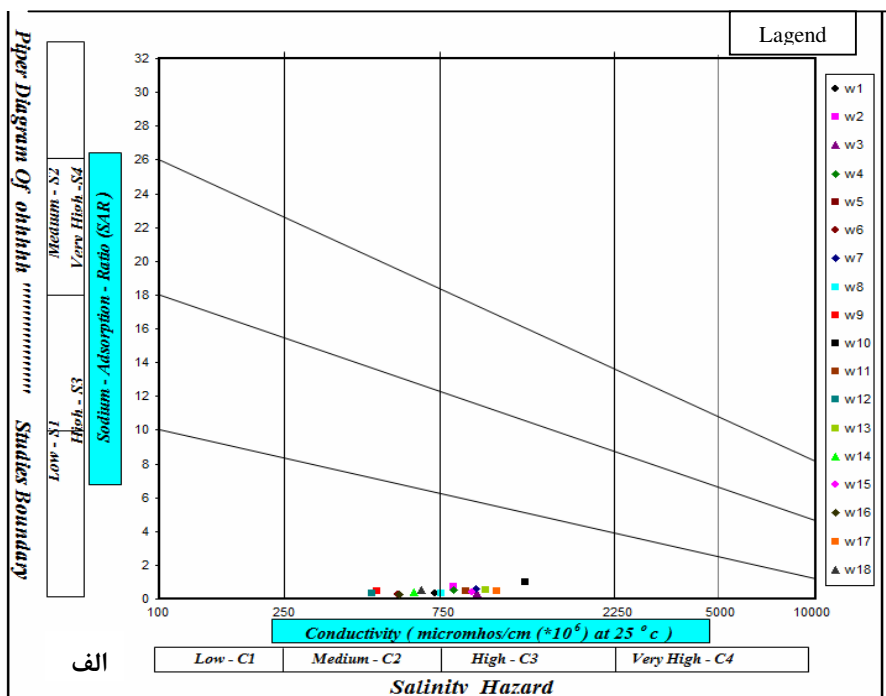
- ۱- غلظت کل نمک‌های محلول آب، که این غلظت از طریق اعمال اسمزی بر روی محصول اثر می‌گذارد.
- ۲- غلظت یون‌های ویژه (مثل بور) که ممکن است برای گیاهان سمی بوده و یا اینکه اثر نامساعدی بر روی کیفیت محصول داشته باشند.
- ۳- غلظت کاتیون‌ها (مثل سدیم) که با پراکندگی رس در خاک، ساختمان خاک را تخریب و از مقدار نفوذ آب می‌کاهد.

برای طبقه‌بندی آب‌های شمال غرب دشت کبودرآهنگ بر حسب مصرف کشاورزی از نمودار ویلکوکس استفاده شده است (شکل ۵). اساس این طبقه‌بندی میزان هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) می‌باشد:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

غلظت کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان در لیتر بیان می‌شود. میزان هدایت الکتریکی نشانگر خطر شوری و نسبت جذب سدیم (SAR) بیانگر خطر سدیم است. خطر سدیم و خطر شوری دو معیار مهم در طبقه‌بندی آب‌های آبیاری می‌باشند. خلاصه طبقه‌بندی ویلکاکس و

1- Residual Sodium Carbonate



شکل ۵. نمودار ویلکوکس. الف و ب) به ترتیب، آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸.

شد. متداول‌ترین روش طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی استفاده از نمودار ویلکوکس است (شکل ۵). هر نمونه آب بسته به میزان هدایت الکتریکی نسبت به جذب سدیم (SAR) در یکی از ۱۶ کلاس آبیاری قرار می‌گیرند.

مهم‌ترین ویژگی‌های آب آبیاری علاوه بر شوری، نسبت یون سدیم به یون‌های کلسیم و منیزیم در آن است. بالا بودن میزان سدیم در آب نسبت به دیگر کاتیون‌های محلول در آب، موجب شوره‌زایی و سختی خاک خواهد

قرار می‌گیرند. بر اساس جداول ۹ و ۱۰ کیفیت آب برای کشاورزی در منطقه مورد مطالعه آب شور تا کمی شور می‌باشد. چنین مشخصاتی برای کشاورزی قابل استفاده می‌باشند. کیفیت آب منطقه برای کشاورزی بر اساس %Na عالی و بر اساس RSC، برای کشاورزی مناسب می‌باشد (جداول ۹ و ۱۰).

چنانچه شوری آب بیش از ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و نسبت جذب سدیم آن بیش از ۳۰ باشد، نمونه خارج از نمودار قرار می‌گیرد؛ که برای کشاورزی مناسب نخواهد بود [۱۸]. بر این اساس در آبان ماه ۸۷، ۴۴/۴۴ درصد دارای طبقه  $C_2S_1$  و ۵۵/۵۶ درصد در طبقه  $C_3S_1$  قرار می‌گیرند و در مرداد ۸۸، ۸۸/۸۹ درصد دارای کلاس آبی  $C_2S_1$  و ۱۱/۱۱ درصد دارای کلاس آبی  $C_3S_1$

جدول ۹. طبقه‌بندی کیفیت آب برای کشاورزی (آبان - ۸۷).

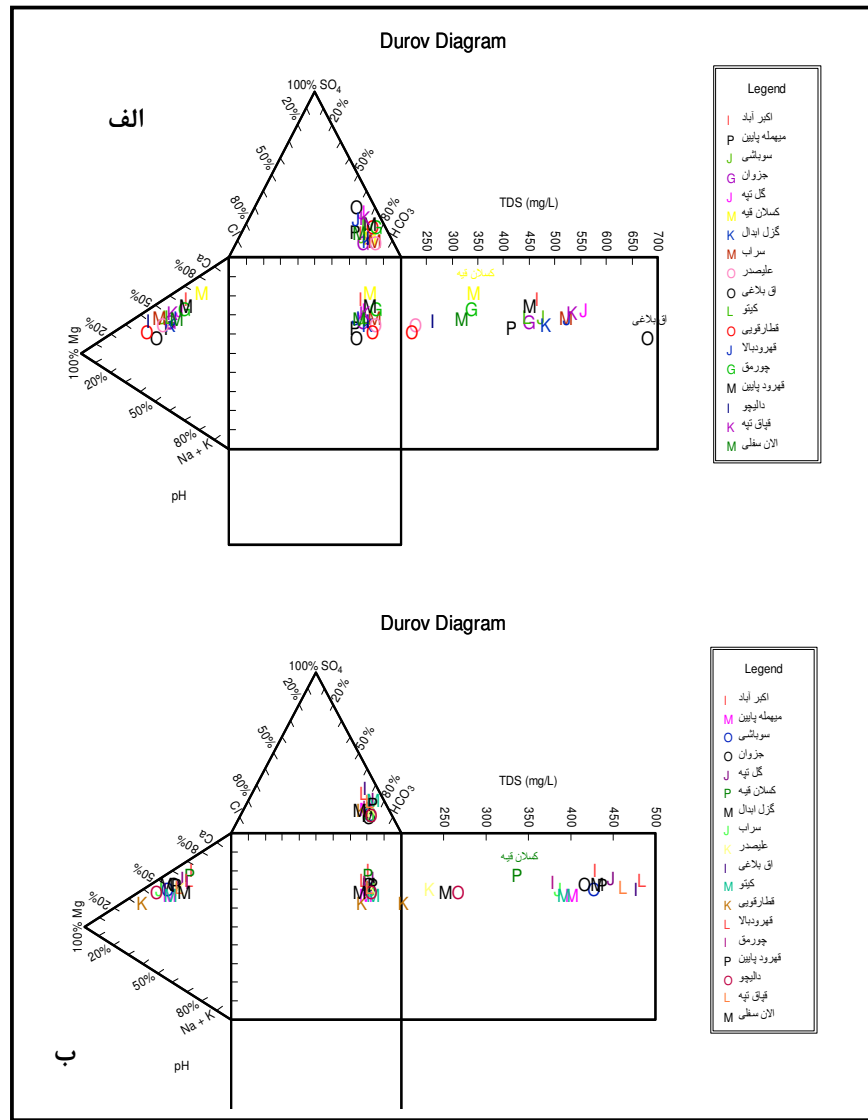
محل نمونه‌برداری	کلاس آب (EC-) (SAR)	کیفیت آب برای کشاورزی	SAR	%Na	کیفیت بر اساس %Na	RSC	کیفیت بر اساس RSC
اکبر آباد	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.3	7.84	عالی	-2.04	مناسب
میهمله پایین	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.7	16.19	عالی	-2.01	مناسب
سوباتشی	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.33	8.47	عالی	-2.28	مناسب
جزوان	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.56	13.51	عالی	-2.28	مناسب
گل تپه	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.48	10.84	عالی	-3.25	مناسب
کسلان قیه	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.25	8.48	عالی	-1.24	مناسب
گزل ابدال	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.61	14.99	عالی	-1.39	مناسب
سراب	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.31	7.44	عالی	-1.64	مناسب
علیصدر	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.44	12.21	عالی	-0.81	مناسب
اق بلاغی	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.98	16.93	عالی	-4.37	مناسب
کیتو	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.46	10.82	عالی	-2.24	مناسب
قطارقویی	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.3	10.67	عالی	-1.39	مناسب
قهرودبالا	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.54	12.61	عالی	-3.14	مناسب
چورمق	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.41	11.29	عالی	-1.21	مناسب
قهرود پایین	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.42	9.73	عالی	-2.44	مناسب
دالیچو	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.26	6.56	عالی	-1.98	مناسب
قیاق تپه	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	0.45	9.48	عالی	-2.8	مناسب
الان سفلی	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	0.53	13.75	عالی	-1.83	مناسب

جدول ۱۰. طبقه‌بندی کیفیت آب برای کشاورزی (مرداد - ۱۳۸۸).

محل نمونه‌برداری	کلاس آب (EC-) (SAR)	کیفیت آب برای کشاورزی	SAR	%Na	کیفیت بر اساس %Na	RSC	کیفیت بر اساس RSC
اکبر آباد	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	6.99	0.26	عالی	-1.56	مناسب
میهمله پایین	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	11.56	0.48	عالی	-2.63	مناسب
سوباتشی	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	7.49	0.27	عالی	-1.73	مناسب
جزوان	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	7.48	0.3	عالی	-2.1	مناسب
گل تپه	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	6.78	0.25	عالی	-2.26	مناسب
کسلان قیه	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	7.9	0.26	عالی	-1.52	مناسب
گزل ابدال	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	4.64	0.14	عالی	-2.33	مناسب
سراب	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	5.33	0.2	عالی	-1.92	مناسب
علیصدر	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	11.87	0.41	عالی	-0.96	مناسب
اق بلاغی	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	7.93	0.35	عالی	-3.41	مناسب
کیتو	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	11.55	0.45	عالی	-1.91	مناسب
قطارقویی	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	7.13	0.21	عالی	-1.51	مناسب
قهرودبالا	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	10.27	0.43	عالی	-2.64	مناسب
چورمق	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	11.57	0.45	عالی	-1.76	مناسب
قهرود پایین	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	9.12	0.35	عالی	-2.13	مناسب
دالیچو	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	5.22	0.21	عالی	-2	مناسب
قیاق تپه	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	11.24	0.47	عالی	-2.03	مناسب
الان سفلی	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	14.76	0.52	عالی	-1.4	مناسب

کاربرد این نمودار نمایش گرافیکی غلظت کاتیون/آنیون نسبت به TDS و pH است. سیر این تکامل در آبخوان مورد نظر از تیپ بی‌کربناته در مناطق تغذیه شروع و به تیپ سولفات به سمت مرکز دشت ختم می‌شود. این روند را به وضوح می‌توان با افزایش TDS نمونه‌های آب در قسمت مربع شکل نمودار دورو مشاهده نمود. نمودارهای دورو شمال‌غرب دشت کبودرآهنگ در دو دوره آبان و مرداد الگوی تقریباً مشابهی را نشان می‌دهد. تیپ‌های هیدروشیمیایی نمونه‌ها در حد فاصل بین دوره‌های نمونه‌برداری برای اغلب نقاط منطقه تغییر چندانی ننموده است.

بر اساس نمودار دورو (شکل ۶؛ قسمت مربع شکل) تنها یک جهت تکامل شیمیایی برای آب‌های زیرزمینی شمال‌غرب دشت کبودرآهنگ وجود دارد. این چرخه تکامل یونی تبعیت بیش‌تری از چرخه تکامل آنیونی نسبت به چرخه تبادل کاتیونی دارد. نمودار دورو یک نمودار کاتیون (برای مثال،  $Na^+ + K^+$ ،  $Ca^{+2}$  و  $Mg^{+2}$ ) و آنیون (برای مثال  $Cl^-$ ،  $HCO_3^-$  و  $SO_4^{2-}$ ) یا به عبارتی یک نمودار کل غلظت آنیون در مقابل کل غلظت آنیون است. در این نمودارها داده‌ها بر اساس ۱۰۰ درصد بهینه و محاسبه می‌شوند. نمودار گسترش یافته‌ای از نمودار دورو، شامل TDS (میلی گرم در لیتر) و داده‌ها pH اضافه شده به دو طرف این نمودار برای مقایسه بیش‌تر است.



شکل ۶. نمودار دورو (Durov). الف) آبان ماه سال ۱۳۸۷ و ب) مردادماه سال ۱۳۸۸.

## ۵-۳- طبقه‌بندی آب برای مصارف صنعتی

در صنعت، آب به اشکال گوناگونی در قسمت‌های مختلف یک واحد تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده آب در دیگ‌های بخار، تاسیسات خنک‌کننده و فرآیندهای تولیدی از مصارف عمده آب در صنعت می‌باشد. خواص آب در هر کارخانه با توجه به نوع فرآورده واحد تولیدی تعیین می‌گردد. دیگ‌های بخار و لوله‌های انتقال آب به منظور سرمایش و گرمایش در تمام کارخانه‌ها یکسان هستند. پدیده خوردگی و رسوب‌گذاری به عنوان شاخص قابلیت مصرف صنعتی آب مورد توجه قرار می‌گیرند. علیرغم تنوع زیادی که در کیفیت آب مورد نیاز صنایع وجود دارد، برای تمام صنایع سه پارامتر شوری، سختی و میزان سیلیس حائز اهمیت می‌باشد [۱۷]. جهت بررسی کیفیت آب منابع شمال‌غرب کبودرآهنگ به منظور مصارف صنعتی، از ضریب اشباع لانژلیه<sup>۱</sup> ( $I_s$ ) و نیز ضریب پایداری رایزنز<sup>۲</sup> ( $I_r$ ) استفاده گردید:

$$I_s = pH - pH_s \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$I_r = 2pH_s - pH \quad \text{رابطه (۴)}$$

$pH$  مقدار اندازه‌گیری شده اسیدیته آب در صحرا (واقعی) و  $pH_s$  میزان  $pH$  در حالت اشباع است که تحت عنوان شاخص اشباع از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$pH_s = C - (\text{Log Alk} + \text{Log Ca}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$C$  پارامتری است که تابع درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد) و باقی‌مانده خشک (TDS) می‌باشد. غلظت کاتیون کلسیم بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و کلیاتیت بر حسب میلی‌گرم در لیتر  $CaO$  است. در روش لانژلیه اگر ضریب لانژلیه منفی باشد آب خاصیت خوردگی<sup>۳</sup> دارد و در  $I_s$  برابر صفر، آب متعادل می‌باشد. همچنین در  $I_s$  بزرگ‌تر از صفر آب تمایل به پوسته‌گذاری<sup>۴</sup> دارد. از نظر شاخص رایزنز اگر  $I_{stab}$  کمتر از ۶ باشد، آب پوسته‌گذار و در  $I_{stab}$  بیش‌تر از ۷/۵ آب خورنده می‌باشد. ضریب لانژلیه بیش‌تر در سیستم‌های با سرعت کم و جریان آرام کاربرد دارد؛ در حالی‌که شاخص رایزنز خاص سیستم‌هایی با سرعت جریان بیش‌تر از ۰/۶ m/s می‌باشد. از آنجائی‌که سرعت آب ورودی از منافذ اسکرین به چاه و نیز سرعت آب در هنگام استخراج، اغلب کمتر از مقدار فوق است،

برای تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه از ضریب لانژلیه استفاده شده است.

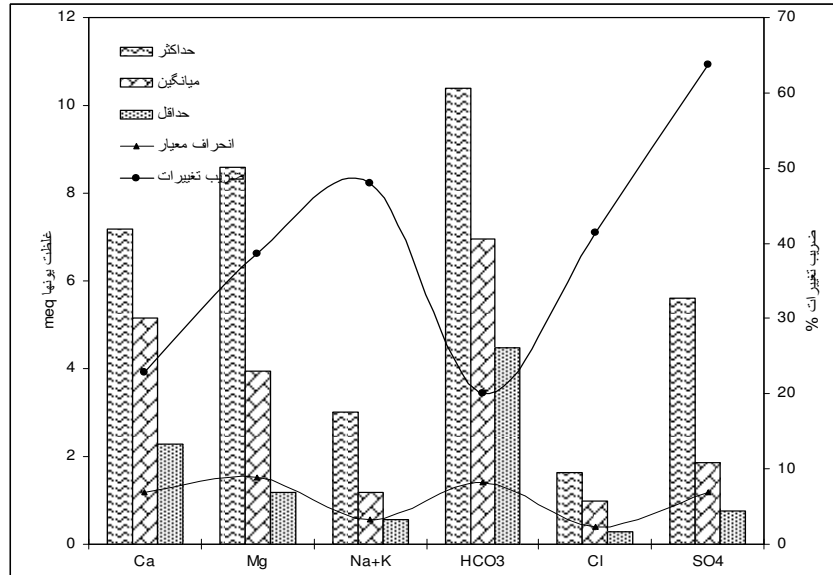
بر اساس داده‌های شیمیایی دو دوره نمونه‌برداری، خاصیت پوسته‌گذاری و خوردگی توسط روابط فوق معین و در جدول‌های ۱۴ و ۱۵ ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد آب زیرزمینی در اغلب نقاط منطقه مورد مطالعه در دوره آبان ۸۷ و در دوره مرداد ۸۸ تمایل به خوردگی دارد. بطور کل خاصیت آب‌های زیرزمینی در این منطقه تحت تاثیر فعل و انفعالات ژئوشیمیایی درون آبخوان و ترکیب آب‌های نفوذی است. همچنین فعال بودن چشمه‌های تراورتن‌ساز در شمال غرب منطقه عامل مهم دیگری است که باعث تاثیر بر خواص آب‌های زیرزمینی در این منطقه می‌شود.

## ۶- توزیع مکانی و تغییرات زمانی مولفه‌های هیدروشیمیایی

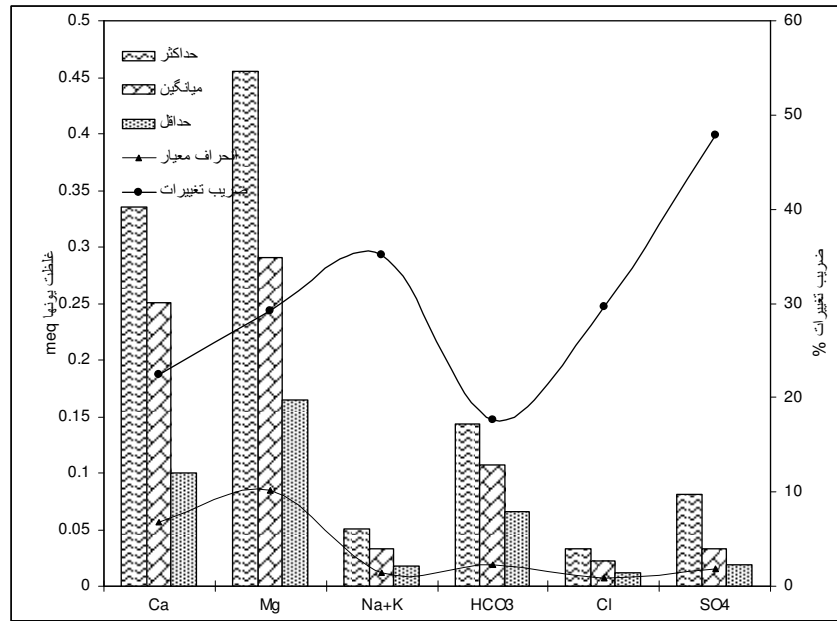
یکی از روش‌های مناسب در مطالعات هیدروشیمیایی جهت پردازش و نمایش داده‌های به دست آمده در یک منطقه وسیع و گسترده، ترسیم نقشه‌های هم‌ارزش پارامترهای مختلف می‌باشد. این نقشه‌ها از داده‌های جمع‌آوری شده در یک زمان مشابه تهیه می‌شوند. توزیع نقاط نمونه‌برداری در یک منطقه برای مقایسه نقشه‌های هم‌میزان از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۹]. در این بخش جهت بررسی توزیع مکانی و زمانی متشکله‌های شیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه، اقدام به تهیه نقشه‌های هم‌ارزش پارامترهای اصلی برای دوره‌های مختلف نمونه‌برداری شده است. رسم نقشه‌های هم‌ارزش با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS9.3 صورت گرفته است.

پارامترهای شیمیایی آب با توجه به شاخص‌های آماری، در طول سال آبی نمونه‌برداری شده، نوساناتی را نشان می‌دهد. جهت شناخت کلی تغییرات زمانی متشکله‌های شیمیایی آب‌های زیرزمینی شمال‌غرب دشت کبودرآهنگ، نمایه‌های آماری غلظت‌های یون‌های عمده،  $pH$ ، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول و مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، واریانس و ... نمونه‌های آب در هر دو دوره محاسبه گردیدند (جدول‌های ۱۴ و ۱۵) و نمودار پارامترهای آماری مولفه‌های شیمیایی برای هر دو نیم فصل ترسیم شدند (شکل‌های ۷ و ۸).

1- Langelier  
2-Ryznar  
3-Aggressive  
4-Scaling



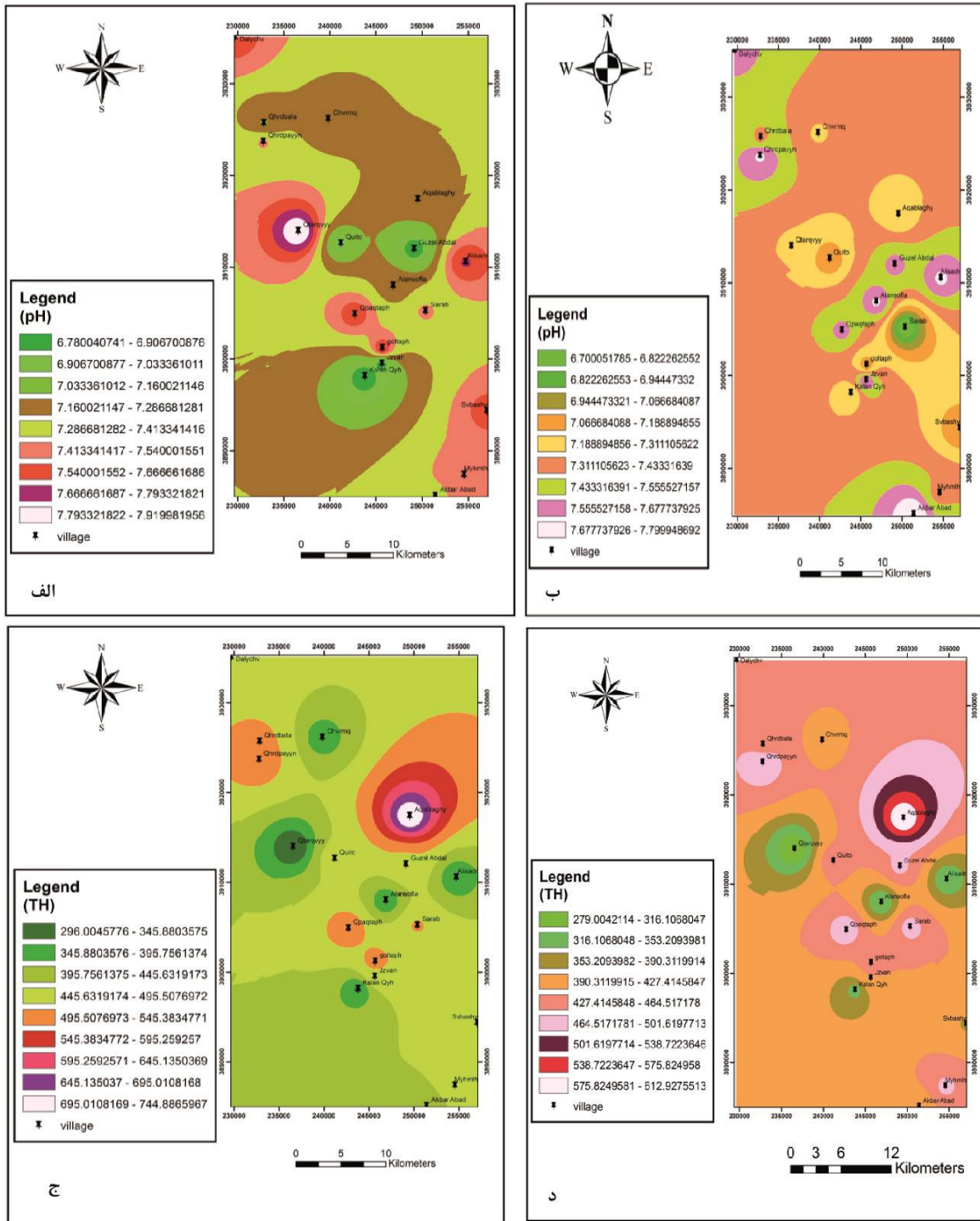
شکل ۷. گراف پارامترهای آماری مولفه‌های شیمیایی (آبان-۸۷).



شکل ۸. گراف پارامترهای آماری مولفه‌های شیمیایی (مرداد ۸۸).

(شکل‌های ۹ ج و ۹ د). معمولاً غلظت کلسیم آب‌های زیرزمینی در نواحی شمال و جنوب شمال‌غربی کبودرآهنگ بیش از بقیه نواحی می‌باشد؛ بطوری‌که غلظت کلسیم در روستای آق‌بلاغی و قهرود پایین افزایش می‌یابد. افزایش شدید و ناگهانی غلظت کلسیم در حوالی این روستاها که به صورت یک ناهنجاری در نقشه‌های هم‌کلسیم مشخص گردیده است می‌تواند ناشی از انحلال لایه‌های آهکی باشد (شکل‌های ۱۰ الف و ۱۰ ب).

بر اساس نقشه هم‌سختی (شکل‌های ۹ الف و ۹ ب)، میزان سختی موجود در آبان ماه ۸۷ نسبت به خرداد ماه ۸۸ از میزان بیش‌تری برخوردار می‌باشد. بیش‌ترین میزان سختی مربوط روستای آق‌بلاغی با سختی ۷۳۲/۷۷ دارای بیش‌ترین درجه سختی می‌باشد. این بخش‌ها به رنگ سفید بر روی نقشه مشخص هستند. میزان pH در تمام منطقه بین ۶/۷۰ تا ۷/۸۰ متغیر می‌باشد. به طور کلی میزان pH در اواخر دوره خشک (مرداد-۸۸) بیش‌تر از میزان آن در اواخر دوره تر سالی (آبان-۸۷) می‌باشد



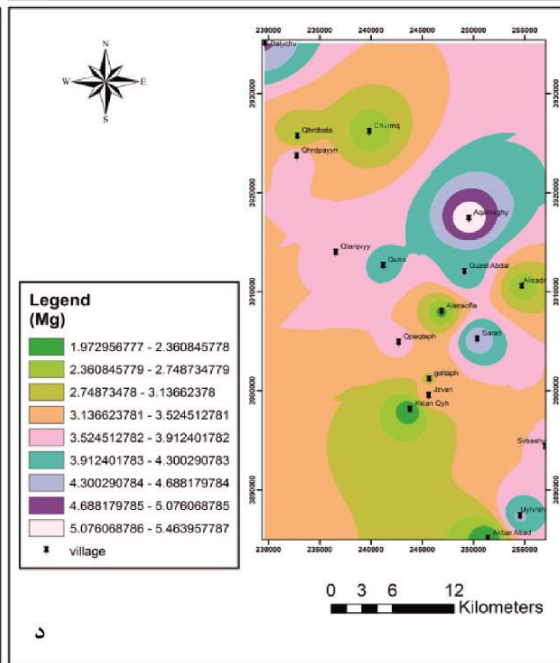
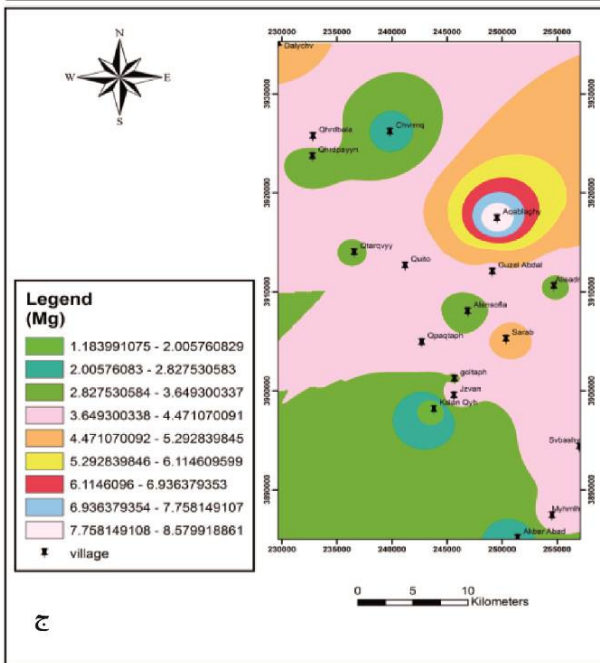
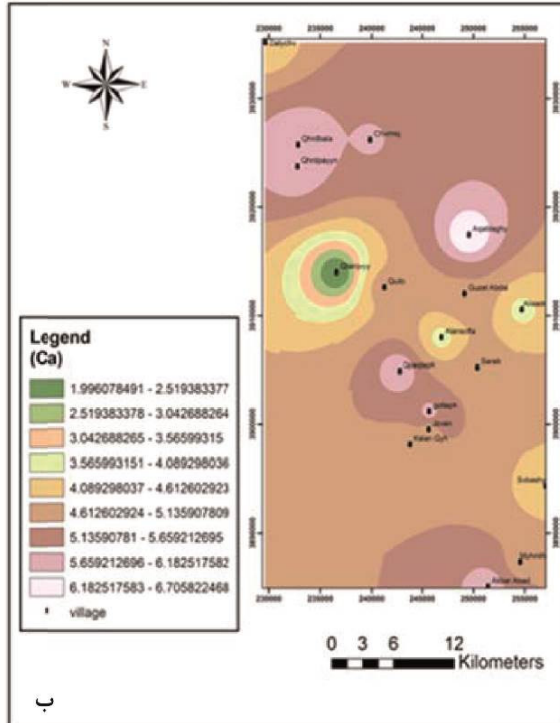
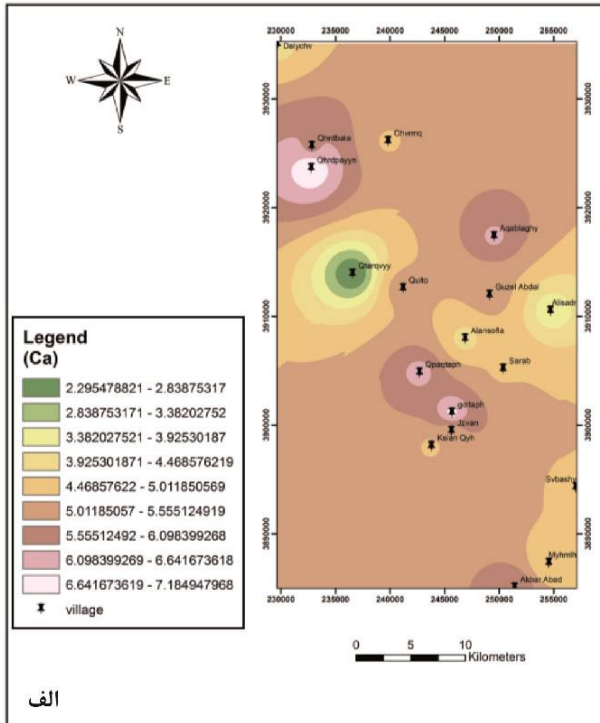
شکل ۹. الف و ب) به ترتیب، نقشه هم‌سختی (TH) آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده). ج و د) به ترتیب، نقشه هم‌pH آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده).

شسته شدن منیزیم در طی شستوی رسوبات آبرفتی منطقه می‌باشد که منجر به حل شدن منیزیم و ورود آن به آب زیرزمینی شده است. منیزیم عمدتاً در کانی البوین و کانی‌های آزبستی که در سنگ‌های اولترامافیک

نقشه هم‌منیزیم آب‌های زیرزمینی شمال‌غرب کبودرآهنگ (شکل‌های ۱۰ و ۱۰د) نیز نشانگر افزایش غلظت منیزیم در شرق و مرکز دشت می‌باشد. افزایش شدید غلظت منیزیم در روستای آق‌بلاغی، احتمالاً مبین

که همرا روانه‌های بازالتی مشاهده می‌شوند، احتمالاً غلظت بالای منیزیم ناشی از فعالیت چنین چشمه‌هایی است.

دگرسان شده یافت می‌شوند، می‌تواند تولید گردد. هم‌چنین منیزیم می‌تواند در اثر هوازدگی بازالت‌ها شسته و هوازده شود و وارد خاک و آب گردد. با توجه به وجود چشمه‌های تراورتن‌ساز در شمال‌غرب دشت کبودرآهنگ



شکل ۱۰. الف و ب) به ترتیب، نقشه هم‌کلسیم آبان سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده). ج و د) به ترتیب، نقشه هم‌منیزیم آبان ماه ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده).

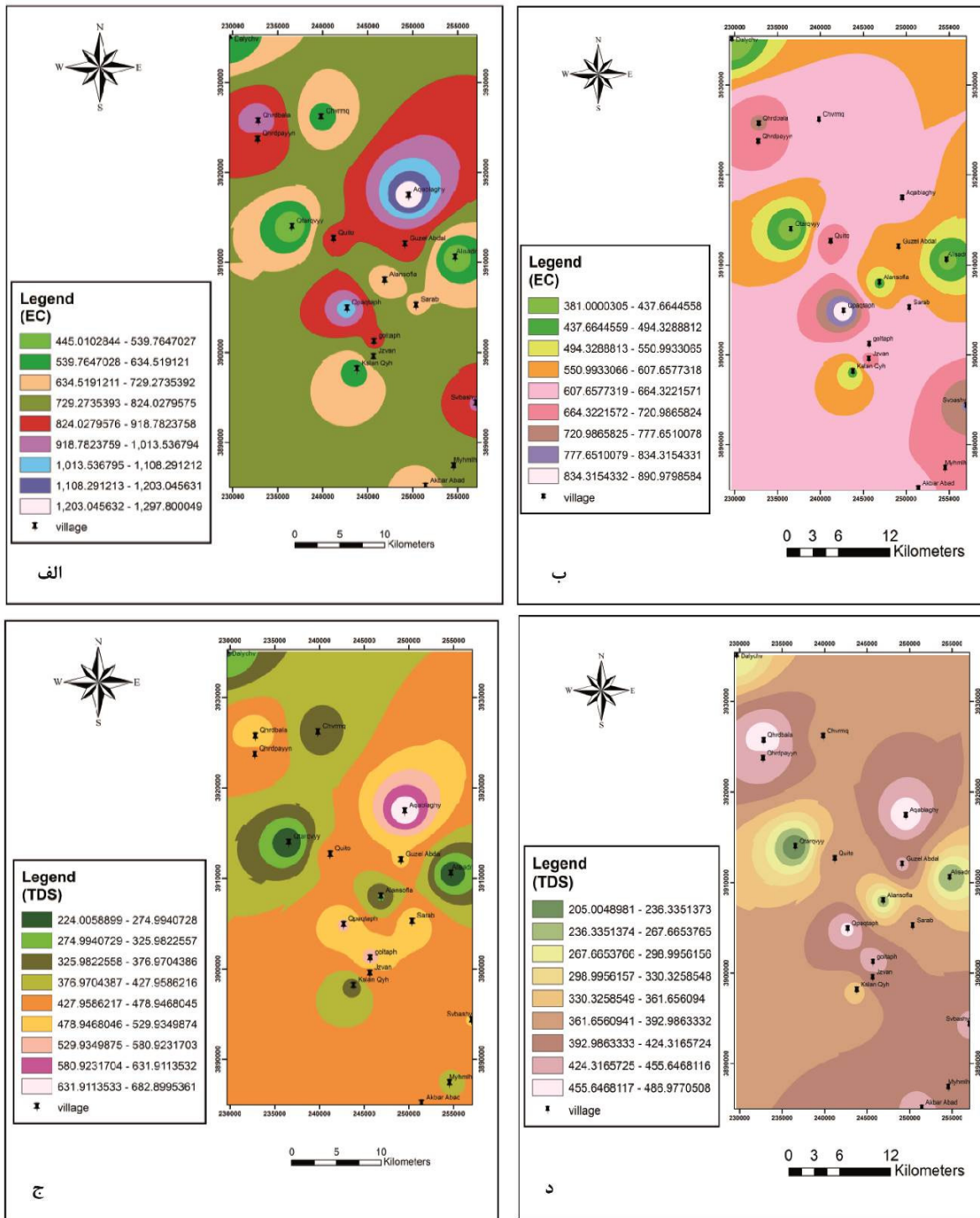


نقشه هم‌سولفات در دشت شمال غرب کبودرآهنگ (شکل‌های ۱۲ الف و ۱۲ ب) نیز همانند اکثر نقشه‌های هم‌یون، متاثر از وجود بخش‌ها و انحلال‌پذیری لایه‌های ژیبسی موجود در آبرفت می‌باشد. انحلال ژیبس طی فرآیند دولومیتی شدن، که یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است، باعث افزایش غلظت سولفات‌هایی مانند منیزیم و کلسیم از آب‌های زیرزمینی نواحی شمالی، شمال‌شرقی و شمال‌غربی محدوده مورد مطالعه شده است. غلظت سولفات در روستای آق‌بلاغی به بالاترین میزان خود رسیده است. از عوامل دیگر افزایش غلظت سولفات می‌توان به غالب بودن یون‌های تک ظرفیتی ( $K^+$  و  $Na^+$ ) جذب شده به وسیله سطح کانی‌های رسی در منطقه اشاره کرد. وجود این کاتیون‌ها، که منشاء آن‌ها می‌تواند عامل تبخیر و تعرق باشد، باعث می‌گردد تا میزان جذب سولفات بر روی سطح رس‌ها کاهش یافته و میزان آبشویی آن‌ها به سمت آب‌های زیرزمینی بالا برود [۱۴]. به همین جهت در اغلب آب‌های کم‌عمق منطقه، بویژه در بستر مناطق کشاورزی (مانند چاه)، غلظت سولفات بیش‌تر می‌باشد. علت دیگر را می‌توان نشانگر کاتیون‌های جذبی مانند آلومینیم و کلسیم بر سطح کانی‌های رسی باشد. دلیل چنین وضعیتی، افزایش جذب دوباره سولفات به وسیله خاک می‌باشد که در حین آبشویی نمی‌توانند به درون آب زیرزمینی وارد شوند.

مفهوم «نسبت جذب سدیم»، در رابطه با واکنش‌های تبادل یونی و به ویژه نسبت ظرفیت تعویض یون سدیم با کاتیون‌های دو ظرفیتی کلسیم، منیزیم و تغییر خواص فیزیکی و خطر افزایش یون سدیم خاک، ارائه شده است [۸]. نقشه‌های هم SAR (شکل‌های ۱۲ ج و ۱۲ د)، شاخص بسیار خوبی در استفاده بهینه از آبخوان‌ها در آبیاری، کشاورزی و جلوگیری از شور شدن، سفت شدن و اصلاح خاک و نیز بررسی‌های ژئوشیمیایی حوضه‌های مطالعاتی می‌باشد. در طراحی شبکه‌های بزرگ آبیاری، زهکشی و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها باید از نقشه‌های SAR تصحیح شده استفاده نمود. نقشه هم SAR منطقه مورد مطالعه در (شکل‌های ۱۲ ج و ۱۲ د) نشان داده شده است. مقادیر محاسباتی SAR با قرار دادن غلظت کاتیون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم بر حسب mg/l در رابطه ۱ به دست می‌آید.

بر طبق نقشه‌های هم EC، در منطقه مورد مطالعه این پارامتر از شمال به سمت جنوب در حال افزایش می‌باشد (شکل‌های ۱۱ الف و ۱۱ ب). در روستاهای آق‌بلاغی و قباق تپه، یک ناهنجاری در کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. میزان هدایت الکتریکی در این دو روستا به ترتیب برابر با ۱۲۹۸ و ۸۹۱ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. علت افزایش EC را می‌توان به عامل زمین‌شناسی نسبت داد (اگر چاه عمیق باشد). با توجه به نقشه‌های هم‌هدایت دو دوره سال آبی ۸۸-۱۳۸۷، یک افزایش نسبی در میزان هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی در آبان ماه نسبت به مرداد ماه روی داده است که علت آن می‌تواند به دلیل بالاتر رفتن غلظت در آبان ماه دانست که هنوز بارندگی مناسبی نتوانسته غلظت کاتیون‌ها را کاهش دهد. بعلاوه کاهش حرارت در این زمان مقدار  $CO_2$  محلول در آب را بالا می‌برد؛ در نتیجه غلظت بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم بالا می‌روند. این عامل می‌تواند بر هدایت الکتریکی تاثیر بگذارد. افزایش موضعی مقدار EC در ماه‌های پر باران می‌تواند به علت انحلال شدید کانی‌های دولومیت و کلسیت موجود در زون غیر اشباع توسط آب‌های نفوذی حاصل از بارش باشد. دلیل چنین وضعیتی، قدرت بالای محلول‌سازی این آب‌ها به جهت دارا بودن  $CO_2$  فراوان آن‌ها است. این خاصیت منجر به افزایش غلظت بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم شده و در نتیجه آب‌های از نوع بی‌کربنات کلسیک-منیزیک در منطقه تولید شده است.

هم‌چنین آب‌های منطقه مورد مطالعه بر حسب میزان TDS در دسته شیرین تا لب‌شور (۷۰۰-۲۰۰ mg/l) قرار می‌گیرند (شکل‌های ۱۱ ج و ۱۱ د). اغلب این آب‌ها از لحاظ قابلیت شرب، خوب تا مناسب هستند. مقادیر TDS بالا بیانگر حضور کاتیون‌ها و آنیون‌های بیش‌تر در آب و شور بودن آن می‌باشد. از جمله عوامل موثر در افزایش TDS آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌توان به حرکت آب از میان کانی‌های قابل حل و ورود آلاینده‌های ناشی از پساب فاضلاب‌ها و زه‌آب کشاورزی اشاره نمود. هر چند که بر طبق غلظت یون‌های عمده و نمودار شولر، اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه قابل شرب می‌باشند، ولی بایستی از لحاظ باکتریایی و آلودگی به مواد مضر نظیر نیترات، نیتريت، BOD و COD مورد پردازش قرار گیرند.



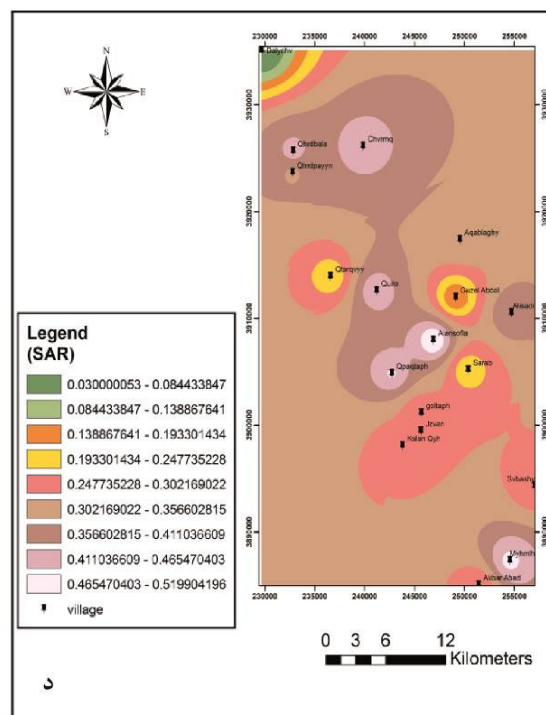
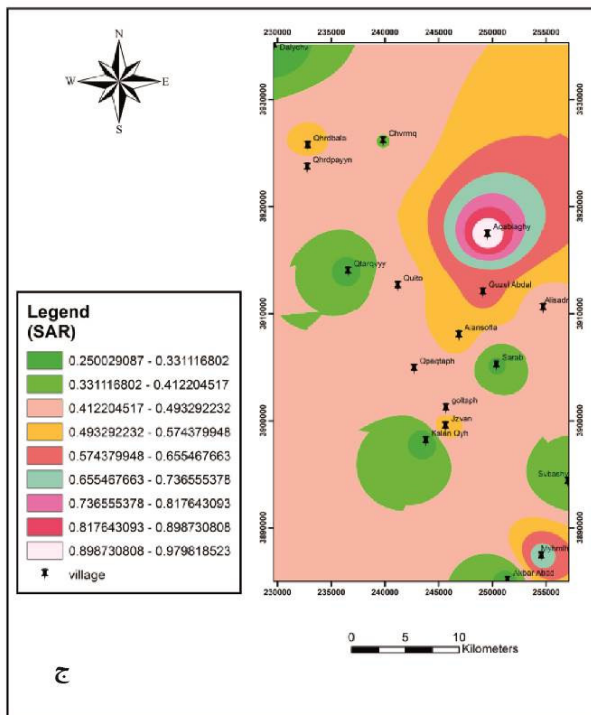
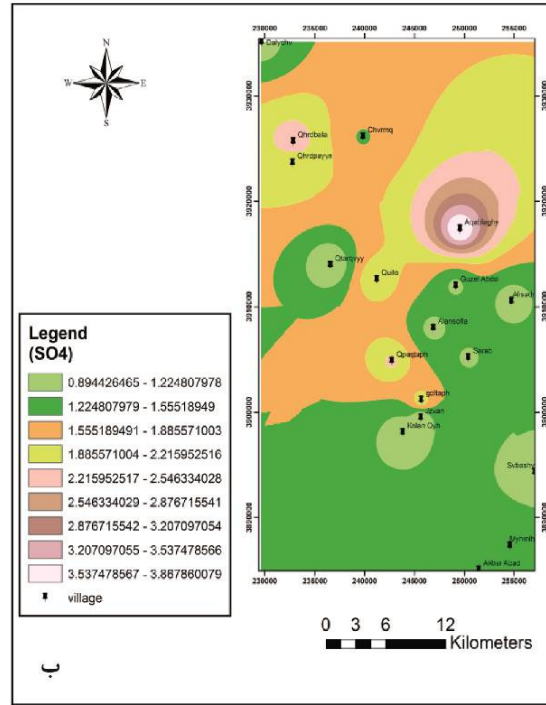
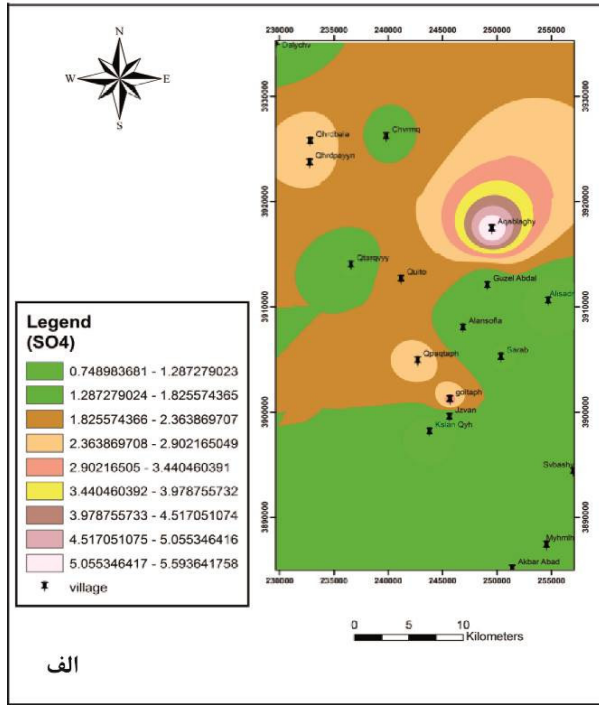
شکل ۱۱. الف و ب) به ترتیب، نقشه هم‌EC آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده). ج و د) به ترتیب، نقشه هم‌TDS آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده).

که در دو دوره نمونه‌برداری بیش‌ترین میزان کلر آب زیرزمینی مربوط به آبان (پایان دوره تر) است. علت چنین وضعیتی افزایش برداشت در طول تابستان و اوایل پاییز است که باعث کاهش ذخایر آب زیرزمینی و افزایش

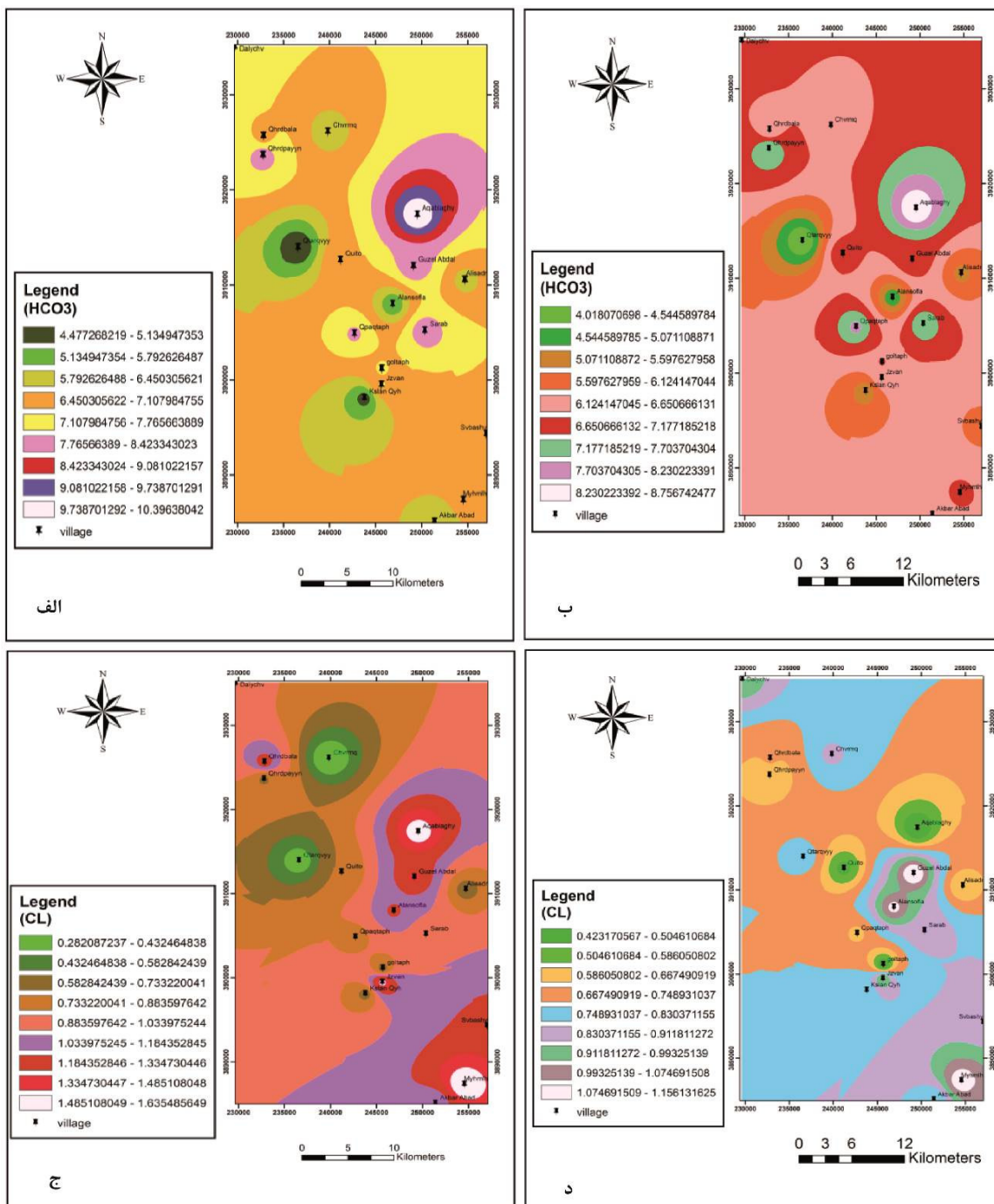
توزیع میزان  $\text{HCO}_3^-$  در منطقه، نیز بر اساس نقشه‌های هم  $\text{HCO}_3^-$  مانند دیگر کاتیون و آنیون‌ها می‌باشد (شکل‌های ۱۳ الف و ب). با توجه به نقشه هم‌کلر سال آبی ۸۸ - ۸۷ (شکل‌های ۱۳ ج و د) مشخص می‌گردد

و بیش‌ترین غلظت کلر آن در انتهای دوره تر اندازه‌گیری شده است. به طور کلی در منطقه مورد مطالعه میزان یون‌های  $\text{HCO}_3^-$ ، منیزیم و کلسیم بیش‌تر از بقیه یون‌ها می‌باشد.

یافتن افت سطح آب زیرزمینی و احتمالاً افزایش گرادیان جریان آب می‌شود؛ بنابراین انحلال افزایش یافته، به تبع آن غلظت کلر در حجم آب کمتر افزایش می‌یابد. در هر حال تغییرات کلر در یک نمونه، در طول سال اندک است



شکل ۱۲. الف و ب) به ترتیب، نقشه هم‌سولفات آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده). ج و د) به ترتیب، نقشه هم‌SAR آبان ماه سال ۱۳۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده).



شکل ۱۳. الف و ب) به ترتیب، نقشه هم  $HCO_3^-$  آبان ۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده). ج و د) به ترتیب، نقشه هم کلر آبان ۸۷ و مرداد ۸۸ (کل محدوده).

جدول ۱۱. درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی ویلکاکس برای مصارف کشاورزی برای سال آبی ۸۸-۸۷ در کل محدوده.

C3- S1	C2- S1	نیمه ۱
55.56	44.44	
C3- S1	C2- S1	نیمه ۲
11.11	88.89	

جدول ۱۲. مشخصه‌های آماری مولفه‌های مختلف شیمیایی بر حسب meq (آبان-۸۷).

پارامتر	EC	T.D.S	pH	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
تعداد نمونه‌ها	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
میانگین حسابی	777.17	432.83	7.34	5.16	3.93	1.01	0.18	6.97	0.99	1.85
انحراف معیار	224.89	122.43	0.33	1.18	1.52	0.5	0.08	1.4	0.41	1.18
ضریب تغییرات (درصد)	28.94	28.29	4.5	22.87	38.68	49.5	44.44	20.09	41.41	63.78
حداکثر	1298	683	7.92	7.19	8.58	2.65	0.36	10.4	1.64	5.6
حداقل	445	224	6.78	2.3	1.18	0.44	0.08	4.48	0.28	0.75
مد	785	453	7.43	4.8902	مد ندارد	0.696	0.153	6.888	0.677	1.1648
میانه	785	453	7.42	5.08	3.98	0.98	0.15	6.97	0.94	1.37
دامنه تغییرات	853	459	1.14	4.89	7.4	2.21	0.28	5.92	1.36	4.85
چولگی	0.45	-0.11	-0.26	-0.53	1.38	2.13	1.28	0.39	0.02	2.06
واریانس	50577	14988	0.11	1.39	2.31	0.25	0.01	1.96	0.17	1.4

جدول ۱۳. مشخصه‌های آماری مولفه‌های مختلف شیمیایی بر حسب meq (مرداد-۸۸).

پارامتر	EC	T.D.S	pH	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
تعداد نمونه‌ها	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
میانگین حسابی	618.67	384.11	7.4	5.01	3.49	0.69	0.13	6.51	0.79	1.59
انحراف معیار	139.6	87.24	0.3	1.13	1.02	0.25	0.05	1.15	0.23	0.76
ضریب تغییرات (درصد)	22.56	22.71	4.05	22.55	29.23	36.23	38.46	17.67	29.11	47.8
حداکثر	891	487	7.8	6.71	5.46	1.04	0.2	8.76	1.16	3.87
حداقل	381	205	6.7	2	1.97	0.3	0.05	4.02	0.42	0.89
مد	698	مد ندارد	7.7	4.99	مد ندارد	0.522	0.102	6.396	0.423	مد ندارد
میانه	636	410.5	7.4	4.99	3.55	0.67	0.13	6.54	0.79	1.23
دامنه تغییرات	510	282	1.1	4.71	3.49	0.74	0.15	4.74	0.74	2.98
چولگی	-0.24	-0.93	-0.62	-0.95	0.11	0.02	0.12	-0.3	-0.02	1.76
واریانس	19489	7610.6	0.09	1.27	1.04	0.06	0	1.33	0.05	0.58

جدول ۱۴. طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصرف صنعتی (آبان-۸۷).

محل نمونه‌برداری	قلیائیت بر حسب CaO	Ca (mg/l)	ضریب C	pHs	pH	pHs-pH	کیفیت آب برای مصارف صنعتی
اکبر آباد	17.985	120.56	11.29	8	7.4	0.6	خورنده
میهمله پایین	40.9725	90.818	11.29	7.7	7.49	0.21	خورنده
سوپاشی	21.975	97.804	11.29	8	7.59	0.41	خورنده
جزوان	37.959	103.79	11.29	7.7	6.84	0.86	خورنده
گل تپه	31.974	135.73	11.3	7.7	7.69	0.01	خورنده
کسلان قیه	14.9775	97.804	11.28	8.1	6.78	1.32	خورنده
گزل ابدال	44.9385	105.79	11.29	7.6	6.83	0.77	خورنده
سراب	19.986	99.002	11.29	8	7.43	0.57	خورنده
علیصدر	24.9765	71.058	11.27	8	7.68	0.32	خورنده
اق بلاغی	74.9535	123.75	11.3	7.3	7.24	0.06	خورنده
کتو	27.984	105.79	11.29	7.8	6.99	0.81	خورنده
قطار قویی	18.9675	45.908	11.27	8.3	7.92	0.38	خورنده
قهرود بالا	36.9645	119.76	11.29	7.6	7.15	0.45	خورنده
چورمق	23.976	99.401	11.28	7.9	7.2	0.7	خورنده
قهرود پایین	28.9725	143.71	11.29	7.7	7.43	0.27	خورنده
دالیچو	17.01	87	11.28	8.1	7.6	0.5	خورنده
قیاقی تپه	27.04	126.6	11.29	7.8	7.64	0.16	خورنده
الان سفلی	28.07	84.6	11.28	7.9	7.21	0.69	خورنده

جدول ۱۵. طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصرف صنعتی (مرداد-۸۸).

محل نمونه‌برداری	قلیائیت بر حسب CaO	Ca (mg/l)	ضریب C	pHs	pH	pHs-pH	کیفیت آب برای مصارف صنعتی
اکبر آباد	14.9895	118.96	11.29	8	7.8	0.2	خورنده
میهمله پایین	30.9735	99.8	11.29	7.8	7.4	0.4	خورنده
سویاشی	15.984	82.834	11.29	8.2	7.1	1.1	خورنده
جزوان	16.9905	99.8	11.29	8.1	7.7	0.4	خورنده
گل تپه	16.9785	116.77	11.29	8	7.1	0.9	خورنده
کسلان قیه	14.9835	95.808	11.28	8.1	7.2	0.9	خورنده
گزل ابدال	12.9705	101.8	11.29	8.2	7.6	0.6	خورنده
سراب	13.983	97.006	11.29	8.2	6.7	1.5	خورنده
علیصدر	21.981	79.042	11.27	8	7.7	0.3	خورنده
اق بلاغی	26.9715	134.13	11.29	7.7	7.2	0.5	خورنده
کیتو	29.967	96.207	11.29	7.8	7.1	0.7	خورنده
قطارقویی	10.9875	39.92	11.27	8.6	7.3	1.3	خورنده
قهرودبالا	24.9885	123.75	11.29	7.8	7.4	0.4	خورنده
چورمق	26.9775	114.17	11.29	7.8	7.3	0.5	خورنده
قهرود پایین	25.965	119.76	11.29	7.8	7.7	0.1	خورنده
دالیچو	12.07	83.8	11.28	8.3	7.6	0.7	خورنده
قیای تپه	31.968	123.35	11.29	7.7	7.6	0.1	خورنده
الان سفلی	26.9775	77.844	11.28	8	7.7	0.3	خورنده

## ۷- نتیجه‌گیری

با بررسی و تجزیه تحلیل داده‌های کیفیت شیمیایی ۱۸ حلقه چاه که در دو دوره (آبان ۱۳۸۷ و مرداد ۱۳۸۸) توسط نمودارهای شولر، پایپر، ویلکوکس، دورو و نقشه‌های هیدروژئوشیمیایی انجام شده است، مشخص می‌شود که کیفیت آب از لحاظ کشاورزی تقریباً مناسب و از لحاظ شرب قابل قبول و از لحاظ مصارف صنعتی خاصیت خورندگی دارد. اکثر منابع آب از لحاظ کشاورزی در طبقه  $C_3S_1$  و  $C_2S_1$  قرار می‌گیرند. بنابراین نشان دهنده کیفیت خوب تا متوسط برای مصارف کشاورزی هستند. کیفیت آب این دشت از لحاظ شرب بر اساس نمودار شولر و میزان سختی قابل قبول می‌باشد.

## ۸- قدردانی

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه که هزینه‌های مالی این پژوهش را فراهم نمودند تشکر می‌شود. از سردبیر و کارکنان محترم مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی و داوران محترم این مقاله تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

[۱] بهرامی، م (۱۳۸۸) مبانی ژئوشیمی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ص ۳۱۲-۳۱۰.

[۲] پیش‌نویس استانداردها (۱۳۷۳) راهنمای تهیهی نقشه‌های هیدروژئوشیمیایی پروژه‌های منابع آب، وزارت نیرو.

[۳] حدادیان، م (۱۳۸۳) نقشه زمین‌شناسی کیودرآهنگ، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[۴] سازمان آب منطقه‌ای همدان. داده‌های شیمی آب.

[۵] صداقت، م (۱۳۷۲) زمین و منابع آب (آب‌های زیرزمینی)، انتشارات دانشگاه پیام نور.

[۶] گلکار، ف، فرهمند، ع (۱۳۸۹) آلودگی‌های محیط زیست، انتشارات ماندگار.

[۷] مقیمی، ه (۱۳۸۵) هیدروژئوشیمی، انتشارات دانشگاه پیام نور.

[8] Afzal, S., I., Ahmad, M., Younas, M., Din Zahid, M.H., Atique Khan, A., and Ali, K., 2000. Study of water quality of Hudiara drain, India-Pakistan, Environment International, Vol: 26, pp: 87-96.

[9] Appelo, C.A.J., and Postma, D (1994) Geochemistry, Groundwater and pollution. Brookfield, 2<sup>th</sup> Balkema, Rotherdam, 536 pp.

[10] Claassen HC (1982) Guidelines and techniques to obtain groundwater Quality samples. U.S. Geological Survey. Open report 82-1024: 54.

[11] Douglas, M., Clark, I. D., Raven, K., and Bottomleg, D (2000) Groundwater mixing dynamics at a Canadian Shield mine. Hydrogeol Journal, Vol: 235, pp: 88-10.

- [12] Hem, J.D (1992) Groundwater characteristics and interpretation, Third edition, U.S. Geological Survey, Washington, 263pp.
- [13] Karanth, K.R (2001) Groundwater Assessment Development and management. MCGraw-Hill. 72 pp.
- [14] Liu, D.H.F., and Liptak, D.G (2000) groundwater and surface water pollution. CRC Press LIC. 150 pp.
- [15] Sikdar, P.K., Sarkar, S.S., and Palchoudhury, S (2001) Geochemical evolution of ground water in the Quaternary aquifer of Calcutta and Howrah, India. Journal of Asian Earth Science, Vol: 19, pp: 579-594.
- [16] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> Edition (1999)
- [17] Todd, D.K (1980) Ground water hydrology. 2d, Ed., John Wiley, New York, 535pp.
- [18] Todd, D.K., and Mays, L.W (2005) Groundwater hydrology. Third edition. John Wiley & sons Inc.