



ارزیابی هیدروشیمیایی و عوامل موثر بر کیفیت شیمیایی چشمه‌های مسجد سلیمان

عباس شیرمردی دزکی^۱، میرحسن موسوی*^۲، فاطمه امیری^۳

۱- استادیار شیمی، گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجد سلیمان، مسجد سلیمان، ایران

۲- استادیار زمین‌شناسی نفت، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجد سلیمان، مسجد سلیمان، ایران

۳- مربی گروه علوم تجربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجد سلیمان، مسجد سلیمان، ایران

* عهده‌دار مکاتبات: mhmoosavi@iaumis.ac.ir, moosavi_m_h@yahoo.com

دریافت مقاله: ۹۱/۴/۶، پذیرش مقاله: ۹۱/۶/۲۰

چکیده

هدف از این تحقیق، ارزیابی کیفی آب چشمه‌ها در منطقه مسجد سلیمان است که مهم‌ترین منبع آب برای مصارف کشاورزی و شرب این منطقه به شمار می‌آید. این مطالعات شامل بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب چشمه‌ها در بخش‌های مختلف و تعیین عوامل موثر بر آنهاست. در این مطالعه برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از روش‌های هیدروشیمیایی مانند نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی استفاده شده است. با استفاده از استانداردهای کنترل کیفیت آب مانند نمودار ویلکوکس و شولر، کیفیت این چشمه‌ها برای مصارف کشاورزی تعیین شد و در مجموع در رده آب‌های مناسب قرار گرفتند. در بیشتر نمونه‌ها نوع آب سولفاتی (کلسیم، سدیم و منیزیم) و در تعداد کمی از آنها از نوع کلرید سدیم و بی‌کربناتی (کلسیمی و سدیمی) است. با توجه به ضرایب همبستگی میان پارامترهای مختلف شیمیایی و بررسی‌های زمین‌شناختی، مهم‌ترین عامل موثر در تغییر کیفیت آب چشمه‌ها، ویژگی‌های سنگ‌شناختی سازندهای در برگیرنده آبخوان است که سبب کاهش شدید کیفیت آب می‌شوند. در این تحقیق، از نسبت‌های یونی مانند $\text{HCO}_3^-/(\text{Sum Anions})$ ، $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Cl})$ ، $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{SO}_4)$ ، $\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ و $\text{Cl}/(\text{Sum Anions})$ و نمودارهای ترکیبی برای تعیین عوامل موثر بر کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده، فرایندهایی مانند انحلال ژپس، هالیت، سولفات‌های سدیم‌دار، هوازگی پلاژیوکلازهای غنی از سدیم و تبادل یونی، کیفیت شیمیایی آب چشمه‌ها را در منطقه مسجد سلیمان تحت تاثیر قرار می‌دهند. نتایج حاصل از محاسبه شاخص اشباع، نشان می‌دهد که این آب‌ها نسبت به کانی‌های ژپس، انیدریت و هالیت زیر اشباع و نسبت به کانی کلسیت اشباع هستند.

واژه‌های کلیدی: چشمه، هیدروشیمی، کیفیت شیمیایی، نسبت یونی، مسجد سلیمان

سال‌های اخیر به مدیریت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی توجه ویژه‌ای شده است (Foster, et al., 2000; Olajire and Imeokparia, 2001; Menda, et al., 2007)

یکی از موضوعات مهم در هیدرولوژی، کیفیت آب است. کیفیت آب زیرزمینی یکی از جنبه‌های مهم هیدروژئوشیمیایی است که درباره توصیف شیمیایی آب، توزیع مکانی انواع سازندهای شیمیایی و قابلیت مصرف آب برای اهداف مختلف مانند شرب، کشاورزی و صنعت بحث می‌کند، زیرا هر کدام از نظر کیفی باید دارای ویژگی‌های کیفی و معیاری مشخص باشند. بنابراین با بررسی کیفی آنها می‌توان از آلودگی این منابع جلوگیری کرد (Alley, 1993).

ترکیب آب‌های سطحی و زیرزمینی به عوامل طبیعی از جمله زمین‌شناسی، توپوگرافی، هواشناسی، هیدروژئولوژی، زیست‌شناسی و میزان بارش و تعادل میان نمک‌های حاصل از تبخیر و بارش در حوضه آبریز و

ارزیابی هیدروشیمیایی سامانه‌های آب زیرزمینی معمولاً براساس مجموعه‌ای اطلاعات جامع در مورد شیمی آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد. شیمی آب‌های زیرزمینی تحت تاثیر عوامل متفاوتی است که از آن جمله می‌توان به زمین‌شناسی محل، میزان هوازگی سنگ‌ها و نوع آنها، کیفیت آب تغذیه‌شونده به درون سفره و واکنش‌های هیدروژئوشیمیایی اشاره کرد (Guler and Thyne, 2004; Subramani, et al., 2005; Coetsiers, 2006). افزایش شناخت از فرایندهای هیدروشیمیایی کنترل‌کننده شیمی آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند در شناخت سامانه‌های هیدروشیمیایی، مدیریت کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی و استفاده از آنها، کمک شایانی بنماید. بنابراین، در

درز و شکافی است. این درز و شکافها اکثراً عمود بر امتداد لایه‌بندی هستند و آب از طریق این شکستگی‌ها از محل تماس ماسه‌سنگ با مارن خارج می‌شوند. سنگ مخزن چشمه‌ها از جنس ماسه‌سنگ درشت‌دانه است. همچنین با توجه به سیمان آهکی ماسه‌سنگ‌های آجاجاری، سامانه زهکشی انحلالی نیز می‌تواند تاثیر زیادی در آبدی داشته باشد. همچنین ضخامت بخش ماسه‌سنگی سازند آجاجاری در منطقه قابل ملاحظه بوده و خود یکی از عوامل مهم در آبدی چشمه به‌شمار می‌رود که این موضوع نقش مهمی در دوام آب چشمه به‌ویژه در فصل خشک دارد. همچنین آبدی چشمه‌ها، ارتباط زیادی با میزان بارندگی در منطقه دارد.

از ویژگی‌های بارز چشمه‌ها، اختلاف نسبتاً زیاد آبدی آن در فصول خشک و تر است، به طوری که آبدی چشمه در فصل خشک در حدود ۲۰ لیتر بر ثانیه و در فصل تر به بیش از ۶۰ لیتر بر ثانیه می‌رسد. علاوه بر شکستگی‌ها، که مهم‌ترین عامل آبدی چشمه‌ها در منطقه به‌شمار می‌رود، شیب توپوگرافی منطقه نیز نقش مهمی در آبدی چشمه دارد. در مناطق با شیب تند، آب زمان کافی برای نفوذ در آبخوان ندارد و آب حاصل از بارش به صورت رواناب و سیلاب جاری شده و از منطقه خارج می‌شود. بنابراین شیب توپوگرافی، یکی از عوامل مهم کنترل‌کننده تغذیه چشمه به‌شمار می‌رود. براساس مطالعات میدانی انجام شده، مناطق ظهور چشمه‌ها دارای شیب توپوگرافی نسبتاً ملایمی است و این موضوع نقش مهمی در تغذیه این چشمه‌ها دارد. مطالعات نشان داده است که بیش از ۸۵ درصد از مساحت منطقه، شیب کمتر از ۳۰ درجه دارد، همچنین بیشتر شکستگی‌های منطقه در شیب ۱۵ تا ۳۰ درجه قرار دارند.

عملکرد فرایندهای ساختاری و ضخامت مناسب بخش ماسه‌سنگی سازند آجاجاری در منطقه، نقشی اساسی در تشکیل آبخوان ماسه‌سنگی داشته است. تراکم شکستگی‌ها در لایه‌های ضخیم ماسه‌سنگی، سبب افزایش ضریب ذخیره سازند شده است، همچنین سبب شده تا منطقه مورد مطالعه از پتانسیل آب زیرزمینی مناسبی برخوردار شود. همچنین محل ظهور چشمه‌ها با فراوانی شکستگی‌های منطقه انطباق نزدیکی نشان می‌دهد.

روند بیشتر شکستگی‌ها در منطقه شمال شرق - جنوب غرب می‌باشد. بیشتر شکستگی‌های مؤثر در ظهور چشمه در منطقه از نوع عرضی می‌باشند. از آنجا که شکستگی‌های عرضی دارای بازشدگی بیشتری هستند، این نوع شکستگی‌ها نقش زیادی در تراوایی و انتقال آب در سازند ماسه‌سنگی دارند.

در مطالعه آب‌های زیرزمینی در سازندهای سخت، چشمه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند و مستقیماً ویژگی‌های درونی آبخوان را بازتاب می‌کنند (Kresic and Stevanovic, 2010). با توجه به اینکه در منطقه مطالعاتی، پیرومتر و چاه‌های بهره‌برداری وجود ندارد، چشمه‌ها از اهمیت زیادی برخوردارند و بازتاب‌کننده شرایط درونی آبخوان ماسه‌سنگی موجود در سازند آجاجاری است.

تغییرات فصلی در حجم رواناب، شرایط و نوع هوازدگی و سطح آنها وابسته است (Gibbs, 1970; Eilers et al., 1992; Bartram and Balance, 1996; Fernandez et al., 2009). از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی نیز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت آب دارد. برخی از این تاثیرات نتیجه تغییرات آب‌شناختی مانند ساختن سد، خشک‌شدن تالاب‌ها و انحراف در مسیر جریان است. عوامل هواشناسی مانند کمیت، فراوانی و شدت بارندگی با تاثیر روی چرخه آب‌شناختی بر کیفیت و کمیت منابع آبی نیز تاثیر دارند. فرایندهای طبیعی و هوازدگی، کاربری اراضی، فعالیت‌های کشاورزی و دخالت‌های انسان در چرخه آب، بر منابع آبی مؤثر هستند (EEA, 2000).

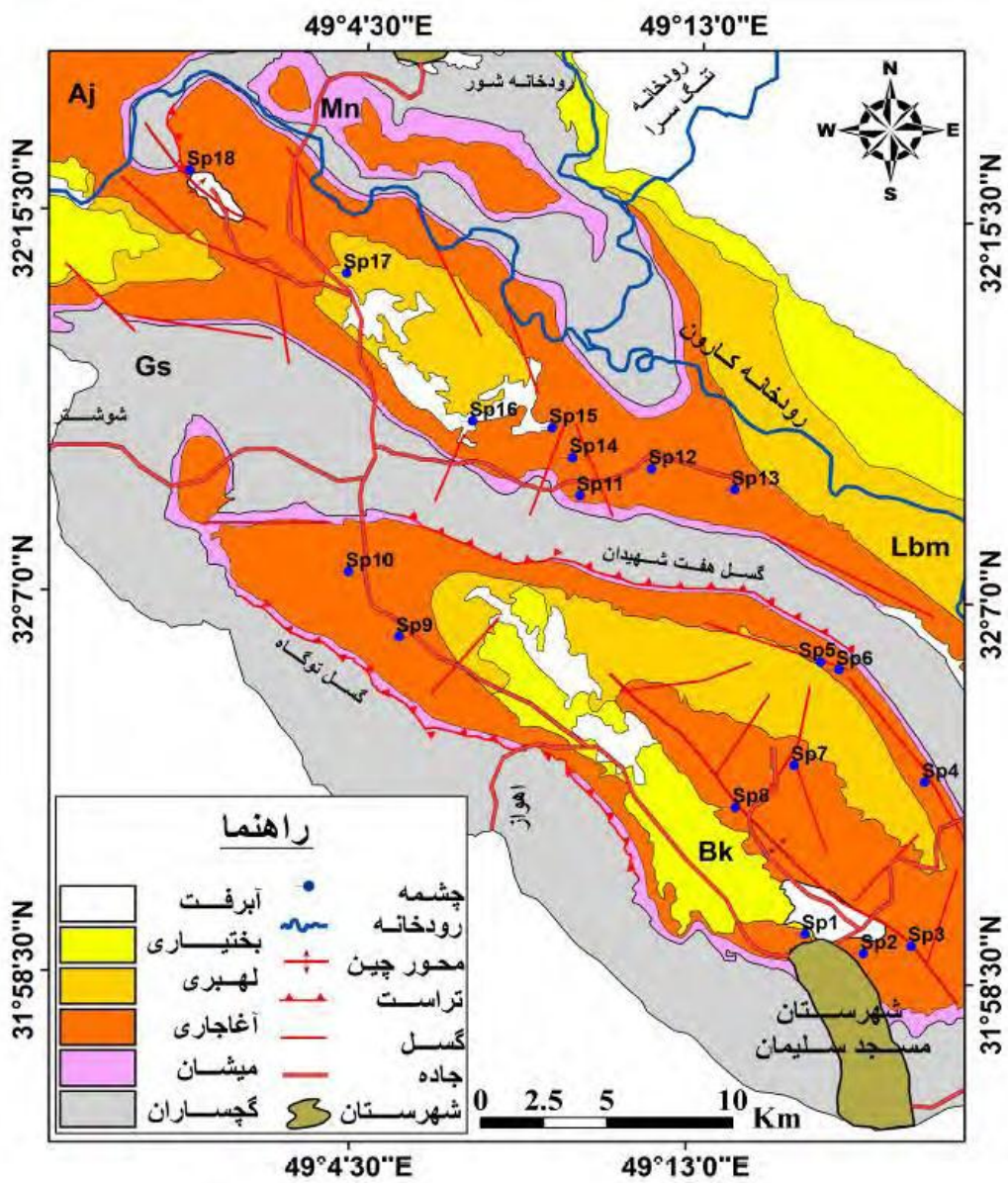
با توجه به اینکه در منطقه مسجد سلیمان قنات یا چاه بهره‌برداری فعال وجود ندارد، چشمه‌ها مهم‌ترین منبع تامین آب هستند و هدف از این پژوهش، بررسی خصوصیات و عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب چشمه‌های موجود در منطقه مسجد سلیمان است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه مساحتی حدود ۷۰۰ کیلومتر مربع دارد. آمار ۳۵ ساله ایستگاه هواشناسی منطقه نشان می‌دهد که منطقه میزان بارندگی نسبتاً مناسبی ندارد و براساس رده‌بندی اقلیمی دومارتن، دارای اقلیم نیمه‌خشک است. به‌گونه‌ای که میانگین بارش سالانه در طول دوره آماری ۴۴۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه نیز بالاتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. بیشتر بارندگی‌های منطقه در فصل زمستان رخ می‌دهد.

محدوده مطالعاتی، توسط سازندهای گچساران، میشان، آجاجاری و بختیاری پوشیده شده است (شکل ۱). در این میان سازند آجاجاری بخش نسبتاً بزرگی از منطقه را (۳۸۰ کیلومتر مربع) می‌پوشاند. سنگ‌شناسی این سازند عمدتاً تناوب مارن و ماسه‌سنگ است و این سازند تحت تاثیر شکستگی‌ها و گسل‌ها (شکل‌های ۱، ۲ و ۳)، مخازن آب زیرزمینی با ارزشی را تشکیل داده است. شکستگی‌ها اعم از درزه‌ها و گسل‌ها، با ایجاد تخلخل ثانویه و افزایش تراوایی در سازندهای سخت و ماسه‌سنگی، باعث تشکیل مخازن آب زیرزمینی در آنها می‌شوند و این مسئله سازندهای ماسه‌سنگی را به منابع با ارزشی تبدیل کرده است (Bashar and Tellam, 2011; Bertolo et al., 2011; Zhang and Hiscock, 2011; Goren et al., 2012).

سازند گچساران نیز در منطقه مورد مطالعه مساحت زیادی دارد و پس از سازند آجاجاری دارای بیشترین رخنمون در منطقه است. این سازند به صورت تناوبی از انیدریت، مارن، آهک و نمک در منطقه مشاهده می‌شود. انحلال‌پذیری زیاد این سازند باعث تغییرات هیدروشیمیایی زیادی در آب زیرزمینی منطقه (چشمه‌ها) شده است. محل ظهور چشمه‌ها از نوع تماسی - درز و شکافی است و بنابراین سامانه زهکشی آبخوان در این منطقه، از نوع



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه



شکل ۳- شکستگی‌های ایجاد شده در سازند آغاچاری



شکل ۲- گسل ایجاد شده در سازند آغاچاری

۳- روش مطالعه

انتخابی در جدول ۱ نشان داده شده است.

در اولین گام، با محاسبه درصد خطای موازنه یونی (رابطه زیر) و رسم نمودار موازنه یون در نرم افزار AqQa، مشخص شد که اختلاف میان کاتیون‌ها و آنیون‌ها برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/l) در بیشتر نمونه‌ها (۸۸/۸۹ درصد) کمتر از مقدار استاندارد تعیین شده (۵ درصد) است (۵۸-۱/۲۷۰ درصد) (بجز نمونه‌های چشمه‌های نم‌نمی (SP₈=27.82%) و بابا زاهد (SP₁₇=10.82%)). موازنه یونی نشان‌دهنده درستی آزمایش شیمیایی است (شکل ۴) (Matthess, 1982).

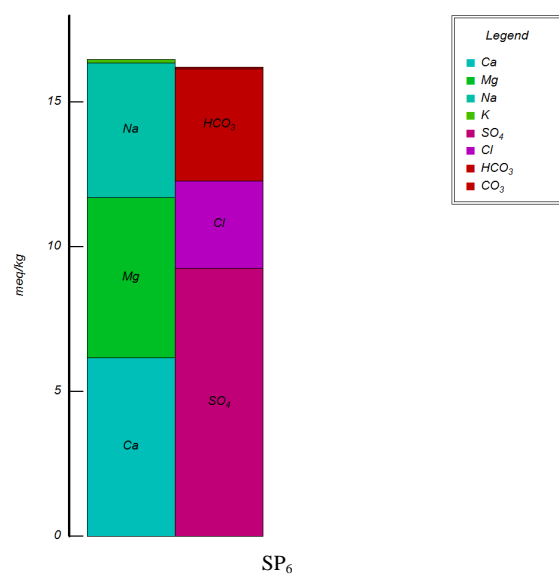
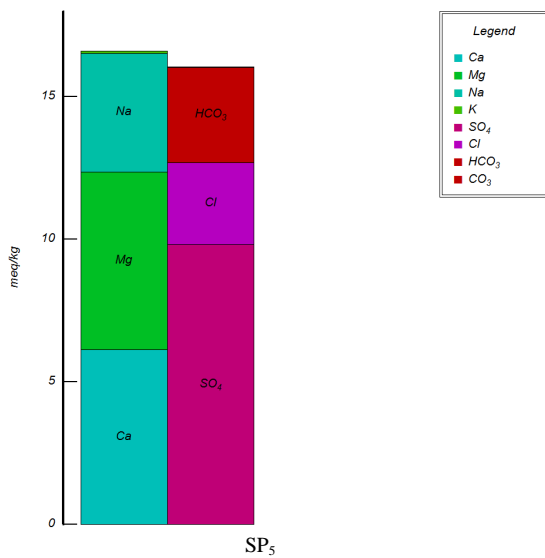
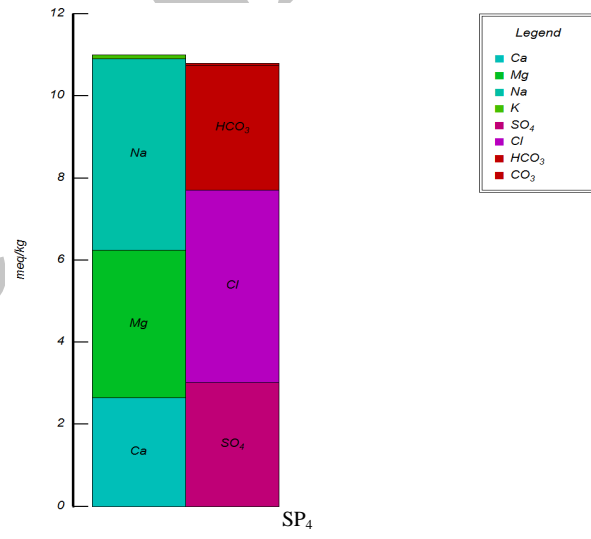
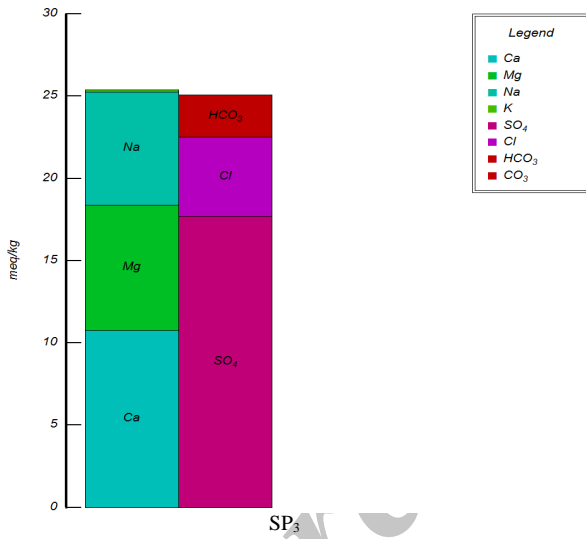
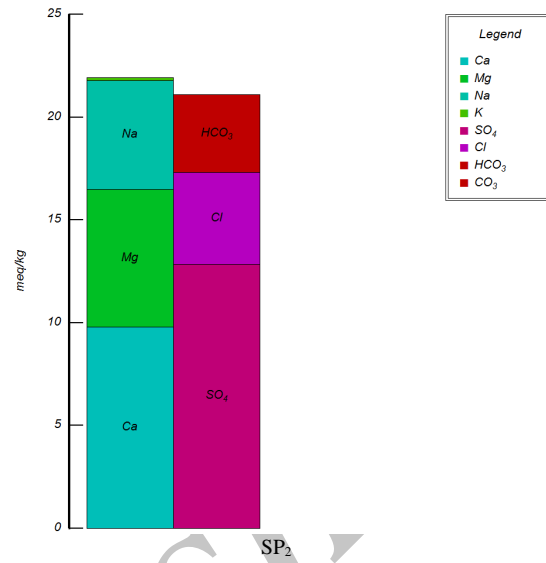
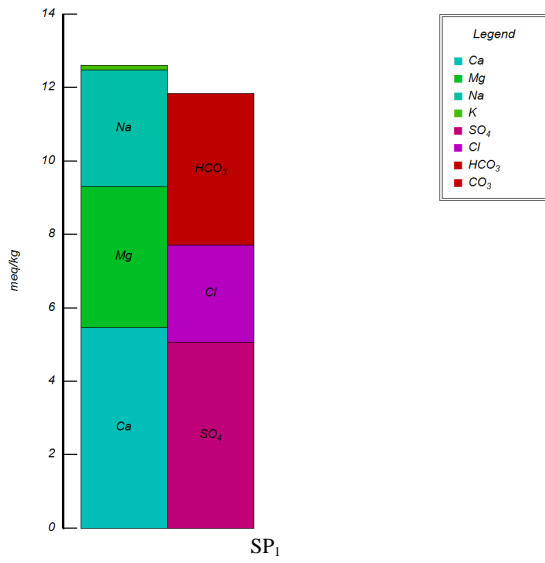
معادله ۱:
$$\text{معاذله ۱: } \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100 = \text{درصد خطای موازنه یونی}$$

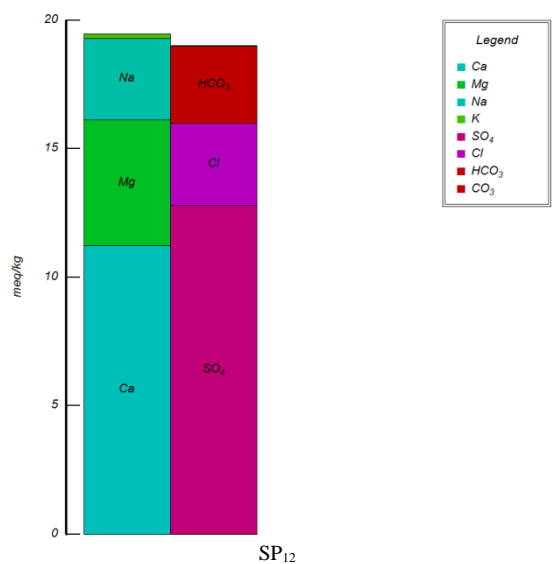
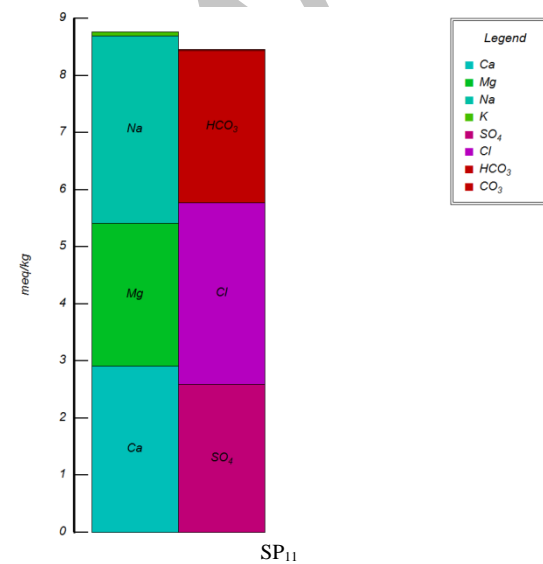
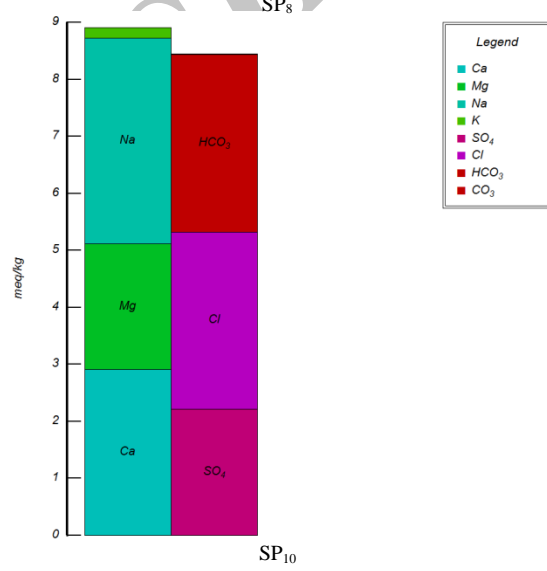
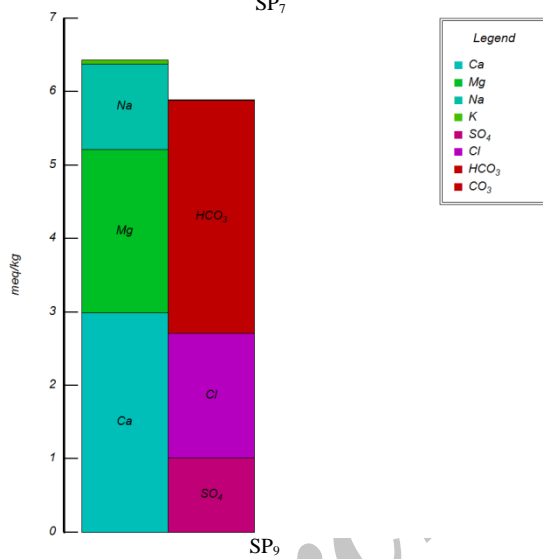
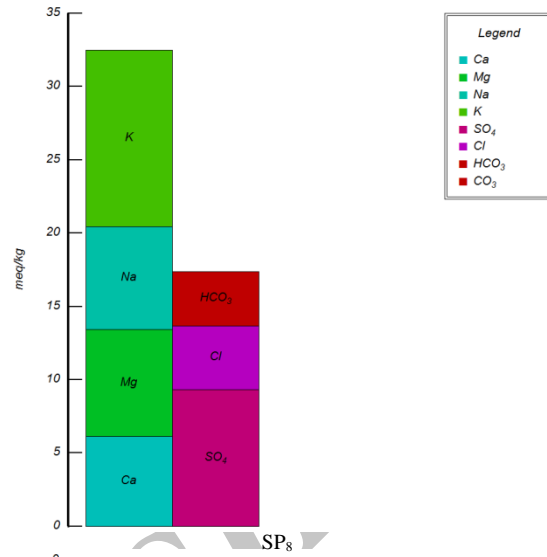
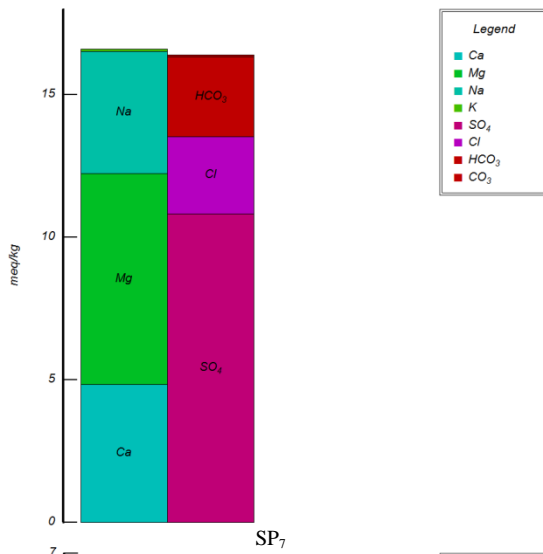
سپس توزیع و گسترش پارامترهای شیمیایی نمونه‌های آب منطقه، توسط نرم‌افزار Arc GIS بررسی شده، سپس توسط نرم‌افزار Rock Ware Aq.Qa و AquaChem کیفیت آب زیرزمینی منطقه مشخص و شاخص اشباع نمونه‌های آب منطقه نسبت به برخی از کانی‌ها با استفاده از کد رایانه‌ای PHREEQC محاسبه شده است.

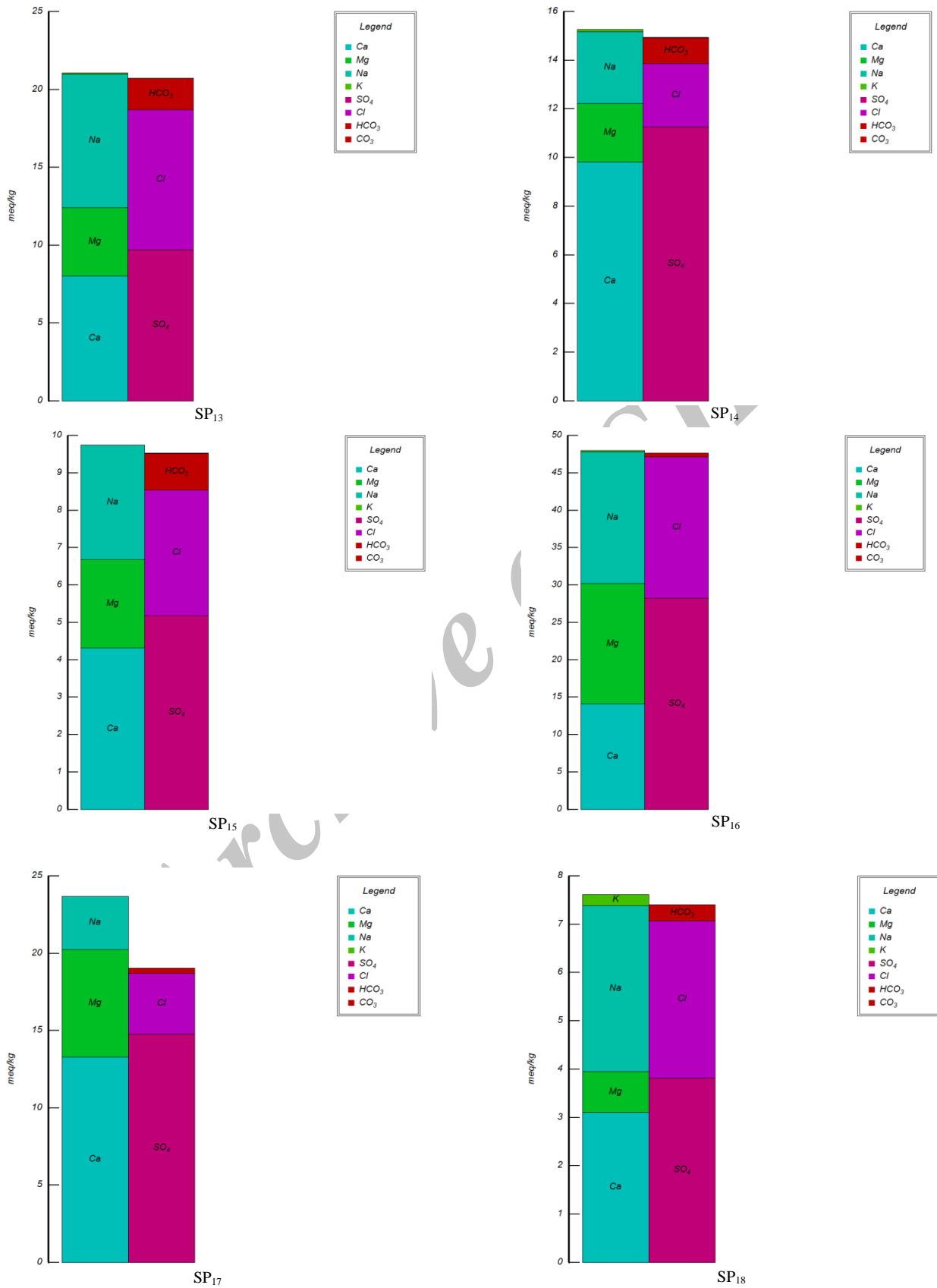
در ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی بررسی شده است. از آنجا که ویژگی هیدروشیمیایی یک منطقه ارتباط نزدیکی با ویژگی سازندهای منطقه دارد، تاثیر سازندهای منطقه بر روی کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد بررسی قرار گرفت و از چشمه‌های منطقه در فصل پر آبی نمونه‌برداری انجام شد. اندازه‌گیری برخی پارامترهای آب همچون دما، Eh و pH در محل ظهور چشمه‌ها انجام شد. سپس نمونه‌های جمع‌آوری شده به آزمایشگاه شیمی دانشگاه مسجد سلیمان منتقل شد و در آنجا براساس روش‌های استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت محیط آمریکا (APHA, 2005) تجزیه شده و کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در آب اندازه‌گیری شد. بر این اساس، غلظت یون‌های سدیم (Na⁺) و پتاسیم (K⁺) از طریق نورسنج شعله‌ای و کلسیم (Ca²⁺)، منیزیم (Mg²⁺)، بی‌کربنات (HCO₃⁻) و کلرید (Cl⁻) به روش تیتراسیون و سولفات (SO₄²⁺) به روش رنگ‌سنجی تعیین شد. نتایج تجزیه نمونه‌های

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان

نام چشمه	pH	EC	TDS	T	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁺	Cl ⁻
چشمه علی (SP ₁)	7.2	1102	771	26.6	5.46	3.83	3.16	0.13	4.68	5.05	2.64
نصیرآباد (SP ₂)	7.1	1981	1486	26.5	9.78	6.66	5.29	0.15	4.4	12.81	4.46
پیر (SP ₃)	7.9	2196	1647	26	10.73	7.63	6.85	0.12	2.64	17.68	4.78
چشمه ایناق (SP ₄)	8.2	863	552	25.5	2.64	3.59	4.65	0.1	3.09	3.01	4.68
دره گوری (SP ₅)	7.3	1464	1098	26.5	6.12	6.24	4.17	0.07	3.7	9.81	2.88
علیشاه (SP ₆)	8	1394	1045	26	6.16	5.52	4.65	0.11	3.98	9.25	3
چم آسیاب (SP ₇)	8.3	1244	933	28.5	4.82	7.38	4.29	0.08	2.87	10.8	2.69
نم‌نمی (SP ₈)	6.9	2044	1430	28	6.1	7.3	7.01	12	4.65	9.31	4.34
توگانه (SP ₉)	7.3	634	380	27	2.98	2.22	1.16	0.06	3.52	1.01	1.69
هفت شهیدان (SP ₁₀)	7.4	883	547	27	2.9	2.2	3.6	0.19	3.38	2.21	3.1
جاجوی بالا (SP ₁₁)	7.7	912	547	29	2.9	2.5	3.27	0.07	2.78	2.58	3.18
سلیران (SP ₁₂)	7.4	1965	1375	26	11.2	4.9	3.16	0.17	3.24	12.77	3.2
دره پارباب (SP ₁₃)	7.5	2124	1486	27.5	8	4.4	8.55	0.09	2.14	9.69	8.98
جاجوی پایین (SP ₁₄)	7.3	1553	1081	30	9.8	2.4	2.94	0.09	1.17	11.23	2.61
علمداری (SP ₁₅)	7.9	996	697	32	4.3	2.37	3.05	0.01	1.01	5.17	3.35
تلخاب تاج الدین (SP ₁₆)	7	4564	3194	23	14.1	16.1	17.6	0.18	0.59	28.23	18.9
بابا زاهد (SP ₁₇)	7.5	1804	1262	29.5	13.27	6.94	3.43	0.01	0.36	14.74	3.93
عنبر (SP ₁₈)	7.9	666	466	30	3.1	0.84	3.43	0.23	0.35	3.81	3.24





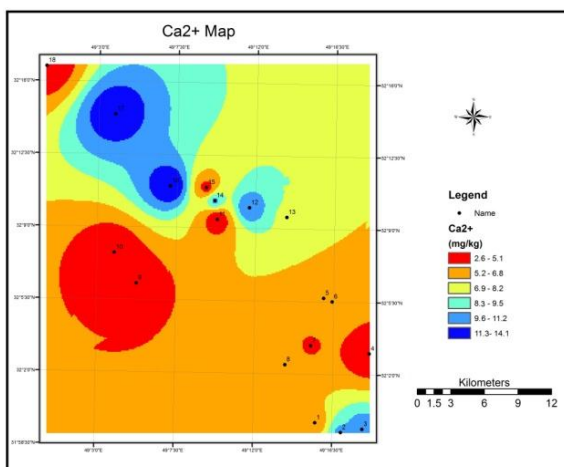


شکل ۴- نمودار موازنه یونی

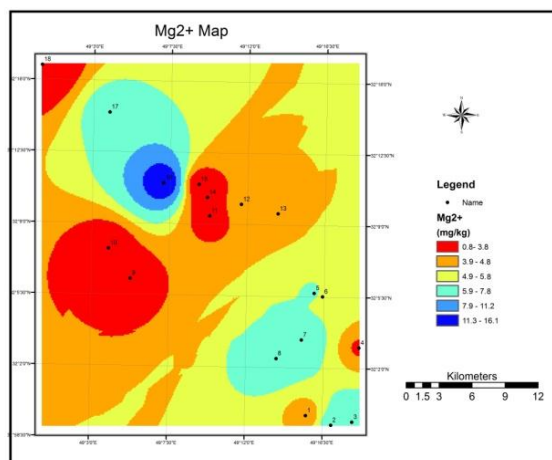
۴- بحث

است تحت تاثیر شرایط زمین‌شناسی منطقه، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در کیفیت آب آنها ایجاد شود. کیفیت آب زیرزمینی در ماسه‌سنگ‌ها به مواد تشکیل‌دهنده آنها بستگی دارد (Matthess, 1982). در شکل ۵ گسترش و توزیع پارامترهای ژئوشیمیایی اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه، مشخص شده است.

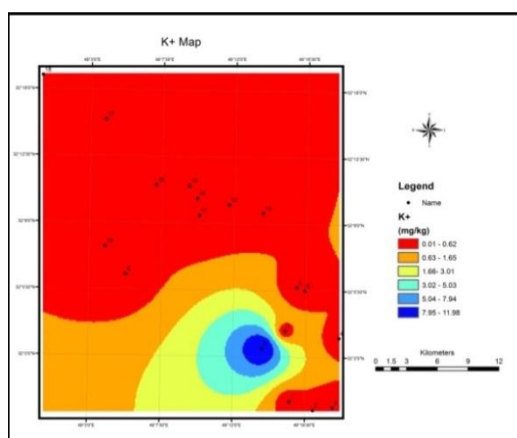
در مطالعات کیفی منابع آب با اهداف مختلف، تعیین مقادیر و نوع عناصر محلول در آب، اهمیت خاصی دارد. کیفیت آب زیرزمینی در ماسه-سنگ‌ها به عوامل متعددی بستگی دارد، در شرایط مساعد آبخوان‌های ماسه‌سنگی دارای کیفیت مناسب و نمک‌های نسبتاً کمی هستند، اما ممکن



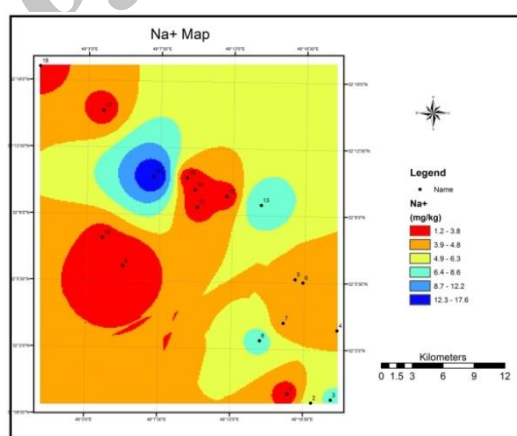
الف



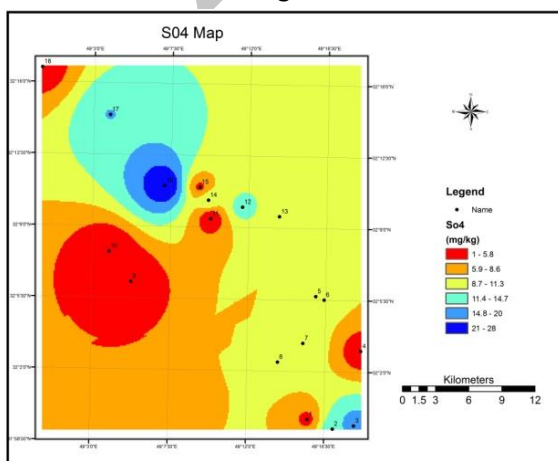
ب



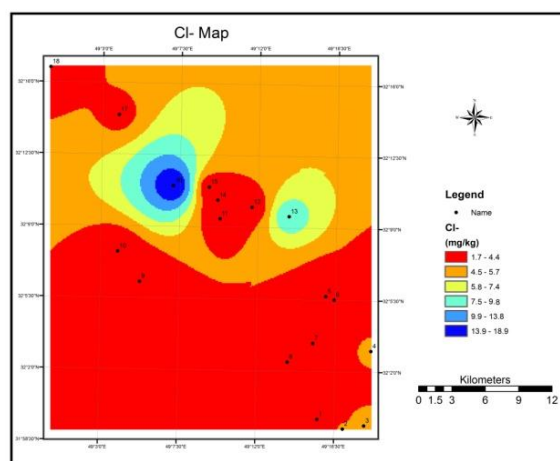
ج



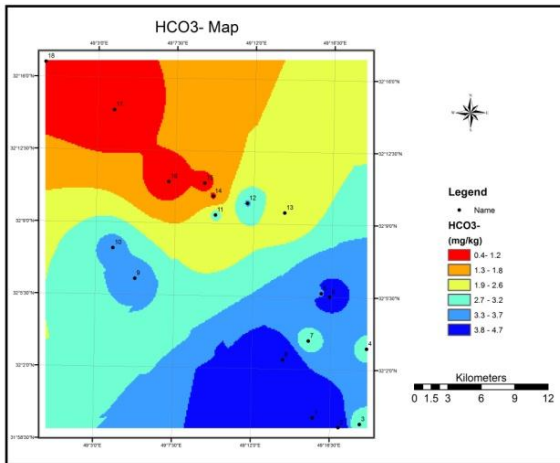
د



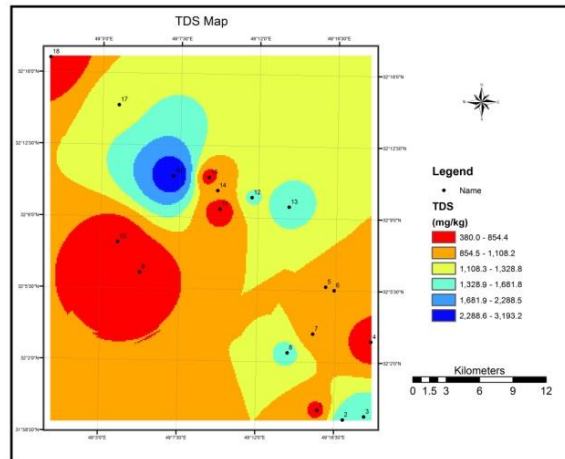
ه



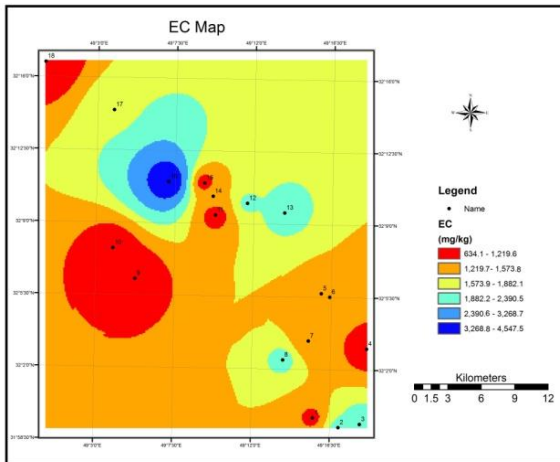
و



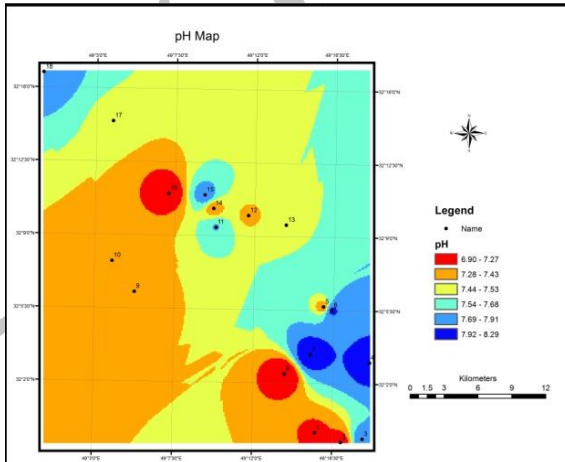
ز



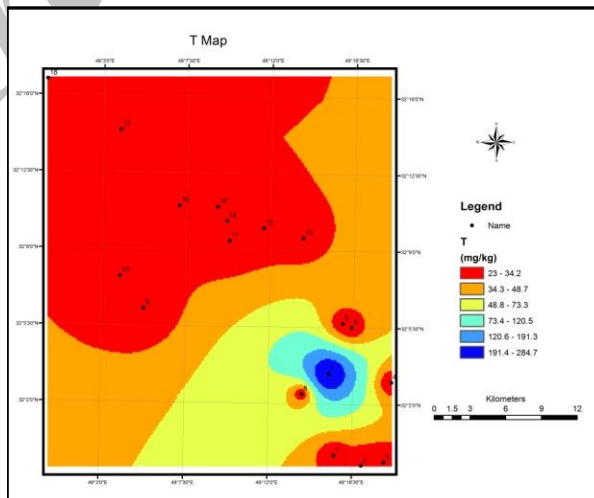
ح



ط



س



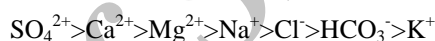
ک

شکل ۵- نقشه هم‌مقدار الف (Ca، ب) Mg، ج) K، د) Na، ه) SO_4 و Cl^- (ز) HCO_3^- ، ح) TDS، ط) EC، ی) pH و ک) دما

نمونه آب‌های زیرزمینی بخش شمال غربی منطقه دارای بیشترین مقدار بوده، به گونه‌ای که غلظت یون‌های Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، SO_4^{2-} ، Cl^- و مقدار EC و TDS در نمونه‌های واقع در این منطقه (چشمه تلخاب تاج‌الدین SP16) دارای بیشترین مقدار است و این نمونه‌ها در بخش شمال شرقی منطقه قرار گرفته است، که این مطلب موجب شده است که شوری و سختی آب در این منطقه افزایش یابد. اما غلظت یون‌های Na^+ ، SO_4^{2-} ، Cl^- و مقدار EC و TDS در نمونه‌های بخش جنوب غربی (چشمه توگاه SP9)، کاهش یافته و علت آن افزایش ضخامت بخش ماسه‌سنگی سازند آجاجاری است (شکل ۵).

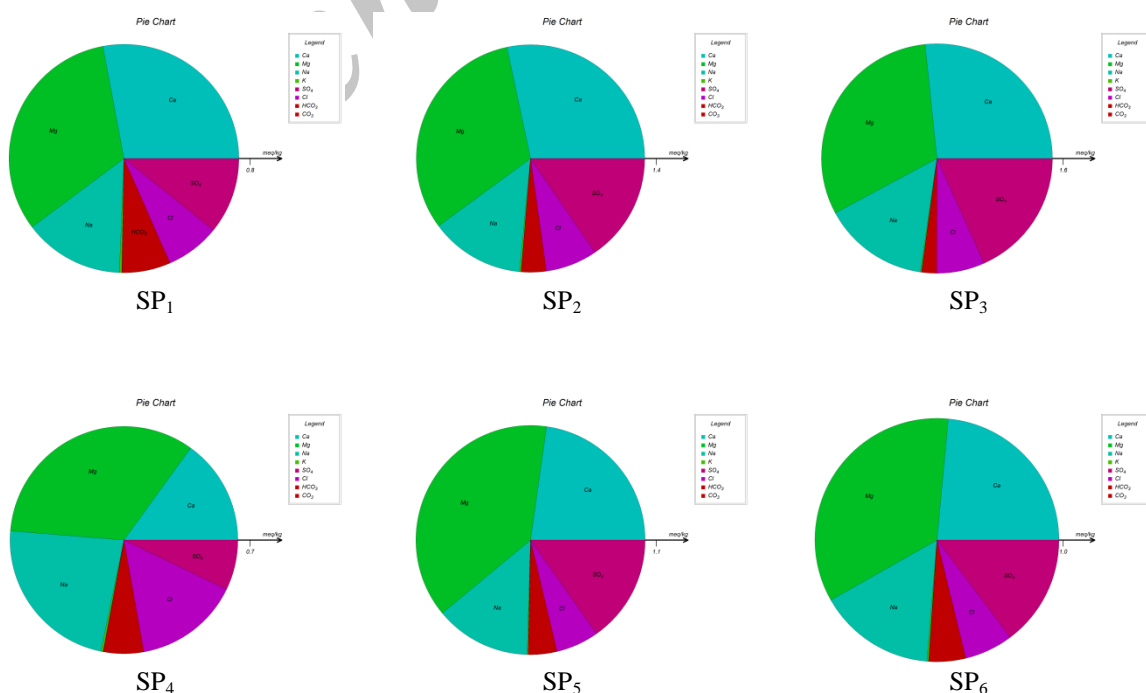
توانایی نشان‌دادن نتایج تجزیه شیمیایی روی یک نقشه یا نمودار و تعیین روند تغییرات شیمیایی، دو مزیت مهم این روش به شمار می‌روند. یکی از نمودارهایی که برای بررسی جداگانه ترکیب شیمیایی نمونه‌ها به کار برده می‌شود، نمودار دایره‌ای است که برای نمونه‌های انتخابی در نظر گرفته شده است (Fetter, 1988). شکل ۶ نمودار دایره‌ای را برای نمونه‌های مورد مطالعه در منطقه نشان می‌دهد. شعاع دایره با مقدار TDS نمونه نسبت مستقیم دارد. مهم‌ترین مزیت این نمودارها این است که می‌توان در یک نگاه ضمن پی‌بردن به ترکیب شیمیایی آب در یک نقطه از منطقه و مقایسه غلظت عناصر در آن نقطه، به مقایسه غلظت عناصر در نقاط مختلف منطقه پرداخت. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود بزرگ‌ترین کوچک‌ترین دایره به ترتیب مربوط به چشمه‌های تلخاب تاج‌الدین (SP16) و توگاه (SP9) است.

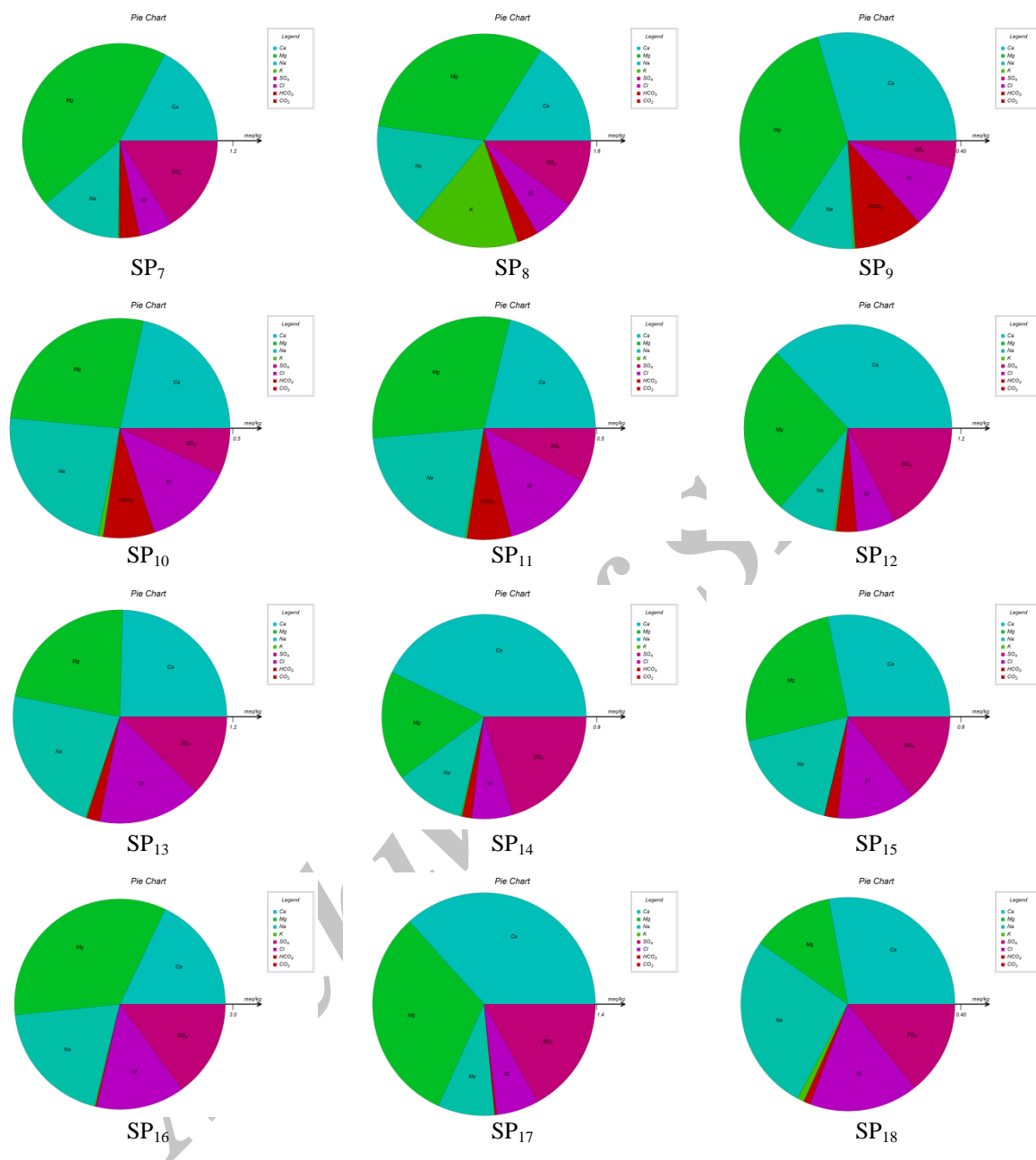
رسانایی الکتریکی (EC) تابعی از بار و غلظت یون‌ها در محلول و حرکت آنها، تحت تأثیر پتانسیل به کار برده شده است (Todd and Mays, 2005). نتایج حاصل از تجزیه نمونه آب چشمه‌های انتخابی (۱۸ نمونه) نشان می‌دهد که میزان رسانایی الکتریکی (EC) بین ۴۵۶۴-۶۳۴ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر بوده و مقدار آن در بخش شمال غربی منطقه مورد مطالعه، به‌ویژه چشمه تلخاب تاج‌الدین (SP16) بالاست. علت این امر این است که منطقه تلخاب تاج‌الدین در دشت آبرفتی قرار دارد و شیب توپوگرافی بخش شمال غربی محدوده مورد مطالعه، به آن سمت است و سبب می‌شود که پارامتر رسانایی الکتریکی به آن چشمه افزایش یابد. همچنین چشمه توگاه (SP9) کمترین میزان رسانایی الکتریکی را دارد، که علت آن، افزایش ضخامت بخش ماسه‌سنگی نسبت به بخش ماری در سازند آجاجاری و نیز تأثیر کمتر سازند گچساران است (شکل ۵-ط). بررسی مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌های آب‌های زیرزمینی منطقه نشان می‌دهد که شرایط آنیونی و کاتیونی زیر حاکم است:



گسترش رگه‌های ژیبس و انیدریت موجود در لایه‌های ماری سازند آجاجاری و نیز رخنمون وسیع سازند تبخیری گچساران در منطقه و انحلال این رگه‌ها و توالی‌ها (کانی‌های سولفاتی)، منشا اصلی یون‌های SO_4^{2-} و Ca^{2+} در آب‌های زیرزمینی منطقه بوده و غلظت بالای یون Cl^- در آب‌های زیرزمینی منطقه به عنوان آنیون اصلی ناشی از فرسایش و هوازدگی کانی‌های تبخیری (هالیت) است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که غلظت بیشتر آنیون و کاتیون‌های موجود در





شکل ۶- نمودار دایره‌ای برای نمونه‌های مورد مطالعه در منطقه مسجد سلیمان

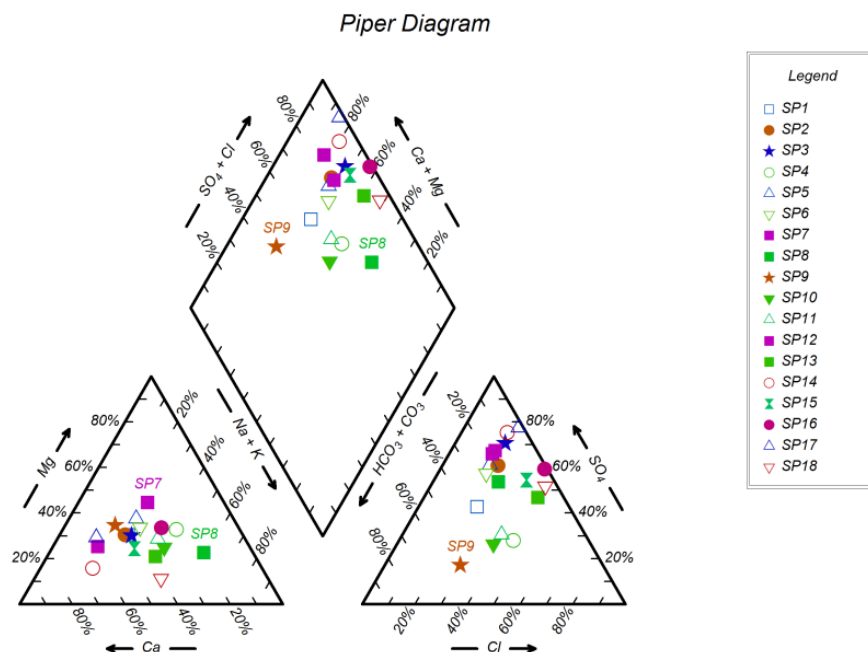
با توجه به این که تیپ غالب آب‌های منطقه Ca, Mg-SO_4 است در نتیجه این آب‌ها دارای سختی دائم هستند و در آنها غلظت کاتیون‌های قلیایی خاکی (Ca^{2+} و Mg^{2+}) بیشتر از قلیایی‌ها (Na^+ و K^+) بوده و آنیون‌های اسیدهای ضعیف (HCO_3^-) کمتر از آنیون‌های اسیدهای قوی (SO_4^{2-}) است.

همچنین شکل ۸ نمودار سه‌تایی $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ محدوده مجزای قلیایی، اسیدی و آب‌های کلردار را نشان می‌دهد (Giggenbach, 1988). داده‌های پیاده‌شده بر روی این نمودار نشان‌دهنده آن است که بیشتر آب‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده اسیدی قرار دارند و فقط آب

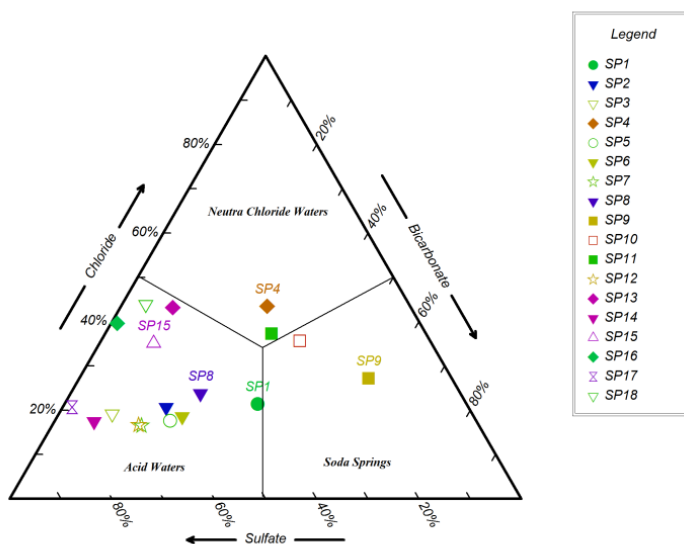
برای ارزیابی ژئوشیمیایی سامانه جریان آب زیرزمینی (تیپ و رخساره)، از نمودار پایپر (Piper, 1944) به طور گسترده استفاده می‌شود. بر این اساس نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه از نوع سولفات کلسیم (Ca-SO_4) waters) و بیانگر و شاخص آب‌های زیرزمینی غنی از کانی ژئوپس هستند. همچنین پنج تیپ هیدروشیمیایی مختلف شامل Ca-SO_4 , Mg-SO_4 , Ca-HCO_3 و Na-Cl, Na-SO_4 در منطقه ایجاد شده است (شکل ۷). انحلال رگه‌های ژئوپس و انیدریت موجود در لایه‌های ماری سازند آغاچاری و نیز رخنمون وسیع سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه سبب شده است که تیپ آب چشمه‌های موجود در منطقه از نوع سولفاتی باشد.

عمدتاً تحت تاثیر توالی سولفاتی همانند ژپیس و انیدریت موجود در سازند آغاچاری و گچساران قرار گرفته است.

چشمه SP10 و SP9 در محدوده چشمه‌های قلیایی و نیز آب دو چشمه SP11 و SP4 در محدوده آب‌های کلردار قرار می‌گیرند که بیانگر تاثیر سنگ‌شناسی منطقه بر کیفیت آب چشمه‌های منطقه است، به گونه‌ای که



Ternary Diagram

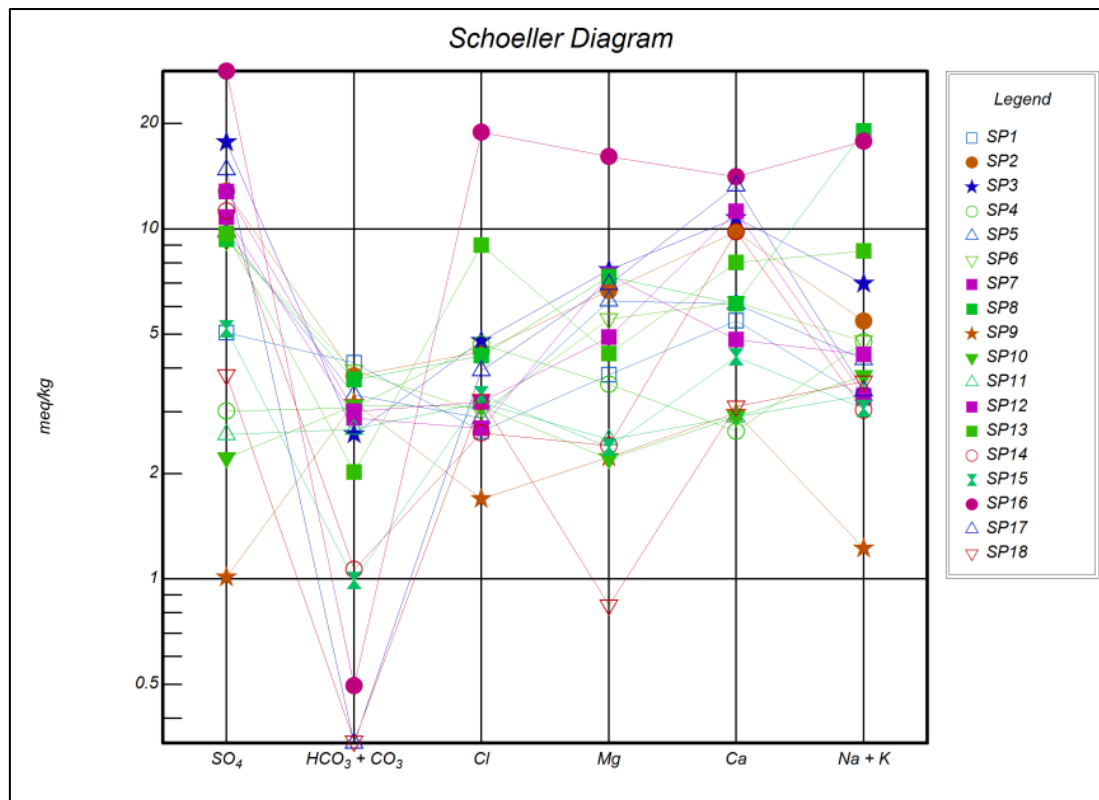


متوسط، نامناسب، به طور کامل نامطبوع و غیر قابل شرب تقسیم می‌شود (Schoeller, 1967). در منطقه مورد مطالعه با توجه به نتایج تجزیه

نمودار شولر یک روش ترسیمی برای رده‌بندی کیفیت آب شرب است و در این نمودار آب‌های مورد بررسی به ۶ گروه شامل خوب، قابل قبول،

نمونه‌های آب چشمه‌های چشمه علی (SP₁) و علمداری (SP₁₅) در رده ۲ و از نظر شرب قابل قبول هستند. بجز نمونه آب چشمه تلخاب تاج‌الدین (SP₁₆) که برای شرب نامناسب است، دیگر نمونه‌های آب منطقه از نظر شرب در رده متوسط قرار می‌گیرند.

نمونه‌های برداشت شده و بررسی آنها در نمودار شولر (شکل ۹)، آب چشمه‌های توگاه (SP₉)، عنبر (SP₁₈)، هفت شهیدان (SP₁₀)، جاجوی بالا (SP₁₁) و ایناق (SP₄) نسبت به بقیه چشمه‌ها از کیفیت بهتری در منطقه برخوردار است و از این میان نیز چشمه‌های توگاه و عنبر به دلیل داشتن سولفات، سدیم و کلر کمتر کیفیت مناسب‌تری دارند. همچنین

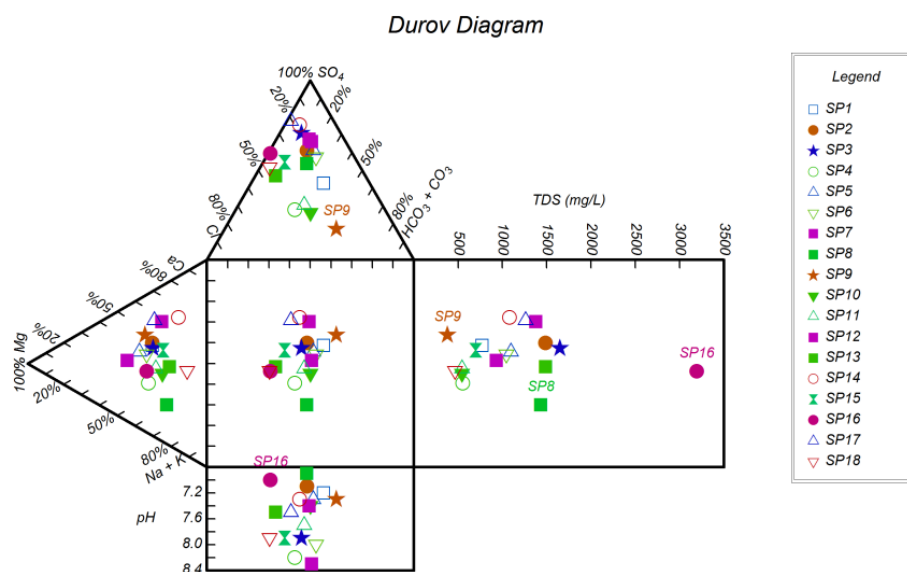


شکل ۹- نمودار شولر برای چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان

درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها به میلی‌اکی‌والان رسم می‌شوند. از مزایای نمودار دورو نسبت به نمودار پایپر، نشان دادن تیپ‌های مختلف آب و فرایندهای هیدروشیمیایی مانند تبادل یونی و آمیختگی آب‌ها با کیفیت‌های متفاوت است (Singhal and Gupta, 1999). نمودار دورو بیانگر آن است که ترکیب آب چشمه‌های منطقه از نوع تیپ سولفاتی با کاتیون غالب منیزیم و کلسیم (Ca, Mg-SO₄) است، که این مطلب بیانگر تاثیر رگه‌های ژئیس و انیدریت موجود در سازند آغاچاری و نیز سازند گچساران است، به گونه‌ای که ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه خنثی تا نیمه‌قلیایی غیر کربناتی (Mg, Ca-SO₄) است. همچنین این نمودار بیانگر آن است که تغذیه چشمه‌ها عمدتاً از یک منبع واحد انجام می‌گیرد (سازند آغاچاری). این نمودار مشخص می‌کند که چرخه تکامل یونی آب-های زیرزمینی تبعیت بیشتری از چرخه تکامل آنیونی نسبت به چرخه کاتیونی دارد. این روند را به روشنی می‌توان با افزایش TDS نمونه‌های آب چشمه‌ها مشاهده کرد.

نمودار Durov یک روش برای ارائه ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی مشابه نمودار سه‌تایی است (Chilingar, 1956; Zaporozec, 1972). نمودار دورو شامل پنج منطقه، دو مثلثی و سه مستطیلی است (شکل ۱۰). هر تجزیه و تحلیل شیمیایی به صورت پنج نقطه روی نمودار رسم می‌شود. در این نمودار درصد نسبی کاتیون‌ها و آنیون‌های مهم به ترتیب بر روی مثلث سمت چپ و بالا نشان داده می‌شود. این مثلث‌ها شبیه نمودارهای سه‌تایی هستند. دو ویژگی دیگر در دو مستطیل بیرونی رسم می‌شود. این دو ویژگی می‌تواند یکی از موارد زیر که شامل کل مواد جامد محلول، رسانایی الکتریکی، PH، سختی، و کل کربن معدنی محلول انتخاب شود. مربع مرکزی در درجه اول به عنوان یک منطقه انتقالی برای اتصال چهار محدوده بیرونی عمل می‌کند. برتری اصلی نمودار Durov در این است که در آن یک تصویر تک از ویژگی‌های بصری هشت یون اصلی و دو ویژگی آب زیرزمینی منطقه فراهم می‌کند (Alley, 1993).

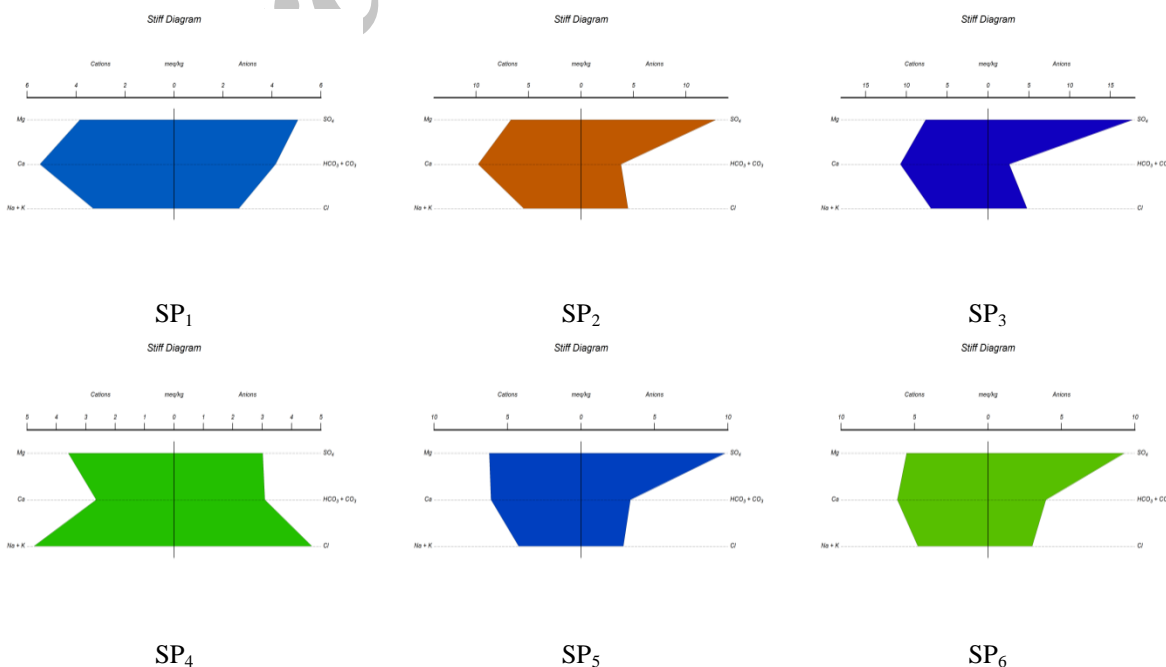
در این مطالعه به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج از نمودار دورو استفاده شد (Lloyd and Heathcote, 1985). این نمودار براساس مجموع

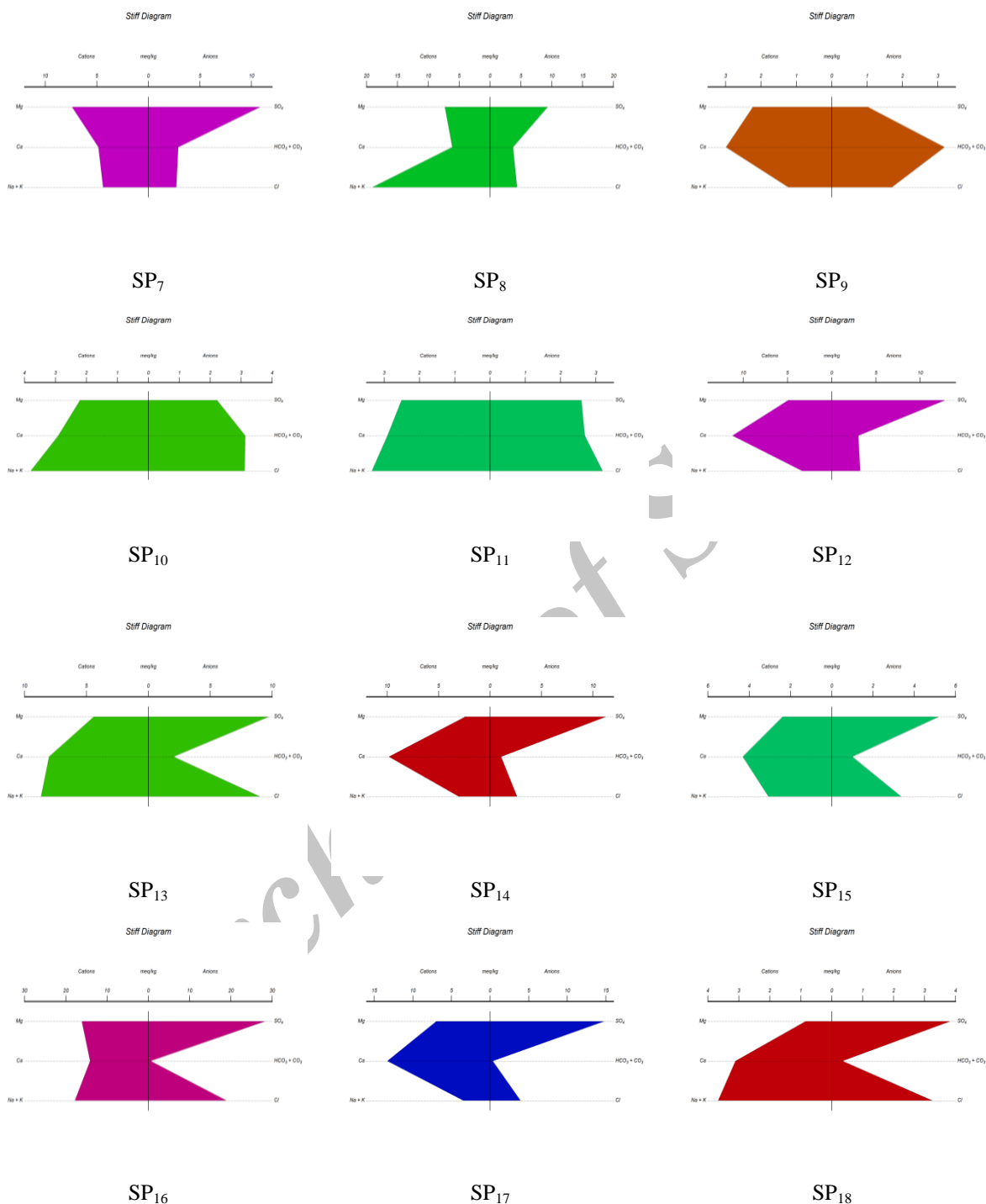


شکل ۱۰- نمودار دورو برای چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان

(SP₁₁) بی‌کربنات کلسیم (SP₉) و بی‌کربنات سدیم (SP₁₀) قرار می‌گیرند. همانطوریکه از این نمودارها مشخص است عمده ترکیب آب‌های زیرزمینی منطقه از نوع سولفاتی، به‌ویژه سولفات کلسیم است، که این خود بیانگر تاثیر توالی‌های ژئوس و انیدریت موجود در سازند آجاجاری و نیز سازند گچساران است. این مطلب نیز توسط شرایط آنیونی و کاتیونی حاکم بر منطقه مشخص شده است.

نمودارهای استیف می‌توانند برای مقایسه نمونه‌ها برای به دست آوردن منشا آنها راه حلی مفید و سریع باشند، به گونه‌ای که در این نمودارها اختلاف بین نتایج شیمیایی متفاوت به خوبی نشان داده می‌شود (Hounslow, 1995). با توجه به نمودار استیف (شکل ۱۱) آب‌های زیرزمینی منطقه به‌ترتیب فراوانی در گروه‌های سولفات کلسیم (SP₁, SP₂, SP₃, SP₆, SP₁₂, SP₁₄, SP₁₅, SP₁₇)، سولفات سدیم (SP₈, SP₁₃, SP₁₆, SP₁₈)، سولفات منیزیم (SP₅, SP₇)، کلرید سدیم (SP₄)

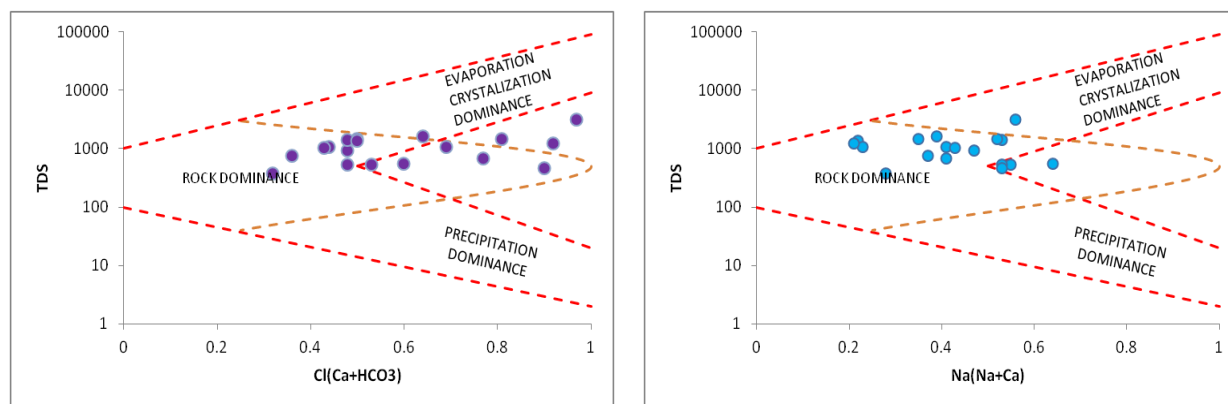




شکل ۱۱- نمودار استیف برای چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان

(Dominance) قرار می‌گیرند که این امر نشان‌دهنده تاثیر متقابل بین شیمی سنگ و شیمی آب‌های حاصل از بارش است که به زیر زمین نفوذ کرده‌اند. از این میان تعداد کمی از نمونه‌ها در ناحیه‌ای که فرایند تبخیر و تبلور غالب است (Evaporation, Crystallization Dominance) قرار می‌گیرند.

به منظور بررسی تاثیر سنگ‌شناسی سنگ‌های در برگزیده بر کیفیت آب‌ها، تعیین سازوکار حاکم بر جریان آب زیرزمینی و ترکیب یون‌های اصلی موجود در آب زیرزمینی از نمودار گیبس استفاده شد (Subba Rao, 2002). براساس این نمودار (شکل ۱۲) نمونه آب‌های چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان عمدتاً در ناحیه‌ای که فرایند سنگی غالب است (Rock



شکل ۱۲- موقعیت نمونه آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بر روی نمودار گیبس

نسبت‌های یونی، معرف‌های مناسبی برای بررسی شیمی منابع آب زیرزمینی هستند و استفاده از آنها روش مناسبی برای تعیین منشأ نمک است. در پیدایش ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، این نسبت‌ها متأثر از ترکیب شیمیایی کانی‌های محلول در آب بوده و مقدار کانی انحلال‌یافته در درجه بعدی اهمیت قرار دارد (Howard et al., 1996). برای مثال؛ نسبت‌های Br/Cl و Na/Cl برای تفکیک شوری طبیعی ناشی از انحلال طبیعی هالیت، از آب‌های شور ژرف مفید هستند (Richter and Kreitler, 1986). و یا؛ در شوری حاصل از انحلال هالیت، نسبت Na/Cl بین $0.47-0.65$ متغیر است (Gogel, 1981). و نیز؛ نسبت‌های Cl/Br ، Na/K و Cl/SO_4 در آب‌های متأثر از تبخیر، کمتر از آب‌های شور ژرف هستند.

یکی از روش‌های تفسیر فرایندهای موثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، تعیین رابطه بین پارامترهای حاصل از تجزیه نمونه‌های آب از طریق رسم آنها بر روی نمودارهای دو متغیره‌ای است که به نمودار ترکیبی معروفند. با توجه به نحوه آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان فرایندهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی را تعیین کرد. از نمودارهای ترکیبی مختلفی برای شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی موثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود (Horward and Mullings, 1996; Stossel, 1997; Stober and Bucher, 1999; Timms et al., 2000; Marie and Vengosh, 2001). برای بررسی منشأ مواد محلول در آب زیرزمینی و واکنش‌های موجود در آبخوان، از نسبت‌های یونی استفاده شده است (Hounslow, 1995) (جدول‌های ۳ و ۴). این روش معمولاً برای داده‌هایی با $pH > 5$ استفاده می‌شود، چرا که $pH < 5$ باعث متلاشی شدن کانی‌های رسی شده و بر مقادیر یون‌ها تأثیر می‌گذارد (Garrels and Mackenzie, 1967).

با توجه به تأثیر سنگ‌شناسی سازندهای مختلف زمین‌شناسی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه، شاخص اشباع نمونه آب‌های زیرزمینی برای کانی‌های کلسیت، ژپس، انیدریت، هالیت و گاز CO_2 مورد بررسی قرار گرفت که برای این منظور شاخص اشباع (Saturation index) تمامی نمونه‌های آب‌های زیرزمینی از طریق کد رایانه‌ای PHREEQC محاسبه شده است (جدول ۲).

شاخص اشباع برای کانی‌های مختلف به منظور ارزیابی میزان تعادل بین آب و کانی‌ها استفاده می‌شود که تغییر در حالت اشباع آب نسبت به کانی‌های مختلف، واکنش‌های ژئوشیمیایی کنترل‌کننده شیمی آب را مشخص می‌نماید (Langmuir, 1997; Jalali, 2006). در صورتیکه شاخص اشباع (SI) کمتر از صفر باشد، آب زیر اشباع است، در صورتی که SI برابر با صفر باشد، ماده و آب در تعادل با یکدیگرند و در اگر SI بیش از صفر و کمتر از یک باشد، آب اشباع است، و در صورتی که SI بیشتر از یک باشد، آب فوق اشباع است (Deutsch, 1997).

نمونه آب چشمه‌های نم‌نی (SP_8)، جاجوی پایین (SP_{14})، تلخاب تاج‌الدین (SP_{16})، بابا زاهد (SP_{17}) و عنبر (SP_{18}) نسبت به کانی کلسیت منفی هستند و دیگر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه نسبت به کلسیت مثبت هستند. همچنین به رغم بالا بودن غلظت سولفات و کلرید در آب زیرزمینی منطقه، شاخص اشباع نمونه‌های آب منطقه نسبت به کانی‌های ژپس، انیدریت و هالیت منفی است. این موضوع بیانگر این است که آب زیرزمینی منطقه نسبت به این کانی‌ها در حالت زیر اشباع قرار دارد و این کانی‌ها می‌توانند در آب زیرزمینی منطقه بیشتر حل شوند و شوری آب زیرزمینی منطقه را افزایش دهند. همچنین همه نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، نسبت به گاز CO_2 زیر اشباع هستند و این امر بیانگر این است که میزان CO_2 بیشتری می‌تواند در آب زیرزمینی منطقه حل شود و قدرت انحلال در منطقه مورد مطالعه را افزایش یابد.

جدول ۲- مشخصات سختی، تیپ آب و درجه اشباع چشمه‌های مورد مطالعه در منطقه مسجد سلیمان

Spring	Hardness	Type	SI _{Calcite}	SI _{Anhydrite}	SI _{Gypsum}	SI _{Halite}	SI _{CO2}
SP ₁	464.8	Mg-SO ₄	0.18	-1.43	-1.21	-6.78	-1.69
SP ₂	822.6	Mg-SO ₄	0.21	-0.94	-0.72	-6.36	-1.64
SP ₃	918.7	Mg-SO ₄	0.77	-0.81	-0.59	-6.22	-2.68
SP ₄	311.7	Mg-Cl	0.72	-1.9	-1.69	-6.36	-2.88
SP ₅	618.5	Mg-SO ₄	0.17	-1.18	-0.97	-6.64	-1.9
SP ₆	584.5	Mg-SO ₄	0.89	-1.2	-0.98	-6.57	-2.59
SP ₇	610.5	Mg-SO ₄	0.95	-1.25	-1.04	-6.66	-3.03
SP ₈	670.5	(Na+K)-SO ₄	-0.12	-1.27	-1.07	-6.09	-1.39
SP ₉	260.2	Mg-HCO ₃	0.03	-2.22	-2.01	-7.38	-1.89
SP ₁₀	255.2	Mg-Cl	0.06	-1.94	-1.73	-6.64	-2.01
SP ₁₁	270.2	Mg-Cl	0.3	-1.87	-1.67	-6.67	-2.39
SP ₁₂	805.6	Ca-SO ₄	0.45	-0.86	-0.65	-6.72	-2.07
SP ₁₃	620.5	Ca-Cl	0.26	-1.09	-0.88	-5.84	-2.34
SP ₁₄	610.5	Ca-SO ₄	-0.06	-0.9	-0.7	-6.84	-2.37
SP ₁₅	333.7	Ca-SO ₄	0.21	-1.44	-1.25	-6.59	-3.02
SP ₁₆	1511.2	Mg-SO ₄	-0.77	-0.66	-0.43	-5.25	-2.45
SP ₁₇	1011.3	Ca-SO ₄	-0.3	-0.76	-0.56	-6.61	-3.11
SP ₁₈	197.2	(Na+K)-Cl	-0.36	-1.63	-1.44	-6.64	-3.48

جدول ۳- نسبت‌های یونی در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

	HCO ₃ /Sum Anions	Cl/Sum Anions	(Ca+Mg)/SO ₄	Ca/(Ca+SO ₄)	Mg/(Ca+Mg)	Na/(Na+Cl)	(Na+K-Cl)/(Na+K-Cl+Ca)
SP ₁	0.64	0.36	1.84	0.52	0.41	0.54	0.11
SP ₂	0.5	0.5	1.28	0.43	0.41	0.54	0.09
SP ₃	0.36	0.64	1.04	0.38	0.42	0.59	0.17
SP ₄	0.4	0.6	2.07	0.47	0.58	0.5	0.03
SP ₅	0.56	0.44	1.26	0.38	0.5	0.59	0.18
SP ₆	0.57	0.43	1.26	0.4	0.47	0.61	0.22
SP ₇	0.52	0.48	1.13	0.31	0.6	0.61	0.26
SP ₈	0.52	0.48	1.44	0.4	0.54	0.62	0.71
SP ₉	0.68	0.32	5.15	0.75	0.43	0.41	-0.19
SP ₁₀	0.52	0.48	2.31	0.57	0.43	0.54	0.19
SP ₁₁	0.47	0.53	2.09	0.53	0.46	0.51	0.05
SP ₁₂	0.5	0.5	1.26	0.47	0.3	0.5	0.01
SP ₁₃	0.19	0.81	1.28	0.45	0.35	0.49	-0.04
SP ₁₄	0.31	0.69	1.09	0.47	0.2	0.53	0.04
SP ₁₅	0.23	0.77	1.29	0.45	0.36	0.48	-0.07
SP ₁₆	0.03	0.97	1.07	0.33	0.53	0.48	-0.09
SP ₁₇	0.08	0.92	1.37	0.47	0.34	0.47	-0.04
SP ₁₈	0.1	0.9	1.03	0.45	0.21	0.51	0.12

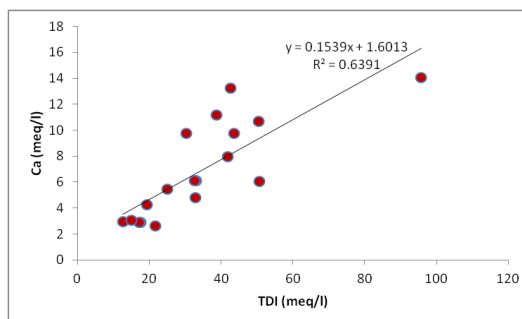
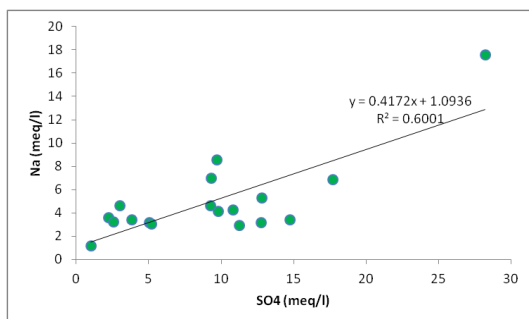
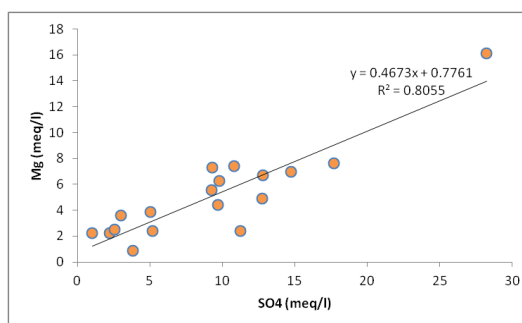
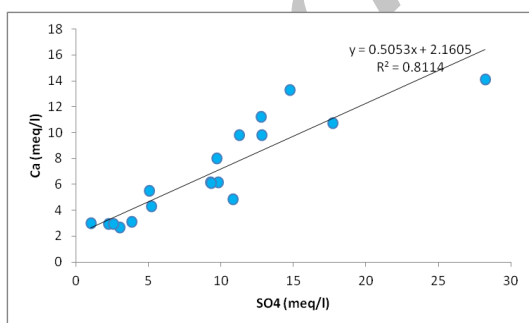
جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل نسبت‌های یونی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه

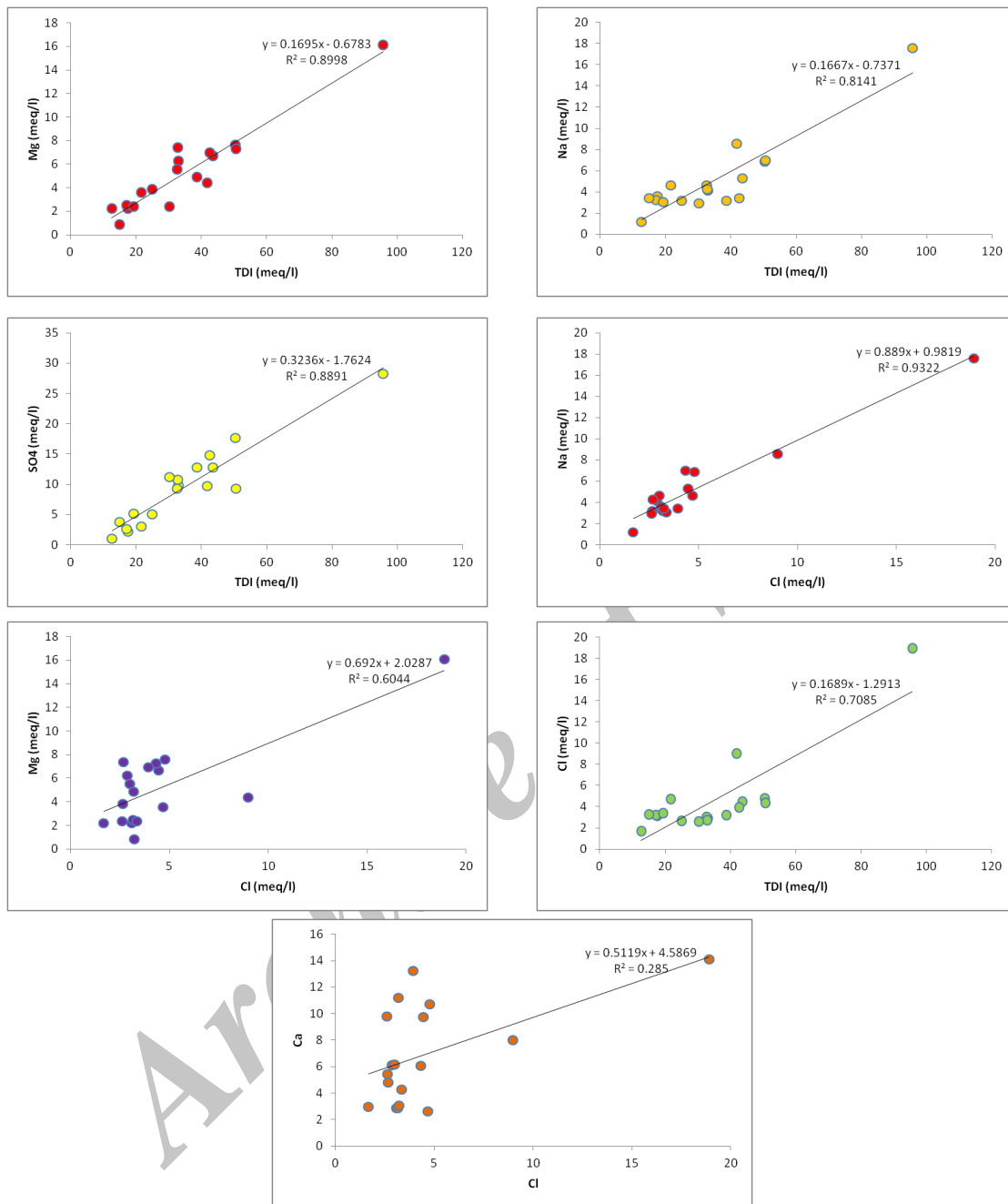
Ionic Ratio	Processes		
$(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})/(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl}+\text{Ca})$	>0.2 and <0.8 Plagioclase weathering possible		
$\text{Na}/(\text{Na}+\text{Cl})$	>0.5 Sodium source other than Halite-Albite or Ion Exchange		
$\text{Mg}/(\text{Ca}+\text{Mg})$	<0.5 Granitic Weathering		
$\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{SO}_4)$	>0.5 Calcium source other than Gypsum	=0.5 Gypsum dissolution	<0.5 Calcium removal, Ion Exchange or Calcite precipitation
$(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{SO}_4$	>0.8 Dedolomitization unlikely	>0.2 and <0.8 Dedolomitization	
$\text{Cl}/\text{Sum Anions}$	<0.8 Rock Weathering		
$\text{HCO}_3/\text{Sum Anions}$	<0.8 and sulphate low Evaporates or brine	<0.8 and sulphate high Gypsum dissolution	
TDS	<500 Silicate weathering	>500 Carbonate weathering or brine	

۴-۱- انحلال کانی‌های سولفاتی

($R^2=0.81$) و رابطه خطی این یون‌ها، و نیز با توجه به وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، گویای انحلال سولفات‌های منیزیم‌دار همچون ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: Epsomite و $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: Hexahydrate) است. همچنین با توجه به ضریب همبستگی نسبتاً بالای بین یون‌های سدیم و سولفات ($R^2=0.60$) و رابطه خطی این یون‌ها، انحلال سولفات‌های سدیم‌دار مانند (Na_2SO_4 : Thenardite) و ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$: Mirabilite) بر کیفیت آب زیرزمینی تاثیر گذاشته است.

با توجه به نسبت یونی $\text{HCO}_3/\text{Sum Anions}$ ، فرایند انحلال ژیبس یکی از عوامل موثر بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه است. از سوی دیگر، میزان همبستگی زیاد ($R^2=0.81$) بین یون‌های کلسیم و سولفات و رابطه خطی بین این یون‌ها و مجموع املاح در نمودارهای ترکیبی (شکل ۱۳) نیز این موضوع را تایید می‌کند. با توجه به ضریب همبستگی بالای بین یون‌های منیزیم و سولفات





شکل ۱۳- نمودارهای ترکیبی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

۴-۲- انحلال پلاژیوکلازها

براساس نتایج حاصل از نسبت یونی $(Na+K-Cl)/(Na+K-Cl+Ca)$ هوازدگی پلاژیوکلازها در تمام نمونه و در نتیجه در کل منطقه مورد مطالعه تاثیر زیادی گذاشته است و با توجه به نسبت یونی $Na/(Na+Cl)$ این پلاژیوکلازها غنی از سدیم (احتمالاً آلبیت) است. وضعیت سنگ‌شناختی منطقه (حضور اجزای خرده سنگی از نوع آذرین و دگرگون نظیر گرانیت در اجزای ماسه‌سنگ‌های آجاجاری) نیز گویای این مطلب است.

۴-۳- انحلال هالیت

همبستگی بالای میان یون‌های کلر و سدیم ($R^2=0.93$) نشان‌دهنده انحلال (NaCl: Halite) در منطقه است. همچنین همبستگی نسبتاً بالای یون‌های کلر و منیزیم ($R^2=60$) بیانگر انحلال ($MgCl_2, 6H_2O$: Bischofite) است. رابطه خطی بین این یون‌ها در نمودار ترکیبی کلر و سدیم و رابطه خطی بین این دو یون و مجموع نمک‌ها (شکل ۱۳) نیز دلیل دیگری برای رخداد این فرایند است. همبستگی پایین ($R^2=29$) یون‌های کلر و کلسیم نیز تا حدودی بیانگر انحلال کانی ($CaCl_2, 6H_2O$)

به مقدار صفر و روی محور X قرار می‌گیرند، تحت تاثیر تبادل یونی واقع نشده‌اند. افزون بر این، اگر انحلال کانی‌های کلسیت، ژیپس، انیدریت و هالیت به‌طور سازگار روی دهد و تبادل یونی صورت نگیرد، در آن صورت مقدار $(Ca+Mg)-(HCO_3-SO_4)$ نیز نزدیک به صفر خواهد شد و آب‌هایی که تبادل یونی را متحمل شده‌اند، در طول خط با شیب ۱- قرار می‌گیرند (Marie and Vengosh, 2001). بیشتر نمونه‌های آب چشمه‌ها، در محدوده کمتر از (صفر و صفر) واقع شده‌اند که این حالت بیانگر رخداد فرایند تبادل یونی است.

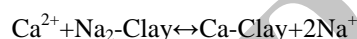
در نمودار دو متغیره Na/Cl در برابر EC، نمونه‌هایی که در بالای خط $Na/Cl=1$ واقع شده‌اند، منشا دوگانه دارند. با توجه به شکل ۱۴، در بیشتر نمونه‌های آب چشمه‌ها رخداد فرایند تبادل یونی دیده می‌شود.

در نمودار متغیره Ca+Mg در برابر HCO_3+SO_4 ، خط ۱:۱ نشان‌دهنده فرایند انحلال کلسیت، انیدریت، ژیپس و هالیت است. بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی در اطراف این خط و در محدوده تبادل یونی قرار گرفته‌اند که این امر نشانگر انحلال کانی‌های کلسیت، انیدریت، ژیپس و هالیت در آب زیرزمینی منطقه است. همچنین با توجه به مقادیر شاخص اشباع (SI) (جدول ۲)، آب زیرزمینی منطقه نسبت به این کانی‌ها حالت تحت اشباع دارد که این امر نیز گویای انحلال کانی‌های یادشده در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه است.

(Antarctite) در نمونه‌های آب منطقه به‌ویژه در نمونه SP₁₃ است (با توجه به نمودار استیف).

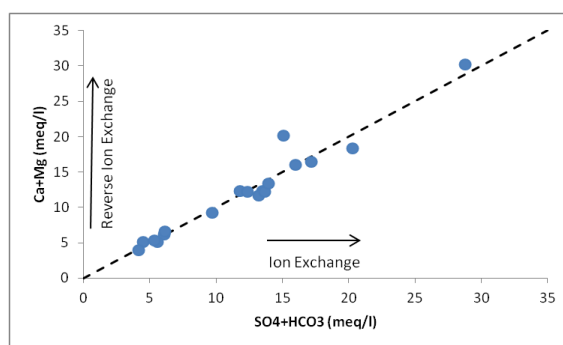
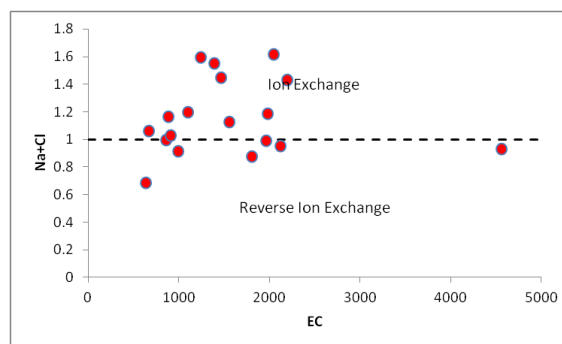
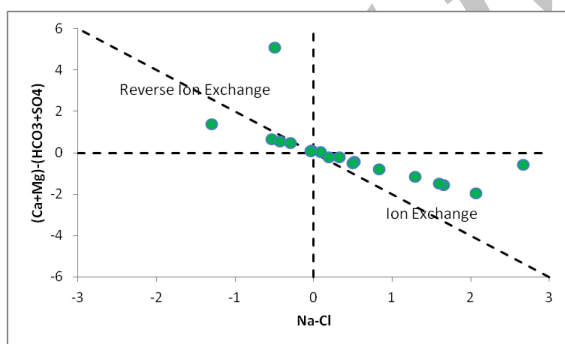
۴-۴- تبادل یونی

این فرایند در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم مانند مونت‌موریلونیت براساس معادله زیر با کلسیم و منیزیم آب زیرزمینی واکنش داده و باعث ورود سدیم به آب زیرزمینی می‌شوند (Drever, 1988):



نبود برابری غلظت‌های کلر و سدیم نیز نشان‌دهنده وجود منشا‌های متفاوت برای این دو یون است. نسبت یونی $Na/(Na+Cl)$ نیز نشان‌دهنده منشا دیگری افزون بر انحلال هالیت، برای یون سدیم است، که تبادل یونی را می‌توان به عنوان منشا مهمی برای سدیم در نظر گرفت. برای نمایش فرایندهای تبادل یونی در آبخوان، سه نمودار ترکیبی با استفاده از توابع بین تشکیل‌دهنده‌های شیمیایی متأثر از فرایند تبادل یونی تهیه شده است (شکل ۱۴).

رخداد فرایند تبادل یونی در نمودار Na-Cl در برابر $(Ca+Mg)-(HCO_3-SO_4)$ نشان داده شده است. در این نمودار نمونه‌هایی که نزدیک



شکل ۱۴- نمودارهای مرتبط با تبادل یونی در منطقه مورد مطالعه

شیمیایی که برای قضاوت در مورد میزان مناسب بودن آب برای آبیاری به کار گرفته می‌شود، استفاده از محتوای سدیم یا خطر قلیایی است که در نسبت جذب سدیم (SAR) بیان شده است. نسبت جذب سدیم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$S.A.R = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \quad \text{معادله ۲:}$$

نمودار Wilcox براساس دو معیار S.A.R و EC ارزیابی کیفیت آب از نظر کشاورزی، شوری و قلیایی بودن را با رده‌های سدیم نشان می‌دهد و آب‌ها را به ۱۶ رده تقسیم می‌کند (USSL, 1954) (جدول ۵). رسم این نمودار (شکل ۱۵)، نمونه‌های ۱۵ چشمه را در رده C_3S_1 (شور، برای آبیاری با اعمال تمهیدات لازم، مناسب) و نمونه آب چشمه‌های جاجوی بالا (SP_{11}) و عنبر (SP_{18}) را در رده C_2S_1 (کمی شور، برای آبیاری تقریباً مناسب) و آب چشمه تلخاب تاج‌الدین (SP_{16}) را در رده C_5S_1 (خیلی شور، مضر برای آبیاری) نشان می‌دهد، در نتیجه از نظر مصارف کشاورزی در رده میانگین قرار می‌گیرند.

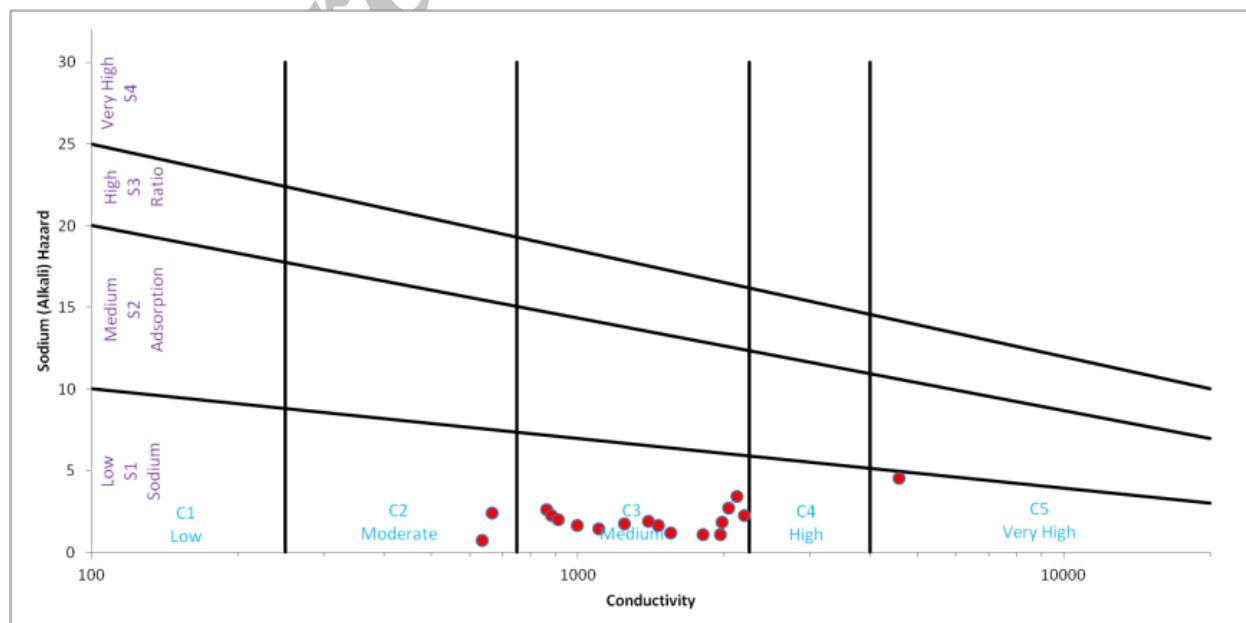
جدول ۵- کیفیت آب کشاورزی بر مبنای پارامترهای EC و Na (Bahadir and Gheorge, 2009)

رده آب	نوع کیفیت آب برای کشاورزی
C_1S_1	شیرین، برای آبیاری کاملاً بی‌ضرر
C_1S_2, C_2S_2, C_2S_1	کمی شور، برای آبیاری تقریباً مناسب
$C_1S_3, C_2S_3, C_3S_1, C_3S_2, C_3S_3$	شور، برای آبیاری با اعمال تمهیدات لازم، مناسب
$C_1S_4, C_2S_4, C_3S_4, C_4S_4, C_4S_3, C_4S_2, C_4S_1$	خیلی شور، مضر برای آبیاری

براساس نسبت یونی $(Ca+Mg)/SO_4$ در بیشتر نمونه‌ها فرایند دولومیت‌زدایی (Dedolomitization) رخ داده است. در صورت حاکم بودن این فرایند، باید کلسیت حالت اشباع و کانی ژپس به حالت زیراشباع باشد. بررسی شاخص اشباع کانی‌های یادشده در آب چشمه‌های منطقه (جدول ۲)، نشان می‌دهد که وضعیت متفاوتی در منطقه مورد مطالعه حاکم است. بر این اساس، آب بیشتر چشمه‌ها نسبت به کلسیت حالت اشباع دارد (چشمه‌های $SP_8, SP_{14}, SP_{16}, SP_{17}, SP_{18}$)، در نتیجه رخداد فرایند دولومیت‌زدایی در منطقه به نظر می‌رسد.

همچنین براساس نسبت یونی $Cl/Sum\ Anions < 0.8$ $Cl/Sum\ Anions$ بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی تحت تاثیر هوازدگی سنگ‌ها قرار گرفته‌اند، به عبارت دیگر، واکنش متقابل بین آب زیرزمینی و مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، بیشترین تاثیر را بر کیفیت آب زیرزمینی گذاشته است.

مقادیر EC و Na نقش حیاتی در مناسب بودن آب برای آبیاری بازی می‌کنند. مقدار بالای نمک در آب آبیاری باعث افزایش فشار اسمزی محلول در خاک می‌شود (Thorne and Peterson, 1954). از آنجا که ریشه‌های گیاه استخراج آب را به روش اسمز انجام می‌دهند، افزایش نمک موجب کاهش جذب آب در گیاهان می‌شود. فشار اسمزی متناسب با محتوای نمک و یا خطر شوری است. همچنین نمک، علاوه بر اینکه به طور مستقیم بر رشد گیاهان تاثیر می‌گذارد، ساختار خاک، نفوذپذیری و هوادهی را که به طور غیر مستقیم بر رشد گیاه تاثیر می‌گذارد، تحت الشعاع خود قرار داده است. غلظت کل نمک‌های محلول در آب آبیاری می‌تواند به رده‌های پایین (C_1)، متوسط (C_2)، بالا (C_3) و مناطق شوری بسیار بالا (C_4) طبقه‌بندی شود. این مناطق (C_1 تا C_4) به ترتیب دارای مقادیر EC کمتر از ۲۵۰، ۲۵۰-۷۵۰، ۷۵۰-۲۲۵۰ و بیشتر از ۲۲۵۰ دارند (شکل ۱۵). مقادیر بالای EC در آب موجب تشکیل خاک شور می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای مهم



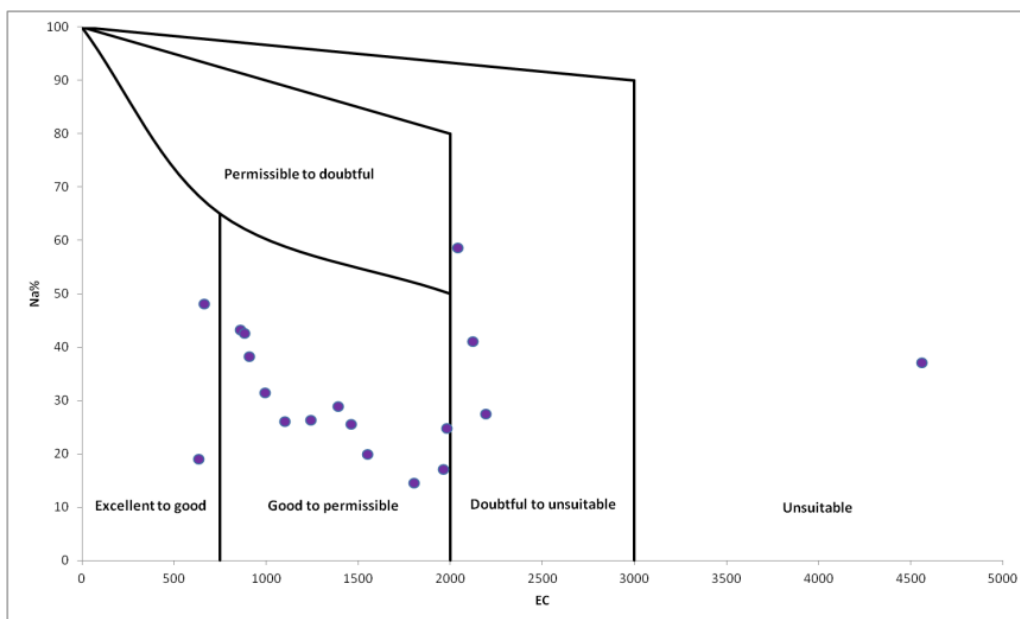
شکل ۱۵- رده‌بندی آب‌های آبیاری براساس مقادیر EC و Na (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)

خاک‌های شور شده است که در این صورت خاک، رشد گیاه را پشتیبانی نمی‌کند. نمودار EC در برابر %Na برای نمونه‌های مورد مطالعه رسم شده است (شکل ۱۶). بر این اساس بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده خوب تا مجاز (good to permissible) برای آبیاری قرار گرفته‌اند. در میان آب چشمه‌های SP₈ و SP₁₈ در محدوده عالی تا خوب (Excellent to good) و آب چشمه‌های SP₃، SP₈ و SP₁₃ در محدوده مشکوک تا نامناسب (Doubtful to unsuitable) و آب چشمه SP₁₆ در محدوده نامناسب برای کشاورزی قرار می‌گیرند.

درصد سدیم (%Na⁺) نیز به طور گسترده‌ای برای ارزیابی مناسب بودن کیفیت آب برای آبیاری استفاده می‌شوند (Wicox, 1984). درصد سدیم با توجه به نسبت‌های کاتیون‌های موجود در آب، که در آن غلظت یون‌ها برحسب اکی‌والان بر لیتر بیان می‌شود، با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\%Na^{+} = \frac{(Na+K) \times 100}{(Ca+Mg+Na+K)} \quad \text{معادله ۳:}$$

درصد بیش از حد سدیم، سبب ترکیب آن با کربنات شده و منجر به تشکیل خاک‌های قلیایی می‌شود، در حالی که ترکیب با کلر موجب تشکیل



شکل ۱۶- رده‌بندی آب‌های آبیاری براساس مقادیر EC و %Na (Wicox, 1984)

الدین (SP₁₆) و پیر (SP₃) به ترتیب در محدوده خطرناک و مراقبت قرار دارد. شکل ۵ زون‌بندی منطقه مورد مطالعه را براساس مقادیر EC، Cl، SAR، pH و TDS موجود در آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۶ آب بیشتر چشمه‌های مورد مطالعه براساس پارامترهایی همچون مقادیر EC، Na%، SAR، Cl، SO₄، pH و TDS، قابل استفاده برای آبیاری و کشاورزی است و تنها چشمه‌های تلخ‌ب تاج-

جدول ۶- معیارهای کیفیت آب کشاورزی (Bahadir and Gheorghe, 2009)

Parameter	Irrigation water class				
	very good	Good	may be used	use with care	Hazardous
EC 25×10 ⁶ (μS/cm)	0-250	250-750	750-2000	2000-3000	>3000
Na%	<20	20-40	40-60	60-80	>80
SAR	<10	10-18	18-26	>26	-
Cl ⁻ meq/L	0-4	4-7	7-12	12-20	>20
SO ₄ ²⁻ meq/L	0-4	4-7	7-12	12-20	>20
TDS	0-175	175-525	525-1400	1400-2100	>2100
Irrigation water class	C ₁ S ₁	C ₁ S ₂ , C ₂ S ₂ , C ₂ S ₁	C ₁ S ₃ , C ₂ S ₃ , C ₃ S ₃ , C ₃ S ₂ , C ₃ S ₁	C ₁ S ₄ , C ₂ S ₄ , C ₃ S ₄ , C ₄ S ₄ , C ₄ S ₃ , C ₄ S ₂ , C ₄ S ₁	-
pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-9.0	<6.0 or >9.0

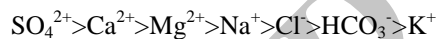
۵- نتیجه گیری

دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجد سلیمان حمایت مادی و معنوی شده است. بنابراین بدین وسیله، نویسندگان مقاله از آن معاونت که پشتیبانی مالی این طرح تحقیقاتی را به عهده داشته است، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- Alley, W.M., 1993, "Regional ground-water quality", *New York, Van Nostrand Reinhold*, P.634.
- American Public Health Association (APHA), 2005, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 21st ed. *American Public Health Association, Washington, DC*.
- Bahadir, A.M., and Gheorghe, D., 2009, "The Role of Ecological Chemistry in Pollution Research and Sustainable Development. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security", *Springer*, P.120.
- Bartram J., and Balance, R., 1996, "Water quality monitoring: A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes", *UNEP/WHO, E & FN Spon, London, UK*, P.348.
- Bashar, K. and Tellam, J.H., 2011, "Sandstones of unexpectedly high diffusibility", *Journal of Contaminant Hydrology*, 122, P.40-52.
- Bertolo, R., Bourotte, C., Hirata, R., Marcolan, L. and Sracek, O., 2011, "Geochemistry of natural chromium occurrence in a sandstone aquifer in Bauru Basin, São Paulo State, Brazil", *Applied Geochemistry*, 26, P.1353-1363.
- Chilingar, G. V., 1956, "Durov's classification on natural waters and chemical composition of atmospheric precipitation in USSR: Transactions of American Geophysical Union", 37, No., 2, P.193-196.
- Coetsiers, M., and Walraevens, K., 2006, "Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium", *Hydrogeology Journal*, 14, P.1556-1568.
- Deutsch, W.J., 1997, "Groundwater geochemistry: fundamentals and application to contamination", *CRC, Boca Rat-on. Florida*. P.232.
- Drever, J. I., 1988, "Geochemistry of Natural Waters", 3rd edition, *Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Company*, P.367.
- Eilers, J.M., Brakke, D.F., and Henriksen, a., 1992, "the inapplicability of gibbs' model of world water chemistry for filute lakes", *Limnology and Oceanography*, 37: P.1335-1337.
- European Environment Agency (EEA), 2000, "Groundwater quality and quantity in Europe, Environmental assessment report No 3. Office for official publications of the European communities", *Copenhagen*, P.13-37.
- Fernández, A.C., Fernández, A. M., Domínguez, C.T. and Santos, B.L., 2009, "Hydrochemistry of northwest Spain ponds and its relationships to groundwaters", *Limnetica*, 25, P.433-452.
- Fetter, C. W., 1988, "Applied Hydrogeology", *Mc Milian publishing Company. U.S.A.* P.592 .
- Foster, G.D., Roberts Jr, E.C., Gruessner, B., Velinsky, D.J., 2000, "Hydrogeochemistry and transport of organic contaminants in an urban watershed of Chesapeake Bay (USA)", *Applied Geochemistry*, 15, P.901-915.
- Garrels, R.M., and Mackenzie, F.T., 1967, "Origin of the chemical composition of springs and lakes, in Equilibrium concepts in natural water systems: American Chemical Society", *Advances in Chemistry Series no. 67*, P.222-242.

تأثیر واحدهای زمین‌شناسی منطقه مسجد سلیمان از دیدگاه تأثیر بر کیفیت منابع آب نشان داد که سازند آجاجاری با سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ و میان لایه‌های ژئوپس و مارن و نیز سازند گچساران مؤثر بر کیفیت منابع آب است. تفسیر نتایج تجزیه هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی در منطقه مسجد سلیمان نشان می‌دهد که آب‌های این منطقه عمدتاً دارای تیپ سولفاتی ($Mg-SO_4$, $Ca-SO_4$, $Na-SO_4$) است، که براساس غلظت یون‌های اصلی موجود در آب‌های زیرزمینی منطقه شرایط آنیونی و کاتیونی زیر حاکم است:



بررسی سنگ‌شناسی سنگ‌های در برگزیده منطقه مورد مطالعه نشان داد که وجود سازند آجاجاری با سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ و با میان لایه‌هایی از ژئوپس و انیدریت و نیز سازند گچساران با سنگ‌شناسی سنگ نمک، انیدریت، مارن‌های رنگین، سنگ‌آهک و مقداری شیل باعث افزایش شوری و غلظت یون‌های سولفات، کلسیم، منیزیم، سدیم و کلر در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه شده است که نتایج حاصل از نمودار گیبس نیز نشان‌دهنده تأثیر متقابل بین شیمی سنگ و شیمی آب‌های موجود در آبخوان است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص اشباع نشان می‌دهد که آب چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان نسبت به کانی‌های ژئوپس، انیدریت و هالیت و نیز CO_2 در حالت اشباع‌نشده هستند و این نشان می‌دهد این مواد می‌تواند در آب زیرزمینی منطقه حل شود و قدرت انحلال افزایش یابد، اما آب بعضی از چشمه بجز چشمه‌های نم‌نی، جاجوی پایین، تلخاب تاج-الدین، بابا زاهد و عنبر نسبت به کانی کلسیت حالت اشباع دارند که بیانگر آن است که کیفیت آب‌های زیرزمینی این منطقه متأثر از سنگ‌شناسی و کیفیت آب تغذیه‌ای است. با توجه به روش‌های هیدروشیمیایی مورد در این تحقیق، مهم‌ترین عامل مؤثر بر کیفیت آب چشمه‌های منطقه مسجد سلیمان، واکنش بین آب و سازند آجاجاری (مواد سازنده آبخوان) است. اصلی‌ترین فرایند حاکم بر ترکیب شیمیایی انحلال کانی‌های سولفاتی ژئوپس و انیدریت و کانی هالیت هستند. منشا یون سدیم در آب زیرزمینی را افزون بر انحلال هالیت، به فرایندهای دیگری مانند تبادل یونی و هوازدگی پلاژیوکلازهای غنی از سدیم مانند آلبیت می‌توان نسبت داد. انحلال سولفات‌های سدیم‌دار نیز کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده است. نتایج کلی تجزیه‌های شیمیایی بیانگر این موضوع است که در بیشتر چشمه‌های منطقه، مقدار EC، TDS، SAR و Na% مناسب و از نظر رده‌بندی آب برای مصارف کشاورزی مناسب هستند و در رده C3 قرار دارند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش بخشی از نتایج حاصل از طرح پژوهشی با عنوان اثرات زیست‌محیطی توسعه شهری بر آلودگی نیترات در آب‌های سطحی و زیرسطحی گستره مسجد سلیمان است که توسط معاونت پژوهش و فن‌آوری

- Gibbs, R.J., 1970**, "Mechanisms controlling world water chemistry", *Science*, 17, P.1088-1090.
- Giggenbach, W.F., 1988**, "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, P.2749-2765.
- Goren, O., Gavrieli, I., Burg, A. and Lazar, B., 2012**, "Cation exchange and CaCO₃ dissolution during artificial recharge of effluent to a calcareous sandstone aquifer", *Journal of Hydrology*, Vol. 400: P.165-175.
- Guler, C. and Thyne, G.D., 2004**, "Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA", *Journal of Hydrology*, 285, P.177-198.
- Gogel, T., 1981**, "Discharge of salt water from Permian rocks to major stream-aquifer system in Central Kansas: Kansas", *Water Resources Investigation*, 81: P.43-65.
- Hounslow, A.W., 1995**, "Water Quality Data: Analysis and interpretation", *CRC Press*, P.416.
- Howard, F.W., Ken, E. and Mullings, E., 1996**, "Hydrochemical analysis of groundwater flow and saline intrusion in the Clarendon basin, Jamaica", *Groundwater*, 34, P.801-810.
- Jalali, M., 2006**, "Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran", *Environmental Geology*, 51: P.433-446.
- Kresic, N. and Stevanovic, Z., 2010**, "Groundwater hydrology of springs", *Butterworth-Heinemann*, P.592.
- Langmuir, D., 1997**, "Aqueous environmental geochemistry", *Prentice Hall, Inc.* P.601.
- Lloyd, J.W. and Heathcote, J.A., 1985**, "Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: An introduction", *Clarendon Press*. P.296.
- Marie, A. and Vengosh, A., 2001**, "Sources of salinity in ground water from Jericho area, Jordan Valley, Ground Water", 39, P.240-248.
- Matthess, G., 1982**, "The Properties of Groundwater", *John Wiley, New York*, P.406.
- Menda, A., Astorga, A., Neumann, D., 2007**, "Strategy for groundwater management in developing countries: A case study in northern Costa Rica", *Journal of Hydrology*, 334, P.109-124.
- Olajire, A.A., and Imeokparia, F.E., 2001**, "Water Quality Assessment of Osun River: Studies on Inorganic Nutrients", *Environmental Monitoring and Assessment*, 69, P.17-28.
- Piper, A.M., 1944**, "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses", *American Geophysical Union Trans*, 25, P.914-923.
- Richter, B.C. and Kreitler, C. W., 1986**, "Geochemistry of salt spring and shallow subsurface brines in the Rolling Plains of Texas", *Groundwater*, 24: P.735-742.
- Schoeller, H., 1967**, "Qualitative evaluation of groundwater resources. In: Methods and techniques of groundwater investigation and development. Water Research", *Series 33, UNESCO*, P.44-52.
- Singhal, B.B.S., and Gupta, R P., 1999**, "Applied Hydrogeology of Fractured Rocks", *Kluwer Academic Publisher*. P.400.
- Stober, I. and Bucher, K., 1999**, "Deep groundwater in the crystalline basement of the Black Forest region", *Applied Geochemistry*, 14, P.237-254.
- Stossel, R.K., 1997**, "Delineating the chemical composition of the salinity source for saline groundwater: An example from eastcentral Canadian Parish, Louisiana", *Ground Water*, 35, P.409-417.
- Subba Rao N., 2002**, "Geochemistry of groundwater in parts of Guntur district, Andhra Pradesh, India", *Environmental Geology*, 41, P.552-562.
- Subramani, T., Elango, L., Damodarasamy, S.R., 2005**, "Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India", *Environmental Geology*, 47, P.1099-1110.
- Thorne, D.W., and Peterson, H.B., 1954**, "Irrigated soils", *Constable and Company Limited, London*, P. 99-10.
- Timms, W., Acworth, R.I., Jankowski, J. and Lawson, S., 2000**, "Groundwater quality trends related to aquitard salt storage at selected sites in the Lower Murumbidgee alluvium, Australia", *Groundwater*, 25, P.655-660.
- Todd, D.K., and Mays, L.W., 2005**, "Groundwater Hydrology", *John Wiley and Sons, New York*, P.535.
- US Salinity Laboratory Staff (USSL), 1954**, "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils", *US Department of Agricultural Hand Book 60, Washington*.
- Wilcox, L.V., 1984**, "The quality of water for irrigation use", *US Department of Agricultural Technical Bulletin 1962, Washington*.
- Zaporozec, A., 1972**, "Graphical Interpretation of water quality data", *Ground Water*, 10, P.32-43.
- Zhang, H. and Hiscock, K.M., 2011**, "Modelling the effect of forest cover in mitigating nitrate contamination of groundwater: A case study of the Sherwood sandstone aquifer in the east Midlands, UK", *Journal of Hydrology*, 399, P.212-225.