

## ارزیابی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها و چاه‌های شرق دشت گرگان

مجتبی قره‌محمودلو\*: دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس

جواد شیرزادینیا: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)



### چکیده

برای ارزیابی و مقایسه خصوصیات هیدروژئوشیمیایی برخی از چشمه‌ها و چاه‌های شرق دشت گرگان، از داده‌های هشت چشمه و چهارده چاه در یک دوره ده ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۴) استفاده شد. در این پژوهش برای شناسایی فرایندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم، منشأ نمک‌ها محلول و آلودگی منابع آب زیرزمینی از دیاگرام‌های هیدروژئوشیمیایی، نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی استفاده شد. نتایج نشان داد که در نود درصد پارامترهای فیزیکوشیمیایی مورد بررسی، بین چاه‌ها و چشمه‌ها اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. با توجه به توزیع مکانی پارامترهای هیدرووشیمیایی، غلظت اکثر پارامترها در جهت جریان آب زیرزمینی در حال افزایش است؛ به طوری که میزان هدایت الکتریکی از ۵۰۴ تا ۴۳۷۱ میکروموس تغییر می‌کند. نتایج نشان داد که  $Mg-HCO_3$ ، تیپ غالب آب و دو رخساره  $Ca-Mg-CO_3-HCO_3$  و  $Mixed Ca-Mg-Cl-SO_4$  به ترتیب بیشترین فراوانی را در منابع آبی دارد. براساس دیاگرام گیبس، واکنش آب - سنگ عامل اصلی در تغییر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی در منابع آبی مورد مطالعه است. نتایج حاصل از نسبت‌های یونی و نمودارهای دو متغیره نشان داد که سنگ‌های آهکی و نفوذ آب شور، مهم‌ترین منابع تغذیه‌کننده آب زیرزمینی است. همچنین فرایند تبادل یونی نسبت به فرایند تبادل یونی معکوس، در میزان غلظت نهایی عناصر اصلی در آب زیرزمینی نقش مؤثرتری دارد. نتایج بررسی نمودارهای  $NO_3/Cl$  و  $HCO_3/Cl$  در مقابل  $Cl$  نشان داد که فعالیت‌های انسانی و نفوذ آب شور لایه‌های زیر سطحی به داخل آب زیرزمینی، در تغییر و تکامل هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی نقش مهمی دارد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، آلودگی، تکامل هیدروژئوشیمیایی، فرایندهای تبادل یونی، نسبت‌های یونی.

\* نویسنده مسئول: [M. G. Mahmoodlu@gmail.com](mailto:M.G.Mahmoodlu@gmail.com)

## ۱- مقدمه

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آبی است که بشر همواره در بخش‌های مختلف از آن استفاده می‌کند. کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی همواره توسط عوامل طبیعی همانند آب و هوا، نوع خاک، زمین‌شناسی، توپوگرافی، بارش و تبخیر، و عوامل انسانی همچون رشد جمعیت، فعالیت‌های گسترده کشاورزی و توسعه صنعتی تهدید می‌شود (Aouiti et al, 2020 & Zhang et al, 2021).

غلظت شاخص‌های شیمیایی طبیعی سلامت عمومی را در سطوح خاصی تغییر نمی‌دهد، اما ممکن است بر میزان قابل قبول بودن آب آشامیدنی تأثیر منفی بگذارد. کیفیت آب زیرزمینی در هر نقطه زیر سطح زمین، اثرات ترکیبی بسیاری از فرایندها را در طول مسیر جریان آب زیرزمینی منعکس می‌سازد. علاوه بر این، کیفیت پایین آب ممکن است به شستشوی مواد مغذی منجر شود و فلزات را از درون خاک آزاد سازد. تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی در جهت مناسب بودن آن برای مصارف خاص اهمیت دارد. مطالعات ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی، درک بهتری از تغییرات احتمالی در کیفیت آب ارائه می‌دهد. روش‌های کنترل کیفیت آب در صورتی مؤثر است که کیفیت پایه طبیعی با درجه اطمینان قابل قبولی تعیین شود. فعالیت‌های انسانی نیز می‌تواند تأثیر خود را در تغییرات عوامل طبیعی نشان دهد و اثرات آلودگی را معرفی کند (Whittemore et al, 1989 & Sarath Prasanth et al, 2012).

شیمی آب‌های زیرزمینی عمدتاً تابعی از ترکیب مواد معدنی آبخوانی است که از طریق آن جریان دارد. همان‌طور که آب‌های زیرزمینی در امتداد مسیر خود از مناطق تغذیه به مناطق تخلیه حرکت می‌کند، انواع فرایندهای هیدروژئوشیمیایی ترکیب شیمیایی آن را تغییر می‌دهد (Srinivasamoorthy et al, 2013 & Appelo and Postama, 2005). بنابراین، پژوهش‌های هیدروژئوشیمیایی می‌تواند اطلاعات بسیار دقیقی درباره تأثیر مواد تشکیل‌شده آبخوان منطقه مورد مطالعه، مسیر تغذیه و تخلیه، نواحی تبخیر از آب زیرزمینی، تأثیر آب‌های سطحی بر آب‌های زیرزمینی منطقه و کیفیت آن در مصارف مختلف را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد (Rezaee, 2011).

برای مطالعه ترکیب شیمیایی آب، عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب‌های زیرزمینی و تعیین منشأ املاح در تحقیقات مختلف، از روش‌های گوناگونی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به تجزیه و تحلیل غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، ترسیم نمودار پایپر برای تعیین تیپ و رخسار آب زیرزمینی، استفاد از نسبت‌های یونی، نمودارهای ترکیبی، مدل‌های کیفی، نمایه‌های اشباع مختلف و شاخص عاملی - که نوعی روش آماری چند متغیره است - اشاره کرد (Mohebbi et al, 2014 & Tafreshi et al, 2016).

در خصوص ارزیابی هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی و شناخت عوامل تأثیرگذار، پژوهش‌های فراوانی در ایران و خارج از آن انجام شده است (Fazel valipour, 2021 & Adimalla and Li, 2018 & Ebrahimi, 2017) و (Paternoster et al, 2021 & Soltani and Asghari Moghaddam, 2021 & Givi et al, 2021) که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

غلام دخت بندری و همکاران (2018) در پژوهشی به ارزیابی کیفیت هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی حوضه سیاهو در شمال شرق شهر بندرعباس پرداختند. بدین منظور، از پارامترهای کیفی مربوط به سه چاه عمیق، سه دهانه چشمه، یک رشته قنات آبدار و یک نمونه آب سطحی استفاده شد. این مطالعه نشان داد که یکی از مشکلات منابع آبی موجود

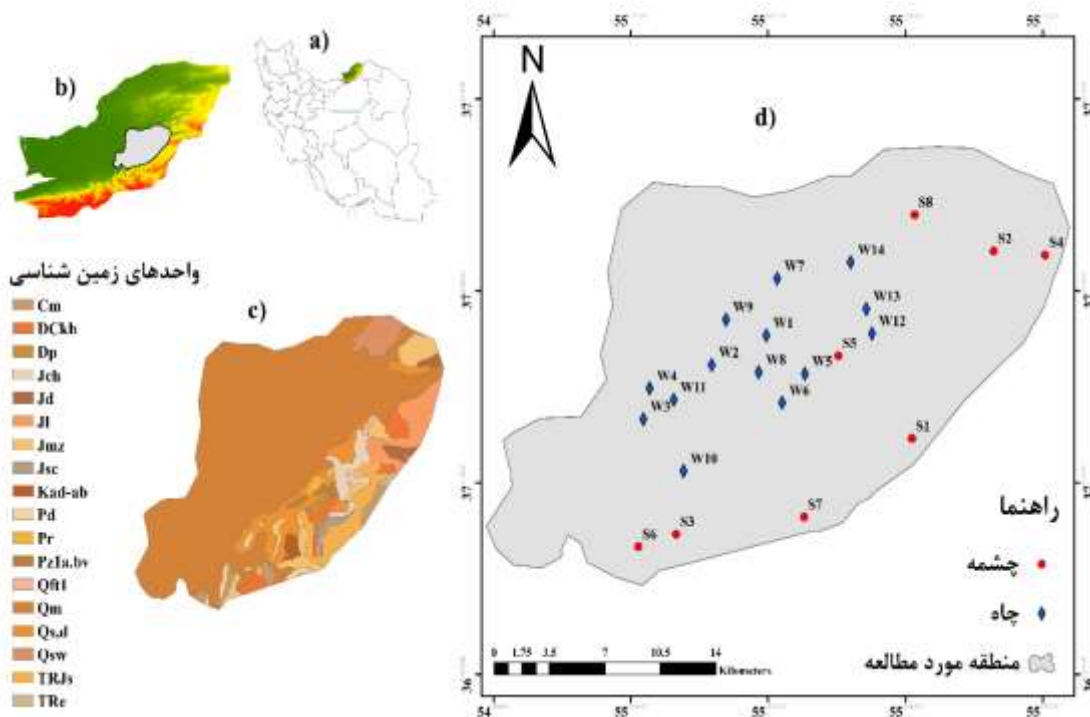
در حوضه سیاهو، مقدار زیاد نمک و مواد محلول است که تأثیر به‌سزای سازندهای زمین‌شناسی (شامل تبخیری، شیلی و کربناتی) و گنبد نمکی را بر منابع آب زیرزمینی و کاهش کیفیت منابع آب نشان می‌دهد. در پژوهشی، نجف‌پور و همکاران (2020) اثر تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی را بر آلودگی آبخوان دشت لنجانان واقع در اصفهان بررسی کردند. بدین منظور، از نتایج آنالیز فیزیکوشیمیایی و میکروبی مربوط به ۶۶ حلقه چاه و قنات نمونه‌برداری استفاده شد. نتایج این پژوهش از روند افزایشی پارامترهای کیفی با زمان در آبخوان حکایت داشت. همچنین ناحیه مرکزی محدوده مورد مطالعه به سمت شمال نیز همواره در معرض آلودگی بود که دلیل آن به توسعه بیشتر صنعتی، شهری و کشاورزی و نفوذ مستقیم پساب این کاربری‌ها به آبخوان بازمی‌گشت. در نتیجه این عوامل، شاخص کیفیت آب زیرزمینی در شمال حوضه نامطلوب گزارش شده است. کلاتری و همکاران (2022) نیز در تحقیقی به بررسی کمی و کیفی آبخوان باغملک در طول دوره ده‌ساله (۱۳۸۶-۱۳۹۶) پرداختند و از روش تحلیل آماری، روش‌های هیدروشیمیایی و GIS استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان افت آب زیرزمینی در طول دوره مذکور برابر با ۱۳/۷۹ متر است، ولی بیشترین افت در بخش شرقی و مرکزی دشت در حدود نوزده متر مشاهده می‌شود. بررسی PCA و HCA برای داده‌های کیفی در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۶ نشان داد که چاه‌های موجود در منطقه در سه گروه قرار می‌گیرند و هدایت الکتریکی دارای بیشترین همبستگی با سولفات و کلسیم است. همچنین تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد که دو عامل اصلی در منطقه وجود دارد؛ عامل اول که ۶۰/۱۲ درصد تغییرات را شامل می‌شود به ترتیب اهمیت عبارت است از: Mg، Na، K، Ca، SO<sub>4</sub> و EC و عامل دوم که موجب ۱۵/۱۵ درصد تغییرات می‌شود فقط شامل HCO<sub>3</sub> است.

در اکثر مطالعات انجام شده، پژوهش‌ها بر یک منبع آبی نظیر آب زیرزمینی تمرکز داشته و مقایسه‌ای بین کیفیت و هیدروژئوشیمی دو منبع مختلف انجام نشده است. در این پژوهش سعی شده هر دو منبع اصلی تأمین آب شرب در بخش شرقی استان گلستان از نظر کیفی ارزیابی شود؛ از این رو، پژوهش حاضر به منظور بررسی هیدروشیمیایی آب چشمه و چاه شرق دشت استان گلستان و مقایسه بین آنها، ارزیابی غلظت پارامترهای مورد مطالعه و تأثیرپذیری سازندهای موجود با بهره‌گیری از نمودارهای ترکیبی و نسبت‌های یونی انجام شد.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

دشت گرگان با مساحتی در حدود پنج هزار کیلومتر مربع، یکی از بزرگ‌ترین دشت‌های کشور است که در نیمه شمالی استان گلستان و جنوب شرق دریای خزر قرار دارد (شکل ۱-ب). این دشت پنج حوضه آبریز اصلی دارد که شامل حوضه‌های شرق خلیج گرگان، نکارود علیا، قره‌سو، گرگان‌رود و اترک سفلی است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش نیز قسمت شرقی دشت می‌باشد. بررسی خطوط هم‌باران در محدوده دشت گرگان نشان می‌دهد که در قسمت‌های جنوبی آن، متوسط سالانه بارندگی در حدود ششصد میلی‌متر است و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم، از مقدار بارندگی کاسته می‌شود؛ به طوری که در نزدیک مرز ترکمنستان به زیر چهارصد میلی‌متر در سال می‌رسد. همچنین در بررسی خطوط هم‌دمای سالانه مشخص شد که متوسط دمای سالانه در قسمت‌های جنوبی این دشت، حدود شانزده درجه سانتی‌گراد است و هر چه به سمت شمال دشت حرکت کنیم، بر مقدار دما افزوده می‌شود؛ به طوری که در نزدیکی مرز ترکمنستان به بیش از هیجده درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بر اساس روش دومارتن، اقلیم دشت گرگان از نیمه خشک در شرق تا مرطوب در بخش‌های غربی منطقه مورد مطالعه متغیر است (Gorganli Davaji et al, 1400).

محور اصلی فعالیت‌های اقتصادی استان گلستان در این دشت نیز فعالیت‌های کشاورزی است. اگرچه در بخش‌های شمالی دشت به دلیل کاهش نزولات جوی و شور شدن خاک‌ها، دامداری حرفه اصلی ساکنان دشت به حساب می‌آید، کیفیت آب‌های زیرزمینی در هر منطقه متأثر از خصوصیات زمین‌شناسی (تنوع سنگی، میزان خلل و فرج سنگ‌ها، انحلال‌پذیری آنها و ...) هر منطقه می‌باشد؛ از این رو، مطالعات زمین‌شناسی می‌تواند به تفسیر داده‌های هیدروژئوشیمی در منطقه مورد مطالعه کمک زیادی کند. همچنین دشت مورد مطالعه از رسوبات ماسه‌ای و سیلتی نامتراکم و سخت‌نشده پوشیده شده است. این رسوبات که عمدتاً لسی مربوط به دوران چهارم زمین‌شناسی است با ضخامت نسبتاً زیاد در منطقه دشت و پای ارتفاعات جنوبی و شرقی نهشته شده است (شکل ۱-۱). گرچه درباره منشأ اولیه و طرز رسوب‌گذاری آنها اختلاف نظر وجود دارد. گرچه اکثر رسوب‌شناسان بر این عقیده‌اند که عناصر تشکیل‌دهنده آنها، از ارتفاعات البرز سرچشمه گرفته و بارها در جهات مختلف تغییر مکان داده‌اند. ارتفاعات جنوب منطقه را تاقدیس‌ها و ناودیس‌هایی از حوضه البرز شرقی با رسوبات مربوط به پالئوزوئیک و مزوزوئیک به مقدار کم تشکیل می‌دهد که سازندهای آهکی و ماسه‌سنگی خوش‌بیلاق، مبارک، درود، روته، الیکا، لار و دلچای و شمشک، اهمیت و رخمون بیشتری دارد. بر اساس ارتباط بین سازندهای زمین‌شناسی و چشمه‌ها، بیشترین تمرکز چشمه‌ها در سازندهای دوران دوم و ابتدای دوران سوم زمین‌شناسی است. به طور کلی بر اساس نحوه شکل‌گیری، چشمه‌های منطقه به انواع درز و شکافی، زهکشی، گسلی، همبری و کارستی تقسیم می‌شود که از این میان، چشمه‌های درز و شکافی بیشترین فراوانی را دارد و در تمام نقاط شرق استان دیده می‌شود. برخلاف چشمه‌های درز و شکافی، چشمه‌های کارستی دارای کمترین فراوانی است؛ گرچه سنگ‌های آهکی در منطقه مورد مطالعه پراکنده‌گی نسبتاً بالایی دارد (Ghareh Mahmoodlu et al, 2019).



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی در استان گلستان و کشور (a و b)، به همراه نقشه زمین‌شناسی (c) و نقشه پراکندگی منابع آبی (d)

### ۳- هیدروژئوشیمی

#### ۳-۱- نسبت‌های یونی ژئوشیمیایی

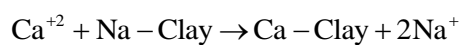
نسبت‌های یونی ژئوشیمیایی، شاخص‌های مناسبی در ارزیابی شیمیایی منابع آب است و استفاده از آنها در تعیین منشأ نمک‌ها کمک فراوانی خواهد کرد ( Ghareh Mahmoodlu et al, 2019b & Hounslow, 1995 & Faryabi et al, 2010). این نسبت‌ها از ترکیب شیمیایی کانی‌های محلول در آب تأثیر می‌گیرد و مقدار کانی انحلال‌یافته در درجه بعدی اهمیت قرار دارد (Ghareh Mahmoodlu et al, 2019 & Faryabi et al, 2010). در جدول ۱، مهم‌ترین نسبت‌های یونی ژئوشیمیایی استفاده شده در این پژوهش به همراه تفسیر آنها ارائه شده‌است.

جدول ۱: نسبت‌های یونی هیدروژنوشیمیایی برای تعیین منشأ یون‌ها در منابع آب زیرزمینی مورد مطالعه (Hounslow, 1995)

نسبت	کاربرد	مقدار	تفسیر
$Ca^{2+}/Mg^{2+}$	شناسایی سازندهای آهکی از	$1 <$	- تغذیه آب زیرزمینی توسط سازندهای آهکی، دولومیت
	دولومیت، همچنین شناسایی	$1 =$	- آهکی و آهک - دولومیتی
	واپاشی خاک و کاهش	$1 >$	- احتمالاً یون کلسیم از محلول استفاده می‌شود
$Ca^{2+}/(Ca^{2+}+SO_4^{2-})$	تدریجی عملکرد آن		- غالب بودن هوازگی سیلیکات‌ها
	تعیین منشأ کلسیم، انحلال	$0.5 <$	- منبع کلسیم غیر از ژپس، کربنات‌ها و سیلیکات‌ها
	ژپس، تعویض یونی و	$0.5 =$	- انحلال ژپس
	رسوب‌گذاری کلسیت	$0.5 > \text{pH} < 5.5$ و $0.5 > \text{pH} > 5.5$	- اکسیداسیون پیریت - حذف کلسیم - تبادل یونی یا رسوب کلسیم
$Ca^{2+}/(Mg^{2+}+Ca^{2+})$	معرف هوازگی و انحلال	$0.5 <$	- تمایل آب زیرزمینی به انحلال دولومیت یا خارج شدن
	سنگ‌های آهکی و دولومیتی	$0.5 >$	کلسیم بر اثر رسوب‌گذاری کلسیت - هوازگی سنگ‌های آهکی و دولومیتی
$Na/Cl$	اطلاعات مفیدی را درباره	$Na^+ > Cl^-$	- منشأ سدیم غیر از حالت و ناشی از تبادل کاتیونی
	منشأ یون کلر با سدیم بیان	$Na^+ = Cl^-$	سیلیکات‌ها
	می‌کند	$Na^+ < Cl^-$	- منشأ سدیم غیر از کانی‌ها - تبادل یونی معکوس
$Cl^-/HCO_3^- + CO_3^{2-}$	معیار مناسبی برای ارزیابی و	$1 >$	- تغذیه از سازندهای آهکی
	تشخیص آلودگی آب‌های	$1 <$	- نفوذ آب شور، سازندهای تبخیری و کودهای شیمیایی
$Na^+/(Na^++Cl^-)$	زیرزمینی به وسیله آب دریا		یا آب‌های شور فسیلی است
	تعیین منشأ سدیم	$0.5 <$	- منبع سدیم دیگری از حالت نظیر آلکیت و تبادل یونی
		$0.5 =$	- انحلال حالت
		$TDS > 500$ و $0.5 >$	- تبادل یونی معکوس و نفوذ آب شور

### ۲-۳- تبادل یونی

فرایند تبادل یونی (عادی و معکوس)، یکی از فرایندهای مهمی است که در میزان غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب زیرزمینی نقش مهمی دارد و بررسی آن در مباحث مربوط به هیدروژنوشیمی دارای اهمیتی ویژه است. این فرایند در جایی رخ می‌دهد که کانی‌های رسی غنی از سدیم مانند مونتوریلونیت، بر اساس رابطه ۱ به کلسیم و منیزیم آب زیرزمینی واکنش نشان دهد و به ورود سدیم به آب زیرزمینی منجر شود:



رابطه ۱

وجود فرایند تبادل یونی در یک آبخوان را می‌توان با استفاده از نمودارهای ترکیبی مختلف بررسی کرد که مهم‌ترین آنها، نمودار  $Na/Cl$  و نمودار  $(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$  نسبت به  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$  است. همچنین نوع تبادل یونی را می‌توان به وسیله شاخص‌های کلر و قلیایی شناسایی کرد. این شاخص‌ها برای نمونه‌های مربوط به منابع آبی مورد مطالعه با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$CAI1 = \frac{Cl^- - Na^+ + K^+}{Cl^-} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$CAI2 = \frac{Cl^- - Na^+ + K^+}{SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-}} \quad \text{رابطه ۳}$$

غلظت تمامی یون‌ها در روابط ۲ و ۳، برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. در صورتی که  $CAI 1$  و  $CAI 2$  مثبت باشد، تبادل کاتیونی معکوس رخ خواهد داد. در مقابل، برای مقادیر منفی  $CAI 1$  و  $CAI 2$  تبادل کاتیونی غالب خواهد بود. در نهایت، زمانی تعادل رخ می‌دهد که میزان  $CAI 1$  و  $CAI 2$  صفر باشد. در این حالت، آرایش داده‌ها خطی به موازات محور افقی خواهد بود.

#### ۴- مواد و روش

در این پژوهش، چهارده چاه پیژومتری بخش شرقی دشت گرگان و هشت چشمه واقع در ارتفاعات بین شهرهای رامیان، مینودشت، کلاله و گنبد برای مطالعه هیدروژئوشیمیایی انتخاب شد (شکل ۱-d). سپس نتایج مقادیر برخی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی نظیر pH، درجه حرارت (T) و هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS)، بی‌کربنات ( $HCO_3^-$ )، کلراید ( $Cl^-$ )، سولفات ( $SO_4^{2-}$ )، نیترات ( $NO_3^-$ )، کلسیم ( $Ca^{2+}$ )، منیزیم ( $Mg^{2+}$ )، سدیم ( $Na^+$ )، پتاسیم ( $K^+$ ) و آهن ( $Fe^{2+}$ ) در یک دوره زمانی ده ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۴)، از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان دریافت شد. متوسط ده ساله پارامترهای مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. ذکر این امر لازم است که مقادیر برخی پارامترها نظیر دما، pH و هدایت الکتریکی، در محل منابع آبی و با استفاده از دستگاه مولتی پارامتر قبل حمل و الکترودهای مناسب تعیین شد. مقادیر بقیه پارامترها نیز در آزمایشگاه با استفاده از روش‌های استاندارد موجود برآورد شد.

برای مقایسه و تعیین اختلاف معنی‌داری بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی در دوره آماری مورد بررسی (بین چاه‌ها و چشمه‌ها)، از آزمون T زوجی در محیط نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد و تجزیه واریانس داده‌ها صورت گرفت. قبل از اجرای آزمون T زوجی، فرض نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون اندرسون — دارلینگ<sup>۱</sup> بررسی شد. در آزمون T زوجی چنانچه مقدار p-value محاسبه شده توسط نرم‌افزار، بزرگ‌تر یا مساوی با ۰/۰۵ باشد، با احتمال ۹۵ درصد فرض  $H_0$  یعنی فقدان اختلاف معنی‌دار بین میانگین تیمارهای موردبررسی پذیرفته و فرض  $H_1$  رد می‌شود؛ اما چنانچه مقدار p-value محاسبه شده کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد، با احتمال ۹۵ درصد فرض  $H_0$  رد و فرض  $H_1$  یعنی وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین تیمارهای موردبررسی پذیرفته می‌شود.

<sup>1</sup> Anderson- Darling Test

سپس نقشه‌های مربوط به تغییرات مکانی پارامترهای آب زیرزمینی در محیط GIS و با استفاده از روش IDW ترسیم و روند تغییرات آنها در محدوده مورد مطالعه تفسیر شد. هدف اصلی از انتخاب روش IDW در پژوهش حاضر، تعیین مقدار پارامترهای فیزیکوشیمیایی بررسی شده در مناطقی بود که در آنجا چاه پیژومتری یا چشمه وجود نداشت. این کار نیز با توجه به نقاط همسایه و با میانگین‌گیری از نقاط نمونه — که در همسایگی هر نقطه مجهول قرار داشت — انجام شد (Maghami et al, 2011; Izanloo et al., 2022).

برای تحلیل بهتر داده‌های هیدروژئوشیمی و ترسیم دیاگرام‌های استیف، پایپر و درووف، از نرم‌افزار Aq.QA استفاده شد. در نهایت، برای شناسایی عوامل حاکم بر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی و بررسی روابط بین متغیرها، از دیاگرام گیبس، نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی استفاده شد. تمامی نمودارهای مذکور در محیط Excel تهیه شد.

## ۵- یافته‌ها (نتایج)

### ۵-۱- شیمی کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی

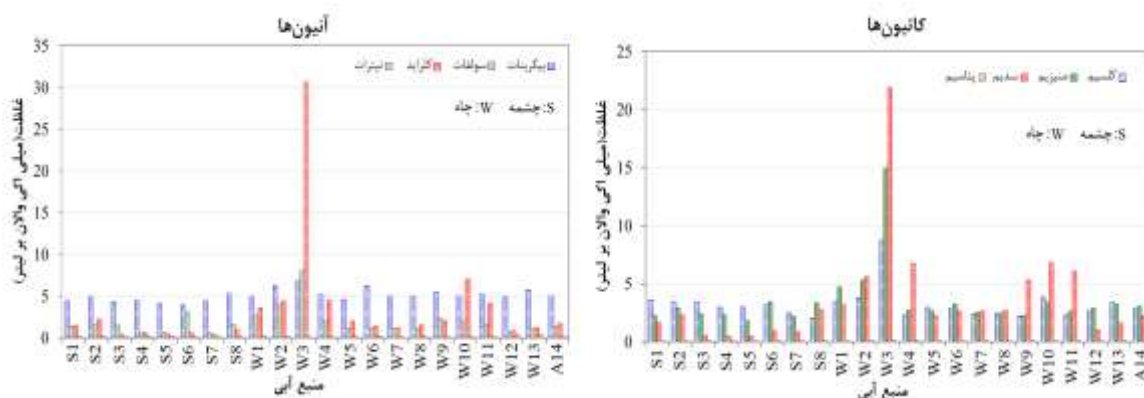
میزان آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در منابع آب زیرزمینی، املاح موجود در آب را تشکیل می‌دهد. به طور کلی، این املاح به جنس سنگ‌ها، میزان انحلال کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها و سرعت و مسیر حرکت آب‌های زیرزمینی بستگی دارد. مقادیر متوسط ده ساله پارامترهای فیزیکوشیمیایی منابع آبی مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۲، تغییرات غلظت یون‌ها را در منابع آبی مورد مطالعه نشان می‌دهد. براین اساس، بیشترین تغییر غلظت یون‌ها در چاه ۳ و ۱۰ می‌باشد. همچنین تغییرات در چشمه‌ها به مراتب کمتر از چاه‌های حفر شده در دشت است؛ به طوری که بیش از پنجاه درصد نمونه‌های آب مربوط به چشمه‌ها، سرشار از یون‌های کلسیم و منیزیم است؛ در حالی که در اکثر چاه‌ها، سدیم کاتیون غالب آب زیرزمینی است. آنیون بی‌کربنات ( $\text{HCO}_3^-$ ) نیز در هر دو منبع آبی چاه و چشمه غالب می‌باشد. در دو چاه ۳ و ۱۰، یون کلراید غالب است که این امر می‌تواند از نفوذ آب شور از سفره‌های پایینی به داخل آب زیرزمینی سرچشمه گرفته باشد.

خلاصه نتایج آماری آزمون T زوجی بین تغییرات برخی از پارامترهای هیدروژئوشیمیایی چاه‌ها و چشمه‌های مورد مطالعه، در جدول ۳ ارائه شده است. براین اساس از ده پارامتر هیدروژئوشیمیایی مورد بررسی، مقادیر p-value آزمون T زوجی برای تنها یک پارامتر بی‌کربنات کمتر از ۰/۰۵ محاسبه شد. این امر بیانگر آن است که مقدار بی‌کربنات در چاه‌ها و چشمه‌ها اختلاف معنی‌داری دارد. در مقابل در ۹ پارامتر، مقادیر p-value آزمون T زوجی بیش از ۰/۰۵ است؛ از این رو، در نود درصد از پارامتر هیدروژئوشیمیایی مورد بررسی، تغییرات در چاه‌ها و چشمه‌ها فاقد اختلاف معنی‌دار است.



جدول ۲: متوسط میزان پارامترهای فیزیکوشیمیایی منابع آبی مورد مطالعه (غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها برحسب meq/L، TDS برحسب mg/L و EC برحسب  $\mu\text{mho/cm}$  است)

Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TDS	EC	pH	ایستگاه	نوع منبع
۳/۵۳	۲/۲۶	۱/۶۵	۰/۰۴	۴/۴۷	۱/۴۴	۱/۴۶	۰/۱۷	۴۶۹/۳۳	۷۳۳/۸۳	۷/۵۰	S1	چشمه
۳/۴۶	۲/۹۲	۲/۳۲	۰/۰۴	۴/۸۴	۱/۵۳	۱/۲۲	۰/۱۹	۵۳۹/۱۱	۸۴۴/۱۱	۷/۵۲	S2	
۳/۴۴	۲/۴۱	۰/۵۱	۰/۰۴	۴/۳۳	۱/۴۹	۰/۵۱	۰/۱۵	۳۹۸/۸۹	۶۲۱/۲۲	۷/۵۰	S3	
۲/۹۶	۲/۳۱	۰/۵۱	۰/۰۶	۴/۵۴	۰/۵۴	۰/۶۴	۰/۱۹	۳۶۳/۱۷	۵۶۴/۳۹	۷/۷۶	S4	
۲/۹۹	۱/۸۳	۰/۴۷	۰/۰۴	۴/۱۲	۰/۶۶	۰/۴۵	۰/۱۹	۳۲۴/۳۳	۵۰۴/۴۴	۷/۶۴	S5	
۳/۲۳	۳/۴۳	۰/۹۹	۰/۰۴	۴/۹۷	۳/۰۲	۰/۶۲	۰/۱۵	۴۷۰/۵۰	۷۳۸/۷۸	۷/۶۱	S6	
۲/۵۳	۲/۱۹	۰/۸۷	۰/۰۳	۴/۴۳	۰/۶۱	۰/۴۸	۰/۱۱	۳۴۰/۴۴	۵۳۰/۰۶	۷/۸۲	S7	
۱/۹۸	۳/۳۳	۲/۷۸	۰/۰۵	۵/۳۴	۱/۶۰	۰/۹۹	۰/۱۵	۵۰۱/۲۸	۷۷۹/۰۰	۷/۹۱	S8	
۳/۴۴	۴/۶۹	۳/۱۹	۰/۰۵	۴/۸۸	۲/۷۲	۳/۶۰	۰/۲۲	۶۹۴/۸۳	۱۰۹۸/۲۸	۷/۷۱	W1	چاه
۳/۷۸	۵/۲۹	۵/۶۲	۰/۰۹	۶/۲۴	۳/۹۴	۴/۴۹	۰/۱۹	۹۰۶/۰۶	۱۴۲۲/۲۲	۷/۴۵	W2	
۸/۷۷	۱۴/۸۹	۲۱/۹۰	۰/۰۸	۶/۸۱	۸/۰۵	۳۰/۶۶	۰/۰۵	۲۶۶۹/۰	۴۳۷۱/۸۳	۷/۵۴	W3	
۲/۳۲	۲/۷۴	۶/۷۴	۰/۰۸	۵/۱۷	۲/۰۵	۴/۵۱	۰/۰۹	۷۰۹/۸۹	۱۱۲۶/۰۶	۷/۹۸	W4	
۲/۹۷	۲/۶۹	۲/۲۲	۰/۰۴	۴/۵۹	۱/۱۵	۲/۰۵	۰/۱۴	۴۸۳/۲۲	۷۵۷/۱۱	۷/۷۶	W5	
۲/۹۱	۳/۲۴	۲/۶۸	۰/۰۴	۶/۲۰	۱/۱۷	۱/۳۴	۰/۲۳	۵۵۰/۰۶	۸۲۶/۴۴	۷/۶۶	W6	
۲/۳۶	۲/۵۳	۲/۶۵	۰/۰۴	۵/۰۷	۱/۱۵	۱/۲۳	۰/۰۷	۴۶۱/۱۱	۷۱۱/۴۴	۷/۷۸	W7	
۲/۴۵	۲/۴۹	۲/۷۳	۰/۰۳	۴/۹۰	۱/۱۶	۱/۵۶	۰/۱۵	۴۶۶/۹۴	۷۳۰/۷۲	۷/۶۰	W8	
۲/۱۸	۲/۳۱	۵/۳۱	۰/۰۴	۵/۴۹	۲/۲۷	۲/۰۶	۰/۰۶	۵۹۳/۶۱	۹۳۰/۸۳	۷/۷۳	W9	
۳/۸۳	۳/۴۱	۶/۷۸	۰/۰۳	۵/۰۶	۱/۹۴	۲/۰۵	۰/۱۰	۸۷۶/۳۳	۱۳۹۴/۲۲	۷/۵۵	W10	
۲/۲۸	۲/۶۳	۶/۰۸	۰/۰۴	۵/۱۷	۱/۶۱	۴/۱۳	۰/۰۵	۶۶۹/۰۶	۱۰۵۷/۳۳	۷/۹۱	W11	
۲/۶۸	۲/۹۱	۱/۰۲	۰/۰۳	۴/۸۸	۰/۷۷	۰/۸۲	۰/۳۱	۴۰۳/۸۹	۶۳۲/۸۹	۷/۶۱	W12	
۳/۳۷	۳/۲۷	۱/۵۸	۰/۰۴	۵/۷۲	۱/۱۰	۱/۲۳	۰/۱۹	۵۰۰/۵۰	۸۰۱/۴۴	۷/۶۴	W13	
۲/۹۲	۳/۰۷	۲/۲۱	۰/۰۴	۵/۰۳	۱/۳۷	۱/۷۷	۰/۱۳	۵۰۲/۶۰	۷۸۵/۵۶	۷/۶۰	W14	



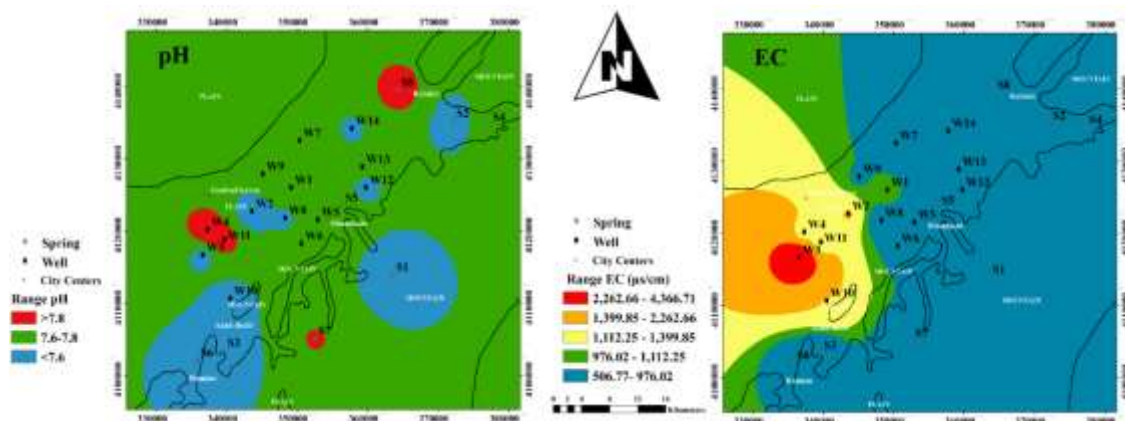
شکل ۲: نمودار تغییرات متوسط غلظت یون‌های اصلی در منابع آبی مورد مطالعه

جدول ۳: مقادیر p-value آزمون T بین مقادیر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی چاه‌ها و چشمه‌های مورد مطالعه

پارامتر	EC	TDS	NO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	K	Na	Mg	Ca	P-Value
	۰/۱۳۶	۰/۱۳۲	۰/۷۷۴	۰/۱۷۸	۰/۲۶۴	۰/۰۰۳	۰/۲۵۷	۰/۰۵۸	۰/۲۳۶	۰/۶۴۳	

### ۲-۵- توزیع مکانی پارامترهای هیدروشیمیایی

بر اساس تغییرات مقدار pH منابع آبی مورد مطالعه، به جز چشمه شماره ۷ که pH قلیایی ( $> 7/8$ ) دارد، بقیه چشمه‌ها دارای آب خنثی است (شکل ۳-ا). در میان چاه‌های مورد بررسی، تعداد آنهایی که pH قلیایی دارند به سه چاه ۴، ۸ و ۱۱ افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی دامنه نوسانات هدایت الکتریکی (EC) در چشمه‌ها و چاه‌های مورد مطالعه، به ترتیب بین ۵۰۴/۴۴ تا ۸۴۴/۱۱ و ۶۳۲/۸۹ تا ۴۳۷۱/۸۳ میکرو موس بر سانتی‌متر در نوسان است. از این رو، هدایت الکتریکی در چشمه‌ها نسبتاً کم است که علت آن، تغذیه چشمه‌ها از سازندهای آهکی می‌باشد (شکل ۳-ب). به طور کلی در قسمت‌های غربی دشت و در جهت حرکت آب زیرزمینی، میزان هدایت الکتریکی به بیشترین مقدار خود یعنی ۴۳۷۱ میکرو موس بر سانتی‌متر افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از نفوذ آب شور بین‌ذره‌ای باقیمانده از زمان رسوب‌گذاری باشد. روند تغییرات کل جامدات محلول نیز مشابه هدایت الکتریکی است؛ به طوری که در چاه شماره ۳ به بیشترین مقدار خود یعنی ۲۶۶۹ میلی‌گرم به لیتر می‌رسد.

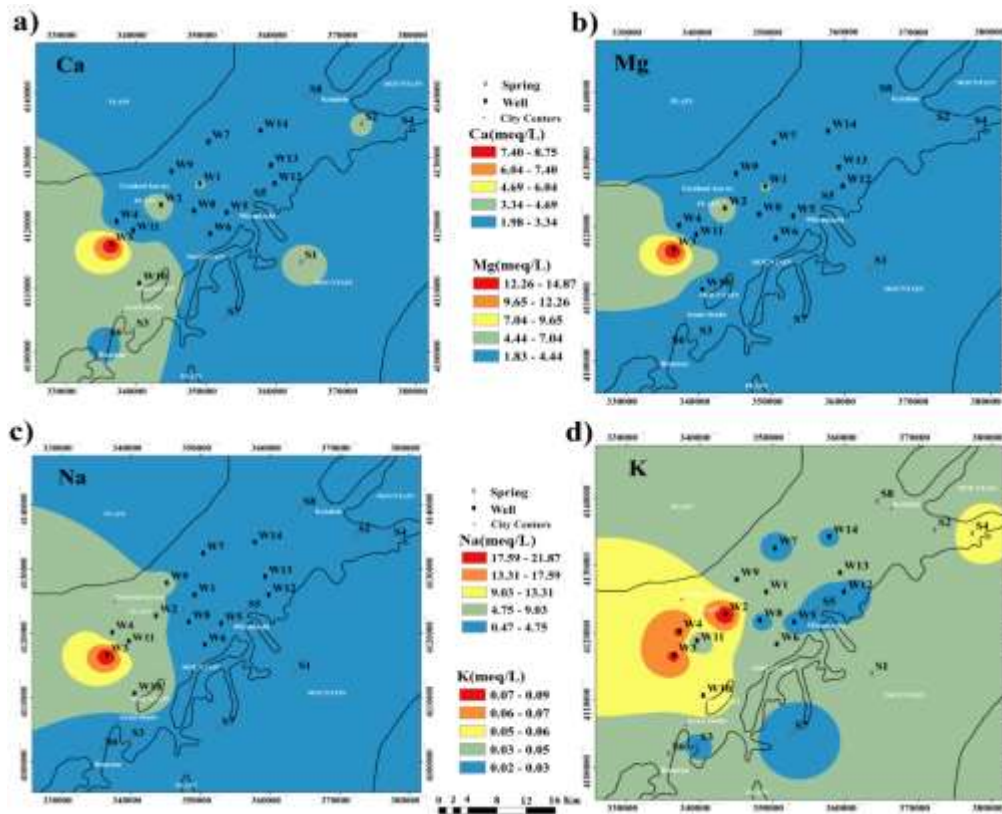


شکل ۳: پراکنده‌گی مکانی هدایت الکتریکی (a) و pH (b) آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه

مهم‌ترین منابع یون کلسیم در آب زیرزمینی، آمیبول‌ها، فلدسپات‌ها، گچ‌ها، پیروکسن‌ها، کلسیت، دولومیت و کاتیون‌های موجود در کانی‌ها، رسی است. شکل ۴، نقشه پهنه‌بندی یون کلسیم را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. به طور کلی، تغییرات این یون در منطقه در حدود ۱/۹۸ تا ۸/۷۵ میلی‌اکی والان در لیتر است. میزان کلسیم در سمت غرب و جنوب غربی دشت به خصوص چاه شماره ۳ رو به افزایش است (شکل ۴-ا). روند تغییرات یون منیزیم در محدوده مورد مطالعه نیز مشابه یون کلسیم است؛ به طوری که بیشترین مقدار این یون در چاه شماره ۳ به میزان ۱۴/۸۹ می‌باشد. این امر، به دلیل وجود لایه‌هایی با کیفیت بد و با نفوذ آب شور از لایه‌های زیرسطحی می‌باشد. در بقیه نقاط محدوده مورد مطالعه، میزان منیزیم تقریباً بین ۱/۸ تا ۴/۴ میلی‌اکی والان در لیتر به صورت یکنواخت است (شکل ۴-ب).

انحلال هالیت، مهم‌ترین عامل افزایش غلظت یون سدیم در آب‌های زیرزمینی است. این یون همچنین می‌تواند از طریق هوازدگی فلدسپات‌ها، کانی‌های رسی و محلول‌هایی از قبیل میرابلیت به آب‌های زیرزمینی وارد شود. تغییرات یون سدیم در منطقه بین ۰/۴۷ تا ۲۱/۹۰ میلی‌اکی والان در لیتر است. تغییرات غلظت یون سدیم در اکثر مناطق دشت به جز قسمت غرب و جنوب غربی دشت منطقه نیز به‌طور یکنواخت می‌باشد. وجود سازند به همراه آبرفت رسی — مارنی، از عوامل اصلی افزایش میزان یون سدیم در این قسمت از دشت است (شکل ۴-۲).

بی‌کربنات، مهم‌ترین آنیون موجود در آب‌های طبیعی است. آب‌های دارای تیپ کربناته معمولاً در نواحی یافت می‌شود که سازندهای آهکی آبرفت را تغذیه می‌کنند. شکل ۵-۲، نقشه پهنه‌بندی یون بی‌کربنات را نشان می‌دهد. به طور کلی، تغییرات بی‌کربنات در محدوده مورد مطالعه نیز بین حدود ۴/۳۳ تا ۶/۸۱ میلی‌اکی والان در لیتر متغیر است. نتایج پهنه‌بندی این یون نشان می‌دهد که میزان بی‌کربنات در قسمت‌های شمال غرب منطقه رو به افزایش است. اگرچه در برخی از مناطق نظیر چاه‌های ۳، ۲ و ۶، میزان این یون افزایش چشمگیری داشته‌است.

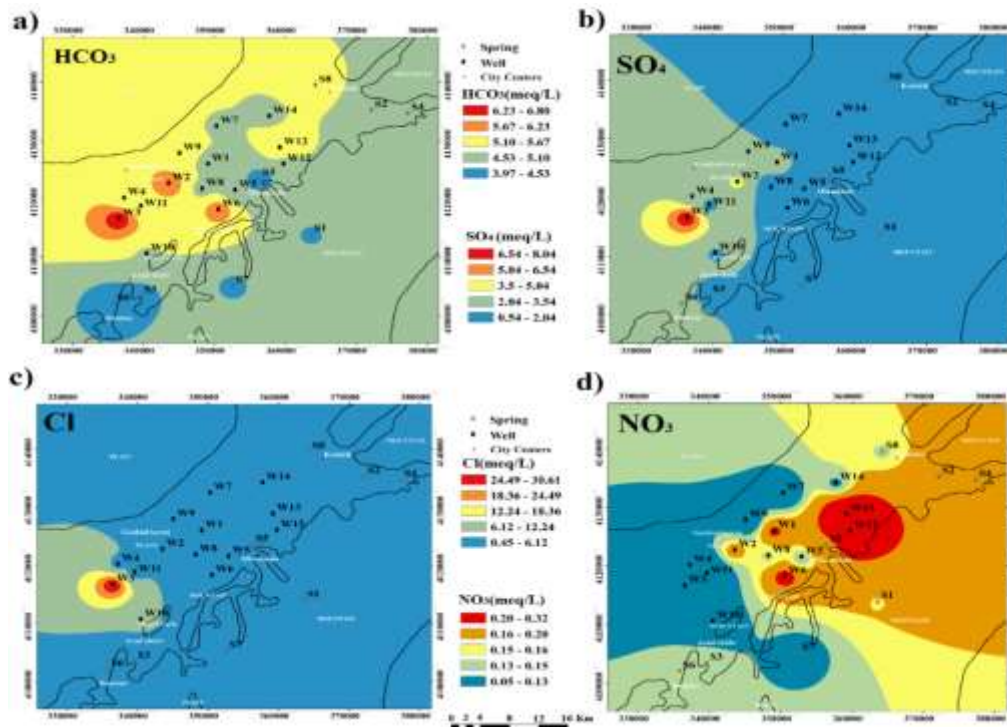


شکل ۴: پراکندگی مکانی کاتیون‌های اصلی آب زیرزمینی (Ca، Mg، Na و K) در محدوده مورد مطالعه

سولفات یکی دیگر از یون‌های اصلی موجود در آب زیرزمینی به‌خصوص در میانه‌های اکثر دشت‌ها است. عوامل ایجاد کننده این یون در آب‌های زیرزمینی شامل اکسایش سنگ‌های سولفیدی معدنی و انحلال سنگ‌های گچی (ژیپس) است. به طور کلی، تغییرات آن در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بین حدود ۰/۵۴ تا ۸/۰۵ میلی اکوی والان در لیتر نوسان دارد. در قسمت غرب دشت نیز میزان سولفات افزایش می‌یابد که علت آن، وجود لایه‌های با کیفیت بد و آبرفت رس - ماری نزدیک خروجی دشت است (شکل ۵-ب).

یکی از مهم‌ترین یون‌های موجود در آب زیرزمینی، کلراید است. منبع اصلی این یون در آب زیرزمینی، سنگ‌های رسوبی به خصوص سنگ نمک و رسوبات رسی و شیلی است. از دیگر منابع این یون می‌توان به سنگ‌های آذرین اشاره کرد. روند تغییرات یون کلر تا حد زیادی از تغییرات کاتیون‌ها به خصوص کاتیون سدیم پیروی می‌کند و به طور کلی، تغییرات آن در منطقه بین حدود ۰/۵۱ تا ۲۱/۹۰ میلی اکوی والان در لیتر نوسان دارد (شکل ۵-ج). غلظت یون کلر نیز در چاه شماره ۳ به بیشترین مقدار خود می‌رسد و به سمت غرب منطقه افزایش می‌یابد که علت آن می‌تواند نفوذ آب شور زیرسطحی - که در زمان پسروی دریای خزر در بین رسوبات زیرین باقی مانده است - به درون آبخوان آب شور باشد.

نیترات در غلظت‌های بالا بر سلامتی انسان تأثیر منفی دارد؛ بنابراین، مطالعه غلظت آن در آب‌های زیرزمینی بسیار مهم است. حداقل نیترات به میزان ۰/۰۵ میلی اکوی والان در لیتر، در چاه‌های ۳ و ۱۱ و حداکثر آن به میزان ۰/۳۱ میلی اکوی والان در لیتر، در چاه ۱۲ مشاهده شد (جدول ۱). با توجه به شکل ۵، برخلاف بقیه آنیون‌ها میزان نیترات در مرکز و شرق منطقه مورد مطالعه بیش از نقاط دیگر آن است. به نظر می‌رسد غلظت بالای نیترات با کاربری مناطق ارتباط مستقیمی دارد؛ به طوری که بیشترین غلظت یون نیترات در مناطق مسکونی دشت مورد مطالعه مشاهده می‌شود.



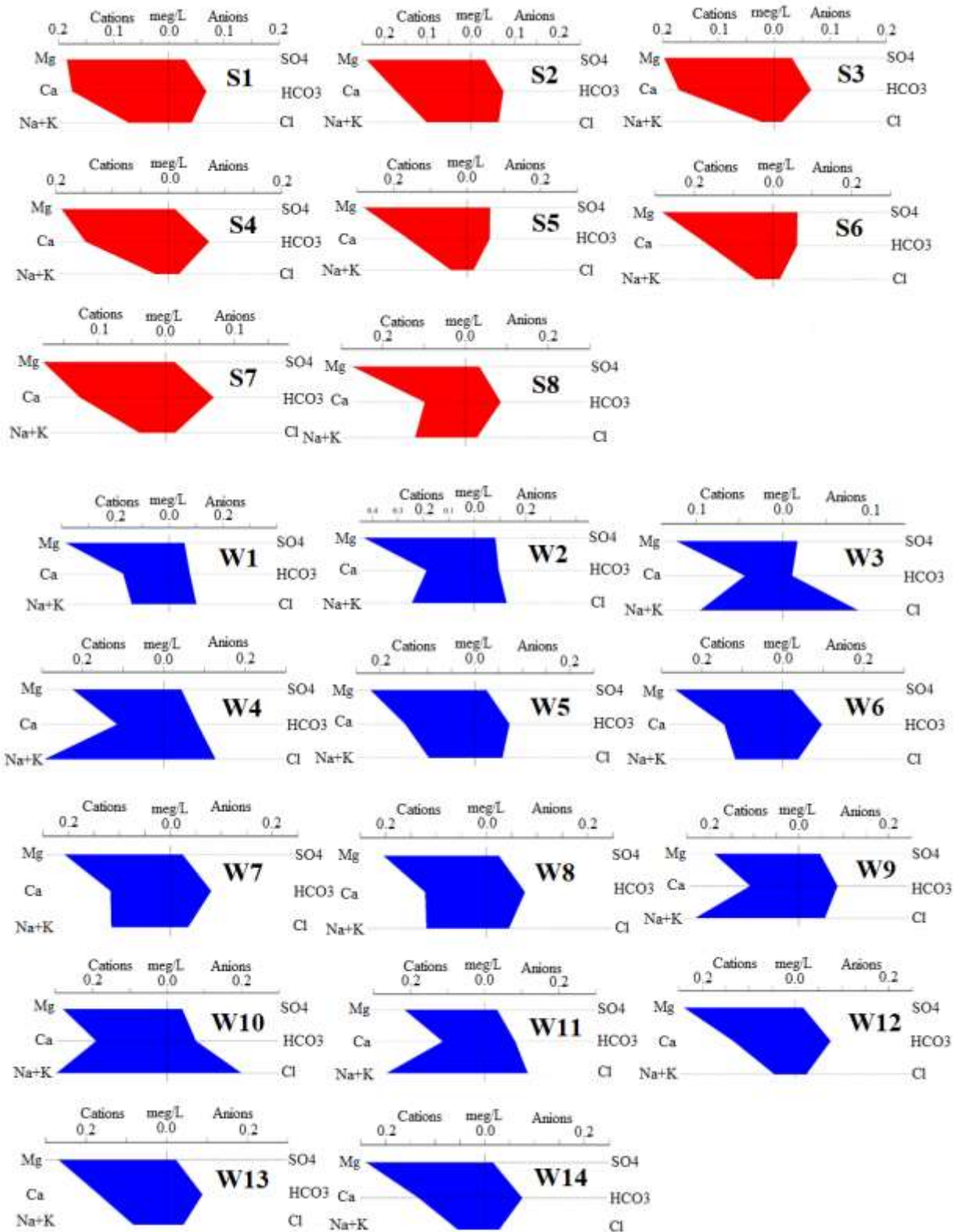
شکل ۵: پراکندگی مکانی آنیون‌های اصلی آب زیرزمینی ( $\text{HCO}_3$ ،  $\text{SO}_4$ ،  $\text{Cl}$  و  $\text{NO}_3$ ) در محدوده مورد مطالعه

### ۳-۵- تیپ و رخساره هیدروژئوشیمیایی

برای تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی چشمه‌ها و چاه‌های مورد مطالعه، به ترتیب از دیاگرام‌های استیف و پایپر استفاده شد (شکل ۶). بر اساس دیاگرام استیف، به جز چشمه شماره ۶ — که دارای تیپ سولفات منیزیک است — بقیه چشمه‌ها تیپ بی‌کربنات منیزیک ( $\text{Mg-HCO}_3$ ) دارند (جدول ۳). این امر بیانگر آن است که سنگ مخزن تغذیه‌کننده چشمه‌ها بیشتر از نوع دولومیتی است؛ اما در سنگ مخزن چشمه شماره ۶ احتمال دارد کانی‌های سولفات نظیر ژپس وجود داشته باشد.

برخلاف چشمه‌ها، رنج وسیعی از تیپ آب در چاه‌های پیژومتری ( $\text{Na-HCO}_3$  و  $\text{Na-Cl}$ ،  $\text{Mg-Cl}$ ،  $\text{Mg-HCO}_3$ ) دیده می‌شود. مشابه چشمه‌ها، بی‌کربنات منیزیک تیپ غالب آب زیرزمینی در این بخش از دشت است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تمامی چاه‌هایی که در حاشیه ارتفاعات حفر شده‌اند، به دلیل تغذیه توسط جبهه کوهستان (با سنگ مخزن آهکی از نوع دولومیت) تیپ بی‌کربنات منیزیک دارند. با دور شدن از این جبهه، نوع آب زیرزمینی تغییر می‌یابد؛ به طوری که ابتدا یون کلر جایگزین بی‌کربنات می‌شود و تیپ آب به کلرید منیزیک ( $\text{Mg-Cl}$ ) تغییر می‌کند و در نهایت با به تکامل رسیدن آب از نظر هیدروژئوشیمیایی، به کلرید سدیک ( $\text{Na-Cl}$ ) تبدیل می‌شود. چاه شماره ۷ نیز با وجود اینکه با حاشیه ارتفاعات فاصله زیادی دارد، همچنان دارای تیپ بی‌کربنات منیزیک (تیپ منطقه تغذیه) است. همجواری این چاه با سد گلستان و احتمال تغذیه آب زیرزمینی توسط آب‌های سطحی ناشی از کف دریاچه سد، می‌تواند دلیلی بر ثابت ماندن تیپ بی‌کربنات منیزیک در این قسمت از دشت باشد (شکل ۶).



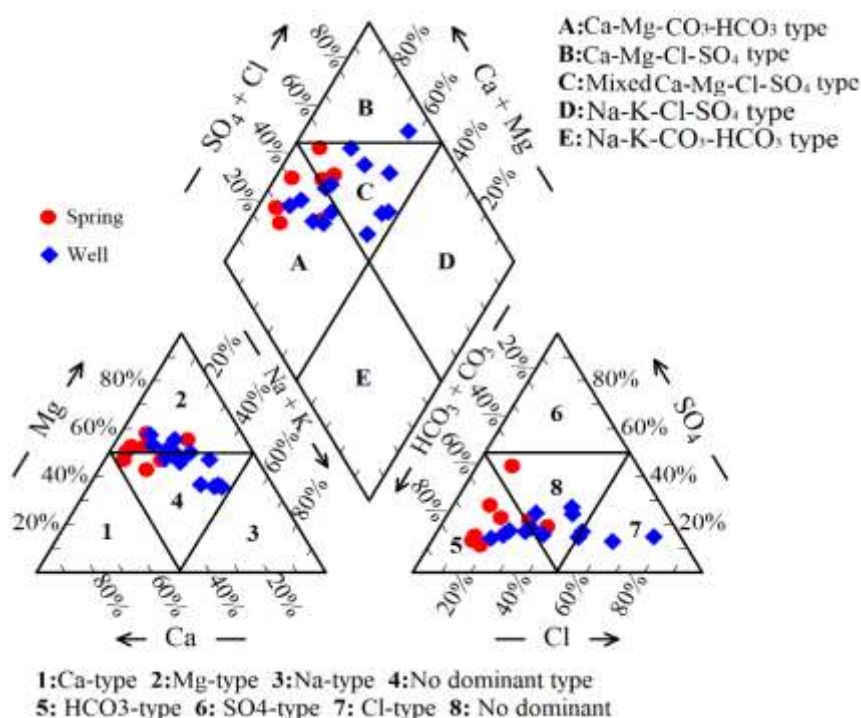


شکل ۶: تغییرات تیپ آب در چشمه‌ها (به رنگ قرمز) و چاه‌های (به رنگ آبی) منطقه مورد مطالعه

جدول ۳: تیپ و رخساره منابع آبی (چاه و چشمه) در محدوده مورد مطالعه

منبع آبی	غلظت آنیونها	غلظت کاتیونها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	نحوه توسعه
S1	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
S2	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
S3	HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
S4	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
S5	HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
S6	HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
S7	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
S8	HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub> > Cl	Mg > Na+K > Ca	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
W1	Cl > HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	کلروره	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W2	Cl > HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub>	Mg > Na+K > Ca	کلروره	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W3	Cl > SO <sub>4</sub> > HCO <sub>3</sub>	Mg > Na+K > Ca	کلروره	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W4	Cl > HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub>	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W5	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W6	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
W7	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W8	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W9	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Na+K > Mg > Ca	بی کربناته	سدیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W10	Cl > HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub>	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W11	Cl > HCO <sub>3</sub> > SO <sub>4</sub>	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	تیپ و رخساره	توسعه انتقالی
W12	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
W13	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی
W14	HCO <sub>3</sub> > Cl > SO <sub>4</sub>	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	تیپ و رخساره	توسعه اساسی

رخساره‌های هیدروشیمیایی آب زیرزمینی، تعیین‌کننده توده‌های آبی با ماهیت ژئوشیمی متفاوت است. رخساره‌ها تابعی از لیتولوژی، پویایی محلول‌ها<sup>۱</sup> و الگوهای جریان آبخوان است. اساس طبقه‌بندی رخساره‌ها، مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های عمده (برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر) آب زیرزمینی است. برای تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی شرق دشت گرگان، از نمودارهای پایپر استفاده شد. به طور کلی، با توجه به پراکنش نمونه‌ها بر اساس نمودار پایپر سه رخساره شیمیایی  $\text{Ca-Mg-CO}_3\text{-HCO}_3$ ،  $\text{Mixed Ca-Mg-Cl-SO}_4$  و  $\text{Ca-Mg-Cl-SO}_4$  قابل تشخیص است (شکل ۷) که از این بین رخساره بی‌کربناته  $\text{Ca-Mg-CO}_3\text{-HCO}_3$  و رخساره  $\text{Mixed Ca-Mg-Cl-SO}_4$  بیشترین فراوانی را دارد. این دو رخساره را می‌توان به دو تیپ آب‌های شیرین<sup>۲</sup> و ترکیبی<sup>۳</sup> تقسیم کرد.



شکل ۷: دیاگرام پایپر منابع آبی مورد مطالعه (چاه و چشمه) (Musaed et al, 2020)

تیپ شیرین از لحاظ سختی در رده سبک قرار دارد و نسبتاً شیرین و قابل نوشیدن است. مقدار مواد جامد محلول (TDS) این نوع آب، بین ۲۱۰ تا ۷۵۵ میلی‌گرم بر لیتر است و مقدار متوسط بی‌کربنات آن خیلی زیادتر از کلرید می‌باشد. کیفیت تیپ ترکیبی در مقایسه با تیپ آب شیرین پایین‌تر است. مقدار TDS آب‌های ترکیبی از ۵۰۰ تا ۹۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، متغیر و از نظر سختی جزء آب‌های سخت می‌باشد و مقدار بی‌کربنات آنها مشابه با آب‌های شیرین است. در این آب‌ها غلظت کلرید نسبت به آب‌های شیرین افزایش می‌یابد. به طور کلی، آب زیرزمینی چشمه‌ها و

<sup>1</sup> Solution Kinetics

<sup>2</sup> Fresh Type

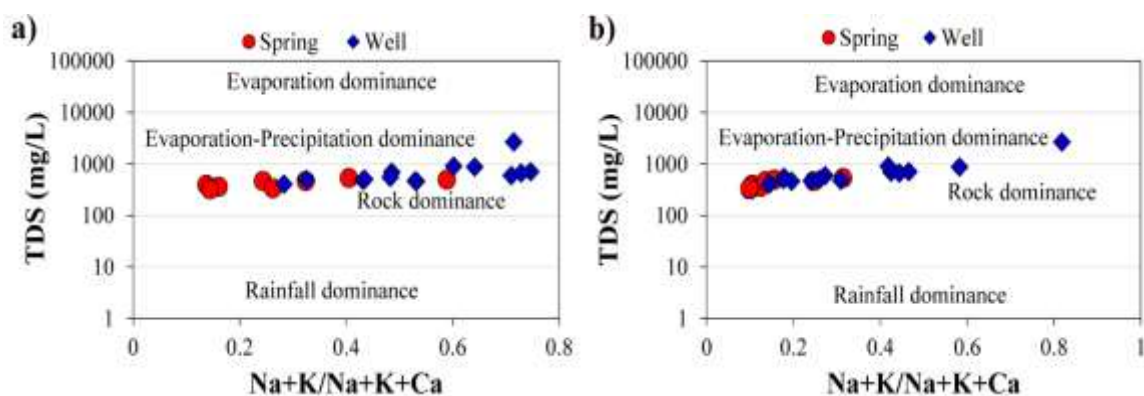
<sup>3</sup> Blended Type



قسمت شرقی دشت گرگان از نظر تکامل هیدروژئوشیمیایی، در ابتدای سیکل است و تمایل خود را برای رسیدن به میانه‌های سیکل نشان می‌دهد.

#### ۴-۵- تعیین عوامل کنترل‌کننده شیمی آب

برای تفسیر بهتر وضعیت هیدروژئوشیمیایی منابع آبی مورد مطالعه (چاه و چشمه) و عوامل کنترل‌کننده شیمی آب، از نمودار گیبس<sup>۱</sup> TDS در مقابل نسبت‌های کاتیونی  $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$  و آنیونی  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  استفاده شد (شکل ۸). با توجه به پراکندگی نمونه‌های مربوط به هر دو منبع آبی در نمودار گیبس، ترکیب شیمیایی تمامی نمونه‌ها — به جز یک نمونه مربوط به چاه — توسط سنگ مخزن چشمه‌ها یا چاه‌های پیزومتری موجود در دشت کنترل شد؛ از این رو، واکنش آب — سنگ مهم‌ترین عامل در تغییر کیفیت شیمیایی آب منابع آبی مورد مطالعه است. اگرچه نحوه پراکنش نمونه‌های مربوط به چاه‌ها، از تحلیل برخی از آنها برای ورود به منطقه تبخیر و رسوب‌گذاری حکلیت دارد، این امر با افزایش میزان مواد محلول و درنهایت شور شدن آنها همراه می‌باشد.



شکل ۸: عوامل کنترل‌کننده شیمی منابع آبی مورد مطالعه. (a) براساس کاتیون‌های غالب و (b) براساس آنیون‌های غالب

#### ۵-۵- نمودارهای ترکیبی

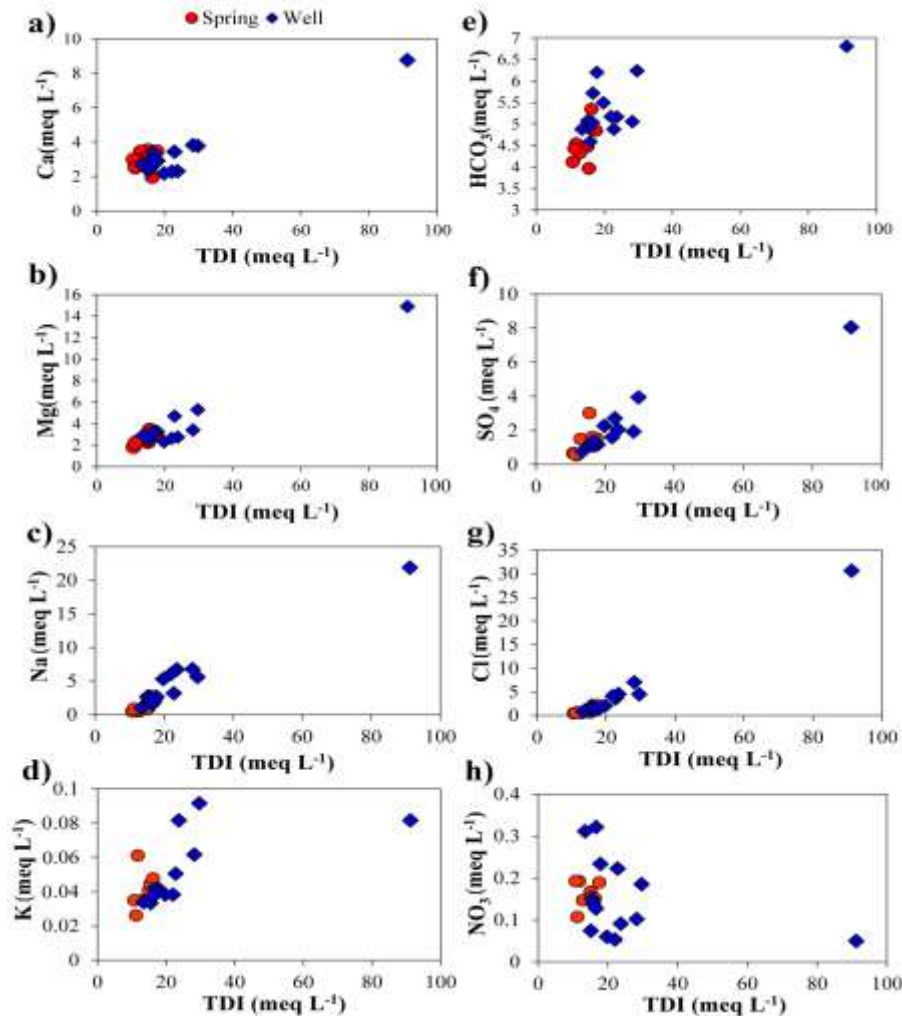
در مطالعات هیدروژئوشیمی برای تشخیص نوع فرایندهای هیدروژئوشیمیایی و تعیین منشأ و اختلاط آب‌ها، از نمودارهای ترکیبی یا دو متغیره<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. نمودارهای دو متغیره کل یون‌های محلول ( $TDI^3$ ) در مقابل سایر یون‌های عمده برای منابع آبی مورد مطالعه، در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به اینکه بین چهار یون منیزیم، سدیم، سولفات و کلراید و کل یون‌های محلول، رابطه خطی وجود دارد و با توجه به ماهیت یون‌هایی که با  $TDI$  رابطه خطی دارند، می‌توان نتیجه گرفت که احتمال دارد آب شور حاوی یون‌های مذکور در آب‌های زیرزمینی منطقه دشت نفوذ کنند یا کانی‌های هالیت و سولفات کلسیم در این آب‌ها انحلال یابند. بر اساس پراکنش داده‌ها در شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که منبع تغذیه دو منبع آبی یکسان نیست؛ به طوری که در نمودارهای مربوط به اکثر یون‌ها، چشمه‌ها و برخی از چاه‌ها در یک منطقه تجمع یافته‌اند؛ در حالی که نمونه‌های مربوط به چاه‌ها پراکندگی کاملاً اتفاقی دارند. با

<sup>1</sup> Gibbs

<sup>2</sup> Scatter Plots

<sup>3</sup> Total dissolved ions

توجه به فراوانی سنگ‌های آهکی در ارتفاعات منطقه، می‌توان تغذیه آبخوان توسط این تشکیلات آهکی را مهم‌ترین منبع تغذیه‌کننده منابع آبی دانست. منبع دومی را که به پراکندگی نمونه‌ها منجر می‌شود و میزان TDI در آن بالا است، می‌توان به تغذیه آبخوان توسط تشکیلات رسی - ماری و نفوذ آب شور به سفره‌های زیرین نسبت داد.



شکل ۹: نمودارهای ترکیبی بین یون‌های اصلی و کل یون‌های محلول (TDI) در محدوده مورد مطالعه

### ۵-۶- نسبت‌های یونی ژئوشیمیایی

نسبت‌های یونی ژئوشیمیایی، شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی شیمیایی منابع آب است و استفاده از آنها، در تعیین منشأ نمک‌ها کمک فراوانی خواهد کرد ( Ghareh Mahmoodlu et al, 2019b & Hounslow, 1995a & Faryabi et al, 2010a). این نسبت‌ها متأثر از ترکیب شیمیایی کانی‌های محلول در آب است و مقدار کانی انحلال‌یافته، در درجه بعدی اهمیت قرار دارد (Ghareh Mahmoodlu et al, 2019 c & Faryabi et al, 2010b). از مهم‌ترین این نسبت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

— **نسبت  $(Ca^{2+}/Mg^{2+})$ :** مقدار میانگین این نسبت در بیشتر چشمه‌ها و چاه‌های منطقه مورد مطالعه، بیش از یک و کمتر از سه محاسبه شد (شکل ۱۰-ا). این مقدار از تغذیه آب زیرزمینی توسط سازندهای آهکی، دولومیت — آهکی و آهک — دولومیتی، مربوط به دوران‌های مختلف زمین‌شناسی است. تنها در یک چاه و دو چشمه، مقدار این نسبت

( $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ ) کمتر از یک است که این امر، غالب بودن هواز دگی سیلیکات‌ها در دشت مورد مطالعه و واپاشی خاک و کاهش تدریجی عملکرد آن را نشان می‌دهد. در یک چشمه و برخی از چاه‌های مشاهده‌ای، این نسبت به یک نزدیک است؛ احتمالاً یون کلسیم از محلول استفاده می‌شود (Reddy et al, 2021).

— **نسبت  $Ca^{2+}/(Ca^{2+}+SO_4^{2-})$ :** از این نسبت برای تعیین منشأ کلسیم، انحلال ژپس، تعویض یونی و رسوب‌گذاری کلسیت استفاده می‌شود. به جز دو حلقه چاه مشاهده‌ای که مقدار این نسبت در آنها نزدیک به ۰/۵ است، در تمامی نمونه‌های مربوط به چشمه و چاه، این نسبت بزرگ‌تر از ۰/۵ می‌باشد (شکل ۱۰-b). این امر به تنوع رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی با مشخصات بی‌کربنات کلسیک و سدیک، کلرید سدیک و در نهایت رسوب‌گذاری کلسیت منجر می‌شود. این مورد با نتایج بخش رخساره‌های هیدروژئوشیمی کاملاً همخوانی دارد.

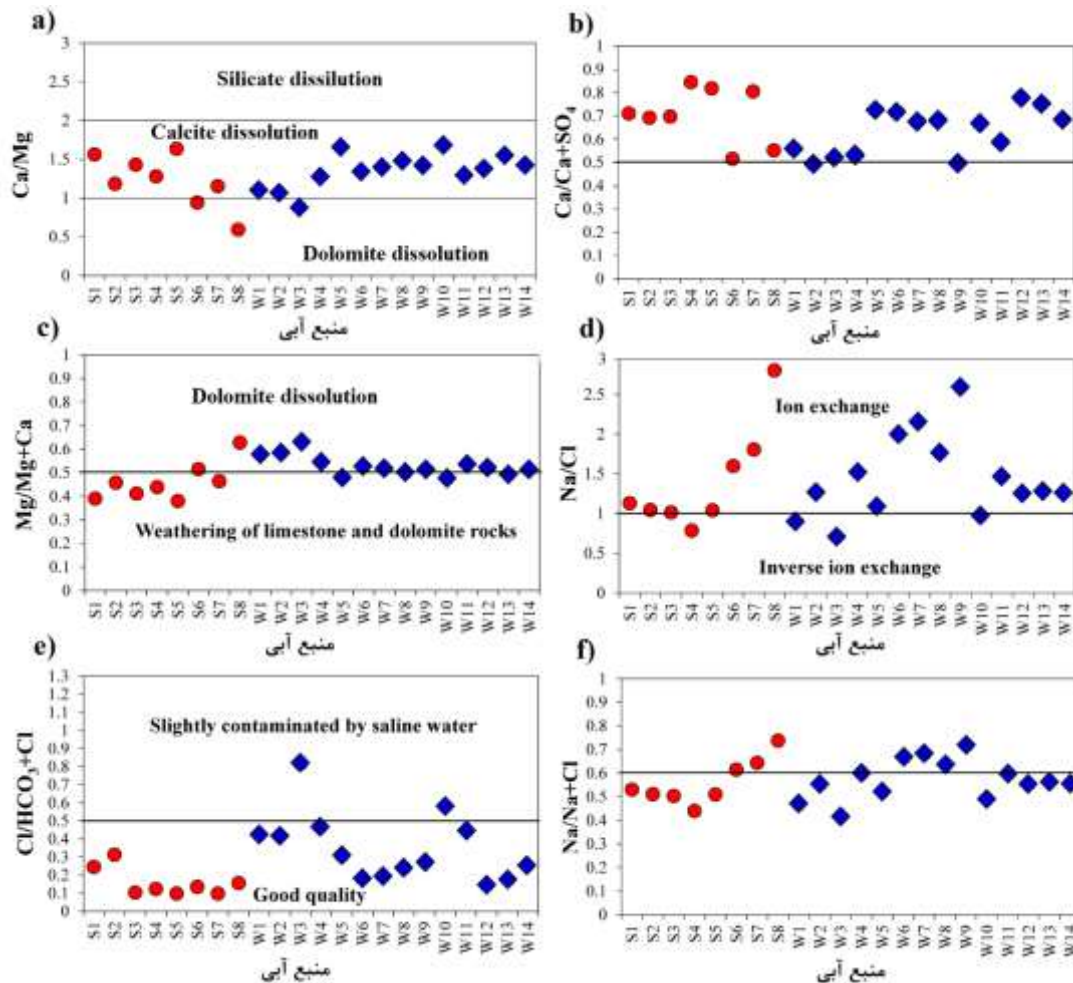
— **نسبت  $Ca^{2+}/(Mg^{2+}+Ca^{2+})$ :** این نسبت در اکثر چشمه‌ها و تعداد کمی از چاه‌های مورد مطالعه، کمتر از ۰/۵ است که هواز دگی سنگ‌های آهکی و دولومیتی را نشان می‌دهد. اما در بیشتر چاه‌های مشاهده‌ای، نزدیک به ۰/۵ یا اندکی بیش از ۰/۵ است که این امر، تمایل آب زیرزمینی به انحلال دولومیت یا خارج شدن کلسیم بر اثر رسوب‌گذاری کلسیت را نشان می‌دهد (شکل ۱۰-c).

— **نسبت سدیم به کلر ( $Na/Cl$ ):** نتایج این پژوهش نشان داد که تنها در چهار منبع آبی، میزان این نسبت به یک نزدیک است (شکل ۱۰-d)؛ از این رو، احتمال انحلال کانی‌هالیت در برخی از مناطق آب زیرزمینی وجود دارد. در اکثر نمونه‌ها نیز میزان این نسبت بیش از یک است ( $Na^+ > Cl^-$ ). بنابراین، منشأ اصلی سدیم در آبخوان مورد مطالعه و سنگ مخزن چشمه‌ها، تبادلات یونی طبیعی و غیر از انحلال کانی‌هالیت (احتمالاً از آلپیت) است.

— **نسبت  $(Cl^-/HCO_3^- + CO_3^{2-})$ :** نسبت یون کلر به مجموع کلر و کربنات (اندیس رول<sup>۱</sup>)، معیار مناسبی برای ارزیابی و تشخیص آلودگی آب‌های زیرزمینی به وسیله آب دریا یا آب‌های شور فسیلی است (Ghareh Mahmoodlu et al, 2019d & Hounslow, 1995b & Faryabi et al, 2010c). مقدار این نسبت در بیشتر نقاط دشت، زیر ۰/۵ است که از کیفیت خوب و تغذیه آبخوان توسط تشکیلات آهکی حکایت دارد. تنها در دو چاه مشاهده‌ای (۳ و ۱۰) این نسبت بین ۱/۳-۰/۵ است که این امر بیانگر نفوذ اندک آب شور، احتمالاً آب شور مربوط به سازندهای زیرین به سفره آب زیرزمینی است (شکل ۱۰-e).

— **نسبت  $Na^+/(Na^++Cl^-)$ :** در صورتی که میزان این نسبت برابر با ۰/۵ باشد، از انحلال هالیت در آب زیرزمینی حکایت دارد. در چهار منبع آبی مورد مطالعه، مقدار این نسبت نزدیک به یک است. مقادیر بیش از ۰/۵ برای این نسبت، از افزایش غلظت سدیم و ورود آن به آب زیرزمینی از منبعی غیر از انحلال هالیت حکایت دارد؛ به عبارت دیگر، فرایند تبادل کاتیونی و جانشینی یون‌های دو ظرفیتی نظیر کلسیم و منیزیم محلول در آب با سدیم موجود در رس‌ها، به آزاد شدن این یون در آب منجر می‌شود. تنها در پنج منبع آبی مقدار این نسبت بالاتر از ۰/۵ است (شکل ۱۰-f). در بقیه منابع آبی مورد مطالعه، ( $Na^+/(Na^++Cl^-) < 0.5$ ) است. این امر بیانگر کاهش غلظت سدیم به دلیل وجود رس‌های غنی از کلسیم (رسوبات مارنی) در مسیر جریان آب زیرزمینی است. آب زیرزمینی با شوری بالا ( $TDS > 500 \text{ mg/l}$ ) به آزاد شدن یون‌های کلسیم و منیزیم در آب و جذب سدیم توسط رس‌ها (فرایند تبادل یونی وارونه) منجر می‌شود.

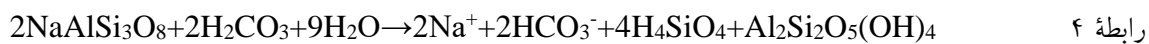
<sup>1</sup> Revelle



شکل ۱۰: نسبت‌های یونی منابع آبی مورد مطالعه، W: چاه و S: چشمه

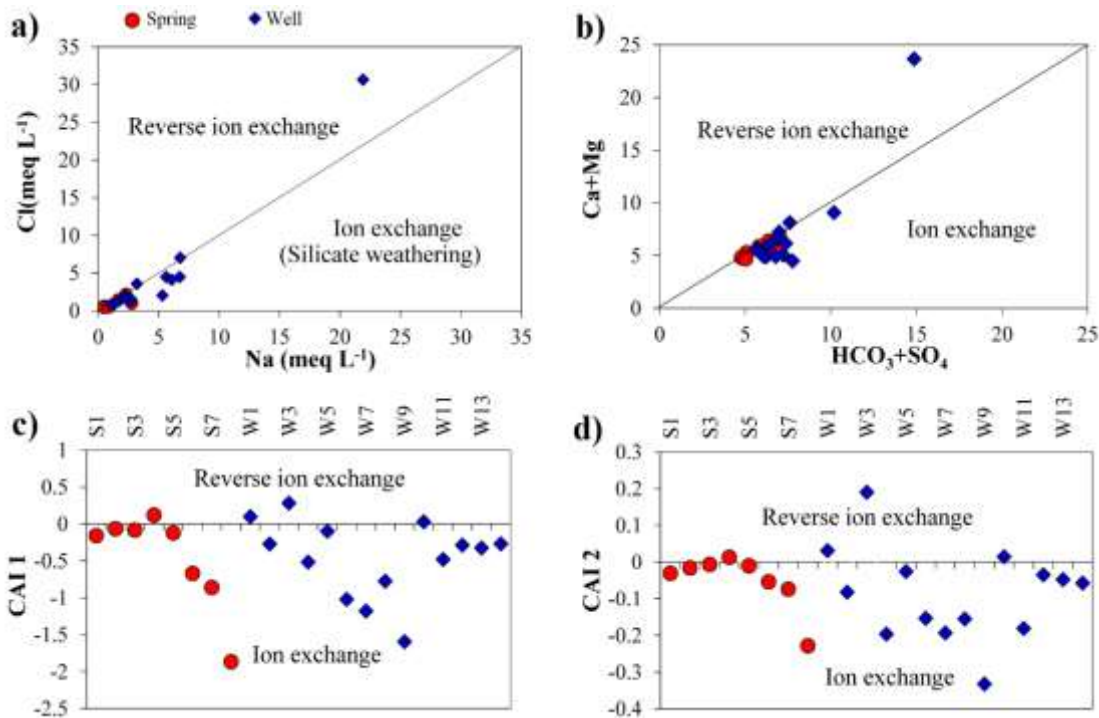
### ۵-۷- تبادل یونی

بررسی نمودار Na/Cl نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها در زیر  $(Na/Cl)=1$  واقع شده‌است (شکل ۱۱) و تحت تأثیر منشأ دوگانه یعنی نظیر تبادل یونی یا انحلال یک کانی سیلیکاته سدیم‌دار نظیر آلبیت مطابق رابطه ۴ قرار دارد:



در نمودار  $(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$  نسبت به  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$  خط ۱:۱ بیانگر فرایند انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس است (شکل ۱۱-b). در این نمودار اکثر نمونه‌ها زیر خط ۱:۱ قرار گرفته‌است (شکل ۱۱-b) که از تأثیر انحلال ژپس، هم‌زمان با پدیده تبادل کاتیونی در ترکیب شیمیایی منابع آب زیرزمینی مورد مطالعه حکایت دارد؛ در حالی که تعداد بسیار کمی از نمونه‌ها بالای خط ۱:۱ قرار گرفته و بیانگر عکس تبادل یونی در این نمونه‌ها است.

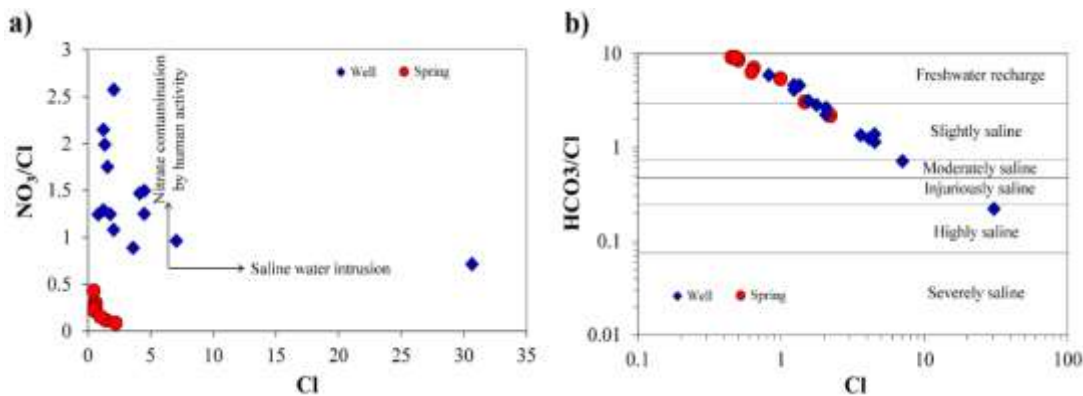
با توجه به شکل (۱۱-c و d)، تبادل یونی و تبادل یونی معکوس، هر دو در منابع آبی مورد مطالعه مشاهده می‌شود. اما پراکندگی و تمرکز نمونه‌ها در زیر خط تعادل، بیانگر تأثیرگذاری بیشتر تبادل کاتیونی در تکامل هیدروژئوشیمیایی منابع آبی مورد مطالعه است؛ این بدان معناست که در طول مسیر حرکت آب زیرزمینی، کلسیم و منیزیم جایگزین سدیم و پتاسیم می‌شود.



شکل ۱۱: نمودارهای ترکیبی چند متغیره منابع آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه

### ۸-۵ آلودگی نترات

نمودار نسبت  $NO_3/Cl$  در برابر  $Cl$ ، به شناسایی نفوذ آب دریا و آلودگی انسانی کمک می‌کند (Askari, 2015a & Tiwari et al, 2019a). با توجه به شکل ۱۲-a، در بیشتر چاه‌های دشت میزان  $NO_3/Cl$  زیاد و میزان  $Cl$  کم است که این امر، آلودگی اکثر چاه‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده بی‌رویه از کودهای ازته برای محصولات کشاورزی و نفوذ فاضلاب‌های شهری یا خانگی به آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تنها در یک چاه نسبت  $NO_3/Cl$  کم است، اما مقدار یون  $Cl$  افزایش چشمگیری دارد که این امر بیانگر نفوذ آب شور لایه‌های زیر سطحی به داخل آب زیرزمینی است. برخلاف چاه‌های واقع در دشت، تمامی چشمه‌ها مقادیر کمی نسبت  $NO_3/Cl$  و یون کلراید دارند؛ از این رو، چشمه‌ها کمتر تحت تأثیر آلودگی قرار گرفته‌اند و کیفیت شیمیایی بهتری دارند.



شکل ۱۲: نمودار نسبت  $NO_3/Cl$  در مقابل  $Cl$  (a) به همراه نمودار نسبت  $HCO_3/Cl$  در مقابل  $Cl$  (b) (Askari, 2015a & Tiwari et al, 2019a).

### ۹-۵- درجه شوری

بی‌کربنات و کلراید به ترتیب، یون‌های فراوان در آب‌های زیرزمینی و آب دریا (آب‌های شور) است؛ از این رو، نسبت یون بی‌کربنات به کلراید می‌تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه شناسایی میزان نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی بیان کند (Askari, 2015b & Tiwari et al, 2019b). با توجه به نمودار نسبت  $HCO_3/Cl$  در مقابل  $Cl$ ، شش منطقه با درجات مختلف آلودگی قابل تشخیص است (شکل ۱۲-ب). با توجه به پراکنندگی داده‌ها در این نمودار، اکثر چشمه‌ها در منطقه تغذیه آب زیرزمینی (آب شیرین) واقع شده‌اند. در مقابل، چاه‌های واقع در دشت نیز تمایل بیشتری به شور شدن از خود نشان می‌دهند؛ به طوری که چاه شماره ۳ در منطقه با شوری بالا و چاه شماره ۱۰ در محدوده با شوری کم واقع شده‌است. اگرچه در بیشتر چاه‌ها تا حدودی شور شدگی دیده می‌شود.

### ۶- بحث و نتیجه‌گیری

تغییرات غلظت یون‌ها در چشمه‌ها به مراتب کمتر از چاه‌های مشاهده‌ای در دشت است. همچنین بی‌کربنات آنیون، در هر دو منبع آبی چاه و چشمه غالب است. اگرچه در دو چاه ۳ و ۱۰، یون کلراید غالب می‌شود که این امر می‌تواند ناشی از نفوذ آب شور از لایه‌های زیرین به داخل آب زیرزمینی باشد.

باتوجه به توزیع مکانی پارامترهای فیزیکوشیمیایی، غلظت اکثر پارامترها در جهت جریان آب زیرزمینی به دلیل وجود لایه‌هایی با کیفیت بد، نفوذ فاضلاب‌های شهری و پساب‌های کشاورزی و نفوذ آب شور از لایه‌های زیرسطحی در حال افزایش است.

بررسی تیپ آب چشمه‌ها، از غالب بودن تیپ بی‌کربنات منیزیک حکایت دارد؛ از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که سنگ مخزن تغذیه‌کننده چشمه‌های مورد بررسی، بیشتر از نوع سنگ آهک دولومیتی است. مشابه چشمه‌ها، تمامی چاه‌های حفر شده در حاشیه ارتفاعات دارای تیپ غالب بی‌کربنات منیزیک است، اما با دور شدن از جبهه کوهستان و تغییر در غلظت برخی یون‌ها به دلیل عوامل محیطی و انسانی، تیپ آب زیرزمینی متنوع‌تر می‌شود ( $Mg-HCO_3$ ،  $Mg-Cl$ ،  $Na-Cl$  و  $Na-HCO_3$ ).

براساس تجمع و پراکنش نمونه‌ها در دیاگرام پایپر، سه رخساره هیدروشیمیایی  $Mixed$ ،  $Ca-Mg-CO_3-HCO_3$  و  $Ca-Mg-Cl-SO_4$  قابل تشخیص است. اگرچه از بین سه رخساره، دو رخساره بی‌کربنات- $Ca-Mg-CO_3-HCO_3$  (تیپ آب شیرین) و  $Mixed Ca-Mg-Cl-SO_4$  (تیپ آب ترکیبی)، به ترتیب بیشترین فراوانی را دارند.

واکنش آب - سنگ، عامل اصلی در تغییر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی و در پی آن کیفیت شیمیایی آب در منابع آبی مورد مطالعه است. نحوه پراکنش نمونه‌های مربوط به چاه‌ها، از تمایل برخی از آنها برای ورود به منطقه تبخیر و رسوب‌گذاری حکایت دارد که این امر با افزایش میزان مواد محلول و در نهایت شور شدن آنها همراه می‌باشد.

باتوجه به نمودارهای ترکیبی چند متغیره منابع آب زیرزمینی، فرایند تبادل یونی، در میزان غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب چشمه‌های مورد مطالعه نقش مهمی دارد. اگرچه در برخی مناطق دشت، تبادل یونی معکوس را می‌توان در آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه مشاهده کرد.



باتوجه به نمودارهای ترکیبی می‌توان نتیجه گرفت که احتمال نفوذ آب شور حاوی یون‌های سدیم، منیزیم، سولفات و کلراید یا انحلال برخی کانی‌ها نظیر هالیت و سولفات ژپس به خصوص در آب‌های زیرزمینی منطقه دشت وجود دارد.

منشأ اصلی سدیم در آبخوان مورد مطالعه و سنگ مخزن چشمه‌ها، تبادلات یونی طبیعی و غیر از انحلال کانی هالیت (احتمالاً از آلپیت) است. اگرچه در برخی از چاه‌های واقع در دشت، نسبت مذکور نزدیک به یک می‌باشد؛ از این رو، احتمال انحلال کانی هالیت یا نفوذ آب شور در برخی از مناطق دشت وجود دارد.

نتایج مربوط به نسبت‌های یونی مربوط به نفوذ آب شور در منابع آبی، از کیفیت خوب آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان توسط تشکیلات آهکی حکایت دارد. گرچه در برخی از چاه‌های واقع در دشت، احتمالاً نفوذ اندک آب شور مربوط به سازندهای زیرین به داخل سفره آب زیرزمینی یا ورود سدیم به آب زیرزمینی از منبعی غیر از انحلال هالیت باشد.

باتوجه به اینکه چشمه‌ها در منطقه تغذیه آب زیرزمینی (آب شیرین) واقع شده‌اند، کمتر تحت تأثیر آلودگی انسانی قرار می‌گیرند و در نتیجه، کیفیت شیمیایی بهتری دارند. در مقابل، چاه‌های واقع در دشت به دلیل فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده بی‌رویه از کودهای ازته برای محصولات کشاورزی و نفوذ فاضلاب‌های شهری یا خانگی به داخل آبخوان، به همراه نفوذ آب شور به داخل آب زیرزمینی در برخی مناطق دشت، تمایل بیشتری به شور شدگی از خود نشان می‌دهند.

#### منابع

1. Adimalla, N., & P. Li., (2018). Hydrogeochemical Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes and Integrated Interpretation with Water Quality Index Studies. *Environmental Processes*. 5, 363-388.
2. Aouiti, S.; Azaza, F.; Melki, F.; Hamdi, M.; Celico, F.; & M. Zammouri, 2020. Groundwater quality assessment for different uses using various water quality indices in semi-arid region of central, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 46669-46691.
3. Appelo, C. A. J., & D. Postma., (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd edition, Amsterdam, the Netherlands, 634 p.
4. Askri, B., 2015. Hydrochemical processes regulating groundwater quality in the coastal plain of Al Musanaah, Sultanate of Oman, *Journal of African Earth Sciences*, 106, 87-98.
5. Dowlati, J.; Lashkaripour, G. H.; & N. Hafezi Moghadas, 2014. Investigating The Factors Affecting the Zahedan'S Aquifer Hydrogeochemistry using Factor Analysis, Saturation Indices and Composite Diagrams' Method, *Journal of Water and Soil*, 28(4), 679-694. (in Persian)
6. EbrahimiMohammadi, S. H., 2017. Evaluation of hydrochemical properties and water quality of springs and wells in Zarivar Lake area, *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 4(4), 1049-1060. (in Persian)
7. Faryabi, M.; Kalantari, N.; & A. Negarestani, 2010. Evaluation of factors influencing groundwater chemical quality using statistical and hydrochemical methods in Jiroft Plain, *Scientific Quaternary Journal, Geosciences*, 20(77), 115-120.
8. Fazel Valipour, M. A., 2021. Hydrogeochemical study of groundwater in the southeast of Mashkan aquifer, Khorasan Razavi province, *Quarterly Journal on Water Engineering*, 9(3), 51-64. (in Persian)

9. Ghareh Mahmoodlu, M.; Sayadi, M.; Rajabi, M. T.; & M. Nazari, 2019. Investigation of springs in the east of Golestan province based on physicochemical properties and Formation, *Scientific Journal of Research Approaches in Earth Sciences*, 13, 1-13. (in Persian)
10. Gholamdokht Bandari, M.; Rezaee, P.; & Z. Gholamdokht Bandari, 2018. Assessment of the hydrogeochemical quality of underground in the Siahoo region, northeast of Bandar Abbas, *Iranian Journal of Health & Environment*, 11(1), 97-110.
11. Givi, M.; Jahangiri-Rad, M.; & H. R. Tashauoei, 2021. Assessment of Groundwater Quality in the Jajrood River Basin, Tehran, Iran: A Coupled Physicochemical and Hydrogeochemical Study, *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 9(3), 237-254.
12. Gorganli Davaji, A.; Jandaghi, N.; Mahmoodlu, M. G.; & Y. Nick Ghogh, 2021. Effect of natural flood spreading of March 2019 on the quantitative and qualitative characteristics of groundwater in floodplain at the end of Gorganroud basin, *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 535-550.
13. Hounslow, A., 1995. Water quality data: analysis and interpretation. 2nd edition. CRC press. 416 p.
14. Izanloo, S.; Ghareh Mahmoodlu, M.; Jandaghi, N.; & Ghorbani Vaghei, H., 2022. Evaluation of saturated hydraulic conductivity changes in surface and subsurface layers of loess soils of east of Golestan Province, *Applied Soil Research*, 10(2), 103-119. (in Persian)
15. Kalantari, N.; Irani Asl, E.; & H. Mohammadi, 2022. Assessment of quality and quantity of Baghmalek aquifer using statistical analysis hydrochemical method and GIS, *Hydrogeology*, 7(1), 11-24.
16. Maghami, Y.; Ghazavi, R.; Vali, A. A.; & S. Sharafi, 2011. Evaluation of spatial interpolation methods for water quality zoning using GIS Case study, Abadeh Township, *Geography and Environmental Planning*, 42(2), 171-182.
17. Mohebbi Tafreshi, A.; Rezaei, M.; & G. Mohebbi Tafreshi, 2016. A hydrogeochemical study of Golpayegan Plain Based on the examination of ionic ratios and environmental factors controlling the chemical composition of groundwater, *Journal of Environmental Studies*, 42(1), 49-63. (in Persian)
18. Musaed, H. A.; Al-Bassam, A. M.; Zaidi, F. K.; Alfaifi, H. J.; & E. Ibrahim, 2020. Hydrochemical assessment of groundwater in mesozoic sedimentary aquifers in an arid region: a case study from Wadi Nisah in Central Saudi Arabia, *Environmental Earth Sciences*, 79(6), 1-12.
19. Najafpour, N.; Torabi Poode, H.; & H. A. Yoonesi, 2020. Evaluation of groundwater quantity and quality on aquifer pollutant (Case Study: Lenjanat Plain, Isfahan), *Environmental Researches*, 11(21), 233-248.
20. Paternoster, M.; Buccione, R.; Canora, F.; Buttitta, D.; Panebianco, S.; Rizzo, G.; et al, 2021. Hydrogeochemistry and Groundwater Quality Assessment in the High Agri Valley (Southern Italy), *Hindawi, Geofluids*. Article ID 6664164, 15 pages.
21. Reddy, S. K. K.; Gupta, H.; Reddy, D. V.; & D. Kumar, 2021. The suitability of surface waters from small west-flowing rivers for drinking, irrigation, and aquatic life from a global biodiversity hotspot (Western Ghats, India), *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 38613-38628.
22. Rezaee, M., 2011. Assessing the controlling factors of groundwater hydrochemistry in Mond alluvial aquifer, Bushehr, *Journal of Environmental Studies*, 37(58), 105-116. (in Persian)
23. Sarath Prasanth, S. V.; Magesh, N. S.; Jitheshlal, K. V.; Chandrasekar, N.; & K. Gangadhar, 2012. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the coastal stretch of Alappuzha District, Kerala, India, *Applied Water Science*, 2(3), 165-175.
24. Soghra Izanloo, S.; Ghareh Mahmoodlu, M.; Jandaghi, N.; & H. Ghorbani Vaghei, 2022. Evaluation of Saturated Hydraulic Conductivity Changes in Surface and Subsurface Layers of Loess Soils of East of Golestan Province, *Applied soil research*, 10(2), 103-119.



25. Soltani, S. H., & A. Asghari Moghaddam., (2021). Hydrogeochemical study of groundwater resources in Bostan Abad plain using multivariate statistical methods. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 8(3), 691-706. (in Persian)
26. Srinivasamoorthy, K.; Gopinath, M.; Chidambaram, S.; Vasanthavigar, M.; & V. S. Sarma, 2013. Hydrochemical characterization and quality appraisal of groundwater from Pungar sub basin, Tamilnadu, India, *Journal of King Saud University-Science*, 26(1), 37-52.
27. Tiwari, A. K.; Pisciotta, A.; & M. De Maio, 2019. Evaluation of groundwater salinization and pollution level on Favignana Island, Italy, *Environmental Pollution*, 249(1), 969-981.
28. Whittemore, D. O.; Greggor, K. M. M.; & G. A. Marotz, 1989. Effects of variations in recharge on groundwater quality, *Journal of Hydrology*, 106(1-2), 131-145.
29. Zhang, Q.; Qian, H.; Xu, P.; Hou, K.; & F. Yang, 2021. Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111992.

# Hydrogeochemical Characteristics Assessment of Springs and Wells in the East of Gorgan plain

Mojtaba G. Mahmoodlu<sup>1</sup>: Assistant Professor in Environmental Hydrogeology, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gonbad Kavous

Javad Shirzadnia: M.Sc of Watershed Management, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Gonbad Kavous

Article History (Received: 2020.07.16

Accepted: 2023.01.21)



## Extended abstract

### 1- Introduction

Groundwater is one of the most important water resources that is always used by humans in different sectors. The composition and chemical quality of groundwater sources are always threatened by natural factors such as climate, soil type, geology, topography, precipitation and evaporation, as well as human factors such as population growth, extensive agricultural activities, and industrial development. Hence, hydrogeochemical researches can provide very detailed information about the effect of the aquifer materials of the study area, the route of recharge and discharge, the areas of evaporation from the groundwater, the effect of surface water on the groundwater of the region, as well as its quality in various uses for decision makers. This research was conducted to 1) compare and determine the significant difference (using the paired samples t-test) between physicochemical parameters in the statistical period under review (between wells and springs), 2) use geochemical ion ratios in order to discover the origin of ions and influencing processes that are responsible to alter the concentration of ions in the studied water resources, 3) investigate and identify the ion exchange process (normal and reverse) using chloro-alkaline indices and some hydrogeochemical graphs, and 4) identify saline water intrusion from subsurface layers or human pollution into the groundwater sources.

### 2- Methodology

In this study, 14 piezometric wells in the eastern part of Gorgan plain and 8 springs located in the heights between the cities of Ramyan, Minoodasht, Kalaleh and Gonbad were selected for hydrogeochemical study for which hydrogeochemical processes and qualitative changes of physicochemical parameters results (including Ca, Mg, Na, K, HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, TDS, pH and EC) were used over a period of 10 years. To compare and determine significant differences between physicochemical parameters in the statistical period under study between wells and springs, paired samples t-test and analysis of variance were performed in Minitab software. Before performing the paired sample t-test, normality of the data was checked using the Anderson-Darling test. In paired samples t-test, if the p-value estimated by the software is greater than or equal to 0.05, with a probability of 95%, the hypothesis H<sub>0</sub>, which means that there is no significant difference between the average of the investigated treatments, is accepted and the hypothesis H<sub>1</sub> is rejected. However, if the calculated p-value is less than 0.05, the hypothesis H<sub>0</sub> is rejected with a

<sup>1</sup> Corresponding Author: [m.g.mahmoodlu@gmail.com](mailto:m.g.mahmoodlu@gmail.com)

probability of 95% and the hypothesis  $H_1$ , which means that there is a significant difference between the averages of the investigated treatments, is accepted. Next, the maps related to the spatial changes of the groundwater parameters were plotted in the GIS environment and by using the IDW method, and then the trend of their changes in the studied area was interpreted. Aq.QA software was also used to better analyze the hydrogeochemical data and to draw the stiff and piper diagrams. Finally, to identify the factors governing changes in groundwater quality and also to investigate the relationships between variables, Gibbs diagram, ion ratios, and compositional diagrams have been used. All the mentioned graphs were prepared using Excel software.

### 3- Results

The spatial distribution of hydrochemical parameters showed that the concentration of most physicochemical parameters due to groundwater flow (from west to northwest) is increasing. The results of the investigation of the water type in the springs showed that magnesium bicarbonate ( $Mg-HCO_3$ ) is the dominant type of water in the studied springs. Unlike springs, a wide range of water type is observed in piezometric wells ( $Mg-HCO_3$ ,  $Mg-Cl$ ,  $Na-Cl$  and  $Na-HCO_3$ ). Also,  $Ca-Mg-CO_3-HCO_3$  bicarbonate facies and then mixed  $Ca-Mg-Cl-SO_4$  facies are the most abundant in water resources. Based on the distribution of water source samples in the Gibbs diagram, the chemical composition of all the samples, except for one sample related to the well, is controlled by the reservoir rock of springs or piezometric wells in the plain. Since the main ions show a linear relationship with TDI, it can be concluded that there is a possibility of intrusion of saline water containing sodium and chlorine ions or dissolution of halite minerals in the groundwater of the plain. The results of ion ratios showed that groundwater is recharged by dolomite, dolomite-limestone, and lime-dolomite formations associated to different geological periods is the main factor controlling hydrogeochemical parameters in the springs. But in the observation wells of the plain, in addition to the above cases, the weathering of silicates and the small intrusion of saline water into the ground water table have caused changes in hydrogeochemical parameters. The results of ion exchanges showed that the normal ion exchange process has a more effective role than the reverse ion exchange process in final concentration of main elements in the groundwater of studied water sources.

### 4- Discussion & Conclusions

The changes in the concentration of ions in the springs are much less than the observed wells in the plain. Bicarbonate is the dominant anion in both well and spring water sources. Nevertheless, in the two wells no. 3 and 10 chloride ions prevail, which can be caused by the intrusion of saline water from the lower layers into the groundwater. Based on the spatial distribution of the physicochemical parameters, the concentration of most of the parameters in the direction of the groundwater flow is increasing due to the presence of layers with poor quality, the infiltration of urban sewage and agricultural effluents, as well as the intrusion of saline water from the subsurface layers. The investigation of the water type of the springs shows that magnesium bicarbonate is the predominant water type. Therefore, it can be concluded that the reservoir rock that recharges the springs is more than dolomite limestone. Similar to the springs, all the wells drilled on the edge of the highlands have the dominant type of magnesium bicarbonate. But by moving away from the mountain front and changing the concentration of some ions due to environmental and human factors, the type of groundwater becomes more diverse. Based on the composition graphs, it can be concluded that there is a possibility of intrusion of saline water containing sodium, magnesium, sulfate and chloride ions or the dissolution of some minerals such as halite and gypsum sulfate, especially in the groundwater of the plain. The results the ionic ratios related to the intrusion of salt water in water resources show the good quality of the groundwater and the recharge of the aquifer by limestone formations. Considering that the springs are located in the groundwater recharge area (fresh water), they are less affected by human pollution and, as a result, they have better chemical quality. On the other hand, the wells situated in the plain, due to human activities such as the excessive use of nitrogen fertilizers for agricultural products and the infiltration of urban or domestic sewage into the aquifer along with the intrusion of saline water into the groundwater in some areas of the plain show a greater tendency to become salty.

**Key Words: Groundwater, Contamination, Hydrogeochemical evolution, Ion exchange processes, Ion ratios.**