

بررسی هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه هستیجان و تعیین کیفیت آن‌ها برای مصارف مختلف

علی محمد رجبی^{۱*}، کیوان مختاری^۲، محمدعلی علی‌آبادی^۳

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

۲. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، امور آب شهرستان دلیجان، دلیجان، ایران

۳. دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، محلات، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۱۶)

چکیده

در این مطالعه به منظور بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه هستیجان از نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی ۱۱ نمونه آب زیرزمینی انتخابی در منطقه مطالعه شده استفاده شده است. به این منظور شاخص‌های اصلی آب، مشخصات فیزیکوشیمیایی یون‌ها و غلظت مهم‌ترین عناصر سنگین، بررسی شده‌اند. به منظور ارزیابی کیفی منابع آب محدوده مطالعه شده، از دیگرام‌های پایپر، گیبس، شولر و ویلکوکس، نسبت جذب سدیم (SAR)، شاخص کلر-قلیائیت (CAI) و شاخص اشباع استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد آب‌های این منطقه جزء آب‌های سخت و بسیار سخت و عمدتاً تیپ و رخساره بی‌کربناته کلسیک و بی‌کربناته سدیک و منیزیک دارد. در این آب‌ها غلظت کاتیون‌های Mg^{2+} و Ca^{2+} بیشتر از کاتیون‌های Na^+ و K^+ و غلظت HCO_3^- بیشتر از SO_4^{2-} و Cl^- است. بررسی سنگ‌های دربرگیرنده منطقه نشان می‌دهد کیفیت شیمیایی آب‌های محدوده مطالعه شده، توسط سنگ‌های مسیر جریان و لیتولوژی مخزن کنترل می‌شود. نتایج حاصل از محاسبه شاخص اشباع نشان می‌دهد که این آب‌ها نسبت به کانی‌های دولومیت و کلسیت فوق اشباع و نسبت به کانی‌های سولفات‌ها تحت اشباع هستند. ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی از طریق مقایسه غلظت یون‌ها با استانداردهای موجود و همچنین بررسی شاخص‌ها و دیگرام‌های استاندارد نشان می‌دهد که کیفیت غالب آب‌های زیرزمینی منطقه برای کشاورزی مناسب و یا قابل استفاده است و برای مصارف شرب خوب، قابل قبول و متوسط‌اند. از نقطه نظر مصارف صنعتی نیز بیشتر نمونه‌ها خاصیت خوردگی دارند، همچنین بررسی‌های انجام شده روی عناصر سنگین شامل عناصر آهن، کروم، روی، منگنز، کادمیوم، نیکل، سرب، مس و فلوئور در منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد که به جز عنصر آهن، غلظت باقی عناصر سنگین پایین‌تر از حد استانداردهای جهانی (WHO, 2008) و ایران در محدوده مجاز است.

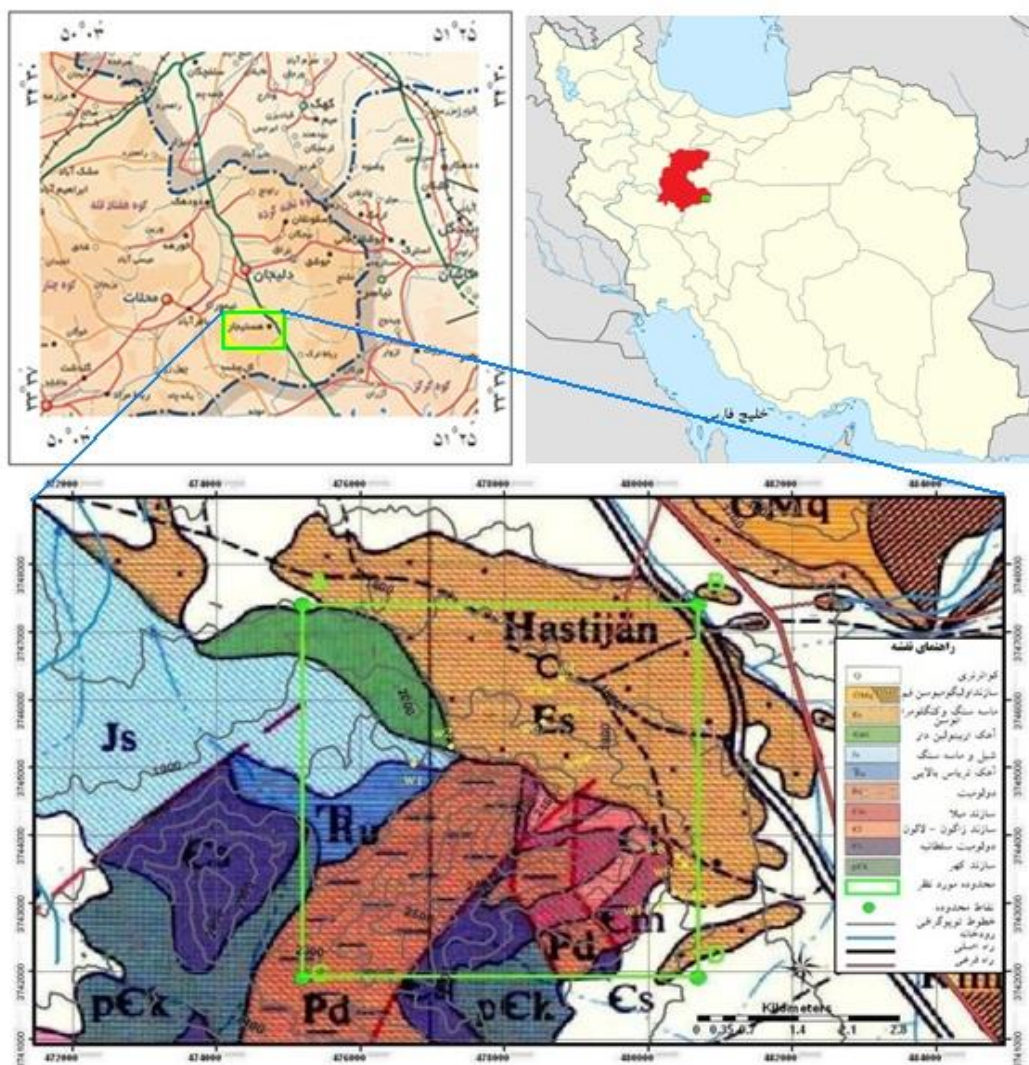
کلیدواژه‌گان: آب‌های زیرزمینی، تیپ آب، شاخص اشباع، هستیجان، هیدروژئوشیمیایی.

۱. مقدمه

زیرزمینی می‌کند. به همین دلیل در سال‌های اخیر به مدیریت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی توجه زیادی شده است (Foster *et al.*, 2000).

امروزه بخش‌های وسیعی از منابع آب زیرزمینی در نقاط مختلف ایران کیفیت مطلوبی ندارند و به دلایل مختلفی با آلودگی‌هایی همراه هستند. منطقه هستیجان واقع در ۱۵ کیلومتری جنوب- جنوب شرق شهرستان دلپجان نیز یکی از مناطقی است که احتمال آلودگی منابع آب گزارش شده است (Water resources of Central province, 2002). این منطقه از نظر اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک محسوب می‌شود (شکل ۱).

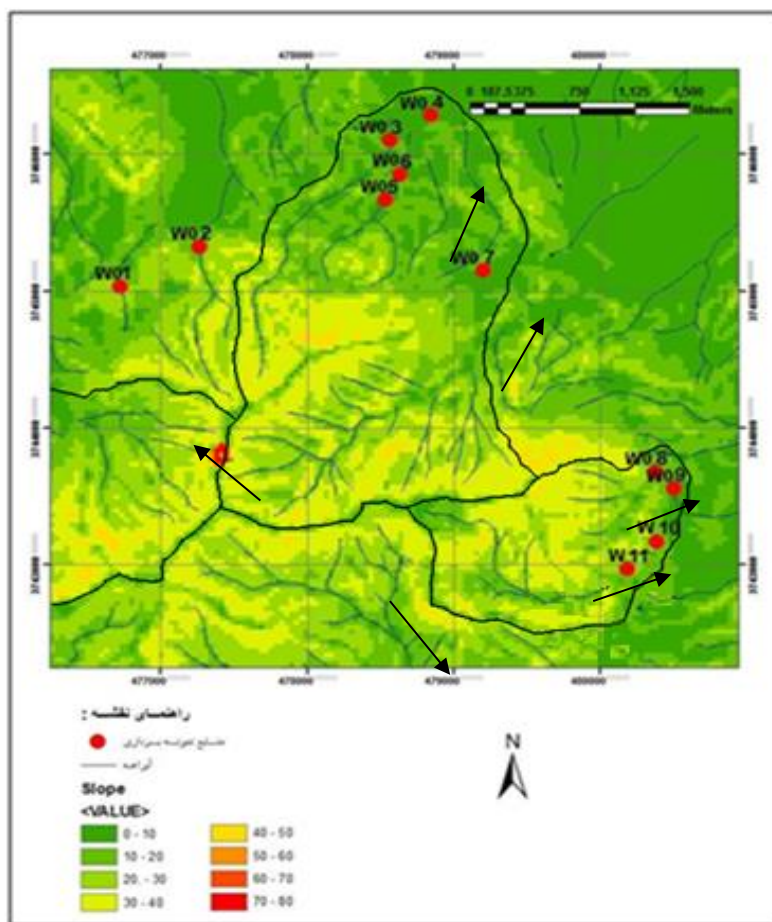
بررسی هیدروشیمیایی سیستم‌های جریان آب زیرزمینی معمولاً براساس یک سری اطلاعات جامع در مورد شیمی آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد که متأثر از فاکتورهای متفاوتی است. از آن جمله می‌توان به زمین‌شناسی محل، نوع و میزان هوازدگی سنگ‌ها، کیفیت آب تغذیه‌ای به داخل سفره و واکنش‌های هیدروژئوشیمیایی اشاره کرد (Subramani *et al.*, 2005; Coetsiers *et al.*, 2006). شناخت فرایندهای هیدروژئوشیمیایی کمک زیادی به مدیریت کمی و کیفی آب‌های



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه به همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری و راه‌های دسترسی به منطقه

رودخانه اصلی این منطقه موسوم به رودخانه شور، در قسمت غرب منطقه مطالعه شده واقع شده و از ارتفاعات موته سرچشمه گرفته است و در نهایت به سد پانزده خرداد منتهی می‌شود. کلیه منابع آبی در این مطالعه استفاده شده‌اند، منابع آب در منطقه مطالعه شده در سازند سخت‌اند و از سازند سخت سرچشمه می‌گیرند. در این مطالعه ابتدا اطلاعات هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی منطقه مطالعه شده جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شده است. سپس فاکتورهای کنترل‌کننده شیمی آب، مکانیسم حاکم بر شیمی آب و شاخص اشباع نمونه آب‌ها برای کانی‌های مختلف بررسی شده و در نهایت کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه برای مصارف مختلف ارزیابی شده است.

از نظر ژئومورفولوژی، منطقه بررسی شده به دو پهنه دشت و کوهستان تقسیم می‌شود. بلندترین نقطه با ارتفاعی حدود ۲۵۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد. در بخش شمالی منطقه، دولومیت سلطانیه توسط سری‌هایی از شیل‌های قرمز و سبز و ماسه‌های روشن میکادار پوشیده شده‌اند. سازندهای پرمین مستقیماً بر روی سازندهای پالئوزوئیک قدیمی (میلا، لالون، سلطانیه و کهر) و متامورفیک‌های پرکامبرین قرار گرفته‌اند (Aghanabati, 2004). در بعضی از مناطق، سازند قم بر روی دولومیت سلطانیه و سازندهای پرمین قرار گرفته‌اند. سازندهای آهکی پرمین و آهک‌های دولومیتی سلطانیه خرد شده و از نظر تراوایی قادر به هدایت ریزش‌های جوی هستند (شکل ۲).



شکل ۲. نقاط نمونه‌برداری در محدوده مطالعه شده حوضه آبریز چشمه‌ها
* بیکان‌ها جهت جریان آب‌های زیرزمینی را در محدوده مطالعه شده نشان می‌دهند.

۲. مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری برخی پارامترهای آب از قبیل دما، pH و هدایت الکتریکی (EC) در محل صورت گرفته است. نمونه‌های جمع‌آوری شده در آزمایشگاه براساس روش‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2008) و مؤسسه استاندارد و پژوهش‌های صنعتی ایران ۱۰۵۳ (Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 1992)، برای یون‌های اصلی موجود در آب آنالیز شده و نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه آب‌های زیرزمینی تجزیه و تحلیل شده است.

در این مطالعه به منظور بررسی هیدروشیمیایی و محاسبه شاخص اشباع برای کانی‌های مختلف از بانک نرم‌افزار PHREEQC استفاده شده است (Parkhurst and Appelo, 1999). شاخص اشباع برای کانی‌های مختلف و تأثیر لیتولوژی بر شیمی آب‌ها بررسی شده و در نهایت کیفیت این آب‌ها برای مصارف مختلف از قبیل شرب، کشاورزی و صنعت براساس استانداردهای موجود بررسی شده است.

در مطالعه حاضر به منظور بررسی و تحلیل کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه هستیجان، ابتدا شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی سفره بررسی و سازندهای مختلف منطقه از دیدگاه تأثیر در تشکیل منابع آب و تأثیر بر روی کیفیت آب‌ها تقسیم‌بندی شد. سپس از منابع آب انتخابی، نمونه‌برداری انجام شد. از آنجاکه هیچ‌گونه آب سطحی در منطقه مطالعه شده وجود ندارد، نمونه‌برداری‌ها تنها به آب‌های زیرزمینی منطقه محدود شده است. در نتیجه از بین ۱۱ نمونه آب برداشت شده، ۲ نمونه مربوط به چاه، ۴ نمونه مربوط به قنات و ۵ نمونه مربوط به چشمه بوده است (جدول‌های ۱ و ۲). از آنجاکه میزان دبی قنات و چشمه‌های موجود در منطقه در طول سال تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد بنابراین، نمونه‌برداری در یک نوبت و در دی‌ماه ۱۳۹۱ برداشت شده است.

جدول ۱. غلظت آنیون و کاتیون‌های اصلی (برحسب ppm) و برخی پارامترهای کیفی در نمونه‌های آب منطقه

نام نمونه	موقعیت نمونه	دبی	pH	E.C	T.H	T.D.S	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K
W01	چاه شماره ۱	۳۵	۷/۱۵	۵۶۰	۱۱۴۵	۲۴۰	۳۲۰	۲۶	۳۴	۷۰/۶	۲۹/۵	۲۲	۰/۵
W02	چاه شماره ۲	۶۰	۶/۱۷	۲۱۰۰	۱۱۶۰	۱۳۶۵	۱۱۰۰	۷۴	۱۳۲	۲۸/۴	۶۷/۷	۱۰۰	۱/۳
W03	قنات دره خشکه	۶	۷/۴۴	۹۵۷	۳۰۲	۴۹۸	۳۹۱/۷	۵۳/۵۲	۸۰/۲۱	۹۰/۸	۱۸/۲۳	۸۰/۴	۲/۷۳
W04	قنات دویدیا	۴	۷/۳۲	۹۶۲	۳۱۸	۵۱۰	۴۰۱	۵۳/۱۳	۱۰۲/۲	۹۸/۶	۱۸/۲۱	۸۴/۴	۳/۳۱
W05	قنات زرشکی بالا	۷	۷/۶۴	۸۶۱	۲۶۷	۴۴۷	۳۴۹	۵۲/۴۶	۷۲/۰۴	۷۴/۷	۱۹/۴۵	۷۳/۵	۲/۷۳
W06	قنات زرشکی پایین	۵	۷/۳۴	۹۷۳	۲۹۹	۵۰۵	۳۷۲/۱	۵۲/۱۱	۱۰۲/۳	۸۷/۶	۱۹/۴۵	۸۵	۳/۱۲
W07	چشمه جولادر	۴	۷/۹۴	۵۸۵	۱۸۷	۳۰۴	۱۹۵/۸	۴۰/۷۶	۶۹/۱۶	۴۴/۹	۱۸/۲۳	۴۸/۳	۲/۳۴
W08	چشمه رزبیده ۱	۱/۵	۷/۱	۶۱۲	۲۴۰	۳۳۸	۱۹۵/۵	۵۶/۵	۷۷/۸	۴۲/۱	۲۶/۷۴	۵۱	۲/۵۴
W09	چشمه رزبیده ۲	۳	۷/۶۸	۶۱۸	۱۹۸	۳۲۲	۱۹۵/۸	۵۷/۶	۷۶/۴۲	۴۱/۳	۲۹/۴۱	۵۰/۸	۲/۶۲
W10	چشمه گندیده ۱	۴	۷/۵۶	۶۱۴	۱۹۴	۳۱۹	۱۹۵/۸	۵۸/۴۹	۶۳/۳۶	۴۵/۷	۱۹/۴۵	۵۱/۷	۲/۷۳
W11	چشمه گندیده ۲	۱/۵	۷/۵	۶۰۹	۲۴۷	۳۳۶	۱۷۲/۶	۵۳/۱۷	۸۵/۰۱	۴۰/۱	۳۵/۷۴	۲۵/۳	۲/۳۴
	سازمان بهداشت جهانی WHO ۲۰۰۸	-	۸/۵	-	۵۰۰	۱۰۰۰	-	۲۵۰	۲۵۰	-	-	۲۰۰	-
	مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ۱۰۵۳	-	۹	-	۵۰۰	۱۵۰۰	-	۴۰۰	۴۰۰	-	-	۲۰۰	-

۳. نتایج

۱.۳. بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی

جدول ۱ مقادیر آماری پارامترهای شیمیایی و فیزیکی نمونه آب‌های زیرزمینی و همچنین جدول ۲ غلظت عناصر سنگین منطقه مطالعه شده که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۲۰ نمونه برداری شده را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که میزان EC بین ۵۶۰ تا ۲۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. بررسی مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌های آب‌های زیرزمینی منطقه نشان می‌دهد که شرایط آنیونی و کاتیونی حاکم به صورت $Ca > Mg > HCO_3 > SO_4 > Cl$ و $Na+K$ است. گسترش سنگ‌های کربناته در حوضه آبریز منطقه هستیجان و انحلال کانی‌های کربناته منشأ اصلی یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} در آب‌های زیرزمینی منطقه است و غلظت بالای یون HCO_3^-

در آب‌های زیرزمینی منطقه به منزله آنیون اصلی، عمدتاً ناشی از فرسایش و هوازدگی کانی‌های کربناته است. شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی و سرعت و جریان آب‌های زیرزمینی و وجود سنگ‌هایی که آب در محل تغذیه از آن‌ها عبور می‌کنند سبب شده است که مقدار EC، TDS، کلسیم، سدیم، پتاسیم، کربنات، بی‌کربنات، سولفات و کلراید در نمونه‌ها پایین‌تر از حد استاندارد جهانی و ایران برای مصارف شرب باشد و فقط در چاه شماره ۲ میزان EC، کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات و کربنات بیشتر از سایر منابع است. بنابراین، علت آن را می‌توان تحت فشار بودن سفره چاه شماره ۲ که به جهت عملکرد گسل به وجود آمده دانست که این امر سبب ماند طولانی آب در سفره محبوس شده است. نمودار مقادیر قلیایی‌های خاکی در مقابل آنیون‌های نظیر نشان‌دهنده تعادل بین کاتیون‌ها و آنیون در سفره است.

جدول ۲. غلظت عناصر و فلزات سنگین بررسی شده در نمونه‌های آب منطقه (بر حسب ppm)

نام نمونه	موقعیت نمونه	Fe	F	Cr	Mn	Ni	Pb	Cd	Zn	Cu
W01	چاه شماره ۱	۰/۰۳۵	۰/۳۹	ND*	۰/۰۰۶	ND	ND	ND	۰/۱۲۶	ND
W02	چاه شماره ۲	۰/۰۴۴	۰/۶۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	ND	ND	ND	۰/۰۲۱	۰/۰۰۸
W03	قنات دره خشکه	۰/۰۰۳	۰/۳۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷
W04	قنات دوبیدا	۰/۰۰۹	۰/۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	ND	ND	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
W05	قنات زرشکی بالا	۰/۰۱	۰/۶۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
W06	قنات زرشکی پایین	۰/۰۱	۰/۴۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵
W07	چشمه جولادر	۰/۲۴	۰/۵۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	ND	ND	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷
W08	چشمه رزبیده ۱	۱/۲	۰/۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶
W09	چشمه رزبیده ۲	۱/۳	۰/۵۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
W10	چشمه گندیده ۱	۳/۸	۰/۶۵	۰/۰۰۴	۰/۰۶۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸
W11	چشمه گندیده ۲	۳/۲	۰/۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶
WHO	سازمان بهداشت جهانی ۲۰۰۸	۰/۲	۱/۵	۰/۰۵	۰/۴	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۳	۲
	مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ۱۰۵۳	-	۱/۵	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۳	-	۳

* ND: داده‌ای یافت نشد.

این نظر از کیفیت مناسبی برخوردارند. بیشترین غلظت آهن در نمونه‌های W07، W08، W09، W10 و W11 به ترتیب ۰/۲۴، ۱/۲، ۱/۳، ۳/۸ و

به جز آهن، غلظت بیشتر فلزات سنگین در آب‌های منطقه مطالعه شده زیر حد تعیین شده سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2008) است و از

۲.۳. تیپ و رخساره منابع آب منطقه مطالعه شده

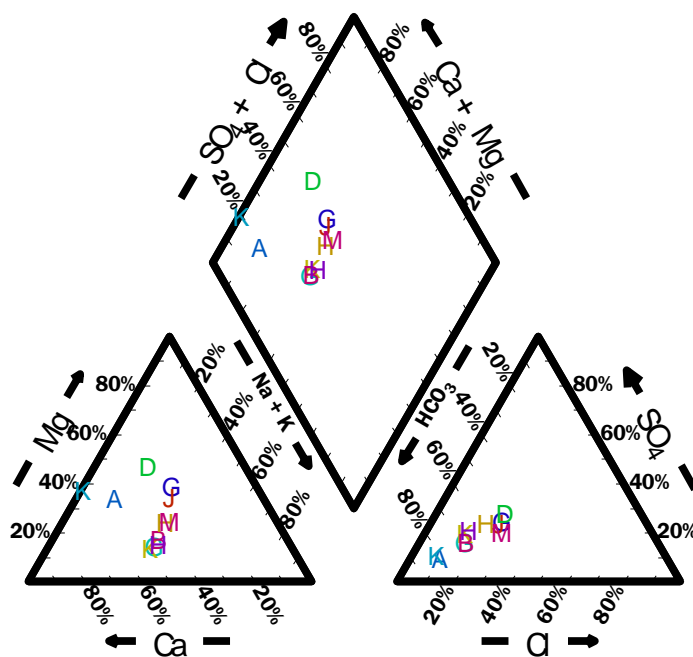
به منظور تعیین تیپ و رخساره آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعه شده از دیاگرام پایپر (Piper, 1944) استفاده شده است (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهد که منابع آب منطقه مطالعه شده در سه تیپ متفاوت قرار می‌گیرند. این سه تیپ آب شامل بی‌کربنات کلسیک در نمونه‌های W01، W02، W03، W04، W05، W06، W07 و بی‌کربنات سدیک در نمونه‌های W08 و W10 و بی‌کربنات منیزیک در نمونه‌های W09 و W11 هستند که به ترتیب از شمال به سمت جنوب منطقه قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه تیپ و رخساره غالب آب‌های منطقه بی‌کربنات کلسیک و منیزیک است در نتیجه این آب‌ها سختی موقت دارند و در آن‌ها غلظت کاتیون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} بیشتر از Na^+ و K^+ و غلظت آنیون‌های HCO_3^- بیشتر از SO_4^{2-} و Cl^- است.

۳/۲ در مقیاس ppm است و علت آن وجود ماسه‌سنگ‌های آهن‌دار میلا و لالون در منطقه و در مجاورت منابع آبی است. مطالعات نشان داد غلظت عناصر کروم، روی، منگنز، کادمیوم، نیکل، سرب، مس و فلئور در منطقه مطالعه شده پایین‌تر از حد استانداردهای جهانی و ایران است. مطابق با طبقه‌بندی مقادیر سختی (Todd, 1985)، نمونه‌های W01، W02، W03، W04، W05، W06، W07، W08، W09، W10 و W11 در رده سخت و نمونه‌های W01، W02، W03 و W04 در ردیف بسیار سخت قرار می‌گیرند (جدول ۳).

جدول ۳. طبقه‌بندی مقادیر سختی (Todd, 1985)

نوع آب	سختی کل برحسب $CaCO_3$ mg/l
نرم	$75 >$
نسبتاً سخت	۷۵-۱۵۰
سخت	۱۵۰-۳۰۰
بسیار سخت	$300 <$

Piper Diagram



Legend	
A	W01
K	W02
G	W03
K	W04
B	W05
H	W06
H	W07
G	W08
J	W09
M	W10
D	W11

شکل ۳. نمودار پایپر منابع آب در منطقه مطالعه شده

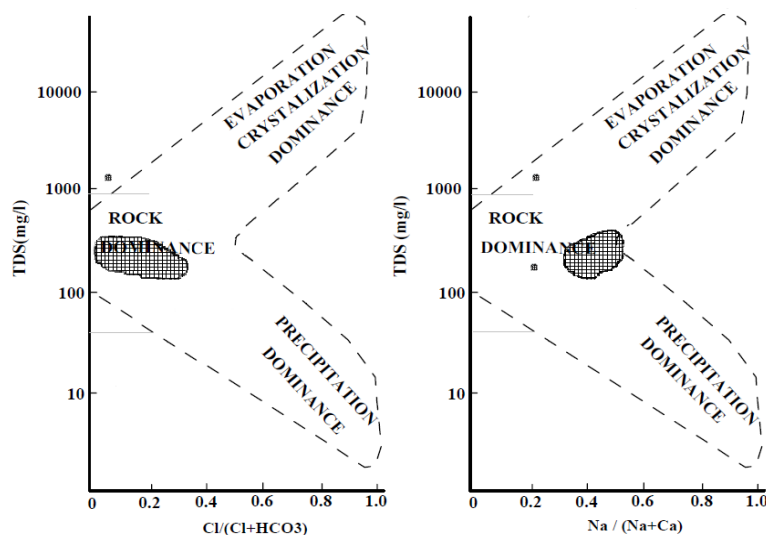
زیرزمینی منطقه هستیجان عمدتاً در ناحیه‌ای از دیاگرام که پدیده سنگی^۱ غالب است قرار می‌گیرند. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر متقابل بین شیمی سنگ و شیمی آب‌های حاصل از بارش که به زیر زمین نفوذ کرده‌اند است. از بین نمونه‌ها فقط نمونه W02 در ناحیه‌ای از دیاگرام که تبخیر و تبلور فرایند غالب است قرار می‌گیرد. افزایش TDS در این نمونه می‌تواند به زمان ماند طولانی آب در سفره محبوس بهره‌برداری شده توسط چاه شماره ۲ نسبت داد.

۳.۳. ارتباط متقابل بین آب و سنگ‌های

درب‌گیرنده

۱.۳.۳. دیاگرام گیبس

به منظور ارزیابی ترکیب یون‌های اصلی موجود در آب‌های زیرزمینی و بررسی تأثیر لیتولوژی سنگ‌های درب‌گیرنده بر منابع آب منطقه مطالعه شده و نیز تعیین مکانیسم حاکم بر جریان آب از دیاگرام گیبس استفاده شد (Subbarao, 2001). براساس دیاگرام شکل ۴ نمونه آب‌های



شکل ۴. موقعیت نمونه آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعه شده بر روی دیاگرام گیبس

نسبت‌های پایین‌تر از یک، آب از بی‌کربنات کلسیم اشباع است که این امر سبب رسوب کربنات کلسیم (تراورتن) در سنگ مخزن دولومیتی می‌شود (Moghimi, 2005).

۳.۳.۳. شاخص کلر-قلیائیت^۲

ارزیابی تغییرات کیفی آب و چگونگی تعویض و تبادل یونی بین آب‌های زیرزمینی طی حرکت آن در سفره، از جمله مواردی است که در مطالعات هیدروژئوشیمیایی توصیه شده است (Sastri, 1994). به این منظور شاخص کلر-قلیائیت (CAI) توسط شولر (Schoeller, 1967) پیشنهاد شد. این

۲.۳.۳. نسبت معرف

در تعیین جنس سنگ مخزن آب‌های زیرزمینی علاوه بر نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، حفاری و چاه‌نگاری می‌توان از برخی نسبت‌های معرف استفاده کرد. مطابق با جدول ۴، برای تعیین درجه خلوص سنگ‌های آهکی و دولومیتی از نسبت معرف mCa^{2+}/mMg^{2+} استفاده شده است. در این نسبت، (m) مولاریته یون‌های مربوطه است. اگر نسبت مولار کلسیم به منیزیم کمتر از یک باشد، بیانگر سنگ مخزن دولومیتی و اگر بین ۵ تا ۸ باشد معرف سنگ مخزن آهکی و نسبت‌های بزرگ‌تر از ۸ نشانه سنگ آهک خالص و یا وجود ناخالصی اغلب گچی است. در

1. Rock Dominant
2. Color Alkalinity Index

شاخص تبادل یونی بین آب زیرزمینی و محیط اطراف را نشان می‌دهند.

چنانچه مقادیر CAI منفی باشد نشان‌دهنده تعویض یونی بین سدیم و پتاسیم موجود در آب با منیزیم و کلسیم موجود در سنگ‌های میزبان است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در منابع آب منطقه مطالعه شده مقدار این نسبت منفی (به جز نمونه ۱۱) و نشان‌دهنده عدم تبادل سدیم و پتاسیم آب با کلسیم و یا منیزیم سنگ‌های دربرگیرنده و بدنه آبخوان است که

در نتیجه مقدار سدیم آب را کاهش نداده است. این شاخص برای نمونه آب‌ها محدوده مطالعه شده بین ۱/۵۷- تا ۰/۲۳ تغییر می‌کند و میانگین این شاخص ۰/۷۹۵- است. با توجه به میزان کلسیم به منیزیم و شاخص غیرتعادلی کلر و آلکان می‌توان گفت جنس سنگ مخزن در نمونه‌های W01، W05، W07 و W10 دولومیت آهکی و نمونه‌های W02، W03، W04 و W06 آهک دولومیتی است و جنس سنگ مخزن در نمونه‌های W08، W09 و W11 دولومیت است.

جدول ۴. رابطه نسبت‌های معرف مطالعه شده و جنس سنگ مخزن

نسبت‌های معرف			نمونه
Na/Ca	شاخص غیرتعادلی کلر و آلکان	جنس سنگ مخزن	آب
۰/۲۷	-۰/۳۲	دولومیت آهکی	W01
۰/۱	-۰/۹۴	آهک دولومیتی	W02
۰/۲۵	-۱/۳۶	آهک دولومیتی	W03
۰/۲۵	-۱/۴۵	آهک دولومیتی	W04
۰/۲۵	-۱/۲۱	دولومیت آهکی	W05
۰/۲۸	-۱/۵۷	آهک دولومیتی	W06
۰/۲۲	-۰/۸۸	دولومیت آهکی	W07
۰/۱۴	-۰/۴۳	دولومیت	W08
۰/۱۴	-۰/۴۱	دولومیت	W09
۰/۱۵	-۰/۴۱	دولومیت آهکی	W10
۰/۲۳	۰/۲۳	دولومیت	W11

در این رابطه SI شاخص اشباع‌شدگی، IAP میزان پویایی و تحرک کانی مورد نظر و K_{sat} ثابت انحلال‌پذیری است. زمانی که آب اشباع ($SI=0$) و $(K_{sat}=IAP)$ و اندیس اشباع کمتر از صفر باشد دلالت بر شرایط تحت اشباع دارد. در صورتی که اندیس اشباع بیشتر از صفر باشد نشان می‌دهد که آب نسبت به کانی مورد نظر فوق اشباع است. شاخص اشباع‌شدگی، بسته به نوع کانی، pH، TDS و دما تغییر می‌کند. 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

۴.۳.۳. شاخص اشباع^۱

با در نظر گرفتن تأثیر لیتولوژی سازندهای زمین‌شناسی بر روی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه، شاخص اشباع (SI) نمونه آب‌های زیرزمینی برای کانی‌های مختلف بررسی شد. به این منظور از نرم‌افزار PHREEQC و بانک داده‌ای mnteq استفاده شده است (Piper, 1944). به‌طور کلی، شاخص اشباع‌شدگی برای کانی‌های مختلف از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$SI = \log \frac{IAP}{K_{sat}} \quad (1)$$

1. Saturation Index-

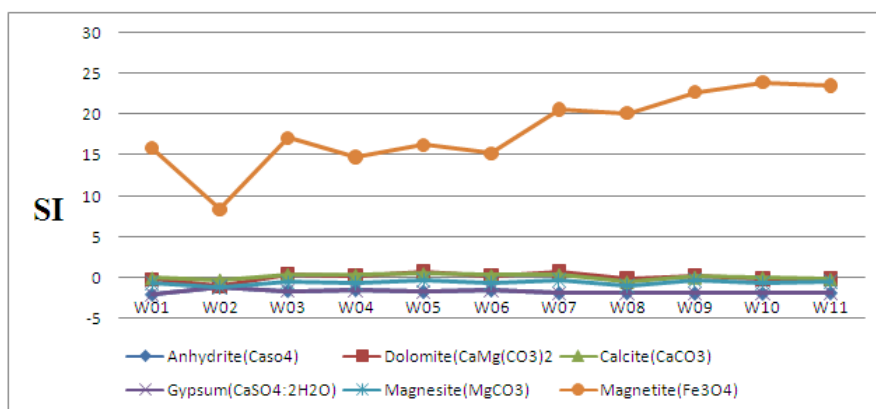
لالون و زاگون و واردشدن آن به آب و درنهایت بالارفتن یون آهن در منابع آب منطقه است.

۴.۳. کیفیت آب برای مصارف مختلف

۱.۴.۳. تعیین کیفیت آب برای مصارف شرب

دیاگرام شولر براساس املاح و یون‌های عمده مورد نیاز بدن، براساس استانداردهای پیشنهادی مراکز علمی- پژوهشی جهان تنظیم شده است (Moghimi, 2005). شکل ۶ نمودار شولر منابع آب منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد. در جدول ۵ درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شولر برای مصارف شرب در کل محدوده مقایسه شده است. بررسی غلظت یون‌های موجود در آب نشان می‌دهد که غلظت یون‌های موجود در بیشتر نمونه‌های انتخابی در حد مطلوب بوده و برای مصارف شرب خوب، قابل قبول و متوسط‌اند.

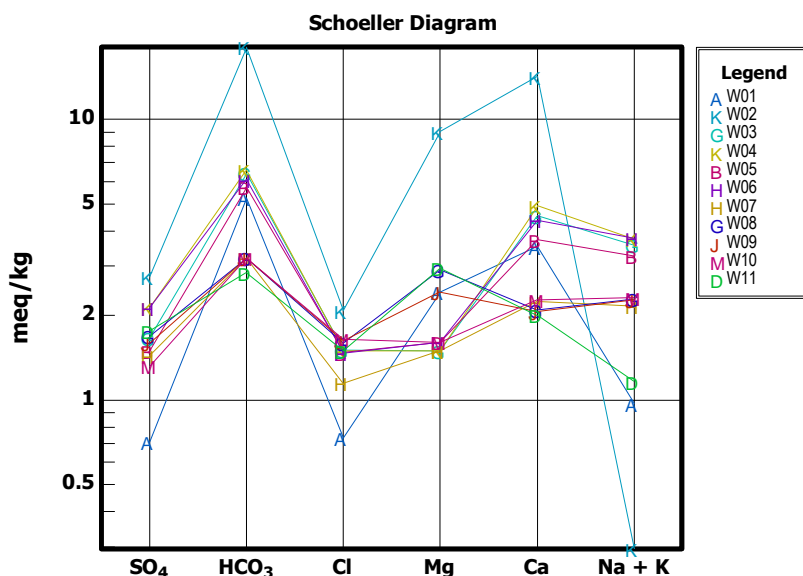
کنترل‌کننده شیمی آب را مشخص می‌کند (Jalali, 2006; Langmuir, 1997). در شکل ۵ شاخص اشباع‌شدگی برای کانی‌های معمول در آب (مانند کلسیت، دولومیت، منیزیت، ژیپس و انیدریت) در تعدادی از نمونه‌های آب مطالعه شده پایین‌تر از صفر است و نمونه‌های آب نسبت به کانی‌های یادشده تحت اشباع‌اند. در نمونه‌های W03، W04، W05، W06، W07 و W09 شاخص اشباع‌شدگی دولومیت به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۲۲، ۰/۷۳، ۰/۱۹، ۰/۶۶، ۰/۲۸ و کلسیت به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۳۴، ۰/۲۸، ۰/۰، ۰/۳۹، ۰/۰۸ است و نشان‌دهنده فوق اشباع بودن آب نسبت به کلسیم، بی‌کربنات، منیزیم در محل است، این امر نشان می‌دهد جنس سنگ مخزن از دولومیت و آهک است، همچنین در شکل ۵ شاخص اشباع‌شدگی کانی‌های حاوی آهن برای تمامی نمونه‌ها در حد فوق اشباع‌اند. این موضوع نشان‌دهنده آزادشدن یون آهن موجود در سازندهای



شکل ۵. شاخص اشباع‌شدگی کانی‌های اصلی در نمونه‌های آب

جدول ۵. درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شولر برای مصارف شرب در کل محدوده

SO ₄	Cl	Na	PH	TH	TDS	طبقه‌بندی آب
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۵/۴۵	۴۵/۴۵	۷۲/۷۳	خوب
.	.	.	۲۷/۲۷	۴۵/۴۵	۱۸/۱۸	قابل قبول
.	.	.	۱۸/۱۸	۹/۰۹	۹/۰۹	متوسط
.	نامناسب
.	کاملاً نامطبوع
.	.	.	۹/۱	.	.	غیر قابل شرب



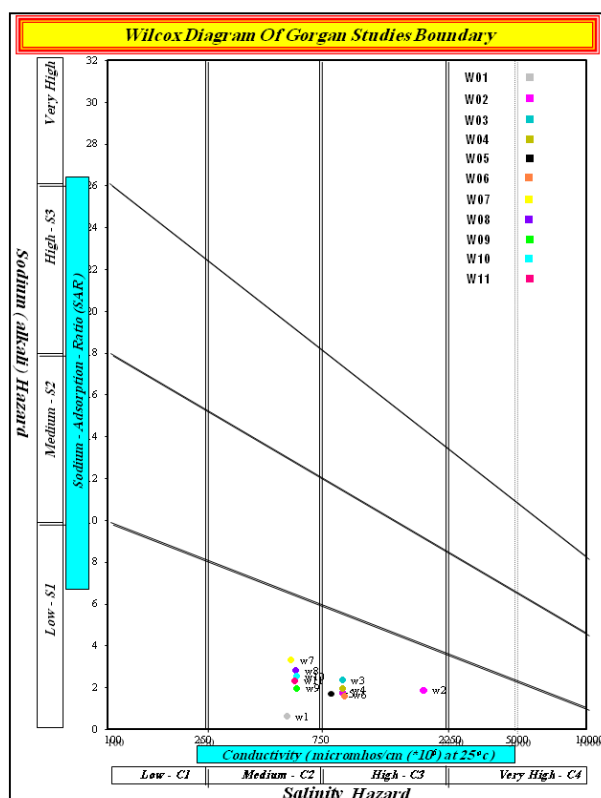
شکل ۶. نمودار شولر منابع آب منطقه

در نهایت نفوذناپذیر شدن خاک‌های منطقه و کاهش محصولات می‌شود. خطر سدیم و شوری دو معیار مهم در طبقه‌بندی آب‌های برای مصارف کشاورزی‌اند (Sedaghat, 2003). بنابراین، در مصارف کشاورزی آب با SAR کم توصیه می‌شود. خلاصه طبقه‌بندی ویلکاکس و کلاس‌های مختلف آب و غلظت کربنات سدیم باقی‌مانده (RSC) در جدول ۶ نشان داده شده است.

۲.۴.۳. تعیین کیفیت آب برای کشاورزی
 به‌منظور طبقه‌بندی آب‌های محدوده مطالعه‌شده از نظر مصرف کشاورزی از نمودار ویلکاکس (Wilcox, 1955) استفاده شده است که اساس آن میزان هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم (SAR) است. غلظت زیاد نمک در آب سبب شوری خاک و مقدار زیاد سدیم منجر به تولید خاک‌های قلیایی همراه با کمبود کلسیم خاک و

جدول ۶. طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی

نمونه آب	RSC (meq/l)	کیفیت براساس RSC (meq/l)	SAR	E.C (µs/cm)	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی
W01	-۰/۷	مناسب	۰/۵۶	۵۶۰	C2-S1	کمی شور - مناسب کشاورزی
W02	-۱/۵۲	مناسب	۱/۳۹	۲۱۰۰	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
W03	۰/۳۹	مناسب	۲/۰۲	۹۵۷	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
W04	۰/۱۵	مناسب	۲/۰۵	۹۶۲	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
W05	۰/۳۹	مناسب	۱/۹۶	۸۶۱	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
W06	۰/۱۳	مناسب	۲/۱۴	۹۷۳	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
W07	-۰/۵۳	مناسب	۱/۵۴	۵۸۵	C2-S1	کمی شور - مناسب کشاورزی
W08	-۱/۱	مناسب	۱/۵۱	۶۱۲	C2-S1	کمی شور - مناسب کشاورزی
W09	-۱/۲۷	مناسب	۱/۴۸	۶۱۸	C2-S1	کمی شور - مناسب کشاورزی
W10	-۰/۶۷	مناسب	۱/۶۲	۶۱۴	C2-S1	کمی شور - مناسب کشاورزی
W11	-۲/۱۱	مناسب	۰/۷	۹۶۰	C2-S1	کمی شور - مناسب کشاورزی



شکل ۷. نمودار ویلکاکس منابع آب منطقه

کشاورزی قابل استفاده است.

۳.۴.۳. تعیین کیفیت آب برای مصارف صنعتی

آب استفاده شده در صنعت، بسته به نوع صنعت، باید استانداردهای خاصی داشته باشد. یکی از معیارهای طبقه‌بندی آب برای مصارف صنعت محاسبه ضریب اشباع‌شدگی لانژیه (Is) است که از رابطه ذیل محاسبه می‌شود (Aghazadeh et al., 2008).

$$Is = pH - pHS \quad (2)$$

در این رابطه pH مقدار اندازه‌گیری شده اسیدیته آب در محل و pHS میزان pH در حالت اشباع است که با عنوان «شاخص اشباع» و از رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$pHS = C + Pca + palk \quad (3)$$

در این رابطه C تابع دما و TDS کل مواد جامد محلول، Pca لگاریتم منفی غلظت یون‌های کلسیم و palk لگاریتم منفی آلکالینیتی آب است.

خطر بی‌کربنات از دیگر پارامترهای بررسی شده در آب‌های کشاورزی است که با نمایه کربنات سدیم باقی‌مانده (RSC) نشان داده می‌شود. غلظت‌های زیاد بی‌کربنات در آب زیرزمینی می‌تواند رشد گیاهان را مختل کند و به رسوب کلسیت، کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش فرسایش خاک منجر شود. آب‌های دارای مقادیر RSC بیش از ۲/۵ میلی‌اکی والان بر لیتر برای آبیاری نامناسبند.

براساس نمودار ویلکاکس حاصل از نمونه‌های منابع آب منطقه مطالعه شده، شکل ۷، نمونه‌های W01، W07، W08، W09، W10 و W11 در کلاس C2-S1 (به میزان ۵۴/۵۵ درصد) قرار می‌گیرند که بیانگر آب با کیفیت کمی شور است. از طرف دیگر نمونه‌های W02، W03، W04، W05 و W06 در کلاس C3-S1 به میزان ۴۵/۴۵ درصد قرار گرفته و شور است. در مجموع با توجه به نمودار ویلکاکس نمونه‌های آب برای مصرف

W10 و W11 خوردگی دارد که سبب کاهش طول عمر و شکستگی غیرمنتظره لوله‌ها و ایجاد آلودگی ثانویه در شبکه‌های توزیع آب می‌شوند و نمونه‌های W03، W05 و W07 سبب رسوب‌گذاری و آسیب به لوله‌ها و تأسیسات آبرسانی و کاهش کارایی گرم‌کننده‌های آب و دیگ بخار می‌شود.

هرگاه ضریب لانژلیه منفی باشد، آب تمایل به خوردگی دارد، مقدار صفر معرف آب متعادل و اگر مثبت باشد آب تمایل به پوسته‌گذاری دارد و رسوب می‌کند (Moghimi, 2005).
براساس نتایج نشان داده‌شده در جدول ۷ نمونه‌های W01، W02، W04، W06، W08، W09،

جدول ۷. طبقه‌بندی آب برای مصارف صنعتی

نمونه آب	قلیائیت بر حسب CaO	Ca (mg/l)	ضریب C	pHs	pH	pHs-pH	کیفیت آب برای مصارف صنعتی
W01	۲۲/۴۸	۷۰/۴۶	۱۱/۲۸	۸/۱	۷/۱۵	۰/۹۵	خورنده
W02	۱۰۰/۹۶	۲۷۹۴/۴	۱۱/۳۲	۶/۹	۶/۱۷	۰/۷۳	خورنده
W03	۸۳/۲۳	۹۰/۶	۱۱/۲۹	۷/۴	۷/۴۴	-۰/۰۴	رسوبگذار
W04	۸۴/۸	۹۸/۴	۱۱/۲۹	۷/۴	۷/۳۲	۰/۰۸	خورنده
W05	۷۶/۳۳	۷۴/۶	۱۱/۲۹	۷/۵	۷/۶۴	-۰/۱۴	رسوبگذار
W06	۸۸/۲۲	۸۷/۴	۱۱/۲۹	۷/۴	۷/۳۴	۰/۰۶	خورنده
W07	۵۰/۶۴	۴۴/۸	۱۱/۲۸	۷/۹	۷/۹۴	-۰/۰۴	رسوبگذار
W08	۵۳/۵۶	۴۲	۱۱/۲۸	۷/۹	۷/۱	۰/۸	خورنده
W09	۵۳/۴۴	۴۱/۲۲	۱۱/۲۸	۷/۹	۷/۶۸	۰/۲۲	خورنده
W10	۵۴/۴۸	۴۵/۶	۱۱/۲۸	۷/۹	۷/۵۶	۰/۳۴	خورنده
W11	۲۷/۶۴	۴۰	۱۱/۲۸	۸/۲	۷/۵	۰/۷	خورنده

شاخص اشباع نشان می‌دهد که این آب‌ها نسبت به کانی‌های دولومیت و کلسیت و مگنتیت فوق اشباع است و نشان از فوق اشباع بودن آب نسبت به کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات و آهن در محل دارد. از طرفی کانی‌های ژپس و انیدریت و تحت اشباع هستند. کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه متأثر از لیتولوژی و کیفیت آب تغذیه است. بررسی کیفیت آب شرب با توجه به استانداردهای موجود و غلظت یون‌ها در بیشتر نمونه‌ها از حد مجاز تعیین شده تجاوز نمی‌کند بنابراین، بیشتر آب‌های زیرزمینی منطقه برای شرب مناسب‌اند. بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه برای مصارف کشاورزی از طریق خطر شوری و قلیائیت، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم، دیاگرام ویلکاکس، کربنات سدیم باقی‌مانده و شاخص نفوذپذیری نشان می‌دهد که کیفیت این آب‌ها بیشتر برای مصارف

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهند که وضعیت شیمیایی آب موجود در سازندهای منطقه بسیار متأثر از لیتولوژی سازندهاست، همچنین بررسی‌های هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی در منطقه هستیجان نشان می‌دهد که آب‌های این منطقه جزء آب‌های سخت تا بسیار سخت است و عمدتاً تیپ $\text{Ca, Mg} - \text{HCO}_3$ دارند که براساس غلظت یون‌های اصلی موجود در آب‌های زیرزمینی منطقه شرایط کاتیونی و آنیونی حاکم عبارت از $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ و $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ است. نتایج حاصل از دیاگرام گیبس نیز نشان‌دهنده تأثیر متقابل بین شیمی سنگ‌های دربرگیرنده و شیمی آب‌های حاصل از بارش که به زیر زمین نفوذ یافته‌اند است. نتایج حاصل از محاسبه

تشکر و قدردانی

از مدیریت و کارکنان محترم مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای استان مرکزی به دلیل در اختیار گذاشتن امکانات و اطلاعات لازم سپاسگزاری می‌شود.

کشاورزی مناسب است. محاسبه ضریب لانژیه (I_s) نمونه آب‌های زیرزمینی منطقه هستیجان نشان داد که حدود ۷۳ درصد از نمونه آب‌های انتخابی خاصیت خورندگی و ۲۷ درصد باقی مانده خاصیت رسوب‌گذاری دارند.

REFERENCES

1. Aghanabati, S.A. 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran. Geological Survey of Iran press, 708p.
2. Aghazadeh, N., Mohaddam, A., and Kymiaee, A. 2008. Assessment of hydrochemical properties of underground water in Salmas and Its Suitability for Various Uses. Journal of Esfahan University, 34:5.
3. Cotsier M., and Walraevens, k. 2006. Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium. Hydrogeology Journal, 1556-1568.
4. Foster G.D., Roberts E.C., Gruessner B., and Velinsky, D.J., 2000. Hydrogeochemistry and transport of organic contaminants in an urban watershed of Chesapeake Bay(USA). Applied Geochemistry. 15: 901-915.
5. Iranian National Standards Organization. 1992. Physical and chemical properties of drinking water. No. 1053. Forth Edition.
6. Jalali, M. 2006. Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran. Environ. Geol., 51: 433-446.
7. Langmuir, D. 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, Inc. 600p.
8. Moghimi, h. 2005. Hydrogeochemistry. Payam noor Univ. press. 218p.
9. Parkhurst, D.L., and Appelo C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQC(ver.2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical alculations. USGeol. Surv. Water-Resources Invest. Rept., 99-4259.
10. Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Trans., Am. Geophysic. Union 25:914-923.
11. Sastri, JCV. 1994. Groundwater chemical quality in river basins, Hydrogeochemical facies and hydrogeochemical modeling. Lecture notes—refresher course conducted by school of Earth Sciences. Bharathidasan University, Thiruchirapalli, Tamil Nadu, India.
12. Sedaghat, M. 2003. Ground and water resource(underground water), payam noor Univ. press, 300p.
13. Schoeller, H. 1967. Qualitative evaluation of groundwater resources. In: Methods and techniques of groundwater investigation and development. Water Research. Series-33, UNESCO, pp 44-2.
14. Subbarao, N. 2001. Geochemistry of groundwater in parts of Guntur district, Andhra Pradesh, ndia. Environmental Geology 41: 552-562.
15. Subramani, T., Elango L., and Damodarasamy S.R., 2005. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. Environmental Geology 47:1099-1110.
16. Todd, D.K., and Mays, L.W. 2000. Ground-water hydrology (Third Edition): John Wiley and Sons, New York, 636 p.
17. Water resource of Central province. 2002. Study of quality and quantity of underground water in palang- darreh, hastijan, central province.
18. WHO, 2008. Guidelines for drinking-water quality, Recommendations, 3rd ed. World Health Organization, Geneva.
19. Wilcox, L.V. 1955. Classification and use of irrigation water. USDA, Circular 969. Washington, DC. USA.