

## بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی حوضه کارستی

### درفک (استان گیلان، شمال شرقی رودبار)

محمد حسین قبادی<sup>۱</sup>، مریم دهبان ایوان استخری<sup>۲</sup> و علی میر عربی<sup>۳</sup>

۱-استاد گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۲-دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان. [Mdehban84@gmail.com](mailto:Mdehban84@gmail.com)

۳- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

#### چکیده

آبخوان های کارستی منابع عمده آب زیرزمینی در شمال شرقی رودبار هستند. مطالعه حاضر کوششی در جهت بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی موجود در منطقه و بررسی توسعه یافتگی کارست در منطقه با استفاده از آمار دبی چشمه سفید آب است. در این بررسی از قابلیت های نرم افزارهای PHREEQC و Rock Ware AqQa جهت محاسبه شاخص اشباع و ترسیم نمودارهای هیدروژئوشیمیایی آب بهره گرفته شده است. در این مقاله همچنین به بررسی توزیع فضایی پارامترهای ژئوشیمیایی آب چشمه ها و مقایسه نحوه تغییرات این پارامترها با تغییرات شیب در منطقه پرداخته شده است. بررسی توزیع فضایی پارامترهای ژئوشیمیایی آب چشمه ها مشخص کرد که این پارامترها دارای روند تغییرات معناداری با توجه به شیب منطقه هستند. با ترسیم دیاگرام پایپر نمونه های آب چشمه ها، مشخص گردید که تیپ آب تمام چشمه های منطقه از نوع  $\text{Ca-HCO}_3$  است، که در واقع تأیید کننده کارستی بودن چشمه های منطقه است. به صورتی که شاخص اشباع بیان می کند، بیشتر نمونه های آب منطقه نسبت به کلسیت، دولومیت و  $\text{CO}_2$  تحت اشباع هستند. با محاسبه مقادیر ضرایب فروکش چشمه سفید آب و مقایسه مقادیر این ضرایب با جدول ارائه شده توسط مالیک و وجتکوا (۲۰۱۲)، درجه توسعه کارست ۵/۵ تعیین گردید. در این درجه از توسعه آبخوان کارستی، رژیم تخلیه پیچیده، یک ترکیبی از یک زیر رژیم با جریان آشفته و دو زیررژیم با جریان آب زیرزمینی آرام وجود خواهد داشت. تأثیر رژیم تخلیه با جریان آشفته در مقایسه با رژیم تخلیه آب زیرزمینی کلی کوتاه مدت است.

واژگان کلیدی: درفک، چشمه سفید آب، PHREEQC، ضریب فروکش.

#### مقدمه

تراوش، دوگانگی تخلخل، دوگانگی جریان و تغییر پذیری است. در طی تکامل تدریجی، آبخوان کارستی توسط جریان یافتن آب های حاوی دی اکسیدکربن با قابلیت انحلال سنگ های کربناته، توسعه می یابد. ویژگی منحصر به فرد بودن آبخوان کارستی در واقع به این حقیقت اشاره دارد که علی رغم شباهت های زیاد بین سیستم های کارستی، هر سیستم کارستی دارای ویژگی خاص خود بوده و قابلیت تعمیم به سایر سیستم ها را ندارد. خصوصیت غیر یکنواختی آبخوان کارستی، در واقع

آبخوان های کارستی، مخازن زیرزمینی ناهمگنی اند که آب در شبکه های مرتبط به هم، شکاف ها، مغاره ها و مجاری درون آنها جمع می شود. سطح ایستابی در آنها، پیوسته نیست و دارای شیب منطقه ای و محلی است. مناطق کارستی آب آشامیدنی ۲۵ درصد از جمعیت جهان را تامین می کنند (Ford & Williams, 2007). مهمترین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان های کارستی شامل تکامل تدریجی، منحصر به فرد بودن، غیر یکنواختی، ناهمسانی در هدایت هیدرولیکی، دوگانگی تغذیه، دوگانگی

بهباد و همکاران، ۱۳۹۴)، (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴)، بررسی هیدروژئوشیمیایی آبخوان کارستی معمولاً براساس مجموعه ای اطلاعات جامع در مورد شیمی آبخوان های کارستی صورت می گیرد. شیمی آبخوان های کارستی تحت تاثیر عوامل متعددی است که از آن جمله می توان به زمین شناسی محل، میزان هوازدگی سنگ ها و نوع آنها، کیفیت آب ورودی به درون آبخوان و واکنش های هیدروژئوشیمیایی اشاره کرد. در طی چند دهه اخیر برخی از محققین که به بررسی هیدروژئوشیمیایی آبخوان های کارستی پرداخته اند و به تاثیرات متقابل لیتولوژی و ریزش های جوی در هیدروژئوشیمی آبخوان های کارستی اذعان دارند، عبارتند از: (کلانتری و همکاران، ۱۳۸۶)، (کارخانه و همکاران، ۱۳۹۵)، (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۵)،

#### اهداف پژوهش

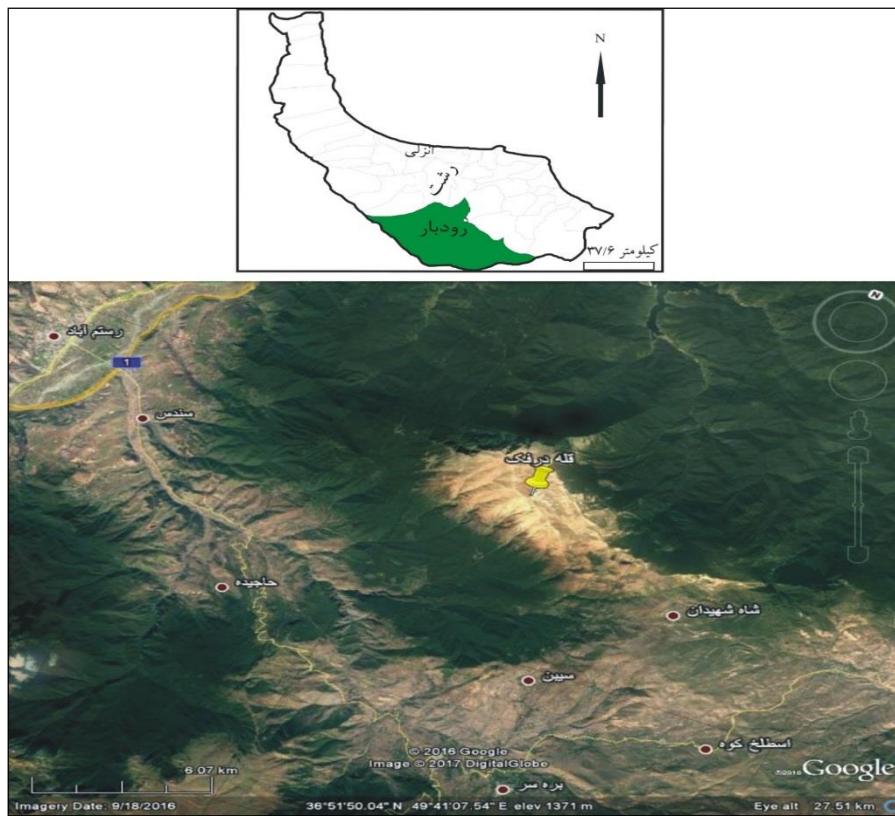
- شناسایی تیپ آب های زیرزمینی منطقه
- بررسی تاثیرات لیتولوژیکی بر روی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی
- تعیین درجه توسعه یافتگی کارست و تاثیرات ریزش های جوی در تغذیه آبخوان کارستی منطقه است.

اقدامات انجام شده در این مطالعه، گردآوری اطلاعات دبی چشمه های موجود در محدوده مورد نظر، نتایج آنالیز شیمیایی نمونه های آب چشمه ها، آمار بارندگی ماهانه ایستگاه های باران سنجی در محدوده مورد مطالعه، تهیه DEM منطقه و بازبینی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور را شامل می گردد. محدوده مورد مطالعه در شمال شرقی شهرستان رودبار و در شرق دره سفید رود واقع است.

#### موقعیت منطقه

مرتفع ترین نقطه منطقه مورد مطالعه، قله درفک با ارتفاع ۲۷۳۳ متر می باشد. میانگین بارش سالانه منطقه مورد مطالعه، ۷۴۸ میلی متر است. میانگین درجه حرارت هوا  $10^{\circ}$  سانتی گراد است. بخش عمده جریان آب سطحی از طریق رودخانه های رود سر(تنگه رود و خشکه رود)، دفرز، سندس، خرشک، راجعون و دیگر آبراهه های فرعی از محدوده خارج و در انتها به رودخانه سفید رود می پیوندد.

بیان می کند که آبخوان کارستی به صورت فضایی تغییرات زیادی را دارد. به صورتی که در یک منطقه، مقادیر زیادی آب ممکن است در غار موجود باشد اما به فاصله کمی، با حفر گمانه، با یک محیط کاملاً خشک مواجه می شویم. ویژگی ناهمسانی آبخوان کارستی بیانگر آن است که خصوصیات هیدرولیکی آبخوان به جهت گیری اجزاء پیکره زمین شناسی وابسته اند. به عنوان مثال، هدایت هیدرولیکی به طور معمول در جهت شکستگی های بزرگ و مجاری بزرگ، بیشتر است. دوگانگی تغذیه آبخوان کارستی به نوع تغذیه ارتباط دارد، یعنی که ممکن است از نوع خودزا (از طریق نواحی کارستی) یا آلورنیک (از طریق نواحی غیرکارستی) باشد. ویژگی دوگانگی نفوذ نیز به نفوذ آب از طریق خاک و زون اشباع (نفوذ انتشاری) یا نفوذ از طریق فروچاله ها و چاه ها (نفوذ متمرکز) می پردازد. خصوصیت دوگانگی تخلخل و جریان نیز بیان می کند که در آبخوان کارستی دو نوع تخلخل (تخلخل بین دانه ای و تخلخل ثانویه مثل ناپیوستگی های موجود در سنگ) و دو نوع جریان (خطی و آشفته) می تواند وجود داشته باشد. جریان آب از میان تخلخل بین دانه ای از نوع خطی و جریان آب از طریق مجراها از نوع آشفته خواهد بود. خصوصیت تغییرپذیری آبخوان کارستی نیز به این واقعیت اشاره دارد که سطح آب در آبخوان های کارستی می تواند گاهی اوقات بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر در دوره زمانی کوتاهی نوسان کند و چشمه های کارستی به طور معمول تغییرات سریع دبی و کیفیت آب را نشان می دهند. پاسخ هیدروژئوشیمیایی و هیدرودینامیکی مشاهده شده در حوضه های کارستی به شرایط جریان در آنها بستگی دارد (باقری سید شگری و همکاران، ۱۳۹۴). بررسی های هیدرودینامیکی آبخوان، شامل تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه های کارستی منطقه است. هیدروگراف چشمه ها بازتاب مستقیم همه فرایندهای فیزیکی است که در داخل آبخوان، جریان آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می دهد (Kutha et al., 2012). در طی چند دهه اخیر، محققین بسیاری در مراحل تحقیقاتی خود از تجزیه و تحلیل هیدروگراف و منحنی فرود (recession) برای تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان های کارستی بهره گرفته اند. تعدادی از این محققین که با استفاده از تحلیل منحنی فرود به نتایج ارزشمندی در ارتباط با توسعه یافتگی کارست دست یافته اند، عبارتند از: (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۴)، (ریاحی پور و کلانتری، ۱۳۸۷)، (محمدی



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

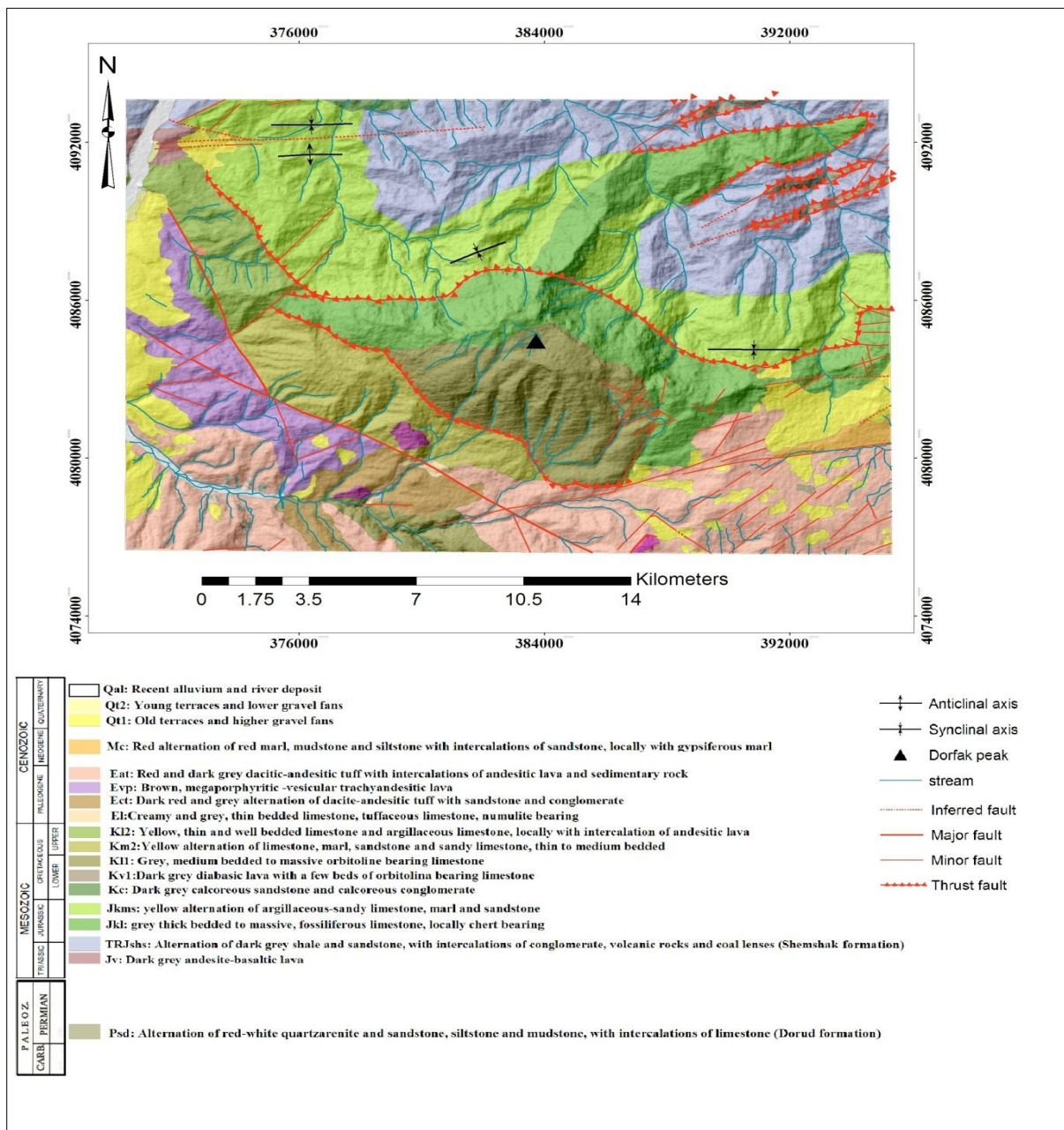
#### زمین شناسی منطقه

(Reilinger et al., 2006; Jackson et al, 2002). حوضه کارستی درفک به لحاظ زمین شناسی ساختمانی در زون برشی گسل لاهیجان قرار می گیرد. محور فشارش اصلی بدست آمده توسط صفری و همکاران (۱۳۹۲) برای پهنه برشی گسل لاهیجان نیز N10E می باشد که با محور فشارش پیشین اندازه گیری شده در منطقه و همچنین با حرکت چپ بر گسل لاهیجان همخوانی دارد. ساختار گوه ای قله درفک در اثر محصور شدن بین دو گسل راندگی درفک با شیب رو به جنوب، و گسل راندگی دیلمان با شیب رو به شمال شکل گرفته است این ساختار معرف وجود شکستگی های زیاد در سنگ است که خود زمینه ای مناسب جهت کارستی شدن در این منطقه فراهم می کند. (Berberian et al., 1992) این گسل ها در راستایی تقریباً عمود بر  $\sigma_1$  در این منطقه شکل گرفته اند. امتداد این گسل ها میان N90-110 و حرکتی معکوس با کمی مولفه چپ بر دارند (صفری و همکاران، ۱۳۹۲). این ساختار تکتونیکی به دلیل تحت فشار بودن باعث توسعه درز و شکاف ها در واحد های آهکی و افزایش ارتفاع در

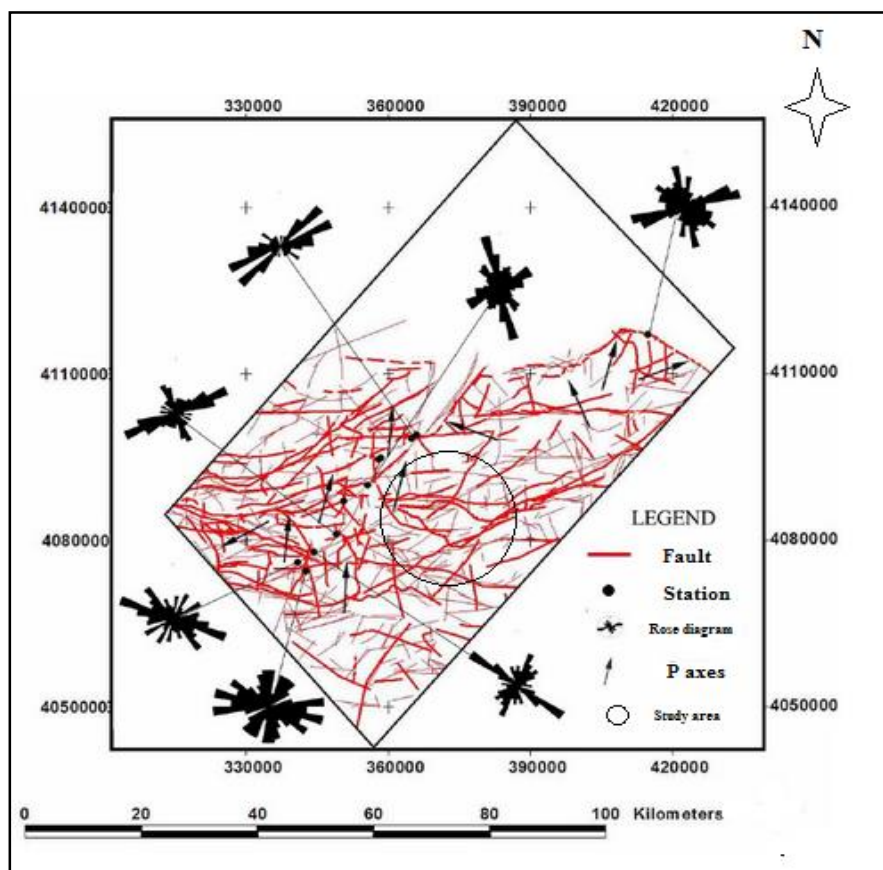
حوضه کارستی درفک بخشی از البرز غربی است که در شرق دره سفید رود قرار دارد. روند کوه ها در این بخش از دره سفیدرود، شرقی - غربی است. در دامنه جنوبی قله درفک سنگ های آتشفشانی متعلق به پالئوژن رخنمون دارد. ساختار قله درفک نیز از توالی رسوب گذاری پیوسته ژوراسیک - کرتاسه تشکیل شده است. واحد های آهکی در حوضه کارستی درفک، از سنگ آهک خاکستری رنگ متوسط لایه تا توده ای حاوی فسیل اوربیتولین (KL1)؛ سنگ آهک خاکستری رنگ ضخیم لایه تا توده ای، حاوی فسیل و به طور محلی حاوی چرت (JKL)؛ تناوب سنگ آهک، مارن، ماسه سنگ و سنگ آهک ماسه ای نازک تا متوسط لایه (Km2)؛ تناوبی از سنگ آهک های مارنی - ماسه ای، مارن و ماسه سنگ به رنگ زرد (JKms)؛ سنگ آهک و سنگ آهک مارنی نازک لایه و منظم لایه به طور محلی با میان لایه هایی از گدازه آندزیتی (KL2) تشکیل می شود (شکل ۲). محورهای جنبشی گزارش شده برای البرز باختری روندی رو به شمال خاور تا شمال دارند که سوی فشارش صفحه عربی به اوراسیا را نشان می دهند.

ساختارهای خطی (شمال غرب-جنوب شرق) قرار گرفته اند. بسیاری از دره های ریزشی- کارستی و آبراهه ها در این منطقه از این روند تبعیت می کنند. بسیاری از چشمه های ذکر شده نیز در امتداد این دره ها نمود یافته اند. بنابراین این احتمال وجود دارد که مجموعه ساختارهای خطی فوق الذکر نقش قابل توجهی در هدایت و انتقال آب های سطحی و زیرزمینی دارند.

منطقه شده است (شکل ۳). در این منطقه شکستگی های کششی بسیاری نیز در راستای تقریباً موازی با  $\sigma_1$  شکل گرفته اند. بر طبق مطالعات میر عربی (۱۳۹۴)، این دسته از ساختارهای خطی، دارای روند شمال شرق-جنوب غربی تا شمالی- جنوبی هستند. بر اساس مشاهدات صحرایی این دسته از ساختارهای خطی دارای مولفه حرکتی نرمال تا امتداد لغز بوده و با زاویه زیادی نسبت به دسته اول



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳- نقشه زمین شناسی ساختمانی محدوده مورد مطالعه (Safari et al, 2013)

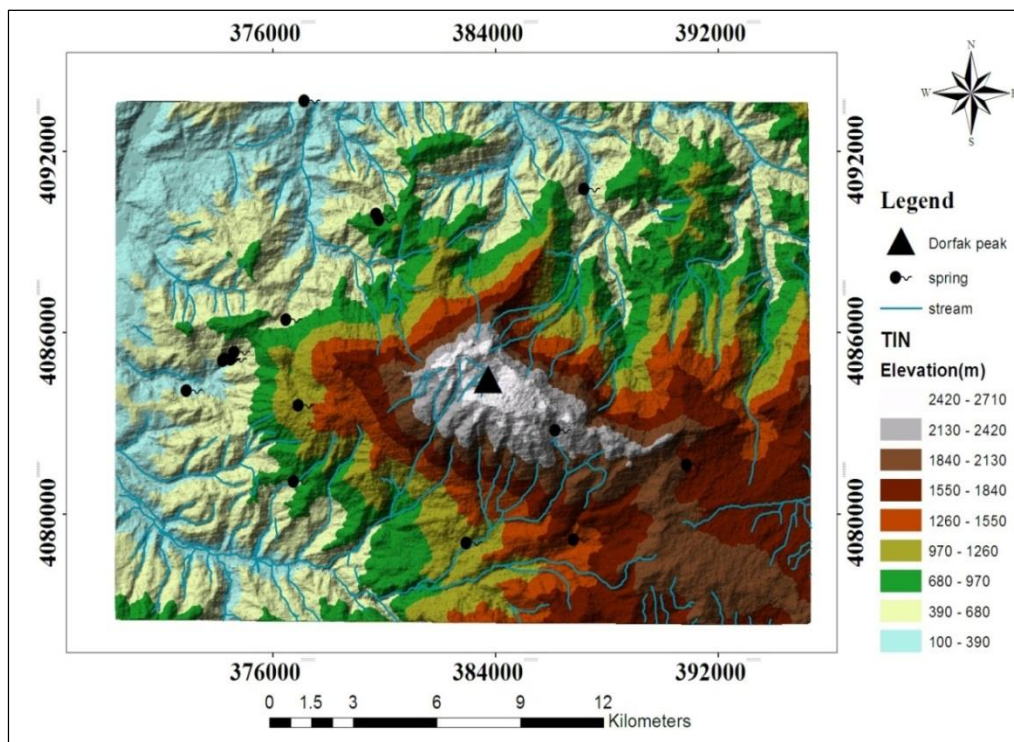
چشمه ها، از نرم افزارهای PHREEQC و Rock Ware استفاده گردیده است.

#### مواد و روش ها

در این مقاله جهت بررسی حوضه کارستی درفک، به تحلیل هیدروگراف چشمه ها و هیدروژئوشیمی نمونه آب چشمه های منطقه پرداخته شده است. لذا اطلاعات مربوط به آمار دبی این چشمه ها و آنالیز شیمیایی آب چشمه ها از سازمان آب منطقه ای استان گیلان تهیه گردید (جدول ۱). موقعیت این چشمه ها در شکل ۴ قابل مشاهده است. به جهت تعیین میزان توسعه لیتولوژی های گوناگون در منطقه از نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شده است. جهت تعیین نقشه شیب در این منطقه نیز از DEM (ASTER GDEM)، تهیه شده از سایت USGS، استفاده گردید. به جهت بررسی هیدروژئوشیمی آب

#### بحث و نتایج

فراوان ترین یون ها در آب زیرزمینی حوضه کارستی درفک به ترتیب غلظت شامل کاتیون های  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $Na^{+}$ ،  $K^{+}$  و آنیون های  $HCO_3^{-}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $NO_3^{-}$ ،  $Cl^{-}$  و  $CO_3^{2-}$  است. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در جدول ۱ ارائه شده است. واکنش بین آب های زیرزمینی و کانی های موجود در آبخوان، نقش مهمی در کیفیت آب داشته و برای درک زایش آب زیرزمینی مفید است (قاسمی و رزم آرا، ۱۳۹۲). در مجموع، فراوانی یون های اصلی به ماهیت سنگ بستر، شرایط آب و هوایی و تحرک یون ها وابسته است (Parsanna et al., 2011).



شکل ۴- موقعیت چشمه های مورد بررسی

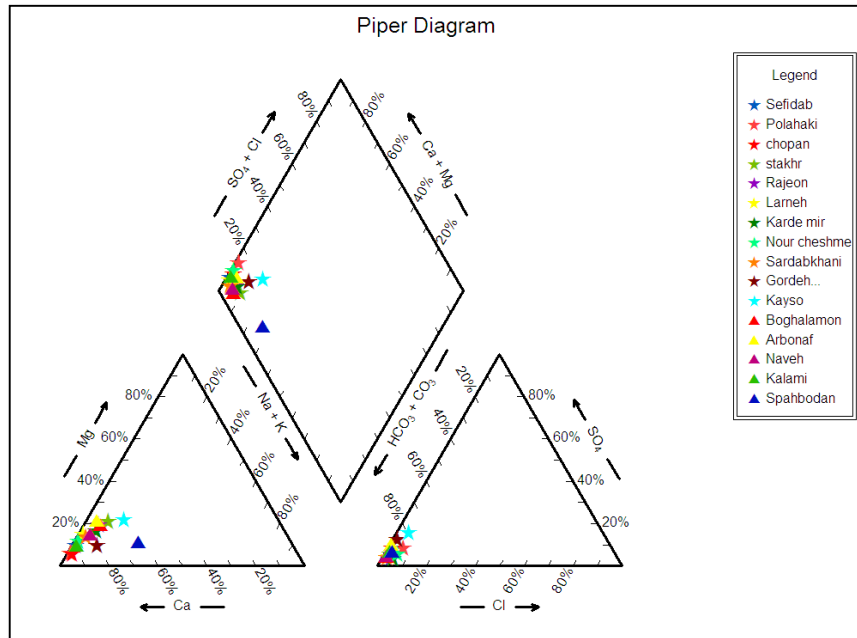
جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب چشمه ها

شماره نمونه	نام چشمه	No3 (Meg/lit)	So4 (Meg/lit)	Cl <sup>-</sup> (Meg/lit)	co <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (Meg/lit)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Meg/lit)	K <sup>+</sup> (Meg/lit)	Na <sup>+</sup> (Meg/lit)	Mg <sup>2+</sup> (Meg/lit)	Ca <sup>2+</sup> (Meg/lit)	PH	TDS (mg/lit)	Ec (μs/cm)
t1	سفیدآب	۰/۱۳	۰/۰۸۴	۰/۰۹۴	.	۲/۲۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۵	۰/۲۵	۲/۴۱	۷/۵۹	۱۴۹/۰۵	۲۳۶
t2	پل آهکی	۰/۰۸	۰/۳۶۴	۰/۳۰۱	.	۴/۰۷۲	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۲۹	۴/۸۲	۷/۵۲	۲۸۴/۵۶	۴۷۴
t3	چوپان	۰/۱۲۲	۰/۲۱۷	۰/۰۵۳	.	۲/۶۴۱	۰/۰۰۷	۰/۰۶	۰/۱۷	۲/۹۱	۷/۲۸	۱۷۸/۹۹	۲۸۶
t4	استخر	۰/۱۲۱	۰/۲۱۶	۰/۱۲	.	۳/۸۸۴	۰/۰۲۲	۰/۴۳	۰/۹۷	۳/۳۰	۷/۵۶	۲۵۳/۲۱	۴۳۵
t5	راجمون	۰/۰۶	۰/۱۷۵	۰/۱۵۸	.	۳/۹۶۲	۰/۰۱۹	۰/۲۸	۰/۹۱	۳/۵۴	۷/۴۷	۲۵۲/۳۱	۴۲۶
t6	لارنه	۰/۰۰۵	۰/۱۴۱	۰/۱	.	۳/۲۱۱	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۵۳	۳/۰۲	۷/۵۴	۱۹۷/۵۲	۳۲۲
t7	کردمیر	۰/۰۳۷	۰/۰۸۷	۰/۱۳	.	۲/۴۲۸	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۴۴	۲/۰۸	۷/۷۴	۱۵۲/۶۴	۲۳۶
t8	نورچشمه	۰/۱۳۱	۰/۱	۰/۱۰۷	.	۲/۰۶۵	۰/۰۰۸	۰/۰۳	۰/۲۶	۲/۰۲	۷	۱۳۷/۲۱	۳۳۲
t9	سرداب	۰/۰۶۲	۰/۱۲۸	۰/۰۶۹	.	۳/۳۶	۰/۰۱۴	۰/۱۲	۰/۴۹	۲/۹۸	۷/۳۷	۲۰۴/۶۶	۳۴۰
t10	گردپشته	۰/۱۰۶	۰/۲۲۸	۰/۰۴۱	.	۱/۶۷	۰/۰۰۹	۰/۲۰	۰/۱۹	۱/۶۳	۷/۶	۱۲۰/۲۱	۲۰۲
t11	کی سو	۰/۰۷۶	۰/۱۳۸	۰/۰۴۶	.	۰/۸۲۹	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۷۵	۷/۰۸	۶۶/۰۹	۱۰۴/۷
t12	یوقلمون	۰/۲۲۷	۰/۱۵۳	۰/۱۰۶	.	۵/۹۵۶	۰/۰۱	۰/۴۳	۱/۱۰	۴/۴۱	۶/۸۸	۳۵۵/۶۵	۵۹۵
t13	اربناف	۰/۱۶۴	۰/۲۲۵	۰/۰۳۷	.	۲/۲۷۲	۰/۰۱۵	۰/۱۱	۰/۵۲	۱/۹۰	۸/۱۳	۱۵۳/۱۸	۲۴۶
t14	ناوه	۰/۰۵۹	۰/۱۸۴	۰/۰۸۹	.	۵/۳۹۹	۰/۱۰۵	۰/۲۱	۰/۷۵	۴/۴۵	۷/۰۳	۳۲۰/۸۸	۵۱۸
t15	کلمی	۰/۰۱۵	۰/۲۲۷	۰/۱	.	۴/۵۳۲	۰/۰۱۵	۰/۱۱	۰/۴۴	۴/۶۸	۷	۲۸۳/۷۸	۵۱۱
t16	اسپهدان	۰/۱۵۴	۰/۱۲۸	۰/۰۷۶	.	۲/۰۶۵	۰/۰۱۵	۰/۶۷	۰/۲۵	۱/۵۸	۷/۷۹	۱۴۴/۹۹	۲۴۴

### ارزیابی ژئوشیمیایی

جهت ارزیابی ژئوشیمیایی آب زیرزمینی (تیپ و رخساره)، از نمودار پایپر (Piper, 1994) استفاده شده است. نمودار پایپر جهت تعیین نوع آب، رخساره های هیدروژئوشیمیایی، مسیر تکامل هیدروژئوشیمیایی، نمایش تعداد زیاد نمونه

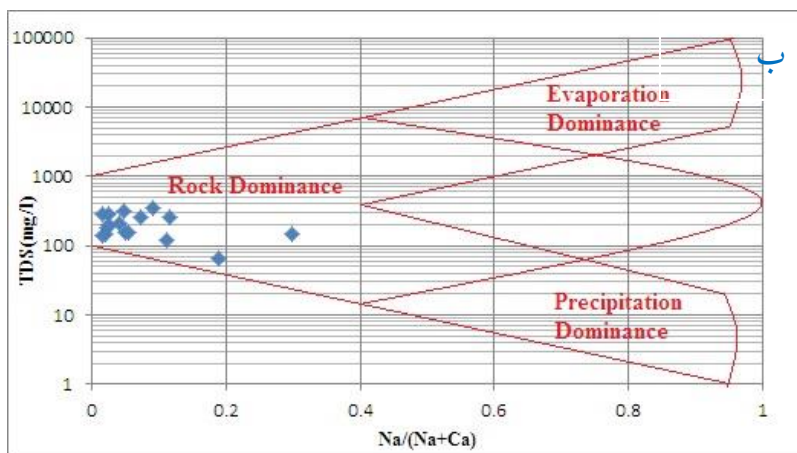
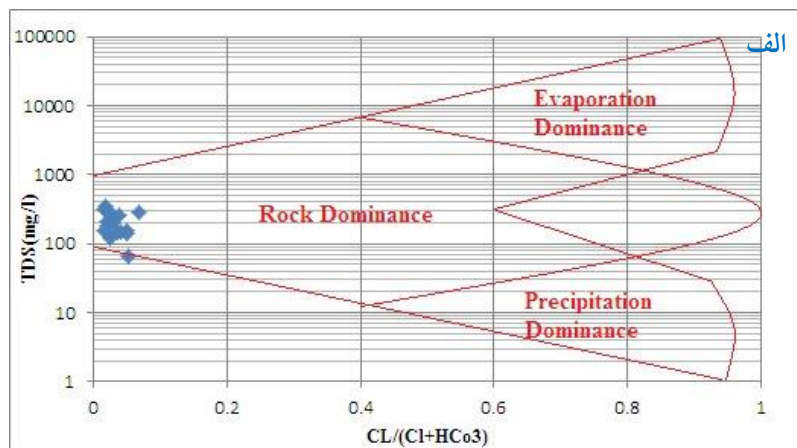
در یک نمودار، نمایش تفاوت ها و شباهت ها بین نمونه های آب، تاثیر اختلاط آب های مختلف و بررسی تغییرات زمانی و مکانی نمونه ها کاربرد دارد. در این بررسی نیز دیاگرام پایپر جهت تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی منطقه به کار گرفته شد (شکل ۵).



شکل ۵- دیاگرام پایپر نمونه آب چشمه ها

پایین و TDS بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر نشان گر تاثیر فرآیندهای هوازدگی سنگ ها و در صورت افزایش هر دوی آنها، به ترتیب نشان گر تاثیر تبخیر و تاثیر آب های شور، به عنوان عامل اصلی کنترل کننده شیمی آب محسوب می شود. تغییرات گسترده نسبت  $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$  با مقادیر TDS نسبتاً ثابت، احتمالاً وقوع تعویض یونی در آب زیرزمینی منطقه را نشان می دهد. در طی تعویض یونی، یک میلی مول بر لیتر کلسیم با دو میلی مول بر لیتر سدیم تعویض می شود که این فرآیند نمی تواند به طور قابل توجهی مقدار TDS آب را تغییر دهد، زیرا وزن یک میلی مول بر لیتر کلسیم (40mg/lit) تقریباً دو میلی مول بر لیتر سدیم (46=2×23mg/lit) می باشد (برزگر و همکاران، ۱۳۹۵).

به منظور تعیین مکانیسم های کنترل کننده شیمی آب، نمودار گیبس (۱۹۷۰) برای نمونه های آب ترسیم گردید (شکل ۶الف، ب). گیبس مکانیسم های کنترل کننده شیمی آب و تکامل آن را به سه دسته، هوازدگی سنگ، تبخیر و ریزش های جوی تقسیم کرده است. گیبس به منظور ارزیابی منشا مواد شیمیایی محلول در آب، دو نمودار به صورت نسبت  $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$  و  $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$  در مقابل کل مواد جامد محلول (TDS) تهیه کرد. در نمونه های دارای نسبت  $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$  یا  $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$  بالا و TDS پایین، ریزش های جوی بیشترین تاثیر را بر روی شیمی آب های منطقه دارند. نسبت  $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$  یا  $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$



شکل ۶- نمودار گیس نمونه های آب چشمه ها (شکل الف): نمودار تغییرات  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  نسبت به TDS ،

شکل ب: نمودار تغییرات  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  نسبت به TDS

باشد، مقدار کانی موردنظر در آب زیادتر و تمایل به ته نشینی در شاخص اشباع مثبت وجود دارد. شاخص اشباع شدگی توسط رابطه (۱) بیان می گردد:

$$SI = \log \frac{IAP}{K_t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه بالا IAP معرف میزان فعالیت یون و  $K_t$  نشان دهنده ثابت انحلال پذیری پایدار است. در این پژوهش نیز مقادیر شاخص اشباع نسبت به کانی های کلسیت، دولومیت و گاز  $CO_2$  با استفاده از نرم افزار PHREEQC محاسبه شده است (جدول ۲)

### شاخص اشباع

جهت بررسی پتانسیل آب زیرزمینی منطقه به جهت رسوبگذاری یا انحلال، شاخص اشباع شدگی آب نسبت به کانی های کلسیت، دولومیت و گاز  $CO_2$  با استفاده از داده های آنالیز شیمیایی نمونه آب چشمه ها و نرم افزار PHREEQC محاسبه گردید. شاخص اشباع شدگی اگر صفر باشد، آب در سرحد اشباع قرار دارد و اگر شاخص اشباع منفی باشد، نشان دهنده وضعیت تحت اشباع آب نسبت به کانی مورد نظر است و بیانگر آن است که کانی بیشتری می تواند در آب حل گردد. شاخص اشباع شدگی مثبت، نشان دهنده فوق اشباع بودن آب نسبت به کانی مورد نظر است. هرچه شاخص اشباع شدگی مثبت تر



جدول ۲- مقادیر شاخص اشباع برای نمونه آب چشمه ها

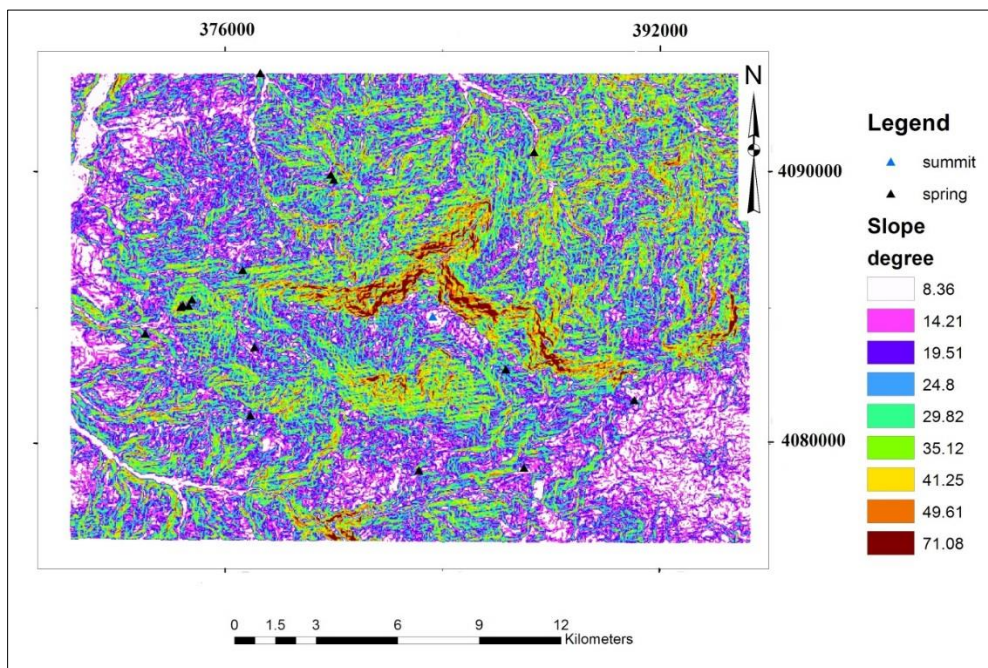
نام چشمه	شاخص اشباع		
	SI <sub>CO2</sub> (شاخص اشباع دی اکسید کربن)	SI <sub>d</sub> (شاخص اشباع دولومیت)	SI <sub>C</sub> (شاخص اشباع کلسیت)
اسپهبدان	-۲/۷۱	-۱/۴۳	-۰/۲۲
کلمی	-۱/۵۹	-۱/۷۹	-۰/۲۶
ناوه	-۱/۵۵	-۱/۳۴	-۰/۱۹
اریناف	-۳/۰۲	-۰/۳۲	۰/۲۲
بو قلمون	-۱/۳۶	-۱/۴۲	-۰/۳۱
کی سو	-۲/۳۹	-۳/۸۸	-۱/۶۱
گرده پشته	-۲/۶۱	-۲/۱۰	-۰/۴۸
سرداب خانی	-۲/۰۹	-۱/۳۵	-۰/۱۹
نور چشمه	-۱/۹۲	-۲/۸۸	-۰/۹۱
کرده میر	-۲/۶۰	-۱/۰۶	-۰/۰۹
لارنه	-۲/۲۸	-۱/۰۱	-۰/۰۳
راجعون	-۲/۱۲	-۰/۷۱	۰/۰۴
استخر	-۲/۲۲	-۰/۵۵	۰/۰۹
چوپان	-۲/۱۰	-۲/۱۹	-۰/۳۸
پل آهکی	-۲/۱۶	-۰/۹۷	۰/۲۲
سفیدآب	-۲/۴۹	-۱/۶۷	-۰/۲۵

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

به طوری که  $Z_{x_0}$  مقدار درون یابی شده،  $n$  نشان دهنده ی تعداد کلی نمونه ها است،  $x_i$  مقدار داده ی  $i$  ام است و  $h_{ij}$  فاصله جدایش بین مقدار درون یابی شده و مقدار داده نمونه برداری شده است و  $\beta$  توان وزن دهی را نشان می دهد (Bhunia et al., 2016). با توجه به اینکه نقاط نمونه برداری دارای پراکنش یکنواختی نبودند، در این مقاله، از روش IDW استفاده شده است. نقشه های تولید شده با این روش نسبت به سایر روش ها، نتایج منطقی تری را در این منطقه ارائه کرده است. نقشه های تولید شده با سایر روش ها به دلیل تخمین دور از واقعیت متغیرها، قابل استفاده نبوده است. شکل ۸ (الف-ح) نقشه های تولید شده با این روش را نمایش می دهند که با نقشه شیب (شکل ۷) مقایسه شده اند تا روند تغییرات متغیرها مشخص گردد.

### گسترش فضایی پارامترهای ژئوشیمیایی

در این مقاله به منظور بررسی توزیع فضایی متغیرهای ژئوشیمیایی، با استفاده از نرم افزار Arc GIS10 و روش درون یابی، نقشه هم مقدار پارامترهای ژئوشیمیایی در محدوده مورد مطالعه تولید گردید. با این عمل نحوه تغییرات متغیرهای ژئوشیمیایی در منطقه نسبت به شیب بررسی گردید. از جمله روش های رایج برای درون یابی، RBF، LPI، Kriging، Spline، IDW است. روش IDW یک روش خیلی رایج و قطعی در این زمینه است. تخمین های IDW بر اساس موقعیت های شناخته شده ی اطراف صورت می گیرد. وزن های تعیین شده برای نقاط درون یابی شده، بالعکس فاصله ی آنها از نقاط درون یابی هستند. در نتیجه، نقاط نزدیکتر دارای وزن بیشتر (تأثیر بیشتر) نسبت به نقاط دورتر هستند و بالعکس (رابطه ۲). نقاط نمونه برداری معین اشاره شده است تا مستقل از یکدیگر باشند (Robinson & Metternicht, 2006).



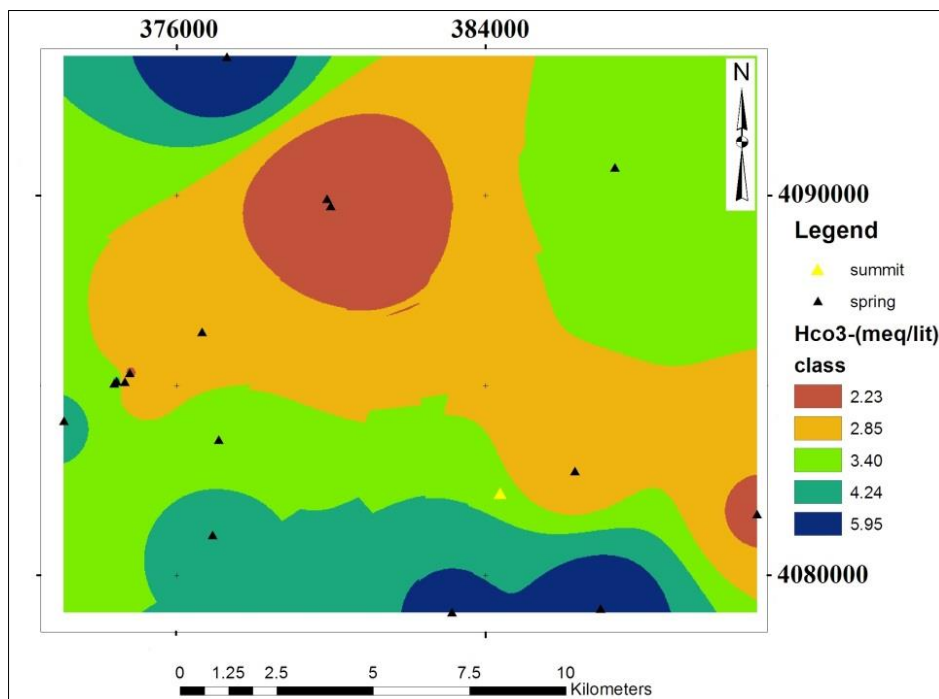
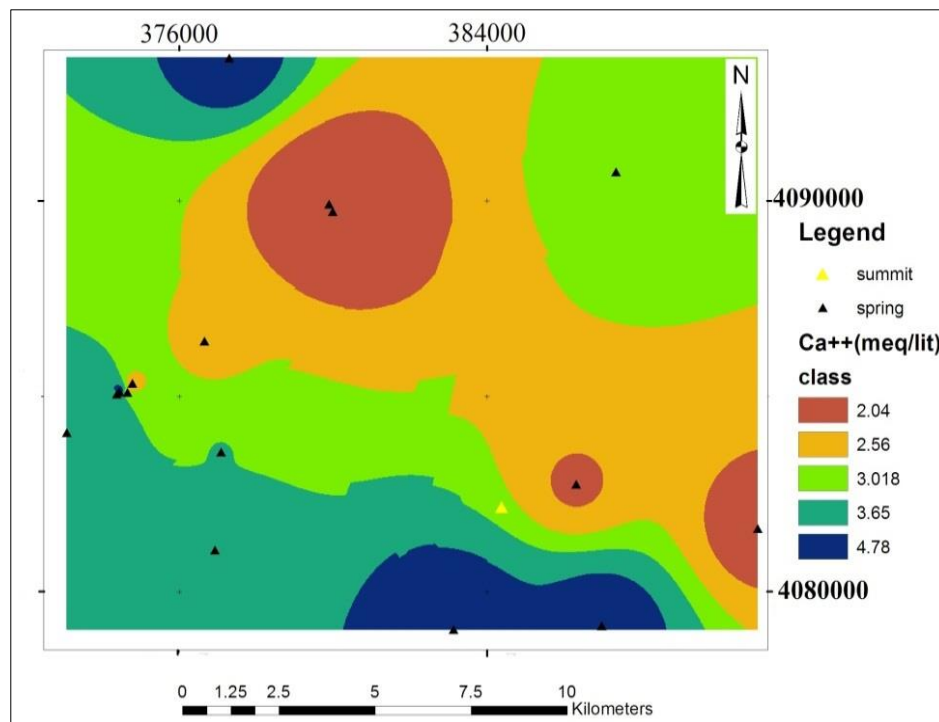
شکل ۷- نقشه شیب محدوده مورد مطالعه

#### ارزیابی توسعه یافتگی آبخوان کارستی

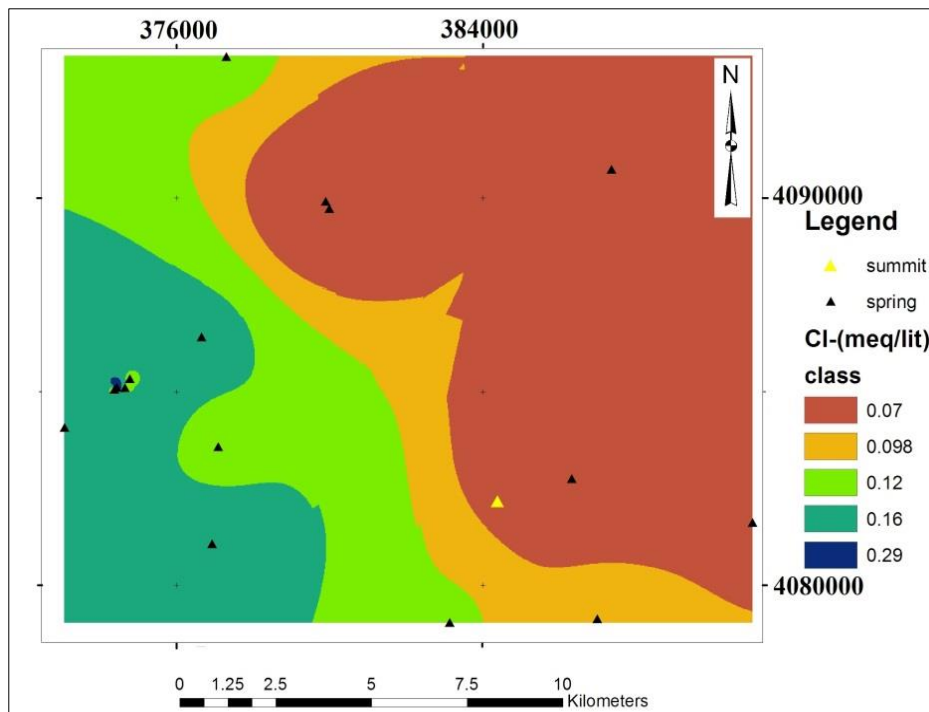
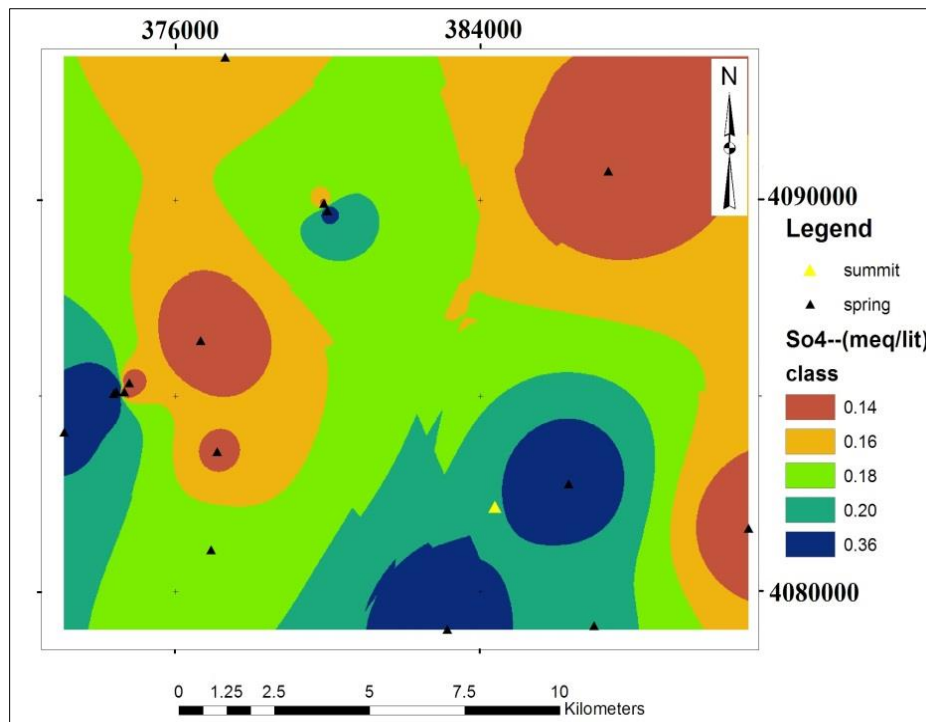
مناطق دارای سنگ های کربناته کارستی شده بدون پوشش خاک، نشان دهنده مناطق تغذیه خودزا (Autogenic) بوده و می توان انتظار داشت ۸۰ درصد بارش در آنها نفوذ کند (Goldscheider and Drew., 2004). ژئومورفولوژی سطحی تاثیر زیادی در نوع و چگونگی تغذیه آبخوان های کارستی دارد (باقری سید شکری و همکاران، ۱۳۹۲). تغذیه آبخوان کارستی در این حالت یا از طریق درزه، شکاف ها و کارن ها منتشر می شود و یا اینکه به صورت متمرکز از طریق فروچاله ها و چاه ها (Shaft) صورت می گیرد. توسعه یافته بودن ژئومورفولوژی کارست سطحی و وجود فروچاله ها و درزه های فراوان در سنگ آهک، عامل اصلی رفتار هیدرودینامیکی چندگانه آبخوان کارستی است. خصوصیات هیدرودینامیکی سامانه های کارستی به شرایط جریان در آنها بستگی دارد (باقری سید شکری و همکاران، ۱۳۹۲). وضعیت جریان در سیستم های کارستی به سلسله مراتب جریان، تنظیم خروجی و سازماندهی شبکه زهکشی در مناطق غیر اشباع وابسته است که به وسیله ساختار سیستم کارستی تعیین می شود (Lastennet & Mudry, 1997). هیدروگراف چشمه

ها منعکس کننده تمام فرآیندهای فیزیکی است که در داخل آبخوان، جریان آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می دهد (Kutha et al., 2012). آنالیز منحنی فرود هیدروگراف روش مهمی در بررسی های هیدرولوژیکی است که برای تفسیر ویژگی های آبخوان های کارستی استفاده می شود (Kresic & Bonacci., 2010). منحنی فرود به صورت نیمه لگاریتمی است. دبی بر حسب لیتر بر ثانیه در برابر زمان بر حسب روز ترسیم می شود. منحنی فرود شامل دوره زمانی بین دبی پیک بیشینه تا زمان افزایش مجدد دبی در پایان دوره منحنی فرود است (Malík & Vojtková., 2012).

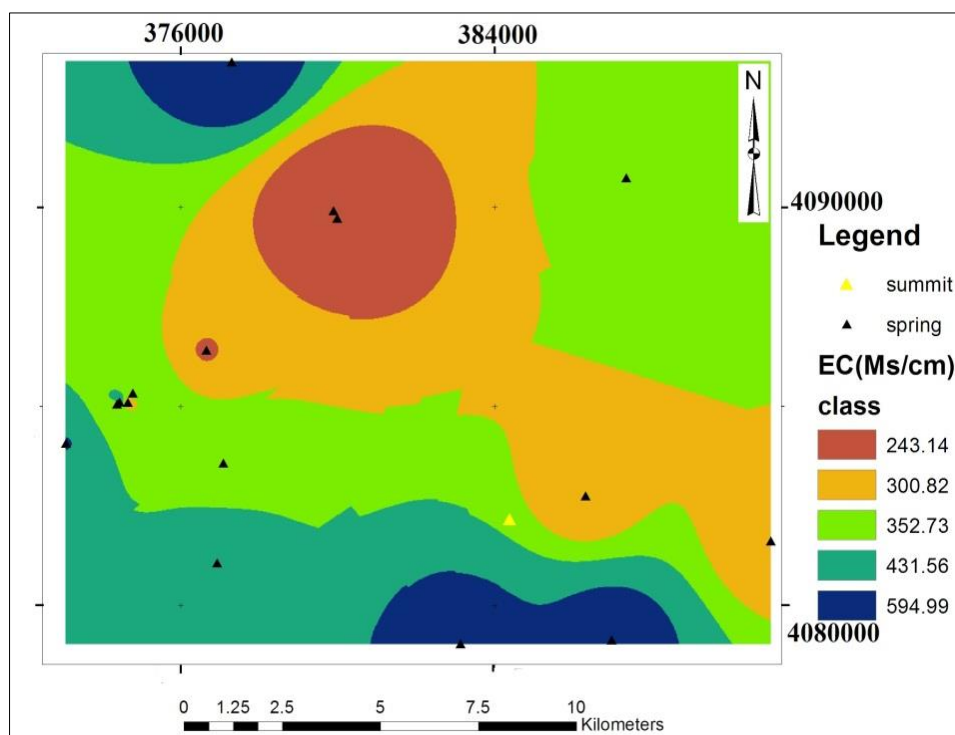
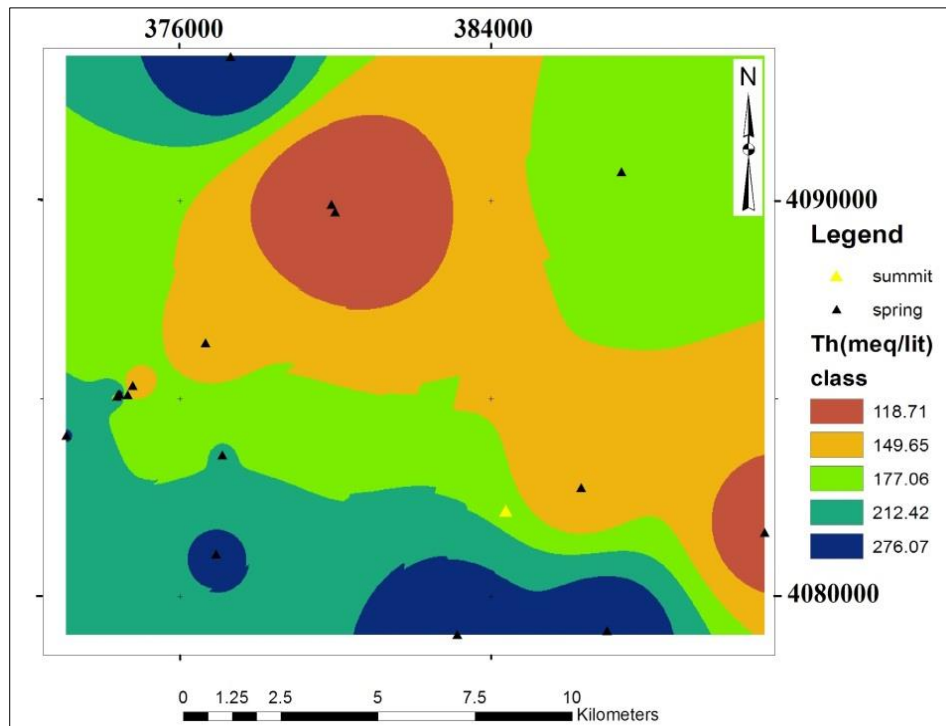
جهت بررسی مقدار ذخیره، دبی و تغییرات آنها در زمان های مختلف، ابتدا هیدروگراف دبی چشمه مورد مطالعه ترسیم می شود. سپس ضریب فرود ( $\alpha$ ) و حجم ذخیره دینامیک چشمه (به عنوان عامل تعیین کننده ی توسعه یافتگی آبخوان ها) محاسبه می گردد. حجم ذخیره دینامیک عاملی است که نتیجه شرایط خاص زمین شناختی و بازخوردی از توسعه کارستی یک منطقه است (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴). در این بررسی به تحلیل هیدروگراف چشمه سفید آب پرداخته شده است. چشمه سفید آب به



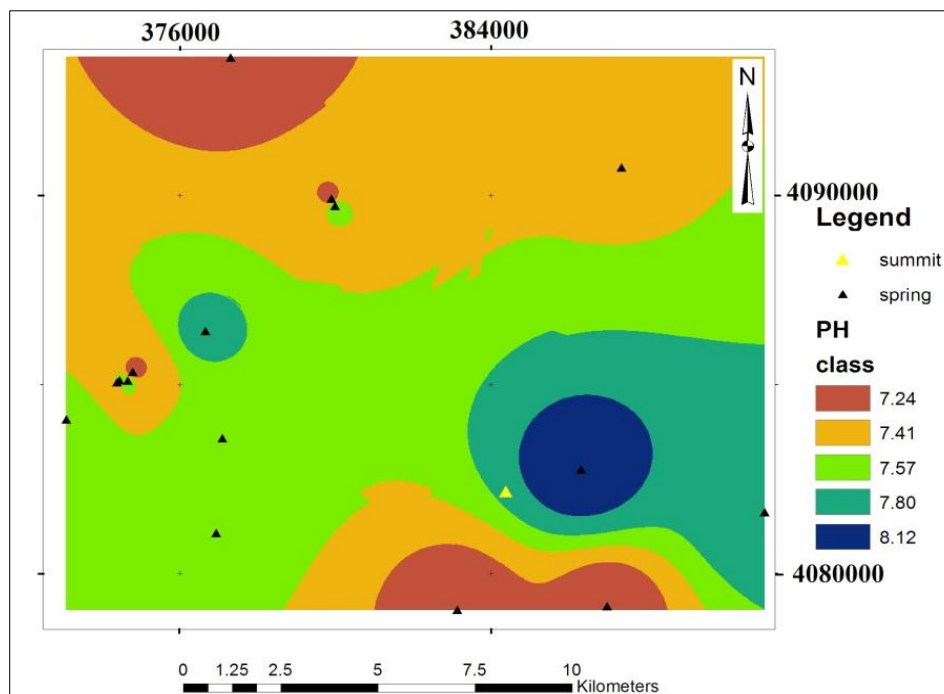
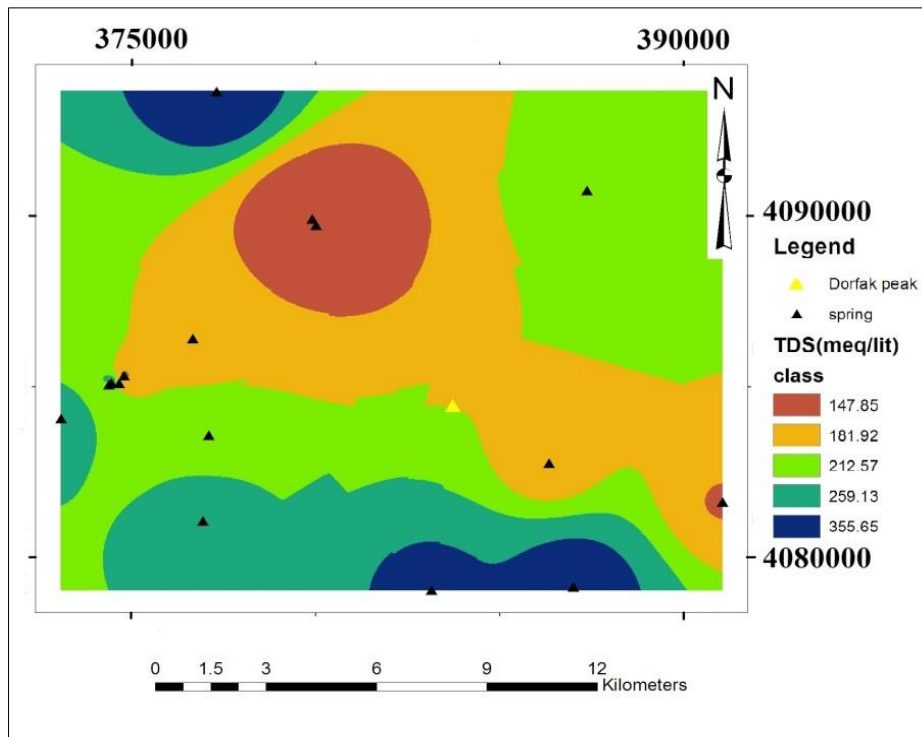
شکل ۸- نقشه های هم مقدار متغیرهای ژئوشیمیایی  $Ca^{+2}$  و  $HCO_3^-$



شکل ۹- نقشه های هم مقدار متغیرهای ژئوشیمیایی  $SO_4^{2-}$  و  $Cl^-$



شکل ۱۰- نقشه های هم مقدار متغیرهای ژئوشیمیایی Th و Ec



شکل ۱۱- نقشه های هم مقدار متغیرهای ژئوشیمیایی TDS و PH

به صورتی که  $V = \text{حجم ذخیره دینامیک (m}^3\text{)}$ ،  
 $Q_{0n} = \text{آبدهی اولیه در قسمت } n \text{ ام نمودار هیدروگراف و}$   
 $\alpha_n = \text{ضریب فروکش در قسمت } n \text{ ام نمودار هیدروگراف}$   
 است (اتحاد و همکاران، ۱۳۸۴).

چشمه های کارستی در مناطق کارستی خیلی پراکنده هستند. اکثر چشمه های کارستی در امتداد سطح اساس فرسایش یعنی در مرز محیطی پولزه های کارستی، دره های رودخانه و ساحل دریا واقع شده اند. مشخصه مشترک این چشمه ها اعم از موقتی یا دائمی بودن، وابستگی مستقیم بین بارش و جریان خروجی از آنها می باشد (میلانویچ، ۱۹۸۱). چشمه ها در منطقه مورد مطالعه در بیشتر موارد در دره ها نمود دارند و از نوع گسله هستند. از کل چشمه های مورد بررسی، فقط نورچشمه از نوع موقتی است و مابقی آنها دائمی هستند. در این بررسی به منظور ارزیابی تاثیرات بارش باران بر آبخوان کارستی منطقه، هیدروگراف چشمه سفید آب (مهمترین چشمه به لحاظ آبدهی در این منطقه) و نمودار میزان بارش (ایستگاه شاه شهیدان) در طی چهار سال ترسیم گردید. در این هیدروگراف سه پیک عمده قابل مشاهده است که پیک اول و سوم (از سمت چپ) بعد وقوع دو رویداد بارش حداکثری ایجاد شده اند و پیک دوم پس از یک دوره بارش مستمر رخ داده است (شکل ۱۳ و ۱۴).

عنوان اصلی ترین زهکش منابع کارستی درفک محسوب می گردد. این چشمه در غرب حوضه کارستی درفک و در بالادست روستای شیرکوه قرار می گیرد. این چشمه از دیدگاه ساختاری یک چشمه گسلی و درزو شکافی است که خردشدگی های ناشی از گسل در آهک های متوسط تا نازک لایه  $\text{Km}^2$  بوجود آمده است. بر اساس داده های موجود و مشاهدات صحرایی، ظرفیت آبدهی این چشمه بسیار متغیر و به میزان و مدت بارندگی بستگی دارد. به صورتی که در شکل (۹) قابل مشاهده است، ضرایب فروکش و حجم ذخیره دینامیکی چشمه سفید آب با استفاده از معادلات زیر برآورد شده است (اتحاد و همکاران، ۱۳۸۴).

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343(t)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

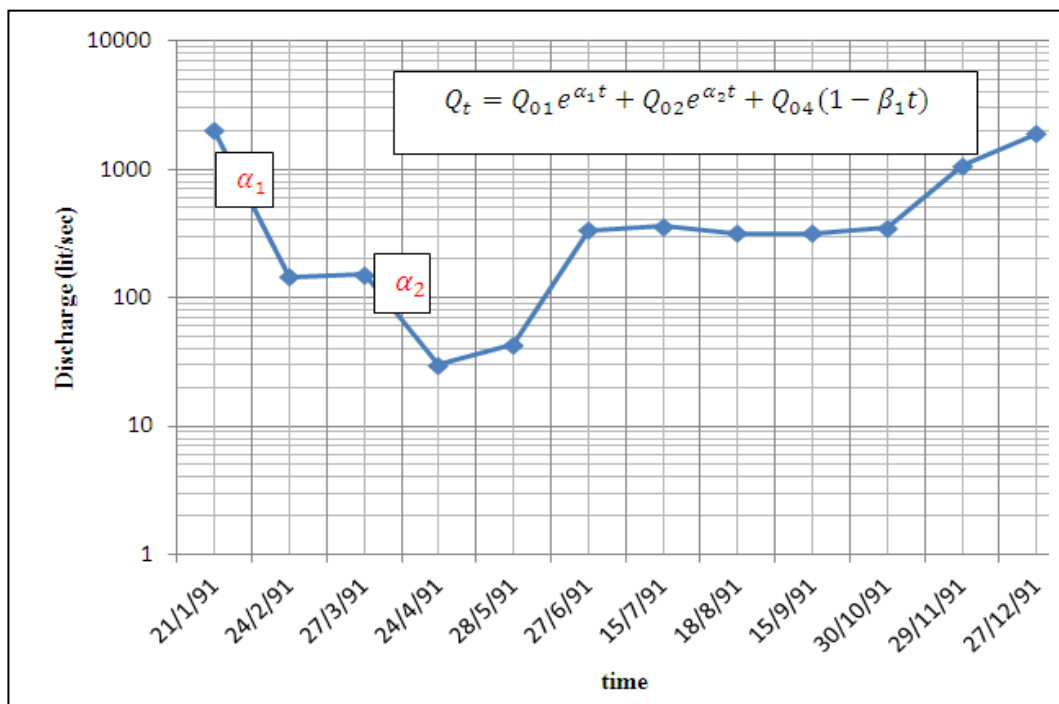
به صورتی که  $\alpha = \text{ضریب فروکش}$

$$Q_0 = \text{آبدهی قبلی در زمان } t=0 \quad (\text{m}^3/\text{Sec})$$

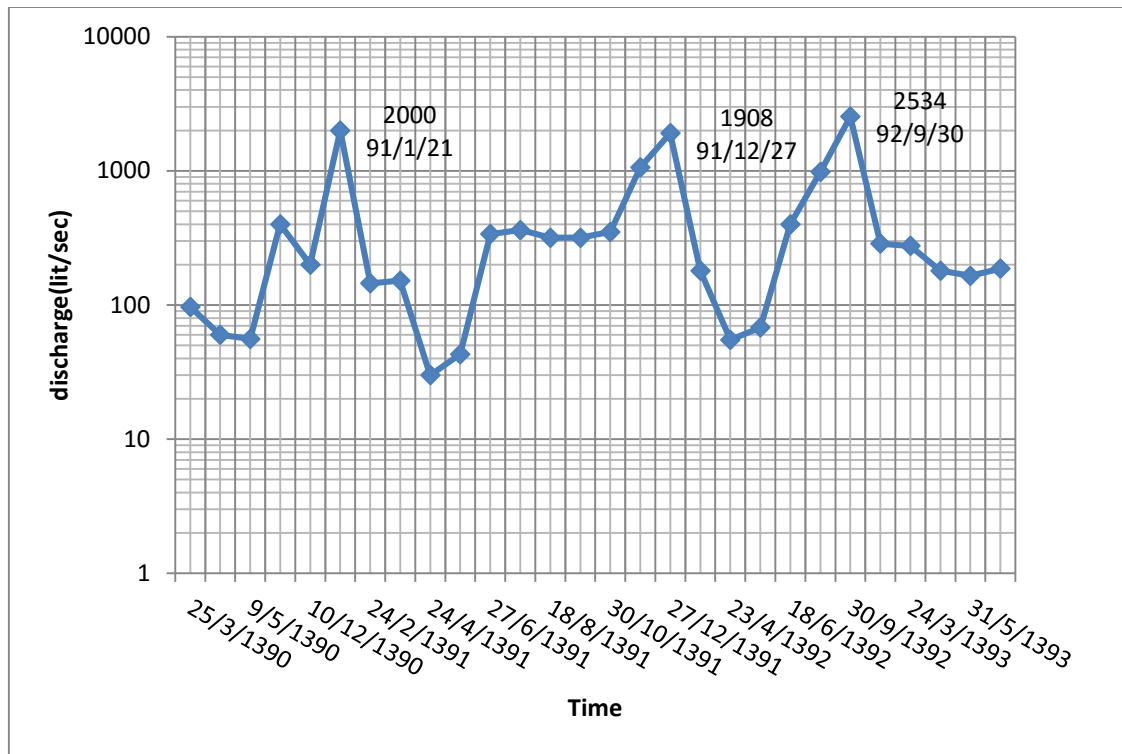
$$Q_t = \text{آبدهی در زمان } t \quad (\text{m}^3/\text{Sec})$$

$t = \text{مدت زمان بین آبدهی اولیه و ثانویه (روز) است.}$

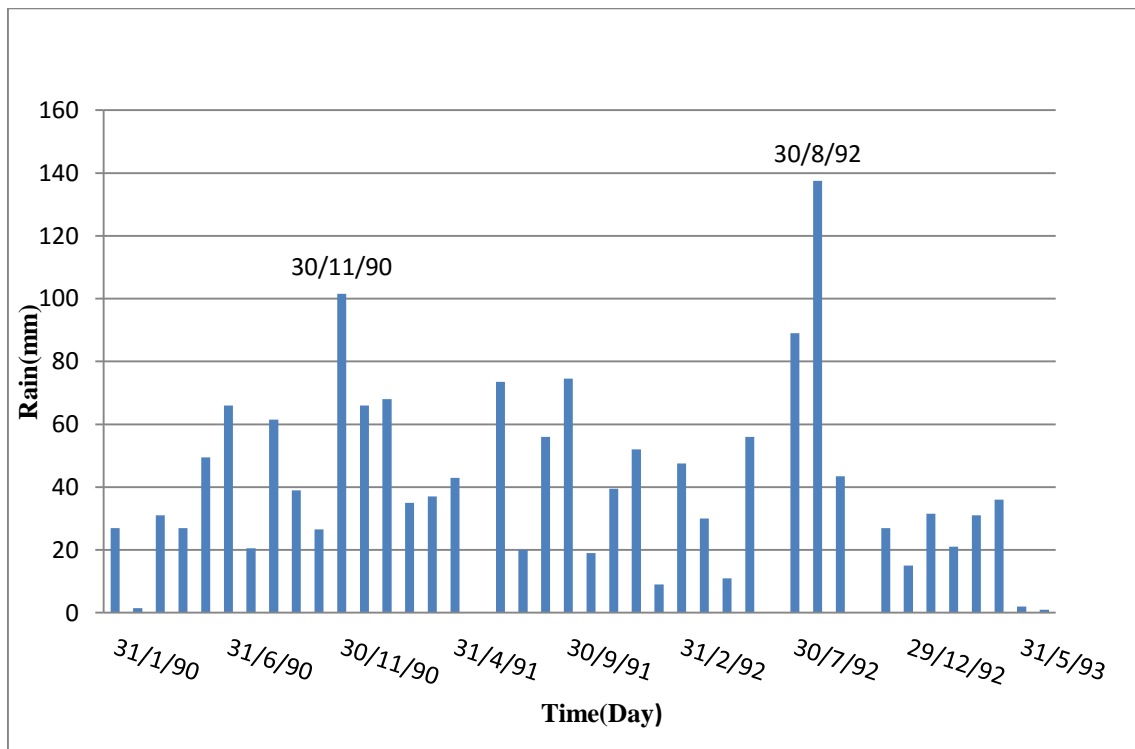
$$V = 86400 \left( \frac{Q_{01}}{\alpha_1} + \frac{Q_{02}}{\alpha_2} + \dots + \frac{Q_{0n}}{\alpha_n} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$



شکل ۱۲- هیدروگراف چشمه سفید آب در سال آبی ۱۳۹۱



شکل ۱۳- نمودار هیدروگراف چهار ساله (۹۰-۹۴) چشمه سفیدآب



شکل ۱۴- نمودار میزان بارش چهار ساله (۹۰-۹۴) ایستگاه شاه شهیدان



## نتیجه گیری

با ترسیم دیاگرام پایپر نمونه های آب چشمه ها، مشخص گردید که تیپ آب تمام چشمه های منطقه از نوع Ca-HCO<sub>3</sub> است، که در واقع تأیید کننده کارستی بودن چشمه های منطقه است. به منظور بررسی لیتولوژی سنگ های در برگیرنده بر کیفیت آب ها، تعیین سازوکار حاکم بر جریان آب زیرزمینی و ترکیب یون های اصلی موجود در آب زیرزمینی از نمودار گیبس استفاده شد (Subba Rao, 2002). بر اساس این نمودار (شکل ۶ الف و ب) نمونه آب های چشمه های منطقه مورد مطالعه در ناحیه ای که فرآیندهای سنگی غالب است (Rock Dominance)، قرار می گیرند که این امر نشان دهنده ی تأثیر متقابل بین شیمی سنگ و شیمی آب های حاصل از بارش است که به زیرزمین نفوذ کرده اند.

در این مطالعه به منظور تعیین تعادل شیمیایی بین کانی های اصلی موجود در سازندهای زمین شناسی و آب زیرزمینی، از جمله کلسیت، دولومیت، شاخص اشباع این کانی ها و گاز CO<sub>2</sub> برای نمونه های آب زیرزمینی محاسبه شده است و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. به صورتی که شاخص اشباع بیان می کند، بیشتر نمونه های آب منطقه نسبت به کلسیت، دولومیت و CO<sub>2</sub> تحت اشباع هستند و این بیانگر آن است که کانی های مورد نظر هنوز می توانند در آب حل شوند.

بررسی توزیع فضایی متغیرهای شیمیایی در منطقه و مقایسه آن با نقشه شیب منطقه (شکل ۷) مشخص کرد که پارامترهای EC، th، TDS در دامنه های شمالی، شمال شرقی، و شمال غربی به دلیل شیب زیادتر، تماس کمتر آب با سنگ، دارای روند تغییرات کمتری هستند. درحالیکه در دامنه های جنوبی و جنوب غربی این پارامترها دارای روند تغییرات زیادتری هستند (شکل ۸ ج، ث، و ج). تغییرات زیادتر EC در دامنه های جنوبی و جنوب غربی همچنین به دلیل گسله بودن چشمه های این محدوده نیز می باشد که دلیل اصلی EC بالاتر این چشمه ها نسبت به چشمه های دیگر است. روند تغییرات یون های Ca<sup>2+</sup> و HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> در دامنه های شمالی و شمال شرقی به دلیل شیب زیادتر و تماس کمتر آب با سنگ دارای غلظت کمتری هستند در حالیکه در دامنه های جنوبی و جنوب غربی به دلیل شیب کمتر و تماس بیشتر آب با سنگ آهک مقدار

این دو یون افزایش می یابد (شکل ۸: الف و ب). روند تغییرات یون SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> نیز در دامنه های جنوبی و جنوب غربی به دلیل شیب کمتر و تماس بیشتر آب با سنگ افزایش می یابد در حالیکه به سمت شمال کاهش نشان می دهد (شکل ۸: پ). روند تغییرات یون Cl<sup>-</sup> از شمال شرقی به جنوب غربی افزایش می یابد (شکل ۸: ت).

میزان توسعه یافتگی کارستی محدوده مورد مطالعه، با استفاده از هیدروگراف یک ساله چشمه سفیدآب و روش مالیک و وجتکوا (۲۰۱۲) ارزیابی گردید. بدین جهت مقادیر  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\beta_1$  در قسمت فرود هیدروگراف محاسبه گردید. مقدار این ضرایب به ترتیب ۰/۰۷۷۱، ۰/۰۵۷۹۵، ۰/۱۱۳۳۱ است. با مقایسه مقادیر این ضرایب با جدول ارائه شده توسط مالیک و وجتکوا (۲۰۱۲)، درجه توسعه کارست ۵/۵ تعیین گردید. در این درجه از توسعه آبخوان کارستی، رژیم تخلیه پیچیده، ترکیبی از یک زیر رژیم با جریان آشفته و دو زیررژیم با جریان آب زیرزمینی آرام وجود دارد. تأثیر تخلیه زیررژیم با جریان آشفته در مقایسه با تخلیه آب زیرزمینی کلی کوتاه مدت است. در این درجه از توسعه کارست، شکستگی ها و فروپاشی های گسترده در محیط سنگی با شکاف های کارستی شده و غیر کارستی با اندازه متوسط و اکثریت با دهانه باز در زون فراتیک از آبخوان کارستی شکاف دار (مطابق با ضریب  $\alpha_1$ ) و با تأثیر کوچکتر از لوله های متصل به هم (جریان آب زیرزمینی از کانال های کارستی بزرگ، مطابق با  $\beta_1$ ) وجود دارد (Malík and Vojtková, 2012). مقدار ذخیره دینامیک چشمه سفید آب بر طبق رابطه (۶)، ۲۴۶۷۸۳۸/۹۵ مترمکعب برآورد گردید.

## منابع

- اتحاد، ر.، امامی، ف.، رشیدی، م.ح.، صداقت، م.، مهرسا، ب.، (۱۳۸۴)، "راهنمای تهیه آبنمود چشمه های کارستی و سازندهای سخت"، شرکت مدیریت منابع آب ایران، نشریه شماره ۲۳۲-الف، خرداد ۱۳۸۴، ۴۵ص.
- باقری سیدشکری، س.، یمانی، م.، جعفریگللو، م.، حاجی کریمی، م.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی ویژگیهای هیدرودینامیکی آبخوانهای کارستی با استفاده از آنالیز سریهای زمانی (مطالعه موردی: آبخوانهای کارستی گیلان غرب و خورین در استان کرمانشاه)"، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۲، ص ۱-۱۶.

- ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشتهای زیرچری و خران"، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد دوم، شماره (بهار و تابستان ۱۳)، ص ۳۳۹-۳۵۶.
- کارخانه، ط.، ساریخانی، ر.، قاسمی دهنوی، آ.، (۱۳۹۵)، "بررسی آماری نسبت های یونی و شاخص های اشباع در تعیین منشأ املاح منابع آب زیرزمینی دشت دلفان"، شمال استان لرستان، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، سال دهم، شماره ۳۶، پاییز ۹۵، ص ۱-۱۴.
- میلانویچ، پ.، (۱۹۸۱)، "هیدرولوژی کارست"، ترجمه آغاسی ع.، افراسیابیان ا.، انتشارات استانداردهای مهندسی آب کشور، ۴۰۸ ص.
- محمدی بهزاد، ح.، چرچی، ع.، کلاتری، ن.، (۱۳۹۴)، "بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی سبزآب"، شمال شرق استان خوزستان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، بهار ۹۴، شماره ۱، ص ۱۰-۱۹.
- میر عربی، ع.، (۱۳۹۴)، "شناسایی مناطق کارستی درفک"، حوضه آبریز شهر بیجار و دیورش، موسسه تحقیقات منابع آب، ص ۲۷۶.
- **Bhunia, G.S., Pravat Kumar Shit, P.K., Maiti, R., (2016), "Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC)", Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, pp.1-12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.001>.**
- **Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, A., Priestly, K., Wallace, T., (1992), "The Rudbar-Tarom Earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: Preliminary Field and Seismological observation, And its tectonic significance" Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, no. 4, 1992, 1726- 1755.**
- **Coetsiers, M., and Walraevens, K., (2006), "Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium", Hydrogeology journal, 14, P.1556-1568.**
- **Ford D., Williams P., (2007), "Karst Hydrogeology and Geomorphology", John Wiley and Sons Ltd1, pp. 562.**
- **Goldscheider, N., Drew, D., (2004), "Methods in Karst Hydrogeology", Taylor & Francis, Londo, pp. 273.**
- **Gibbs, R.J., (1970), Mechanism controlling world water chemistry. Science 170: 1088-1090**
- **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.**
- **Hatipoglu-Bagci, Z., Sazan, M.S., (2014), "Characteristics of karst springs in Aydıncık (Mersin, Turkey), based on recession curves and hydrochemical and isotopic parameters", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 47, 2014, pp. 89-99.**
- برزگر، ر.، اصغری مقدم، ا.، نجیب، م.، کاظمیان، ن.، (۱۳۹۵)، "بررسی ویژگیهای هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت تبریز با استفاده از مدل های هیدروشیمیایی و روش های آماری"، نشریه علوم و مهندسی آب خیزداری ایران، سال دهم، شماره ۳۲، بهار ۱۳۹۵، ص ۳۹-۵۰.
- بهرامی، ش.، زنگنه اسدی، م.ع.، جهانفر، ع.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگی های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه های کارستی در زاگرس ( منطقه مورد مطالعه : تاقدیس قلاجیه و توده پراویستون)"، جغرافیا و توسعه، شماره ۴۴، پاییز ۱۳۹۵، ص ۱۰۷-۱۲۳.
- رحمتی، م.، مرادی، ح.، حاجی کریمی، جلیلی، خ.، (۱۳۹۴)، "بررسی اثر توسعه یافتگی کارست بر رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه های کارستی استان کرمانشاه"، اکوهیدرولوژی، دوره ۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴، ص ۱۶۳-۱۷۳.
- ریاحی پور، م.، کلاتری، ن.، (۱۳۸۷)، "تعیین حوضه آبریز چشمه کارستی پیرغار به روش زمین شناسی و هیدروژئولوژی"، دوازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، اهواز شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.
- صفری، ح.، قاسمی، م.، آق آتابای، م.، رضوی پش، ر.، (۱۳۹۲)، "تحلیل ساختاری پهنه گسلی لاهیجان-البرز باختری، فصلنامه علوم زمین"، تابستان ۹۲، سال بیست و دوم، شماره ۸۸، ص ۱۳-۱۸.
- قاسمی، ع.، رزم آرا، م.، (۱۳۹۲)، " تاثیرات هیدروژئوشیمیایی منطقه افیولیتی شمال شرق تربت حیدریه بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه گرماب-آبدارو" مجموعه مقالات هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱-۱۰.
- کریمی وردنجانی، ح.، (۱۳۸۴)، "بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه های کارستی موگرمون و سرآسیاب"، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران، ص ۱۴۹-۱۵۷.
- کلاتری، ن.، محمدی بهزاد، ح.، چرچی، ع.، کشاورزی، م.، (۱۳۹۰)، "چشمه های کارستی به عنوان ساده ترین ابزار برای تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان های کارستی"، مطالعه موردی چشمه بی بی تلخون، استان خوزستان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته زمستان ۹۰، شماره ۲ جلد ۱، ص ۹۰-۱۰۰.
- کلاتری، ن.، رحیمی، م.ح.، چرچی، ع.، (۱۳۸۶)، "استفاده از دیاگرام های ترکیبی، تحلیل عاملی و نمایه های اشباع در

- Piper, A.M., (1944), "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses", American Geophysical Union Trans, 25, pp.914-923.
- Prasanna, M. V., Chidambaram, S., Senthil Kumar, G., Ramanathan, A. L. and Nainwal H. C. (2011). "Hydrogeochemical assessment of groundwater in Neyveli Basin, Cuddalore District, South India", Arab J. Geosci. Vol. 4, pp. 319-330.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. & Karam, G., (2006), "GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions", J. Geophys. Res. 111, No. B5, B05411, pp. 26.
- Robinson, T.P., Metternicht, G.M., (2006), "Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties", Comput. Electron. Agric. 50, pp. 97–108.
- Safari, H.O., Ghassemi, M.R., Razavi-Pash, R., (2013), "Determination and Structural Analysis of the Lahijan Transverse Fault in Forestall Region of Alborz Mountains, Iran: A Geospatial Application", International Journal of Remote Sensing Applications Volume 3, Issue 4, December 2013, doi: 10.14355/ijrsa.2013.0304.06215.
- 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, pp.1099-1110.
- Subba Rao N., (2002), "Geochemistry of groundwater in parts of Guntur district, Andhra Pradesh, India", Environmental Geology, 41, pp.552-562.
- Terzić, J., Stroj, A., Frangen, T., (2012), "Hydrogeological investigation of karst system properties by common use of diverse methods: a case study of Lička Jesenica springs in Dinaric karst of Croatia", HYDROLOGICAL PROCESSES, DOI: 10.1002/hyp.9194.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. & Berberian, M., (2002), "Active tectonics of the South Caspian Basin", Geophys. J. Int., 148, pp. 214-245.
- Krishnaraj, S., Murugesan, V., Vijayaraghavan, K., Sabarathinam, C., Paluchamy, A., Ramachandran, M., (2011), "Use of Hydrochemistry and Stable Isotopes as Tools for Groundwater Evolution and Contamination Investigations", Geosciences 2011; 1(1): pp.16-25 DOI: 10.5923/j.geo.20110101.02.
- Kuhta, M., Brkić, Ž. and Stroj, A. (2012), "Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia". Geologia Croatica. 65 (1), pp. 41-52.
- Kresic, N. and Bonacci, (2010), "Spring discharge hydrograph. In Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability". Elsevier ch 4. pp. 129–163.
- KAVOUSI, A., RAEISI, E., (2015), "Estimation of groundwater mean residence time in unconfined karst aquifers using recession curves", Journal of Cave and Karst Studies, v. 77, no. 2, pp. 108–119. DOI: 10.4311/2014ES0106.
- Lopez-Chicano, M., Bouamama, M., Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., (2001), "Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs. A case study from the Betic Cordilleras, Spain", Applied Geochemistry 16 (2001), pp.1179-1192.
- Lastennet, R. and Mudry, J. (1997), "Role of karstification and rainfall in the behavior of a heterogeneous karst system". Environmental Geology, 32 (2), pp. 114-123.
- Liu, Z., Li, Q., Sun, H., Wang, J., (2007), "Seasonal, diurnal and storm scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO<sub>2</sub> and dilution effects", Journal of Hydrology (2007) 337, pp. 207–223.
- Malík, P. and Vojtková, S. (2012), "Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs", Environmental Earth Sciences, 65 (8), pp. 2245-2257.
- Malík, P., (2007), "Assessment of regional karstification degree and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analysis in the Velka Fatra Mts., Slovakia" Water Resources and Environmental Problems in Karst, Environ Geol 2007(51):707–711. doi:10.1007/s00254-006-0384-0.
- Mustafa, O., Merkel, B., Weise, S.M., (2015), "Assessment of Hydrogeochemistry and Environmental Isotopes in Karst Springs of Makook Anticline, Kurdistan Region, Iraq", Hydrology 2015, 2, pp. 48-68; doi:10.3390/hydrology2020048.
- Milanovic, P.T. (1981), "Karst Hydrogeology", Water Resources Publication, Colorado, pp. 434.
- Nilfouroushan, F., (2007), "Ground Movements in the Zagros Fold-Thrust Belt of SW Iran Measured by GPS and InSAR Compared to Physical Models", PhD, Thesis, Uppsala University, Sweden.

