

بررسی پارامترهای ساختاری و الگوی شکستگی‌ها، معماری زون‌های گسلی و ساختار نفوذپذیری گسل‌ها و نقش آن در نفوذ، زهکشی و فرار آب از سازند تیرگان در منطقه قوری میدان

حسین محمد زاده

مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی (متآب)، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

زهرا زند وکیلی

مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی (متآب)، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

بهنام رحیمی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۱

mohammadzadeh@um.ac.ir

چکیده

دشت قوری میدان، واقع در استان خراسان شمالی، از شمال و جنوب توسط سازند تیرگان، مهمترین مخزن آب کارستی منطقه، محصور شده است. هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای ساختاری (چین، گسل و درزه‌ها) و الگوی شکستگی‌ها و تخمین آب نفوذی و زهکشی شده از سازند تیرگان می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌های ساختاری حاصل از عملیات صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای بیانگر تاقدیسی بودن ارتفاعات شمالی و جنوبی و ناودیدی بودن دشت و وجود شکستگی‌ها (N50) با ساختار نفوذپذیری کانالی افشان و کانالی سدی است. با همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی مختلف در نرم‌افزار GIS، میزان نفوذ آب در سازند تیرگان به دست آمد (۰.۴۴٪)، که با توجه به مساحت و متوسط بارندگی، حدود $22/8 \text{ MCM}$ آب از طریق شکستگی‌ها نفوذ و سپس از طریق چشمه دشتک ($8/7 \text{ MCM}$) و بصورت زهکشی ($14/1 \text{ MCM}$) از سازند تیرگان به داخل رودخانه اترک تخلیه و از منطقه خارج می‌گردد.

کلمات کلیدی: سازند تیرگان، کارست، پارامترهای ساختاری، درصد نفوذ، چشمه دشتک

مقدمه

با ساختارهای تکتونیکی است (احمدی پور، ۱۳۷۷، شکری و همکاران، ۱۳۹۰، مینویی و همکاران، ۱۳۸۹). عوامل تکتونیکی و همچنین پدیده‌های کارستیک هر منطقه نقش مهمی در نفوذپذیری و تغذیه آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند (Krishnamurthy and Srinivas, 1995). برای ارزیابی تغذیه می‌توان از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های فیزیکی ردیابی و ایزوتوپی، بررسی هیدروگراف‌ها و روش بیان استفاده نمود. اما بدلیل فراگیر بودن و هوشمندی نسبی GIS (کی نژاد و همکاران، ۱۳۹۱)، بسیاری از دانشمندان از این بانک اطلاعاتی برای تعیین نفوذ استفاده می‌کنند. شعبان و همکاران (Shaban et al., 2004)، به منظور تعیین نواحی با پتانسیل تغذیه بالا در مناطق کارستی غرب لبنان، از سنجش از دور و GIS استفاده کردند. اندرو و همکاران (Andreo et al., 2008)، ۸ آبخوان کارستی در جنوب اسپانیا را با استفاده از روش APLIS (ارتفاع، شیب، لیتولوژی، نفوذ و عوارض سطحی و نوع خاک) مورد بررسی قرار دادند. رادولووی و همکاران (Radulovic et al. 2011) برای ارزیابی توزیع مکانی تغذیه در منطقه کارستی مونتنگرو، پارامترهای مؤثر در نفوذ را به صورت لایه‌های اطلاعاتی درجه کارستی شدن، شرایط آب و هوایی، رواناب، شیب، تکتونیک، لیتولوژی و پوشش گیاهی وارد محیط GIS کرده و میزان تغذیه در این منطقه بین ۶۰ تا ۸۰٪ بارش سالانه برآورد شده است. در ایران نیز کارهای بسیاری در زمینه تعیین نفوذ با استفاده از نرم‌افزار GIS صورت گرفته است (نجفی و همکاران، ۱۳۹۱؛ رحیمی دهکردی و همکاران، ۱۳۹۲).

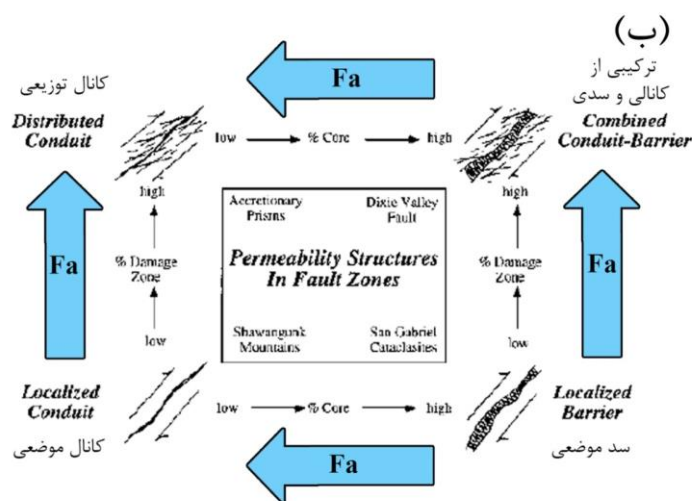
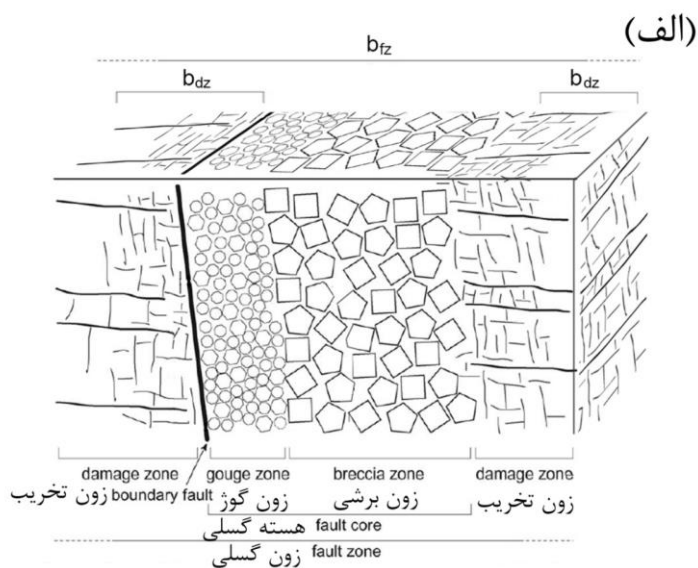
با توجه به تنوع و گسترش نهشته‌های کربناته در ایران و موقعیت خشک آن در جهان، توجه خاص به پتانسیل این نهشته‌ها به منظور اکتشاف منابع

هیدروژئولوژی زون‌های گسلی بسیار مهم و عوامل ساختاری نقش مهمی در الگوی جریان و حرکت آب زیرزمینی در آبخوان‌ها را دارند (Bense et al., 2013). بخصوص در سازندهای کارستی شونده که سطح قابل توجهی از سطح زمین (La Moreaux, 1991) و حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور (افراسیایان، ۱۳۷۷) را می‌پوشانند و آب مورد نیاز حدود ۲۵ درصد از جمعیت جهان را تأمین می‌کنند (Milanovic, 1981). شناخت عوامل ساختاری در بررسی جریان آب زیرزمینی و ارائه مدلی مفهومی آبخوان ضروری است (Ford and Williams, 2007). رابطه بین کارست و تکتونیک توسط کارست‌شناسان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است که به عنوان مثال می‌توان به مواردی چون کنترل عوامل ساختاری در تشکیل غارهای کارستی (Martel, 1894؛ ملکی، ۱۳۹۲؛ سیف و همکاران، ۱۳۹۱) و نوسانات سطح آب زیرزمینی و هیدروژئومورفولوژی (Burbey, 2008)، ارتباط بین حرکات تکتونیکی و توسعه کارست (Radev, 1915؛ قبادی و محمدیان، ۱۳۸۹) و تأثیر گسل و خطواره بر روی الگوی جریان آب زیرزمینی در آبخوان (Levens et al., 1994; Mayer et al., 2007; Bense et al., 2008; Folch and Mas-Pla, 2008؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۱، هاشمی و همکاران، ۱۳۸۹، قلمکاری و اسدی، ۱۳۹۳، کلانتری و همکاران، ۱۳۹۰) اشاره نمود. بدون تکتونیک پویا، هیچ کارستی به وجود نمی‌آید (Vandycke and Quinif, 2001) و در اصل، راحت‌ترین راه برای حرکت جریان آب زیرزمینی در سازند-های کارستی شونده شکستگی‌هایی است که عمود بر محور تنش اصلی حداقل هستند (Šušteršič, 2003). مظهر بسیاری چشمه‌های کارستی نیز در ارتباط

کند (Aydin, 2000; Rawling et al., 2001; Bense and Person, 2006). اجزای زون گسلی شامل هسته گسلی، زون تخریب و سنگ مادر می باشد (شکل ۱- الف). هسته گسلی نقش مانع جریان آب زیرزمینی را ایفا می کند (Caine et al., 1996)، اما زون تخریب با شکستگی های اطراف گسل نقش مجرای برای عبور آب زیرزمینی خواهد داشت (Bruhn et al., 1994). ساختار نفوذپذیری گسل در سنگ های کربناته مانند سنگ های کریستالین به صورت درجاتی از سیستم مجرای- سدی توصیف می شود (Bense et al., 2013). بر اساس نسبت پهنای هسته گسلی به پهنای زون تخریب چهار نوع معماری زون گسلی مرتبط با ساختار نفوذپذیری مطرح می- شود که شامل کانال موضعی، کانال توزیعی یا چند مسیره، سد موضعی و ترکیبی (کانالی- سدی) می باشد (Caine et al., 1996) (شکل ۱- ب).

شرب زیرزمینی بسیار مفید است. هدف از این مقاله، بررسی پارامترهای ساختاری و الگوی شکستگی ها، معماری زون های گسلی و ساختار نفوذپذیری گسل ها و نقش آن در مسیرهای غالب جریان، نفوذ و زهکشی و فرار آب از سازند تیرگان در منطقه قوری میدان، واقع در استان خراسان شمالی، و در نهایت برآورد مقادیر تغذیه و تخلیه سالانه در سازند آهکی و تخمین آب زهکشی شده از سازند آهکی تیرگان می باشد.

جهت آگاهی از میزان نفوذپذیری گسل ها برای انتقال آب زیرزمینی به شناخت اجزای ساختار زون گسلی داریم. زون گسلی در یک مفهوم کلی منطقه ای با شکستگی فراوان همراه با تعداد زیادی سطوح گسلی با فاصله کم از یکدیگر می باشد (Ben-Zion and Sammis, 2003; Kim et al., 2004) که می تواند به عنوان کانال و یا مانع در برابر جریان آب زیرزمینی عمل



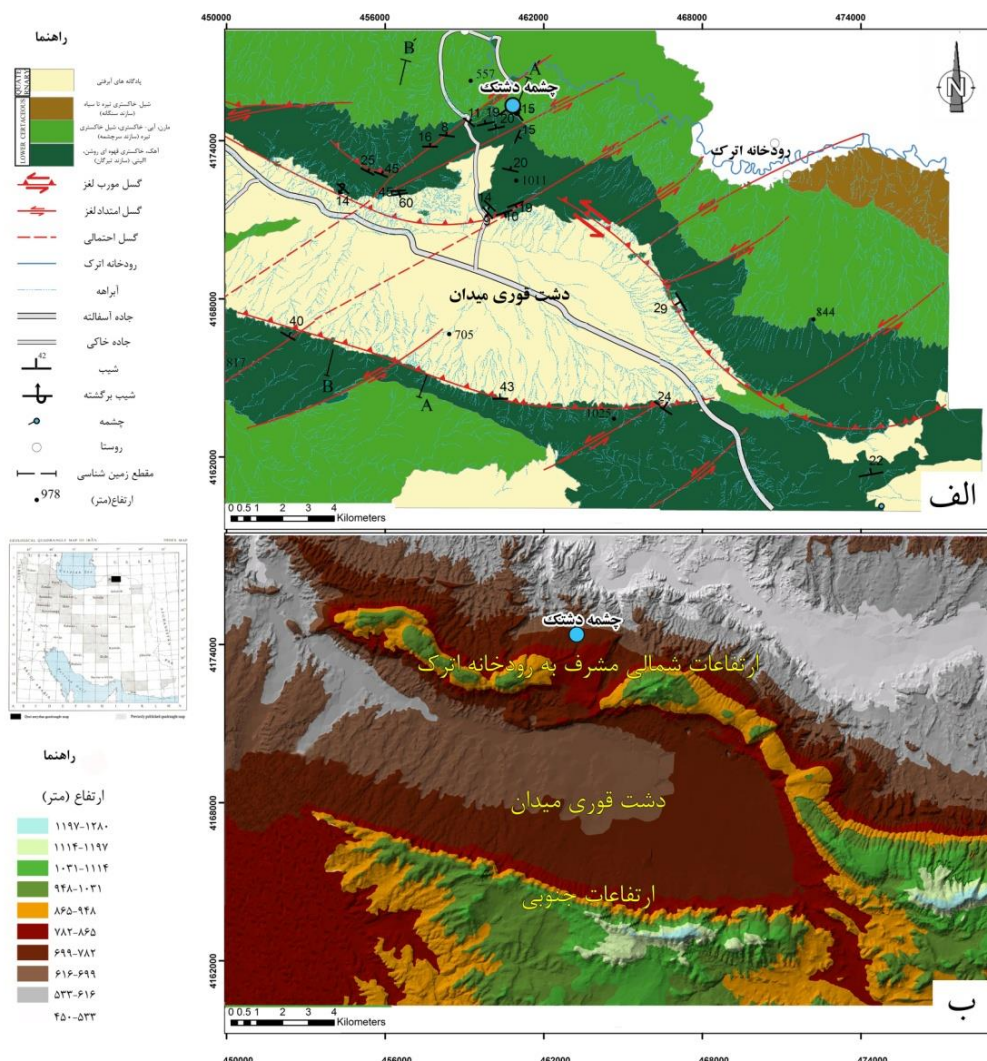
شکل ۱. الف) پهنه بندی زون گسلی (Billi, 2005)، ب) مدل مفهومی ارتباط معماری زون گسل با ساختار نفوذپذیری (تغییر یافته از Caine et al., 1996)

می‌شود، در شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه و روی سازند تیرگان قرار گرفته است. سازند سنگانه که از شیل‌های تیره تا خاکستری سبز تیره رنگ با میان لایه‌های سنگ آهک خاکستری و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. رسوبات کواترنری شامل آبرفت‌های جدید از جنس ذرات رس و سیلت به صورت گسترده دشت قوری میدان را تشکیل می‌دهند (آقابیانی، ۱۳۸۳) (شکل ۲ - الف). توپوگرافی یکی از عوامل کنترل کننده شیب هیدرولیکی در اطراف زون گسلی (Karasaki et al., 2008). از اینرو، نقشه طبقه‌بندی ارتفاعی منطقه قوری میدان تهیه و در (شکل ۱ - ب) ارائه شده است. این نقشه نشان دهنده کم ارتفاع بودن ارتفاعات شمالی نسبت به ارتفاعات جنوبی است.

موقعیت جغرافیایی، زمین شناسی، معماری زون گسلی،

توپوگرافی و هیدرولوژی منطقه

دشت قوری میدان در استان خراسان شمالی و در ۳۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان آسخانه قرار گرفته است. از نظر مختصات جغرافیایی بین عرض‌های $37^{\circ} 44' 04''$ - $37^{\circ} 37' 37''$ و طول‌های $56^{\circ} 44' 09''$ - $56^{\circ} 00' 00''$ واقع شده است. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه رسوبی کپه داغ می‌باشد. سازند تیرگان که قسمت اعظم شمال و جنوب منطقه را در بر گرفته است، از سنگ آهک‌های الییتی و زیست آواری و لایه‌های جزئی آهک‌های مارنی، مارن و شیل آهکی تشکیل شده است. سازند سرچشمه که از یک بخش مارن خاکستری و خاکستری تیره و یک بخش لایه‌های شیل تیره و لایه‌های نازک سنگ آهک و فسیل‌های تیراتولا و اربیتولینا تشکیل



شکل ۲. الف) نقشه زمین شناسی منطقه دشت قوری میدان (تهیه شده بر اساس برداشت داده‌های صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای) و ب) نقشه طبقه‌بندی ارتفاع منطقه دشت قوری میدان

صحرایی و سنجش از دور نشان می‌دهد که ارتفاعات شمالی از نظر زمین شناسی ساختاری به فرم تاقدیس می‌باشد که به سمت جنوب به ناودیس دشت قوری میدان متصل می‌شود. گسل مورب لغز آسخانه با امتداد تقریباً شرقی - غربی و طول ۸۰ کیلومتر (Javidfakhr et al., 2011) در شمال

از لحاظ زمین شناسی ساختاری، گسترده مورد بررسی در زون زمین ساختاری کپه داغ غربی که روند چین‌های آن تقریباً شرقی - غربی است واقع شده است (Hollingsworth et al., 2006). بررسی پدیده‌های ساختاری چین و گسل و درزه و شکستگی‌ها و ساختارهای مورفولوژی بررسی مطالعات

اگر میزان Fa نزدیک صفر باشد ساختار نفوذپذیری زون گسلی به سمت سدی تمایل دارد و گوژ گسلی مانند مانعی برای جریان آب در جهت موازی گسل عمل می‌کند. اگر میزان Fa نزدیک یک باشد میزان نفوذپذیری بالاست و ساختار نفوذپذیری زون گسلی به سمت کانالی افشان تمایل دارد (Caine et al., 1996).

$$Fa = \frac{\text{پهنای زون تخریب}}{\text{کل پهنای زون گسلی}} = \frac{2b dz}{bfz} \quad (\text{رابطه ۲})$$

جهت تعیین ساختار نفوذپذیری گسل‌ها، ابتدا گسل‌های مهم (از نظر وسعت قرابت با چشمه دشتک) منطقه مورد مطالعه شناسایی و موقعیت آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google earth و نرم افزار GIS مشخص شد. پس از مکان‌یابی گسل‌های مهم منطقه در عملیات صحرایی، اندازه‌گیری پهنای زون گسلی و اجزای آن (هسته گسلی و زون تخریب) در جهت عمود بر امتداد گسل با کمک قطب نمای برانتون و متر انجام شد. اندازه‌گیری‌ها به این صورت بود که در طول یک گسل سه نقطه انتخاب و اجزای زون گسلی در این سه نقطه برداشت شد. در نهایت نمودار نسبت پهنای زون تخریب به پهنای زون گسلی جهت تحلیل ارتباط معماری زون گسلی و ساختار نفوذپذیری با استفاده از نرم افزار Excel رسم شد. به منظور تعیین درصد تغذیه در محیط GIS لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر شامل میزان شیب، جهت شیب، عوارض کارستی، تراکم خطواره‌ها سازند آهکی تیرگان تهیه گردید. در نهایت برای استخراج نقشه نهایی میزان تغذیه، این لایه‌ها تلفیق و طبقه‌بندی گردید (شکل ۳). با توجه به موقعیت مظاهر چشمه دشتک و با استفاده از نرم افزار GeoFryPlot، روند مظاهر چشمه دشتک تعیین گردید. تحلیل Fry، که یک روش اندازه‌گیری تطبیق مکانی برای داده‌های نقطه‌ای می‌باشد و بیان می‌کند برای n نقطه $n-2$ رابطه مکانی وجود دارد، در مقیاس ناحیه‌ای می‌تواند الگوی پراکندگی مظاهر چشمه را تعیین و رابطه آن با امتداد لایه‌بندی نزدیک مظاهر چشمه را مشخص نماید (Vearncombe and Vearncombe, 1999).

نتایج و بحث

بررسی پارامترهای ساختاری و الگوی شکستگی‌های منطقه

امتداد غالب شکستگی‌ها به‌عنوان مسیرهای جریان ترجیحی در نظر گرفته شده است. تقاطع سطوح لایه‌بندی با شکستگی‌ها نیز در تشکیل سیستم مجرای اهمیت دارد. از این‌رو گسل‌ها و شکستگی‌های سیستماتیک استخراج شده با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Google earth به‌طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج پردازش داده‌های حاصل از اندازه‌گیری امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های سیستماتیک ارتفاعات شمالی و جنوبی دشت قوری میدان به صورت نمودار گل سرخی در (شکل ۴) آرایه شده است، به‌طور کلی نمودارهای گل سرخی نشان‌دهنده پراکندگی قابل ملاحظه گسل‌ها و شکستگی‌های سیستماتیک بوده که خود باعث فراوانی محل‌های تقاطع شکستگی‌ها گردیده و در نتیجه سهولت جریان آب از شکستگی‌ها و افزایش پتانسیل کارست شدگی در این محدوده شده است. امتداد غالب شکستگی‌های سیستماتیک و گسل‌های ارتفاعات شمالی و جنوبی دشت قوری میدان حدود $N 60^{\circ}$ را نشان می‌دهد که احتمالاً سیستم مجرای اصلی آبخوان کارستی در دامنه امتدادی مذکور رخ داده است (شکل ۴).

در مطالعات میدانی، اندازه‌گیری درزه‌های (درزه برداری) ارتفاعات شمالی و جنوبی که از نظر ظهور چشمه و تراکم گسل و شکستگی‌ها حائز اهمیت می‌باشد به ترتیب در 18° ایستگاه و 5° ایستگاه انجام گردید.

دشت قوری میدان واقع شده است و سبب راندگی آهک سازند تیرگان بر روی رسوبات کواترنری شده است. در شمال گسل آشخانه، گسل‌های ثانویه امتداد لغز چپگرد با جابه جایی زیاد و امتداد شمال شرق - جنوب غرب نیز مشاهده می‌شود (Javidfakhr et al., 2011).

متوسط بارش سالانه در منطقه بر اساس متوسط ارتفاع منطقه از رابطه ارتفاع - بارش محدوده مورد مطالعه تعیین گردید. با توجه به اطلاعات ارتفاع و میزان متوسط بارندگی ایستگاه‌های منطقه (رسالت، اینچه علیا، دربند سملقان، شیرآباد و درکش (شرکت مهندسی مشاور سیمای آب خاوران، ۱۳۹۴) رابطه بین ارتفاع و بارندگی بصورت (رابطه ۱) از نمودار ارتفاع-بارندگی بدست آمد که با توجه به ارتفاع متوسط منطقه (E) (۹۸۰ متر)، میزان متوسط بارش سالانه منطقه (R) حدود 375 میلی‌متر استخراج گردید.

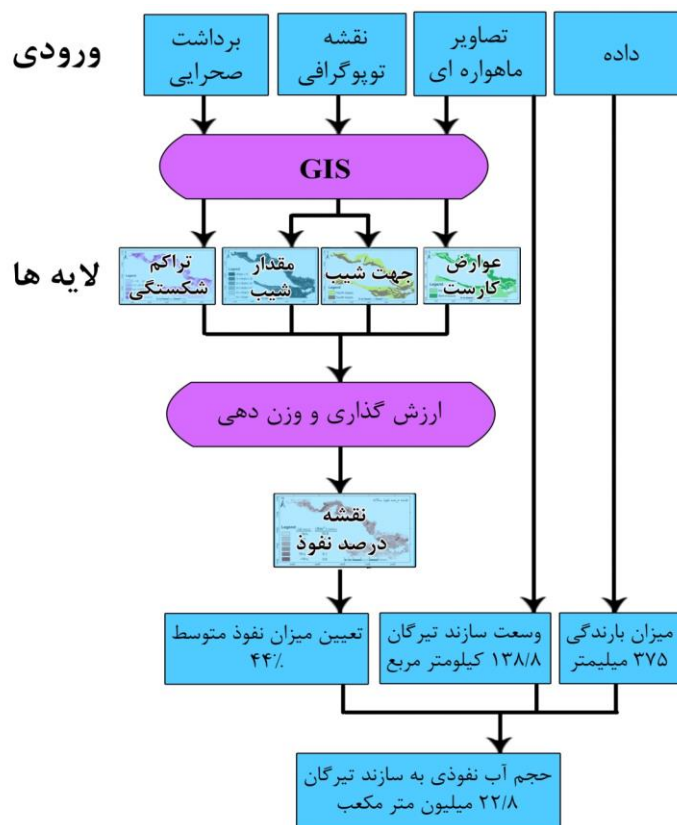
$$R = 0.39 E \quad (\text{رابطه ۱})$$

تنها رودخانه دائمی منطقه، رودخانه اترک، واقع در شمال دشت قوری میدان می‌باشد (شکل ۲-الف). اصلی‌ترین منبع تأمین‌کننده آب‌های سطحی در منطقه رواناب حاصل از بارندگی و چشمه دائمی دشتک، می‌باشد که دارای یک مظهر اصلی و چند مظهر فرعی است، می‌باشد این چشمه دارای آب نسبتاً گرم با میانگین دمای 23° درجه می‌باشد که در شمال منطقه قرار گرفته است (شکل ۱-الف).

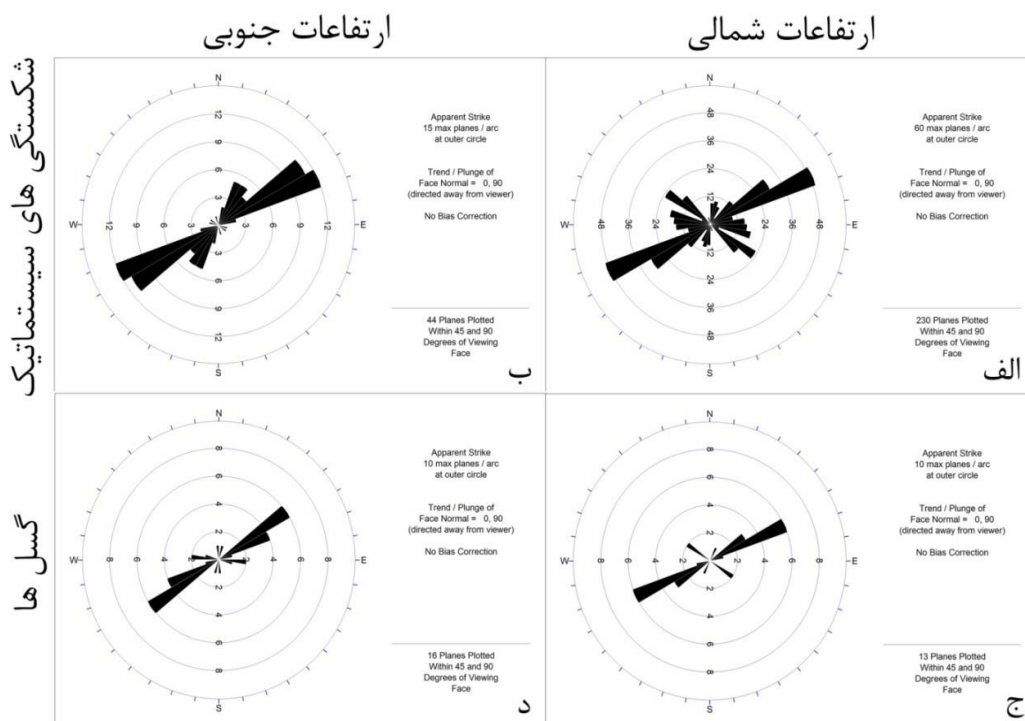
روش کار

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های حاصل از برداشت صحرایی، در محیط GIS نقشه زمین شناسی و نقشه شکستگی‌های منطقه ترسیم گردید. نقشه طبقه‌بندی ارتفاعی محدوده نیز با استفاده از نقشه ارتفاعی رقمی DEM (بر اساس مطالعات شرکت مهندسی مشاور سیمای آب خاوران، ۱۳۹۴) در محیط GIS تهیه شد. علاوه بر برداشت شیب و امتداد لایه‌بندی‌ها و گسل‌ها، به منظور شناخت کلی از سیستم ساختاری منطقه، مقاطع زمین شناسی در دو مسیر و عمود بر جهت لایه‌بندی زده شد. همچنین بررسی میدانی درزه و شکستگی‌ها نیز در 18° ایستگاه با تأکید بر مسیر مظاهر چشمه دشتک در ارتفاعات شمالی و 5° ایستگاه در ارتفاعات جنوبی، برای یافتن جهت غالب سیستم شکستگی منطقه به وسیله قطب نمای برانتون اجرا گردید. سپس از نرم افزار Dips جهت تحلیل ساختاری شیب و امتداد گسل‌ها، درزه‌ها و لایه‌های اندازه‌گیری شده در عملیات صحرایی استفاده شد و نمودارهای گل سرخی تهیه گردید. تعیین روند موقعیت مظاهر چشمه و ارتباط آن‌ها با روندهای ساختاری عمده نیز با استفاده از نرم افزار GeoFryPlot انجام گرفت.

برای تعیین معماری زون گسلی و ساختاری نفوذپذیری از سه مشخصه Fa ، Fm ، Fs استفاده شده است. مقدار عددی Fa از صفر تا یک می‌باشد و با اندازه‌گیری نسبت پهنای زون تخریب به پهنای کل زون گسلی (شکل ۱-الف) در یک محل معین به دست می‌آید (رابطه ۲). پلات کردن مقدار Fa در مقابل عرض کل زون گسلی بینشی راجع به مکانیک گسل، پاسخ سنگ مادر به تغییر شکل و ساختار نفوذپذیری درون گسل می‌دهد. اگر Fa برابر صفر باشد ساختار نفوذپذیری در زون گسلی از نوع سدی می‌باشد و وقتی Fa برابر با یک باشد ساختار نفوذپذیری در زون گسلی از نوع کانالی می‌باشد (شکل ۱-ب). میزان متوسط Fa نشان‌دهنده ساختار نفوذپذیری کانالی - سدی می‌باشد. میانگین مقادیر چندین Fa برای یک زون گسلی با شاخص Fm شناخته می‌گردد. Fs نشانگر وسعت مقادیر Fa در سراسر زون گسلی می‌باشد ($Fa \max - Fa \min$). میزان کوچک Fs نشان‌دهنده یکنواختی معماری زون گسلی و عدم وجود هسته گسلی می‌باشد ولی مقادیر بالای Fs بیانگر عدم یکنواختی معماری در زون گسلی و وجود هسته گسلی در زون گسلی و نفوذپذیری پایین است.



شکل ۳. مراحل تعیین حجم آب نفوذی به سازند تیرگان



شکل ۴. نمودار گل سرخی شکستگی های سیستماتیک ارتفاعات شمالی (الف)، ارتفاعات جنوبی (ب) و گسل های ارتفاعات شمالی (ج)، ارتفاعات جنوبی (د) بدست آمده از تصاویر ماهواره ای

مدل مفهومی دشت قوری میدان

بر اساس نتایج حاصل از برداشت‌های صحرائی، مطالعات سنجش از دور، مطالعات زمین‌شناسی و تفسیر داده‌ها، می‌توان مدل ساختاری - مفهومی دشت قوری میدان را بصورت (شکل ۸) ارائه نمود. ناودیس دشت قوری میدان و تاقدیس‌های شمالی و جنوبی دشت با روندهای تقریباً شرقی - غربی به طول حدودی ۳۰ کیلومتر به دلیل وجود تنش فشارشی ایجاد و سپس گسل راندگی آشخانه با امتداد موازی سطح محوری چین به طول ۸۰ کیلومتر در اثر ادامه فرایند فشارش ایجاد شده است. با ادامه اعمال نیرو و فشارش، شکستگی‌ها شکل گرفته و در اثر جابجایی در امتداد این شکستگی‌ها گسل‌های راستا لغز با روند شمال شرقی - جنوب غربی با طول بیشتر از ۳ کیلومتر تشکیل شده‌اند که حرکت آنها باعث بریدگی محور چین‌ها شده است (افشار حرب، ۱۳۷۳). با توجه به بررسی معماری نفوذپذیری زون گسلی گسل‌های راستالغز، این گسل‌ها به‌عنوان کانالی برای جریان آب در راستای شمال شرقی - جنوب غربی عمل می‌کنند که احتمال تأیید این فرضیه که آب از جنوب به سمت شمال از طریق این گسل‌ها در حرکت بوده و آب چشمه دشتک را تأمین نماید، قوت می‌یابد.

برآورد مقادیر تغذیه و تخلیه سالانه در سازند آهکی و تخمین

آب زهکشی شده از سازند آهکی تیرگان

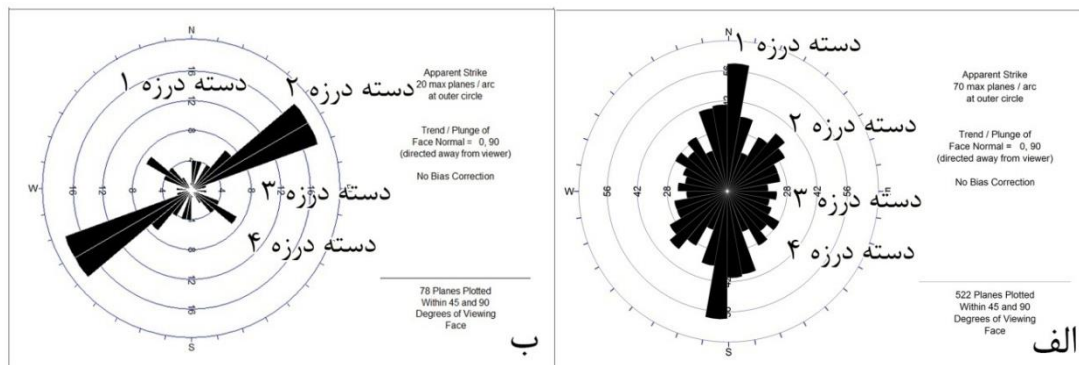
تنها سازند سخت دارای تراوایی و پتانسیل منبع آب کارستی در منطقه مورد مطالعه، سازند تیرگان می‌باشد. از این رو، با توجه به اهمیت این سازند به لحاظ توسعه کارست و نقش مهم آن در تغذیه منابع آب زیرزمینی، مقادیر تغذیه و تخلیه سالانه در این سازند در کل محدوده مورد مطالعه بررسی و آب زهکشی شده از سازند آهکی تیرگان برآورد شده است. به منظور تعیین میزان تغذیه در سازند تیرگان، نقشه درصد نفوذ بر اساس روش کارشناسی (کرمی، ۱۳۹۲) تهیه شده است. بدین منظور، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی رستری تراکم خطواره‌ها، شیب، جهت شیب، عوارض کارستی تهیه (شکل ۹)، هم مقیاس و در محدوده‌های ۰ تا ۱۰ طبقه‌بندی گردید و سپس با ارزش گذاری هر طبقه از لایه‌های اطلاعاتی و وزن دادن به لایه‌ها، لایه‌ها همپوشانی و نقشه درصد نفوذ به دست آمد (شکل ۹). نرخ متوسط نفوذ سالانه آب (I) در سازند تیرگان، با توجه به مساحت (Ai) و میزان نفوذ (Ii) در هر کلاسه نفوذ و با استفاده از (رابطه ۳) حدود ۴۴٪ برآورد گردید.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot I_i}{A_i} = 0.44 \quad (\text{رابطه ۳})$$

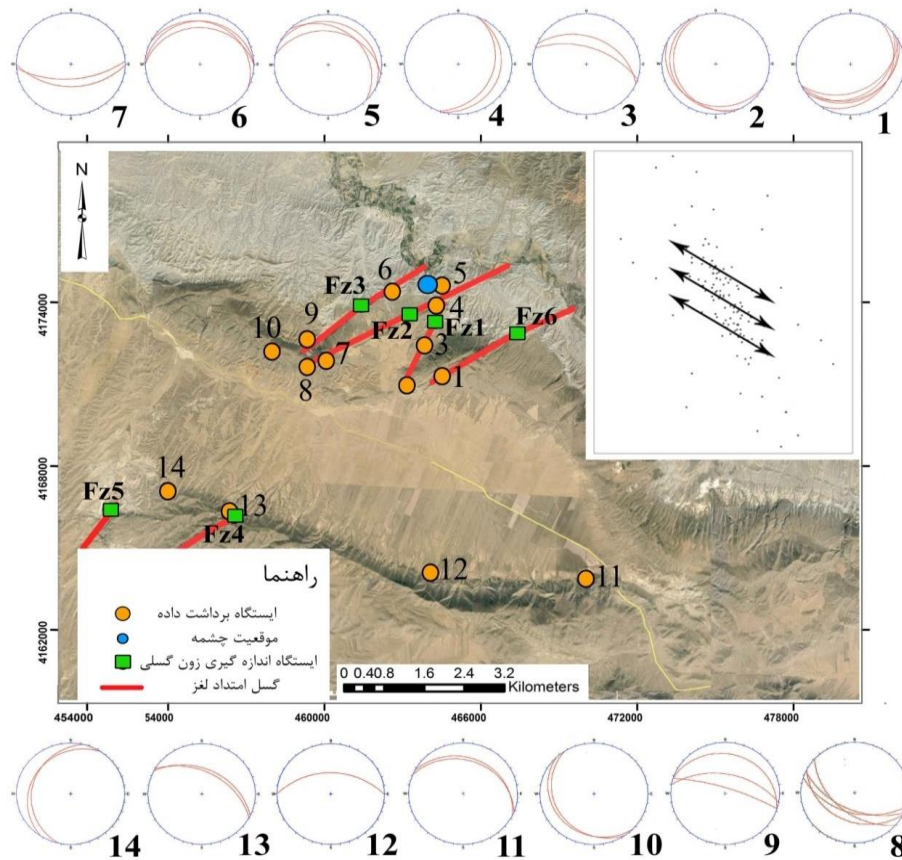
جهت غالب درزه‌ها همانطور که در نمودار گل سرخی ارتفاعات شمالی قابل ملاحظه است N۰۵ می‌باشد (شکل ۵ - الف) ولی مهمترین دسته، دسته درزه ۲ با روند N۵۰ موازی امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های سیستماتیک منطقه می‌باشد. همچنین جهت غالب درزه‌ها در ارتفاعات جنوبی در جهت N۶۰ می‌باشد (شکل ۵ - ب). یکی از پارامترهای دیگری که تأثیر بسیار مهمی در فرایند نفوذ آب در مناطق درز و شکاف دار و به خصوص مناطق کارستی دارد، اندازه بازشدگی دهانه درزه‌ها می‌باشد. با توجه به شکل ۵، بیشترین مقدار بازشدگی دهانه درزه در ارتفاعات شمالی به درزه‌های دسته ۲ با میانگین ۰/۵ سانتی‌متر تعلق دارد که نشان‌دهنده احتمال در جهت بودن جهت حرکت آب زیرزمینی با جهت این درزه‌ها می‌باشد.

به دلیل نقش تعیین کننده سطوح جداکننده تکتونیکی نظیر سطوح لایه‌بندی، در جریان آب زیرزمینی و توسعه کارست (کرمی و رورنجانی، ۸۹). لایه‌بندی ارتفاعات شمالی و جنوبی منطقه به ترتیب در ۱۰ و ۴ ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۶). شیب و امتداد لایه‌بندی‌های ارتفاعات شمالی و جنوبی منطقه نمایانگر ناودیس بودن ارتفاعات جنوبی و دشت و همچنین تاقدیس بودن ارتفاعات شمالی می‌باشد. روند موقعیت و الگوی پراکندگی مظاهر چشمه دشتک، که با استفاده از روش Fry بدست آمده است، در شکل ۶ نشان داده شده است. این روند تقریباً منطبق با امتداد لایه‌بندی نزدیک مظاهر چشمه (ایستگاه ۵ برداشت داده لایه‌بندی در شکل ۶) می‌باشد که نشان‌دهنده رخنمون اکثر مظاهر چشمه‌ها از بین سطوح لایه‌بندی است (Vearncombe and Vearncombe, 1999).

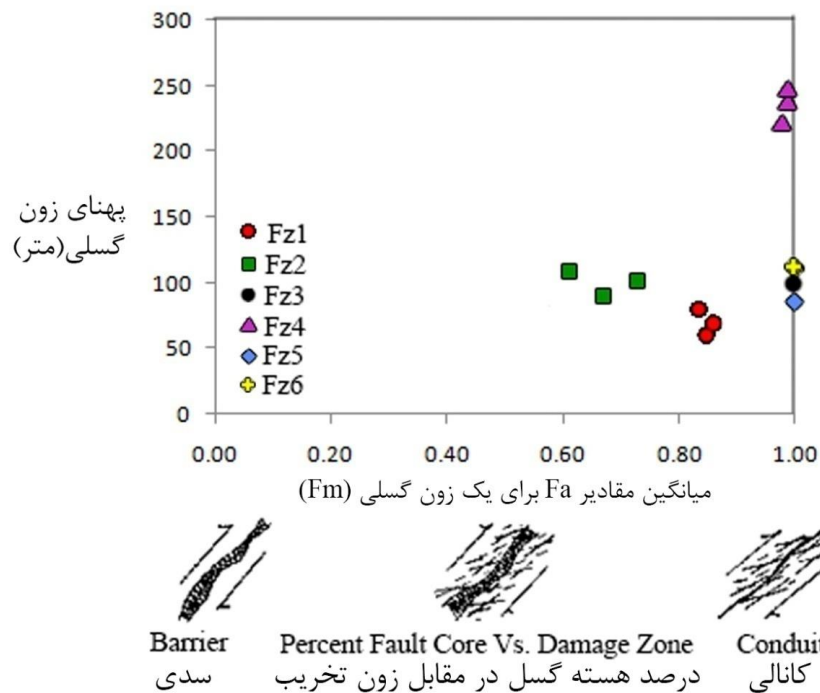
به منظور بررسی گسل‌های منطقه از نظر ساختار نفوذپذیری، تعداد ۶ گسل Fz 1, Fz 2, Fz 3, Fz 4, Fz 5, Fz 6، که همگی از نوع امتداد لغز چپ گرد می‌باشند، انتخاب (شکل ۶) و مورد بررسی معماری ساختار نفوذپذیری مرتبط با زون گسلی قرار گرفته است (شکل ۷). زون گسلی Fz 1 دارای ساختار نفوذپذیری تقریباً کانالی افشان و زون گسلی Fz 2 دارای ساختار نفوذپذیری تقریباً کانالی - سدی می‌باشد. اما سایر زون‌های گسلی زون گسلی Fz 3, Fz 4, Fz 5, Fz 6 دارای ساختار نفوذپذیری کانالی افشان به صورت ایده‌آل می‌باشند (جدول ۱ و شکل ۷). براساس میزان Fs معماری زون گسلی گسل‌های Fz 1, Fz 3, Fz 4, Fz 5, Fz 6 و یکنواخت و معماری زون گسلی Fz 2 تقریباً یکنواخت می‌باشد. از آنجائیکه زون‌های گسلی مناطق تخریب شده می‌باشند و دارای نفوذپذیری بالا هستند و آب به راحتی می‌تواند در آنها نفوذ و حرکت نماید، در صورت وجود آب زیرزمینی، منطقه تخریب گسل احتمالاً راحت‌ترین مسیری برای حرکت آب زیرزمینی بوده و در نتیجه مؤلفه افقی جریان آب زیرزمینی به موازات امتداد زون‌های گسلی خواهد بود.



شکل ۵. نمودار گل سرخی جهت غالب درزه‌های (الف) ارتفاعات شمالی (متوسط بازشدگی دسته درزه‌های دسته ۱ و ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب ۲ و ۵/۰ و ۱۲/۰ و ۰ سانتیمتر می‌باشد) و (ب) ارتفاعات جنوبی (جدول داده‌های نمودارهای گل سرخی به علت حجم زیاد قابل ارائه نمی‌باشد).



شکل ۶. موقعیت ایستگاه‌های برداشت لایه‌بندی و اندازه‌گیری اجزای زون گسلی در ارتفاعات شمالی و جنوبی منطقه دشت قوری میدان. روند غالب موقعیت مظاهر چشمه دشتک با استفاده از روش Fry (Vearncombe and Vearncombe, 1999) در داخل چهارگوش نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار نسبت پهنای زون گسلی به F_m و تعیین نوع ساختار نفوذپذیری زون‌های گسلی در منطقه دشت قوری میدان

جدول ۱. داده‌های صحرایی برداشت شده و فاکتورهای معماری زون گسلی محاسبه شده و نوع ساختار نفوذپذیری ۶ زون گسلی در منطقه قوری میدان

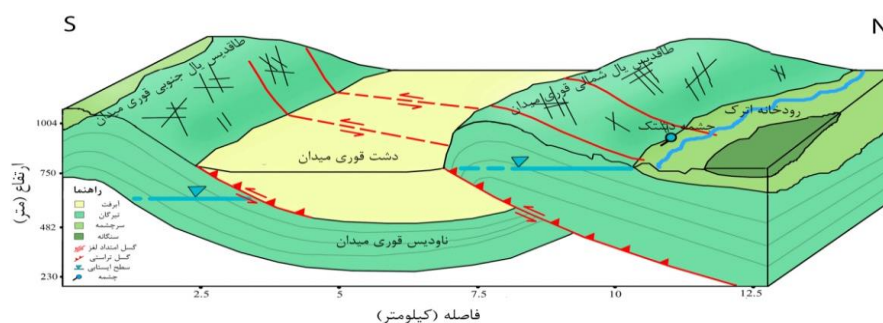
Fs	Fm	Fa	هسته گسلی (متر)	منطقه تخریب (متر)	زون گسلی (متر)	امتداد	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ایستگاه
۰/۰۲	۰/۸۵	۰/۸۶	۱۰	۶۰	۷۰	۱۰	۴۱۷۳۸۲۷	۴۶۴۶۸۶	Fz ۱-۱ Fz ۱
		۰/۸۵	۹	۵۳	۶۲				Fz ۱-۲
		۰/۸۴	۱۲	۶۵	۷۷				Fz ۱-۳
۰/۱۷	۰/۶۸	۰/۶۷	۳۰	۶۰	۹۰	۶۰	۴۱۷۴۰۱۲	۴۶۴۰۱۱	Fz ۲-۱ Fz ۲
		۰/۷۷	۳۲	۷۵	۱۰۷				Fz ۲-۲
		۰/۶۰	۴۵	۷۰	۱۱۵				Fz ۲-۳
۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۰	۴۱۷۴۶۱۲	۴۶۲۴۶۱	Fz ۳-۱ Fz ۳
		۱/۰۰	۰	۷۰	۷۰				Fz ۳-۲
		۱/۰۰	۰	۱۴۰	۱۴۰				Fz ۳-۳
۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۲/۲	۲۳۵	۲۳۷/۲	۶۰	۴۱۶۶۲۲۳	۴۵۶۹۴۵	Fz ۴-۱ Fz ۴
		۰/۹۹	۱/۵	۲۴۰	۲۴۱/۵				Fz ۴-۲
		۰/۹۸	۳/۲	۲۲۵	۲۲۸/۲				Fz ۴-۳
۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰	۸۵	۸۵	۳۵	۴۱۶۶۰۵۱	۴۵۱۸۶۸	Fz ۵-۱ Fz ۵
		۱/۰۰	۰	۹۰	۹۰				Fz ۵-۲
		۱/۰۰	۰	۷۰	۷۰				Fz ۵-۳
۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰	۱۱۰	۱۱۰	۶۰	۴۱۷۲۸۲۹	۴۶۷۱۵۶	Fz ۶-۱ Fz ۶
		۱/۰۰	۰	۱۰۰	۱۰۰				Fz ۶-۲
		۱/۰۰	۰	۱۳۵	۱۳۵				Fz ۶-۳

سازند تیرگان در منطقه قوری میدان، حدود ۸/۷ میلیون مترمکعب برآورد شده است (شرکت مهندسی مشاور سیمای آب خاوران، ۱۳۹۴) بنابراین با توجه به اختلاف میزان تغذیه و تخلیه (بیلان)، می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۱۴/۱ میلیون مترمکعب آب سازند تیرگان به داخل رودخانه اترک زهکشی و یا از زیرزمین فرار می‌کند. مساحت حوضه آبرگیر چشمه دشتک (C) با استفاده از روش بیلان تخمینی (رابطه ۴)، حدود ۵۲/۷ کیلومتر مربع بدست آمد (Ashjari and Raeisi, 2006).

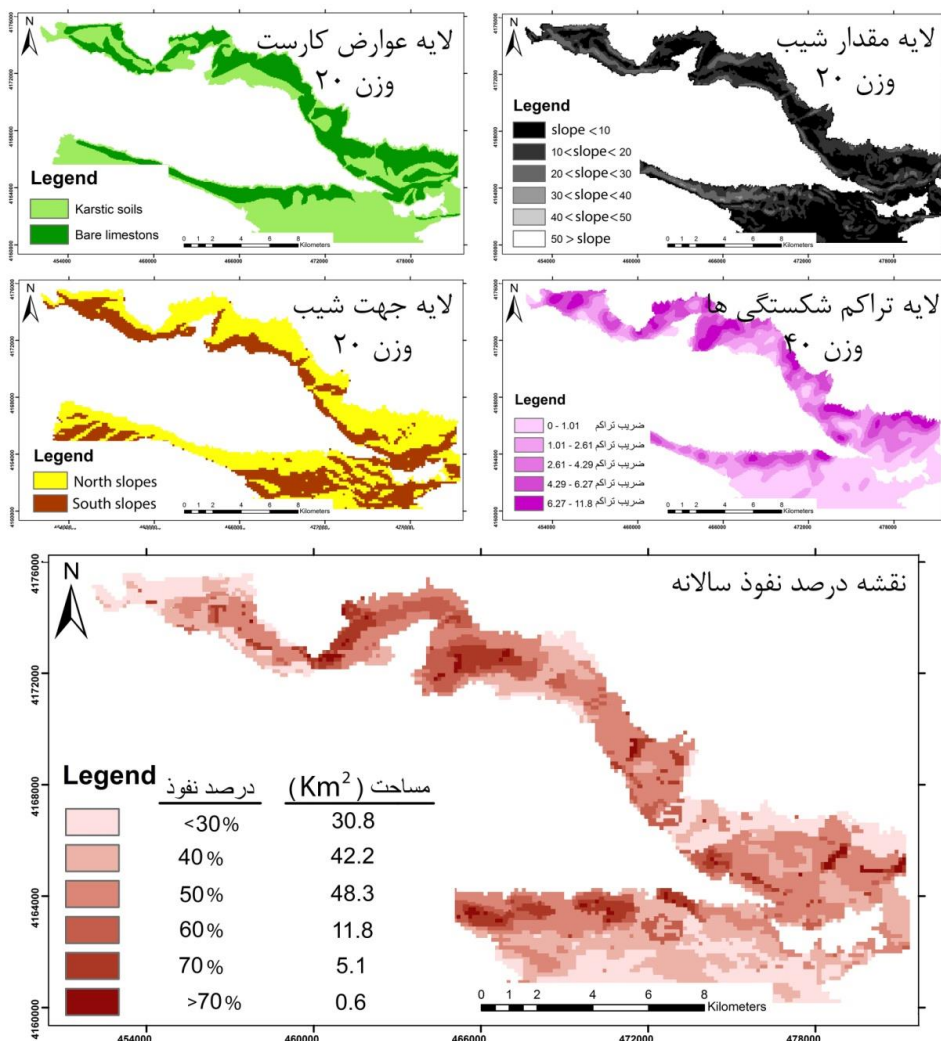
$$Q = I \times P \times C$$

(رابطه ۴)

کل میزان سالانه بارندگی (P) بر روی سازند تیرگان در منطقه مورد مطالعه، حدود ۳۷۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است (شرکت مهندسی مشاور سیمای آب خاوران، ۱۳۹۴)، که با توجه به مساحت کل سازند تیرگان (حدود ۱۳۸/۸ کیلومتر مربع)، حجم کل نزولات جوی که به طور مستقیم بر روی سازند تیرگان می‌بارد حدود ۵۱/۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است. با اعمال نرخ نفوذ سالانه برآورد شده (۲۴٪)، حجم کل آب نفوذی به آبخوان کارستی تیرگان حدود ۲۲/۸ میلیون مترمکعب برآورد می‌گردد. به عبارتی بیش از نیمی از بارش سالانه در منطقه در زمین نفوذ نموده و سبب تغذیه منابع آب زیرزمینی می‌گردد. میزان تخلیه سالانه چشمه دشتک (Q)، تنها منبع تخلیه



شکل ۸. مدل ساختاری و مفهومی دشت قوری میدان و چشمه دشتک



شکل ۹. نقشه لایه‌ها و نقشه درصد نفوذ آب در سازند سخت منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

با توجه به داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرایی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سیستم غالب گسل‌های امتداد لغز و شکستگی‌های سیستماتیک منطقه قوری میدان، دارای راستای N ۵۰ تا N ۷۰ و دارای بیشترین تراکم و بازشدگی هستند که نمایانگر جهت احتمالی جریان آب زیرزمینی در امتداد گسل‌های امتداد لغز جنوب غرب - شمال شرق می‌باشد. همچنین اغلب مظاهر چشمه منطبق با امتداد لایه‌بندی در راستای N ۱۳۰ می‌باشد که بیانگر نقش مهم لایه‌بندی در انتقال آب می‌باشد. بررسی زون گسلی و اجزای زون گسلی گسل‌های مهم منطقه، نشان می‌دهد که این گسل‌ها از نظر ساختار نفوذپذیری، از نوع کانالی (انتقال‌دهنده جریان آب زیرزمینی موازی جهت امتدادشان) هستند که بیانگر مسیره‌های غالب احتمالی جریان در امتداد این گسل‌ها می‌باشند. میزان نفوذ ۴۴ درصدی برای سازند سخت تیرگان که از تلفیق لایه‌های مختلف در نرم افزار GIS برآورد شده، نشان‌دهنده این است که بیش از نیمی از میزان بارندگی از طریق شکستگی‌ها به درون سازند آهکی تیرگان نفوذ می‌کند. همچنین مقایسه مقادیر تغذیه و تخلیه سالانه برآورد شده، نشان‌دهنده فرار ۱۴/۱ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی (حدود ۵۰ درصد آب نفوذی) از زیرزمین می‌باشد. انجام مطالعات ژئوالکترونیک در دشت قوری میدان

به منظور بررسی لایه‌بندی زیرسطحی و تعیین مناطق گسل خورده و همچنین مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار (¹³C و ²H، ¹⁸O) و بر روی منابع آبی کارستی (سطحی و زیرزمینی) و اندازه‌گیری پیوسته و دائمی دما و دبی چشمه دشتک به منظور تعیین منشأ دقیق آب چشمه و تدقیق سناریوی انتقال آب از طریق گسل‌ها پیشنهاد می‌گردد.

قدردانی

این تحقیق با استفاده از حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی با کد KNW93181 انجام شده است. بر خود لازم می‌دانیم از کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم. همچنین از زحمات آقایان مهندس کاظمی گلپان، مدیر عامل شرکت مهندسین مشاور سیمای آب خاوران، دکتر اکبری، عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی، دکتر کرمی عضو هیئت علمی دانشگاه شاهرود و مهندس ناصری کارشناس ارشد مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی، مهندس علی کیوان زراعتکار تقدیر به عمل می‌آوریم. از همه داوران که مقاله را بررسی و با نکات ارزنده خود باعث بهبود کیفیت مقاله شده‌اند، سپاسگزاریم.

منابع

- احمدی پور. م.، ۱۳۷۷، بررسی هیدروژئولوژیکی حوزه الشتر غرب ایران: دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی. تهران - کرمانشاه.
- افراسیابیان. ا.، ۱۳۷۷، اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه.
- افشار حرب. ع.، ۱۳۷۳، زمین شناسی ایران: زمین شناسی کپه داغ. تهران: سازمان زمین شناسی کشور.
- آقا نباتی. ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- رحیمی دهکردی، ف.، کرمی، غ.، فاضلی، ع.، ۱۳۹۲، کاربرد GIS برای ارزیابی میزان تغذیه آهک‌های کارستی تاقدیس سالدوران و تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی سراب بابا حیدر و پیرغار، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
- رضائی. ح.، آریامنش، م.، اسدی. ن.، ۱۳۹۱، بررسی ارتباط بین جهت جریان آب زیرزمینی با خطواره‌های ساختاری و محور تنش زمین ساختی در منطقه‌ی دستگردان، همایش ملی آسیب‌شناسی و برنامه‌ریزی اثرات زلزله‌ی ۲۱ مرداد ۹۱ در استان آذربایجان شرقی، هریس، دانشگاه پیام نور استان آذربایجان شرقی.
- قلمکاری. س.، اسدی، ع.، ۱۳۹۳، شناسایی سیستم جریان زیرزمینی کارستی در ایچ استهبان رابطه بین ساختارهای تکتونیکی و عوامل ژئومورفولوژیکی با آب‌های زیر زمینی در مناطق کارستی، همایش ملی زمین شناسی و اکتشاف منابع، شیراز، مرکز همایش‌های علمی همایش نگار.
- کرمی، غ.، ۱۳۹۲، ارزیابی حجم آب‌های زیرزمینی آبخوان‌های کارستی در منطقه شمال استان خراسان شمالی. خراسان شمالی: سازمان آب منطقه‌ای خراسان شمالی.
- کریمی وردنجانی. ح.، ۱۳۸۹، هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها). شیراز: انتشارات ارم شیراز.
- کلانتری. ن.، محمدی بهزاد. ح.، چرچی. ع.، کشاورزی. م.، ۱۳۹۰، چشمه‌های کارستی به‌عنوان ساده‌ترین ابزار برای تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی، مطالعه موردی چشمه بی‌بی تلخون، استان خوزستان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲، ص ۹۰-۱۰۰.
- کی نژاد. ص.، مختاری. ا.، فتحیان پورن.، ایران نژادی. م.، پتانسیل‌یابی منابع زمین‌گرایی استان آذربایجان شرقی در مقیاس 1:250000 با استفاده از GIS داده‌های زمین شناسی و اکتشافی در محیط، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۳، ص ۱۰۵-۱۱۶.
- سیف. ع.، سبک خیز. ف.، ۱۳۹۱، تأثیر فاکتورهای تکتونیکی در پراکنش غارهای کارستی ایران با استفاده از تکنیک GIS، پنجمین کنگره بین‌المللی جغرافیادانان اسلام، تبریز، دانشگاه تبریز.
- شرکت مهندسی مشاور سیمای آب خاوران.، ۱۳۹۴، پروژه مطالعات شناسایی سازند سخت و کارست محدوده مطالعاتی سملقان (جلد دوم). خراسان شمالی: سازمان آب منطقه‌ای.
- شکری. م.، اشجاری. ج.، کرمی. غ.، ۱۳۹۰، تأثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان، پانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران، انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم.
- قبادی. م.، محمدیان. م.، ۱۳۸۹، ارتباط سیستم ساختاری و کارست شدگی در منطقه رامهرمز-شرق خوزستان، پنجمین همایش ملی زمین شناسی و محیط زیست، اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.
- ملکی. ح.، ۱۳۹۲، تأثیر تکتونیک در پراکنش غارهای منطقه کارستی شاهو با GIS استفاده از تکنیک، اولین همایش ملی جغرافیا و پایداری محیط، کرمانشاه، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- مینویی. ا.، امیدوی. پ.، کرمی. غ.، ۱۳۸۹، تأثیر زمین شناسی ساختاری در رفتار هیدرودینامیکی چشمه کارستی روانسر، کرمانشاه، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.
- نجفی. ز.، کرمی. غ.، طاهری. ع.، ۱۳۹۱، ارزیابی میزان نفوذ در آهک کارستی بیستون در شرق و جنوب شرق روانسر: اولین همایش زمین شناسی فلات ایران. کرمان.
- هاشمی. ن.، تقی پور. ن.، قوشه ای. زارع رئیس آبادی. ح.، ۱۳۸۹، بررسی نقش گسل‌های اصلی در کنترل فراوانی منابع آب زیرزمینی استان سمنان، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.
- Andreo. B., Vías. J., Durán. J. J., Jiménez. López-Geta. P. Carrasco. J. A., Carrasco. F., 2008, Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain, *Hydrogeology Journal*, 16: 911–925.
- Ashjari. J., Raeisi. E., 2006. "Influences of Anticlinal Structure on Regional Flow, Zagros, IRAN", *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 68, no. 3, p. 118-129.
- Aydin. A., 2000. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Mar. Pet. Geol.* 17 (7), 797–814.
- Ben-Zion. Y., Sammis. C.G., 2003. Characterization of fault zones. *Pure and Applied Geophysics* 160, 677–715.
- Bense. V. F., Gleeson. T., Loveless. S. E., Bour. O., Scibek. J., 2013, Fault zone hydrogeology, *Earth-Science Reviews* 127 (2013) 171–192.
- Bense. V., Person. M., Chaudhary. K., You. Y., Cremer. N., Simon, S., 2008. Thermal anomalies as indicator of preferential flow along faults in an unconsolidated sedimentary aquifer system. *Geophys. Res. Lett.* <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL036017>.
- Bense V.F., Person. M., 2006. Faults as conduit–barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resour. Res.* 42 (W0542). <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004480>.
- Billi. A., 2005, Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin (<1 m) strike-slip fault cores in limestone. *Journal of Structural Geology*, 27, 1823–1837.
- Bruhn. R. L., Parry, W. T., Yonkee, W. A., Thompson, T., 1994, Fracturing and hydrothermal alteration in normal fault zones: *PAGEOPH*, v. 142, p. 609–644.
- Burbey. T., 2008. The influence of geologic structures on deformation due to ground water withdrawal. *Ground Water* 46 (2), 202–211. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00395.x>.

- Caine. J. S., Forster. C. B., Evans. J. P., 1996, Fault zone architecture and permeability structure, California: *Journal of Structural Geology*, ; v. 24; no. 11; p. 1025–1028
- Fetter. C.w., 1994, *Applied Hydrogeology*. New York; Prentice Hall Publishin. Pp.
- Folch. A., Mas-Pla. J., 2008. Hydrogeological interactions between fault zones and alluvial aquifers in regional flow systems. *Hydrol. Process.* 22, 3476–3487.
- Ford. D.C., Williams. P.W., 2007, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester.
- Hollingsworth. J., Jackson. J., Walker. R., Gheitanchi. M.R., Bolourchi. M.J., 2006, Strike-slip faulting, rotation and along-strike elongation in the KopehDagh Mountains, NE Iran. *Geophysical Journal International*, 166, 1161-1177.
- Javidfakhr. B., Bellier, O., Shabaniyan, E., Ahmadian, S. , Saidi, A., 2011, Plio–Quaternary tectonic regime changes in the transition zone between Alborz and KopehDagh Mountain. Ranges (Ne Iran). *Tectonophysics*, 506, 86-108.
- Karasaki. Kenzi. Onishi. Tiemi. Wu. Yu-Shu, 2008. Development of Hydrologic Characterization Technology of Fault Zones, NUMO-LBNL Collaborative Research Project Report.
- Kim. Y.-S., Peacock. D.C.P., Sanderson. D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology* 26, 503–517.
- Krishnamurthy. J., Srinivas, G., 1995, Role of geological and geomorphological factors in ground water exploration: a study using IRS, LISS data, *International Journal of Remote sensing* 16(14) pp 2595-2618.
- La Moreaux. P.E., 1991, *History of Karst Hydrogeological studies: Proceeding of the national Conference on Environmental Changes in Karst Areas*. Padova, Italy.
- Levens. R.L., Williams. R.E., Ralston. D.R., 1994. Hydrogeologic role of geologic structures. Part 1: paradigm. *J. Hydrol.* 156, 227–243.
- Martel. E. A., 1894, *Les Abimes*. Delagrave, Paris, p 580.
- Mayer. A., May. W., Lukkarila. C., Diehl. J., 2007. Estimation of fault-zone conductance by calibration of a regional groundwater flow model: Desert Hot Springs, California. *Hydrogeol. J.* 15, 1093-1106.
- Milanovic. P.T., 1981, *Karst hydrology*. Colorado: WPR.
- Radulovic. M., Stevanovic. Z., Radulovic. M., 2011, A new approach in assessing recharge of highly stified terrains–Montenegro case studies, *Environ Earth Sci*.
- Radev. Z., 1915, *Karst landforms in West Stara Planina*. Yearbook of Sofia University, Faculty of history and philology, 10–11. Tzar’s Publishing House, p 149 (in Bulgarian).
- Rawling. G.C., Goodwin. L.B., Wilson. J.L., 2001. Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault zone types. *Geology* 27 (1), 43–46.
- Shaban. A., Khawlie, M., Abdallah, C., 2004, Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon, *Hydrogeology Journal*, 14: 433– 443.
- Šušteršič. F., 2003, Collapse dolines, deflector faults and collector channels. *Speleogenesis Evol Karst Aquifers* 1(3):9. Virtual Sci J. www.speleogenesis.info.
- Vandycke. S., Quinif. Y., 2001, Recent active faults in Belgian Ardenne revealed in Rochefort Karstic network (Namur Province, Belgium). *Neth J Geosci/Geologie en Mijnbouw* 80(3–4):297–304.
- Vearncombe. J., Vearncombe. S., 1999, The spatial distribution of mineralization: Applications of fry analysis, *Economic Geology*, 94: 475- 486.