



## سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال سیزدهم / شماره سوم) پائیز ۱۴۰۱

نماینده شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز، سیوبلیکا، گوگل اسکولار

آدرس وب سایت : <http://girs.iaubushehr.ac.ir>



# شناسایی مناطق کارست و میزان گسترش آن با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبریز ظالم رود ساری در مازندران، ایران

مقاله پژوهشی

محمدعلی قلی نتاج ملک‌شاه، سیدرمضان موسوی، داود جهانی، نادر کهنسال قدیم وند، سیدحمید وزیری

دریافت: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۰ / بازنگری: ۱۰ مرداد ۱۴۰۰ / پذیرش: ۴ شهریور ۱۴۰۰  
دسترسی اینترنتی: ۴ شهریور ۱۴۰۰ / دسترسی چاپی: ۱ مهر ۱۴۰۱

### چکیده

مناطق، موردتوجه جدی زمین شناسان، هیدرولوژیست‌ها، هیدروژئولوژیست‌ها، اکوتوریست‌ها، ژئوتوریست‌ها و زیست‌محیطی در مقیاس‌های گوناگون است. از طرفی با توجه به برخی از شرایط ویژه مانند بحران آب و یافتن نقاط دارای ذخایر آبی پایدار و یا مناطق مناسب جهت احداث سدها و سایر سازه‌های با ریسک کم و ضریب اطمینان بالا، شناسایی مناطق کارستی از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین پدیده کارست در ابعاد گوناگون، از دیدگاه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی نیز دارای جایگاه ویژه‌ای است، زیرا علل و چگونگی فرآیندها و اشکال انحلالی و گسترش آن‌ها بر سنگ‌ها و کانی‌ها دارای اهمیت بسیار بالایی است. شرق مازندران به‌ویژه در محدوده مورد مطالعه، از لحاظ زمین‌شناسی یکی از مناطق دارای پتانسیل فرآیند کارستی بوده و با توجه به شرایط محیطی به‌خصوص وضعیت پوشش گیاهی و راه‌های دسترسی، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس، این مطالعه، به‌منظور شناسایی مناطق کارستی و میزان گسترش آن‌ها با استفاده از روش سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه ظالم رود ساری در استان مازندران در شمال ایران متمرکز است.

پیشینه و هدف سیمای مرکبی از همه ناهمواری‌ها، اشکال، فضای خالی و پدیده‌هایی که در اثر خوردگی آب در سطح و در زیر سطح زمین در سازندهای زمین‌شناسی قابل‌حل مختلف ایجاد می‌شوند را کارست گفته که تقریباً ۱۵ درصد از سنگ‌های رخنمون یافته جهان را در بر گرفته‌اند. علی‌رغم اهمیت مناطق کارستی در ادوار گذشته، امروزه، مطالعه، شناسایی، تحلیل مکانی و مدیریت این محمدعلی قلی نتاج ملک‌شاه<sup>۱</sup>، سیدرمضان موسوی<sup>۲</sup> (✉)، داود جهانی<sup>۳</sup>، نادر کهنسال قدیم وند<sup>۴</sup>، سیدحمید وزیری<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
۲. استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳. دانشیار، گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
۴. استادیار گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
۵. استاد گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات : [srmmousavi@sanru.ac.ir](mailto:srmmousavi@sanru.ac.ir)

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.684338>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.3.4.6>

اساس متغیرهای پارامتری توجیه‌های داخلی و خارجی (External and Internal Orientation) سنجنده و نقاط کنترلی زمینی (Ground Control Points, GCPs) انجام شده است. شیب توپوگرافی منطقه به کمک DEM و بر اساس درجه در محیط نرم‌افزاری GIS محاسبه و نقشه آن تهیه شده است. بر اساس داده‌های آب‌وهوایی اداره کل هواشناسی استان مازندران، وضعیت آب‌وهوایی به صورت منحنی‌های هم‌دما، هم بارش و هم تبخیر مشخص و نوع آب‌وهوا نیز، از روش De Marton تعیین شده است.

**نتایج و بحث** حاصل فعالیت‌های فوق، تولید نقشه‌های سنگ‌شناسی، تراکم و فاصله از خطواره‌های حاصل از شکستگی، تراکم و فاصله از آبراهه‌ها، شیب توپوگرافی، هم بارش و پوشش گیاهی بوده است. با توجه به معیارهای متفاوت بکار رفته در نقشه‌های تولیدشده و وجود نیاز به معیاری واحد و قابل‌مقایسه و متناسب برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، از منطق فازی کمک گرفته شده است. در این حالت، کلیه لایه‌ها با مرز غیرقطعی به جز لیتولوژی که دارای مرز قطعی بوده و تابع منطق بولین است، فازی سازی شده‌اند و در GIS، به صورت لایه‌های فازی سازی شده استخراج گردیده‌اند. از طرفی، چون وزن و ضریب اثربخشی عوامل هشت‌گانه مؤثر در وقوع پدیده کارست یکسان نیستند، برای تعیین ارجحیت و اولویت‌بندی این عوامل، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شده است و میزان مشارکت و به عبارتی وزن هر یک از معیارها با ضریب ناسازگاری کمتر از یک درصد در نرم‌افزار Expert Choice 12 محاسبه شده است. درنهایت، با روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC)، لایه‌های رستری فازی شده بر اساس وزن مؤثر آن‌ها، با عملگر تجمعی توافقی (Compromise Operator) یا گاما تلفیق شده و نقشه پراکندگی پدیده کارست با ضریب احتمال متفاوت در محدوده مورد مطالعه استخراج گردید. در گام بعدی، به منظور بررسی وضعیت فیزیکی شیمیایی آبخوان‌ها و ارزیابی پدیده کارست، تعداد ۱۸ چشمه با دبی مساوی و بیشتر از سه لیتر بر ثانیه انتخاب و به کمک نرم‌افزارهای SPSS، RockWorks2016 و PHREEQC2.6 مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و ضمن استخراج جداول و نمودارهای هیدروژئوشیمیایی، شاخص اشباعی کانی‌های متعدد نیز، محاسبه گردیده‌اند.

**مواد و روش‌ها** به منظور شناسایی مناطق کارستی و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی آبخوان‌های موجود، ابتدا لازم بود مناطق کارستی شناسایی و سپس وضعیت فیزیکی شیمیایی آن ارزیابی می‌گردید. در گام نخست، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست Landsat، ستر ASTER و SRTM، نقشه‌های زمین‌شناسی، اطلاعات آب‌وهوایی و بازدیدهای میدانی، عوامل مؤثر بر کارستی شدن که شامل نوع سنگ، خطواره‌ها نظیر گسل‌ها و شکستگی‌ها، پوشش گیاهی، آب‌وهوا، وضعیت آبراهه‌ها و شیب توپوگرافی هستند، استخراج شده‌اند. قابل‌ذکر است که در این گام، برای به دست آوردن نتیجه بهتر، از منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بهره گرفته شده است. در گام دوم، به منظور بررسی وضعیت فیزیکی شیمیایی آبخوان، پارامترهای شیمیایی برخی از چشمه‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پارامترهای انحلالی، ضرایب اشباعی، منشأ مواد شیمیایی محلول در آب و سیستم کلی جریان در آبخوان‌های موجود مشخص شده است. در این مطالعه، تعیین ترکیب و پراکندگی سنگی، بر اساس بازدیدهای میدانی و به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی یک‌صد هزارم به شهر و ساری که زمین مرجع شده‌اند، انجام شده است. برای استخراج خطواره‌های ناشی از شکستگی‌ها، از سه روش دستی، خودکار و نیمه اتوماتیک استفاده شده است. در روش دستی، با اعمال فیلترهای High Pass، PCA و ترکیب رنگی داده‌های ماهواره‌ای لندست-۸، خطواره‌ها بارزسازی و استخراج شده‌اند. در روش اتوماتیک، از الگوریتم Segment Tracing (STA) Algorithm در نرم‌افزار PCI، کمک گرفته شده است. در الگوریتم STA، پیکسل‌های خطی بر اساس اختلاف درجه خاکستری شناسایی و سپس بر اساس پارامترهای GTHR، RADI، LTHR، FTHR، ATHR و DTHR به بردار تبدیل گردیده‌اند. جهت تشخیص و استخراج وضعیت پوشش گیاهی، از شاخص Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) بر روی داده‌های سنجنده OLI از ماهواره لندست-۸ کمک گرفته شده است. آبراهه‌ها، با کمک اکستنشن ArcHydro در GIS شناسایی گردیدند. برای تولید DEM مورد نیاز، از تکنیک‌های فتوگرامتری بر روی تصاویر زوج استریو سنجنده ASTER در نرم‌افزار Idrisi و بر

افشان و افشان- مجرای است. بر اساس این تحقیق، بهره‌گیری از فن‌آوری نوین سنجش‌ازدور و GIS، موجب افزایش دقت و سرعت و کاهش هزینه در مطالعات کارستی به‌همراه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** کارست، هیدروژئوشیمی، سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، منطق‌فازی، حوضه آبریز ظالم رود، مازندران

**نتیجه‌گیری** نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پدیده کارست، در بخش مرکزی دارای بیشترین گسترش بوده و خطواره‌های حاصل از شکستگی‌ها، بیشترین نقش را در تشکیل این پدیده داشته‌اند. تیپ آب این چشمه‌ها، بی‌کربنات کلسیک- منیزیک بوده و براساس نمودار گیبس، نقش سنگ‌های تشکیل‌دهنده آبخوان در تعیین ترکیب شیمیایی آب، بسیار واضح است. همچنین، با توجه به شاخص‌های اشباعی کانی‌ها، نوع جریان در مخازن آب‌های زیرزمینی، به‌صورت

لطفاً به این مقاله استناد کنید: قلی‌تاج ملکشاه، م. ع.، موسوی، س. ر.، جهانی، د.، کهنسال قدیم وند، ن.، وزیری، س. ح. ۱۴۰۱. شناسایی مناطق کارست و میزان گسترش آن با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم‌اطلاعات‌جغرافیایی در حوضه آبریز ظالم رود ساری در مازندران، ایران، نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۳(۳): ۷۱-۵۰.

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.684338>

یا حاصل وجود آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق باشد، این پدیده‌ها را نیز شناسایی نمود (۲۳).

استفاده از فن‌آوری‌های مکانی، در مطالعات محیطی و به‌خصوص زمین‌شناسی، از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و با توجه به توانمندی، سرعت، دقت و به‌روز بودن داده‌ها، بسیاری از مسائل مهم علوم زمین، اعم از مطالعات و بررسی‌های لیتولوژیکی، خاک‌شناسی و کانی‌شناسی (۳۳) و (۳۶)، ساختارهای زمین‌شناسی، وضعیت و کیفیت آب‌های سطحی، اشکال ژئومورفولوژیکی و سایر مطالعات علوم زمین را بررسی (۴، ۳۰ و ۳۱) و ضمن ارزیابی مکانی مناسب می‌توان نقشه‌هایی تا دقت ۹۰٪ (۲۷) نیز تهیه نمود. همچنین، استفاده از فن‌آوری‌های مکانی، به همراه اطلاعات با دقت‌های گوناگون و متنوع ماهواره‌ای مانند Landsat, IRS P6, LiDAR, Aster و SRTM، امروزه به‌عنوان روشی بسیار مناسب، دقیق و سریع در مطالعات کارست قلمداد شده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد (۱۳ و ۲۴). در این روش، نه‌تنها، از طریق اختلاف دمای هوای نزدیک سطح زمین (۳۲)، ارتباط فابریک‌های تکتونیکی با جریان‌ات آبی (۱۶)، خصوصیات مورفولوژیکی (۲۰) و اشکال کارستی به‌ویژه فرو چاله‌ها (۳۴) مناطق کارستی را شناسایی و میزان توسعه‌یافتگی آن را ارزیابی قرار نمود، بلکه در برخی موارد، می‌توان محدوده‌های حاوی آب زیرزمینی را نیز شناسایی نمود (۳).

مطالعه کارست بر پایه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و همچنین بر اساس ویژگی‌های هیدروشمیایی و با به‌کارگیری ابزارهایی مانند منطق فازی و AHP، در بسیاری از نقاط جهان و به‌ویژه در ایران صورت گرفته است، اما در اغلب آن‌ها، دو یا حداکثر سه مورد از روش‌های فوق‌الذکر به کار گرفته شده است. ضمن این‌که شرایط پوششی گیاهی محدوده مورد مطالعه در این بررسی نیز با اغلب مناطق مطالعاتی قبلی تفاوت چشمگیری دارد. برای مثال، ابراهیمی و همکاران (۱۲)، محمدی و همکاران (۲۴) و پیراسته (۲۸)، با به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی و همچنین گاهی منطق فازی، مطالعات کارست را در ایران انجام

سیمای مرکبی از همه ناهمواری‌ها، اشکال، فضای خالی و پدیده‌هایی که در اثر خوردگی آب، در سطح و در زیر سطح زمین، در سازندهای زمین‌شناسی قابل‌حل، ایجاد می‌شوند را کارست می‌گویند. در تشکیل و گسترش این پدیده دیاژنتیکی، عوامل متعددی مانند نوع و درجه انحلال‌پذیری سنگ‌های مرتبط با کارست، خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب‌های جاری و فرورو، شرایط آب‌وهوایی، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژیکی، تراکم درز و شکاف‌ها و پویایی تکتونیکی نقش دارند (۹ و ۱۶).

مطالعه و مدیریت مناطق کارستی، از دیرباز موردتوجه زمین‌شناسان، هیدرولوژیست‌ها، هیدروژئولوژیست‌ها، ژئومورفولوژیست‌ها، کارشناسان محیط‌زیست و حتی اکو و ژئوتوریست‌ها بوده است (۸ و ۲۶). امروزه شناسایی مناطق کارستی با توجه به برخی از شرایط ویژه آن، از قبیل پتانسیل منابع آبی، شرایط زیست‌محیطی و مکان‌یابی با ریسک کم برای سازه‌های عمرانی، اهمیت زیادی دارند (۳۴). از طرفی، به سبب محدودیت‌های مالی، زمانی، دسترسی غیر آسان، تجهیزات زمینی گران‌قیمت و حتی نبود آثار و شواهد کارستی واضح در برخی مطالعات میدانی، استفاده از روش و یا روش‌هایی که بتواند کاستی‌ها و محدودیت‌های فوق‌الذکر را مرتفع سازد دارای اهمیت زیادی است. یکی از این روش‌های کارآمد، استفاده از فناوری سنجش‌ازدور است. در این روش، با کمک قوانین حاکم بر بازتاب طیف‌های خورشیدی توسط اجسام و سایر قواعد موجود در این علم، می‌توان داده‌های ماهواره‌ای با اهداف گوناگون دریافت کرد (۱۵ و ۳۳)، که با پردازش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها در نرم‌افزارهای سنجش‌ازدوری، خروجی‌های کاربردی و باارزشی را استخراج نمود. برای مثال، نه‌تنها به کمک اشکال ژئومورفولوژیکی و پوشش گیاهی می‌توان خطواره‌هایی مانند شکستگی‌ها را تشخیص داد بلکه حتی می‌توان به کمک داده‌های حرارتی، تفاوت‌های دمایی برجسته‌ای که ممکن است ناشی از تخلیه آب در طول گسل‌ها

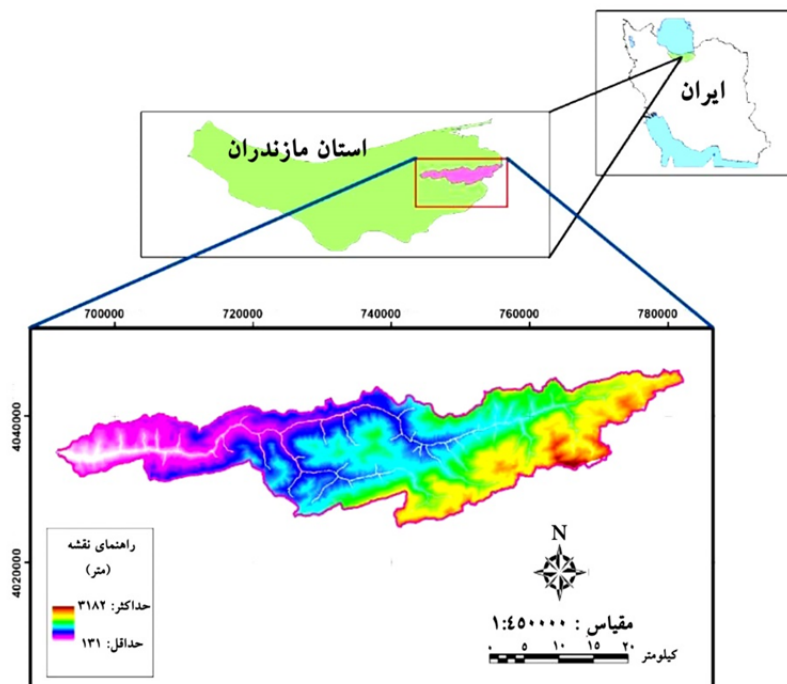
بکار برده، سپس وزن و ضریب هر یک از عوامل را تعیین نموده‌اند و در ادامه در محاسبات خود بکار بسته است. در گام بعدی که بررسی منابع آبی کارستی بوده است، ابتدا منابع آبی زیرزمینی که در واقع همان چشمه‌های موجود هستند، از لحاظ شیمیایی و با استفاده از نمودارها و ضرایبی مانند ضریب اشباعی کانی‌های مرتبط با کارست مورد ارزیابی قرار گرفته تا ضمن شناسایی چشمه‌های با منبع کارستی، نوع جریان‌های احتمالی در آبخوان، میزان گسترش پدیده کارست بررسی گردد.

#### منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه آبریز ظالم رود در حوضه آبریز تجن شهرستان ساری با روند شرقی- غربی در بخش شمالی البرز مرکزی قرار دارد (شکل ۱). این محدوده در بین طول جغرافیایی  $12^{\circ}$ ،  $10^{\circ}$ ،  $53^{\circ}$  تا  $22^{\circ}$ ،  $11^{\circ}$ ،  $54^{\circ}$  شرقی و عرض جغرافیایی  $41^{\circ}$ ،  $19^{\circ}$ ،  $36^{\circ}$  الی  $11^{\circ}$   $32^{\circ}$   $36^{\circ}$  شمالی واقع شده، کمترین ارتفاع آن با بلندی حدود  $130$  و بیشترین ارتفاع آن با بلندی  $3184$  متر از سطح آب‌های آزاد دریا در جنوب شرق می‌باشد. شیب توپوگرافی عمومی محدوده به سمت غرب است. پوشش جنگل‌های هیرکانی آن در نیمه غربی دارای بیشترین و در نیمه شرقی کمترین تراکم را دارد. متوسط بارندگی سالانه این محدوده حدود  $700$  میلی‌متر بوده، بیشترین بارش در نیمه غربی تا  $1000$  میلی‌متر و کمترین بارندگی در نیمه شرقی تا  $400$  میلی‌متر واقع شده است. این محدوده، از لحاظ زمین‌شناسی، بخشی از قسمت شمالی، کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا در آسیای غربی بوده، مطابق با تقسیمات زمین‌شناسی ساختاری در زون البرز (۲) و بر اساس تقسیمات پهنه‌های رسوبی- ساختاری، در پهنه مرکزی ایران (۱) قرار گرفته است. غالب سنگ‌های موجود، نهشته‌های رسوبی دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک بوده، سنگ‌های حاوی کانی‌های کربناته مانند سنگ‌آهک، سنگ‌آهک دولومیتی، سنگ‌آهک ماسه‌ای و ماسه سنگ‌آهکی نیز دارای گسترش زیادی هستند.

داده‌اند. در حالی که خانلری و مؤمن (۱۷)، با نگاه هیدروشیمیایی، این پدیده را در کشورمان مورد ارزیابی قرار داده‌اند. قابل ذکر است که چنین مطالعاتی در سایر کشورها نیز صورت گرفته، ولی مناطق مشابه محدوده مورد مطالعه در این بررسی از لحاظ پوشش گیاهی کمتر هستند و نمونه‌ای از آن را می‌توان به مطالعات میجرینک و همکاران (۲۳) در منطقه با پوشش گیاهی انبوه حوضه آبریز سوئومی (Suoiuoi) کشور ویتنام را اشاره نمود.

هدف از این تحقیق، ارزیابی پراکندگی و وضعیت گسترش مناطق کارستی در زیرحوضه آبریز ظالم رود از حوضه آبریز تجن شهرستان ساری، با به‌کارگیری روش سنجش‌از‌دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و همچنین با استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های موجود بوده و با بررسی نظر کارشناسان علوم محیطی و زمین‌شناسی، تابع عضویت فازی و میزان اثرگذاری عوامل مؤثر بر کارستی شدن در این محدوده، اندازه‌گیری گردد. این زیرحوضه با وجود شرایط زمین‌شناسی، تکنیکی، آب‌وهوایی و سایر عوامل اثرگذار بر تشکیل و گسترش پدیده کارست، هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته و میزان گستردگی آن ارزیابی نشده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از سنجش‌از‌دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (Analytical Hierarchy Process)، مناطق کارستی شناسایی و بر اساس آنالیز شیمیایی آب چشمه‌های این مناطق، نوع جریان‌های احتمالی در آبخوان‌های کارستی را مورد ارزیابی قرار دهند. بدین منظور، در گام نخست، هشت فاکتور تراکم خطواره‌ها و آبراهه‌ها، فاصله از خطواره‌ها و آبراهه‌ها، لیتولوژی، آب‌وهوا، پوشش گیاهی که در تشکیل و گسترش پدیده کارست اثرگذار هستند، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. سپس، با توجه به جایگاه و کاربرد وسیع منطق فازی در علوم زمین (۱۰)، تمامی این فاکتورها به‌جز لیتولوژی، در محیط نرم‌افزاری ArcGIS، فازی سازی شده‌اند. از طرفی با آگاهی از عدم یکسان بودن نقش هر یک از عوامل اثرگذار در تشکیل و گسترش کارست، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی این عوامل



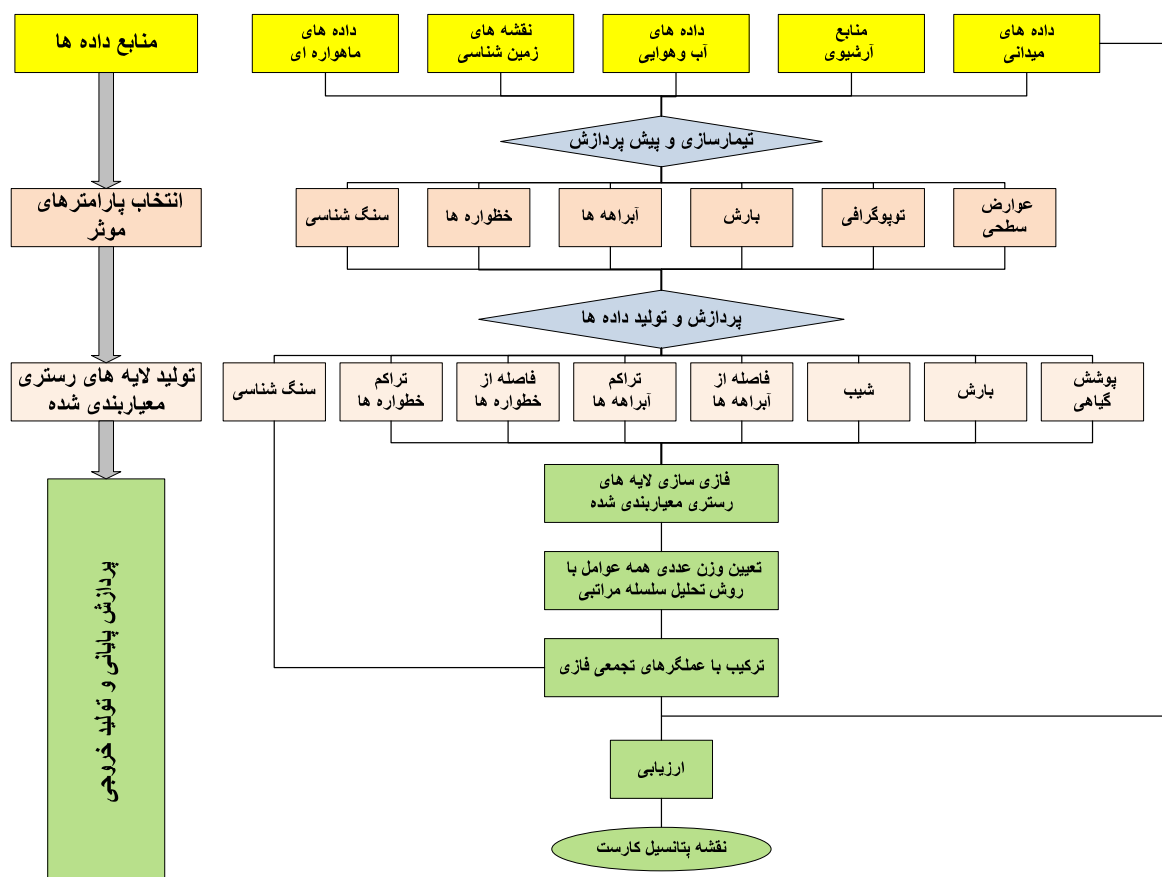
شکل ۱. موقعیت زیرحوضه آبریز ظالم رود در استان مازندران و حوضه آبریز تاجن

Fig. 1. Location of Zalem River catchment area in Mazandaran province and Tajan catchment area

## روش تحقیق

گرفته، میزان مشارکت و به عبارتی وزن هر یک از معیارها تعیین گردیده است (۲۹). در نهایت، با روش ترکیب خطی وزن دار (Weighted Linear Combination) که یکی از رایج ترین روش های مورد استفاده در ترکیب داده ها است، خروجی های لازم جهت شناسایی مناطق با پتانسیل تشکیل کارست بر اساس عملگر تجمعی توافقی تولید گردیده اند. علی رغم قابلیت مناسب مدل رقومی ارتفاعی SRTM، جهت افزایش جزئیات ارتفاعی از پردازش امکانات باندهای زوج استریو ASTER، مدل ارتفاعی رقومی ASTER تولید و پردازش و نتایج دقیق تری به دست آمد. به همین دلیل برای تولید DEM با ابعاد پیکسلی  $15 \times 15$  متر در محیط نرم افزار Idrisi، از تکنیک های فتوگرامتری بر روی تصاویر زوج استریو سنجنده ASTER، بر اساس متغیرهای پارامتری توجیه داخلی (Internal Orientation) و خارجی (External Orientation) سنجنده و نقاط کنترلی زمینی (Ground Control Points, GCPs) استفاده شده است (۵).

به منظور شناسایی مناطق کارستی و ویژگی های فیزیکوشیمیایی آبخوان های موجود، ابتدا لازم بود مناطق کارستی شناسایی و سپس وضعیت فیزیکوشیمیایی آن ارزیابی می گردید. در گام نخست، با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از داده های سنجنده های Landsat، Aster، SRTM، نقشه های زمین شناسی، اطلاعات آب و هوایی، باز دیده های میدانی، عوامل مؤثر بر کارستی شدن استخراج شده اند (۲۵). در ادامه طی مراحل که در فلوچارت شکل ۲ نشان داده شده است، نقشه پتانسیل کارست منطقه تولید شده است (شکل ۲). در این مطالعه، برای هر یک از لایه های با مرز غیرقطعی، مجموعه فازی تعیین گردیده و سپس، بر اساس اهداف این مطالعه، درجه عضویت فازی آن ها تعریف شده است. همچنین، به منظور تعیین ارجحیت عوامل مؤثر در ایجاد فرآیند کارست، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در نرم افزار ExpertChoice@12 کمک



شکل ۲. فلوچارت گام نخست انجام این تحقیق

Fig. 2. Flowchart the first step in doing this research

کارستی شدن نقش دارند. در محدوده مورد مطالعه، به سبب وجود پوشش گیاهی انبوه و وسیع، استفاده از داده های ماهواره ای جهت استخراج خصوصیات لیتولوژیکی مناسب و کافی نبوده است، بنابراین، برای تعیین ترکیب سنگ شناسی، از نقشه های زمین شناسی یک صد هزارم به شهر و ساری استفاده شده است. ضمن اینکه برای تطبیق این داده ها، از بازدیدهای میدانی نیز کمک گرفته شده است. این نقشه ها در محیط GIS زمین مرجع شده است (شکل ۳ الف). بر این اساس، مشخص شده است که پراکندگی سنگ های آهکی و سنگ های آواری کربناته و همچنین تبخیری ها که قابلیت انحلال و کارستی شدن بالایی هستند در جنوب و شرق محدوده مورد مطالعه حداکثر می باشد. سه روش دستی، خودکار و نیمه اتوماتیک، برای استخراج خطواره های ناشی از شکستگی ها وجود دارد. در روش دستی، با اعمال فیلترهای High Pass، PCA و ترکیب

در گام دوم، به منظور بررسی وضعیت فیزیکوشیمیایی آبخوان، ابتدا ۱۸ چشمه با دبی مساوی و بزرگ تر از سه لیتر در ثانیه در مناطق کارستی شناسایی شده در گام اول انتخاب شده و ترکیبات شیمیایی آن ها از سازمان آب منطقه ای مازندران تهیه گردیده است. سپس با تجزیه و تحلیل پارامترهای انحلالی به کمک تهیه نمودارهایی مانند پایپر، گپس و محاسبه ضرایب اشباعی کانی های کلسیت، آراگونیت، دولومیت، ژیپس، اندیریت و هالیت، منشأ مواد شیمیایی محلول در آب و سیستم کلی جریان در آبخوان های کارستی تعیین گردید.

## بحث و نتایج

عوامل گوناگونی نظیر ویژگی های لیتولوژیکی، خطواره ها نظیر گسل ها و شکستگی ها، پوشش گیاهی، آب و هوا، وضعیت آبراهه ها و شیب توپوگرافی، در تشکیل و گسترش فرآیند

در داده‌های سنجنده OLI از ماهواره Landsat 8، این شاخص به صورت رابطه ۲ بوده و باندهای ۴ و ۵ مورد کاربرد می‌باشد.

[۲]

$$NDVI = (Band 5 - Band 4) / (Band 5 + Band 4)$$

بر اساس نتایج حاصله، بیشترین تراکم پوشش گیاهی و به دنبال آن بیشترین فراوانی کربن و اسیدهای آلی، در نیمه شرقی محدوده مورد مطالعه قرار دارد. در استخراج وضعیت آبراهه‌ها، DEM تولیدشده از داده‌های سنجنده ASTER، در محیط GIS فراخوان شده و با اکستنشن ArcHydro آبراهه‌ها شناسایی گردیدند و در ادامه نقشه‌های تراکم آبراهه‌ها (شکل ۳ ث) و فواصل نقاط مختلف نسبت به این آبراهه‌ها (شکل ۳ ح) تولید شده‌اند. در این محدوده، تراکم آبراهه‌ها، حتی به بیش از ۱/۲ کیلومتر بر کیلومتر مربع رسیده و بیانگر زهکشی قابل توجه آب‌های سطحی و زیرسطحی آن می‌باشد. شیب توپوگرافی منطقه به کمک DEM و بر اساس درجه در محیط نرم‌افزاری GIS محاسبه و نقشه آن تهیه شده است (شکل ۳ ج). برای تعیین وضعیت آب‌وهوایی منطقه، از داده‌های بارش، دما و تبخیر ایستگاه‌های هواشناسی وابسته به اداره کل هواشناسی استان مازندران در بازه‌های زمانی متفاوت، بهره گرفته و از طریق درون‌یابی به روش کریجینگ، منحنی‌های هم‌دما، هم بارش و هم تبخیر بر اساس متوسط سالانه در محیط نرم‌افزاری GIS تولید شده‌اند. برای تعیین نوع آب‌وهوا نیز، از روش De Marton بر اساس رابطه ۳ استفاده شده و نقشه ویژگی‌های آب‌وهوایی محدوده مورد مطالعه تولید شده است (شکل ۳ خ).

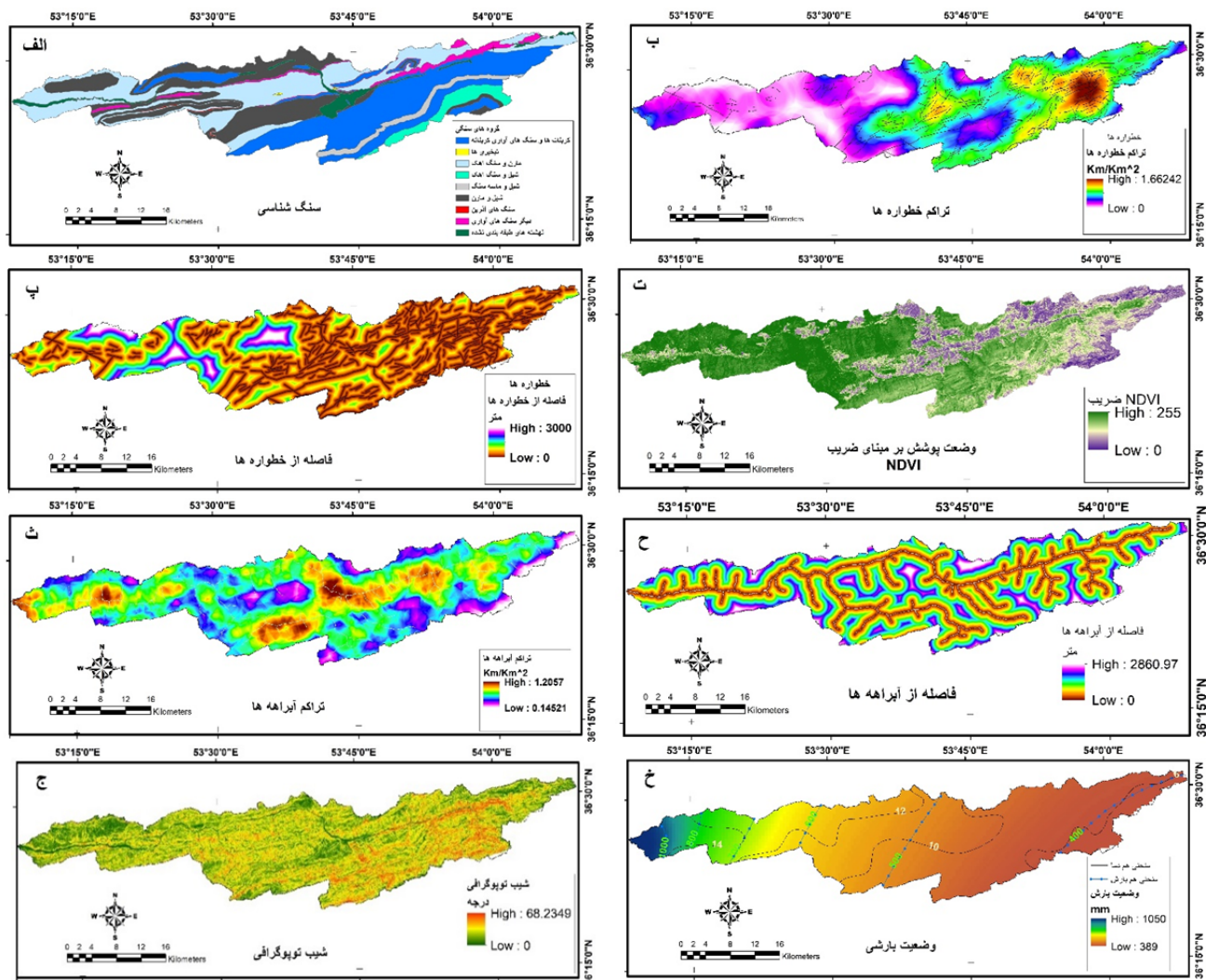
$$I = P / (T + 10) \quad [۳]$$

در این رابطه؛ I ضریب خشکی، P متوسط بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر و T متوسط درجه حرارت سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نقشه‌های عوامل مؤثر بر تشکیل و گسترش کارست در شکل ۳ ارائه شده است.

رنگی داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸، خطواره‌ها بارزسازی و قابل استخراج هستند. قابل ذکر است که در فیلتر کردن، غالباً از فیلترهای جهت‌دار یا لبه ساز Gradient- Robert، Gradient- Sobel و Gradient-Prewitt استفاده می‌شود. در روش اتوماتیک، عموماً از سه الگوریتم Haar Transform، Hough Transform و Segment Tracing Algorithm (STA) که دارای بیشترین کاربرد هستند، استفاده می‌شود (۱۹). بدین منظور در نرم‌افزار PCI، از ماژول Line که دارای نزدیکی منطقی با الگوریتم STA است، کمک گرفته شده است. در الگوریتم STA، پیکسل‌های خطی بر اساس اختلاف درجه خاکستری آن‌ها به‌طور خودکار تشخیص داده شده و سپس بر اساس شش پارامتر ATHR، FTTHR، LTHR، GTHR، RADI و DTHR به بردار تبدیل می‌گردند (۱۸). در نهایت با تلفیق و همپوشانی خروجی‌های دستی و اتوماتیک، نقشه خطواره نظارت‌شده نهایی تهیه شده است و سپس نقشه‌های تراکم خطواره‌ها (شکل ۳ ب) و فواصل نقاط مختلف نسبت به این خطواره‌ها (شکل ۳ پ) در محیط نرم‌افزاری GIS تولید گردیدند. بر اساس خروجی‌های حاصله، بیشترین تراکم خطواره‌های حاصل از شکستگی‌ها، در شرق محدوده مورد مطالعه بوده و به ۱/۶۶ کیلومتر بر کیلومتر مربع می‌رسد. با توجه به وضعیت جذب و بازتاب طیف‌ها در کلروفیل گیاهان، شاخص Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)، که بر مبنای باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز پایه‌گذاری شده، شاخصی مناسب جهت تشخیص و استخراج وضعیت پوشش گیاهی، است (شکل ۳ ث) (معادله ۱). همچنین بر اساس مطالعات میدانی، وضعیت پوشش منطقه، به سه گروه عمده جنگلی، مرتعی و مزارع قابل تفکیک بوده و بهترین روش برای جدایش این سه مجموعه، استفاده از این شاخص است.

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad [۱]$$





شکل ۳. نقشه‌های تولیدشده از عوامل مؤثر بر تشکیل و گسترش کارست: الف، بر اساس وضعیت زمین‌شناسی، پراکنندگی سنگ‌های دارای انحلال‌پذیری مشخص شده‌اند، ب، در بخش شرقی تراکم خطواره‌های حاصل از شکستگی‌ها برحسب کیلومتر بر کیلومترمربع، دارای حداکثر مقدار است، پ، فاصله از خطواره‌های حاصل از شکستگی‌ها برحسب متر به دست آمده است، ت، تراکم پوشش گیاهی در بخش غربی بیشتر از شرقی است، ث، دره‌ها و رودها در چندین محدوده، دارای تراکم بالایی هستند، ح، فاصله از آبراهه‌ها برحسب متر به دست آمده است، ج، مناطق پرشیب، در ارتفاعات جنوب شرقی و حواشی آبراهه‌ها قرار دارند و خ، میزان بارش از غرب به شرق کاهش می‌یابد.

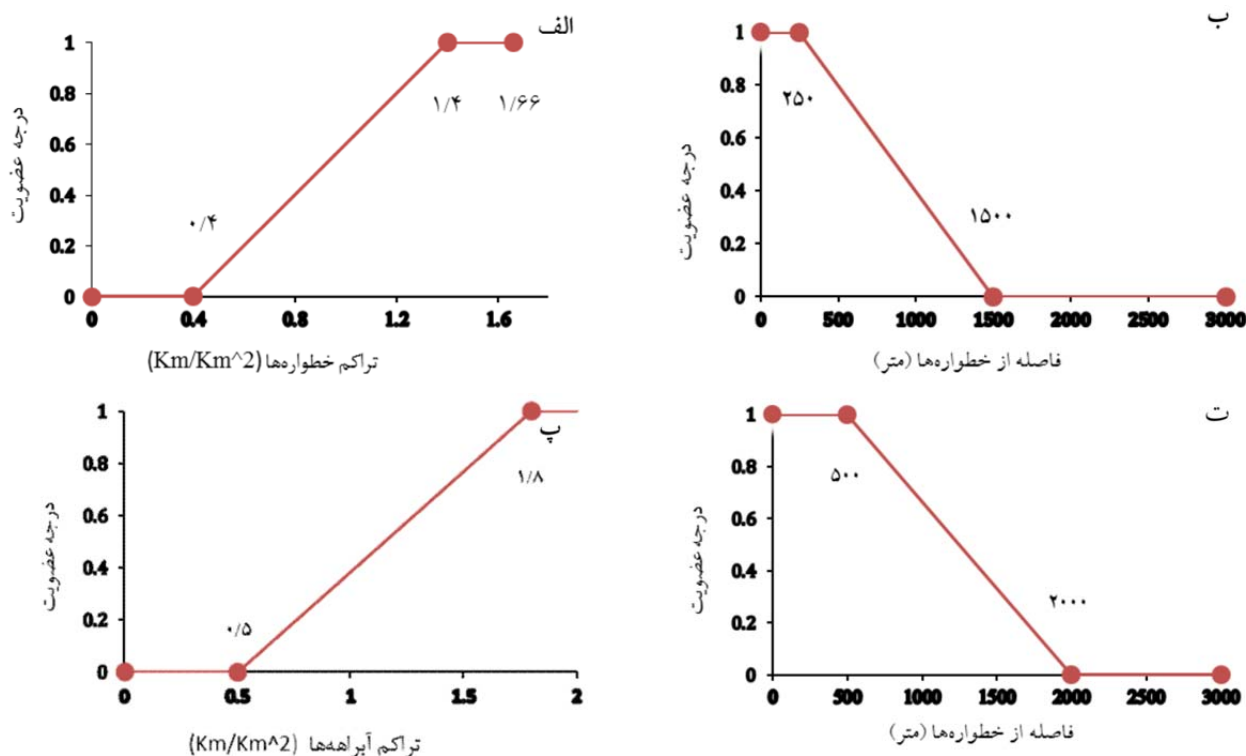
Fig. 3. Maps produced of factors affecting the formation and spread of karst: A, Based on the geological status, the dispersion of soluble rocks has been determined, B, In the eastern part, density of fracture lines in terms of kilometers per square kilometer has a maximum value, C, The distance from the fracture lines is obtained in meters, D, Vegetation density is higher in the western part than in the east, E, Valleys and rivers have high density in several areas, F, Distance from drainages is obtained in meters, G, Sloping areas are located in the southeastern highlands and along the drainages and H, Precipitation decreases from west to east.

می‌شود، در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی‌زاده مطرح شد. برخلاف منطق بولین که مسئله قطعیت وجود دارد، یک مجموعه فازی، به‌صورت مجموعه‌ای از داده‌ها با مرز غیرقطعی هستند. از طرفی، در تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، توجه به ارزش هر یک از

امروزه، منطق فازی، با توجه به توانمندی و تولید خروجی‌های مناسب، توانسته در بسیاری از علوم و به‌ویژه علوم زمین جایگاه ویژه‌ای باز کرده و کاربرد وسیعی داشته باشد (۱۰). این منطق که بر پایه مجموعه‌های فازی تعریف

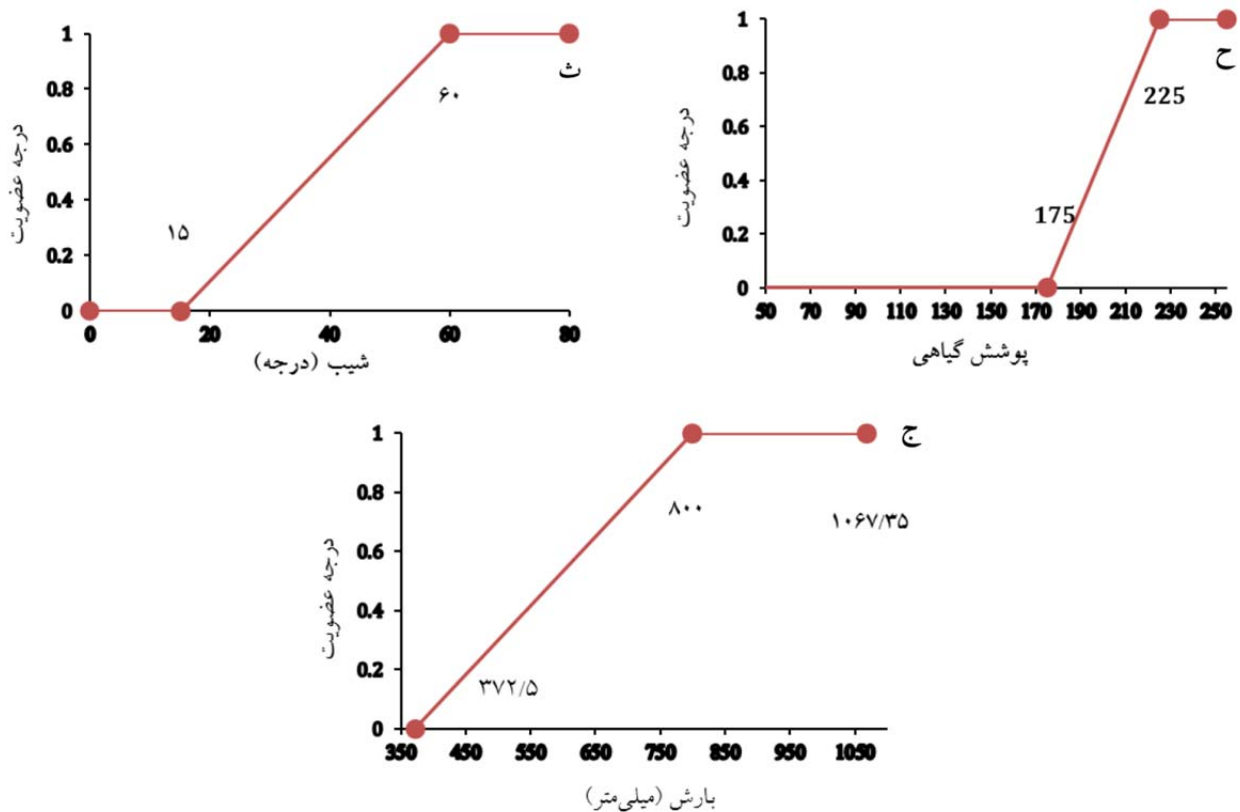
بالایی است (۱۰). در این مطالعه، در مرحله اول برای هر یک از لایه‌های با مرز غیرقطعی شیب، تراکم خطواره‌ها و آبراهه‌ها، فاصله از آبراهه‌ها و خطواره‌ها، پوشش گیاهی و بارش، مجموعه فازی تعیین گردید، سپس، بر اساس اهداف این مطالعه، درجه عضویت فازی آن‌ها با تابع خطی تعریف شده است (شکل ۴). در ادامه، ارزش پیکسل‌های همه عوامل مؤثر در تشکیل و گسترش پدیده کارست به‌جز لیتولوژی که تابع مسئله قطعیت موجود در منطق بولین می‌باشد، در محیط GIS بر اساس تابع عضویت فازی آن محاسبه و لایه‌های رستری جدیدی تولید شده‌اند (شکل ۵).

لایه‌ها و واحدهای آن‌ها، امری ضروری است؛ زیرا معیارهای لایه‌های اطلاعاتی، با همدیگر متفاوت می‌باشند مانند واحد متر برای ارتفاع و درجه برای شیب. همچنین، در مدل تصمیم‌سازی، داده‌هایی قابلیت تلفیق دارند که معیارهای آن‌ها به‌صورت واحدهای قابل‌مقایسه و متناسب باشد و در غیر این صورت، حالت ابهام وجود داشته و قابلیت طبقه‌بندی نخواهد داشت. در منطق فازی بر اساس نوع هدف مطالعه، داده‌های هر لایه، مقدار عضویتی می‌گیرد که بیانگر میزان مطلوبیت آن می‌باشد. همچنین، در استفاده از منطق فازی، نه تنها تعیین درجه عضویت، بلکه گزینش نوع تابع فازی که به اهداف پژوهش و نوع معیارهای داده‌های هر لایه بستگی دارد، نیز دارای اهمیت



شکل ۴. نمودارهای میزان درجه عضویت فازی داده‌های با مرز غیرقطعی در این مطالعه؛ الف) تراکم خطواره‌ها، ب) فاصله از خطواره‌ها، پ) تراکم آبراهه‌های اصلی و فرعی، ت) فاصله از آبراهه‌های اصلی و فرعی، ث) شیب توپوگرافی، ح) پوشش گیاهی و ج) میزان بارش

Fig. 4. Fuzzy membership degree graphs of data with uncertain boundary in this study as (A) lineaments density, (B) distance from lineaments, (C) density of drainages, (D) distance from drainages, (E) topographic slope, (F) vegetation and (G) precipitation



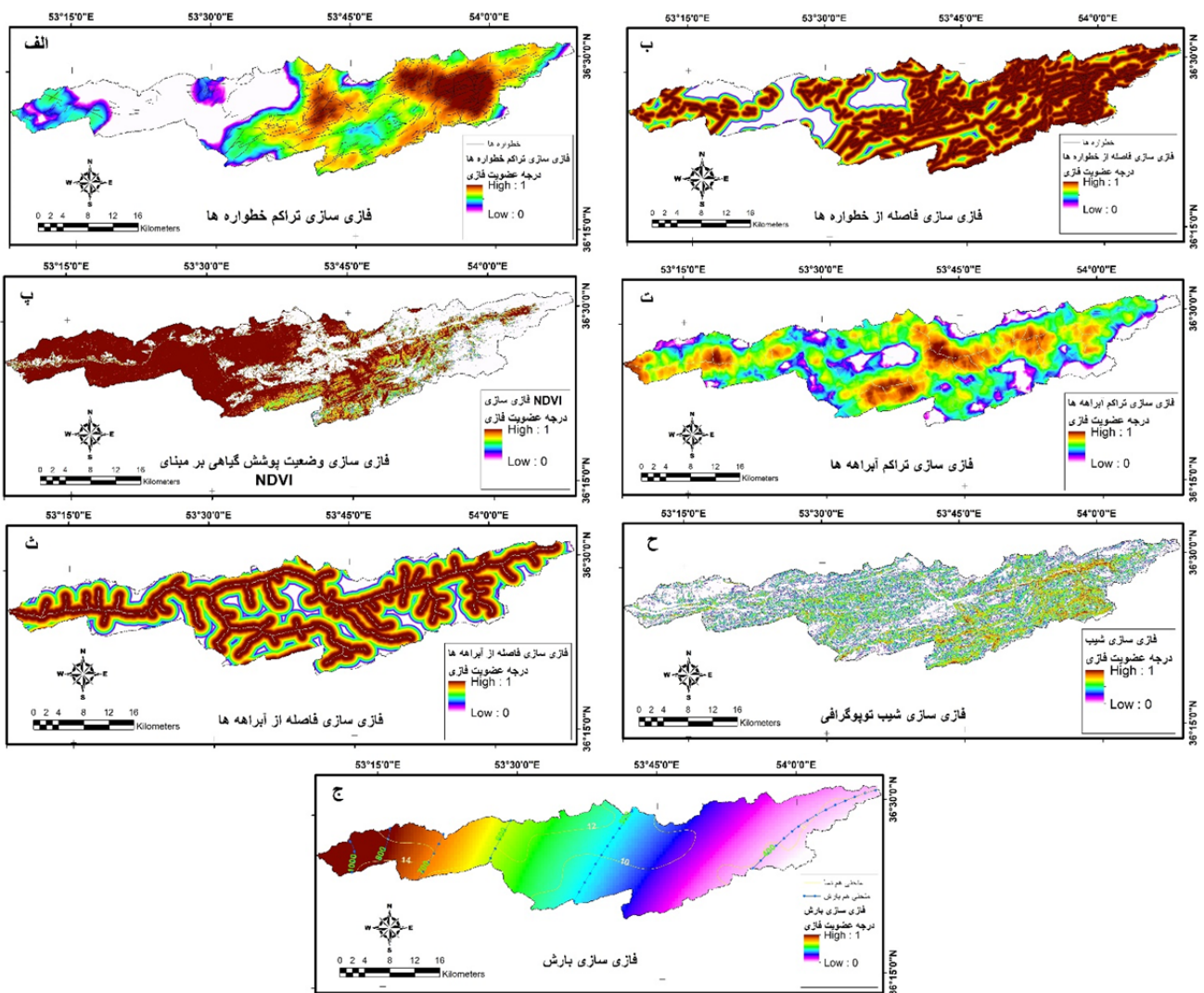
ادامه شکل ۴. نمودارهای میزان درجه عضویت فازی داده‌های بامرکز غیرقطعی در این مطالعه؛ ج) میزان بارش

Fig. 4. Fuzzy membership degree graphs of data with uncertain boundary in this study as (G) precipitation

تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شامل پنج نفر دکتری زمین‌شناسی، هفت نفر دکتری آبخیزداری، پانزده نفر کارشناسی ارشد زمین‌شناسی و دو نفر کارشناسی زمین‌شناسی و دوازده نفر کارشناسی منابع طبیعی و آبخیزداری بوده‌اند.

ماتریس مقایسات زوجی، ارجحیت عوامل هشت‌گانه مؤثر در وقوع پدیده کارست در جدول ۱ ارائه شد. سپس با تولید، وزن اثربخشی هر یک از پارامترها با ضریب ناسازگاری کمتر از یک درصد محاسبه گردید. در این محاسبه، وزن اثربخشی سنگ‌شناسی / لیتولوژی، تراکم خطواره‌ها، فاصله از خطواره‌ها، تراکم آبراهه‌ها، فاصله از آبراهه‌ها، میزان بارش، شیب توپوگرافی و پوشش گیاهی به ترتیب برابر  $0/302$ ،  $0/170$ ،  $0/225$ ،  $0/071$ ،  $0/107$ ،  $0/032$ ،  $0/071$  و  $0/021$  می‌باشد (شکل ۶).

از دیگر فاکتورهای مهم و اساسی در چنین مطالعاتی، تعیین میزان وزن هر یک از عوامل مؤثر بر اساس نوع هدف پژوهش است، زیرا نقش هر یک از عوامل، یکسان نبوده و با همدیگر تفاوت دارند؛ بنابراین بایستی وزن و ضریب اثربخشی آن‌ها مشخص گردد. یکی از روش‌های تعیین وزن و ضریب اثربخشی عوامل مؤثر در مطالعات، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است. این روش که برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر در مطالعات بکار می‌رود، یکی از مدل‌های کارآمد در تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش، شامل یک ماتریس وزن دهی بر مبنای مقایسه دوتایی بین عوامل اثرگذار بوده و میزان مشارکت و به عبارتی وزن هر یک از معیارها بر اساس نظر کارشناسان و شاخص ناسازگاری معیارها تعیین می‌گردد (۳۲). قابل‌ذکر است که کارشناسان محترمی که از نظرات سازنده آن‌ها در این



شکل ۵. نقشه‌های فازی عوامل مؤثر در تشکیل و گسترش کارست: الف، میزان تراکم خطواره‌های حاصل از شکستگی‌ها بر حسب کیلومتر بر کیلومتر مربع، ب، فاصله نسبت به خطواره‌های حاصل از شکستگی‌ها بر حسب متر، پ، بر اساس وضعیت پوشش گیاهی، بخش شرقی دارای کمترین تراکم است، ت، میزان تراکم آبراهه‌ها بر حسب کیلومتر بر کیلومتر مربع، ث، میزان فاصله نسبت آبراهه‌ها بر اساس متر، ح، وضعیت شیب توپوگرافی بر حسب درجه و ج، وضعیت بارشی محدوده بر اساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی

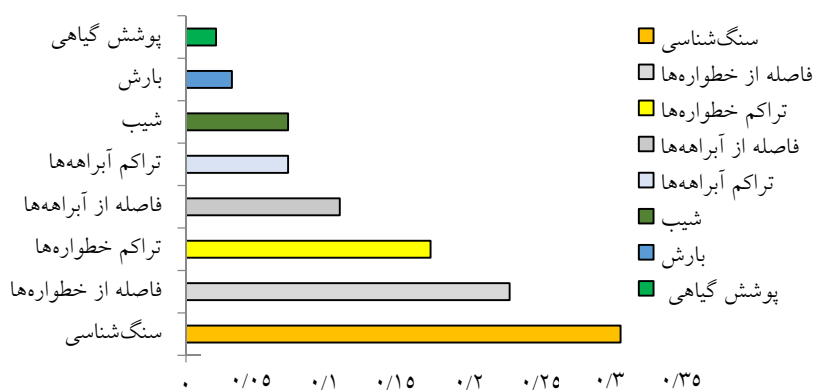
Fig. 5. Maps obtained from fuzzy factors affecting the formation and expansion of karst: A, The density of fracture lines in kilometers per square kilometer, B, Distance to fracture lines in meters, C, Based on the vegetation status, the eastern part has the lowest density, D, The density of drainages in terms of kilometers per square kilometer, E Distance from drainages based on meters, F, topographic slope in degrees and G, Precipitation status of the area based on meteorological station data

جدول ۱. ماتریس مقایسات زوجی عوامل هشت گانه مؤثر در تشکیل و گسترش کارست در محدوده مورد مطالعه بر اساس تحلیل سلسله مراتبی

Table 1. Matrix of pairwise comparisons of the eight factors affecting the formation and expansion of karst in the study area based on hierarchical analysis

عوامل	سنگ شناسی	تراکم خطواره‌ها	فاصله از خطواره‌ها	تراکم آبراهه‌ها	فاصله از آبراهه‌ها	بارش	شیب	پوشش گیاهی
سنگ شناسی	۱	۲	۲	۵	۴	۷	۵	۷
تراکم خطواره‌ها		۱	-۲	۴	۳	۵	۲	۶
فاصله از خطواره‌ها			۱	۵	۳	۶	۳	۷
تراکم آبراهه‌ها				۱	-۲	۳	۲	۵
فاصله از آبراهه‌ها					۱	۴	۳	۶
بارش						۱	-۴	۳
شیب							۱	۶
پوشش گیاهی								۱

۰/۰۶ = ضریب ناسازگاری



شکل ۶. هیستوگرام وزن اثربخشی هر یک از پارامترهای مؤثر در تشکیل و گسترش کارست در محدوده مورد مطالعه

Fig. 6. Histogram of the effective weight of each of the parameters affecting karst formation and expansion in the study area

داشته است. این عملگر، بین عملگرهای T-norm و S-norm قرار داشته و شامل میانگین، اختلاف و عملگر گاما است (۲۴). عملگر گاما از رابطه ۴ تعیین گردید.

[۴]

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{fuzzy sum})_{\gamma} - (\text{fuzzy product})_{1-\gamma}$$

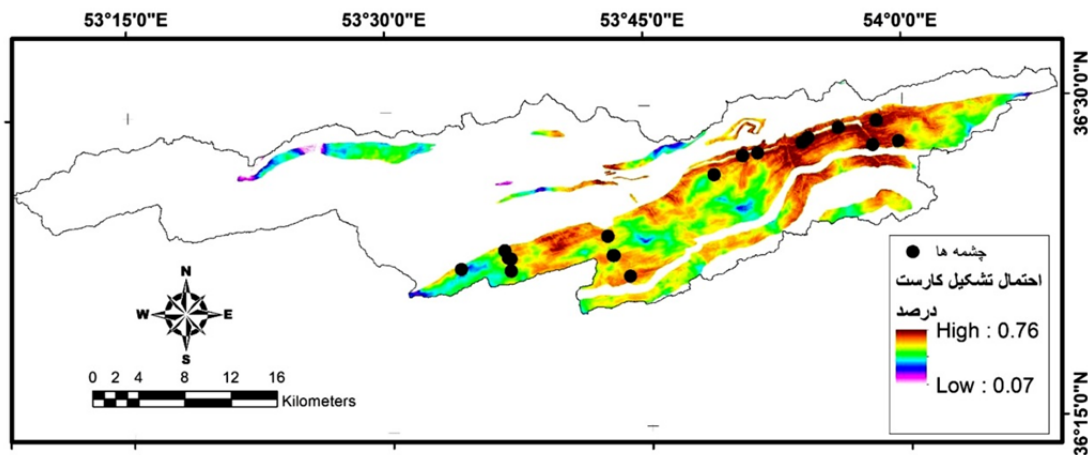
در این رابطه؛  $\gamma$  از صفر تا یک در تغییر است. چنانچه  $\gamma$  برابر صفر باشد ترکیب این عملگر معادل حاصل جبری فازی است و اگر  $\gamma$  برابر یک باشد ترکیب این عملگر اجتماع جبری فازی خواهد بود. بر همین اساس خروجی‌های حاصل از

در نهایت، با روش ترکیب خطی وزن دار (Weighted Linear Combination) که یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در ترکیب داده‌ها به خصوص در زمینه کاربری اراضی، تحلیل پایداری، انتخاب مکان و ارزیابی منابع است (۲۲)، لایه‌های رستری فازی تهیه شده و وزن مؤثر آن‌ها، بر اساس عملگر تجمعی توافقی (Compromise Operator) یا گاما تلفیق شده‌اند.

در بین عملگرهای T-norm، S-norm و توافقی، عملگر توافقی دارای بهترین خروجی بر اساس بازدیدهای میدانی را

است (شکل ۷). در این تلفیق، مقادیر متعدد گاما، مورد محاسبه قرار گرفته و سپس با بازدیدهای میدانی مورد ارزیابی قرار گرفته اند و بر اساس این ارزیابی، بهترین مقدار برای گاما، در این مطالعه، ۰/۹ بوده است.

عملگر گاما انعطاف پذیر است (۷). حاصل تلفیق لایه های فازی شده بر اساس وزن اثربخشی آن ها در تشکیل و گسترش پدیده کارست، استخراج نقشه پراکندگی پدیده کارست با ضریب احتمال متفاوت در مناطق مختلف محدوده مورد مطالعه بوده



شکل ۷. نقشه های تولید شده بر اساس تلفیق لایه های فازی شده با استفاده از عملگر توافقی. بر اساس محاسبات، بیشترین احتمال تشکیل کارست، در نیمه جنوبی بخش شرقی محدوده مورد مطالعه وجود دارد.

Fig. 7. Maps generated based on the combination of fuzzy layers using the agreement operator. According to calculations, the highest probability of karst formation is in the southern half of the eastern part of the study area

بنابراین، مطالعات شیمی آب می تواند منجر به استخراج اطلاعات مهمی از یک سیستم کارستی گردیده و ارزیابی پدیده کارست و نحوه گسترش آن ها را آسان تر می نماید. بر این اساس، تعداد ۱۸ چشمه از مناطق دارای پتانسیل کارستی، انتخاب و ترکیب شیمیایی آب آن ها از سازمان آب منطقه ای مازندران تهیه گردید. دبی این چشمه ها مساوی و بیشتر از سه لیتر بر ثانیه است. ابتدا این داده ها به کمک نرم افزار آماری SPSS مورد ارزیابی آماری قرار گرفته و با نرم افزار RockWoerk نمودار پایپر استخراج شد. همچنین، برای تعیین شاخص های اشباعی کانی هایی نظیر کلسیت، آراگونیت، دولومیت، انیدریت، ژیپس و هالیت، از نرم افزار PHREEQC 2.6 استفاده شد. نتایج نشان داد که کاتیون و آنیون غالب در آب این چشمه ها، به ترتیب  $Ca^{2+}$  و  $HCO_3^-$  است. ترتیب فراوانی کاتیون ها و آنیون ها در آب چشمه های محدوده مورد مطالعه،  $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ + K^+$  و  $HCO_3^- > Cl^-$

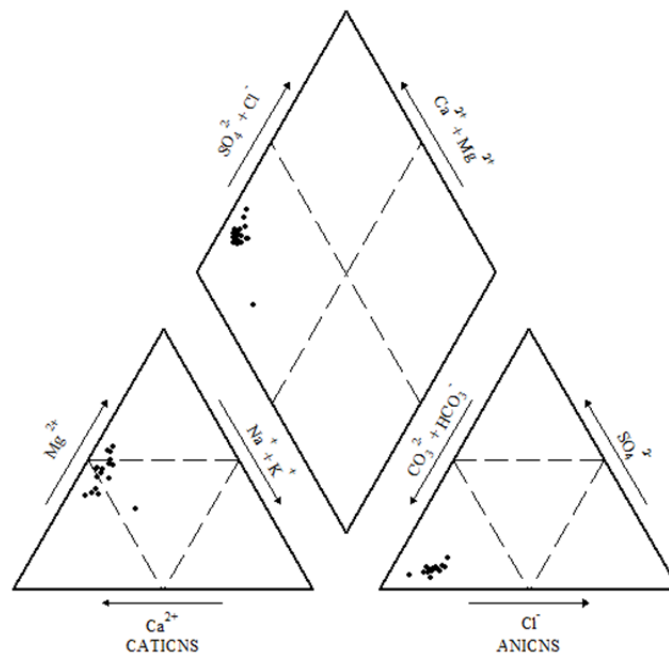
گام بعدی در این پژوهش، بررسی وضعیت فیزیکوشیمیایی آبخوان مناطق کارستی شناسایی شده در مرحله قبلی، در محدوده مورد مطالعه است؛ زیرا یکی از روش های شناسایی رفتارهای آبخوان های کارستی، تجزیه و تحلیل پارامترهای انحلالی است. با توجه به نوع سنگ های دربرگیرنده و مدت زمان تعامل آب با این سنگ ها، به همراه سایر عوامل محیطی مانند نوع و مدت بارش، پوشش گیاهی، توپوگرافی، کانی های موجود در سنگ دربرگیرنده، میزان شکستگی ها و حتی نوع تخلخل، تکامل ژئوشیمیایی آب های کارستی اتفاق می افتد. کیفیت و به عبارتی تغییرات ژئوشیمیایی آب های کارستی، از لحظه ورود آب های متوریککی به آبخوان های کارستی شروع شده و تا لحظه خروج از آن ادامه دارد؛ زیرا در طول این مسیر، واکنش های شیمیایی متعدد و پیوسته ای بین سنگ ها و رسوبات سازنده آبخوان های کارستی و محتویات آن رخ داده و یون های زیادی جابجا می گردند (۱۴ و ۲۱).

موجود بی کربنات کلسیک - منیزیک می باشد (شکل ۸).  $SO_4^{2-}$  بوده (جدول ۲) و بر اساس آن تیپ آب چشمه‌های

جدول ۲. پارامترهای شیمیایی و فیزیکی آب چشمه‌های مناطق کارستی

Table 2. Chemical and physical parameters of karst springs

TDS mg l	TH mg l l	Ec	Mg	Ca	K	Na	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Q_lit_sec	
۲۷۷/۴	۱۳۵	۳۲۶	۰/۸	۱/۹	۰/۰۲	۰/۲	۲/۲	۰/۲	۰/۲	۳	کمترین
۵۶۱/۲	۲۵۵	۵۹۳	۱/۹	۳/۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۶	۰/۴	۲۵	بیشترین
۴۳۸/۷	۲۰۳/۳	۴۶۳/۸	۱/۵	۲/۶	۰	۰/۴	۳/۷	۰/۴	۰/۳	۸/۶	میانگین
۸۳/۴	۳۶/۰۶	۸۰/۹۷	۰/۲۹	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱	۰/۰۶	۵/۹۷	انحراف معیار
۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۶۹	ضریب تغییرات
۲۸۳/۸	۱۲۰	۲۶۷	۱/۱	۱/۸	۰	۰/۵	۲/۶	۰/۴	۰/۲	۲۲	دامنه تغییرات
۴۵۵/۱	۲۰۷/۵	۴۶۷	۱/۵	۲/۴۵	۰/۰۴	۰/۴	۳/۸۵	۰/۴	۰/۳	۶/۵	میانه
-۰/۷۵	-۰/۷۵	-۰/۶۷	-۰/۸	-۰/۰۹	-۱/۰۷	۰/۶۲	-۰/۳۹	-۰/۴۱	۰/۳۱	-۰/۱۰	چولیدگی
۶۹۷/۰۸۸	۱۳۰۰	۶۵۵۵/۴۸	۰/۰۹	۰/۳۲	۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۳۵/۷	واریانس
-۰/۳۶	-۰/۲۲	-۰/۱۱	-۰/۵۹	۰/۴۲	۰/۱۲	۰/۲۷	-۰/۴۴	۰/۲۴	۰/۰۹	۱/۵۹	کج شدگی



شکل ۸. نمودار پایپر آب چشمه‌های مناطق کارستی

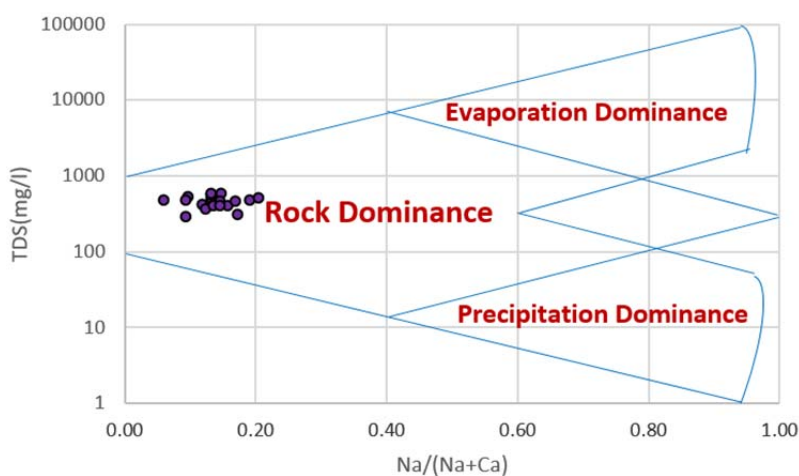
Fig. 8. Piper diagram of karst springs

شیمیایی محلول در آب، از دو نمودار با نسبت وزنی  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  و  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  در مقابل کل مواد جامد محلول (TDS) استفاده می‌گردد. دلیل انتخاب این نسبت وزنی، تبادل کاتیونی یون سدیم و کلسیم نسبت به شرایط گوناگون محیطی بوده و در چنین شرایطی، مقدار TDS تغییر چندانی

نمودارهای گیس، از جمله نمودارهای پر کاربرد در تعیین مکانیسم‌های کنترل‌کننده شیمی و بررسی ژنز شیمیایی آب زیرزمینی است. چراکه، شیمی آب و تکامل آن، توسط واکنش سنگ‌ها با آب زیرزمینی، تبخیر و بارش‌های جوی، کنترل می‌شوند (۱۱ و ۱۴). بدین منظور، برای تعیین منشأ مواد

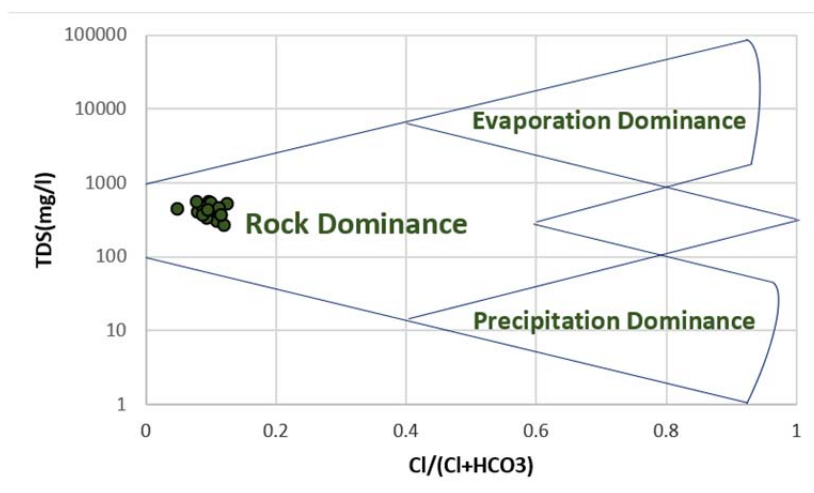
جزء نمودارها بالا باشد تبخیر و در ادامه آب‌های شور، کنترل‌کننده شیمی آب منطقه بوده‌اند. بر اساس نمودار گیپس تهیه‌شده از آب چشمه‌ها در محدوده مورد مطالعه (شکل‌های ۹ و ۱۰)، تقریباً آب همه چشمه‌ها در محدوده  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  و  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  پایین و میزان TDS بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر قرار گرفته‌اند و به عبارتی نقش سنگ‌های دربرگیرنده، بیشتر از سایر عوامل بوده و با تبادل یونی سنگ‌های دربرگیرنده‌اش توأم می‌باشد.

ندارد، زیرا مقادیر وزنی دو مول سدیم (۴۶ میلی‌گرم در لیتر) با یک مول کلسیم (۴۰ میلی‌گرم در لیتر) برای اثرگذاری بر TDS بسیار به هم نزدیک هستند (۱۱ و ۳۲). در این نمودارها، اگر میزان  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  و  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  بالا و مقدار TDS کم باشد، بارش بیشترین تأثیر را بر شیمی آب در منطقه را داشته است. چنانچه مقدار  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  و  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  پایین و میزان TDS بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشد، هوازگی سنگ‌ها و درنهایت اگر هر دو



شکل ۹. نمودار گیپس بر اساس  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  و TDS

Fig. 9. Gypsum diagram based on  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  and TDS



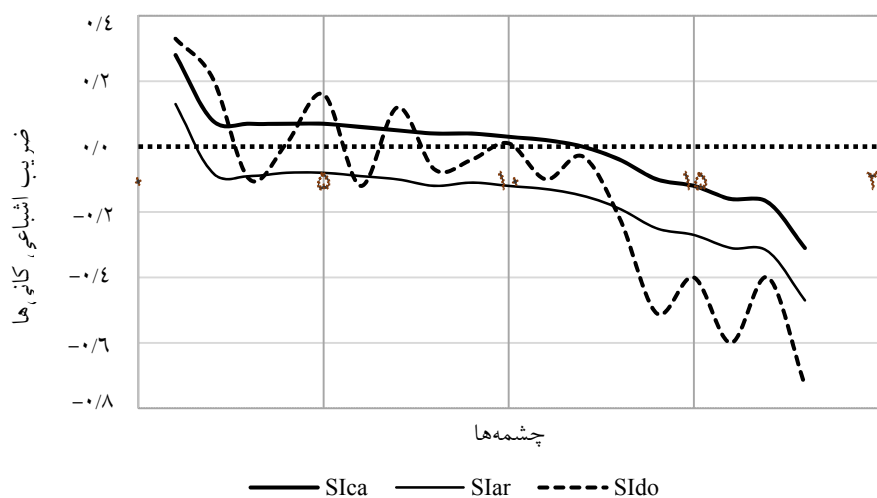
شکل ۱۰. نمودار گیپس بر اساس  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  و TDS

Fig. 10. Diagram based Arch  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$  and TDS



برای محاسبه شاخص‌های اشباعی در آب چشمه‌های محدودده مورد مطالعه از نرم‌افزار PHREE QC 2.6 بهره گرفته شده و شاخص‌های اشباعی کلسیت ( $SI_{Ca}$ )، آراگونیت ( $SI_{Ar}$ )، دولومیت ( $SI_{Do}$ )، انیدریت ( $SI_{An}$ )، ژپس ( $SI_{Gy}$ ) و هالیت ( $SI_{Ha}$ ) به صورت شکل ۱۱ و جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس این شاخص، می‌توان میزان فعل و انفعالات شیمیایی سیال و سنگ‌های دربرگیرنده آن مشخص نمود. بر اساس شرایط فیزیکوشیمیایی محیط، هر چه میزان انحلال و به عبارتی واکنش سیال و محیط پیرامون آن بیشتر باشد، میزان این شاخص بیشتر خواهد بود. در محدوده مورد مطالعه، به سبب وجود سنگ‌های آهکی، شاخص‌های اشباعی کانی‌های کربناته به ویژه کلسیت، می‌تواند شرایط فیزیکوشیمیایی محیط آبخوان را نشان دهد.

از دیگر معیارهای ارزیابی تکامل هیدروشیمیایی و همچنین درجه تعادل بین کانی و آب در مناطق کارستی، تعیین شاخص‌های اشباعی کانی‌هایی نظیر کلسیت، آراگونیت، دولومیت، انیدریت، ژپس و هالیت می‌باشد. این شاخص، نه تنها وضعیت انحلال و رسوب‌گذاری یک کانی خاص را نشان می‌دهد، بلکه، می‌توان سیستم کلی جریان آب در آبخوان‌های کارستی را نیز مشخص نمود (۶)؛ زیرا در چنین شرایطی، هرچند عواملی مانند تبخیر، انحلال نامتجانس، تغییرات سریع دمایی و خروج گاز کربن دی‌اکسید می‌تواند بر تغییرات اشباعی کانی‌ها اثرگذار باشد، ولی میزان در دسترس بودن کانی‌ها و زمان ماندگاری آب در آبخوان، دارای اهمیت بالاتری است. قابل ذکر است که سیستم کلی جریان در آبخوان‌های کارستی کربناته، به دو گروه جریان مجرای ( $Conduit\ flow$ ) و افشان ( $Diffuse\ flow$ ) تقسیم‌بندی می‌گردند (۳۴ و ۳۵).



شکل ۱۱. نمودار ضرایب اشباعی کانی‌ها در آب چشمه‌های انتخاب شده. ضرایب اشباعی آب بیشتر چشمه‌ها در محدوده صفر و بالاتر از صفر بوده و بیانگر وجود شرایط کافی برای انجام واکنش‌های شیمیایی سیال و سنگ‌های پیرامون آن است.

Fig. 11. Diagram of saturation coefficients of minerals in the water of selected springs. Water saturation coefficients of most springs are in the range of zero and above zero and indicate the existence of sufficient conditions for chemical reactions of fluid and surrounding rocks.

جدول ۳. جدول ضرایب اشباعی کانی‌ها در آب چشمه‌های انتخاب شده

Table 3. Table of saturation coefficients of minerals in the water of selected springs

چشمه	SI <sub>ca</sub>	SI <sub>ar</sub>	SI <sub>do</sub>	SI <sub>an</sub>	SI <sub>gy</sub>	SI <sub>ha</sub>
SP1	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۳۳	-۷/۸۷	-۷/۵۱	-۱۰/۶۶
SP2	۰/۰۸	-۰/۰۸	۰/۲۱	-۸/۱۳	-۷/۷۵	-۱۱/۰۸
SP3	۰/۰۷	-۰/۰۹	-۰/۱۰	-۸/۱۴	-۷/۷۷	-۱۱/۶۶
SP4	۰/۰۷	-۰/۰۸	۰/۰۱	-۸/۲۸	-۷/۹۲	-۱۱/۵۶
SP5	۰/۰۷	-۰/۰۸	۰/۱۶	-۸/۱۹	-۷/۸	-۱۱/۹۳
SP6	۰/۰۶	-۰/۰۹	-۰/۱۲	-۸/۰۸	-۷/۷۱	-۱۱/۹۶
SP7	۰/۰۵	-۰/۱۰	۰/۱۲	-۸/۰۵	-۷/۶۹	-۱۱/۷۴
SP8	۰/۰۴	-۰/۱۲	-۰/۰۷	-۷/۹۲	-۷/۵	-۱۲/۲۲
SP9	۰/۰۴	-۰/۱۱	-۰/۰۴	-۸/۲۲	-۷/۸۴	-۱۲/۰۷
SP10	۰/۰۳	-۰/۱۲	۰/۰۱	-۸/۱۴	-۷/۷۷	-۱۱/۸۳
SP11	۰/۰۲	-۰/۱۳	-۰/۱	-۷/۹۸	-۷/۶۲	-۱۱/۶۴
SP12	۰/۰۰	-۰/۱۵	-۰/۰۳	۸/۰۸	-۷/۷	-۱۱/۸۲
SP13	-۰/۰۴	-۰/۱۹	-۰/۲۲	۸/۱۱	-۷/۷۴	-۱۱/۴۹
SP14	-۰/۱۰	-۰/۲۵	-۰/۵۱	-۸/۳۳	-۷/۹۵	-۱۲/۰۷
SP15	-۰/۱۲	-۰/۲۷	-۰/۴۰	-۸/۱۳	-۷/۷۶	-۱۱/۷۴
SP16	-۰/۱۶	-۰/۳۱	-۰/۶۰	-۸/۰۳	-۷/۶۵	-۱۱/۸۲
SP17	-۰/۱۷	-۰/۳۲	-۰/۴۰	-۸/۲۵	-۷/۸۹	-۱۲/۴۴
SP18	-۰/۳۱	-۰/۴۷	-۰/۷۳	-۸/۱۴	-۷/۷۹	-۱۱/۷۴

### نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به روش‌های گوناگون شناسایی مناطق کارستی به‌عنوان یکی از پدیده‌های مهم زمین‌شناسی و محیطی، استفاده از روش سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به همراه تلفیق منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی می‌تواند یکی از ابزارهای مناسب و مفید بوده و با توجه به دقت، سرعت و کاهش هزینه در فرآیند مطالعه، این روش می‌تواند جایگاه مناسبی داشته باشد. از طرفی، می‌توان با تجزیه و تحلیل پارامترهای انحلالی به کمک تهیه نمودارهایی مانند پایپر، گیبس و محاسبه ضرایب اشباعی کانی‌های با ضریب انحلالی نسبتاً بالا، منشأ مواد شیمیایی محلول در آب و سیستم کلی جریان در آبخوان‌های کارستی تعیین نمود. برخی از نتایج حاصل از این مطالعه عبارت‌اند از؛ بیشترین توسعه‌یافتگی پدیده کارست تابع خطواره شکستگی‌ها است در سازند آهکی الیکا با سن تریاس، در قسمت مرکزی مورد مطالعه رخ داده

است. بر اساس بازدیدهای میدانی، عملگر توافقی (Compromise operator) در حالتی که  $\lambda$  بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ باشد، در تلفیق لایه‌های فازی شده، دارای بهترین و مناسب‌ترین خروجی است. در این محدوده که دارای تنوع بالایی از پوشش جنگلی و مرتعی با کاربری‌های متعدد بوده، استخراج خطواره‌ها بایستی به سه روش دستی، اتوماتیک و نیمه اتوماتیک صورت بگیرد و همچنین تنها استفاده از تصاویر لندست مناسب نبوده و از DEM نیز بایستی در استخراج خطواره‌ها بهره جست. استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی در مطالعه کارست می‌تواند منجر به نتایج قابل قبولی شده که بر اساس بازدیدهای میدانی این نتایج به واقعیت نزدیک‌تر است. استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در مطالعات کارست در این محدوده با توجه به سرعت، دقت و دسترسی آسان به داده‌ها مقرون به‌صرفه‌تر بوده و با توجه به وجود محدوده‌های وسیعی از عرصه‌ها با شرایط

دارد. هرچند حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد از این چشمه‌ها، تحت اشباع از این کانی‌ها بوده و به عبارتی زمان ماندگاری کمتری دارند. با توجه به ضرایب اشباعی کانی‌های کلسیت، آراگونیت و دولومیت، سیستم کلی جریان در آبخوان‌های کارستی منطقه، به صورت جریان افشان (Diffuse Flow) و جریان افشان-مجریایی است.

#### تقدیر و تشکر

از آزمایشگاه پیشرفته سنجش‌ازدور و GIS دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی به جهت همکاری‌های آزمایشگاهی، نرم‌افزاری و داده کمال تشکر را داریم.

محیطی نسبتاً مشابه این محدوده، لزوم استفاده از این روش را بیشتر می‌نماید. بر اساس نمودار گیبس، کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، متأثر از واکنش آب با سنگ میزبان است. تیپ آب چشمه‌ها بی‌کربنات کلسیک-منیزیک بوده و فراوان‌ترین آنیون و کاتیون به ترتیب،  $\text{HCO}_3^-$  و  $\text{Ca}^{2+}$  است. همچنین فراوانی کاتیون‌ها به صورت  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$  و فراوانی آنیون‌ها به صورت  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$  است. با توجه به وضعیت ضریب اشباع کانی‌های کلسیت، دولومیت و آراگونیت، سرعت حرکت آب در آبخوان کم بوده و به عبارتی مدت‌زمان ماندگاری آن‌ها کمی بالا است و در چنین شرایطی، فرصت کافی برای انجام واکنش بین فاز جامد و مایع وجود

#### References

1. Aganbati SA. 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran. First edition. 640 p. (In Persian).
2. Alavi M. 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103(8): 983-992. doi:https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2.
3. Alonso-Contes CA. 2011. Lineament mapping for groundwater exploration using remotely sensed imagery in a karst terrain: Rio Tanama and Rio de Arecibo basins in the northern karst of Puerto Rico. Michigan Technological University. doi:https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etsd/309.
4. Asadzadeh S, de Souza Filho CR. 2016. A review on spectral processing methods for geological remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 47: 69-90. doi:https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.004.
5. Balıka F, Alkışa A, Alkış YKZ. 2004. Validation of radargrammetric DEM generation from radarsat images in high relief areas in Edremit region of Turkey. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(Part XXX).
6. Birk S, Liedl R, Sauter M. 2004. Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany). Journal of Hydrology, 286(1): 179-193. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.007.
7. Bonham-Carter GF, Bonham-Carter G. 1994. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. vol 13. Elsevier. 398 p.
8. Dafny E, Tawfeeq KJ, Ghabraie K. 2015. Evaluating temporal changes in hydraulic conductivities near karst-terrain dams: Dokan Dam (Kurdistan-Iraq). Journal of Hydrology, 529: 265-275. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.048.
9. Daoxian Y. 1997. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect. Quaternary International, 37: 105-113. doi:https://doi.org/10.1016/1040-6182(96)00012-2.
10. Demicco RV, Klir GJ. 2003. Fuzzy logic in geology. Elsevier. 347 p.
11. Drever JI. 1988. The geochemistry of natural waters, vol 437. Prentice hall Englewood Cliffs. 436 p.
12. Ebrahimi O, Ahmadi M, Shahabi H, Asgari S. 2018. Evaluation of karst features using principal component analysis (PCA): a case from Zarneh and Kergan, Western Iran. Carbonates and Evaporites, 33(4): 625-635. doi:https://doi.org/10.1007/s13146-017-0373-2.
13. Elez J, Cuezva S, Fernandez-Cortes A, Garcia-Anton E, Benavente D, Cañaveras JC, Sanchez-Moral S. 2013. A GIS-based methodology to quantitatively define an Adjacent Protected Area in a shallow karst cavity: The case of Altamira cave. Journal of Environmental Management, 118: 122-134. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.020.
14. Gibbs RJ. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170(3962): 1088-1090.
15. Ho P-G. 2009. Geoscience and remote sensing. BoD-Books on Demand, 610 p.

16. Kaufmann G, Romanov D. 2016. Structure and evolution of collapse sinkholes: Combined interpretation from physico-chemical modelling and geophysical field work. *Journal of Hydrology*, 540: 688-698. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.050>.
17. Khanlari G, Momeni AA. 2012. Geomorphology, hydrogeology and the study of factors affecting to karst development in Garin area, west of Iran. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 2(3): 61 -73. (In Persian).
18. Koike K, Nagano S, Ohmi M. 1995. Lineament analysis of satellite images using a Segment Tracing Algorithm (STA). *Computers & Geosciences*, 21(9): 1091-1104. doi:[https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00042-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00042-7).
19. Kresic N. 1995. Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric karst. *Remote Sensing of Environment*, 53(2): 85-90. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00042-Y](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00042-Y).
20. Litwin L, Andreychouk V. 2008. Characteristics of high-mountain karst based on GIS and Remote Sensing. *Environmental Geology*, 54(5): 979-994. doi:<https://doi.org/10.1007/s00254-007-0893-5>.
21. Liu F, Song X-f, Yang L, Zhang Y, Han D, Ma Y, Bu H. 2015. Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, Northwestern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1): 551-565. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-19-551-2015>.
22. Malczewski J. 2000. On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, 4(1): 5-22. doi:<https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>.
23. Meijerink AM, Bannert D, Batelaan O, Lubczynski M, Pointet T. 2007. Remote sensing applications to groundwater, vol 16. Unesco Paris, 312 p.
24. Mohammadi Z, Alijani F, Rangzan K. 2014. DEFLOGIC: a method for assessment of groundwater potential in karst terrains: Gurpi Anticline, southwest Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(9): 3639-3655. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-013-0958-6>.
25. Mohammadizad R, Arfania R. 2017. Advanced investigation of remote sensing to geological mapping of Zefreh region in central Iran. *Open Journal of Geology*, 7(10): 1509. doi:<https://doi.org/10.4236/ojg.2017.710101>.
26. O'Driscoll MA, DeWalle DR. 2006. Stream-air temperature relations to classify stream-ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology*, 329(1): 140-153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.010>.
27. Pei J, Wang L, Huang N, Geng J, Cao J, Niu Z. 2018. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for estimating exposed bedrock fractions in typical karst regions of Southwest China using a karst bare-rock index. *Remote Sensing*, 10(9): 1321. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10091321>.
28. Pirasteh S. 2006. The role of lineaments in karstification-Pabdeh anticline Zagros Fold Belt: an application of remote sensing and geographic information system. *Geographical Journal of Territory (Sarzamin)*, 3(11): 51-68. (In Persian).
29. Saaty TL. 2001. Fundamentals of the analytic hierarchy process. In: *The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making*. Springer, pp 15-35.
30. Shahmoradi S, Ghafarian Malamiri HR, Amini M. 2021. Extraction of soil moisture index (TVDI) using a scatter diagram temperature/vegetation and MODIS images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(1): 38-62. doi:<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.1.2.1.3.4>. (In Persian).
31. Shuster ET, White WB. 1971. Seasonal fluctuations in the chemistry of lime-stone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 14(2): 93-128. doi:[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90001-1).
32. Srivastava PK, Mukherjee S, Gupta M, Islam T. 2014. Remote sensing applications in environmental research. Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-05906-8>.
33. Su YH, Zhu GF, Feng Q, Li ZZ, Zhang FP. 2009. Environmental isotopic and hydrochemical study of groundwater in the Ejina Basin, northwest China. *Environmental Geology*, 58(3): 601-614. doi:<https://doi.org/10.1007/s00254-008-1534-3>.
34. Uromeihy A. 2000. The Lar Dam; an example of infrastructural development in a geologically active karstic region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(1): 25-31. doi:[https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(99\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00026-7).
35. Xing L, Guo H, Zhan Y. 2013. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70-71: 250-264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.03.017>.
36. Yu L, Porwal A, Holden E-J, Dentith MC. 2012. Towards automatic lithological classification from remote sensing data using support vector machines. *Computers & Geosciences*, 45: 229-239. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.019>.



## Identification of karst areas using Remote sensing and GIS method and its expansion in Zalem-Rud sub-basin of Sari in Mazandaran, Iran

Mohammad Ali Gholi Nataj Malekshah, Seyed Ramzan Mousavi, Davood Jahani, Nader Kohansal Ghadimvand, Seyed Hamid Vaziri

Received: 7 May 2021 / Received in revised form 1 August 2021 / Accepted: 26 August 2021  
Available online 26 August 2021 / Available print 23 September 2022

### Abstract

**Background and Objective** Karst is a composite image of all the roughness, shapes, pores, and phenomena caused by water corrosion, above and below the surface, in various soluble geological formations, which cover about 15% of the world's exposed rocks. Despite the importance of karst areas in the past, today, the study, identification, spatial analysis and management of these areas are of very interest to geologists, hydrologists, hydrogeologists, eco-tourists, geotourists and environmentalists at various scales. Karst phenomenon also has a special

place in various dimensions from the point of view of geology and geomorphology, because the causes and methods of dissolution processes and forms and their extension in rocks and minerals are of great importance to East Mazandaran, especially in the study area, is geologically one of the areas with karst process potential and has been less studied due to environmental conditions, especially vegetation and access roads. This study is focused on identifying karst areas and their extent using RS and GIS method in the Zalem-Rud Sari basin in Mazandaran province in northern Iran. In order to identify karst areas and physicochemical characteristics of existing aquifers, it was first necessary to identify karst areas and then assess their physicochemical status. In the first step, using Landsat, ASTER and SRTM satellite data, geological maps, weather information and field visits, factors affecting karstification such as rock types, Fracture lineaments, vegetation, climate, condition of the drainages and the slope of the topography are extracted. It should be noted that in this step, to obtain a better result, fuzzy logic and Hierarchical Analysis Process have been used. In the second step, in order to investigate the physicochemical condition of the aquifer, the chemical parameters of some springs are analyzed and the dissolution parameters, saturation indices, the origin of water-soluble components and the general flow system in the existing aquifers are determined.

M. A. Gholi Nataj Malekshah<sup>1</sup>, S. R. Mousavi<sup>(✉)</sup><sup>2</sup>, D. Jahani<sup>3</sup>, N. Kohansal Ghadimvand<sup>4</sup>, S. H. Vaziri<sup>5</sup>

1. PhD. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran
2. Assistant Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran
3. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran
4. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran
5. Professor of Department of Geology, Faculty of Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran

e-mail: [srmmousavi@sanru.ac.ir](mailto:srmmousavi@sanru.ac.ir)

<https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.684338>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1401.13.3.4.6>

**Materials and Methods** In this study, the composition and distribution of rock, based on field visits and georeferenced geological maps of one hundred thousandths of Behshahr and Sari, have been done. Three methods of manual, automatic and semi-automatic have been used to extract the lineaments due to fractures. In the manual method, the lineaments are highlighted and extracted by applying High Pass filters, PCA and the color combination of Landsat 8 satellite data. In the automatic method, the Segment Tracing Algorithm (STA) in PCI software is used. In the STA algorithm, linear pixels are identified based on the degree of gray difference and then converted to vectors based on RADI, GTHR, LTHR, FTHR, ATHR and DTHR parameters. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to detect and extract vegetation status on OLI sensor data from the Landsat 8 satellite. To generate DEM, photogrammetric techniques were performed on a pair of stereo images of ASTER sensor in Idrisi software based on parametric variables of external and external orientations and ground control points (GCPs). The topographic slope of the area has been calculated by DEM and based on the degree in GIS and its map has been prepared. Based on the weather data of the General Meteorological Department of Mazandaran Province, the weather condition is determined by the isothermal, isohyetal and isoevaporation curves and the type of weather is determined by the De Marton method.

**Results and Discussion** The result of the above activities has been the production of lithological maps, density and distance from fracture lineaments, density and distance from drainages, topographic slope, rainfall and vegetation. Due to the different criteria used in the generated maps and the need for a single, comparable and proportionate criteria for combining information layers, fuzzy logic has been used. In this case, all layers, except lithology, which has a definite boundary and is a function of Boolean logic, are fuzzy

and then extracted as fuzzy layers in GIS. On the other hand, because the weight and effectiveness of the eight factors affecting the occurrence of the karst phenomenon are not the same, the Hierarchical Analysis (AHP) method has been used to determine the preference and prioritization of these factors. And the participation rate, in other words, the weight of each criterion with an incompatibility coefficient of less than one percent has been calculated in Expert Choice 12 software. Finally, by the weighted linear combination (WLC) method, fuzzy raster layers based on their effective weight are combined with Compromise Operator or Gamma and the karst distribution map is extracted with different probability coefficients in the study area. In the next step, in order to investigate the physicochemical status of the aquifers and evaluate the karst phenomenon, 18 springs with equal flow and more than three litres per second were selected and evaluated using SPPS, RockWorks2016 and PHREEQC2.6 software. In addition to extracting hydrogeochemical tables and graphs, the saturation index of various minerals has also been calculated.

**Conclusion** The results of this study show that the karst phenomenon has the most spread in the central part and the lineaments resulting from fractures have played the most role in the formation of this phenomenon. The water type of these springs is calcium-magnesium bicarbonate and according to the Gibbs diagram, the role of aquifer rocks in determining the chemical composition of water is very clear. Also, the saturation indices of minerals and the type of flow in groundwater reservoirs are diffuse and diffuse-duct flows. To this research, the use of new remote sensing technology and GIS increases accuracy and speed and reduces costs in karst studies.

**Keywords:** Karst, Hydro-geochemistry, Remote sensing, GIS, Fuzzy Logic, Zalem-Rud sub-basin, Mazandaran