

پهنه بندی خطر شکل گیری فروچاله های گچی در سازند گچساران با استفاده از مدل فازی (مطالعه موردی: دشت جابر بدره ایلام)

حمیده غلام حیدری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان
مژگان انتظاری* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان
حاجی کریمی - استاد گروه کشاورزی دانشگاه ایلام

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

چکیده

سازندهای دارای لایه گچی زمینه ساز تشکیل اشکال کارستی گچی است. دشت جابر، در شمال غربی استان ایلام، در واحد زاگرس چین خورده واقع شده است. سازند گچساران به سبب شرایطی که در گذشته پشت سر گذاشته عمدتاً در ناودیس ها قرار دارد. وجود پدیده های کارستی گچی به شکل فروچاله در این دشت، می تواند تأثیر بسیار مخربی بر جاده ها و تأسیساتی که در مجاورت این لایه ها قرار دارند بگذارد. در این پژوهش نقشه پهنه بندی تکامل کارست با استفاده از مدل فازی تهیه شده که جهت تهیه این نقشه از ده عامل محیطی شامل شیب، وجه شیب، زمین شناسی، فاصله از خط کنیک، نقاط تمرکز جریان دامنه ای، فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، پارامتر اقلیم با استفاده از روش دمارتن، و شاخص پوشش گیاهی استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد ۳۶/۹ درصد منطقه مورد مطالعه در محدوده ریسک بالا، ۴۹ درصد در محدوده ریسک متوسط، و ۱۴/۱ درصد در محدوده ریسک پایین قرار دارد. بازدهی های میدانی نشان می دهد مهم ترین عوامل مؤثر در تکامل کارست این منطقه شیب و محل تلاقی خطوط آبراهه ها در دامنه با لایه های گچ خالص ضخیم لایه است و محل تلاقی لایه های گچ در مجاورت خط کنیک یکی از عوامل زمینه ساز و مهم در جهت شکل گیری این فروچاله ها محسوب می شود.

واژگان کلیدی پهنه بندی، دشت جابر، فروچاله، کارست گچی، مدل فازی.

مقدمه

واژه کارست به مجموعه ای از فرایندهای زمین شناسی و پدیده های حاصل از انحلال سنگ های انحلال پذیر گفته می شود که با تجزیه و تخریب ساختمان این سنگ ها رژیم آب شناختی بی همتایی شکل می گیرد و به تشکیل لندفرم های ویژه ای می انجامد (وزارت نیرو (تماب)، ۱۳۷۳). پدیده های کارستی در سازندها و لایه های انحلال پذیر در آب از قبیل آهک، نمک، و سنگ های گچی (سولفات ها) شکل می گیرد که البته تمرکز این پژوهش بر روی سازندهای گچی است. میان ژئومورفولوژی کارست و تکامل آن ارتباط نزدیکی وجود دارد، به طوری که فراوانی و گسترش پدیده های مورفولوژی کارست نشان دهنده گسترش کارست در ناحیه است (کریمی، ۱۳۹۰). به عبارت دیگر، می توان گفت وجود یا فقدان هر یک از اشکال کارستی در یک منطقه می تواند راهنمایی برای شناخت بهتر و بیشتر سیستم کارستی منطقه باشد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۵). عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست به سه دسته فیزیکی، شیمیایی، و وضعیت

هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌شود. آب داخل درز و شکاف سنگ‌های قابل انحلال مثل کربنات کلسیم نفوذ می‌کند و موجب توسعه درز و شکاف‌ها می‌شود و اشکال کارستی را پدید می‌آورد (مول و همکاران: ۱۹۸۸). کارست گچی، به‌رغم رخداد گسترده و اهمیت وابسته به آن، از لحاظ کاربردی (مخاطرات، اثرات، و منابع) کمتر مورد توجه قرار گرفته است (کلیمچاک و همکاران، ۱۹۹۶). عوارض کارست گچی می‌تواند منشأ مشکلات و مسائل متعددی مانند فرونشست و شکل‌گیری ناگهانی فروچاله‌ها باشد و شناسایی و مطالعه آن‌ها برای احداث و نگهداری سازه‌های مختلف، به‌خصوص سازه‌های هیدرولیکی و همچنین مدیریت پایدار آب، حائز اهمیت است (کوپر و گوتیرز، ۲۰۱۳). از مدل‌های متعددی از جمله مدل سلسله‌مراتبی AHP، فازی، و رگرسیون خطی چندمتغیره تاکنون در زمینه پهنه‌بندی تحول و تکامل کارست استفاده شده است.

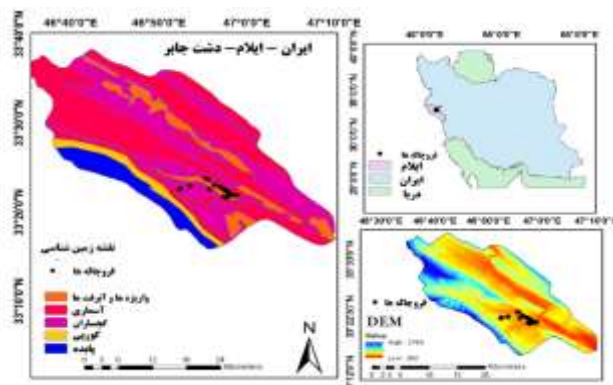
مکرم و نگهبان (۱۳۹۸) با استفاده از مدل فازی و سلسله‌مراتبی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن در جنوب شهرستان کازرون را شناسایی کرده‌اند. در این مطالعه، برای تعیین مناطق مستعد کارستی از نقشه‌های زمین‌شناسی، فاصله از گسل، بارش، ارتفاع، دما، فاصله از رودخانه و شیب استفاده شده است. طبق نتایج حاصل‌شده در این پژوهش، عوامل لیتولوژیک، اقلیم، و مورفولوژیک مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در میزان کارست‌زایی در این منطقه محسوب می‌شوند و طبق نظر نویسندگان این پژوهش مدل فازی دقت لازم برای بررسی میزان پتانسیل کارست‌زایی را داراست. محمدیان و همکاران (۱۳۹۴)، پس از بررسی انحلال‌پذیری سنگ‌های گچی (ژیپس) سازند گچساران و اثرات زیست‌محیطی آن در شرق خوزستان، فراوانی ساختارها (درزه‌ها و گسل‌ها) و عملکرد آب زیرزمینی را از عوامل اصلی تشکیل کارست در منطقه می‌دانند. هیبت و هو چاو (۲۰۱۹) فروچاله‌ها را یکی از تهدیدهای مهم تأسیسات شهری دانستند و یکی از عواملی که می‌تواند به‌راحتی فروچاله‌ها را در این مناطق گسترش دهد نشت لوله‌های زیرزمینی مناطق مسکونی است. رجبی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل فازی توده کارستی شیرز را بررسی کردند و با استفاده از لایه‌های زمین‌شناسی، طبقات ارتفاعی، فاصله از گسل، شیب، وجه شیب، بارش، دما و پوشش گیاهی، با بررسی شرایط هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک نقشه مناطق دارای پتانسیل، توسعه کارست را تهیه کردند. مرادی و همکاران (۲۰۱۶) نیز نقشه پتانسیل تحول و تکامل کارست را با استفاده از مدل‌های فازی و AHP در شمال خوزستان تهیه کردند. آن‌ها عامل تکتونیک را مؤثرترین عامل در تکامل کارست این منطقه می‌دانند. انتظاری و آقایی‌پور (۲۰۱۸) در یک مطالعه بر روی توده پراو و بیستون با استفاده از مدل آنتروپی و بررسی پدیده‌های کارستی مانند سینک هول‌ها، اووالاها، و غارها و همچنین شرایط هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک، ۳۹ درصد توده مورد مطالعه را دارای پتانسیل بالا و بسیار بالای تکامل کارستی دانستند. همچنین، بیان کردند که تعداد زیاد چشمه‌های کارستی نیز نشان‌دهنده تحول بالای کارست در این منطقه است. صفاری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از منطق فازی به بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین پرداختند و از لایه‌های سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، بارش و دما، شیب، ارتفاع جهت شیب، شیب و پوشش گیاهی استفاده کردند و با استفاده از تابع گامای ۰/۹ منطقه را به چهار بخش فاقد کارست (واقع در محدوده رسوبات عهد حاضر)، طبقه با توسعه کارست کم (آهک‌های کرمی با میان‌لایه مارنی)، طبقه با توسعه کارست متوسط (آهک بیستون و میان‌لایه‌های مارنی)، و طبقه با توسعه کارست زیاد (مرتفع‌ترین بخش آهک بیستون) تقسیم کردند. صفاری و همکاران (۱۳۹۵) در مقاله مروری بر خصوصیات لندفرم‌های کارستی در لایه‌های گچی برآند که، با توجه به سرعت انحلال بالای گچ در توسعه عوارض کارستی گچی، باید به جای استفاده از مقیاس زمانی زمین‌شناسی از مقیاس زمانی انسانی استفاده کرد. طبق نظر نویسندگان در زمانی اندک در اثر عوامل انسانی از جمله آبیاری، برداشت

آب، آبیگری سدها، یا حتی تغییر اقلیم به سرعت می‌توان زمینه‌ای برای ایجاد فروچاله‌ها ایجاد کرد. در پژوهش شو و همکاران (۲۰۲۰)، که بر روی فروچاله‌های گچی انجام شده است، این نتیجه حاصل شد که مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌گیری کارست گچی، توپوگرافی، تکتونیک و سطح آب زیرزمینی، و همچنین فعالیت‌های انسان است. در این پژوهش سعی شده است نتایج حاصل از دو مدل با مطالعات میدانی تطبیق داده شود تا مناسب‌ترین مدل در این ارتباط مشخص شود. نتیجه حاصل از این پژوهش نشان داد مدل AHP مدل مناسب‌تری است و نتایج حاصل از آن با نتیجه حاصل از مطالعات میدانی مطابقت دارد. حیدری و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی فروچاله‌های آهکی دشت کرمانشاه پارامترهایی مانند تغییرات در سیستم درز و شکاف، میزان بارش، دما، شیب، توپوگرافی را عوامل مؤثر در گسترش و توسعه کارست سطحی می‌دانند. طبق نظر نویسندگان این پژوهش، عامل شیب زیاد عاملی محدودکننده در توسعه کارست است. با بررسی پیشینه مطالعات انجام‌شده بر روی میزان پتانسیل کارست‌زایی در مناطق مختلف دو نکته قابل توجه است: نکته اول اینکه در مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است به میزان پتانسیل کارست‌زایی لایه‌های گچی و برخلاف میزان اهمیت آن کمتر توجه شده است؛ نکته دوم اینکه عوامل ایجادکننده کارست آهکی با عواملی که بر روی کارست گچی مؤثر است بسیار متفاوت است، زیرا به طور کلی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های گچی و محل قرارگیری آن‌ها با آهک متفاوت بوده و بنابراین آنچه در روند شکل‌گیری این دو پدیده آهکی و گچی مؤثر است با یکدیگر منطبق نخواهند بود. در مطالعه کریمی و همکاران (۱۳۹۱)، در این محدوده مطالعاتی، عمده فروچاله‌های گچی شکل‌گرفته در این منطقه از نوع ریزشی تشخیص داده شد و عوامل شکل‌گیری آن‌ها شیب توپوگرافی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق آب زیرزمینی، و فاصله از خط کنیک معرفی شد.

در پژوهش حاضر به دلیل اهمیت سازندهای گچی و پدیده‌های کارستی مرتبط با آن‌ها و مؤثر بودن این پدیده‌ها بر سازه‌های مهم از جمله جاده‌ها و تأسیسات، و همچنین سرعت بالای تشکیل آن‌ها و به تبع آن پتانسیل بالای تحول و تکامل کارست‌های گچی در این منطقه، این محدوده مطالعاتی با استفاده از مدل فازی بررسی شده و پس از بازدیدهای میدانی مدل یادشده نیز بررسی و صحت‌سنجی شده است.

محدوده مورد مطالعه

دشت جابر بدره در طول جغرافیایی $6^{\circ} 46'$ تا $17^{\circ} 47'$ شرقی و عرض جغرافیایی $16^{\circ} 33'$ تا $38^{\circ} 33'$ شمالی در شمال غربی شهر ایلام در استان ایلام قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

متوسط بارندگی دشت جابر در دوره بیست‌ساله ۴۴۰ میلی‌متر است. میانگین دمای محدوده مورد مطالعه ۲۱ درجه سانتی‌گراد است و بر اساس تقسیم‌بندی دمارتون نیز این محدوده در طبقه‌های خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. این محدوده در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده و از دیدگاه ژئومورفولوژیک از رشته‌کوه‌های نسبتاً مرتفع با روند کلی شمال غرب جنوب شرق تشکیل شده است. توالی چینه‌شناسی محدوده مورد بررسی شامل سازندهای گچساران، آسماری، بختیاری، پابده، و گورپی و رسوبات عهد حاضر است. سازند مورد بررسی و با اهمیت در این پژوهش گچساران است که از ژپس، انیدریت، و مارن‌های قرمز تشکیل شده است که به طور هم شیب بر روی سازند آسماری قرار گرفته و ضخامت متوسط و تقریبی آن حداکثر ۱۰۰۰ متر برآورد شده است (کریمی، ۱۳۹۰: ۱۲۷).

مواد و روش‌ها

منطق فازی شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم را، که نیازمند ریاضیات پیشرفته و نسبتاً پیچیده است، با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی یا به عبارتی دانش فرد خبره و با هدف ساده‌سازی و کارآمدشدن طراحی سیستم، جای‌گزین یا تا حد زیادی تکمیل می‌نماید (موسوی و صادقیان، ۱۳۹۵: ۸۲). تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست قطعی و صدصدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب است، زیرا با استفاده از نظریه فازی می‌توان متغیرهای نادقیق و مبهم را به شکل ریاضی درآورد (مؤمنی، ۱۳۸۹: ۱۸۷). در مدل فازی، هر پارامتر هم‌زمان در مجموعه‌های مختلف اما به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر از صفر تا یک را می‌پذیرد (ون آلفن و همکار، ۲۰۰۰: ۱۷۱۰). در تئوری مجموعه‌های دقیق، اگر یک مجموعه را در نظر بگیریم، هر عضو مجموعه مرجع یا در مجموعه هست یا نیست و می‌توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (رابطه ۱) (مؤمنی، ۱۳۸۹: ۱۹۷).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , \text{If } x \in A \\ 0 & , \text{If } x \notin A \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

این تابع به هر عضو مجموعه A عدد یک و به هر عضو خارج از مجموعه A عدد صفر نسبت می‌دهد. روش فازی با پنج عملگر، که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم‌افزار ArcGIS قابل اجراست (کارتر، ۱۹۹۶: ۲۷۰): اجتماع فازی^۱، اشتراک فازی^۲، ضرب فازی^۳، جمع فازی^۴، و گاما^۵. عملگر گاما نقش تعدیلی نسبت به نتیجه جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل و به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. مقدار گاما از طریق قضاوت کارشناسی مبتنی بر نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهده‌شده یا تجربیات موجود درباره موضوع مورد بررسی تعیین یا از طریق آزمون سعی و خطا، در تطبیق با شواهد، واقعی می‌گردد. از این رو، عملگر گاما موجب دستیابی به خروجی‌هایی شده که مناسب‌ترین مقادیر γ را در تطبیق با واقعیت‌ها و در مقایسه با خروجی‌های حاصل از به‌کارگیری سایر عملگرها مشخص می‌نماید. این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس معادله ۲ تعریف می‌شود.

1. Fuzzy OR
2. Fuzzy AND
3. Fuzzy Product
4. Fuzzy SUM
5. Fuzzy Gamma

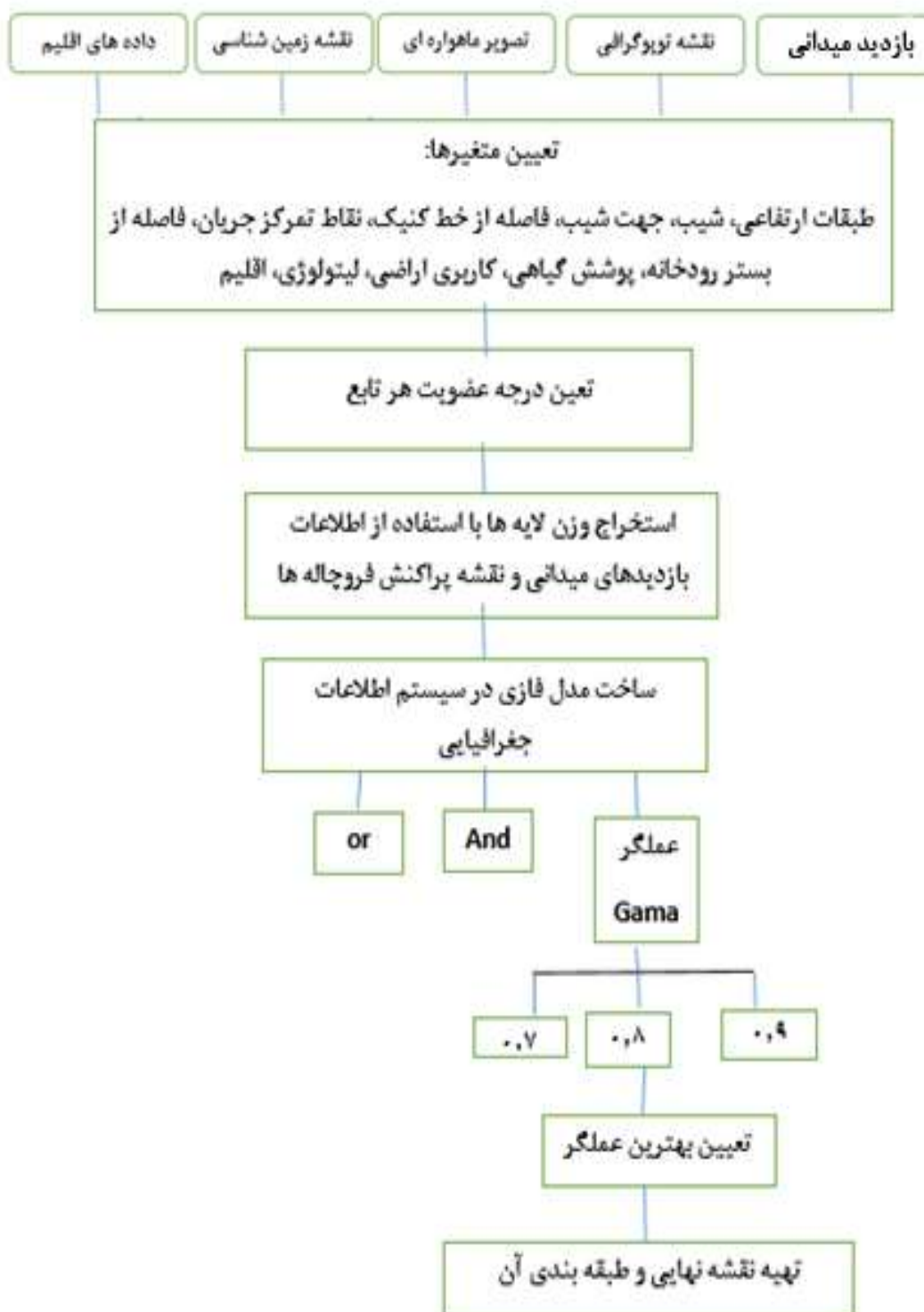
رابطه (۲)

$$\mu_{\text{combination}} = ((\text{Algebraic Sum فازی}) (\text{Algebraic Product فازی}))^{1-\gamma}$$

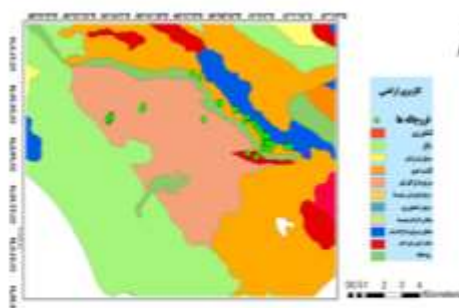
در این رابطه $\mu_{\text{combination}}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γ را برابر ۱ قرار دهیم، ترکیبی که اعمال می‌شود همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب، برابر با ضرب جبری فازی است. مقدار در نظر گرفته شده برای γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهش ضرب جبری فازی سازگاری دارد (کارتر، ۱۹۹۶: ۲۸۰).

به منظور توسعه کارست سطحی، هر یک از پارامترهای مؤثر انتخابی، به عنوان یک مجموعه فازی، توسط تابع عضویتی بیان می‌شوند که این تابع عضویت درجه تعلق اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین ۰ تا ۱ نشان می‌دهد. بنابراین، لازم است تک تک لایه‌ها با توجه به هدف مورد نظر بر اساس توابع عضویت فازی‌سازی شوند. پارامترهای فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، فاصله از خط کنیک، اقلیم، نقاط تمرکز جریان در دامنه‌ها، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، و کاربری اراضی با توجه به ماهیت رستری آن‌ها با استفاده از توابع موجود در نسخه ۱۰٫۳ نرم‌افزار ArcGIS یا کدنویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی‌سازی شدند. تابع عضویت لایه‌های وکتور بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد تعیین شد. ذکر این نکته لازم است که تابع عضویت تعریف‌شده برای لایه‌های رستری به صورت کارشناسی و طبق نظر نگارندگان بر اساس آنچه در عملیات میدانی مشاهده شده است. و در نهایت بنابر میزان اهمیت هر لایه نسبت به سایر لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار EXPERT CHOICE ضریبی برای هر لایه در نظر گرفته شده و لایه‌های یادشده در این ضرایب ضرب شده‌اند. از بین پنج عملگر فازی، عملگر گاما ۰/۸ به عنوان بهترین ضریب تلفیق روی هم گذاری شناخته و نقشه پهنه‌بندی خطر توسعه فروچاله‌ها تهیه شد و در نهایت با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی به سه کلاس ریسک زیاد، ریسک متوسط، و ریسک کم طبقه‌بندی شد. در ادامه به معرفی تابع عضویت این لایه‌ها پرداخته شد.

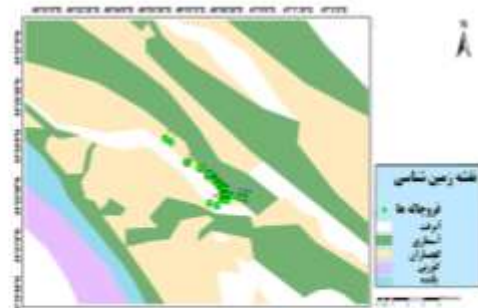
در این پژوهش از اطلاعات دما و بارش کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک مجاور منطقه مطالعاتی، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شیت کبیرکوه، تصویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۱۸، نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ با عنوان کلم بالا، نقشه کاربری اراضی، و DEM ده متر محدوده مورد مطالعه به عنوان داده‌های پژوهش استفاده شده است. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و تهیه نقشه‌های مورد نیاز از نرم‌افزارهای Excel و GIS و ENVI استفاده شده است. شکل ۲ مراحل اجرای این پژوهش را نشان می‌دهد. در ادامه نقشه پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه آمده است (شکل ۳).



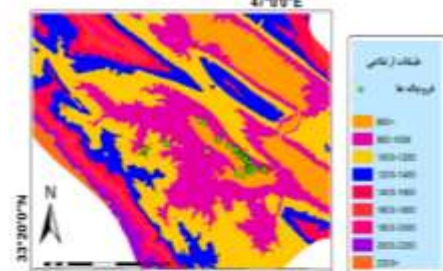
شکل ۲. ساختار کلی پژوهش



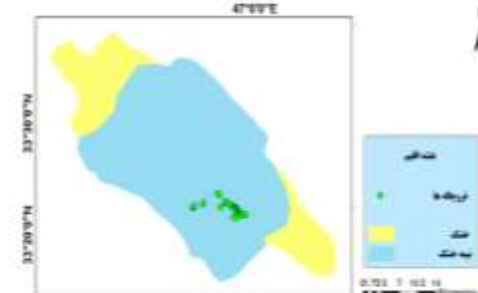
شکل ب- نقشه کاربری اراضی



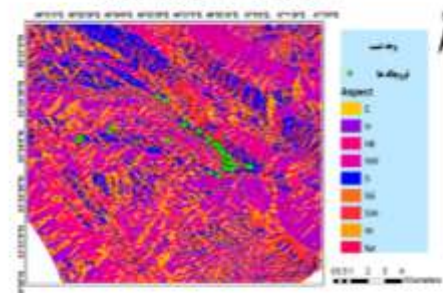
شکل الف - نقشه زمین شناسی



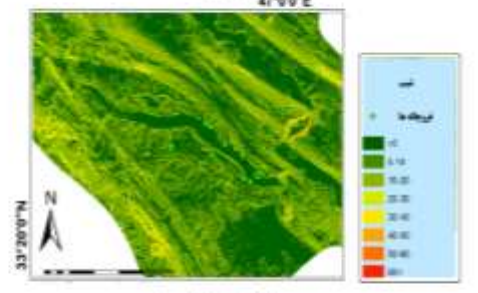
شکل د - نقشه طبقات ارتفاعی



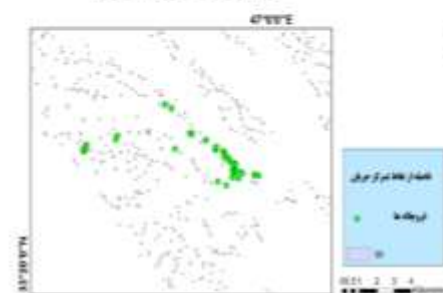
شکل ج - نقشه اقلیم



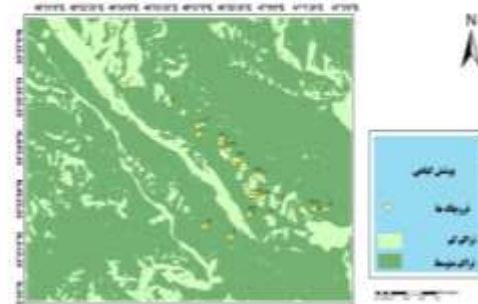
شکل ر - نقشه وجه شیب



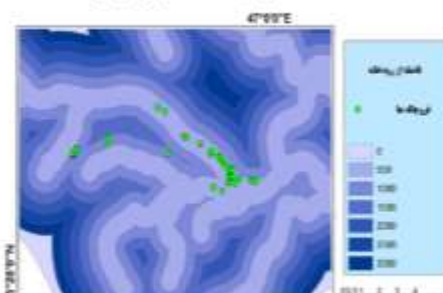
شکل ذ - نقشه شیب



شکل م - نقاط تمرکز جریان



شکل ز - نقشه پوشش گیاهی



شکل و - فاصله از رودخانه



شکل ن - نقشه فاصله از خط کنیک

شکل ۳. نقشه پارامترهای مورد مطالعه

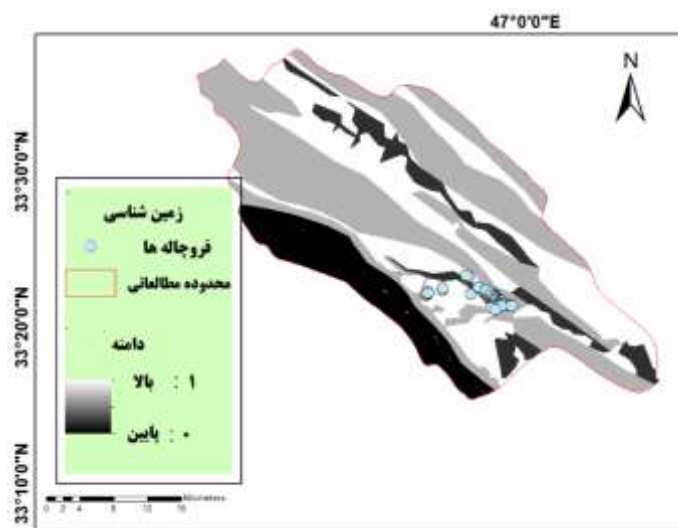
پس از تعیین مرز دشت، با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه و تعیین حدود سازندهای زمین‌شناسی با به‌کارگیری نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت کبیرکوه، همچنین تهیه نقشه پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر Landsat8، نقشه‌های شیب، وجه شیب، و طبقات ارتفاعی نیز از DEM منطقه توسط نرم‌افزار ARCMAP استخراج شد و در نهایت پس از اجرای مطالعات میدانی، موقعیت جغرافیایی تعدادی از فروچاله‌های منطقه برداشت شد و موقعیت هر فروچاله با استفاده از نرم‌افزار Google Earth بررسی شد. در پایان بررسی، به هر یک از لایه‌ها امتیازی اختصاص داده شد و پس از آن نقشه ۹ عامل مؤثر به صورت رستر با استفاده از عملگر گاما در این امتیازها ضرب شد. در نهایت، پس از جمع ۹ نقشه یادشده توسط ابزار Raster Calculator نقشه نهایی حاصل شد.

یافته‌ها و نتایج

یافته‌ها و نتایج پژوهش حاضر به شرح زیر است.

زمین‌شناسی

فروچاله‌ها در سازندها و لایه‌های کربناته از جمله آهک و گچ و لایه‌های قابل انحلالی مانند نمک شکل می‌گیرند. در این مطالعه محدوده‌ای بررسی شده است که سازند گچساران بخش عمده‌ای از منطقه را تحت پوشش قرار داده است. سازند گچساران دارای لایه‌های مارن، انیدریت، و ژپس بوده که فروچاله‌های مورد مطالعه در لایه‌های گچی این سازند شکل می‌گیرند. در مرحله فازی، به سازند گچساران که در واقع بستر قرارگیری فروچاله‌هاست امتیاز ۱ و آساماری ۰/۷ و سایر سازندها به این دلیل که مستعد شکل‌گیری فروچاله نیستند صفر اختصاص یافته است (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی مدل فازی

اقلیم

فرایند انحلال و شکل‌گیری فروچاله‌های گچی در اقلیم گرم و مرطوب سریع‌تر انجام می‌شود. بنابراین، هر دو عامل دما و بارش برای این مطالعه اهمیت دارد. بنابراین، با توجه به نیاز به دو فاکتور دما و میزان بارش، با استفاده از آمار

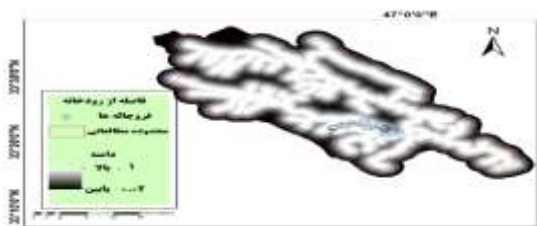
بیست‌ساله بارش و دمای محدوده مورد مطالعه و طبق روش دمارتون^۱ نقشه اقلیم تهیه شد که منطقه را در دو محدوده خشک و نیمه‌خشک تقسیم کرد. رطوبت بیشتر در محدوده نیمه‌خشک نسبت به خشک سبب می‌شود که منطقه به لحاظ تأثیرگذاری در شکل‌گیری فروچاله دارای اهمیت بیشتری باشد (شکل ۵).



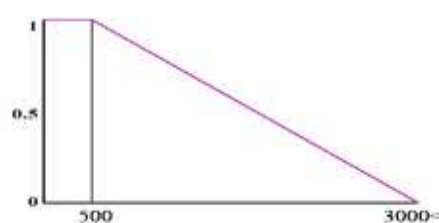
شکل ۵. نقشه اقلیم فازی

فاصله از رودخانه

قرارگیری تعدادی از فروچاله‌ها در محدوده آبرفت‌های رودخانه‌ای این مسئله را مطرح می‌کند که حضور گچ‌های سازند گچساران در قسمت زیرین آبرفت‌ها و مجاورت آن‌ها با آب رودخانه باعث انحلال گچ در بخش زیرین بستر رودخانه شده و در نهایت ریزش آبرفت‌های رودخانه‌ای نوع فروچاله رمبشی^۲ را به دنبال داشته است (شکل ۱۵- الف). بنابراین، نقشه فاصله از رودخانه نیز از پارامترهای مورد بررسی بوده و هرچه فاصله نسبت به بستر رودخانه کمتر می‌شود امتیاز بالاتری به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به آنچه در بازدیدهای میدانی مشاهده شد، بر اساس مورفولوژی منطقه و با در نظر گرفتن تراکم فروچاله‌ها، بهترین طبقه‌بندی برای این پارامتر ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۶).



شکل ۶. فاصله از رودخانه مدل فازی



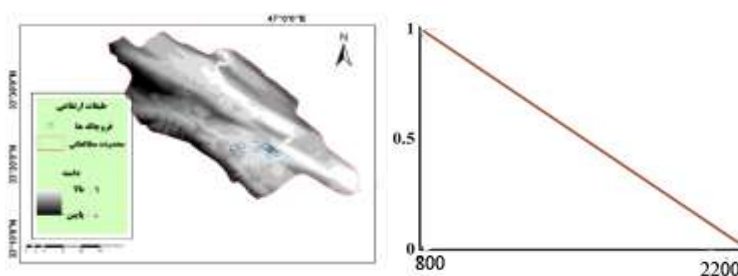
نمودار ۱. تابع عضویت عامل فاصله از رودخانه

طبقات ارتفاعی

طبقه‌بندی ارتفاع در مطالعات مربوط به پدیده‌های کارست گچی با طبقه‌بندی ارتفاع در پهنه‌بندی پدیده‌های کارستی آهکی متفاوت است. فرسایش‌پذیری کم سازندهای آهکی آسماری نسبت به سازند گچساران سبب شده است که پس از

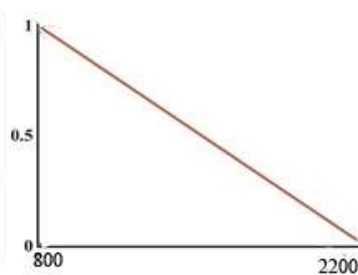
1. Demrton
2. collapse sinkhole

رخداد فاز کوهزایی و به سبب آن ایجاد چین‌خوردگی، لایه‌های سازند گچساران از روی بخشی از آهک آسماری که طاقدیس را شکل داده فرسایش یابد و بخشی از گچساران که در ناودیس‌ها قرار دارد و کمتر در معرض فرسایش قرار گرفته باقی ماند. بنابراین، امتیازدهی به طبقات ارتفاعی در مطالعات گچی دقیقاً برعکس طبقه‌بندی در مطالعات آهکی است و هرچه طبقات ارتفاعی به کف ناودیس نزدیک‌تر می‌شود امتیاز بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. با بررسی و همپوشانی سازند زمین‌شناسی و برداشت‌های میدانی، این نتیجه حاصل شد که بالاترین ارتفاعی که سازند گچساران در آن جای گرفته است ۱۰۰۰ متر بوده و پایین‌ترین منطقه دشت دارای ارتفاع ۶۰۰ متر است. بنابر آنچه در بازدیدهای میدانی مشاهده شد و بر اساس داده‌های موجود، مبنای طبقه‌بندی ارتفاعی دشت مارون ۲۰۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۷).



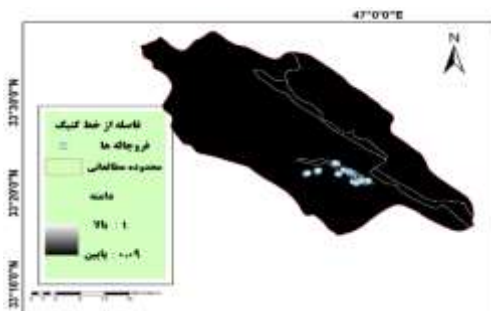
شکل ۷. طبقات ارتفاعی مدل فازی

نمودار ۲. تابع عضویت عامل طبقات ارتفاعی

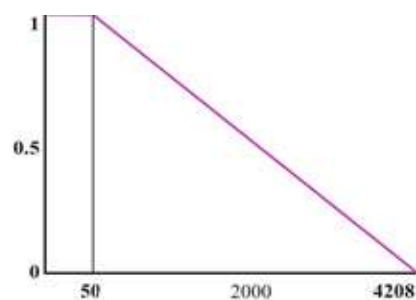


فاصله از خط کنیک

یکی از مواردی که در مطالعات میدانی در این منطقه جلب توجه می‌کند و کریمی و همکاران (۱۳۹۱) نیز به آن اشاره کرده است قرارگیری تعداد قابل توجهی از این پدیده در نزدیکی خط کنیک است. دلیل وجود این شرایط در این منطقه مطالعاتی خاص قرارگرفتن لایه گچ سازند گچساران در ناحیه پایکوهی ارتفاعات مورد نظر به عبارتی در مجاورت خط کنیک است. محل تلاقی لایه‌های گچ با جریان‌های متمرکز دامنه‌ای زمینه‌ساز شکل‌گیری فروچاله گچی است. جریان‌های متمرکز به دلیل قدرت فرساینده‌گی و انحلال بالایی که دارند می‌توانند به راحتی سبب انحلال لایه‌های گچ مجاور خط کنیک شوند، به ویژه اگر این لایه دارای نقاط ضعفی همچون شکستگی و درز نیز باشد. اندازه این فروچاله‌ها به میزان ستبری لایه گچی در محل تلاقی بستگی دارد. ذکر این نکته لازم است که نگارندگان پنج محدوده متفاوت از زاگرس را بررسی و بازدید کرده‌اند که پارامتر خط کنیک فقط در محدوده جابر خودنمایی کرده است و در سایر مناطق این فاکتور کوچک‌ترین اهمیتی ندارد. نقشه ۸ فاصله پنجاه‌متری خط کنیک ارتفاعات مشرف به سازند گچساران را نشان می‌دهد. محل قرارگیری یکی از فروچاله‌ها در محدوده خط کنیک را به نمایش گذاشته است. حداکثر قطر فروچاله‌های برداشت‌شده در دشت مارون در مجاورت خط کنیک ۴۰ متر است. بنابراین، با توجه به آنچه تا کنون رخ داده است، که البته رابطه مستقیمی با میزان ستبری لایه‌های گچی مجاور خط کنیک دارد، حداکثر فاصله مؤثر از خط کنیک ۵۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۸).



شکل ۸. فاصله از خط کنیک مدل فازی



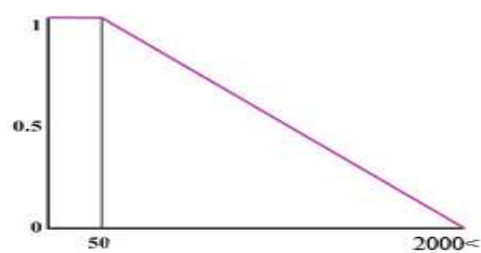
نمودار ۳. تابع عضویت عامل فاصله از خط کنیک

نقاط تلاقی آبراهه‌ها

طبق آنچه در بازدیدهای میدانی مشاهده شد، یکی از مکان‌هایی که عموماً این فروچاله‌ها در آن قرار گرفته‌اند مسیر آبراهه‌ها در دامنه‌های گچی سازند گچساران است. تلاقی دو یا چند آبراهه در دامنه سبب افزایش انرژی و قدرت فرساینده‌گری می‌شود و اگر این نقاط تلاقی بر روی لایه‌های گچی باشد، بدون تردید این مکان نقطه مناسبی برای شکل‌گیری فروچاله است که البته ابعاد و عمق این فروچاله به وضعیت قرارگیری لایه گچ نسبت به سطح افق و ستبری لایه گچ بستگی دارد. به همین دلیل، نقشه آبراهه‌های محدوده سازند گچساران استخراج شده و انتهای آبراهه و همچنین محل تلاقی آبراهه‌ها در دامنه‌های سازند گچساران با استفاده از تابع Feature vertices to point مکان‌نمایی شد و محدوده پنجاه‌متری این نقاط نسبت به محدوده‌های اطراف امتیاز بیشتری به خود اختصاص داده تا تأثیر این نواحی نیز در نتیجه حاصل از مدل نادیده گرفته نشود. عکس‌های ۱۵-ج و د این پدیده را در دشت جابر نشان می‌دهد که در مسیر آبراهه قرار گرفته است. مسئله‌ای که باید به آن توجه کرد این است که سازند گچساران شامل بخش‌های متعددی از جمله مارن، گچ، و انیدریت است و این آبراهه‌ها الزاماً باید با بخش گچی سازند گچساران برخورد داشته باشند. یکی از مواردی که در دامنه‌های این دشت مورد توجه قرار گرفت این مسئله است که شیب لایه گچی سازند گچساران در دامنه‌ها در صورتی که افقی باشند، می‌توانند به وسیله مارن‌های سازند گچساران پوشیده شوند؛ در این صورت وجود این مارن‌ها موجب ایزوله شدن لایه‌های گچی در دامنه می‌شود که این مسئله شکل‌گیری فروچاله‌ها را منتفی می‌کند. اما، در صورتی که شیب لایه گچی موجود در دامنه‌ها مانع تجمع مارن بر روی این لایه‌ها شود، محل تلاقی آبراهه با لایه گچی ایجاد فروچاله‌ها را تسهیل می‌کند. بنابراین، می‌توان گفت در مناطقی که فروچاله شکل گرفته شیب لایه‌های گچی به گونه‌ای بوده است که مارن نتوانسته این لایه‌ها را ایزوله کند و بستر برای شکل‌گیری فروچاله مهیا بوده است. پارامتر فاصله از نقاط تلاقی جریان به استناد حداکثر قطر فروچاله‌های دامنه‌ای که زیر ۵۰ متر است همان ۵۰ متر مد نظر قرار گرفته شد (شکل ۹).



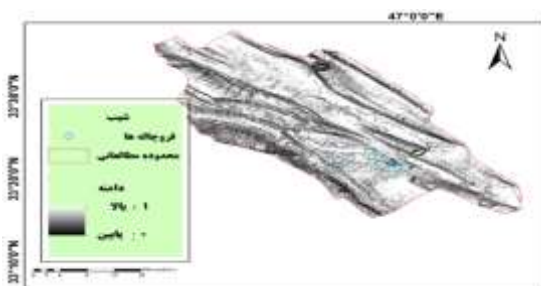
شکل ۹. نقاط تمرکز جریان دامنه‌های مدل فازی



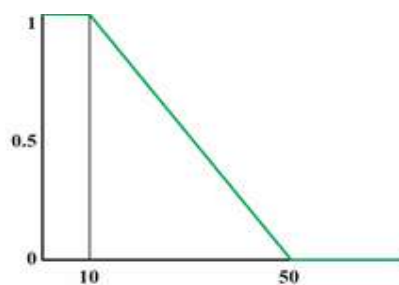
نمودار ۴. تابع عضویت عامل فاصله از خطوط جریان

شیب

جهت بررسی این فاکتور با در نظر گرفتن این مسئله که مناطق دارای شیب کم فرصت نفوذ آب در زمین را افزایش می‌دهد و هر چه زمان بیشتری آب در مجاورت لایه‌های گچی قرار گیرد فرایند انحلال بیشتر و سریع‌تر انجام می‌شود و در نتیجه کاهش شیب به تشکیل فروچاله‌ها کمک می‌کند، به هر بخشی از دشت که دارای کمترین میزان شیب است امتیاز بیشتری داده شده است. طبق مطالعات انجام‌شده، بیشترین پتانسیل شکل‌گیری فروچاله‌ها در شیب زیر ۳۰ درجه است (زنگنه اسدیو نامعی تبار، ۱۳۹۹: ۲۱۹). بنابراین، برای طبقه‌بندی پارامتر شیب از طبقات ده‌درجه استفاده شده است (شکل ۱۰).



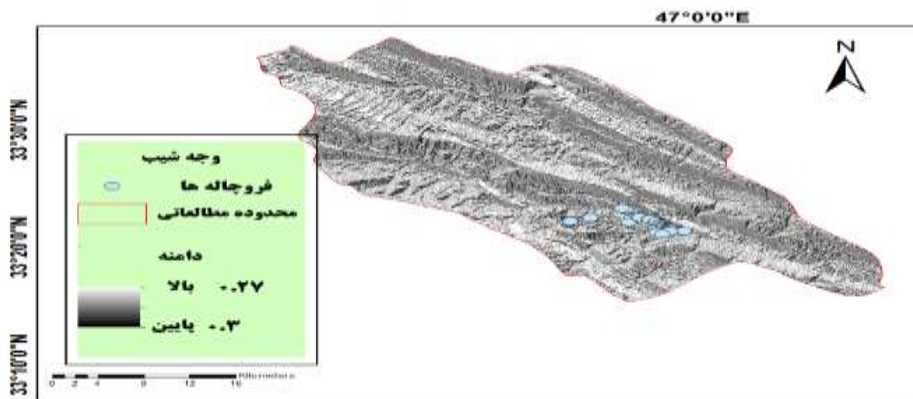
شکل ۱۰. شیب مدل فازی



نمودار ۵. تابع عضویت عامل شیب

جهت شیب

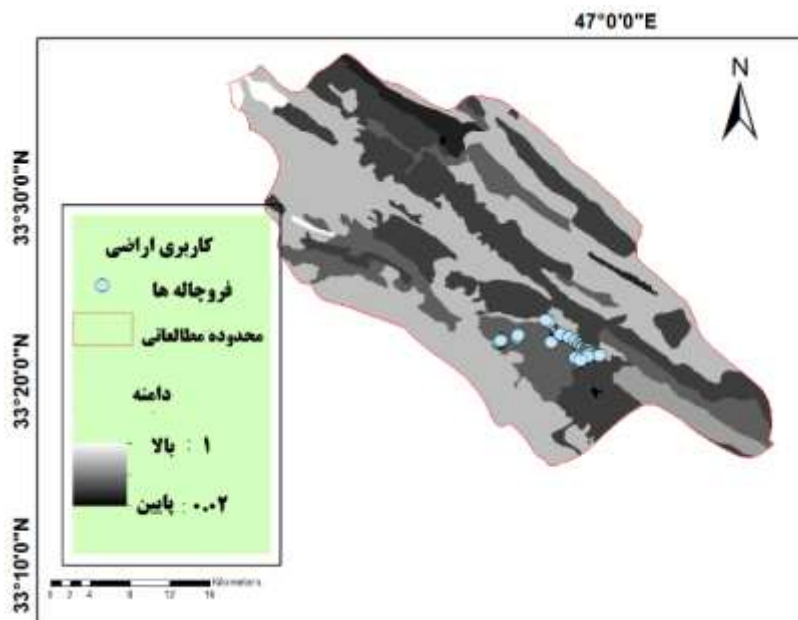
طبق پژوهش‌هایی که تاکنون در ارتباط با جهات شیب انجام شده است، از دامنه شمالی با عنوان جهت سایه‌گیر و از دامنه جنوبی با عنوان دامنه آفتاب‌گیر یاد می‌شود. بنابراین، با توجه به اینکه دما، تبخیر، و تعرق در دامنه‌های شمالی نسبت به دامنه جنوبی کمتر است، این دامنه‌ها از پوشش گیاهی متراکم‌تر و رطوبت بیشتری برخوردارند (علمی‌زاده، ۱۳۹۱: ۸۱). همچنین، وجود پوشش گیاهی در دامنه‌های شمالی سبب می‌شود که آب ناشی از بارش فرصت نفوذ بیشتری پیدا کند و از تشکیل رواناب جلوگیری شود. لذا، در این پژوهش به جهت شمال و شمال غرب بیشترین امتیاز داده شده است، زیرا پتانسیل شکل‌گیری فروچاله در این مناطق بیشتر است. جهت شیب طبق جهات شیب جغرافیایی تقسیم‌بندی شده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. وجه شیب مدل فازی

کاربری اراضی

پارامتر کاربری اراضی نیز بر اساس میزان تأثیرگذاری آن بر شکل‌گیری فروچاله‌ها بررسی شده است. زمین‌های کشاورزی و باغ کمترین میزان امتیاز و جنگل‌های متراکم بیشترین میزان امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. کاربری اراضی مدل فازی

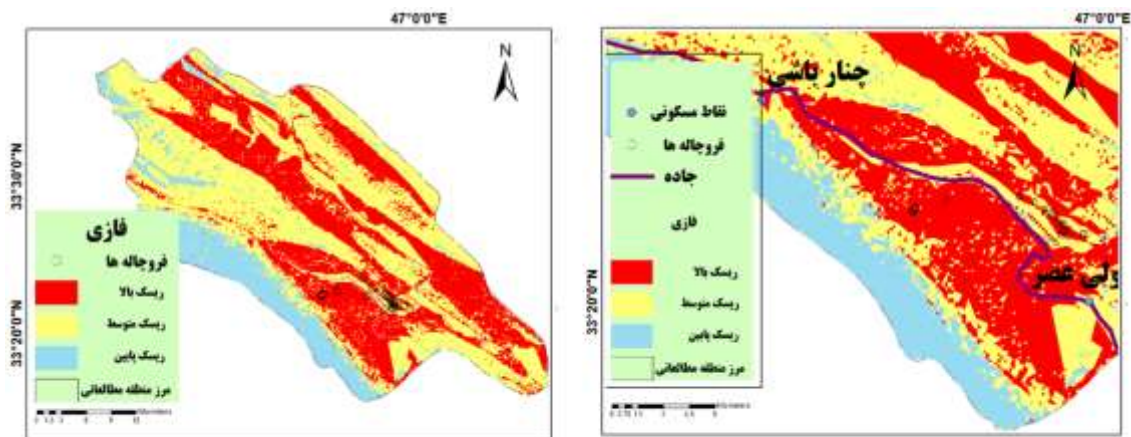
پوشش گیاهی

پوشش گیاهی این محدوده مطالعاتی با استفاده از باند شماره ۸ تصویر ماهواره‌ای Landsat و تابع NDVI در محیط نرم‌افزار ENVI استخراج شده است. این محدوده مطالعاتی با توجه به وضعیت پوشش منطقه، به دو بخش پوشش گیاهی نیمه‌متراکم و فاقد پوشش گیاهی تقسیم شده است. با توجه به این مطلب که هرچه پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد میزان نگهداشت رطوبت افزایش می‌یابد، همچنین از ایجاد رواناب جلوگیری می‌کند و فرصت نفوذ را افزایش می‌دهد، هر چه پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد امتیاز بالاتری به لایه داده می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. پوشش گیاهی مدل فازی

با توجه به اینکه در طبقه‌بندی تعدادی از پارامترها مانند وجه شیب یا پوشش گیاهی نمی‌توان به طور قطع گفت که در مناطقی که دارای کمترین امتیاز هستند فروچاله شکل نمی‌گیرد، کمترین امتیاز صفر در نظر گرفته نشده است. از میان پنج عملگر فازی که به آن اشاره شد، عملگر گاما $0/8$ به‌عنوان بهترین ضریب تلفیق روی هم گذاری شناخته شد. زیرا پس از بررسی‌های انجام‌شده و مقایسه نقشه‌های نهایی، عملگر گامای $0/8$ بیشترین تطابق را با آنچه در بازدیدهای میدانی مشاهده شده دارد. در نهایت، با استفاده از فاکتورهای یادشده و در چارچوب مدل فازی در محیط GIS نقشه Raster پهنه‌بندی تشکیل فروچاله‌ای گچی در دشت جابر تهیه شد. پس از تهیه نقشه Raster، این نقشه به سه کلاس ریسک پایین، ریسک متوسط، و ریسک بالا طبقه بندی شد تا نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر تشکیل فروچاله‌های آهکی در سازند گچساران تهیه شود. برای اثبات میزان کارایی این نقشه، مکان ۵۶ فروچاله برداشت در بازدید میدانی بر روی نقشه مکان یابی شد و در نهایت مشخص شد که مدل مورد استفاده دقت کافی را داشته است، زیرا تراکم فروچاله در منطقه با ریسک بالا در حدود ۸۵ درصد فروچاله‌ها را شامل می‌شود (شکل ۱۴-ب). شکل ۱۴-الف محل عبور جاده و قرارگیری مناطق مسکونی در مناطق پُرخطر محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ب - نقشه استخراج شده در مدل فازی

شکل الف - نقشه هم‌پوشانی نقاط مسکونی، جاده‌ها در منطقه مورد مطالعه

شکل ۱۴. نقشه‌های استخراج‌شده در مدل فازی

بقی نقشه به‌دست‌آمده از مدل فازی، محدوده‌هایی که دارای بیشترین ریسک در زمینه ایجاد فروچاله است دارای کمترین میزان شیب است و بیشتر این مناطق واقع در دشت است که جزو مناطق دارای ارتفاع کم محسوب می‌شود. به لحاظ اقلیم، بیشترین ریسک تشکیل فروچاله‌ها در منطقه نیمه‌خشک واقع شده‌اند. مناطق مجاور خط کنیک و نقاط تقاطع آبراهه‌ها از جمله محدوده‌های دارای ریسک بالا هستند. به لحاظ پوشش گیاهی، ریسک شکل‌گیری فروچاله‌ها برای مناطق دارای پوشش گیاهی متوسط بیشتر است. به سبب مجاورت لایه‌های گچ با آب‌های سطحی، هر چه فاصله رودخانه و لایه‌های گچ کمتر باشد شکل‌گیری فروچاله نیز تسهیل می‌یابد. در ارتباط با کاربری اراضی نیز هرچه میزان تراکم پوشش سطحی بالاتر باشد ریسک شکل‌گیری فروچاله‌ها کمتر است.



عکس الف- فروچاله تشکیل شده در محدوده آبرفت های رودخانه ای عکس ب - یک فروچاله تشکیل شده در محدوده خط کنیک
 (۳۳ درجه و ۲۲ دقیقه و ۲۵ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۵۸ دقیقه ۴۷ ثانیه شرقی) (۳۳ درجه و ۲۲ دقیقه و ۴۶ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۳ ثانیه شرقی)



عکس های (ج و د) - یکی از فروچاله های دامنه ای تشکیل شده در مسیر آبراهه - دشت جابر
 (۳۳ درجه ۲۲ دقیقه و ۴۰ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه ۵۸ دقیقه ۵۰ ثانیه شرقی)



عکس و - شکل گیری فروچاله گچی در حاشیه راه روستایی واقع در دشت جابر (عکس ها از نگارندگان)
 ۳۳ درجه و ۲۲ دقیقه و ۴۵ ثانیه شمالی، ۴۶ درجه ۵۸ دقیقه ۴۲ ثانیه شرقی

شکل ۱۵. تعدادی از فروچاله‌های بررسی شده در دشت مارون (عکس از نگارندگان)

روچاله زمزم با قطر ۹۵ متر در نزدیکی بستر رودخانه واقع شده که اطراف آن را زمین‌های کشاورزی احاطه کرده است. چاه زمزم در اغلب ماه‌های سال پُر آب است. با توجه به اینکه کیفیت آب موجود در این فروچاله با کیفیت آب رودخانه مجاور تفاوت دارد، می‌توان گفت آب موجود در فروچاله مرتبط با آب‌های زیرزمینی این منطقه است که در واقع

این مسئله تأییدکننده سطح بالای آب زیرزمینی در این ناحیه است. بالا بودن سطح آب زیرزمینی فاکتور بسیار مهمی است که می‌تواند با انحلال لایه‌های گچی زیرزمینی به توسعه کارست‌های ریزشی در محدوده بستر رودخانه و زمین‌های اطراف کمک بسزایی کند (شکل ۱۶).

محل فروچاله‌های برداشت شده در بازدید میدانی



(۳۳ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی، ۴۶ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی)

شکل ۱۶. چاه زمزم و تعدادی از فروچاله‌های برداشت‌شده در دشت جابر

بحث

طبق بررسی و مطالعه انجام‌شده، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل مؤثر در تشکیل فروچاله‌ها در این منطقه شامل شیب، قرارگیری لایه‌های گچ در مجاورت خط کنیک، نقاط تلاقی جریان‌های دامنه‌ای، و فاصله از بستر رودخانه است. این اولویت‌بندی بر اساس آنچه در بازدیدهای میدانی دیده شده است انجام شده. فراوانی فروچاله‌های مشاهده‌شده و دسته‌بندی آن‌ها بر اساس مکانیسم شکل‌گیری تعیین‌کننده صحت این اولویت‌بندی است. شیب مهم‌ترین عامل از عوامل تسهیل‌کننده شکل‌گیری فروچاله‌هاست. موقعیت و مکان شکل‌گیری فروچاله‌ها تأییدکننده این مسئله است که اگر همه شرایط برای شکل‌گیری فروچاله‌ها مهیا باشد و شیب مناسب نباشد، فروچاله‌ای شکل نخواهد گرفت. همچنین، بیشترین فروچاله‌هایی که در این منطقه مشاهده شد فروچاله‌های مجاور خط کنیک بوده‌اند. بنابراین، دومین پارامتری که در این منطقه شرایط را برای شکل‌گیری فروچاله‌ها مهیا کرده است مجاورت لایه گچ و خط کنیک است. به لحاظ فراوانی دومین دسته فروچاله‌ها بر روی دامنه و در محل تلاقی فروچاله‌ها شکل گرفته‌اند. بنابراین، سومین پارامتر از لحاظ اهمیت را می‌توان تلاقی آبراهه‌ها بر روی دامنه به شرط تلاقی با لایه گچ دانست. سومین دسته از فروچاله‌ها، که به لحاظ فراوانی کمترین تعداد فروچاله‌ها را شامل می‌شوند، فروچاله‌هایی هستند که در بستر رودخانه شکل گرفته‌اند. شکل ظاهری فروچاله‌ها گویای قرارگیری آبرفت رودخانه‌ای بر روی لایه گچ و انحلال زیرسطحی به سبب بالا بودن سطح آب زیرزمینی است. بنابراین، چهارمین فاکتوری که می‌توان در این اولویت‌بندی به آن اشاره کرد فاصله از بستر رودخانه است. در مطالعه‌ای که کریمی و همکاران (۱۳۹۰) در این منطقه انجام داده‌اند مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد فروچاله‌ها در این ناحیه را شیب، فاصله از بستر رودخانه، کاربری اراضی، خط کنیک، ضخامت آبرفت، و عمق سفره آب زیرزمینی دانستند. نتایج این پژوهش نشان داده که عوامل سنگ‌شناسی، شیب دامنه، فاصله از خط کنیک، ضخامت رسوب، کاربری اراضی، و عمق سفره آب زیرزمینی بیشترین تأثیر را در وقوع فروچاله‌های موجود داشته‌اند. طبق نتایج حاصل از این دو پژوهش، آنچه بیشترین تأثیر را در ایجاد فروچاله در این منطقه داشته جریان‌های متمرکز و قدرتمند دامنه‌ای است

که در محل تلاقی با لایه‌های گچی در دامنه یا در مجاورت خط کنیک ایجاد شده‌اند. همچنین، در این زمینه، در مطالعه موسویان و صادقیان (۱۳۹۵)، عوامل زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی و ساختار)، هیدرولوژیکی (سیستم‌های زهکشی)، توپوگرافی (شیب و ارتفاع) بررسی شده است. نتیجه به‌دست‌آمده حاکی از این مسئله است که هرچه ارتفاع و شیب بیشتر باشد ریسک شکل‌گیری فروچاله به حداقل می‌رسد و هر چه فاصله از آبراهه و محور طاق‌دیس کمتر شود ریسک شکل‌گیری فروچاله نیز کمتر می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از این دو پژوهش، می‌توان تأیید کرد که ارتفاع بالا و شیب بالا سبب کاهش ریسک شکل‌گیری فروچاله می‌شود. اما در ارتباط با فاصله از محور طاق‌دیس، نویسندگان این پژوهش این نتیجه را تأیید نمی‌کنند، زیرا فاصله از محور طاق‌دیس رابطه مستقیمی با ارتفاع دارد و نمی‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد. همچنین، در ارتباط با فاصله از آبراهه در واقع ارتباط مستقیم لایه گچ با آب‌های متمرکز و مؤثر فراهم می‌شود. بنابراین، این پارامتر هم می‌تواند در شکل‌گیری فروچاله تأثیرگذار باشد؛ در حالی که موسویان و صادقیان این مسئله را تأیید نکرده‌اند.

نتیجه‌گیری

فروچاله‌های گچی از جمله اشکال کارستی هستند که در ایران به‌واسطه وجود سازند گچساران به‌وفور دیده می‌شوند و معمولاً باعث بروز مشکلات بسیاری در جاده‌ها و تأسیسات زیربنایی می‌شوند.

قرارگیری لایه‌های گچی در مجاورت خط کنیک نیز به‌سبب انرژی بالایی که جریان‌های متمرکز دامنه‌ای دارند بستر شکل‌گیری فروچاله خواهند بود. در این منطقه بالا بودن سطح آب زیرزمینی توانسته است در مجاورت بستر رودخانه باعث انحلال لایه‌های گچ زیرین شود و در نهایت سبب ایجاد فروچاله‌های ریزشی شود. یکی از پارامترها که می‌تواند پتانسیل ایجاد فروچاله‌ها را افزایش دهد جهت شیب است؛ با این توضیح که در جهت‌ها شیب سایه‌گیر به‌سبب کاهش تبخیر و تعرق محیط مرطوب‌تر می‌ماند و افزایش پوشش گیاهی در این جهت‌ها مانع ایجاد رواناب می‌شود و فرایند نفوذ آب بیشتر روی می‌دهد.

ارتفاع شکل‌گیری فروچاله‌ها

چین‌خوردگی حاصل از فازهای کوهزایی سبب شد بخش‌هایی از سازند گچساران به صورت طاق‌دیس درآید. اما به‌علت فرسایش‌پذیری بیشتر نسبت به لایه زیرین خود (آهک آسماری) از بین برود و اکنون سازند گچساران فقط در محل ناودیس رخمون پیدا کند و بستر تشکیل فروچاله‌های گچی شود. بنابراین، هرچه ارتفاعات به سمت نقاط پست‌تر و دارای شیب کمتر پیمایش شود شرایط جهت شکل‌گیری فروچاله‌ها مساعدتر می‌شود. در نتیجه هر چه ارتفاع کمتر باشد ریسک شکل‌گیری فروچاله گچی بالاتر است.

موقعیت قرارگیری و علل ایجاد فروچاله‌ها

فروچاله‌های آهکی و فروچاله‌های گچی، علاوه بر تفاوت‌هایی که از لحاظ فرم دارند، مکان شکل‌گیری و عوامل مؤثر در پیدایش آن‌ها نیز متفاوت است. فروچاله‌های گچی، برخلاف فروچاله‌های آهکی، که معمولاً در ارتفاعات و اقلیم سرد و مرطوب به دلیل وجود دی‌اکسید کربن شکل می‌گیرند، در ناودیس‌ها و در اقلیم گرم و مرطوب تشکیل می‌شوند. از نظر موقعیت مکانی، تراکم بیشتر فروچاله‌های منطقه مورد مطالعه بر روی سه منطقه متمرکز شده‌اند: اولین گروه فروچاله‌هایی هستند که در مجاورت خط کنیک شکل گرفته‌اند. فرایند انحلال در نقاط تقاطع جریان‌های متمرکز

دامنه‌ای ناشی از بارش در محل خط کنیک با لایه‌های گچی بستر شکل‌گیری این گروه از فروچاله‌ها شده است؛ گروه دوم فروچاله‌های دامنه‌ای هستند که در محل تقاطع جریان‌های متمرکز دامنه‌ای با لایه‌های گچی ایجاد شده‌اند. البته تشکیل فروچاله‌ها در ارتفاعات بالاتر و بخش‌های فوقانی به علت ایزوله‌شدن لایه‌های گچ توسط لایه‌های مارن تقریباً غیرممکن می‌شود؛ گروه سوم نیز فروچاله‌هایی هستند که نزدیک یا بر روی بستر رودخانه‌ای که از روی سازند گچساران می‌گذرد تشکیل شده‌اند. بنابراین، در دو گروه اول جریان‌های متمرکز و در گروه سوم جریان آب زیرزمینی و انحلال زیر سطحی سبب شکل‌گیری فروچاله‌ها شده است. پس به طور کلی می‌توان گفت عواملی مانند شیب کم، زمین‌شناسی منطقه، طبقات ارتفاعی پایین، و محل تلاقی آبراهه‌ها با لایه‌های گچی سازند گچساران در دامنه‌ها بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری این پدیده‌ها داشته‌اند.

ریسک و خطرهای توسعه فروچاله‌ها

انطباق نقشه پراکندگی فروچاله‌ها بر روی نقشه پهنه‌بندی تکامل کارست که می‌تواند در شناسایی مناطق مستعد وقوع فروچاله‌ها مؤثر باشد نشان می‌دهد ۸۵ درصد از فروچاله‌ها بر روی مناطق با ریسک بالا قرار گرفته‌اند که این امر دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند. از طرفی، با توجه به اینکه عمده تأسیسات و جاده‌ها در ناودیس‌ها و بالطبع بر روی این سازند قرار گرفته‌اند، تغییرات سریعی که در لایه‌های گچی رخ می‌دهد می‌تواند منجر به بروز بسیاری از مخاطرات از جمله ریزش جاده و خسارت به ساختمان‌هایی شود که در نزدیکی خط کنیک قرار دارند. تراز بالای آب زیرزمینی در مجاورت رودخانه و آب حاصل از آبیاری کشاورزانی که از آبیاری نوین استفاده نمی‌کنند نیز می‌تواند در گسترش و ایجاد فروچاله‌ها در منطقه مؤثر باشد. بنابراین، لازم است اقدام‌های پیشگیرانه جهت کنترل تشکیل فروچاله‌ها و مدیریت تأسیسات زیربنایی مانند راه‌ها، تونل‌ها، و واحدهای ساختمانی روستایی و کشاورزی انجام شود. همچنین، لازم است مطالعات زمین‌شناسی کافی در این منطقه انجام شود و به موقعیت قرارگیری لایه‌های گچی، اعم از فاصله آن با بستر رودخانه‌ها و فاصله از خط کنیک، توجه بیشتری شود.

منابع

- بهنیا، ا. و قنبرزاده، ه. (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی کارست، مشهد: نگاران سبز.
- تصویر ماهواره‌ای Land sat (۲۰۱۸)، USGS-NASA.
- حیدری، ز.؛ قدیمی، م.؛ رضایی عارفی، م. و حیدری، ز. (۱۳۹۹)، شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع فروچاله‌ها با استفاده از شاخص‌های کمی مورفومتریک، مطالعه موردی (دشت کرمانشاه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، س ۹، ش ۲، صص ۲۱۵-۲۲۶.
- زنگنه اسدی، م. و ناعمی‌تبار، م. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در حوضه آبریز فخر داوود (دامنه جنوبی بینالود)، جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۳، ش ۲.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. شیت شماره ۵۳۵۶.
- شرکت مهندسی مه‌باب قدس (۱۳۸۱). طرح سد و نیروگاه سیمره (مطالعات مرحله دوم)، گزارش زمین‌شناسی مهندسی، صفحه ۱۹۴.
- صفاری، ا. و قنواتی، ع. (۱۳۹۴). ارزیابی مخاطرات شکل‌گیری فروچاله‌ها در مناطق کارست گچی (مطالعه موردی: منطقه گلگیر، شمال شرق خوزستان)، کنگرة بین‌المللی تخصصی علوم و زمین، دوره ۳۴.
- صفاری، ا.؛ کیانی، ط. و زنگنه‌تبار، س. (۱۳۹۸). بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، س ۱۹، ش ۵۵، صص ۲۳-۳۶.
- صفاری، ا.؛ موسی‌وند، ج. و افتخاری، م. (۱۳۹۰). تحلیل توسعه کاربری‌های شهری در مناطق لغزشی با استفاده از تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی: حوضه رود دره)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ج ۱۹، ش ۲۲، صص ۸۵-۱۰۷.
- صفاری، ا.؛ قنواتی، ع.؛ علیجانی، ف. و محمدی، ز. (۱۳۹۵). مروری بر خصوصیات لندفرم‌های کارستی در لایه‌های گچی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، صص ۳۹۱۷-.
- علمی‌زاده، ه. (۱۳۹۱). تحلیل مورفولوژی و شیب در ارتباط با فرسایش (نمونه موردی حوضه نجی)، سپهر، دوره ۲۰، ش ۶۰، صص ۷۹-۸۳.
- قبادی، م.؛ ساعدی، ب.؛ مهدی‌آبادی، ن. و احمدزاده، ج. (۱۳۹۵). معرفی پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست توده آهکی بیستون-پراو، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۷ و ۱۸ شهریور ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی مشهد، صص ۱۸۴-۱۹۹.
- قربانی، م.؛ محمودی، ف.؛ یمانی، م. و مقیمی، ا. (۱۳۸۸)، نقش تغییرات اقلیمی کوتاه‌تر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی، مطالعه موردی: ناهمواری‌های شاهو، غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۷۴، صص ۱-۱۶.
- کریمی، ح. (۱۳۹۰). بررسی سازوکار تشکیل فروچاله‌های دشت جابر در جنوب شرق استان ایلام، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱، ش ۲، صص ۱۲۵-۱۳۹.
- کریمی، ح.؛ گرایی، پ. و توکلی، م. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر وقوع فروچاله با استفاده از رگرسیون چندمتغیره، مطالعه موردی: فروچاله‌های ریزشی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ش ۶، صص ۵۳-۶۲.

محمدیان، م.؛ لشکری‌پور، غ.؛ غفوری، م. و قبادی، م.ح. (۱۳۹۴). انحلال‌پذیری سنگ‌های گچی سازند گچساران و اثرات زیست‌محیطی آن در شرق استان خوزستان، دوره ۱۳، ش ۳، صص ۱۱-۲۴.

مقصودی، م.؛ کریمی، ح.؛ صفری، آ. و چهارراهی، ذ. (۱۳۸۸). بررسی توسعه کارست در توده پرآو و بیستون با استفاده از ضریب فور، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوبی و شیمیایی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۶۹، صص ۵۱-۶۵.

مکرم، م. و نگهبان، س. (۱۳۹۸). بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، س ۳۰، شماره پیاپی ۷۴، ش ۲، صص ۱۲۱-۱۳۴.

موسوی، ق. و صادقیان، ر. (۱۳۹۵). بررسی منطق فازی و کاربرد آن در مسائل پیچیده، ماهنامه پژوهش ملل، دوره ۲، ش ۱۵، صص ۷۶-۸۹.

مؤمنی، م. (۱۳۸۹). مباحث نوین در تحقیق در عملیات، تهران: انتشارات مؤلف.

وزارت نیرو (تماب) (۱۳۷۳). فرهنگ چندزبانه واژه‌های کارست، سازمان تحقیقات منابع آب.

Behniafar, A, Ghanbarzade, H, (2015), Geomorphology of karst.

Carter, M.W. and Laporte, G. (1998). Recent developments in practical course timetabling, The practice and theory of automated timetabling) Part II), Toronto, Canada, Lecture notes in computer science 1408, Springer-Verlag, 3-19.

Cooper, A.H. and Gutiérrez, F. (2013). Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning. In: Shroder, J.) Editor in Chief), Frumkin, A.) Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, Karst Geomorphology, Vol. 6, PP .451-462.

Cooper, H. (2006). Anthony, Gypsum dissolution geohazards at Ripon, North Yorkshire, UK, IAEG2006 Field Trip Guide Ripon.

Elmizade, H. (2012). Morphological and slope analysis in relation to erosion (Case Study of the Nachi Basin), Sepehr, Volume 20, Issue 80, Winter 2012, PP 79-83.

Entezari, M. and Aghaeipour, Y. (2018). Zonation of Karst development using Entropy Model) Case study: Paraw – Bistoon mountain masses). Journal of Geography and Environmental Planning, Vol, 29 ,No. 2 ,Ser No.(70)

Ford, D. C. and Williams, S. (1989). Karst geomorphology and hydrology. ۱۹۸۹ Springer Netherlands, 1-601, ISBN 1-7780-011-94-978

PP (2020).adi, M, Naemitabar, M,,earch, Geological Survey of the country, geological map of scale 1: 100000.

Land sat image 2018.

Ghorbani, M., Mahmoudi, F, Yamani, M., Moghimi, A.(2010). The role of quaternary climate changes in geomorphologic evolution of sinkholes, case study: Shaho roughnesses, west of Iran. Natural Geography Research, No. 74, Winter 2010. PP 16-16.

Ghobadi, M, H, Sa'edi, B, Mehdi Abadi, N, Ahmadzadeh, J. (2013) Introduction of Karst geomorphological phenomena of Bisotun - Prao Calcareum. Eighth Iranian Engineering and Environmental Geology Congress. September 17th and 18th, 2013, Ferdowsi University of Mashhad.

Heidari, Z, Ghadimi, M, Rezaei, M, Heidari, Z. (2020). Identification and analysis of karst sinkholes with emphasis on the morphometric characteristics Indicators Case Study (Kermanshah Region),

- Quantitive Geomorphological Research, Volume 9, Issue 2 - Serial Number 34, Autumn 2020, PP 215-226.
- Karimi, h. (2011). Investigating the mechanism of formind of sinkholes in Jaber Plain in the south east of Ilam province, *Advanced Applied Geology*, Volume 1, Issue 2, Winter 90, PP. 125-139 .
- Karimi, H, Geraee, P, Tavakkoli, M. (2011). Zoning the risk of forming sinkholes with multivariate regression, case study: Collaps Sinkholes. *Advanced Geology Journal* 1391, Winter 91, No. 6 .
- Guo, Sh.; Yan, CH.; Yu, L.; Liu, Y.; Zhou, Y. and Shi, X. (2020) .Characteristics, Controlling Factors, and Formation of Shallow Buried Karst in Eastern China: A Case Study in the Wuxi Metro Areas, Jiangsu Province, *Environmental and Engineering Geoscience*, 257:(2)26-269
- Haibat, A. and Choi, J. (2019). Risk Prediction of Sinkhole Occurrence for Different Subsurface Soil Profiles due to Leakage from Underground Sewer and Water Pipelines, *Sustainability*12, 2020.310
- Klimchouk, Alexander (1996). THE lypology of Gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution, *Int. J. Speleol*, (4-3)25
- Ministry of Energy (Tamab). (1994). Multilingual Culture of Karstic Words, *Water Resources Research Organization* .
- Moradi, S. Kalantari, N. Charachi, A. (2016). Karstification Potential mapping in northeast of Khuzestan province, Iran, using Fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) technique.2016 *Geopersia* 6 (2), PP. 265-282 .
- Mokarram, M, Negahban, S, Investigating and Identifying Areas with Potential Karsticization using the Fuzzy Method and Analytical Hierarchy Process Model, 2019, *Journal of Geography and Environmental Planning*, Vol 30, No. 2, Ser No. (74).
- Momeni, M., *New Issues in Operations Research*, 2010.
- Moradi, S.; Kalantari, N. and Charachi, A. (2016). Karstification Potential mapping in northeast of Khuzestan province, Iran, using FUZZY logic and analytical hierarchy process) AHP) technique, *Geopersia*, (2)6:282-265
- Mull, D. S.; Neilsen, D. M. and Quinlan, J. F. (1988). Application of dye – tracing techniques for determine solute transport characteristics of Groundwater in karst terrains .United States Environmental Protection Agency.
- Mohammadian, M, Ghafari, M, Ghobadi, M. (2015). A Study of the Gypsum Solubility of the Gachsaran Formation in East of Khuzestan Province and its Environmental Impacts, *Enviromental sciences*, Volume 13, Issue 3, Autumn 2015, PP 11-24.
- Moosavi, GH, Sadeghian, 2015, Investigation of fuzzy logic and its application in complex problems, *Research of nations*, No 15 PP 76-89.
- Maghsoudi, M, Karimi, H, Safari, F, Chaharrahi, Z. (2009). Investigation of karst development in Pravo-Biston massif using landing coefficients, spring death time and isotopic and chemical analysis, *Physical Geography Research*, No 69, PP 51-65.
- Rajabi, M.; Hejazi, A. and Almasi GH (2017). Zonation of Superficial Karst Development Using Fazzy logic method (Case study: Shirez Karstic masses). *Science Arena publications*, 59-50(1)1
- Saffari, A, Kiani, T, Zngenetabar, S. (2019). Investigating the Factors Affecting the Development and Zoning of Khorini Mountain KarstUsing fuzzy logic, *Geosciences Research Journal*, Nineteenth Year, No. 55, Winter 8.
- Saffari, A, Ghanavati, E, Alijani, F, Mohammadi, Z. (2016). Overview of karst landforms in the gypsum layers, 2016, *Quantitive Geomorphological Reaserch*, Volum 4, Issue 4 – Serial number 4, Spring.

- Saffari, A, Moosivand, J, Eftekhari, M. (2011). Analysis of urban land use development in landslide areas using integration, Case study : Darre rood basin, Journal of Applied Research in Geographical Sciences, Volume 19, Number 22, Fall 1, PP 85-107.
- Saffari, A, Ghanavati, E. (2015). Assessing the risks of sinkholes formation in gypsum karst areas (Case study: Golgir area, northeast of Khuzestan province), International Specialized Congress of Science and Earth, Volume 34.
- Van Alphen, B. J. and Stoorvogel, J. J. (2000). A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. Soil Science Society of America Journal, (5)64:1713-1706
- White, W. B. (1989). Geomorphology and Hydrology of karst, oxford university press. Quinlan, j, Groundwater monitoring in karst terrains ,EPA./ 600 x.
- William, P. and Ford, D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19[^] SQ ,England,578-1
- Yamani, M, Shamsipoor, A, Jaafari Aghdam, M, Bagheri Seyed Shokri, S. (2013). Investigating the Factors Influencing the Development and Zonation of Karel Basin of Chole Basin Using Fuzzy Logic and AHP. Kermanshah Province. Journal of Earth Sciences, 2008, No. 88, PP. 57 to 66.
- Zanganeasadi, M, Naemitabar, M. (2020). Zoning of surface karst development in Fakhr Davood catchment (southern slope of Binalood), Geography and Human Relations Volume 3 Autumn 1399 No. 10, PP 230-212.