

**Investigating Effective Factors in the Evolution of Karstic Sinkholes in Gachsaran Formation Using the Fuzzy Model
(Case Study: Maroon Plain, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province)**

**Hamideh Gholamhaydari ¹, Haji Karimi ^{2*}, Mozhgan Entezari ³,
Mohammad Hossein Ramesht ⁴**

1- PhD Candidate of Geomorphology, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran h.heidari.5961@gmail.com

2- Professor, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
(*Corresponding Author Email: haji.karimi@gmail.com)

3- Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran entezary54@yahoo.com

4- Professor, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran
mn.raamesht@gmail.com

Abstract

The presence of formations containing gypsum layers could enhance the formation of gypsum karst forms. The thickness of the gypsum layers and the quality of the mentioned beds influence the formation of such landforms. The Maroon plain is located in the folded zone of the Zagros Mountains in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province. The existence of the Gachsaran Formation and the occurrence of the karst phenomena (among which sinkholes are the most significant) in this plain have a very destructive impact on the roads, facilities, farmlands, residential units, and the reservoir of the Maroon Dam located in the plain. However, this phenomenon is not well-known and well-studied. In the present study, the karst evolution zoning map was prepared using the fuzzy model. To produce this map, ten environmental factors including the slope, slope direction, geology, distance from the Knick line, distance from the flow line, distance from the river, elevation, land use, climate, and the NDVI Index were used. The results of this study demonstrated that 55.2% of the study area was situated in the zero-risk zone because it was situated out of the Gachsaran Formation realm and lacked the gypsum layer. Also, 11.2% of the area was in the high-risk zone, 18.5% in the medium-risk zone, and 15.1% in the low-risk zone. Field observations and studying the zoning map indicated that the main factors influencing the karst evolution of this area were slope and streamlines which were superimposed on the gypsum layers.

Keywords: Maroon Plain, Gachsaran Formation, Sinkhole, Gypsum Karst, Fuzzy Model.



بررسی عوامل مؤثر بر تکامل فروچاله‌های کارستیک در سازند گچساران با استفاده از مدل فازی

نمونه پژوهش: دشت مارون کهگیلویه و بویراحمد

حمیده غلام حیدری^۱، حاجی کریمی^{۲*}، مژگان انتظاری^۳، محمدحسین رامشت^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران h.heidari.5961@gmail.com

۲- استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران haji.karimi@gmail.com

۳- دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران entezary54@yahoo.com

۴- استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران mn.raamesht@gmail.com

چکیده

وجود سازندهای شامل لایه‌های گچی زمینه‌ساز تشکیل اشکال کارستی گچی خواهد بود. میزان ستبری لایه‌های گچی و کیفیت این لایه‌ها در شکل‌گیری این گونه اشکال تأثیرگذار است. دشت مارون در بخش چین‌خورده ساده رشته‌کوه زاگرس در استان‌های خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد واقع شده است. وجود سازند گچساران و پدیده‌های کارستی گچی در این دشت که مهم‌ترین آنها فروچاله است، تأثیر بسیار مخربی بر جاده‌ها، تأسیسات، زمین‌های کشاورزی، واحدهای مسکونی و مخزن سد مارون واقع در این دشت دارد؛ اما متأسفانه شناخت و مطالعه این پدیده کمتر مدنظر بوده است.

در این پژوهش به منظور تعیین پتانسیل کارست‌زایی در دشت مارون برای مدیریت سازه‌های مهم منطقه، نقشه پهنه‌بندی ریسک شکل‌گیری کارست با استفاده از مدل فازی تهیه شده است. برای تهیه این نقشه از ده عامل محیطی شامل شیب، وجه شیب، زمین‌شناسی، فاصله از خط کنیک، فاصله از خطوط جریان، فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، اقلیم و شاخص (NDVI) استفاده شده است.

نتایج این پژوهش نشان داد ۵۵/۲ درصد از منطقه پژوهش با توجه به اینکه در محدوده سازند گچساران قرار ندارد و فاقد لایه‌های گچی است، از نظر وقوع فروچاله در محدوده ریسک صفر درصد، و ۱۱/۲ درصد در محدوده ریسک زیاد، ۱۸/۵ درصد در محدوده ریسک متوسط و ۱۵/۱ درصد در محدوده ریسک کم قرار می‌گیرد. براساس بازدیدهای میدانی و بررسی نقشه پهنه‌بندی، عوامل اصلی مؤثر بر تکامل کارست این منطقه، شیب و خطوط آبراهه، بر لایه‌های گچی منطبق است.

واژه‌های کلیدی: دشت مارون، سازند گچساران، فروچاله، کارست گچی، مدل فازی.

مقدمه

مناطق کارستی به مناطقی اطلاق می‌شود که با انحلال سنگ‌بستر و توسعه شبکه زهکشی زیرزمینی گسترش و ارتباط می‌یابد (Waltham et al., 2005: 1). عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و وضعیت هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌شوند. آب داخل درزها و شکاف‌های سنگ‌های قابل انحلال مانند کربنات کلسیم نفوذ می‌کند و موجب توسعه درزها و شکاف‌ها می‌شود و اشکال کارستی را پدید می‌آورد (Mull et al., 1988). سازندهای تبخیری که بسیاری از آنها حاوی واحدهای گچی نازک هستند، ۸ درصد از سطح زمین را پوشانده و زیربنای حدود ۲۵ درصد از سطح قاره‌ای زمین را تشکیل داده‌اند (Ford and Williams, 2007: 15). باید دانست که میان ژئومورفولوژی کارست و تکامل آن ارتباط نزدیکی وجود دارد؛ به طوری که فراوانی و گسترش پدیده‌های مورفولوژی کارست نشان‌دهنده گسترش کارست در ناحیه است (کریمی، ۱۳۹۰: ۲)؛ به بیان دیگر وجود و نبود هریک از اشکال کارستی در یک منطقه، راهنمایی برای شناخت بهتر و بیشتر سیستم کارستی منطقه است (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۰۰). کارست گچی با وجود رخداد گسترده و اهمیت آن از لحاظ کاربردی (مخاطرات، آثار و منابع) کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Klimchouk et al., 1996: 50). عوارض کارست گچی منشأ مشکلات و مسائل متعددی مانند فرونشست و شکل‌گیری ناگهانی فروچاله‌هاست و شناسایی و مطالعه آنها برای احداث و نگهداری سازه‌های مختلف به‌ویژه سازه‌های هیدرولیکی و همچنین مدیریت پایدار آب مهم است (Cooper and Gutiérrez, 2013: 1). با توجه به مسائل متعددی که در برخورد با کارست‌های گچی با آنها روبه‌رو هستیم، چنین مناطقی برای برنامه‌ریزی محلی و ملی، اقدامات با هدف کاهش خطرات، استفاده از منابع و در نتیجه توسعه ایمن کارست گچی مفیدند؛ بدین منظور نخست بایستی چشم‌اندازها و لندفرم‌های گچی را شناخت؛ بر این اساس نخستین مرحله در مطالعه مناطق کارست گچی ژئومورفولوژی است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۸).

پیشینه پژوهش

مدل‌های متعددی از جمله مدل سلسله‌مراتبی AHP، Fuzzy، رگرسیون خطی چندمتغیره و آنتروپی تاکنون در زمینه پهنه‌بندی ریسک تشکیل کارست استفاده شده‌اند و نتایج متعددی به دست آمده است. در ادامه به تعدادی از مطالعاتی اشاره شده که تاکنون درباره پدیده لندفرم‌های کارستی انجام شده است.

در پژوهش کریمی و همکاران (۱۳۹۱) در محدوده جابر در استان ایلام، عمده فروچاله‌های گچی شکل گرفته از نوع ریزشی تشخیص داده و عوامل شکل‌گیری آنها شیب توپوگرافی، نوع سازند زمین‌شناسی، عمق آب زیرزمینی و فاصله از خط کنیک معرفی شده است.

محمدیان و همکاران (۱۳۹۴) پس از بررسی انحلال‌پذیری سنگ‌های گچی (ژپس) سازند گچساران و آثار زیست‌محیطی آن در شرق خوزستان، فراوانی ساختارها (درزه‌ها و گسل‌ها) و عملکرد آب زیرزمینی را از عوامل

اصلی تشکیل کارست در منطقه می‌دانند؛ همچنین در نتیجه انحلال سنگ‌های ژیبسی، میزان TDS و میزان یون‌های سولفات در آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث کاهش کیفیت آب، و انحلال سریع سنگ‌ها باعث ایجاد فرونشست در منطقه شده است.

رجبی و همکاران^۱ (۲۰۱۷) با استفاده از مدل فازی، توده کارستی شیرز را بررسی کرده‌اند. آنها با استفاده از لایه‌های زمین‌شناسی، طبقات ارتفاعی، فاصله از گسل، شیب، وجه شیب، بارش، دما، فاصله از گسل و پوشش گیاهی، با ارزیابی شرایط هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک، نقشه مناطق دارای پتانسیل توسعه کارست را تهیه کرده‌اند.

مرادی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) نقشه پتانسیل تحول و تکامل کارست را با استفاده از مدل‌های فازی و AHP در شمال خوزستان تهیه کرده‌اند. آنها عامل تکتونیک را مؤثرترین عامل در تکامل کارست این منطقه دانسته‌اند. انتظاری و آقایی‌پور^۳ (۲۰۱۸) در یک مطالعه درباره 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 مطالعه‌شده را دارای پتانسیل زیاد و بسیار زیاد تکامل کارستی دانسته‌اند؛ همچنین وجود تعداد زیاد چشمه‌های کارستی نشان‌دهنده تحول زیاد کارست در این منطقه است.

هاندون چو و همکاران^۴ (۲۰۱۷) مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی ناشی از ورود آب به داخل کانال‌های کارستی با استفاده از مدل فازی» انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده از مدل فازی با بازدیدهای میدانی و نتایج حاصل از آن منطبق است.

آرزومند و همکاران^۵ (۲۰۱۵) در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با کمک مدل فازی؛ مطالعه موردی: دشت کوچ اصفهان آستانه» وزن پارامترها را به کمک ضریب لاندا به فازی تبدیل کردند؛ وزن پارامترهای کمی با توابع عضویت و وزن پارامترهای کیفی با توابع گسسته به فازی تبدیل شدند و در نهایت پهنه‌بندی انجام شد. دوناتلا کانینانی و همکاران^۶ (۲۰۱۵) در مقاله‌ای با عنوان «طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی خطر آلودگی آب زیرزمینی سایت‌های آلوده‌کننده با استفاده از منطق فازی؛ مطالعه موردی: منطقه باسیکیکاتای^۷ ایتالیا» میزان تأثیرگذاری آلاینده‌های انسانی را بر منابع زیرزمینی آب بررسی کردند.

زمانی و همکاران (۱۳۹۶) پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل وجود حفره‌های کارستی در واحدهای کربناته استان مازندران، با استفاده از داده‌های آب ورودی به تونل، برای تونل‌های حفرشده و پراکندگی چشمه‌ها اعتبار نقشه تهیه‌شده را سنجیدند.

^۱. Rajabi et al.

^۲. Moradi et al.

^۳. Entezari, and Aghaeipour,

^۴. Handong Chu et al.

^۵. Arezoomand et al.

^۶. Donatella Caniani

^۷. Basilicata

مددی و همتی (۱۳۹۴) با استفاده از پارامترهای زمین‌شناسی، فاصله از درز و شکاف، توپوگرافی، شیب، بارش و دما در محیط GIS با مدل فازی، نقشه پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی منطقه نمک‌آبرود را تهیه کرده‌اند.

مکرم و نگهبان (۱۳۹۸) با استفاده از مدل فازی و سلسله‌مراتبی، مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن را در جنوب شهرستان کازرون شناسایی کرده‌اند. در این مطالعه برای تعیین مستعدترین مناطق کارستی از نقشه‌های زمین‌شناسی، فاصله از گسل، بارش، ارتفاع، دما، فاصله از رودخانه و شیب استفاده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، عوامل لیتولوژیک، اقلیم و مورفولوژیک، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در میزان کارست‌زایی در این منطقه محسوب می‌شوند.

هیب و چاو^۱ (۲۰۱۹) فروچاله‌ها را یکی از تهدیدهای مهم تأسیسات شهری می‌دانند؛ در این زمینه نشت لوله‌های زیرزمینی مناطق مسکونی، یکی از عواملی است که به‌راحتی فروچاله‌ها را در این مناطق گسترش می‌دهد. در پژوهش شولان ژو و همکاران^۲ (۲۰۲۰) درباره فروچاله‌های گچی این نتیجه حاصل شده که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل‌گیری کارست گچی، توپوگرافی، تکتونیک، سطح آب زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی است.

حیدری و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی فروچاله‌های آهکی دشت کرمانشاه، پارامترهایی مانند تغییرات در سیستم درز و شکاف، میزان بارش، دما، شیب و توپوگرافی را عوامل مؤثر بر گسترش و توسعه کارست سطحی می‌دانند؛ براساس نظر نویسندگان این پژوهش، عامل شیب زیاد، عاملی محدودکننده در توسعه کارست است.

در پژوهش حاضر با توجه به اینکه سازندهای گچی و پدیده‌های کارستی مرتبط با آنها تأثیر بسیار زیادی بر پایداری سازه‌های مهم از جمله جاده‌ها و تأسیسات دارند و با در نظر گرفتن اینکه سرعت تشکیل این پدیده‌ها بسیار زیاد است، این منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل فازی بررسی و پس از بازدیدهای میدانی مدل یادشده نیز صحت‌سنجی شد.

محدوده پژوهش

دشت مارون واقع در حوضه مارون در بخش چین‌خورده ساده رشته‌کوه زاگرس در استان کهگیلویه و بویراحمد در عرض ۳۱ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۲ دقیقه و طول ۵۱ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهبهان قرار دارد (شکل ۱). این منطقه در مرز غربی استان خوزستان با استان کهگیلویه و بویراحمد واقع است. حوضه مارون بسته به ارتفاع، اقلیم متفاوتی دارد؛ با توجه به سیستم تقسیم‌بندی آب‌وهوا در سیستم کوپن سه نوع اقلیم مدیترانه‌ای سرد، نیمه‌گرمسیری و نیمه‌خشک با تابستان خشک قابل تشخیص است. محدوده تپه ماهوری بررسی‌شده در این منطقه، آب‌وهوایی نیمه‌گرمسیری دارد. دشت مارون در محدوده زاگرس

^۱. Haibat and Choi

^۲. Shulan Guo et al.

چین خورده قرار گرفته و سازندهای گچساران، آسماری، بختیاری، گورپی، میشان، سروک، پابده و رسوبات کواترنری از جمله واحدهای لیتولوژیک است که در این منطقه جای گرفته‌اند.



شکل ۱ - نقشه موقعیت محدوده پژوهش در کشور و استان

روش‌شناسی پژوهش

در نخستین مرحله از منطقه مطالعه‌شده بازدید و در ادامه نقشه پهنه‌بندی ریسک فروچاله با مدل فازی تهیه شد. در مدل فازی هر پارامتر همزمان در مجموعه‌های مختلف، اما با درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک یا خود این دو حد را می‌پذیرد (Van Alphen and Stoorvogel, 2000: 1710). در نظریه 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 را نسبت می‌دهد. روش فازی با پنج عملگر که هریک نحوه عمل خاصی دارند، در محیط نرم‌افزار ArcGIS قابل اجراست (Carter,)

270: 1996). اجتماع فازی ۱، اشتراک فازی ۲، ضرب فازی ۳، جمع فازی ۴ و گاما ۵. عملگر گاما نقش تعدیلی در نتیجه جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی زیاد عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل و به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. مقدار گاما با قضاوت کارشناسی مبتنی بر نتایج حاصل از تجربه و تحلیل داده‌های مشاهده‌شده یا تجربیات موجود درباره موضوع بررسی‌شده تعیین یا با آزمون سعی و خطا در تطبیق با شواهد واقعی می‌شود؛ از این رو عملگر گاما موجب دستیابی به خروجی‌هایی شده است که مناسب‌ترین مقادیر ۷ را در تطبیق با واقعیت‌ها و در مقایسه با خروجی‌های حاصل از به‌کارگیری سایر عملگرها مشخص می‌کند. این عملگر برحسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی براساس رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\mu_{\text{combination}} = ((\text{Fuzzy Algebraic Product})^{1-\gamma} (\text{Fuzzy Algebraic Sum}))^{\gamma} \quad \text{رابطه ۲}$$

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 ، مقداری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهشی ضرب جبری فازی سازگاری دارد (Carter, 1996: 280) به‌منظور توسعه کارست سطحی مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

۱. منطقه مدنظر پیمایش و موقعیت، شرایط تشکیل و مشخصات ظاهری ۵۸ فروچاله برداشت شد.
۲. پارامترهای فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، فاصله از خط کنیک، اقلیم، فاصله از خطوط جریان در دامنه‌ها، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی به‌مثابه عوامل اصلی شکل‌گیری فروچاله‌ها انتخاب شد.
۳. تابع عضویت لایه‌های وکتور براساس نوع رابطه هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی تعیین شد (گفتنی است تابع عضویت تعریف‌شده برای لایه‌های رستری به‌صورت کارشناسی و بر مبنای نظر نگارندگان براساس آن چیزی است که در عملیات میدانی مشاهده شده است). هریک از پارامترهای مؤثر انتخابی به‌منزله یک مجموعه فازی با تابع عضویتی بیان شد که این تابع عضویت درجه تعلق اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین [۰، ۱] نشان می‌دهد؛ بنابراین تک‌تک لایه‌ها با توجه به هدف مدنظر براساس توابع عضویت فازی‌سازی شدند.

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

۴. همه پارامترها 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.

۵. در نهایت بنا بر میزان اهمیت هر لایه نسبت به سایر لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار EXPERT CHOICE، ضریبی برای هر لایه در نظر گرفته شد و لایه‌های یادشده در این ضرایب ضرب شدند.

۶. از بین پنج عملگر فازی، عملگر گاما ۰,۸ به مثابه بهترین ضریب تلفیق روی هم‌گذاری شناخته و نقشه پهنه‌بندی خطر توسعه فروچاله‌ها تهیه و در نهایت با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی در سه کلاس ریسک زیاد، ریسک متوسط و ریسک کم طبقه‌بندی شد. در ادامه تابع عضویت این لایه‌ها معرفی شد.

در این پژوهش از اطلاعات دما و بارش همه ایستگاههای سینوپتیک مجاور منطقه مطالعاتی، نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شیت کبیرکوه، تصویر ماهواره ای لندست ۲۰۱۸، نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ با عنوان بهبهان، نقشه کاربری اراضی و DEM ده متر محدوده مطالعه شده به مثابه داده‌های پژوهش استفاده شده است. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و تهیه نقشه‌های مورد نیاز از نرم‌افزارهای Excel و GIS^۱ و ENVI استفاده شده است.

^۱. Geographic Information System

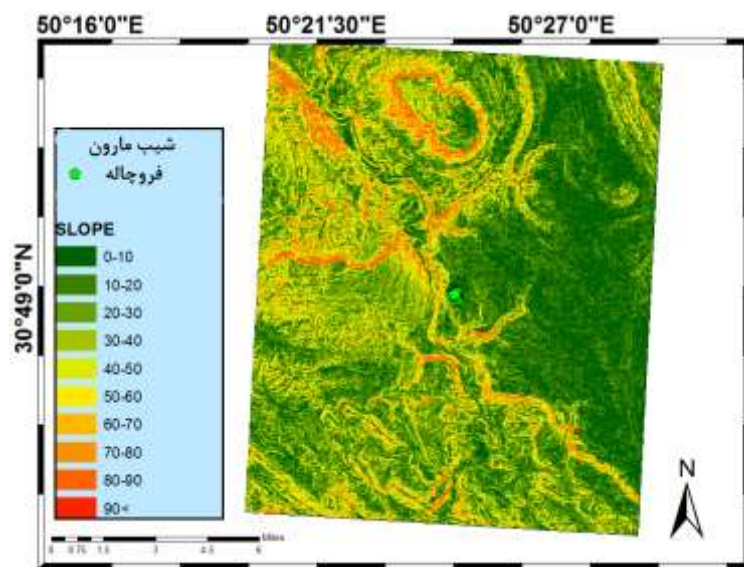


نمودار - ۱: ساختار کلی پژوهش

یافته‌های پژوهش

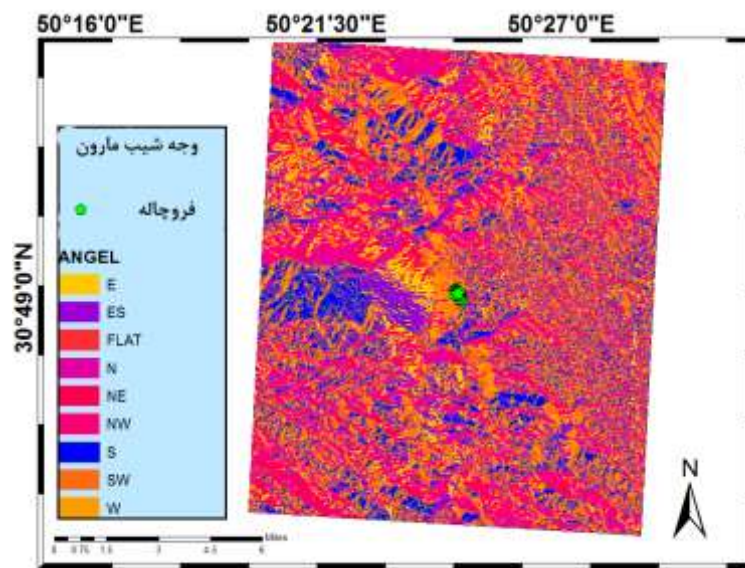
در بازدید میدانی انجام‌شده در مساحتی حدود ۱۶۰۰۰۰ مترمربع تعداد ۶۱ فروچاله با متوسط قطر کوچک ۲۱ متر و متوسط قطر بزرگ ۲۵ متر برداشت و میزان مساحت این ۶۱ فروچاله، ۴۰۱۶۶ مترمربع محاسبه شد؛ درنهایت پس از محاسبات انجام‌شده، مشخص شد حدود ۲۵ درصد از مساحت کل منطقه پیمایش‌شده را فروچاله دربرگرفته است. کمترین ارتفاع کل محدوده مطالعاتی، ۳۵۰ متر از سطح دریا و بیشترین آن، ۱۳۰۰ متر از سطح دریاست و فروچاله‌های برداشت‌شده در این ناحیه در ارتفاع ۷۵۰ تا ۸۰۰ متر قرار گرفته‌اند. شیب این منطقه حداقل ۰ درجه و حداکثر ۷۵ درجه دارد و موقعیت فروچاله‌ها نشان می‌دهد این پدیده در محدوده شیب زیر ۱۱ درجه ایجاد شده

است. باید توجه داشت برای شکل‌گیری فروچاله‌های گچی، علاوه بر ملایم و مناسب بودن شیب توپوگرافی منطقه، شیب رخنمون‌های گچی نیز بسیار مهم و مؤثر است. ویژگی مورفولوژیکی فروچاله‌های کشیده این ناحیه مطالعاتی، نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ آنهاست که این نسبت ۱ به ۳ اندازه‌گیری شد. می‌توان گفت این نسبت تابع ستبری لایه‌های گچی است. فرم عمومی این فروچاله‌ها کیفی شکل و براساس نظر فورد و ویلیامز^۱ (۱۹۸۹) مکانیزم شکل‌گیری فروچاله‌های با شیب زیاد در دیواره و مساحت کمتر در دهانه ریزشی است؛ بنابراین می‌توان گفت این فروچاله‌ها محصول همزمانی فرایند انحلال و ریزش گچ‌های سست شده هستند. اشکال ۲ تا ۱۱، نقشه‌های تهیه‌شده براساس پارامترهای فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، فاصله از خط کنیک، اقلیم، نقاط تمرکز جریان در دامنه‌ها، زمین‌شناسی، NDVI و کاربری اراضی‌اند.

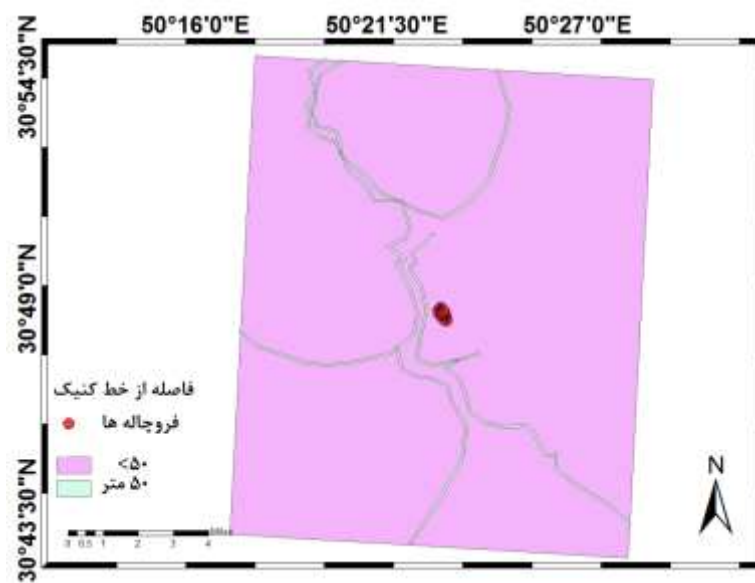


شکل - ۲: نقشه وجه شیب

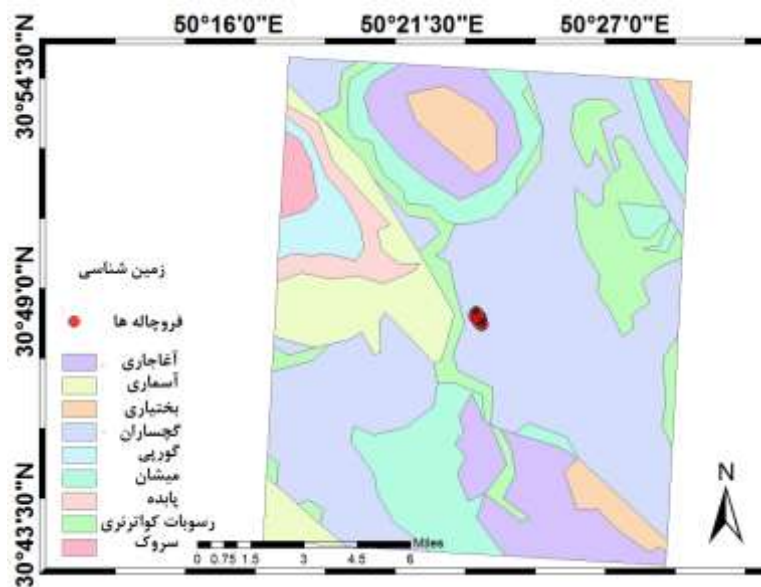
¹. Ford and Williams



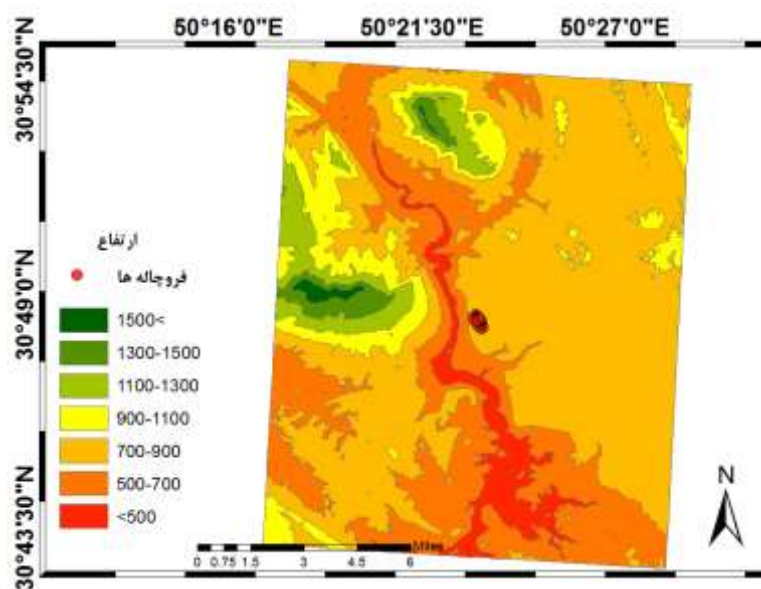
شکل - ۳: نقشه شیب



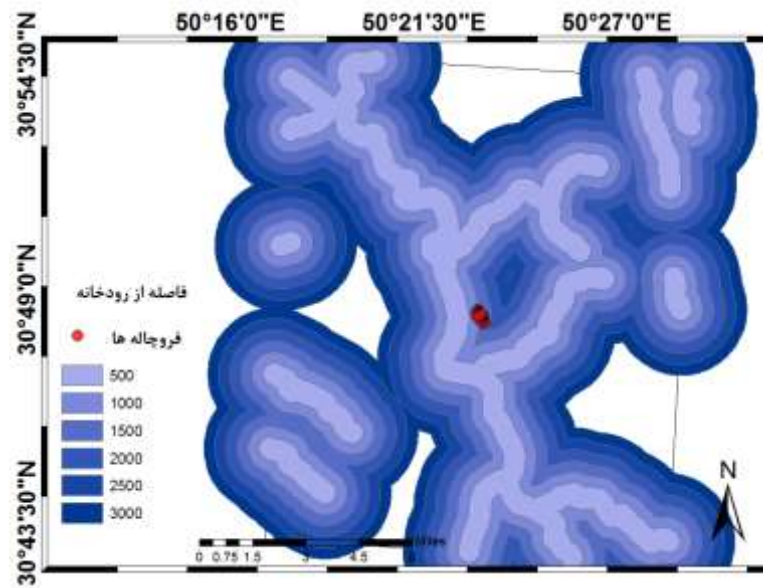
شکل - ۴: نقشه فاصله از خط کنیک



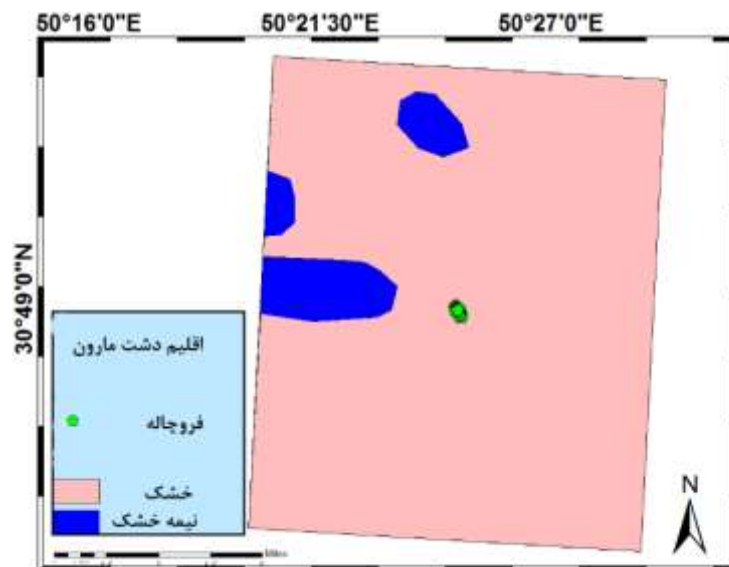
شکل - ۵: نقشه زمین‌شناسی



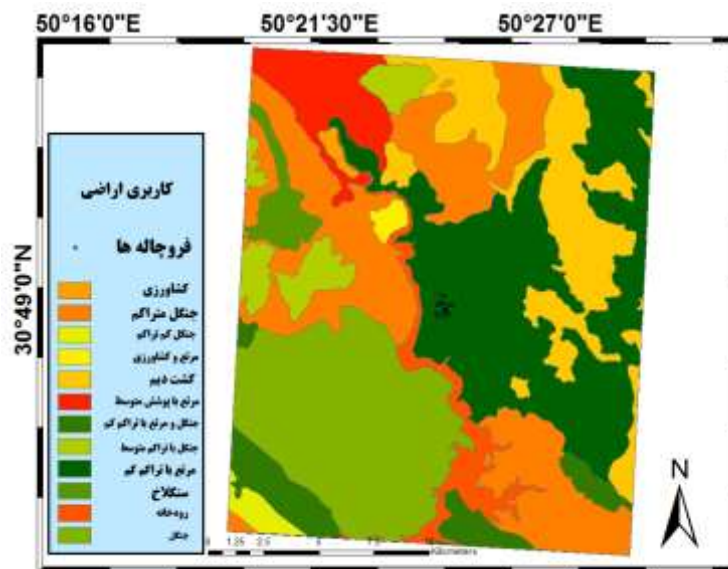
شکل - ۶: نقشه طبقات ارتفاعی



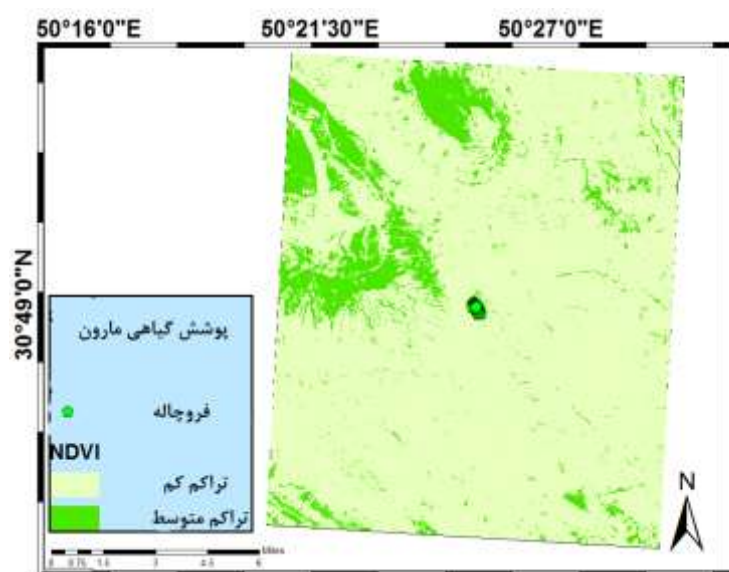
شکل - ۷: نقشه فاصله از رودخانه



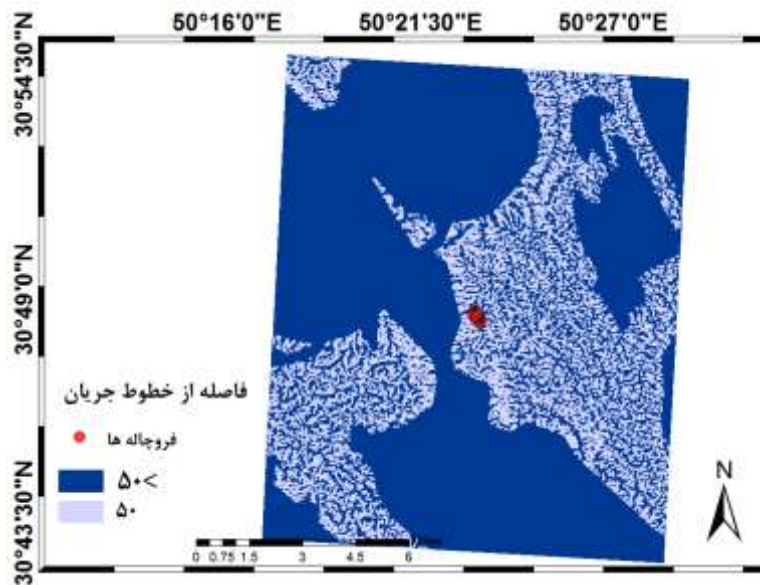
شکل - ۸: نقشه اقلیم



شکل - ۹: نقشه کاربری اراضی



شکل - ۱۰: نقشه NDVI



شکل - ۱۱: نقشه فاصله از خطوط جریان

زمین‌شناسی

فروچاله‌ها درواقع در سازندها و لایه‌های قابل انحلالی ازجمله آهک، گچ و نمک شکل می‌گیرند. در این مطالعه محدوده‌ای بررسی شده که سازند گچساران بخش عمده‌ای از آن را زیر پوشش قرار داده است. نقشه زمین‌شناسی در این پژوهش از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بهبهان استخراج شده است. با توجه به این مسئله که فروچاله‌های مطالعه‌شده صرفاً در لایه‌های گچی موجود در سازند گچساران شکل می‌گیرند، امتیاز کمی به سازندهایی همچون پابده و گورپی، شامل لایه‌های مارنی، تعلق می‌گیرد؛ بنابراین تنها سازند گچساران بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده و به سایر سازندها امتیاز صفر داده شده است.

دما و بارش (اقلیم)

با توجه به اهمیت دما و میزان بارش، با استفاده از آمار ۲۰ساله بارش و دمای محدوده مطالعه‌شده و براساس روش دمارتون^۱ (۱۹۶۲) نقشه اقلیم تهیه شد و براساس آن منطقه در دو محدوده خشک و نیمه‌خشک قرار گرفت. طبقه‌بندی اقلیمی دمارتون براساس عناصر دما و بارندگی پایه‌گذاری شده، ولی بین حرارت و مقدار رطوبت رابطه تجربی زیر را برقرار کرده است:

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad \text{رابطه ۳}$$

^۱. De Martonne

در این رابطه I ضریب خشکی، T متوسط درجه حرارت سالانه به سلسیوس و P متوسط بارندگی سالانه به میلی‌متر است؛ بر این اساس ۶ نوع اقلیم مشخص شده است.

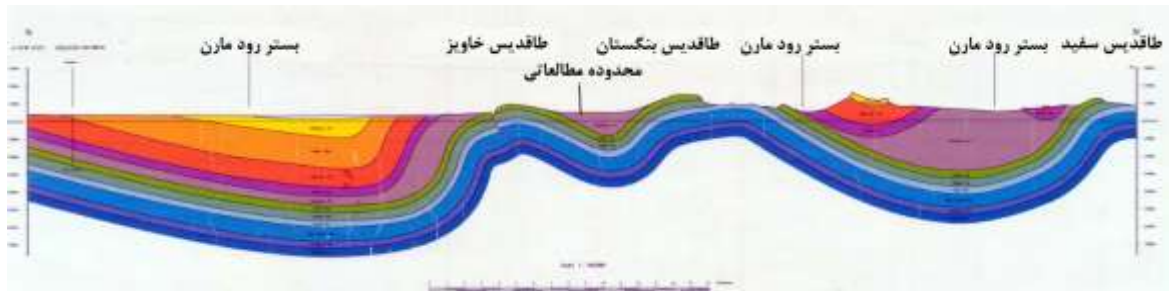
جدول- ۱: طبقه‌بندی اقلیمی دمارتون (۱۹۶۲)

نام اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتون (I)
خشک	$I < 10$
نیمه خشک	$10 < I < 19$
مدیترانه‌ای	$20 < I < 23.9$
نیمه مرطوب	$24 < I < 27.9$
مرطوب	$28 < I < 34.9$
بسیار مرطوب	$35 < I$

طبقات ارتفاعی

طبقه‌بندی ارتفاع در مطالعات مربوط به پدیده‌های کارست گچی با طبقه‌بندی ارتفاع در پهنه‌بندی پدیده‌های کارستی آهکی بسیار متفاوت است. قرارگیری سازندهای آهکی در ستیغ ارتفاعات به واسطه خصوصیات فیزیکی آن و قرارگیری سازند انعطاف‌پذیر گچساران در ناودیس‌ها این مسئله را تأیید می‌کند. 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 پس از رخداد فاز کوه‌زایی و به سبب آن، ایجاد چین‌خوردگی، لایه‌های سازند گچساران از روی بخشی از آهک آسماری شکل‌دهنده طاق‌دیس فرسایش یابد و بخشی از گچساران باقی بماند که در ناودیس‌ها قرار دارد و کمتر در معرض فرسایش قرار گرفته است؛ 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؛ همچنین این عامل، جهت رواناب‌ها و میزان تراکم شبکه زهکشی را کنترل می‌کند و در میزان رطوبت خاک و شیب دامنه‌ها نیز تأثیر دارد.

ارتفاع منطقه پژوهش، دامنه‌ای از ۴۷۰ تا ۱۶۷۰ متر را شامل می‌شود. براساس عضویت فازی محاسبه شده از تلفیق طبقات این عامل با پهنه‌های کارستی منطقه، پایین‌ترین طبقه ارتفاعی ۴۷۰ تا ۷۰۰ متر بیشترین تابع فازی (عدد ۱) را دارد و از ارتفاع ۸۸۰ متر به بالا پهنه کارستی یا پدیده کارستی وجود ندارد و عضویت فازی این محدوده ۰٫۱ به دست آمد.



شکل - ۱۲: نیم‌رخ زمین‌شناسی دشت مارون (منبع: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهبهان)

فاصله از خط کنیک

قرارگیری لایه‌های گچی سازند گچساران در مجاورت خط کنیک سبب می‌شود در نقاط تلاقی این لایه‌ها و جریان‌های متمرکز دامنه‌ای که در زمان بارندگی و سیلاب‌ها شکل می‌گیرند، پتانسیل تشکیل فروچاله‌ها افزایش یابد. در دشت جابر واقع در شمال شرقی شهر ایلام، یکی از عوامل مهم تشکیل فروچاله‌ها، همین عامل بوده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۵۸).

شیب

شیب و مورفولوژی دامنه‌ها تأثیر زیادی بر فرایند شکل‌گیری فروچاله‌ها دارد. برای بررسی این عامل با در نظر گرفتن این مسئله که مناطق دارای شیب کم فرصت نفوذ آب را در زمین افزایش می‌دهند و هرچه 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 کمترین میزان شیب را دارد، امتیاز بیشتری داده شده است. با بررسی‌های انجام‌شده، بیشترین مقدار عضویت فازی به طبقه شیب ۰ تا ۱۰ درجه اختصاص داده شد و کمترین مقدار امتیاز به مناطق با حداکثر شیب یعنی دامنه بین ۸۰ تا ۹۰ درجه تعلق دارد. البته باید به این نکته اشاره کرد که در شیب‌های بالای ۳۰ درجه، عضویت فازی پهنه‌ها کاهش می‌یابد؛ این موضوع نشان می‌دهد در شیب‌های بالاتر از ۳۰ درجه، شرایط برای شکل‌گیری فروچاله‌ها نامساعد می‌شود.

جهت شیب

براساس پژوهش‌هایی که تاکنون درباره جهت 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)؛ بنابراین در این پژوهش به جهت شمال و شمال غرب بیشترین امتیاز داده شده است؛ زیرا پتانسیل شکل‌گیری فروچاله در این مناطق بیشتر است.

کاربری اراضی

با بررسی نقشه کاربری اراضی براساس میزان تأثیرگذاری هر منطقه بر فرایند کارست‌زایی، بیشترین و کمترین میزان امتیاز برای هر منطقه در نظر گرفته شده است؛ بر همین اساس جنگل‌های دارای تراکم زیاد به این سبب که توانایی نگهداشتن رطوبت بیشتری را دارند، امتیاز ۱ را به خود اختصاص داده‌اند و به ترتیب با کم‌تر شدن میزان تراکم پوشش گیاهی این میزان امتیاز به حداقل یعنی ۰٫۱ رسیده است. زمین‌های کشاورزی با کشت دیم و باغ، کمترین میزان امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند.

پوشش گیاهی

پوشش گیاهی این محدوده مطالعاتی با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Landsat و تابع NDVI در محیط نرم‌افزار ENVI استخراج شده است. این محدوده مطالعاتی به دو بخش پوشش گیاهی نیمه‌متراکم و فاقد پوشش گیاهی تقسیم شده است. هرچه پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد، امتیاز بیشتری به لایه داده می‌شود؛ زیرا با افزایش تراکم پوشش گیاهی، حفظ رطوبت که عامل اصلی انحلال است، آسان می‌شود.

فاصله از رودخانه

انطباق آبرفت‌های رودخانه‌ای و سازند گچساران این مسئله را مطرح می‌کند که حضور گچ‌های سازند گچساران در قسمت زیرین آبرفت‌ها و مجاورت آنها با آب رودخانه‌ها، باعث انحلال گچ می‌شود و در نهایت ریزش آبرفت‌های رودخانه‌ای، نوع فروچاله رمبشی (collapse sinkhole) را ایجاد می‌کند؛ بنابراین نقشه فاصله از رودخانه نیز از پارامترهای بررسی شده بوده و هرچه فاصله از بستر رودخانه کمتر می‌شود، امتیاز بیشتری را به خود اختصاص داده است. در طبقه‌بندی ۵۰۰ متری فاکتور فاصله از رودخانه، کمترین میزان طبقه‌بندی (۰ تا ۵۰۰ متر) و عمده این منطقه شامل بستر رودخانه امتیاز ۱ دارد و هرچه فاصله بیشتر شود، این امتیاز کمتر می‌شود؛ زیرا به سبب فاصله از بستر رودخانه و بیشتر شدن ارتفاع از میزان مجاورت آب‌های جاری سطحی و همچنین زیرسطحی با لایه‌های گچی کاسته شده و محدوده ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر فاصله از بستر رودخانه امتیاز صفر را به خود اختصاص داده است.

فاصله از خطوط جریان

برای انجام این مطالعه، درمجموع از پنج منطقه دارای فروچاله‌های گچی با مشخصات ارتفاعی و اقلیمی بازدید شد. یکی از مکان‌هایی که عموماً این فروچاله‌ها در آن قرار گرفته‌اند، در مسیر آبراهه‌ها در دامنه‌های گچی سازند

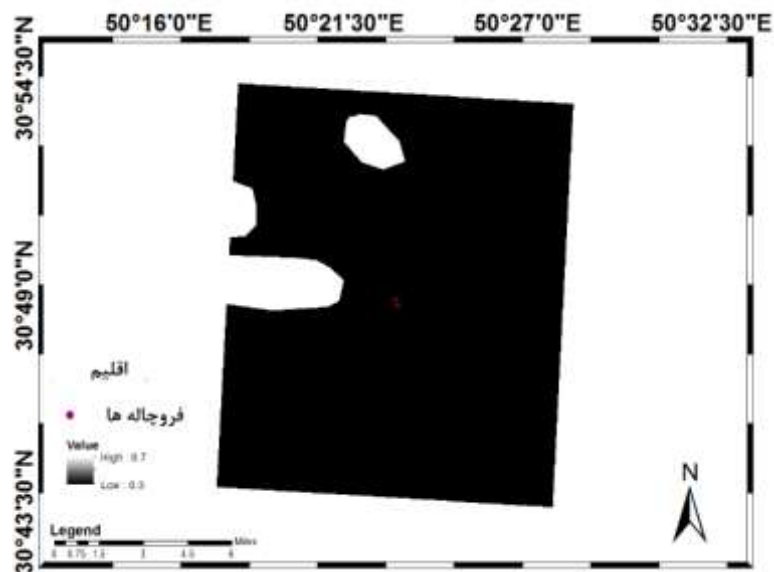
گچساران است. بازدیدهای میدانی انجام‌شده در منطقه مطالعاتی مارون گویای این مطلب است که بیشتر فروچاله‌های شکل گرفته در این ناحیه در مسیر آبراهه‌هاست؛ بنابراین برای کمی کردن این پارامتر، نقشه آبراهه‌های محدوده مطالعاتی که با سازند گچساران همپوشانی دارند، استخراج و در نهایت نقشه فاصله از خطوط آبراهه با فاصله ۵۰ متر تهیه شد. شکل ۱۳، نمونه‌ای از فروچاله‌های منطقه است که در مسیر آبراهه قرار دارند.



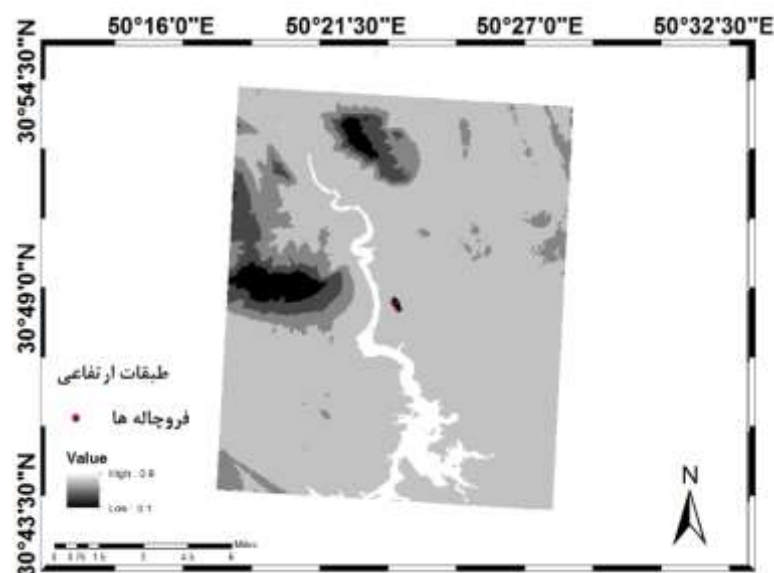
شکل - ۱۳: فروچاله‌های دامنه‌ای تشکیل شده در مسیر آبراهه - دشت مارون

با بررسی فروچاله‌های برداشت شده در دامنه تپه‌ماهورهای دشت مارون، حداکثر قطر بزرگ این فروچاله‌ها که موازی با جهت جریان است، ۵۰ متر و قطر کوچک آن که عمود بر جهت جریان قرار دارد، ۲۰ متر است. با استناد به ابعاد مشاهده شده در بازدیدهای میدانی، فاصله ۵۰ متری از خطوط جریان امتیاز ۱ دارد و برای مناطق خارج از این محدوده حداقل امتیاز، یعنی ۰,۵ در نظر گرفته شده است؛ درواقع تلاقی خطوط جریان با لایه‌های گچی از بالادست شرایط را برای شکل‌گیری فروچاله‌ها مهیا می‌کند. انحلال لایه‌های گچ از بالادست این خطوط جریان به مرور زمان به صورت زیرسطحی نیز انحلال ایجاد می‌کند و گسترش تونل‌های زیرزمینی و انحلال سطحی به صورت همزمان فروچاله‌های کشیده و دارای پونوره‌های متعدد را شکل می‌دهد.

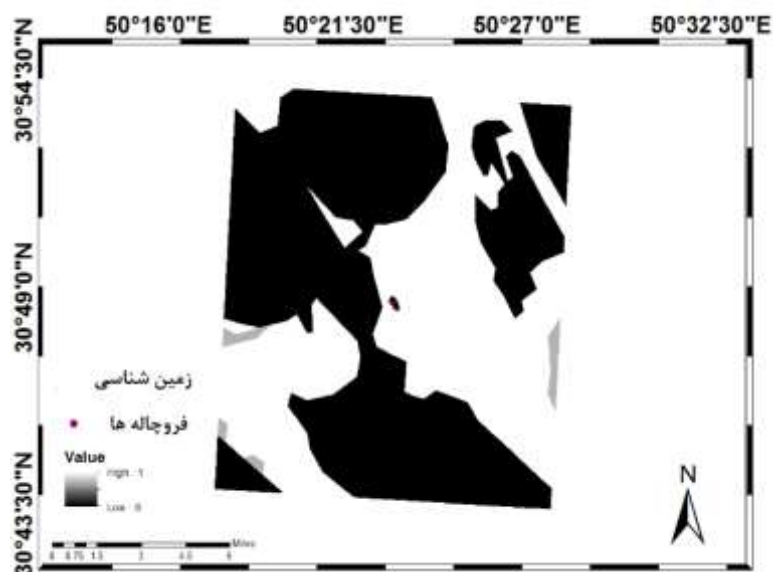
شکل‌های ۱۴ تا ۲۳، نقشه پارامترهای استفاده شده در مدل فازی هستند که براساس مدل و میزان تأثیرگذاری آنها بر تشکیل فروچاله‌ها امتیازدهی شده‌اند.



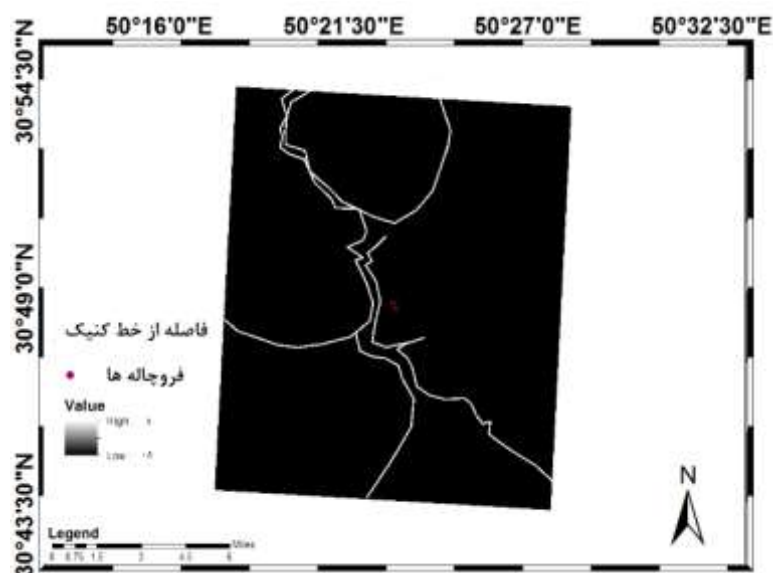
شکل - ۱۴: نقشهٔ اقلیم مدل فازی



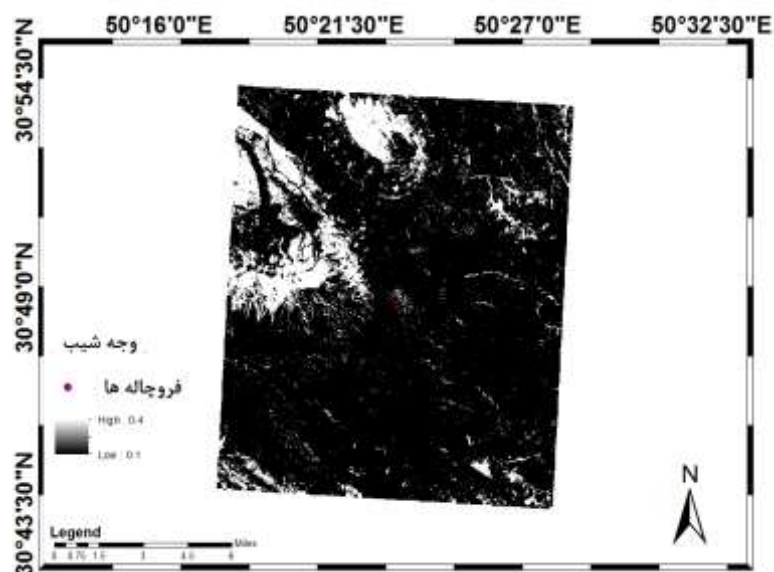
شکل - ۱۵: نقشهٔ طبقات ارتفاعی مدل فازی



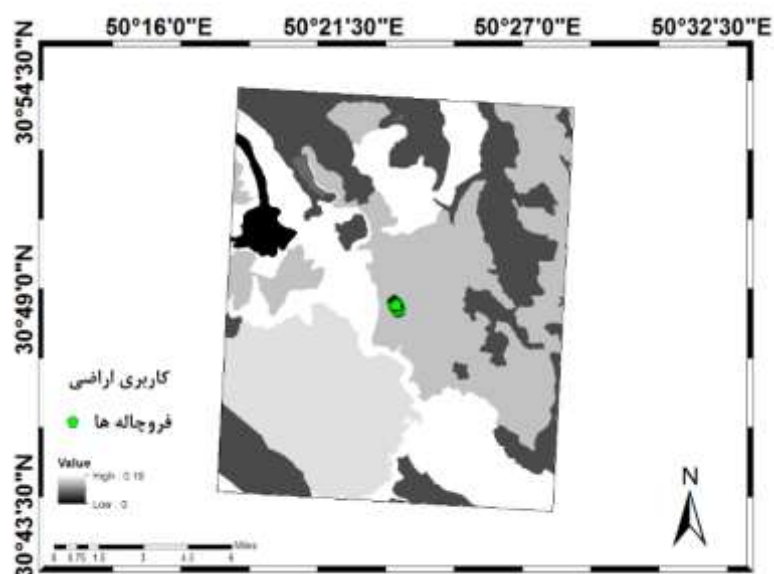
شکل - ۱۶: نقشه زمین‌شناسی مدل فازی



شکل - ۱۷: نقشه خط کنیک مدل فازی



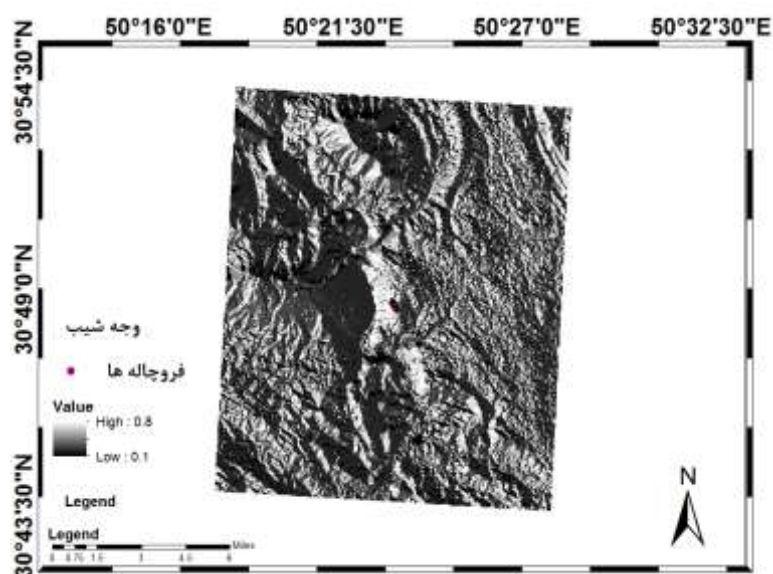
شکل - ۱۸: نقشه پوشش گیاهی در مدل فازی



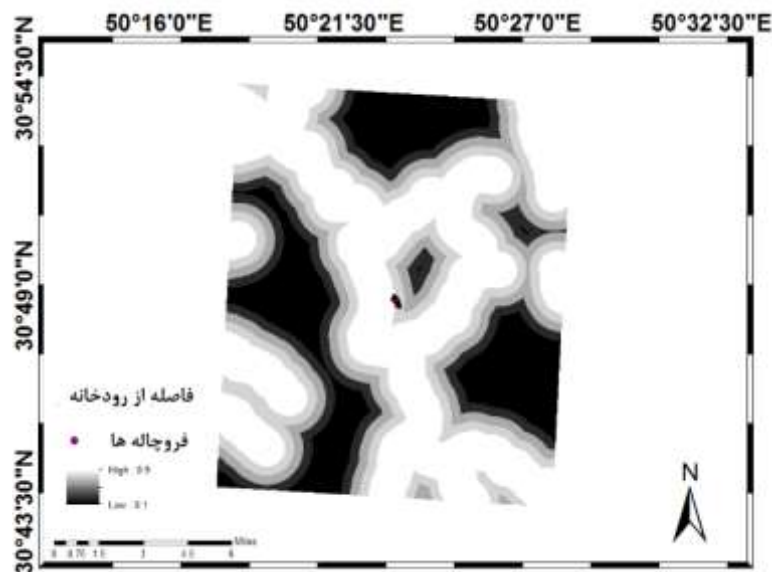
شکل - ۱۹: نقشه کاربری اراضی در مدل فازی



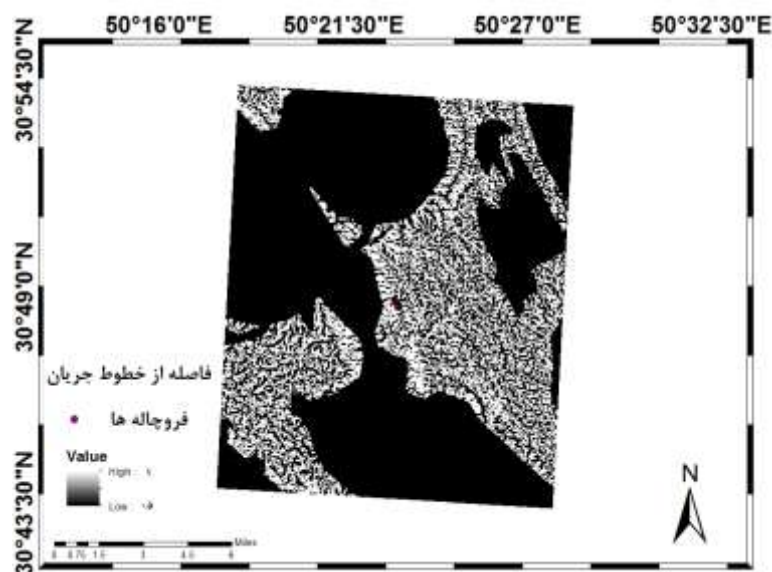
شکل - ۲۰: نقشه شیب در مدل فازی



شکل - ۲۱: نقشه وجه شیب در مدل فازی

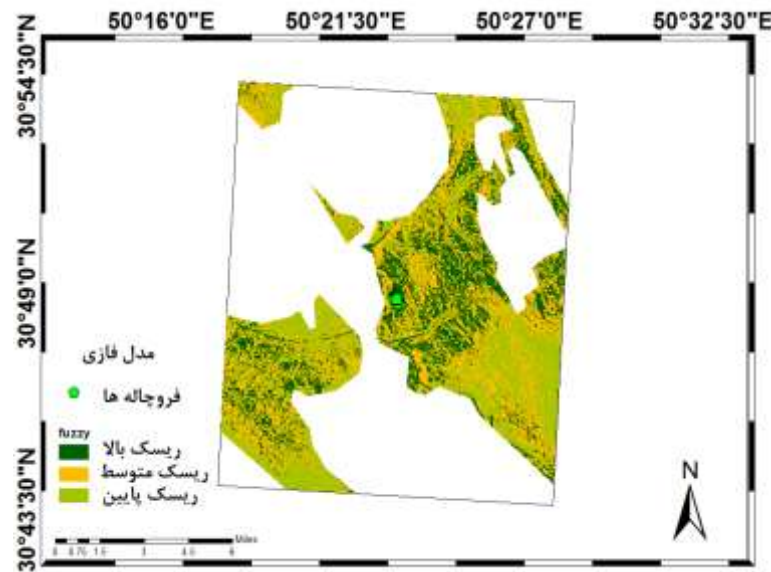


شکل - ۲۲: نقشه فاصله از رود در مدل فازی



شکل - ۲۳: نقشه فاصله از خطوط جریان دامنه‌ها در مدل فازی

درنهایت با استفاده از فاکتورهای بیان‌شده و در چهارچوب مدل فازی در محیط GIS، نقشه پهنه‌بندی تشکیل فروچاله‌های گچی در دشت مارون تهیه و برای اثبات میزان کارایی این نقشه، مکان تعداد ۵۸ فروچاله برداشت‌شده در بازدید میدانی روی نقشه مشخص شد. مدل استفاده‌شده دقت کافی را داشته است؛ زیرا ۹۵ درصد از فروچاله‌های برداشت‌شده در بازدید میدانی در منطقه با ریسک زیاد قرار گرفته است (شکل ۲۴).



شکل - ۲۴: نقشه استخراج شده در مدل فازی

بحث

براساس مشاهدات و بررسی‌های انجام‌شده، مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌گیری فروچاله‌های این منطقه به ترتیب طبقه‌بندی ارتفاعی، شیب مناسب، قرارگیری لایه‌های ستر گچ در مسیر آبراهه‌ها، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و جهت شیب است. قرارگیری سازند گچساران در ناودیس‌ها سبب می‌شود مناطق نزدیک به کف ناودیس‌ها به‌لحاظ امتیازبندی ارزش بیشتری داشته باشند. در این مناطق هرچه میزان شیب کمتر باشد، شرایط برای شکل‌گیری فروچاله‌ها مناسب‌تر است. جریان‌های متمرکزی که از بالادست به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند، در مسیر آبراهه‌ها لایه‌های گچ را دچار انحلال می‌کنند و علاوه بر انحلال سطحی در صورتی که درز و شکافی در مسیر خود داشته باشند، انحلال زیرسطحی را نیز ایجاد خواهند کرد. تلفیق انحلال سطحی و زیرسطحی، فروچاله‌های کشیده‌ای در مسیر آبراهه‌ها ایجاد می‌کند که حاصل فرایند ریزش و انحلال خواهد بود. حال اگر پوشش گیاهی متراکم باشد، میزان رطوبت منطقه حفظ و انحلال نیز آسان می‌شود.

نوع فعالیت‌های انسانی نیز عامل مؤثری در تشکیل فروچاله‌ها محسوب می‌شود. فعالیت‌هایی مانند کشاورزی سنتی و آبیاری این مناطق، انحلال زیرسطحی را تسریع می‌کند و در کنار عوامل طبیعی، این تحول سریع‌تر شکل می‌گیرد. جهات شیبی که کمتر در معرض نور مستقیم خورشید قرار دارند و همچنین وجود پوشش گیاهی در این دامنه‌ها سبب می‌شود آب ناشی از بارش فرصت نفوذ بیشتری پیدا کند و از تشکیل رواناب جلوگیری شود؛ بنابراین دامنه‌های سایه‌گیر مانند جهت شمال، بیشترین پتانسیل شکل‌گیری فروچاله را دارند.

مطالب بیان شده همگی در گرو شرایط اقلیمی قرار دارند؛ به این معنی که اگر تمامی شرایط برای شکل‌گیری فروچاله‌ها مهیا باشد، اما شرایط اقلیمی و میزان بارش مناسب نباشد، فروچاله‌ای شکل نخواهد گرفت.

نتیجه‌گیری

فروچاله‌های گچی با وجود تأثیر بسیار زیاد بر تأسیسات و جاده‌ها کمتر توجه پژوهشگران را جلب کرده‌اند. در این پژوهش سعی شده است تأثیرگذارترین عوامل بر شکل‌گیری فروچاله‌های گچی شناسایی شوند تا در برنامه‌ریزی و مدیریت سازه‌ها و تأثیراتی که این پدیده بر آنها دارد، سودمند واقع شوند.

قرارگیری سازند گچساران در ناودیس‌ها عملاً محل قرارگیری اشکال کارستی گچی را در ارتفاعات پایین‌تر ممکن ساخته است؛ بر همین اساس پایین‌ترین طبقه ارتفاعی ۴۷۰ تا ۷۰۰ متر، بالاترین تابع فازی (عدد ۱) را دارد و از ارتفاع ۸۸۰ متر به بالا، پهنه کارستی یا پدیده کارستی وجود ندارد و عضویت فازی این محدوده ۰٫۱ به دست آمد. مجاورت و قرارگیری بستر رودخانه‌ها روی سازند گچساران سبب می‌شود لایه‌های گچی این سازند در مجاورت جریان سطحی آب رودخانه قرار گیرد و شکل‌گیری فروچاله‌ها آسان شود؛ به همین سبب کمترین میزان فاصله از بستر رودخانه که ۰ تا ۵۰۰ متر را شامل می‌شود، امتیاز ۱ دارد و هرچه فاصله بیشتر شود، این امتیاز کمتر می‌شود؛ بنابراین محدوده ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر فاصله از بستر رودخانه امتیاز ۰٫۱ را به خود اختصاص داده است.

یکی دیگر از عوامل مهم شکل‌گیری فروچاله‌ها در محدوده مطالعاتی، قرارگیری لایه‌های گچی در مجاورت خط کنیک است که سبب می‌شود جریان آب دامنه‌ای ناشی از بارندگی در محدوده خط کنیک فرایند انحلال را به راحتی انجام دهد. فاصله ۵۰ متری از خطوط کنیک امتیاز ۱ دارند. بازدیدهای میدانی انجام شده در منطقه گویای شکل‌گیری این اشکال در مسیر آبراهه‌ها در دامنه‌های سازند گچساران است. با توجه به اینکه بیشتر فروچاله‌های مشاهده شده در دشت مارون تابع آبراهه‌اند و در مسیر آبراهه قرار دارند، شکل عمومی فروچاله‌ها کشیده است و بیشتر آنها چندین پونور دارند. فاصله زیر ۵۰ متر از خطوط آبراهه امتیاز ۱ دارد.

پهلوانی‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی حوضه آبریز سد مخزنی جرّه استان خوزستان، دو پهنه کارستی با پتانسیل متوسط و زیاد و همچنین یک افق کارست زیرسطحی و یک گسل امتدادلغز را شناسایی کرده‌اند که نقش فعالیت‌های تکتونیکی در ایجاد مناطق کارستی و لغزشی درون مخزن را نشان می‌دهد. برخلاف مطالعه یادشده، در این مطالعه عوامل شیب کم، زمین‌شناسی منطقه، طبقات ارتفاعی پایین و محل تلاقی آبراهه‌ها با لایه‌های گچی سازند گچساران در دامنه‌ها، بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری فروچاله‌ها داشته‌اند. نتیجه به‌دست‌آمده در نقشه پهنه‌بندی تحول و تکامل کارست گچی نشان می‌دهد از مجموع ۴۰۲/۷ کیلومترمربع محدوده دشت مارون، میزان ۱۱/۲ درصد در پهنه ریسک زیاد قرار گرفته که ۹۵ درصد فروچاله‌ها را در خود جای داده است؛ ۱۸/۵ درصد در پهنه ریسک متوسط قرار گرفته که ۵ درصد فروچاله‌ها را دربرگرفته است و ۱۵/۱ درصد منطقه در پهنه ریسک کم قرار گرفته است. گفتنی است ۵۵/۲ درصد از این چهار گوشه بر سازندهای پاینده و گورپی، بختیاری، آسماری و

میشان منطبق بوده است؛ بنابراین ریسک شکل‌گیری فروچاله‌های گچی در این سازندها صفر درصد و غیرممکن است. در بررسی نهایی این منطقه مطالعاتی، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل مؤثر در تشکیل فروچاله‌ها در این منطقه، شیب و قرارگیری لایه‌های گچ در مجاورت خطوط آبراهه است.

منابع

- ۱- پهلوانیزاده، سعید، کلانتری، نصرالله، محمدی، هادی، سامانی، بابک، (۱۳۹۶). بررسی عوامل مؤثر در فرایند کارستیشن و لغزش در حوضه آبریز سد مخزنی جرّه استان خوزستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۷، شماره ۳، ۸۳-۹۴.
- ۲- حیدری، زهرا، قدیمی، مهنوش، رضایی عارفی، مرتضی، حیدری، زینب، (۱۳۹۹). شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع فروچاله‌ها با استفاده از شاخص‌های کمی مورفومتریک؛ مطالعه موردی: دشت کرمانشاه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۹، شماره ۲، ۲۱۵-۲۲۶.
- ۳- زمانی، حمزه، حسنیور، جعفر، چشمی، اکبر، (۱۳۹۶). پهنه‌بندی پتانسیل وجود حفرات کارستی و کاربرد آن برای پیشبینی خطر هجوم آب به داخل تونل ناشی از وجود این حفرات برای استان مازندران، چهارمین کنفرانس ملی کاربرد سامانه اطلاعات مکانی GIS در صنعت آب و برق.
- ۴- سازمان زمینشناسی کشور، (۱۳۴۹). نقشه زمینشناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- ۵- صفاری، امیر، قناتی، عزت‌الله، علیجانی، فرشاد، محمدی، زکیه، (۱۳۹۵). مروری بر خصوصیات لندفرمهای کارستی در لایه‌های گچی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۴، ۱۷-۳۹.
- ۶- علمیزاده، هیوا، (۱۳۹۱). تحلیل مورفولوژی و شیب در ارتباط با فرسایش؛ نمونه موردی: حوضه نجی، سپهر، دوره ۲۰، شماره ۸۰، ۷۹-۸۳.
- ۷- قبادی، محمدحسین، ساعدی، بهمن، مهدیآبادی، ناصر، احمدزاده، جواد، (۱۳۹۲). معرفی پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست توده آهکی بیستون-پراو، هشتمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۷ و ۱۸ شهریور ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۸- قربانی، محمدصدیق، محمودی، فرج‌الله، یمانی، مجتبی، مقیمی، ابراهیم، (۱۳۸۹). نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی؛ مطالعه موردی: ناهمواری‌های شاهو، غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، ۱-۱۶.
- ۹- کریمی، حاجی، (۱۳۹۰). بررسی سازوکار تشکیل فروچاله‌های دشت جابر در جنوب شرق استان ایلام، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱، شماره ۲، ۱۲۵-۱۳۹.

- ۱۰- کریمی، حاجی، (۱۳۸۹). ارتباط سیستم ساختمانی و کارستشدگی، مجموعه مقالات دومین سمپوزیوم بین‌المللی منابع آب کارست در ایران، تهران.
- ۱۱- کریمی، حاجی، گرابی، پرویز، توکلی، محسن، (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر وقوع فروچاله با استفاده از رگرسیون چندمتغیره؛ مطالعه موردی: فروچاله‌های ریزشی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، ۵۳-۶۲.
- ۱۲- محمدیان، محمد، لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد، قبادی، محمدحسین، (۱۳۹۴). انحلالپذیری سنگهای گچی سازند گچساران و اثرات زیستمحیطی آن در شرق استان خوزستان، دوره ۱۳، شماره ۳، ۱۱-۲۴.
- ۱۳- مددی، عقیل، همتی، طاهر، (۱۳۹۴). پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی با استفاده از مدل منطق فازی؛ مطالعه موردی: منطقه نمک‌آبرود شهرستان چالوس، دوفصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال ۳، شماره ۵، ۸۹-۱۰۲.
- ۱۴- مقصودی، مهران، کریمی، حاجی، صفری، فرشاد، چهارراهی، ذبیح‌الله، (۱۳۸۸). بررسی توسعه کارست در توده پراو و بیستون با استفاده از ضریب فورد، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۱، شماره ۶۹، ۵۱-۶۵.
- ۱۵- مکرم، مرضیه، نگهبان، سعید، (۱۳۹۸). بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارست‌شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۳۰، پیاپی ۷۴، شماره ۲، ۱۲۱-۱۳۴.
- ۱۶- مؤمنی‌پور، مهدی، (۱۳۹۵). مطالعه نئوتکتونیک و فرسایش حوضه مارون با تکنیک ژئومورفومتری، پژوهش‌های فرسایش محیطی، جلد ۶، شماره ۳، ۳۳-۵۱.
- ۱۷- موسوی، سید قائم، صادقیان، رضا، (۱۳۹۵). بررسی منطق فازی و کاربرد آن در مسائل پیچیده، ماهنامه پژوهش ملل، دوره ۲، شماره ۱۵، ۷۷-۸۹.
- ۱۸- یمانی، مجتبی، شمسی‌پور، علیاکبر، جعفری‌اقدام، مریم، باقری سید شکری، سجاد، (۱۳۹۲). بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، نشریه علوم زمین، سال ۲۲، شماره ۸۸، ۵۷ تا ۶۶.

19-Arezoomand Omid Langrudi, M., Javadi, S., Hashemi, S.R., (2016). **Evaluation of vulnerability of aquifers by improved fuzzy drastic method: Case study: Aastane Kocesfahan plain in Iran**, Ain Shams Engineering Journal, Vol. 7, Issue 1, Pages 11-20.

20-Caniani, Donatella, Lioi, Dnnata Serafina, I.M., Manicia, Masi, Salvatore, (2015). **Hierarchical Classification of Groundwater Pollution Risk of Contaminated Sites Using Fuzzy Logic: A Case Study in the Basilicata Region (Italy)**, School of

- Engineering, University of Basilicata, viale dell'Ateneo Lucano n. 10, Potenza 85100, Italy.
- 21-Carter, M.W., 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, Pages 3-19.
 - 22-Cooper, H., Anthony, (2006). **Gypsum dissolution geohazards at Ripon, North Yorkshire**, UK, IAEG2006 Field Trip Guide Ripon.
 - 23-Cooper, A.H., 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, Vol. 6, Karst Geomorphology.
 - 24-Chu, H., Xu, G., Yasufuku, N., Yu, Z., Liu, P., Wang, J., (2017). **Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on two-class fuzzy comprehensive evaluation method**, Arabian Journal of Geosciences, 10 (7), [179].
 - 25-De Martonne, E., (1926). **Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité**, Meteorologie 2, 449-458.
 - 26-Entezari, M., Aghaeipour, Y., (2018), **Zonation of Karst development using Entropy Model (Case study: Paraw – Bistoon mountain masses)**, Journal of Geography and Environmental Planning, Vol 29, Vol. 2, Ser No. (70) Summer.
 - 27-Ford, D.C., Williams, S., (1989). **Karst geomorphology and hydrology**, 601 p.
 - 28-Ford, D.C., Williams, P.W., (2007). **Karst Hydrogeology and Geomorphology**, Wiley, Chichester, 562 p.
 - 29-Guo, Sh., Yan, CH., Yu, L., Liu, Y., Zhou, Y., 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, 26 (2), 257–269.
 - 30-Guo, Sh., Yan, CH., Yu, L., Liu, Y., Zhou, Y., 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 (2020), 26 (2), 257–269.
 - 31-Haibat, A., Choi, J., (2019). **Risk Prediction of Sinkhole Occurrence for Different Subsurface Soil Profiles due to Leakage from Underground Sewer and Water Pipelines**, Sustainability 2020, 12, 310.
 - 32-Klimchouk, Alexander, (1996). **The typology of Gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution**, Int. J. Speleol. 25 (3-4).

- 33-Landsat 8 T1, 22 march, (2018).
- 34-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**, Geopersia 6 (2), PP. 265-282.
- 35-Mull, D.S., Neilsen, D.M., Quinlan, J.F., (1988). **Application of dye – tracing techniques for determine solute transport characteristics of Groundwater in karst terrains**, United States Environmental Protection Agency.
- 36-Rajabi, M., Hejazi, A., Almasi, GH.S., (2017). **Zonation of Superficial Karst Development Using Fuzzy logic method (Case study: Shirez Karstic masses)**, Science Arena publications, Vol. 1 (1): 50-59.
- 37-Van Alphe, B.J., Stoorvogel, J.J., (2000). "A Functional Approach to Soil Characterization in Support of Precision agriculture", Soil sci.soc, 64, Pp. 1706-1713.
- 38-Waltham, T., Waltham, A.C., Bell, F.G., Culshaw, M.G., (2005). **Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction**, Springer Science & Business Media.
- 39-White, W.B., (1988), **Geomorphology and Hydrology of karst**, oxford university press. Quinlan, j, 1989, Groundwater monitoring in karst terrains, EPA. 600/ x.
- 40-William, P., Ford, D., (2007). **Karst hydrogeology and geomorphology**, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 1-578.