پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال سیزدهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۳
صص. ۱۵۶-۱۳۹

شناسایی گستره پیدایش فروچاله‌ها به روش مدل‌سازی رابطه ای در اَلَموت، شمال استان قزوین

نادر جلالی – استادیار بازنشسته پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
پرویز آرمانی* – دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین.
محمد طارمی – غارنورد و عضو انجمن غارنوردی استان قزوین.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸ تائید نهایی: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

چکیده

شناسایی فروچاله‌ها از دید زمینریخت‌شناسی (ژئوموفولوژی) و آبشناسی دارای اهمیت بسزایی است. فضاهای زیرزمینی و مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا، گستره‌هایی هستند که در آنها احتمال فروریزش مواد پوشاننده‌ی سازندهای انحلال‌پذیر و پیدایش فروچاله وجود دارد. جستجوها بر پایه نقشه مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا، برای شکل‌گیری فروچاله ها انجام گرفت و با دخالت دادن نقش عوامل تاثیرگذار، مانند دما، بارش و تمرکز جریان سطحی آب و فشردگی خطواره‌های زمین‌شناسی، مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها بر فراز مناطق امید، شناسایی شدند. برای انجام این پژوهش از لایه‌های اطلاعاتی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا، نقشه گسل‌ها و خطواره‌های زمین شناسی، نقشه‌های پهنه‌های اقلیمی و همدمای تهیه شده توسط اداره کل هواشناسی استان، تصاویر لندست سنجنده +ETM و نقشه تمرکز جریان سطحی آب بهره‌گیری شد. در این پژوهش، از روش تلفیق لایه‌های اطلاعاتی با بهره‌گیری از معیارهای تصمیم‌گیری، استفاده شد. برای این کار، لایه‌های پهنه‌های اقلیمی و پهنه‌های هم‌دما و لایه‌های فشردگی خطواره‌ها و تمرکز جریان، دو به دو و نتایج به دست آمده باهم قطع داده شدند. به هریک از حالت‌های پیش آمده ناشی از قطع لایه‌های اطلاعاتی، در قالب جدول‌های دو بعدی، متناسب با ماهیت و اثرگذاری هریک از اجزای آن‌ها بر انحلال سنگ‌های کربناته، وزن متناسب اختصاص داده شد. انطباق نسبی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها با برداشت‌های میدانی و نقشه فروچاله‌های محاسبه شده از طریق مدل رقومی ارتفاع، درستی یافته‌ها را ثابت نمود. بیش از ۶۶ درصد مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در فاصله کمتر ۲۰۰ متری از فروچاله‌های قرارگرفته است. بنابراین روش کار رفته در این پژوهش، می تواند به عنوان یک روش سریع و کم هزینه، در شناسایی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله ها در گستره سازندهای انحلال‌پذیر به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: فروچاله، کارست، تصویر فروسرخ گرمایی، مدل‌سازی، الموت قزوین.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: armani@sci.ikiu.ac.ir

مقدمه

زمینديس‌های[1] (زمین‌ریخت) کارستی سهم مهمی در جذب بارش‌ها و نفوذ آب به درون زمین دارند. فروچاله[2] گونه‌ای از زمینديس‌های کارستی است که به صورت طبیعی در مناطقی پدید می آید که سازندهای انحلال‌پذیر مانند سنگ‌آهک، سنگ گچ و سنگ نمک در محل وجود داشته باشند. در این راستای پژوهش‌هایی در کشور انجام شده است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹؛ اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۴۰۰؛ آذربون و همکاران، ۱۴۰۱). یکی از جاهایی که فروچاله‌ها به فراوانی در آنجا دیده می‌شوند شمال الموت در مرز میان استان‌های قزوین با مازندران و گیلان است (شکل ۱). در این گستره نزدیک به ۲۰۰ فروچاله در روی زمین، شناسایی شد (آرمانی و طارمی، ۱۴۰۰).

شکل ۱- نمایی از فروچاله‌های شمال خاوری روستای ویار (نفت چاک) در مرز میان استان‌های قزوین- مازندران و گیلان

از سوی دیگر عواملی مانند آب‌های اسیدی، شرایط اقلیمی مناسب، ساختارهای زمین‌شناسی و زمین‌لرزه در پیدایش آن‌ها موثر هستند. رده‌بندی‌های گوناگونی از فروچاله‌ها توسط (Waltham and Fookes, 2003; Gutiérrez et al. 2014; Nam et al. 2020) انجام شده است. بر پایه بررسی آرمانی و همکاران (۱۴۰۰)، فروچاله‌های گستره شمال الموت از گونه انحلالی[3] و رُمبشی[4] هستند. به عنوان نمونه، تأثیر برداشت از منابع آب زیرزمینی در منطقه کارستی خشک و نیمه خشک در ابرکوه، باعث پیدایش ۲۸ فروچاله در دشت فیض‌آباد آن گستره شده است (Soldo et al. 2020).

امروزه به دلیل دخالت بیش از اندازه انسان در طبیعت و برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی، پیدایش فروچاله‌ها، افزایش روزافزون یافته است. برداشت بی‌رویه آب از دشت‌های کشور یک بحران زیست محیطی را رقم زده است. با توجه به نرخ بالای افت سفره‌های آب زیرزمینی و تکرار دوره‌های خشکسالی، به جرات می توان گفت که تمام دشت‌های کشور ایران در معرض خطر فرونشست و گاهی فروچاله‌ها و وارد شدن آسیب به زیرساخت‌ها، قرار دارند. برای شناخت و محاسبه میزان فرونشست دشت‌ها، روش‌هایی مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری ارایه شده‌اند، اما در راستای شناسایی مناطق در معرض خطر فروچاله در دشت‌ها روش شناخته شده‌ای وجود ندارد. شاید ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش برای جستجوی این مناطق، توجه به روش‌های جستجوی مناطق امید به وجود منابع کارستی و فضاهای زیرزمینی باشند (آرمانی و جلالی، ۱۴۰۱).

---

[1] Landforms

[2] Sinkhole

[3] Dissolution sinkhole

[4] Collapse sinkhole

برای شناسایی محدوده‌های دارای فضاهای زیرزمینی و مناطق امید به وجود منابع آب کارستی موجود در آن‌ها، فرض بر این است که سطح زمین بر فراز این مناطق به دو حالت انتقال گرمایی و تبخیر از راه درز و شکاف و فروچاله ها، بخش های خردشده و فروریخته، زیر تاثیر قرار می گیرند و این تاثیر با دورسنجی گرمایی قابل شناسایی است.

بررسیهایی که توسط محمودی و ملکی (۱۳۸۰) در ناهمواریهای بیستون انجام شد، نشان داد که در مکان‌هائی که تحول کارست پیشرفته است، توان های قوی در جذب آب و ذخیره آن ایجاد می‌شود. یکی از مهمترین پژوهش‌ها در رابطه با ارزیابی کمی خطر پیدایش فروچاله‌ها، معرفی روشی است که توسط Galve et.al, (2008)، در یک منطقه‌ای به مساحت ۵۰ کیلومترمربع، در بخشی از سازندهای تبخیری کارستی دره اِبرو (Ebro)، بطور مستقل مورد ارزیابی قرار گرفت. این روش بر مبنای داده‌های میدانی بیش از ۱۰۰۰ فروچاله کوچک و بزرک (سه نوع متمایز از نظر پیدایش و اندازه) در دشت سیلابی و پادگانه‌ها و با بهره‌گیری از روش‌های آماری برای انتخاب نوع فروچاله و عوامل موثر، انجام گرفت. درستی مدل که با بهره‌گیری از نقشه پراکنش فروچاله‌ها در سال ۲۰۰۵ با داده‌های مکانی سال ۲۰۰۶ مورد ارزیابی قرار گرفت، نشان داد مدل برای فروچاله‌های نوع ۳ (اندازه بزرگ در دشت سیلابی) کارآیی دارد. آنچه در این پژوهش اهمیت داشت شناسایی مناطق دارای استعداد پیدایش فروچاله‌های بزرگ در محدوده‌ی سازندهای انحلال‌پذیر کارستی بود. از سویی دیگر، دسترسی به داده‌های پراکنش مکانی فروچاله‌ها و عوامل موثر در پیدایش آنهاست که اهمیت دارد زیرا که معمولا با محدودیت دسترسی همراه است. در این پژوهش از ۸ لایه اطلاعاتی از جمله زمین‌ریخت‌شناسی، آبیاری، ستبرای رسوبات و داده‌های پیزومترها بهره‌گیری شد.

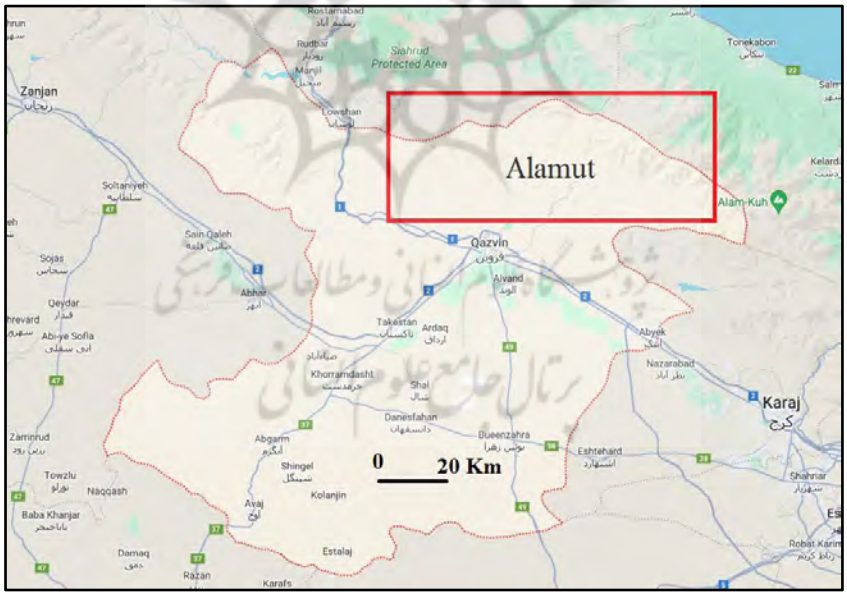
به نظر (Parise, 2019)، فروچاله‌ها (دولین‌ها)، گودال‌هایی در مناطق کارستی هستند که به همراه دیگر زمینديس‌های کارستی، طی فرایند انحلال، در سنگهای انحلال پذیر به سوی پایین دیده می شوند. برای کنترل و پیشگیری از ریزش سقف مناطق دچار انحلال شده، پیش بینی پیدایش فروچاله‌ها دشوار است. بنابراین آنها جزء پرخطرترین پدیده‌های زمین‌شناسی در نواحی کارستی به شمار می روند که می‌توانند باعث آسیب‌های جدی شوند. این ارتباط مستقیم سطح زمین با منابع آب کارستی می‌تواند راهیابی آلاینده‌ها را به منابع آب که دارای جریان سریع هستند را نیز فراهم کند. امیری و همکاران (۱۳۸۳) بر پایه پیمایش‌ها، بررسی‌ها و اندازه‌گیری های میدانی ویژگی‌ها و مختصات فروچاله‌های دشت فامنین را شناسایی و ثبت کردند و گزارش کردند که وجود حفره های انحلالی، مجاری آب، سیستم درز و شکاف در سنگ بستر آهکی و پمپاژ آب آن‌ها عامل اصلی تولید فروچاله‌های منطقه بوده است. افزون بر این، عواملی چون ماسه‌شویی لایه‌ها، خروج گاز از چاه‌ها و افت سریع تراز آب زیرزمینی نیز در تسریع پیدایش فروچاله‌ها موثر بوده‌اند. پهنه‌بندی خطر فروچاله‌ها با بهره‌گیری از روش وزن شواهد، در دشت کبودر آهنگ- فامنین توسط جعفری و محمدی (۱۳۹۸)، انجام شد. ایشان چنین نتیجه‌گیری کردند که پیش‌بینی پیدایش فروچاله‌ها، نیاز به درک شرایط و فرآیندهای دخیل در ایجاد آنها دارد و مهمترین عوامل مؤثر در ایجاد و پیدایش فروچاله‌ها در این دشت به ترتیب، تراز آبهای زیرزمینی، زمین‌شناسی، کاربری زمین و دامنه ارتفاعی بوده و بالاترین حساسیت در زمین‌شناسی نیز مربوط به سازندهای آهکی است.

قربانی و همکاران (۱۳۸۹) نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول زمین‌ریخت‌شناسی فروچاله‌های کارستی، در ناهمواری شاهو، بخشی از زاگرس بلند، واقع در باختر ایران، را مورد بررسی قرار دادند. این ناهمواری دارای شرایط مناسبی برای گسترش زمینديس‌های کارستی، بویژه فروچاله‌ها، بوده است. نبود نشانه‌ای از فروچاله‌های کارستی در دامنه‌های شمالی با بلندی کمتر از ۱۸۰۰ متر، با وجود مناسب‌بودن دیگر شرایط از نظر شیب، سنگ‌شناسی و دخالت زمینساخت و فراوانی معنی‌دار فروچاله‌های کارستی در بلندی‌های بیش از ۱۹۰۰ متر، نشان از نقش بارز شرایط اقلیمی و استقرار دوره‌های سرد پلئیستوسن و وجود برف دایمی در گسترش انحلالی فروچاله‌های کارستی می‌باشد. در اقلیم خشک به سبب محدود شدن نفوذ آب و تغذیه سازندهای کارستی، انحلال در سطح سازندها با محدودیت شدید همراه خواهد بود. نرخ گسترش زمینديس-های کارست به طور سنتی از راه دیدگاه اقلیمی مورد واکاوی قرار گرفته است. رواناب و تمرکز جریانهای سطحی، عامل

اصلی کنترل کننده گسترش کارست است. این دیدگاه باید با توجه به آگاهی روزافزون از اهمیت فرآیندهای مستقل از آب و هوا مرتبط با منابع ژرفزادی[۱] اسیدیته نیز مورد ارزیابی دوباره قرار گیرد (Augusto et al., 2003).

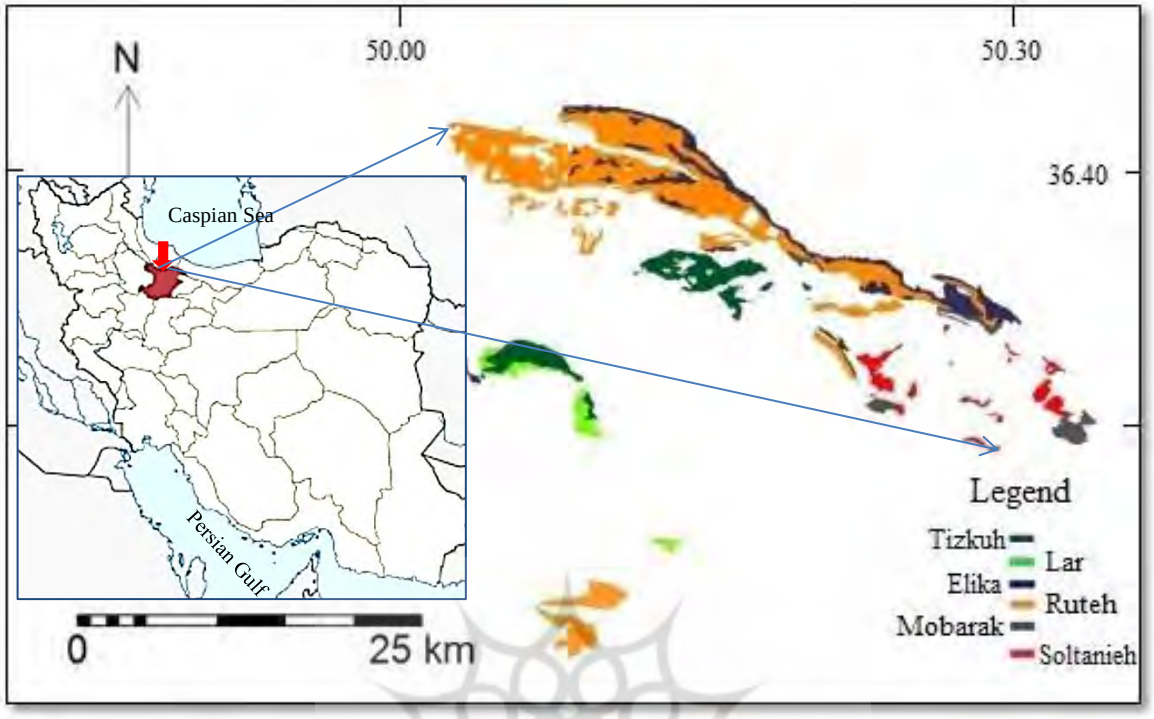
زمین شناسی گستره پژوهش

گستره مورد بررسی در مرز شمالی استان قزوین و در همسایگی با استان‌های گیلان و مازندران واقع شده است. این گستره از راه رازمیان و روستای ویار دسترس پذیر است (شکل ۲). برپایه نقشه زمین شناسی، سازندهای کربناته با سن گوناگون در بخش‌های شمالی استان قرار دارند و پدیده کارست زایی در همه این سازندها وجود دارد. در شکل ۳، بخشی از نقشه زمین‌شناسی شمال استان قزوین (برگه جواهرده، در مقیاس ۱۰۰۰۰۰: ۱، بهارفیروزی و همکاران ۱۳۸۲) که در برگیرنده منطقه مورد بررسی است، نشان داده شد. در این گستره سازندهای دوره‌های پرمین تا کرتاسه برونزد دارند. سازند دورود (P_d) با تناوبی از ماسه سنگ، شیل و سنگ‌آهک؛ سازند روته (P_r) سنگ‌آهک؛ سازند الیکا (TR_e^{dl}) سنگ دولومایت؛ واحد سنگی $TR_3j_2^{s,sh}$ با تناوب لای‌سنگ، شیل، ماسه سنگ و شن سنگ (کنگلومرا) همراه با لنزها و لایه‌های زغالسنگ؛ سازند تیزکوه (K_t^l) با سنگ‌آهک‌های نازک تا ستبر و گاهی توده‌ای؛ سنگ‌های آتشفشانی و توف کرتاسه بالایی (K_2^v)؛ و واحد سنگی K_2^v با سنگ های آتشفشانی با ترکیب متوسط تا بازیک همراه با لایه های آذرآواری در گستره کار رخنمون دارند. وجود سازندهای آهکی تراوا در استان قزوین نشانگر توان این استان در پیدایش فروچاله در سازندهای سخت است. این پژوهش و بررسی‌های تکمیلی می تواند به شناسایی مناطق دارای استعداد فروچاله‌ها بیانجامد و دستاوردهای آن مبنا و راهنمایی برای پی‌جویی‌های دقیق‌تر میدانی قرار گیرد.



شکل ۲. جایگاه گستره الموت در شمال استان قزوین و استان های همسایه (برگرفته از گوگل مپ)

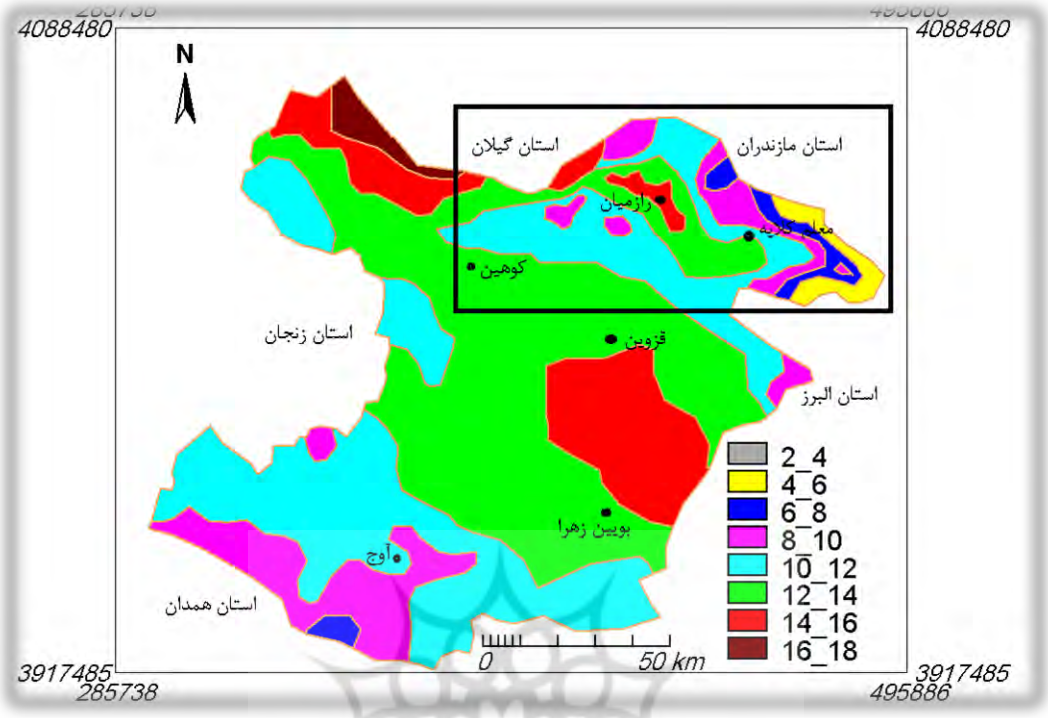
[۱] Hypogenic



شکل ۳. پراکندگی سازندهای کربناته گستره الموت در شمال استان قزوین (برگرفته از غضنفری و همکاران، ۱۳۹۴، با کمی اصلاح).

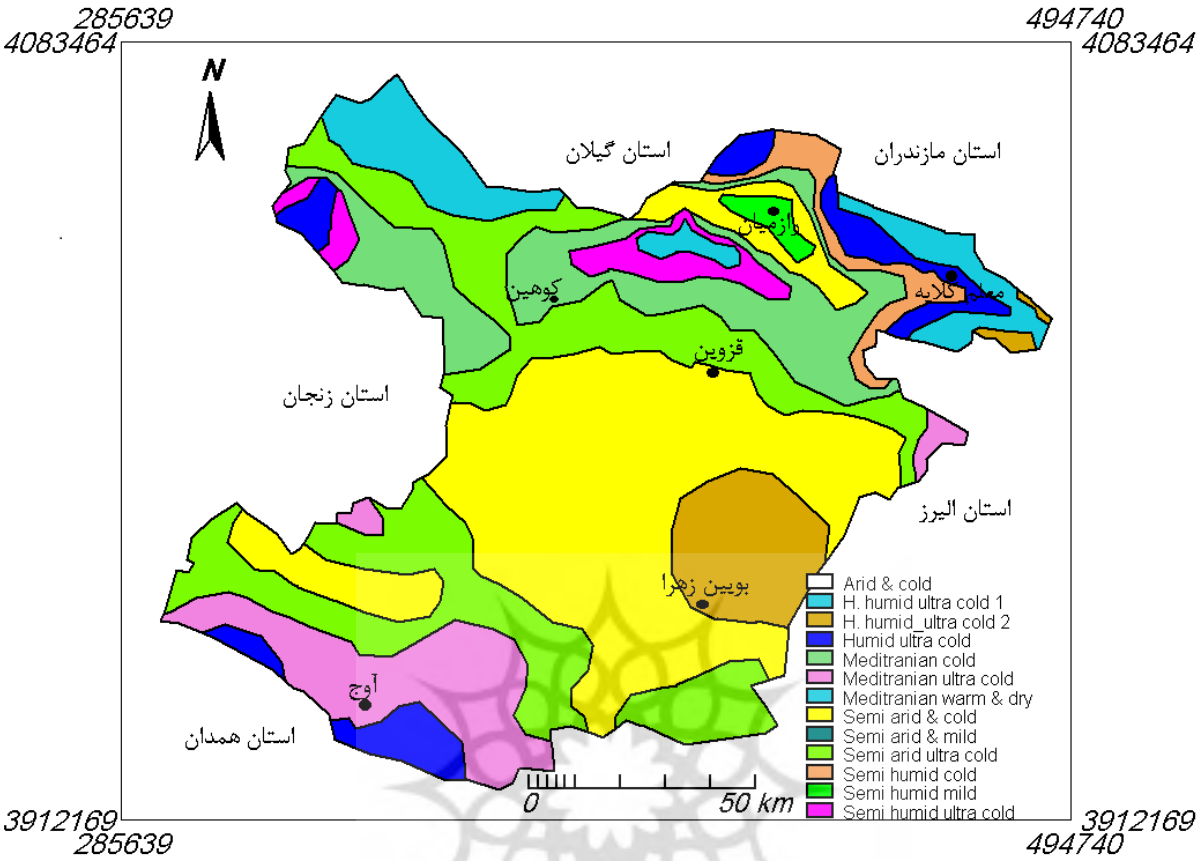
اقلیم

شرایط اقلیمی و آب و هوایی در میزان انحلال گاز کربنبک در آب و نرخ انحلال سازندها موثر است (قربانی، ۱۳۸۹). اگرچه در مناطق گرم و نمناک گاز کربنیک بیشتر تولید می شود، لیکن در آبهای سرد است که میزان انحلال گاز کربنیک افزایش یافته و در نتیجه اسیدیته آب افزایش می‌یابد. میزان انحلال‌پذیری سنگ‌های کربناته، به تغییرات دما و میزان انحلال گاز گربنیک و اسیدیته (خورندگی) آبهای سطحی نفوذی به آن‌ها وابسته است. به عبارتی افزایش اسیدیته آب افزایش میزان انحلال کربنات‌ها را سبب می‌شود. برپایه قانون هنری، حلالیت گازها در آب، با فشار، نسبت مستقیم و با گرما رابطه وارونه دارد. چون حلالیت کربنات‌ها به مقدارگاز $Co2$ حل‌شده در آب وابسته است در نتیجه هرچه دما کم باشد حلالیت کربنات نیز به همان نسبت بیشتر خواهد بود (مقیمی، ۱۳۹۱). گستره کار بیشتر دارای میانگین دمایی ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۴).



شکل ۴. پهنه‌های دمایی استان قزوین و گستره پژوهش (چهارگوش سرخ رنگ) (اداره کل هواشناسی استان قزوین، ۱۳۹۵)

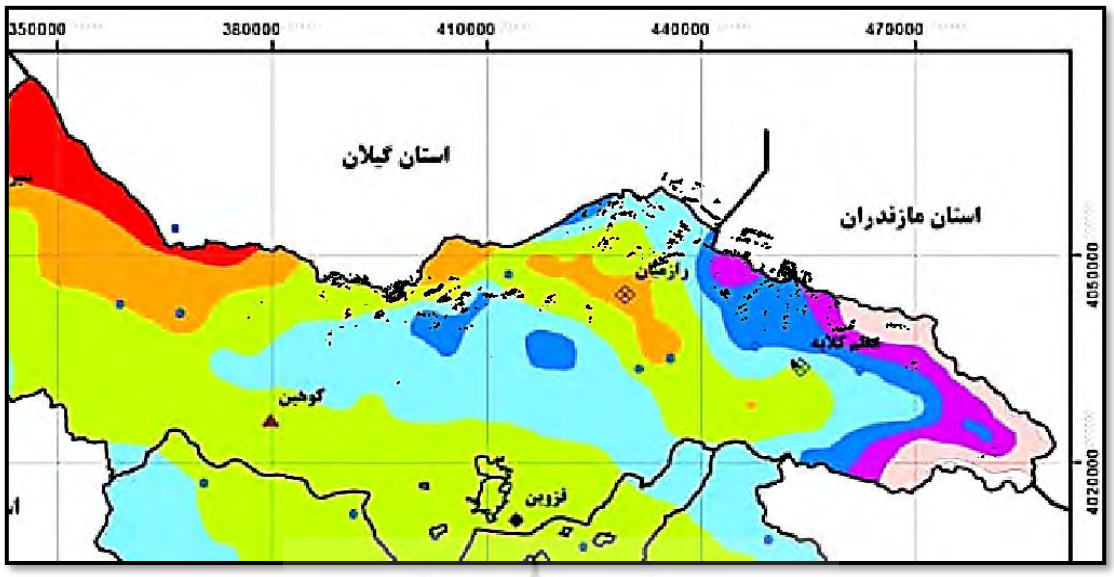
وجود آب فاکتور اصلی اقلیمی در گسترش فرایند کارستزایی است، این عامل اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش سازندهای انحلال‌پذیر است. وجود آب به عنوان حلال، سایر عوامل آب و هوایی را زیر تأثیر قرار می‌دهد و در صورت نبود آب به میزان کافی و به حالت مایع، اثر حل کنندگی سایر عوامل محدودتر می‌شود. از اینرو در موضوع انحلال سازندهای کربناته افزون بر جنس سنگ، از یک رابطه خطی کاهنده برای دما و رابطه‌ی خطی افزاینده برای عامل بارش بهره‌گیری می‌شود (صفاری و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین، انحلال‌پذیری سازندهای کربناته از وضعیت اقلیم تاثیر می‌پذیرند، به گونه‌ای که پدیده انحلال در سازندهای آهکی در اقلیم‌های سرد و مرطوب به مراتب بیشتر از میزان آن در اقیم‌های گرم و خشک است. گستره کار بیشتر در اقلیم نیمه نمناک سرد قرار گرفته است (شکل ۵).



شکل ۵. پهنه‌های اقلیمی استان قزوین (اداره کل هواشناسی استان قزوین، ۱۳۹۵)

مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا

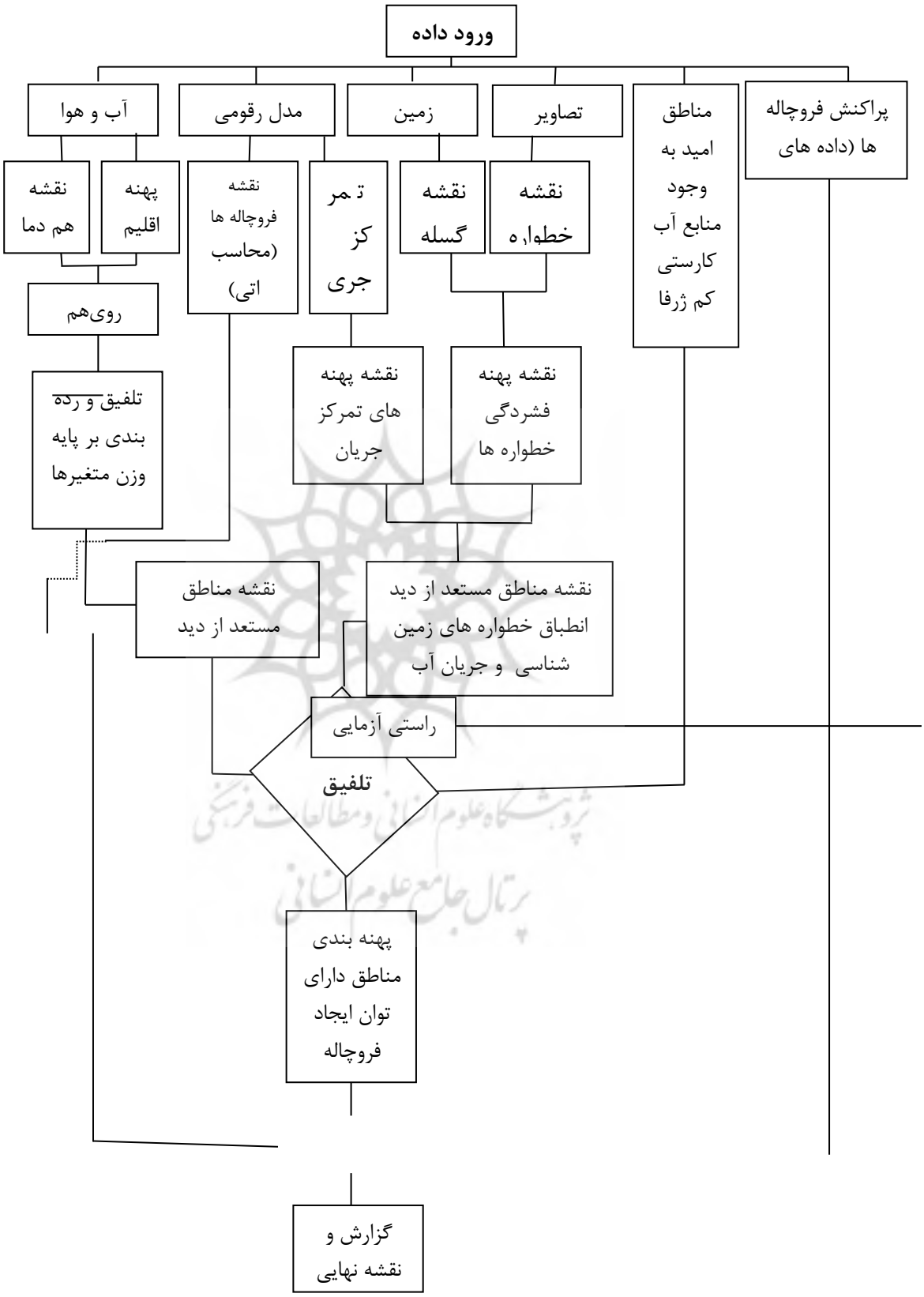
برای شناسایی پراکنش مکانی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا در شمال استان قزوین، از داده‌های سنگ شناسی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و مشتقات آن، شاخص گیاهی نرمال شده و تصاویر ماهواره‌ای ETM^{+} برای طول روز و فصل تابستان و تعمیم معیارها و قانونمندی‌ها در قالب مدل‌سازی رابطه‌ای بهره‌گیری شده است (آرمانی و جلالی، ۱۴۰۱). پراکنش مکانی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در شمال استان قزوین در شکل ۶، نشان داده شده است. این نقشه به عنوان یک لایه اطلاعاتی، پایه‌ی بررسیها و جستجوهای تکمیلی با هدف شناسایی گستره‌های دارای استعداد پیدایش فروچاله‌ها، قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش شناسایی گستره های دارای توان پیدایش فروچاله در بخشی از شمال استان قزوین و توسعه روشی برای شناسایی اینگونه گستره ها در مناطق همانند می باشد.



شکل ۶. نقشه پراکنش مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا (لکه‌های به رنگ سیاه) در شمال استان قزوین و بخشهایی از استان‌های گیلان و مازندران (تصویر زمینه، نقشه پهنه‌های هم‌دمای استان است، آرمانی و جلالی، ۱۴۰۱)

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش از لایه‌های اطلاعاتی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا در شمال استان قزوین، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱۰۰,۰۰۰: ۱، نقشه گسل‌ها و خطواره‌های زمین شناسی، نقشه‌های پهنه‌های اقلیمی و همدما، تصاویر ماهواره‌ای لندست سنجنده ETM^+ و نقشه تمرکز جریان سطحی آب به دست آمده از پردازش مدل رقومی ارتفاع (DEM) گستره پژوهش بهره‌گیری شد. تمام لایه‌های اطلاعاتی از جمله پهنه‌های اقلیمی و هم‌دمای استان به صورت رقومی به سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) وارد شدند. لایه‌های داده‌های گسل‌ها و خطواره‌های زمین شناسی به همراه نقشه تمرکز جریان آبهای سطحی نیز تولید و در سامانه اطلاعات جغرافیایی مورد بهره‌گیری قرار گرفتند (شکل ۷). برای شناسایی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها، از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی با بهره‌گیری از معیارهای تصمیم‌گیری، عمل شد. برای تلفیق لایه های اطلاعاتی، لایه‌های پهنه‌های اقلیمی و پهنه‌های هم‌دما و لایه‌های فشردگی خطواره‌ها و تمرکز جریان، دو به دو باهم قطع داده شدند و دو نقشه حاصل از این عمل برهم‌گذاری، نیز با هم قطع داده شدند. به هریک از حالتهای پیش آمده ناشی از قطع لایه‌های اطلاعاتی، در قالب جداول دو بعدی، متناسب با ماهیت و اثرگذاری هریک از اجزای آنها بر انحلال سنگهای کربناته، یک کد (عدد وزن) میان ۱ (وزن کم) تا ۵ (وزن زیاد) اختصاص داده شد. نقشه پایانی حاصل از وزن‌دهی به صورت مناطق دارای توان زیاد، متوسط و کم برای پیدایش فروچاله‌ها، تولید شد. برای راستی آزمایی یافته‌ها از انطباق محل فروچاله‌هایی که جایگاه مکانی آنها طی بازدیدهای میدانی با GPS برداشت شده بودند و نقشه پراکنش مکانی فروچاله‌های محاسبه شده با استفاده از مدل رقومی ارتفاع، بهره‌گیری شد.



شکل ۷. نمودار گردشی روش کار

همان‌گونه که اشاره شد جستجو برای مناطق دارای استعداد پیدایش فروچاله‌ها، به سطح مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا محدود شده است. بر پایه نقشی که شرایط اقلیمی، دما، فشردگی خطواره‌ها و میزان تمرکز جریان آبهای سطحی در فرایند انحلال سنگ‌های کربناته دارند، به حالتهای محتمل ناشی از تلفیق آنها وزن اخصاص یافت. در جدول ۱، وزنهای اختصاص یافته به تلفیق هریک از حالت‌های لایه‌های پارامترهای فشردگی خطواره‌ها و تمرکز جریان و در جدول ۲، وزنهای اختصاص یافته به انطباق هریک از لایه‌های پارامترهای دما و پهنه‌های اقلیمی ارایه شدند.

جدول ۱. وزنهای اختصاص یافته به انطباق هریک از طبقات پارامترهای تمرکز جریان و تراکم خطواره‌ها

Flow accumulation	Lineament density	Low density	Moderate density	High density
Low flow accum.		1	1	2
Modeerate flow accum.		2	3	3
High flow accum.		2	3	3

جدول ۲. وزن‌های اختصاص یافته به تلفیق هریک از حالت‌های لایه‌های پارامترهای دما و پهنه‌های اقلیمی

وزن	مساحت(Km^2)	پهنه های اقلیمی	گروه دمایی(°C)
۵	۴۶	بسیار مرطوب_ فراسرد۲	۶-۴
۵	۱۷۷	بسیار مرطوب_ فراسرد۱	۶-۴
۵	۱۷۰	بسیار مرطوب_ فراسرد۱	۸-۶
۵	۱۰۷	مرطوب_ فراسرد	۸-۶
۴	۱۰۳	بسیار مرطوب_ فراسرد۱	۱۰-۸
۴	۴۷۹	مرطوب_ فراسرد	۱۰-۸
۴	۱۳	مرطوب_ فراسرد۱	۱۰-۸
۳	۹	نیمه رطوب_ سرد	۱۰-۸
۳	۵۱۱	مدیترانه ای فراسرد	۱۰-۸
۳	۵۸	نیمه خشک فراسرد	۱۰-۸
۴	۴۱	بسیار مرطوب_ فراسرد۱	۱۲-۱۰
۴	۳۵	مرطوب_ فراسرد	۱۲-۱۰
۳	۳۰۰	نیمه رطوب_ فراسرد	۱۲-۱۰
۳	۳۵۷	نیمه رطوب_ سرد	۱۲-۱۰
۳	۴۳۸	مدیترانه ای فراسرد	۱۲-۱۰
۲	۸۹۵	مدیترانه ای سرد	۱۲-۱۰
۳	۱۵۱۷	نیمه خشک فراسرد	۱۲-۱۰
۲	۵۱۰	نیمه خشک و سرد	۱۲-۱۰
۳	۱۸۴	بسیار مرطوب_ فراسرد۲	۱۴-۱۲
۳	۱	نیمه رطوب_فرا سرد	۱۴-۱۲

۲	۹	نیمه رطوب_ سرد	**۱۴-۱۲**
۲	۲۴	نیمه مرطوب معتدل	**۱۴-۱۲**
۲	۸۶۶	مدیترانه ای سرد	**۱۴-۱۲**
۱	۹	گرم مدیترانه و خشک	**۱۴-۱۲**
۳	۱۲۴۴	نیمه خشک فراسرد	**۱۴-۱۲**
۲	۳۶۶۶	نیمه خشک و سرد	**۱۴-۱۲**
۴	۷۲۶	بسیار مرطوب_ فراسرد۲	**۱۴-۱۴**
۴	۰,۳	مرطوب فراسرد	**۱۶-۱۴**
۳	۱	نیمه رطوب_ سرد	**۱۶-۱۴**
۲	۱۰۰	نیمه مرطوب معتدل	**۱۶-۱۴**
۲	۵	مدیترانه ای سرد	**۱۶-۱۴**
۱	۳۰۱	گرم مدیترانه ای و خشک	**۱۶-۱۴**
۳	۱۱۹	نیمه خشک فراسرد	**۱۶-۱۴**
۲	۶۳۱	نیمه خشک و سرد	**۱۶-۱۴**
۱	۲۲۶	گرم مدیترانه ای و خشک	**۱۸-۱۶**

تلفیق

نقشه‌های مرتبط به جدول‌های ۱ و ۲ که در بردارنده نقش ترکیبی عوامل یاد شده‌ی موثر در پیدایش فروچاله‌ها است که منتج به تولید جدول ۳، شد. برپایه داده‌های این جدول و به روش داوری کارشناسی و با توجه به ماهیت و تاثیرگذاری هریک حالت‌های محتمل، توان خطر پیدایش فروچاله‌ها شناسایی شد.

جدول ۳. دسته‌بندی مناطق بالقوه آسیب‌پذیر در برابر پیدایش فروچاله‌ها بر پایه ترکیب وزنی

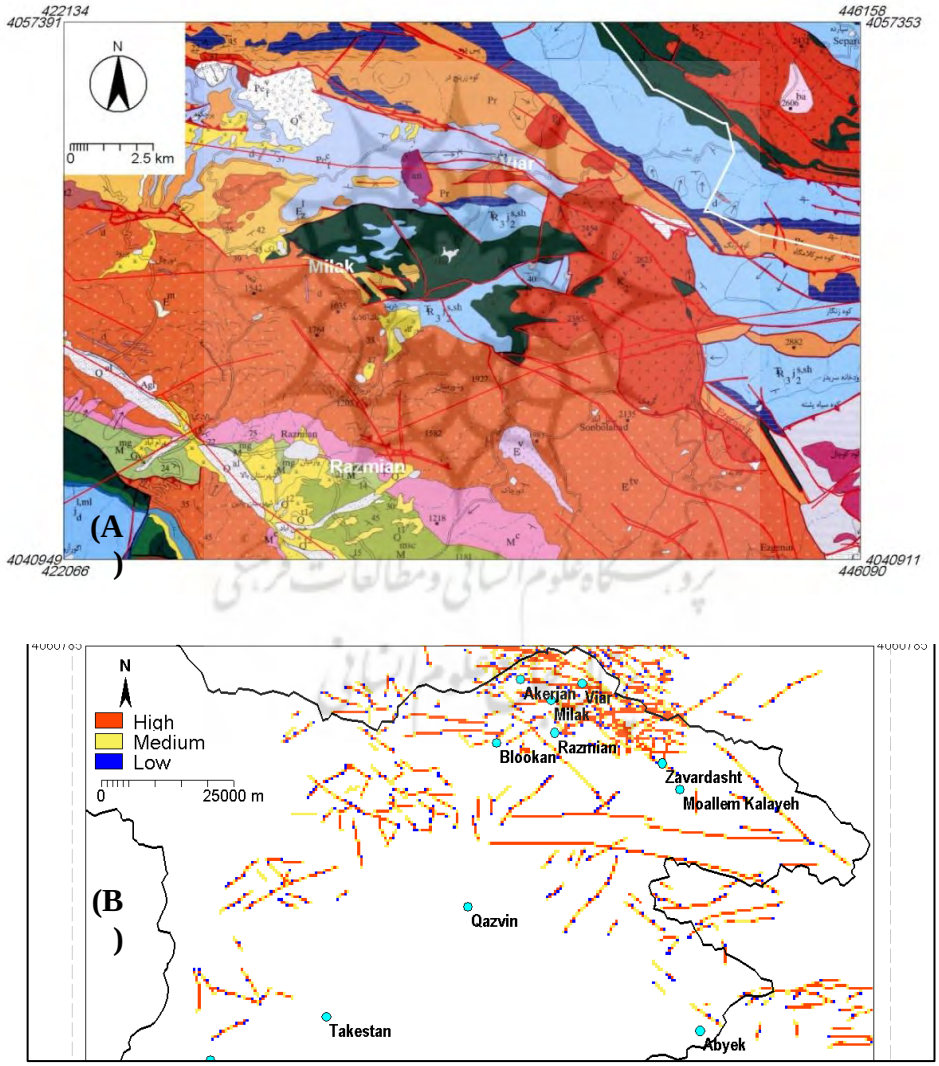
Weights of Flow accumulation and lineament density (Table 2)	Weights of Climate and Temperature (Table 1)	Area of coverage (Km^2)	Potentials for occurrence of sinkholes
1	1	47.1	low
1	2	2942.1	low
1	3	1393.9	Moderate
1	4	395.4	Moderate
1	5	354.2	Moderate
2	1	6.5	Low
2	2	541.4	Moderate
2	3	266.5	Moderate
2	4	110.2	High
2	5	61.4	High
3	1	0.1	Moderate
3	2	22.9	High
3	3	17.3	High
3	4	10.1	High
3	5	3.2	High

یافته‌ها

در راستای دستیابی به هدف اصلی این پژوهش که همانا شناسایی مناطق و گستره دارای استعدادپیدایش فروچاله‌ها می باشد. داده‌های میانی در رابطه با گسلها و تراکم آنها و تمرکز جریانهای سطحی نولید شدند که به تشریح بخشی از آنها پرداخته می شود.

گسل‌ها و خطواره‌ها

برای تهیه نقشه گسل‌ها و خطواره‌ها از تفسیر چشمی تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات ساختاری موجود در نقشه زمین شناسی بهره‌گیری شد. سپس بر پایه نسبت طول آنها در واحد سطح، فشردگی آنها محاسبه شد. نقشه پایانی گسل‌ها و خطواره‌های زمین‌شناسی و فشردگی آنها، در شکل ۸ ارایه شده است.

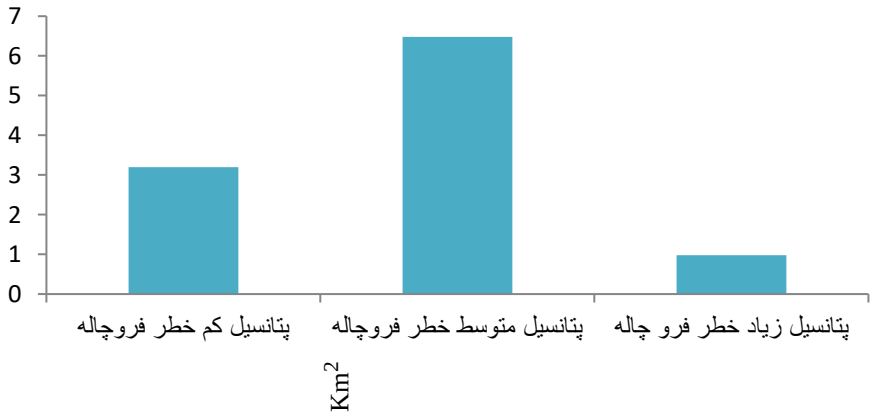


شکل ۸. نقشه یکصدهزارم زمین‌شناسی گستره کار (شکل بالا)؛ لایه اطلاعاتی گسل‌ها و خطواره‌های زمین‌شناسی بر روی نقشه بالا (شکل پایین)

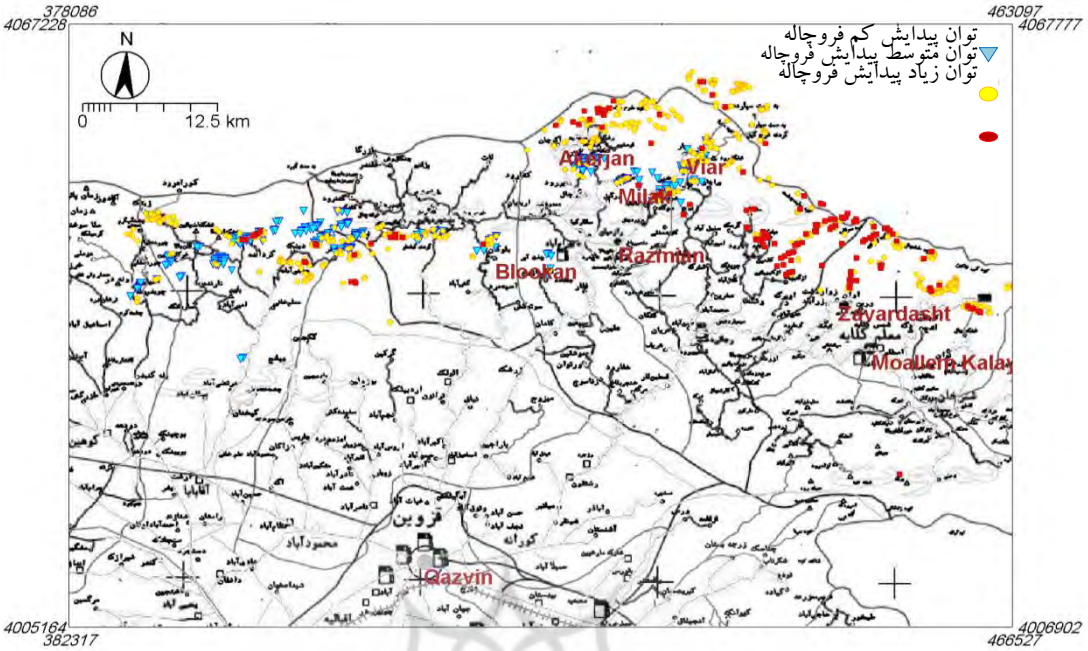
تمرکز جریان آبهای سطحی

برای اینکه انحلال صورت بگیرد باید آب باران و رواناب‌های سطحی در سازند انحلال‌پذیر نفوذ کنند. برای اینکه آب در این سازندها نفوذ کند باید آب چه به صورت بارش مستقیم باران و یا به صورت هدایت آبهای پیرامونی و دامنه‌ها بر روی آنها جاری شود. مدل رقومی ارتفاع (DEM) این قابلیت را دارد که بتوان با بهره‌گیری از رقوم ارتفاعی پیکسل‌ها و توجه به اختلاف ارتفاع و یا شیب دامنه، نقشه‌هایی مانند شبکه آبراهه‌ها، رتبه بندی آنها و تمرکز جریان را از آن استخراج نمود. در نقشه تمرکز جریان نشان می‌دهد که آب چه تعداد از پیکسل‌ها به هر یک از آنها تخلیه می‌شود. با توجه به اینکه بارش و تمرکز جریانات سطحی آب یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری انحلال و پیشرفت آن در سنگ‌های انحلال پذیر، از جمله سازندهای کربناته هستند، از این لایه اطلاعاتی نیز به عنوان یکی از عوامل موثر در این پژوهش بهره‌گیری شد.

مناطق دارای پیدایش فروچاله‌ها با جستجوی توان پیدایش آنها بر روی نقشه مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا منتج به تولید نقشه پایانی توان پیدایش فروچاله‌ها در شمال استان قزوین شد. فراوانی سطح و توزیع این مناطق به تفکیک میزان توان خطر پیدایش فروچاله در هر رده محتمل در شکل ۹ نشان داده شد. گستره پیدایش فروچاله‌ها با جستجوی توان پیدایش آنها بر روی نقشه مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا به تولید نقشه پایانی توان پیدایش فروچاله‌ها در شمال استان قزوین انجامید. با توجه به اینکه داده های موثر برای تولید این نقشه، داده‌های مربوط به عوامل کاملا تاثیرگذار و روش مدل‌سازی رابطه‌ای برپایه داوری کارشناسی بودند و درستی یافته‌ها با آزمون‌های به کار رفته، تایید شده است، در نتیجه روش به کار رفته در این پژوهش و ترکیب و نوع داده‌های بهره‌گیری‌شده، می تواند به عنوان یک الگو و روش سودمند برای شناسایی گستره دارای توان پیدایش فروچاله ها در مناطق مشابه استان قزوین، سفارش شود. فراوانی سطح و پراکندگی این مناطق به تفکیک میزان توان خطر پیدایش فروچاله در هر رده محتمل در شکل ۹ نشان داده شد. برپایه تراز بالای جایگاه فروچاله‌های گستره الموت، فراوانی و ویژگی‌های ریخت‌شناسی این گونه از فروچاله‌ها با دیگر فروچاله‌هایی که در دشت‌ها پدید می‌آیند متفاوت بوده است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹). شمار کمی از این فروچاله‌ها در زیر آبرفت قرار دارد. داده‌های به کار گرفته شده توسط آذربون و همکاران (۱۴۰۱) برای شناسایی فروچاله‌های توده پرآو-بیستون از لایه‌های اطلاعاتی ناهمواری‌ها، شیب، سوی شیب، سوی جریان، جریان تجمعی، انحنا سطح، انحنا سطح در بیشترین شیب، انحنا سطح عمود بر بیشترین شیب سطح در بیشترین شیب، انحنا سطح عمود بر بیشترین شیب برگرفته از مدل رقومی ارتفاع بودند. در این پژوهش از لایه‌های اطلاعاتی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا، نقشه گسل‌ها و خطواره‌های زمین شناسی، نقشه‌های پهنه‌های اقلیمی و همدمای تهیه شده توسط اداره کل هواشناسی استان، تصاویر لندست سنجنده ETM^{+} و نقشه تمرکز جریان سطحی آب بهره‌گیری شد. همچنین، از روش تلفیق لایه‌های اطلاعاتی با بهره‌گیری از معیارهای تصمیم‌گیری، بهره‌گیری شد.



شکل ۹. فراوانی سطح توان خطر پیدایش فروچاله‌ها در شمال استان قزوین

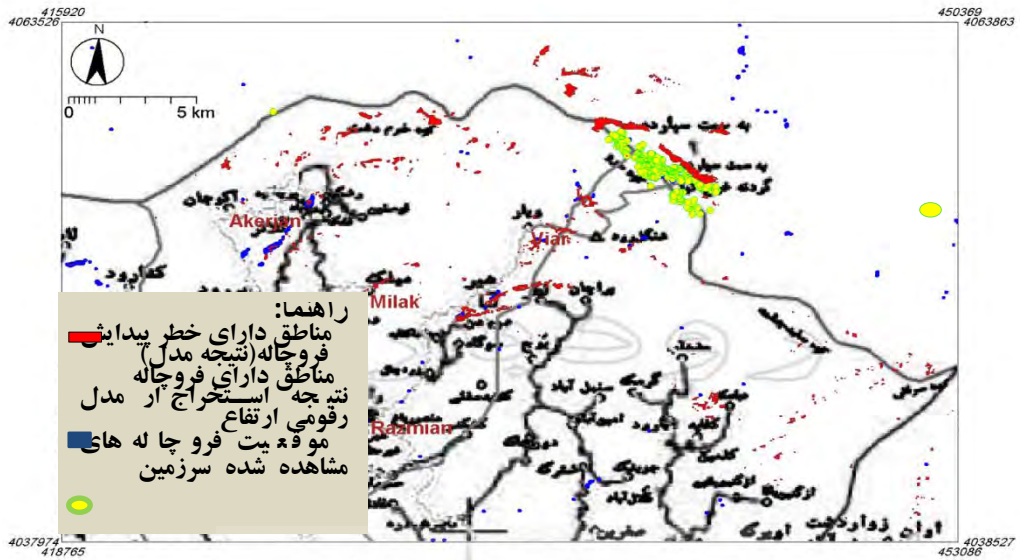


شکل ۱۰. پراکنش نقطه‌ای مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها

پراکنش نقطه‌ای مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که حدود ۶۲ درصد مناطق دارای استعدادپیدایش فروچاله‌ها بر سطح مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا منطبق هستند.

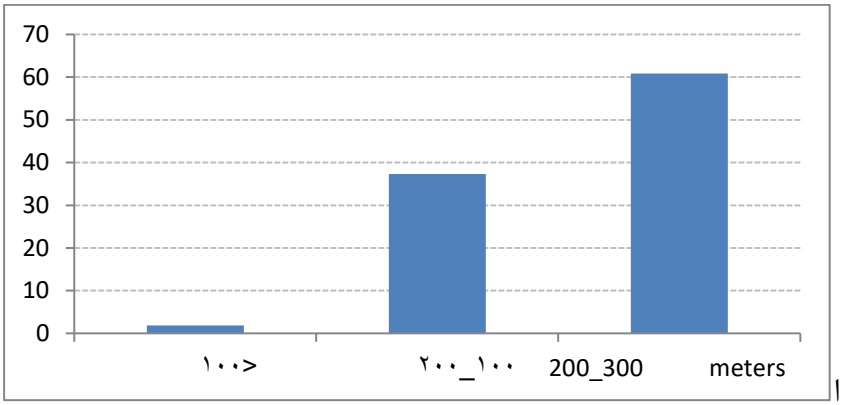
راستی آزمایی

برای ارزیابی درستی یافته‌ها، از دو گروه داده بهره‌گیری شد. یک گروه از این داده‌ها، برداشت‌های میدانی تعداد۲۴۰ فروچاله است که از گستره شمال خاور روستای ویار در مرز استان قزوین و استان‌های مازندران و گیلان، برداشت شد. گروه دیگر، جایگاه مکانی فروچاله‌هایی است که به روش پُرکردن محاسباتی چاله‌ها بر روی تصویر مدل رقومی ارتفاع و سپس تفریق آنها از این تصویر به دست آمد. عملگر پُرکننده چاله‌ها (Fill sinks)، پیک سل(های) دارای ارتفاع کمتر نسبت به مقادیر ارتفاع ۸ پیک سل پیرامون را حذف و آن(ها) را با کوچکترین رقم ارتفاعی بین ۸ پیک سل، جایگزین و به صورت هموار ارایه می کند. در شکل ۱۱، پراکنش مکانی ۲۴۰ نقطه برداشت شده و مشاهدات میدانی از فروچاله‌ها، جایگاه فروچاله‌های محاسباتی به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و همچنین پراکنش جغرافیایی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌های به دست آمده از این پژوهش نشان داده شده‌اند.



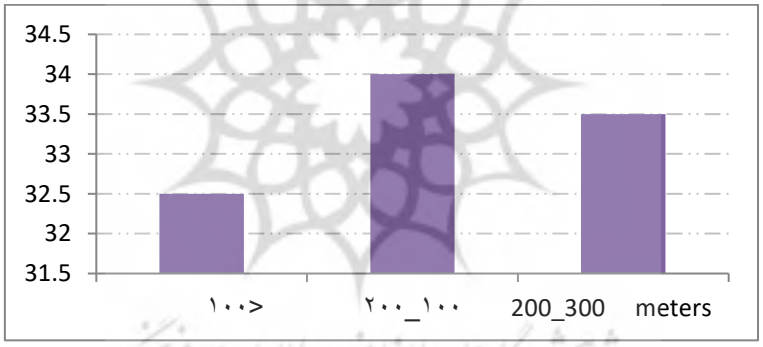
شکل ۱۱. پراکنش مکانی فروچاله‌های مشاهداتی (دایره‌های سبز و زرد)، موقعیت فروچاله‌های محاسباتی به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع (لکه‌های به رنگ آبی) و پراکنش جغرافیایی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها به دست آمده از این پژوهش (لکه‌های به رنگ قرمز) نشان داده شده‌اند.

همان‌گونه که جلالی و همکاران (۲۰۰۹) اشاره کرده‌اند، مدل شناسایی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم‌ژرفا برای مناطق بدون پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی بسیار کم، مطرح شده است و به همین دلیل هم، سطح برآوردهای این مدل همواره کمتر از میزان واقعی آن است. در بررسی‌های میدانی و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای، آشکار شد که گستره شمال‌خاور روستای ویار، جایی که بردا شتهای میدانی از فروچاله‌ها انجام شده است، دارای پوشش گیاهی نسبتا خوبی است. این موضوع سبب شده است که شمار و سطح مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در این محدوده، کمتر به نقشه درآیند. با این حال سطح بسیاری از پیرامون فروچاله‌های دیده شده که برونزدهای سنگی بدون پوشش گیاهی هستند، توسط مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها، احاطه شده است. به دیگر سخن، چه بسا اگر در مدلسازی شناسایی مناطق امید، پوشش گیاهی عامل محدود کننده‌ای نبود، مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها با محل فروچاله‌های دیده شده، همبستگی بیشتری پیدا می‌کرد. اگر برای فروچاله‌های دیده شده یک حریم ۳۰۰ متری در نظر گرفته شود، بیش از ٪۴۰ مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در فاصله کمتر از ۲۰۰ متر از فروچاله‌های دیده شده و مانده آن‌ها در حریم میان ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر قرار می گیرند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. درصد فراوانی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در فواصل مختلف از فروچاله‌های دیده شده

بررسی انطباق فراوانی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها با فواصل مختلف از فروچاله‌های محاسبه شده از طریق مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نشان می دهد که بیش از ۶۶ در صد مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در حریم کمتر ۲۰۰ متری از فروچاله‌های محاسبه شده از طریق مدل رقومی ارتفاع واقع شده‌اند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. درصد فراوانی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در فواصل مختلف از فروچاله‌های محاسبه شده از طریق DEM.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نقشه گستره های دارای توان پیدایش و رخداد فروچاله ها در نواحی شمال استان قزوین، تهیه شد و نشان داد تهیه نقشه خطر پیدایش فروچاله ها برپایه پردازش تصویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی رابطه‌ای، برای گستره الموت از دید زمان و هزینه بسیار با صرفه است. بر این پایه، می‌توان با نقشه‌برداری غیرمستقیم و سریع فروچاله‌ها، خطرات و پراکنش مکانی آن‌ها را بررسی نمود. از آنجایی که فروچاله‌ها بیشتر بر روی مواد انحلال‌پذیر مانند سنگ‌های کربناته پدیدمی‌آید، بنابراین، برخی از بخش‌های این سنگ‌ها که به‌عنوان مناطق امید برای دسترسی به منابع آب کم ژرفای کارست به نقشه درآمدند، پایه‌ای برای بررسی‌های بیشتر و استخراج اطلاعات درباره پراکنش مکانی مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها بسیار سودمند است. بررسی این پژوهش نشان داد که بیش از ۶۶ در صد مناطق دارای توان پیدایش فروچاله‌ها در حریم کمتر ۲۰۰ متری از فروچاله‌های محاسبه شده از طریق مدل رقومی ارتفاع قرارگرفته است. پیشنهاد می‌شود دیگر جاهایی که احتمال بیشتری برای پیدایش فروچاله دارند، مورد بررسی‌های میدانی بیشتر قرارگیرند. باتوجه به اطمینان از یافته های به دست آمده، این روش در مناطق همانند برای شناسایی گستره های دارای توان پیدایش فروچاله ها به کار گرفته شود.

منابع

- آذربون،پ.، مینائی، م.، مینائی، ف.، صفری، ف.، نوری، م.، نورینی،ج.، و داودی، م.، ۱۴۰۱ تشخیص خودکار فروچاله های کارستی با استفاده از داده های TanDEM-X، سنجش از دور شی‌گرا و داده کاوی (مطالعه موردی توده پراو-بیستون). پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۱، شماره ۱، ص ۸۲-۹۵.
- آرمانی، پ.، و جلالی، ن.، ۱۴۰۱ شناسایی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در استان قزوین با بهره گیری از تصاویر فروسرخ گرمایی. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۲ (۴): ۷۸۷-۸۰۸. DOI: 10.22055/AAG.2021.36990.2214
- آرمانی، پ.، طارمی، م.، مه‌پیما، آ.، و فلاحتکار، ن.، ۱۴۰۰ ویژگی‌های فروچاله‌های شمال خاوری ویار، آلموت. سیزدهمین همایش ملی زمین شناسی دانشگاه پیام نور، ۲۳ و ۲۴ تیر ماه، ۱۴۰۰، کرج، ایران، ص ۲۴۰-۲۴۵.
- اسفندیاری درآباد، ف.، شکر بهجتی، س.، رستمی، ع.، ۱۴۰۰ شناسایی و بررسی خصوصیات مورفومتریک و خاک دولین‌ها در شمال ایران (مطالعه موردی: منطقه گرازبن از جنگل آزمایشی خیرود کنار، نوشهر مازندران). پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۱، ص ۱-۱۹.
- امیری، م.، و نظری پویا، ه. و مظاهری، ح.، ۱۳۸۳ علل و مکانیسم وقوع فروچاله ها در دشت فامنین- کبودر آهنگ. تحقیقات جغرافیایی, ۱۹(۲ (پیاپی ۷۳))، ص ۱۷۲-۱۸۶. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaperiaspx?id=14981
- جعفری غ.ح.، و محمدی، ه.، ۱۳۹۸ پهنه‌بندی خطر فروچاله ها با استفاده از روش وزن شواهد، مطالعه موردی: دشت کبودر آهنگ-فامنین. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ششم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، ص ۷۱- ۸۸
- جلالی، ن.، و کاظمی، ر.، ۱۳۹۸ شناسایی فضاهای زیرسطحی در منطقه شیرامین آذرشهر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای فروسرخ گرمایی، فصلنامه زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱۰، شماره ۳، ص ۳۷۰-۳۸۱. DOI:10.22055/AAG.2019.28880.1955
- حیدری، ز.، قدیمی، م.، رضایی عارف، م.، حیدری، ز.، ۱۳۹۹ شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع فروچاله ها با استفاده از شاخص های کمی مورفومتریک مطالعه موردی (دشت کرمانشاه). پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۲، ص ۲۱۵-۲۲۶.
- صفاری ا.، کیانی ط.، و زنگنه تبار س.، ۱۳۹۸، بررسی عوامل موثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال نوزدهم، شماره ۵۵، ص ۱۶-۶۳
- قربانی م. ص.، محمودی ف.، یمانی م.، و مقیمی ا.، ۱۳۸۹ نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی، (مطالعه موردی: ناهمواری شاهو، غرب ایران)، پژوهشهای جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، ص ۱۶-۱.
- محمودی ف.، و ملکی ا.، ۱۳۸۰ تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواریهای بیستون - پرآو (کرمانشاه)، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۳، شماره ۴۰ ، ص ۹۳- ۱۰۵
- مقیمی، ه.، ۱۳۹۱ هیدرولوژی کارست، انتشارات دانشگاه پیام نور.
- *Augusto, S., Auler, P., Smart, L., 2003, The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the Precambrian carbonates of semi-arid northeastern Brazil, https://doiiorg/10.1002/esp.443, Willy online library.*
- *Galve, J.P.F., Gutiérrez, P., Lucha, J., Guerrero, J., Bonachea, J., Remondo Cendrero, A., 2008. Probabilistic sinkhole modeling for hazard assessment. John Wiley & Sons, Ltd, (www.interscience.wiley.com) doi: 10.1002/esp.1753.*
- *Jalali, N3,Saghafian, B., Imanov, F., Museyyibov, M., 2009 Recognition of shallow karst water resources and cave potentials using thermal infrared image and terrain*

characteristics in semi-arid regions of Iran, Int. J. Applied. Earth Observation and Geo-information,volume 11,issue 6, pages 439-447

- *Nam BH, Kim YJ, Youn H, 2020 Identification and quantitative analysis of sinkhole contributing factors in Florida's Karst. Engineering Geology, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105610*
- *Parise, M., 2019, Earth surface processes and landforms. in Encyclopedia of Caves (Third Edition), 437–452, John Wiley & Sons, Ltd.*
- *[do, B., Mahmoudi Sivand, S., Afrasiabian A. Đurin B (2020) Effect of Sinkholes on Groundwater Resources in Arid and Semi-Arid Karst Area in Abarkooh, Iran. Environments, https://doi.org/10.3390/environments7040026*
- *Waltham AC, Fookes PG, 2003 Engineering classification of karst ground conditions. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 36, 101–118. https://doi.org/10.1144/1470-9236/ 2002-33.*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی