

پهنه‌بندی خطر فروچاله‌ها با استفاده از روش وزن شواهد

مطالعه موردی: دشت کبودرآهنگ-فامنین

غلام حسن جعفری^۱، استادیار ژئومورفولوژی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
هژیر محمدی، کارشناس ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۴ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۴/۱۸

چکیده

عواقب و آثار فعالیت‌های انسانی در چند دهه اخیر گاه چنان مخرب و غیرقابل بازگشت به حالت اولیه بوده که توجه همه اقشار را به خود جلب کرده است. یکی از این اثرات، فروچاله‌هایی است که در بخش‌های مختلف سیاره زمین و از جمله ایران، استان همدان و به صورت متمرکز در دشت کبودرآهنگ-فامنین اتفاق افتاده است. در این ارتباط، پژوهشگران معتقدند که مهم‌ترین پیامدهای برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، حفر چاه‌های غیرمجاز و فعالیت نیروگاه حرارتی شهید مفتح و تغییر پارامترهای خاکی، پیدایش فروچاله‌های منطقه است. بدین منظور کلیه اطلاعات زمین‌شناسی، گسل، هیدرولوژیکی، ارتفاعی، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی و راه‌های منطقه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاعی و تصاویر Google Earth استخراج شد و جهت بررسی روند فروچاله‌ها با توجه به تعداد و تراکم آن‌ها در نرم‌افزار Arc GIS وزن دهی گردید. نتایج نشان می‌دهد که تراز آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و دامنه ارتفاعی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار در ایجاد فروچاله است؛ اما در یک دید فضایی نقش عوامل خارج از منطقه و در بخشی دورتر از فروچاله‌ها که باعث افت شدید آب‌های زیرزمینی شده است، اهمیت بیشتری دارد؛ احداث سد اکباتان بر روی مهم‌ترین رودخانه تأمین‌کننده آب دشت‌های مورد مطالعه، گسترش شهر (همدان) و تغییر کاربری اراضی اطراف شهرها، از مرتع به کشاورزی، مانع از رسیدن آب به دشت‌های کبودرآهنگ و فامنین شده و افزایش تقاضای آب در پایین‌دست به همراه زیرساخت مناسب فراهم‌شده از قبل (انحلال آهک) در ایجاد فروچاله‌ها نقش مهمی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: وزن دهی، فروچاله، سد اکباتان، شبکه زهکشی، همدان.

مقدمه

عواقب و آثار فعالیت‌های انسانی در چند دهه اخیر گاه چنان مخرب و غیرقابل‌بازگشت به حالت اولیه بوده که توجه همه اقشار را به خود جلب کرده است. یکی از این اثرات، فروچاله‌هایی است که در بخش‌های مختلف سیاره زمین و از جمله ایران، استان همدان و به‌صورت متمرکز در دشت کبودرآهنگ-فامنین اتفاق افتاده است. در این ارتباط، پژوهشگران معتقدند که مهم‌ترین پیامد برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، حفر چاه‌های غیرمجاز و فعالیت نیروگاه حرارتی شهید مفتح و تغییر پارامترهای خاکی، پیدایش فروچاله‌های منطقه است (کرم و همکاران، ۱۳۹۱). مخاطرات طبیعی از جمله عواملی هستند که سالانه با رویداد خود باعث ایجاد خسارات جانی و مالی فراوان در بیشتر مناطق جهان از جمله ایران می‌شوند. اگر در رابطه با اقدامات کاهش خطر احتمالی این مخاطرات، شناخت بیشتری صورت می‌گرفت بدون شک زندگی بسیاری حفظ می‌شد (کریمی و همکاران ۱۳۹۲). یکی از مسائلی که در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد نشست زمین^۱ است. نشست زمین در آکیفرهای محصور و نیمه محصور واقع در مواد آبرفتی تحکیم نشده یا نیمه تحکیم شده، بیشتر مشاهده می‌گردد. در اثر برداشت آب زیرزمینی و خارج شدن آب از منافذ امکان متراکم شدن مواد تا عمق ۳۰۰ متر فراهم می‌گردد و هرچه بیشتر برداشت شود تراکم مواد بیشتر خواهد بود (علیزاده، ۱۳۹۰: ۳۷۷). وقوع فرونشست زمین یک تهدید جدی به محیط‌زیست انسان، با توجه به افزایش تراکم جمعیت، خطوط لوله و زیربنای دیگر در امتداد سواحل و فرایند فاجعه باری است که به‌طور کلی بدون هیچ اختطاری رخ می‌دهد. روش پیشنهادی مارژتا و همکاران (Margiotta, ۲۰۱۲) برای شناسایی مکانیسم تشکیل فروچاله و پهنه‌بندی مناطق خطر ناشی از آن، بر اساس چینه‌شناسی و بررسی ژئومورفولوژی و ژئوفیزیک است. همبستگی مکانی بین فروچاله‌ها و تغییرات ناشی از آبخوان‌های محلی به شکل‌های کاهش نسبی آب به‌طور محلی، انحراف جریان آبخوان‌های زیرزمینی به سمت کانال‌های احداث‌شده مصنوعی، افزایش سرعت جریان، تقویت آبخوان‌های زیرزمینی کنترل‌شده به‌وسیله‌ی جزر و مد و جریان معکوس محلی آب زیرزمینی از بالا به پایین منعکس می‌شود (۲۰۱۱، Dolores Fidelibus et al). افزایش روزافزون برداشت از منابع آب زیرزمینی منطقه، به‌ویژه از حوزه‌هایی که با رسوبات تحکیم نیافته آبرفتی یا نهشته‌های کم‌عمق دریایی انباشته‌شده‌اند منجر به فرونشست سطح زمین گردیده است (محبوبی اردکانی و همکاران، ۱۳۸۴).

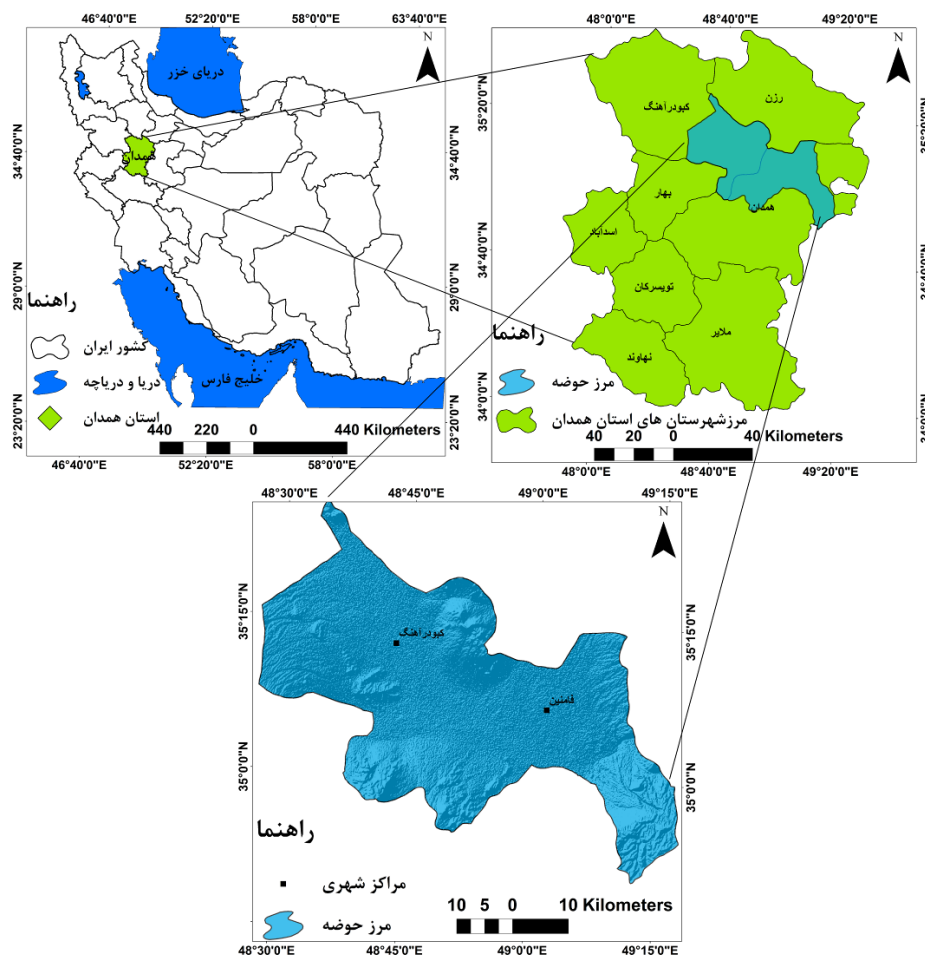
اولین مطالعه رسمی فروچاله‌ها توسط سازمان یونسکو در ۱۹۰۰ انجام شد که به بررسی تفضیلی ۴۵ فروچاله در ۱۵ کشور جهان پرداخت. نتوتون (Newton, ۱۹۸۷) فروچاله‌های جنوب شرق آمریکا، ویلیام (William, ۱۹۸۸) فروچاله‌های اورلاندای آمریکا، گونگیو، وانفانگ (Gongyu & Wanfang, ۱۹۹۹) در مطالعه ایجاد فروچاله در معادن ذغال سنگ و سنگ‌آهن مناطق کارستی چین دریافتند که هجوم آب از آبخوان‌ها، خلأهای موجود در خاک، وزن خاک و فرایند اشباع به تشکیل فروچاله کمک می‌کنند و اقدامات کلیدی کنترل‌کننده وقوع فروچاله، کاهش نوسانات آفت آب و مهروموم کردن حفرات مناطق کارستی است. گائو (Gao, ۲۰۰۲) فروچاله‌های خوشه‌ای را پیشنهاد کرد زیرا مناطق دارای ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی یکسان به نفع تشکیل فروچاله می‌باشد. گوتیرز و همکاران (۲۰۰۸، Gutierrez) فروچاله‌های موجود در مناطق کارست تبخیری را فعال‌تر و متنوع‌تر از فروچاله‌های کارست کربنات می‌دانند، چراکه مناطق کارست تبخیری با حلالیت بالاتر، مقاومت مکانیکی کمتری دارند. دولارز و همکاران (۲۰۱۱،

^۱ - land subsidence

(Dolores) فروچاله‌های متعددی را در فوجیای ایتالیا بررسی کرده‌اند. بررسی حیدری و همکاران (۲۰۱۱، Heidari) حاکی از آن است که بیشترین فروچاله‌ها در دشت مرکزی همدان به وقوع پیوسته که رسوبات الیگومیوسن و سنگ‌آهک اغلب آن‌ها را پوشانده‌اند و اغلب این فروچاله در سنگ‌بستر آهکی با تخلیه‌ی زیاد آب زیرزمینی رخ داده است. مارژتا و همکاران (۲۰۱۲، Margiotta) معتقدند نقشه حساسیت می‌تواند یک ابزار مهم برای مقاصد برنامه‌ریزی و توسعه در نظر گرفته شود. اُزدمیر (۲۰۱۵، Ozdemir) تشکیل فروچاله‌ها را مهم‌ترین خطر زمین‌شناسی منطقه کریپنر قونیه ترکیه معرفی کرده است زیرا آن‌ها می‌توانند به سازه‌های مهندسی، مناطق کشاورزی و مناطق مسکونی آسیب جدی وارد کنند. رئیسی (۱۳۸۴) معتقد است فروچاله‌ها گودال‌های بسته‌ای هستند که به صورت حفره‌هایی در سطح زمین‌های آهکی و دیگر سطح‌های انحلال‌پذیر و یا آبرفتی به وجود می‌آیند و عموماً رواناب از سوراخ موجود در کف آن‌ها به آب‌های زیرزمینی می‌پیوندد. دادستان و همکاران (۱۳۸۴) معتقدند که فروچاله‌های منطقه را می‌توان عمدتاً از دو نوع فروچاله‌های طبیعی (مانند فروچاله‌های همه‌کسی) و فروچاله‌هایی که فعالیت‌های انسان در شکل‌گیری آن‌ها مؤثرتر بوده‌اند (مانند فروچاله‌های کردآباد و فامنین) دانست. محبوبی اردکانی (۱۳۸۴) و ولیزاده و همکاران (۱۳۸۴) معتقدند که عمده فروچاله‌های منطقه کبودرآهنگ- فامنین در محدوده‌هایی از دشت رخ داده که از سنگ‌بستر آهکی تشکیل شده و آبیاری اراضی زراعی به روش غرقابی بوده است. امیری و همکاران (۱۳۸۳) معتقدند فروچاله‌های شناسایی شده در ایران بخصوص در استان همدان در سال‌های اخیر به واسطه‌ی نزدیکی به نیروگاه برق و خطرات بعدی آن موردتوجه قرار گرفته و بررسی‌های زیادی پیرامون آن صورت پذیرفته است. دلیل آن تراکم بالای جمعیتی دشت فامنین- کبودر آهنگ، واقع در شمال همدان بوده که موجب بهره‌برداری شدید سفرهای آب زیرزمینی شده است. به علت کاهش آبدهی چاه‌های آب در سال‌های اخیر، کف کنی و حفاری در سنگ‌بستر برخی از چاه‌های آب منطقه نیز انجام شده است. به دنبال این امر فروچاله‌های بزرگ و کوچکی در مجاورت این چاه‌ها به وجود آمده که ضمن خسارت به زمین‌های کشاورزی و تهدید نیروگاه برق و سایر تأسیسات، موجب نگرانی ساکنین منطقه و مسئولین استان شده است. قربانی و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی با عنوان نقش تغییرات اقلیمی کوآترنری در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی، ناهمواری‌های شاهو که شرایط مناسبی برای توسعه اشکال کارستی دارند را مورد بررسی قرار داده و معتقدند حضور فروچاله‌ها در اقلیم کنونی و از ارتفاع ۱۹۰۰ متر بالاتر، باعث تخریب کارست‌های منطقه می‌شود. کرم و همکاران (۱۳۹۲) معتقدند وقوع فروچاله در دو روستای فیض‌آباد و هوروک شهرستان ابرکوه، خسارت چشم‌گیری به زمین‌های کشاورزی و تأسیسات منطقه وارد آورده است. کریمی و همکاران (۱۳۹۲) با ارزیابی فروچاله‌های دشت جابر ایلام با بکارگیری رگرسیون چند متغیره به این نتیجه رسیدند که عوامل شیب دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از خط کنیک، ضخامت رسوب، کاربری اراضی و عمق آب زیرزمینی بیشترین تأثیر را بر روی وقوع فروچاله‌های منطقه داشته‌اند. مسلم است که ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی اساس بررسی‌های منابع طبیعی حوضه‌های آبخیز به شمار می‌رود و فرونشست از مسائلی است که بدون توجه به خصوصیات و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی توسعه نخواهد یافت. این مقاله سعی دارد با نگاهی سیستمی به عوامل محیطی مؤثر در فروچاله‌های دشت کبودرآهنگ- فامنین همدان، از طریق وزن دهی به عوامل، نقشه حساسیت مناطق هم‌جوار به ایجاد فروچاله‌ها را ترسیم نماید.

داده‌ها و روش کار

دشت کبودرآهنگ- فامنین با موقعیت ریاضی ۳۴ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی در شرق و شمال شرقی استان همدان واقع شده است. مساحت آن بالغ بر ۲۱۵۵ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۹۲۹ متر است. این منطقه از شمال به شهرستان رزن، از جنوب به شهرستان همدان و از شرق به استان مرکزی منتهی است (شکل ۱) و دارای ۲۷ فروچاله است (جدول ۱). ناحیه کبودرآهنگ - فامنین از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی بین دو منطقه واقع شده، قسمت‌های شمال آن در بخش ایران مرکزی و ناحیه جنوبی در زون سنندج- سیرجان واقع است؛ بنابراین در محدوده مورد مطالعه، سنگ‌ها و اثرات تکتونیکی هر دو ناحیه را می‌توان مشاهده نمود. شیل‌ها و شیست‌های دگرگون‌شده ژوراسیک، قدیمی‌ترین سنگ‌هایی هستند که در منطقه مورد مطالعه شناخته شده‌اند. این سنگ‌ها بیشتر در حاشیه غربی و گاهی به صورت پراکنده در جنوب و شرق منطقه وجود دارند. در قسمت زیرین، شیست‌های خاکستری‌رنگ و آهک کریستالیزه همراه با آهک دولومیتی که به صورت متداخل بین لایه‌ای هستند، قرار دارد. رسوبات کرتاسه فقط در محدوده کوچکی از جنوب و مرکز دشت شناخته شده‌اند؛ این تشکیلات به دو واحد آهکی و شیلی تقسیم می‌گردند (وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵).



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد نظر در روی نقشه ایران و استان همدان (منبع: وزارت کشور، سازمان تقسیمات سیاسی، ۱۳۹۵)

جدول ۱: مشخصات فروچاله‌های منطقه مورد مطالعه (سازمان آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵)

ردیف	محدوده مطالعاتی	نام محل	UTM x	UTM y	ارتفاع از سطح دریا	قطر	عمق	تاریخ وقوع
۱	کیودرآهنگ	بابان ۱	۲۹۵۵۷۳	۳۸۹۹۸۰۶	۱۶۷۱	۲۵/۶	۱۷	۱۳۸۷
۲	کیودرآهنگ	بابان ۲	۲۹۵۴۹۶	۳۸۹۹۷۶۳	۱۶۷۱	۴	۴	نامشخص
۳	قهاوند	جهان‌آباد ۱	۳۱۵۳۱۹	۳۸۸۳۷۰۷	۱۶۳۰	۲۳	۱۷	۱۳۷۳
۴	قهاوند	جهان‌آباد ۲	۳۱۵۵۱۲	۳۸۸۳۴۷۲	۱۶۳۰	۱۹/۰۶	۱/۵	۱۳۷۳
۵	کیودرآهنگ	خان‌آباد	۲۹۵۳۴۴	۳۸۹۴۴۲۹	۱۶۶۰	۷	۱۲	۱۳۷۴
۶	کیودرآهنگ	کردآباد ۵	۲۹۸۸۴۱	۳۸۸۸۲۴۰	۱۶۱۰	۳۶	۷	۱۳۸۲
۷	کیودرآهنگ	کردآباد ۱	۲۹۹۱۹۷	۳۸۸۴۴۷۹	۱۶۴۲	۲۷/۷	۱۰	نامشخص
۸	کیودرآهنگ	کردآباد ۴	۲۹۸۸۷۲	۳۸۸۳۳۸۴	۱۶۴۲	۲۹	۱۰	۱۳۸۵
۹	کیودرآهنگ	کردآباد ۶	۲۹۸۹۳۷	۳۸۸۳۳۸۴	۱۶۴۲	۳۸	۱۴	۱۳۸۴
۱۰	کیودرآهنگ	کردآباد ۷	۲۹۹۰۴۹	۳۸۸۴۴۹۹	۱۶۴۲	۱۸	۷	۱۳۸۴
۱۱	کیودرآهنگ	کردآباد ۳	۲۹۹۴۵۲	۳۸۸۷۳۳۹	۱۶۴۲	۲۵	۲۰	۱۳۸۴
۱۲	کیودرآهنگ	کردآباد ۲	۲۹۹۷۶۷	۳۸۸۸۳۲۱	۱۶۴۳	۲۲	۸	۱۳۷۴
۱۳	کیودرآهنگ	نوی‌آباد	۲۹۶۹۹۷	۳۸۸۹۰۳۵	۱۶۵۵	۱۵	۵	۱۳۷۸
۱۴	قهاوند	همه‌کسی ۱	۳۱۴۵۵۲	۳۸۷۷۸۸۰	۱۶۱۴	۱۰	۲۰	۱۳۸۳
۱۵	قهاوند	همه‌کسی ۱۰	۳۱۳۸۳۳	۳۸۷۷۱۷۷	۱۶۴۸	۶	۰/۵	نامشخص
۱۶	قهاوند	همه‌کسی ۳	۳۱۴۳۷۶	۳۸۷۷۳۵۱	۱۵۸۰	۱۵	۱	۱۳۷۱
۱۷	قهاوند	همه‌کسی ۴	۳۱۴۴۳۹	۳۸۷۷۳۳۴	۱۶۳۶	۵*۹	۱۰	۱۳۸۹
۱۸	قهاوند	همه‌کسی ۵	۳۱۴۱۲۱	۳۸۷۷۰۲۰	۱۶۴۰	۵/۸*۵/۹	۱۰	۱۳۹۰
۱۹	قهاوند	همه‌کسی ۶	۳۱۴۱۳۵	۳۸۷۷۰۲۸	۱۶۳۹	۸/۶*۸/۷	۱۰	۱۳۸۳
۲۰	قهاوند	همه‌کسی ۹	۳۱۳۸۲۷	۳۸۷۷۰۲۰۹	۱۶۴۹	۳*۴	۰/۵	نامشخص
۲۱	قهاوند	همه‌کسی ۸	۳۱۶۰۶۷	۳۸۷۸۱۱۲	۱۶۱۶	۶	۷	۱۳۸۹
۲۲	قهاوند	همه‌کسی ۷	۳۱۴۲۰۹	۳۸۷۶۸۱۱	۱۶۳۸	۸/۳*۱۳/۵	۶	نامشخص
۲۳	قهاوند	بین همه‌کسی جهان‌آباد	۳۲۴۳۹	۳۸۸۱۱۰۲	۱۶۲۱	۱۸*۲۰	۱۰	نامشخص
۲۴	کیودرآهنگ	آق تپه	۲۸۹۵۲۶	۳۹۰۱۸۴۸	۱۶۸۶	۴۰	۱	۱۳۹۱
۲۵	کیودرآهنگ	شاوه	۲۸۶۵۴۴	۳۸۹۵۸۹۲	۱۶۸۶	۱۰	۵	نامشخص
۲۶	قهاوند	طمه چی ۱	۳۳۷۱۰۳	۳۸۷۳۲۵۶	۱۷۶۵	۲۴	۲	۱۳۷۵
۲۷	قهاوند	طمه چی ۲	۳۳۷۰۹۵	۳۸۷۳۱۷۶	۱۷۶۰	۱۹	۳	۱۳۷۵

به‌منظور شناسایی فروچاله‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، ۳۰*۳۰ metre DEM استان همدان مستخرج از ماهواره‌ی SRTEM در سایت USGS و از دستگاه سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در برداشت موقعیت فروچاله استفاده گردید. پس از وارد کردن نقشه‌های پایه و جدول مختصات جغرافیایی فروچاله‌ها منطقه مورد نظر در محیط GIS، لایه فروچاله‌های منطقه تهیه و با توجه به مطالعات و بررسی‌های مقدماتی به‌منظور شناسایی میزان اثرگذاری عوامل و مکانیسم آن‌ها، اطلاعات مربوط به عوامل احتمالی ایجاد فروچاله‌ها شامل نقشه‌های توپوگرافی، شیب، جهت شیب، فاصله از جاده‌های ارتباطی، طبقات ارتفاعی، فاصله از رودخانه، تراز آب‌های زیرزمینی، لیتولوژی و فاصله از گسل، کاربری اراضی و نقشه مهم‌ترین حوضه‌های آبریز اثرگذار بر آبخوان‌های منطقه مورد مطالعه از منابع مختلف تهیه شد. در مجموع ۹ لایه عامل رستری در محیط نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. روش به کار گرفته برای ارزیابی عوامل مؤثر در وقوع فروچاله‌ها در محدوده، مدل آماری روش وزن شواهد است. این

مدل بر اساس نسبت تراکم فروچاله‌ها در هر یک از لایه‌های عاملی به تراکم فروچاله‌ها در کل منطقه می‌باشد که نتیجه این نسبت دستیابی به وزن واحدهای هر یک از لایه‌های عاملی است. در این مدل مقادیر وزنی اعداد مثبت و منفی می‌شود که به ترتیب بیانگر نقش بیشتر و کمتر متغیرهای مورد بررسی است (رابطه ۱، Ozdemir، ۲۰۱۵). در نرم‌افزار Arc GIS منوی Reclassify ارزش‌های قدیمی را حذف کرده و یک فیلد (New values) ایجاد و وزن‌های برآوردی از هر طبقه، وارد می‌گردد. اغلب روش‌های ارزیابی عوامل و پهنه‌بندی خطر وقوع فروچاله‌ها عمدتاً بر قضاوت کارشناسی و وزن دهی‌های نامشخص و به‌کارگیری تعداد کمی از متغیرهای مؤثر در پهنه‌بندی و عدم استفاده از رایانه استوار هست (Varnes، ۱۹۸۴)؛ سپس با توجه به تهیه نقشه رستری لایه‌های عامل فروچاله، وزن نهایی به هر یک از لایه‌ها داده می‌شود؛ به این طریق که در هر کدام از لایه عامل‌ها که بیشترین تراکم فروچاله وجود دارد، بیشترین وزن داده می‌شود و در مقابل به لایه عاملی که تراکم فروچاله‌ها در آن کم است وزن و ارزش کمتری اختصاص می‌یابد. از جمع جبری نقشه تهیه‌شده در نرم‌افزار Arc GIS، نقشه نهایی پهنه‌بندی مناطق حساس خطر فروچاله تولید می‌شود (رابطه ۲).

$$w_i = \ln \frac{\text{Count sinkholes}}{\text{Factor class area}} \quad \text{رابطه ۱:}$$

W_i وزن هر یک از لایه عاملی فروچاله، Count sinkholes فراوانی فروچاله در لایه عاملی و Factor class area مساحت لایه عامل است. نقشه پهنه‌بندی خطر فروچاله با استفاده از رابطه (۲) بر اساس وزن هر یک از لایه‌های عامل (Slop, Geology, Landuse, ...) به دست می‌آید.

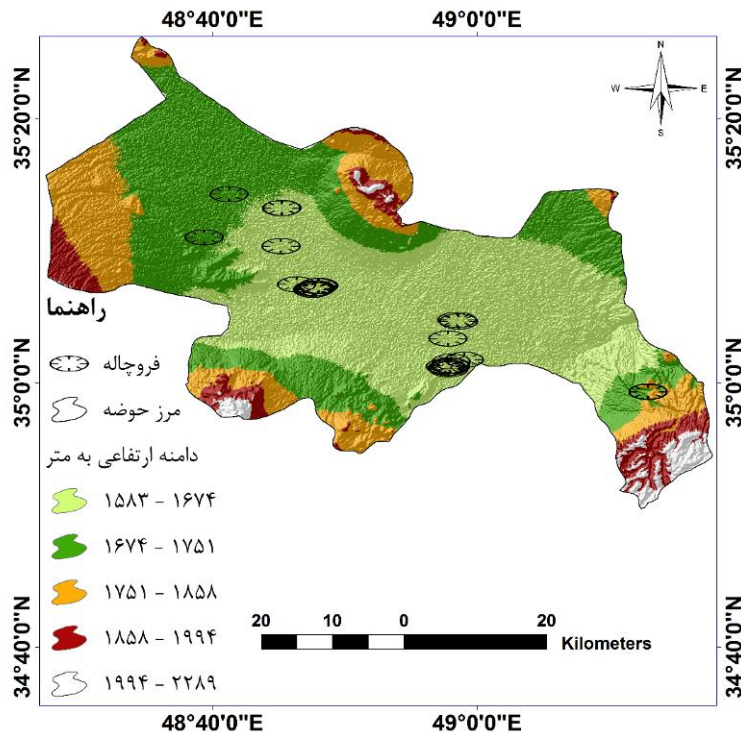
$$\text{Mapfw} = \text{slop}w + \text{geology}w + \text{Landuse}w + \text{Dem}w + \dots + nw \quad \text{رابطه ۲:}$$

در منطقه مورد مطالعه تعداد ۲۷ فروچاله شناسایی شد و عواملی همچون دامنه ارتفاع، دامنه شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و درنهایت آب‌های زیرزمینی در تشکیل و وقوع فروچاله‌ها بررسی شد و وزن هر یک از لایه عامل‌ها به صورت نمودار ترسیم گردید (شکل ۲).



شکل ۲: نمودارهای مربوط به وزن هر یک از لایه‌های عامل ایجاد فروچاله در محدوده مورد مطالعه (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۵)

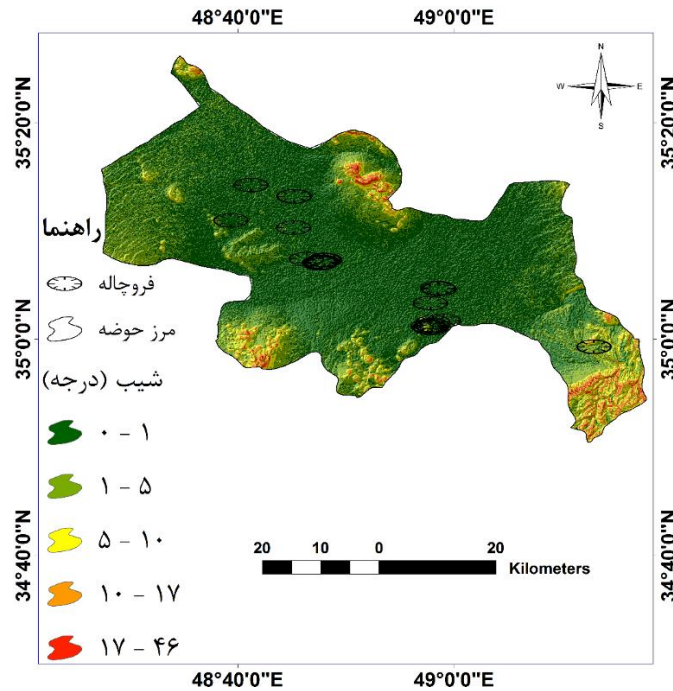
دامنه ارتفاع: عامل ارتفاع با توجه به اثراتی که بر روی عناصر اقلیمی بخصوص دما و بارش و در کنار آن بر آب‌های زیرزمینی دارد؛ یکی از عوامل مؤثر در پدیده فرونشست است. به این منظور منطقه را به ۵ طبقه ارتفاعی تقسیم و هر طبقه ارتفاعی با توجه به تراکم فروچاله‌ها ارزش‌گذاری شد. رابطه‌ی رگرسیون خطی معکوسی بین ارتفاع و تعداد وقوع فروچاله وجود دارد؛ به این ترتیب که با افزایش ارتفاع تعداد فروچاله‌ها کمتر می‌شود، با توجه به ارزیابی که انجام شد اکثر فروچاله‌ها در مناطق کم ارتفاع منطقه مورد مطالعه به وجود آمده‌اند (شکل ۳). چنین تغییری در فروچاله‌ها با کاهش ارتفاع حاکی از آن است که مناطق هم‌جوار توده مرتفع کوهستانی که در واقع قسمت آبخیز حوضه محسوب می‌شوند بیشتر از خود مناطق کوهستانی که آبخوان هستند از افت آب‌های زیرزمینی متأثر می‌شوند. این موضوع دال بر این مطلب است که در نواحی کم ارتفاع هر حوضه که سطوح ارضی قابل توجهی از نظر شیب بر آن‌ها تسلط دارند و آب سطحی و زیرزمینی آن‌ها را تأمین می‌نمایند، با برداشت آب زیرزمینی، احتمال وقوع فرونشست بیشتر است.



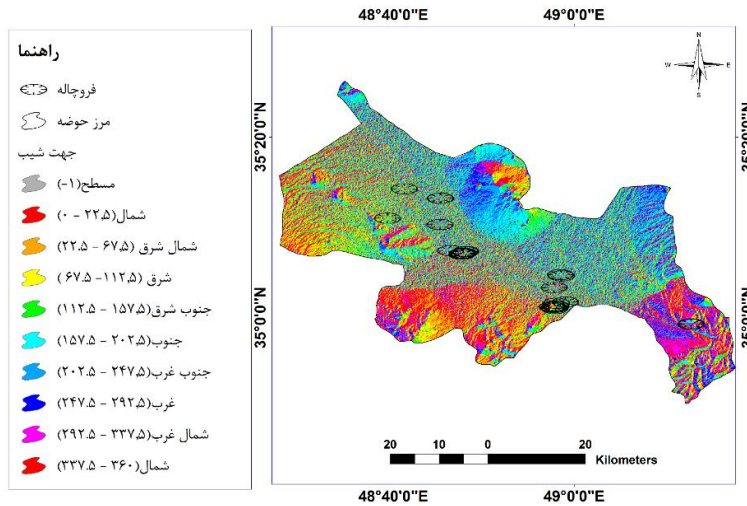
شکل ۳: نقشه دامنه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه (منبع: سایت UGGS)

دامنه شیب: با دقت در محل و شکل اکثر فروچاله‌ها می‌توان گفت که شیب در شکل و اندازه فروچاله‌ها تأثیرگذار است. به این طریق که ارزیابی این فاکتور بیان‌کننده آن است که اکثر فروچاله‌ها در شیب ۰-۱ درجه شکل‌گرفته‌اند، در شیب‌های کم با کاهش سرعت آب‌های زیرزمینی، مجاری عبور آب، شرایط گسترش بیشتری دارند و با افت آب‌های زیرزمینی فضای خالی بیشتری در زیرزمین متروک می‌شوند که در میزان و تعداد فرونشست اثر می‌گذارند. شیب زیاد باعث ناتوانی در مورفولوژی فروچاله‌ها می‌شود. در شیب‌های کم، عمق فروچاله‌ها زیاد می‌شود و یک نوع توازن در عمق و قطر فروچاله‌ها به وجود می‌آید (شکل ۴).

جهت شیب: با توجه به رخداد فروچاله در شیب‌های کم، جهت نمی‌تواند اثر زیادی بر آن داشته باشد ولی اهمیت جهت شیب بیشتر وابسته به اثری است که سطوح هم‌جوار به‌عنوان آبخوان بر مقدار آبدهی آب‌های زیرزمینی می‌گذارند. مسلماً جهت شیب فروچاله‌ها متأثر از جهت آن سطوح خواهد بود. در مورد تأثیر جهت شیب در محدوده مورد نظر با به دست آوردن وزنی که از روی جهت شیب و تراکم فروچاله‌ها دیده شد، می‌توان دریافت که جهت شمال و جنوب بیشترین رخداد فروچاله و ارزش را داشتند و جهت‌های شمال غربی و جنوب غربی که سطح هم‌جوار با این جهت، ارتفاع کمی دارند؛ کمترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. این مطلب بیان‌کننده تأثیرگذاری جهت شیب سطوح هم‌جوار در مقدار تغذیه و حرکت آب‌های زیرزمینی است. به این صورت که حرکت آب از الوند شروع می‌شود و در جهت شیب حرکت می‌کند. هرچه از سرچشمه آبخوان دورتر شویم تراکم فروچاله‌ها بیشتر می‌شود (شکل ۵).

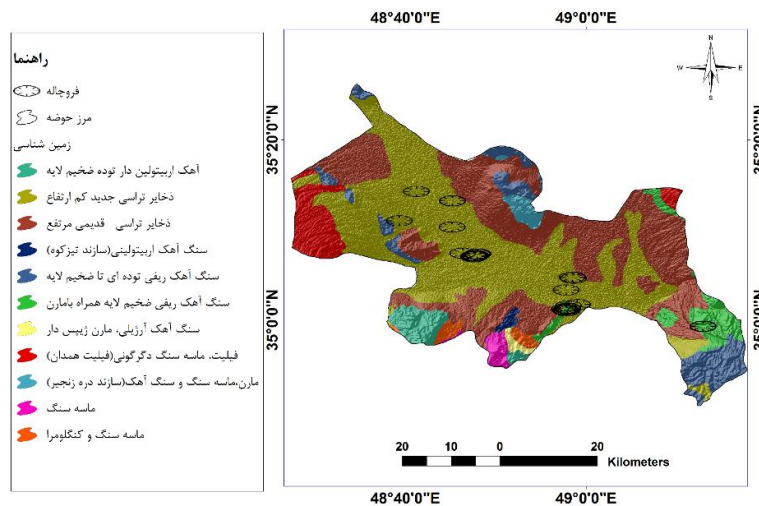


شکل ۴: نقشه دامنه شیب منطقه مورد مطالعه (منبع: سایت USGS)



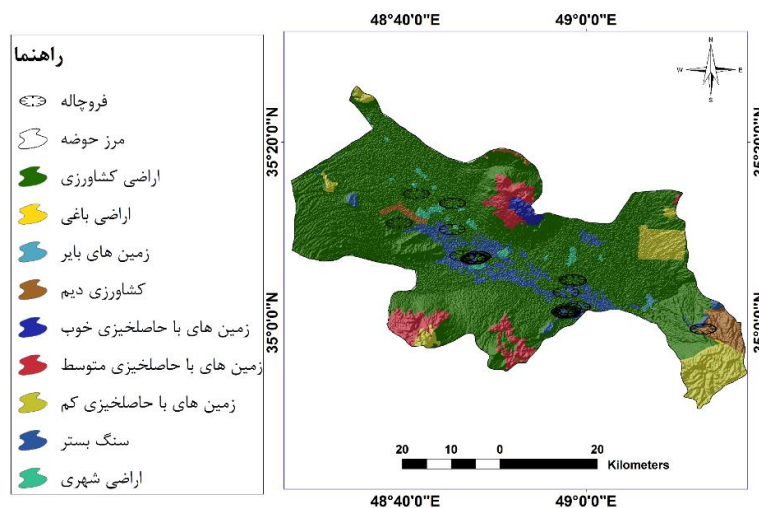
شکل ۵: نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه (منبع: سایت USGS)

زمین‌شناسی: واحد آهکی در حد جنوبی دشت گسترش داشته و ارتفاعات جنوب روستای قرخلر را تشکیل می‌دهند. گسترش آهک‌ها در شرق دره خورونده نسبت به سایر نقاط بیشتر است. واحد شیلی در ۱۵ کیلومتری شرق کبودرآهنگ ارتفاعات کوه قره‌لر را تشکیل می‌دهد. روی این واحدهای آهکی و شیستی ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع گسترده شده است (وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵). ارزش به دست آمد نشان می‌دهد که بیشترین وزن مربوط به سنگ‌آهک ریفی توده‌ای ضخیم همراه با مارن است که دال بر آهکی بودن بستر اکثر فروچاله‌ها است و نمی‌توان نقش عمل انحلال را در وقوع فروچاله نادیده گرفت (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (منبع: وزارت صنایع و معادن کشور، ۱۳۸۳)

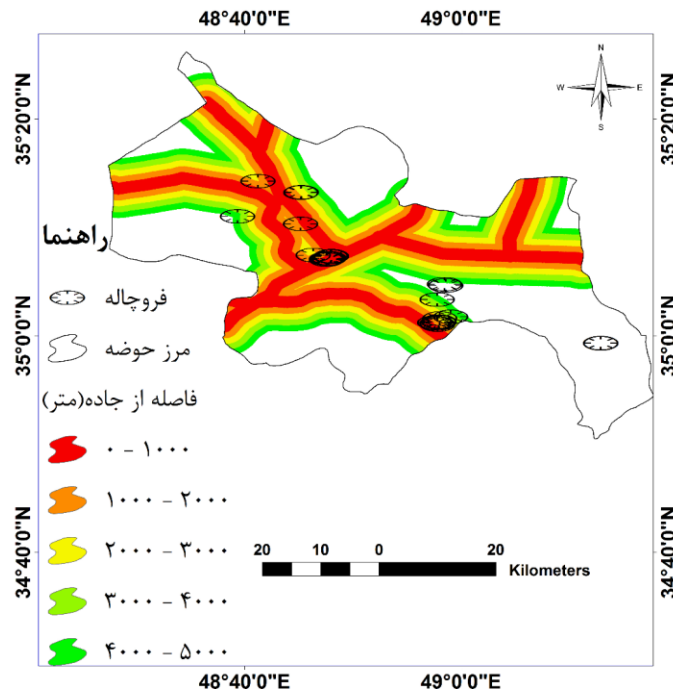
کاربری اراضی: کاربری زمین علاوه بر اینکه بر میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی اثر می‌گذارد به لیتولوژی منطقه هم‌بستگی دارد. سطوح ارضی مسیر آبراهه در طی زمان، آبرفت‌های مناسبی برای کشاورزی فراهم می‌نماید؛ استفاده از زمین، به ایجاد و گسترش فروچاله دامن می‌زند. بررسی نقش کاربری اراضی در تراکم فروچاله‌ها دال بر این است که زمین‌های زراعی و باغی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. چراکه در زمین‌های منطقه مورد نظر بیشتر از آب‌های زیرزمینی برای کشاورزی استفاده می‌شود می‌توان گفت کاهش سطح آبخوان بر اثر برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باعث به وجود آمدن فروچاله‌ها یا گسترش عمق و قطر فروچاله‌ها شده است (شکل ۷).



شکل ۷: نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه (منبع: سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان، ۱۳۹۵)

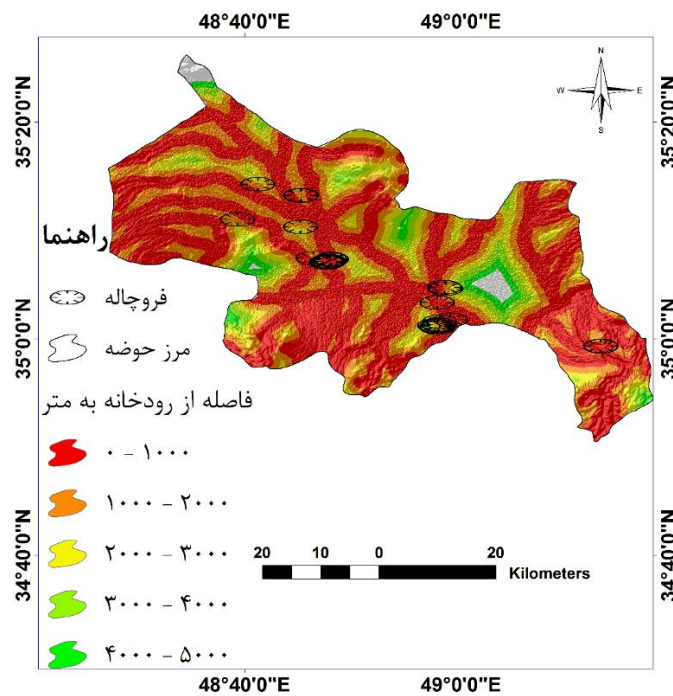
فاصله از محورهای ارتباطی: رابطه‌ی مستقیمی بین رطوبت و تخلخل وجود دارد؛ به این صورت که زمانی رطوبت در خاک وجود دارد تخلخل کم می‌باشد اما با از بین رفتن رطوبت تخلخل زیاد و ذرات خاک از هم پاشیده می‌شوند. محورهای ارتباطی نیز با وجود عبور و مرورهای زیاد با ایجاد امواجی به طرفین و عمق زمین، به فروپاشی ذرات خاک در

محل‌های که رطوبت کاهش پیدا کرده به فرونشست زمین کمک کرده و فروچاله‌ها را تقویت می‌کند؛ بنابراین برای بررسی وزن این عامل، بیشترین ارزش، به بافرهای نزدیک به جاده اختصاص داده شد (شکل ۸).



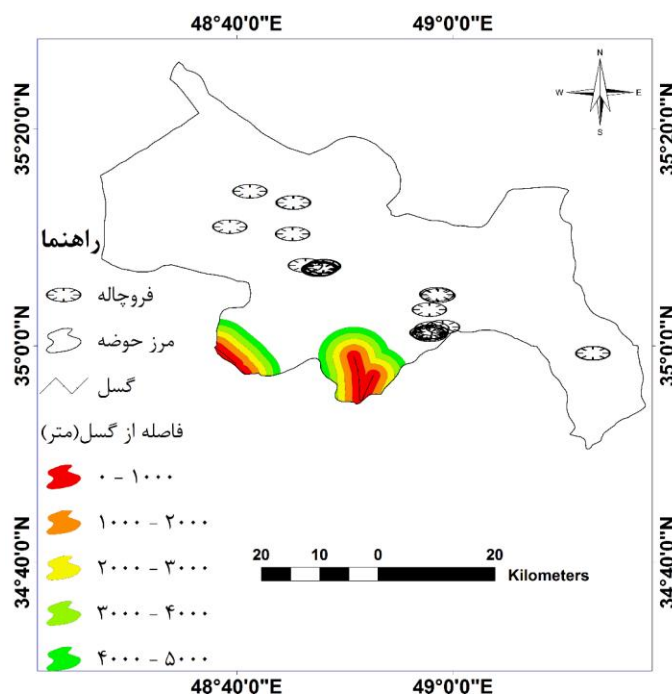
شکل ۸: نقشه فاصله از محورهای ارتباطی منطقه مورد مطالعه (منبع: وزارت راه و ترابری کشور، ۱۳۹۵)

فاصله از رودخانه: شبکه رودخانه‌ها با توجه به اثری که برجهت آب‌های سطحی و بالطبع بر آب‌های زیرزمینی می‌گذارد از دیگر عوامل مؤثر در تشکیل فروچاله‌ها است. بررسی کردن این فاکتور حاکی از این است که هرچه از سمت رودخانه‌ها دور شویم تراکم و تعداد فروچاله‌ها نیز کاهش می‌یابد (شکل ۹).



شکل ۹: نقشه فاصله از رودخانه منطقه مورد مطالعه (سازمان آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵)

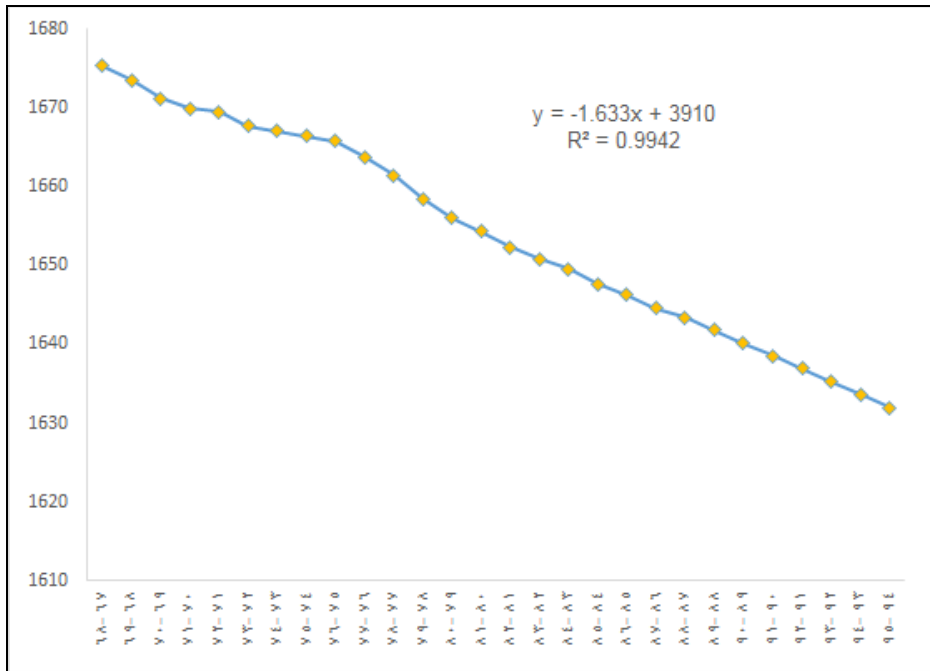
فاصله از گسل: نیروهای درونی و تکتونیکی نیز از عوامل ایجاد فروچاله‌ها هستند که با ایجاد شکستگی‌هایی در روی زمین و لایه‌های زمین‌شناسی می‌توانند حفرهای بزرگ و کوچکی را به وجود آورند و یا با شکست لایه‌های آبدار باعث پایین رفتن سطح آب فروچاله‌ها شوند. در منطقه مورد مطالعه با استناد به نقشه‌های زمین‌شناسی تنها چند گسل کوچک در منطقه دیده شد که با فاصله زیادی که دارند به نظر می‌رسد کمترین اثر را بر روی ایجاد فروچاله‌ها داشته باشند (شکل ۱۰).



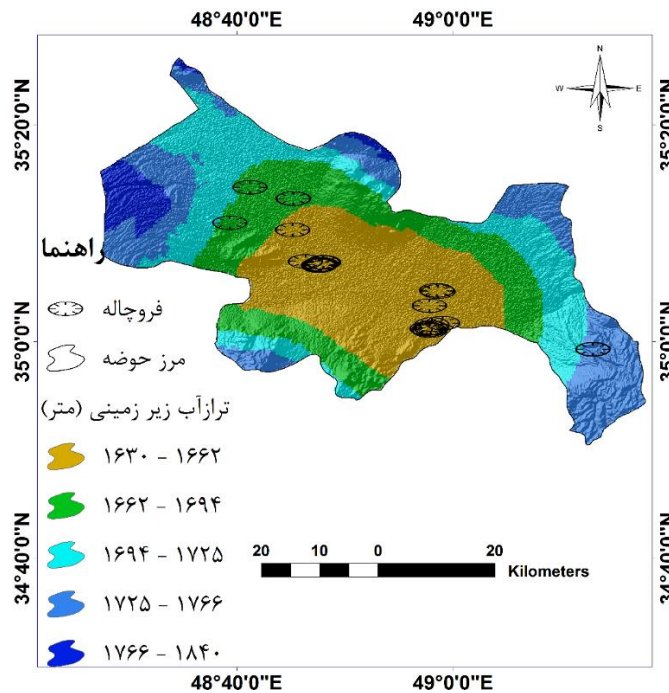
شکل ۱۰: نقشه فاصله از گسل منطقه مورد مطالعه (منبع: وزارت صنایع و معادن کشور، ۱۳۸۳)

تراز آب‌های زیرزمینی: در محدوده مطالعاتی این دشت طبق نقشه و بر اساس مرز محدوده مطالعاتی مربوطه، دشت کبودرآهنگ با مساحت آبخوان ۱۱۸۶ کیلومترمربع با تعداد پیژومترها ۵۳ حلقه اندازه‌گیری می‌شود. هیدروگراف معرف آب زیرزمینی برای دشت از سال ۱۳۶۸ تا سال ۱۳۸۷ تهیه‌شده، در این هیدروگراف میزان افت ۲۵ ساله به میزان ۳۵/۴۸ متر می‌باشد. بر اساس رابطه‌ی خطی که از افت سطح آب‌های زیرزمینی با تعداد سال، هیدروگراف میزان افت آب‌های زیرزمینی تا سال ۹۵ به دست آمد (شکل ۱۲)؛ افت متوسط سالیانه‌ای برابر ۱/۷۷ متر می‌باشد، میزان کسری کل حجم مخزن دشت با توجه به ضریب ذخیره ۴ درصدی در منطقه فوق، معادل ۱۶۸۳/۱۷ میلیون مترمکعب و کسری متوسط سالانه معادل ۸۴/۱۶ میلیون مترمکعب برآورد گردیده است. در سال آبی ۸۶-۸۷ میزان افت سطح آب زیرزمینی ۵/۳۹ متر است؛ در این سال میزان کسری حجم مخزن ۲۵۵/۷ میلیون مترمکعب برآورد گردیده است. بیشترین میزان افت سفره در سال آبی ۸۶-۸۷ در ۲۵ سال گذشته با ۵/۳۹ متر افت بوده است؛ دلیل این افت ناگهانی بروز خشک‌سالی و برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی دشت بوده که این امر نشانگر این است که آبخوان زیرزمینی دشت فوق در سال‌های خشک بسیار آسیب‌پذیر است (سازمان آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵). با توجه به مطالبی که بیان شد و با استفاده از داده‌های آب‌های زیرزمینی در منطقه و ارزش‌گذاری که انجام شد مسئله مهم، تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین عامل ایجاد فروچاله‌های منطقه است که با بررسی‌های که انجام‌شده محل

و تراکم فروچاله ها در مناطقی است که سطح آبهای زیرزمینی افت داشته و یا کمترین حد خود را داشتند (شکل ۱۲ و ۱۳).

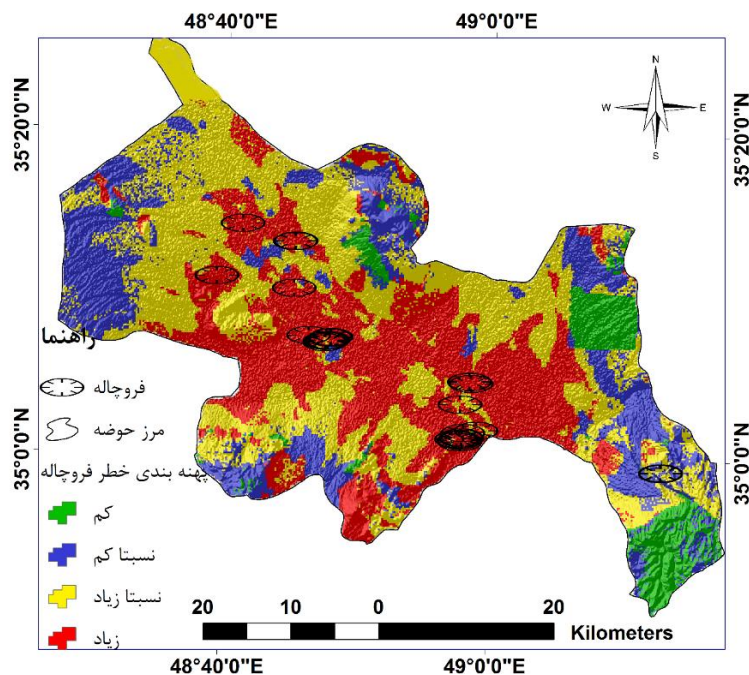


شکل ۱۲: میزان افت آبهای زیرزمینی سالهای آبی ۹۵-۱۳۶۷ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۵)



شکل ۱۳: نقشه تراز آبهای زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۵)

پس از انجام مراحل تهیه نقشه‌های عامل ایجاد فروچاله، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فروچاله نیز ایجاد شد که بر اساس این نقشه منطقه مورد مطالعه به ۴ کلاس خطر: کم، نسبتاً کم، نسبتاً زیاد و زیاد تقسیم‌بندی شد که این کلاس‌ها را بعد از صحت‌سنجی تأیید گردید (شکل ۱۴) (جدول ۲).



شکل ۱۴: نقشه پهنه‌بندی خطر ایجاد فروچاله در منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۵)

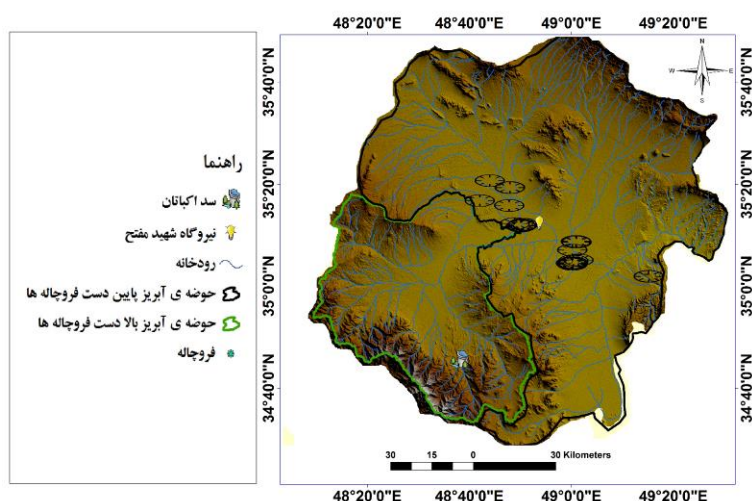
جدول ۲: ارزش‌گذاری کلاس‌های طبقه‌بندی خطر فروچاله

کلاس‌های خطر	ارزش‌ها
کم	۰
نسبتاً کم	۰/۷۱۶
نسبتاً زیاد	۰/۸
زیاد	۲/۴۰۶

شرح و تفسیر نتایج

سد اکباتان مهم‌ترین سد استان همدان است که در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر همدان بر روی رودخانه آبشینه (یلفان) پائین‌تر از محل تلاقی رودخانه‌های یلفان و ابرو واقع شده است. سد اولیه باهدف تأمین آب شرب شهر همدان و حق‌آبه کشاورزی با قدرت تنظیم سالیانه ۱۷ میلیون مترمکعب از آب رودخانه آبشینه در سال ۱۳۴۲ به بهره‌برداری رسید. علیرغم اینکه متوسط رواناب رودخانه در محل محور سد اکباتان، با ۲۱۳ کیلومتر مربع وسعت حوضه و ۵۰۵ میلی‌متر متوسط بارش سالیانه، حدود ۵۵ میلیون مترمکعب می‌باشد، فقط ۳۱ درصد از آن توسط سد اکباتان تنظیم و به مصرف می‌رسد. با توجه به انباشته شدن رسوبات در مخزن سد که منجر به کاهش میزان ذخیره سد گردیده پس از مطالعه و بررسی در سال ۱۳۸۷ طرح افزایش ارتفاع سد به میزان ۲۵ متر جهت ظرفیت مخزن عملیاتی گردید. ظرفیت فعلی مخزن هم ۴۰ میلیون مترمکعب است. ارتفاع سد در زمان ساخت ۵۴ متر (از پی) بوده است و پس از اتمام طرح افزایش ارتفاع، به ۷۹ متر رسیده است (سازمان آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵) (شکل ۱۵). با بررسی نقشه‌های منطقه، می‌توان دریافت شبکه زهکشی تحت تأثیر تیپ ناهمواری، نوع لیتولوژی و تغییرات ناهمواری یکی از بخش‌های اصلی ریخت‌زایی فعال در چشم‌انداز منطقه است که اختلال در بهره‌برداری از این منابع (ایجاد سد بر روی

یلفان) بهره‌برداری نادرست از آب‌های زیرزمینی، تغییر حریم رودخانه به نفع اراضی کشاورزی و صنعتی و تغییر نوع کشت از عوامل مؤثر در بروز پدیده فرونشست در منطقه است.



شکل ۱۵: نقشه‌ی حوضه‌های آبریز بالادست و پایین‌دست محدوده ایجاد فروچاله‌ها (سازمان آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۵)

لازمه بررسی فروچاله‌ها، وزن دهی عوامل مؤثر محیطی از جمله: لیتولوژی، آبراهه، گسل، کاربری اراضی، دامنه ارتفاعی، شیب، جهت شیب، تراز آب‌های زیرزمینی و جاده در محل وقوع فروچاله‌ها است. دیدگاه فضایی لازم به محیط پیرامون فروچاله‌ها با توجه به شکل (۱۵) حاکی از آن است که دو رودخانه اصلی محل فروچاله‌ها، یکی یلفان از نواحی مرتفع الوند (۳۵۴۰ متر ارتفاع) و دیگری رودخانه قره‌چای از نواحی کم ارتفاع سرچشمه می‌گیرد. هرچند وسعت حوضه یلفان نسبت به قره‌چای کمتر است ولی مرتفع‌تر بودن آبخیز آن باعث شده نقش بیشتر در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و سطحی منطقه داشته باشد. با احداث سد اکباتان و افزایش دادن ارتفاع سد، میزان تغذیه بشدت کاهش یافته و گسترش شهر همدان و شهرک‌های هم‌جوار همچون بهار باعث تغییر کاربری اراضی اطراف این شهرها به کشاورزی و نیاز بیشتر آب در قسمت بالادست شده و در مجموع میزان آب خروجی از حوضه یلفان را کاهش داده به دنبال آن بهره‌برداری از منابع آب دشت به‌واسطه چاه‌های عمیق و نیمه عمیق برای نیروگاه و سایر مصارف، باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است. عدم تغذیه و جبران آب برداشت‌شده در وقوع فروچاله‌ها نقش اساسی داشته است. به‌طوری‌که از نقطه خروجی رودخانه یلفان به فاصله ۵ کیلومتر به سمت شمال غرب (برخلاف جهت جریان رود) و ۱۰ کیلومتر در سمت جنوب شرق (در جهت جریان رود) تراکم فروچاله‌ها به حداکثر رسیده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توزیع فضایی فروچاله و عوامل کنترل و تشکیل فروچاله با استفاده از روش وزن شواهد در محیط GIS مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌بینی وقوع آینده نیاز به درک شرایط و فرآیندهای دخیل در ایجاد فروچاله دارد. مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد و وقوع فروچاله‌ها در محدوده موردنظر به ترتیب شامل: تراز آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و دامنه ارتفاعی می‌باشد. افت تراز آب‌های زیرزمینی و وزن‌های به‌دست‌آمده حاکی از بیشترین تعداد فروچاله در تراز ۱۶۶۲-۱۶۳۰، با اختلاف ۳۲ متری می‌باشد. بالاترین حساسیت در زمین‌شناسی مربوط به سازند آهک است که دلیل آن انحلال و ریزش‌های است که در این نوع لیتولوژی به وقوع می‌پیوندد و در مکانیسم تشکیل فروچاله

دخیل است. در زمانی که سطح آب‌های زیرزمینی بالا بوده سازند مذکور انحلال پیدا کرده و بعد از اُفت آب‌های زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه، دچار ریزش شده و در ایجاد فروچاله‌ها نقش اساسی داشته است. در کاربری اراضی بیشترین اثر مربوط به زمین‌های زراعی است که نشان‌دهنده استحصال بی‌رویه آب توسط کشاورزان است. به دلیل شیب زیاد مناطق کوهستانی و سرعت آب، شدت و مقدار نفوذ کم است و آب سرازیر شده به دشت‌های پایین دست منجر به انحلال سازندهای آهکی و ایجاد فروچاله می‌شود. بر اساس وزن دهی و ارزش‌گذاری دامنه ارتفاعی ۱۶۷۴-۱۵۸۳ بیشترین تراکم و وزن در ایجاد فروچاله را دارا می‌باشد. سقوط و فروپاشی پوشش فروچاله ممکن است باعث آسیب شدید مناطق مسکونی، مناطق کشاورزی، سازه‌های مهندسی و تهدید جانی انسان‌هایی شود که در مسیر فاجعه‌بار مکانیسم وقوع فروچاله قرار دارند. پیامد ناشی از آبرگیری سد اکباتان، کاهش حقبه حوضه قره‌چای است که به همراه حفر چاه‌های عمیق در نیروگاه شهید مفتاح، باعث اُفت شدید تراز آب‌های زیرزمینی و ایجاد فروچاله‌ها شده است. آماده‌سازی نقشه‌های خطر از ملاحظات آینده‌نگری برای تحقیقات فروچاله‌ها است. با استفاده از نقشه حساسیت زمین به فروچاله‌ها و نقشه خطر می‌توان مقدار خسارات جانی و مالی را کاهش داد. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های محبوبی اردکانی (۱۳۸۴)، گونگیو، وانفانگ (Gongyu & Wanfang, ۱۹۹۹)، حیدری و همکاران (۲۰۱۱، Heidari)، کریمی و همکاران (۱۳۹۲)، همخوانی دارد که این مهم نشانگر کاربردی بودن مدل بکار برده شده در تهیه و ترسیم نقشه خطر در منطقه فامنین- کبودرآهنگ است. در نهایت باید اذعان نمود که هرچند عوامل محیطی در ایجاد فروچاله‌ها نقش کلیدی دارند ولی ایجاد اغتشاش در جریان‌های اصلی محیط و قطع ارتباط آبخوان‌ها با بخش‌های دیگر یک سفره آب زیرزمینی، به‌واسطه احداث سد و غیره درافت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی نقش اساسی دارند که نباید مورد غفلت قرار گیرد. احداث سد اکباتان بر روی رودخانه یلغان، رشد غده‌ای شهر همدان و شهرک‌های اطراف و نیاز بیشتر به منابع آب در قسمت آبخیز به همراه افزایش تقاضای آب در پایین دست به خاطر نیروگاه برق و حفر بیشتر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق از عواملی هستند که درافت آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین عامل اثرگذار در ایجاد فروچاله‌ها نقش اساسی داشته‌اند.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در طی روند پژوهش و نتایج به‌دست‌آمده پیشنهادهای ارائه‌شده در این زمینه به شرح زیر می‌باشد:

- هرچند نمی‌توان از نیازهای روزافزون انسان به منابع آب صرف‌نظر نمود ولی رعایت حقبه‌های زیست‌محیطی در مناطق مختلف از بروز چنین مشکلاتی جلوگیری می‌نماید.
- رعایت حقبه‌های زیست‌محیطی، به این معنی است که از آب‌های زیرزمینی و سطحی به‌گونه‌ای استفاده شود که تعادل لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی منطقه حفظ شود.
- مسلماً اگر درصدی از منابع آب از سرچشمه حوضه‌ها به پایاب حوضه اختصاص داده شود و از منابع آب زیرزمینی در حد معقول بهره‌برداری گردد، خروجی نهایی بهره‌برداری از منابع آب منفی خواهد ماند و تعادل لندفرم‌های محیطی بر هم نخواهد خورد.
- استفاده از روش‌های نوین آبیاری کشاورزی برای به حداقل رساندن مصرف و هدر رفت آب.
- کنترل دقیق سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی، برای برنامه‌ریزی و جلوگیری از وقوع فروچاله.

- در نهایت با توجه به نقشه‌ی نهایی خطر فروچاله، از ساخت‌وسازهای مسکونی، تجاری و کاربری‌های کشاورزی در مناطق پرخطر جلوگیری شود و این مناطق به‌عنوان مناطق ممنوعه قلمداد گردد تا از ایجاد فروچاله‌های بیشتر ممانعت شود.

منابع

- امیری، منوچهر؛ هادی نظری پویا و حبیب‌الله مظاهری. ۱۳۸۳. علل و مکانیسم وقوع فروچاله‌ها در دشت فامنین - کبودرآهنگ. فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، ۷۳: ۱۸۶-۱۷۲.
- دادستان، احمد؛ ایمان انتظام سلطانی و محمدجواد بلورچی. ۱۳۸۴. مجموعه مقالات کنفرانس بررسی خطرات فروچاله‌ها در مناطق کارستی (با تأکید ویژه بر فروچاله‌های همدان). شرکت آب منطقه‌ای غرب کرمانشاه، ۱-۲۲.
- رئیس‌ی اردکانی، عزت‌الله. ۱۳۸۴. مجموعه مقالات کنفرانس بررسی مخاطرات فروچاله در مناطق کارستی، چاله‌های کارستی حادثه‌ساز و پتانسیل ایجاد آن در ایران با تأکید بر فروچاله‌ی همدان. شرکت آب منطقه‌ای غرب کرمانشاه، ۱-۱۲.
- سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان، ۱۳۹۵.
- علیزاده، امین. ۱۳۹۰. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ سی و دوم. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.
- قربانی، محمدصدیق؛ فرج‌الله محمودی، مجتبی‌یمانی و ابراهیم مقیمی. ۱۳۸۹. نقش تغییرات اقلیمی کواترن در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی (مطالعه موردی: ناهمواری شاهو، غرب ایران). فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، ۷۴: ۱-۱۶.
- کرم، امیر؛ پرویز ضیائیان و نعیمه السادات محصل همدانی. ۱۳۹۲. بررسی عوامل مؤثر در وقوع فروچاله‌های ابرکوه و تهیه‌ی نقشه‌ی خطر نواحی مستعد بروز آن. کاوش‌های جغرافیای مناطق بیابانی، سال اول، ۱: ۳۴-۱۷.
- کریمی، حاجی؛ پرویز گرابی و محسن توکلی. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فروچاله با استفاده از رگرسیون چند متغیره، مطالعه موردی: فروچاله‌های ریزشی دشت جابر، استان ایلام. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، تابستان ۹۱، ۶: ۵۳-۶۲.
- کریمی، مرتضی؛ علی‌اصغر قنبری و شهرام امیری. ۱۳۹۲. سنجش خطرپذیری سکونتگاه‌های شهری از پدیده فرونشست زمین مطالعه موردی: منطقه ۱۸ شهر تهران. مجله علمی-پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، سال سوم، ۱ (پیاپی ۸): ۳۷-۵۶.
- محبوبی اردکانی، احمدرضا؛ سیدعباس هاشمی. ۱۳۸۴. مجموعه مقالات کنفرانس بررسی مخاطرات فروچاله در مناطق کارستی، بررسی علل نشست عمومی زمین و چاله‌های فرونشستی در دشت فامنین با نگرش ویژه بر موقعیت نیروگاه شهید مفتاح (با تأکید ویژه بر فروچاله‌های همدان). شرکت آب منطقه‌ای غرب کرمانشاه، ۱-۱۵.
- وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۵.
- وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ برگ ۱:۱۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ نقشه‌های زمین‌شناسی استان همدان، کبودرآهنگ، ۱۳۸۳.
- وزارت راه و شهرسازی کشور، اداره کل راه و شهرسازی استان همدان، ۱۳۹۵.
- وزارت کشور، سازمان تقسیمات سیاسی کشور، تقسیمات سیاسی استان همدان، ۱۳۹۵.
- ولیزاده، رسول؛ بهروز یعقوبی کیکله و حسن موسیوند. ۱۳۸۴. مجموعه مقالات کنفرانس بررسی خطرات فروچاله‌ها در مناطق کارستی، تحلیلی بر فروچاله‌های دشت مرکزی. همدان شرکت آب منطقه‌ای غرب کرمانشاه، ۱-۱.
- Dolores, M. F.G. Fidelibus, and s. Giuseppe. ۲۰۱۱. Human-induced hydrogeological changes and sinkholes in the coastal gypsum karst of Lesina Marina area (Foggia Province, Italy). Engineering Geology, ۱۱۸: ۱۹-۱.
- Gao, Y. ۲۰۰۲. Karst Feature Distribution in Southeastern Minnesota: Extending GIS-Based Database for Spatial Analysis and Resource Management (PhD Thesis). University of Minnesota.

- Gongyu, L. Z. Wanfang. ۱۹۹۹. Sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention. *Engineering Geology*, ۵۲: ۵۰-۴۵.
- Gutierrez, F. A.H. Cooper and K.S. Johnson. ۲۰۰۸. Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas, *Environ Geol*, v. ۵۳: ۱۰۲۲-۱۰۰۷.
- Heidari, M. G.R. Khanlari, A.R. Taleb Beydokhti and A.A. Momeni. ۲۰۱۱. The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan, Iran. *Geomorphology*, ۱۳۲: ۸۶-۷۶.
- Newton, J. S. ۱۹۸۷. Development of sinkholes resulting from man's activities in the Eastern United State, United State, United State Geological Survey, Circular ۹۶B, ۵B, Bibliography, ۴۰.
- Ozdemir, A. ۲۰۱۵. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapinar (Konya, Turkey). *Geomorphology*, ۲۴۵: ۵۰-۴۰.
- Margiotta, S. S Negri, M. Parise and R. Valloni. ۲۰۱۲. Mapping the susceptibility to sinkholes in coastal areas, based on stratigraphy. *geomorphology and geophysics*, Nat Hazards, v ۶۲: ۶۷۶-۶۵۷.
- Varnes, D. J. ۱۹۸۴. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice* UNESCO, Paris.
- William, W. B. ۱۹۸۸. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press.
- www.earthexplorer.usgs.gov