

ارزیابی تحول‌یافتگی توده کارستی شاهو با استفاده از روش داده‌کاوی تعمیم‌یافته

عبدالکریم ویسی * - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
دکتر ابراهیم مقیمی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
دکتر مهران مقصودی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
دکتر مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
دکتر سیدموسی حسینی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

چکیده

توده کارستی شاهو در شمال غرب استان کرمانشاه به واسطه گستردگی سازندهای آهکی و وجود گسل‌ها و درزه‌های زمین‌شناختی از پتانسیل زیادی برای کارست‌زایی برخوردار است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی مکانی تحول کارست در این منطقه است. در این پژوهش ۱۰ عامل محیطی تأثیرگذار در تحول کارست استفاده گردیده است. دولین‌های کارستی منطقه با استفاده از روش CCL استخراج گردید. برای بررسی ارتباط میان دولین‌ها و عوامل مؤثر بر تحول کارست از نظریه تابع اطمینان شهودی استفاده شد و وزن طبقه‌های هر عامل مشخص شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تحول کارست در شیب‌های ۵-۰ درصد، جهت شیب‌های شمالی و هموار، ارتفاع بالاتر از ۲۵۰۰ متر، فاصله نسبتاً کم از آبراهه‌ها (۱۰۰-۲۰۰ متر)، فاصله کم از گسل (کمتر از ۱۰۰۰ متر)، سازند توده‌ای بیستون، زمین‌های مرتعی و جنگل‌های نیمه انبوه، دامنه‌های مقعر و مناطق پربارش قرار دارد. نقشه پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل GAM در نرم‌افزار آماری R برای منطقه تهیه شد. نتایج قابلیت بالای تحول کارست این منطقه را نشان می‌دهد؛ به طوری که ۲۷ درصد منطقه در طبقه با تحول زیاد و ۳۷ درصد آن در منطقه با تحول متوسط واقع شده است در حالی که تنها ۱۷ درصد از کل منطقه در پهنه با تحول کارست خیلی کم واقع شده است. مطابقت بالای نتایج به دست آمده با واقعیت منطقه مورد مطالعه، بیانگر کارایی بالای مدل است.

واژگان کلیدی: تحول کارست، دولین، داده‌کاوی، شاهو.

مقدمه

اصطلاح کارست به مناطقی اطلاق می‌شود که عمدتاً از سنگ‌های کربناته انحلال‌پذیر و توده‌ای یا تبخیری تشکیل شده است که به صورت فرم‌های خاص در سطح و زیرزمین در نتیجه عمل انحلال پدیدار می‌شوند (کوکوریچ و همکاران^۱، ۲۰۱۴:۲۳). بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته اکثر کارست‌شناسان بر این عقیده‌اند که عوامل مؤثر در توسعه کارست به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌شوند (قدیمی و همکاران، ۱۳۹۴:۶۹). مناطق کارستی نقش مهمی در زندگی ساکنان خود داشته و به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک از اهمیت زیادی در تأمین ذخایر آبی برخوردار هستند (به‌نیافر، ۱۳۸۸:۱۲۲) به‌گونه‌ای که بر اساس تحقیقات یونسکو منابع آب کارست مهم‌ترین و امن‌ترین منابع آب آشامیدنی در دنیا محسوب می‌شوند (آیورلی^۲، ۲۰۱۰:۶). این‌گونه برآورد شده است که امروزه آبخوان‌های کارستی در حدود ۲۵ درصد آب آشامیدنی جهان را تأمین می‌کنند (فورد و ویلیامز^۳، ۱۹۸۹). به نظر می‌رسد با توجه به آلودگی منابع آب غیرکارستی در نتیجه فعالیت‌های انسانی استفاده از منابع کارست افزایش یابد (پاریسه و همکاران^۴، ۲۰۱۸:۲۳۶). با توجه به وسعت زیاد سازندهای کربناته در ایران و اهمیت آن از جنبه‌های مختلف به‌ویژه از منظر تأمین منابع آب، انجام هر پژوهشی در این زمینه ضروری است. بررسی منابع منتشرشده در ارتباط با موضوع تحقیق نشان داد که پژوهش‌های در این زمینه به‌عمل آمده است که به نمونه‌هایی از آن اشاره می‌شود.

قربانی و اونق (۱۳۹۱) مدل رگرسیون خطی چندمتغیره را به منظور پهنه‌بندی تحول کارست در توده کارستی شاهو به کار برده‌اند. هم‌خوانی زیاد نقشه‌ها و نتایج به دست آمده با موقعیت منطقه مطالعاتی گویای کارایی و قابلیت اعتماد مدل است. صفاری و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به بررسی میزان تحول کارست در حوضه قره‌سو پرداختند و دریافتند که مناطق شمال و شمال‌شرقی حوضه دارای کارست توسعه‌یافته هستند و نیازمند برنامه‌ریزی‌های متناسب با وضعیت توسعه‌یافتگی هستند. کومار و همکاران^۵ (۲۰۱۳) مناطق مستعد توسعه آب‌های زیرزمینی در حوضه رودخانه کوه را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که حاکی از متناسب بودن مدل منطق فازی با واقعیت‌های محیطی منطقه است. تیرلا و ویجولی^۶ (۲۰۱۳) به مطالعه توسعه و تحول کارست پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که درز و شکاف‌ها و سیستم‌های گسلی منطقه به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در توسعه کارست محسوب می‌شوند. بانیش و اندرسون^۷ (۲۰۱۷) با بررسی عوامل تأثیرگذار بر تحول کارست در جنوب غربی ایالت میسوری آمریکا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ژئوفیزیکی دریافتند که بسیاری از فعالیت‌های انسانی در این منطقه بدون توجه به وضعیت تحول کارست بوده است و تهیه نقشه کارست ضروری به نظر می‌رسد. ژو و همکاران^۸ (۲۰۱۷) با بررسی توزیع فضایی غارها در مناطق کارستی به منظور تعیین عوامل تأثیرگذار در تحول کارست درونی دریافتند که توزیع فضایی این اشکال کارستی متأثر از ضخامت سازند کربناته، ویژگی‌های سنگ و توسعه شبکه زهکشی درونی است.

منابع آب کارست مهم‌ترین منبع تأمین آب در استان کرمانشاه می‌باشند. با توجه به ویژگی‌های پهنه‌های کارستی در این منطقه، این منابع در مقابله با تغییرات محیطی بسیار حساس می‌باشند. از این‌رو شناسایی اشکال کارست، بررسی و تحلیل آن‌ها روش‌هایی هستند که نمی‌توان آن‌ها را از بررسی‌های پیچیده پهنه‌های کارستی جدا کرد (ملکی، ۱۳۸۸:۹۳). علاوه بر این در دهه‌های اخیر نیاز روبه رشدی به بررسی و تحلیل رفتارهای زمین و نظام پویای آن در منابع سطح زمین و

1. Kukurić

2. Aureli

3. Ford & Williams

4. Parise et al

5. Kumar et al

6. Tirla & Vijuilie

7. Bansah & Anderson

8. Zhou et al

زیرزمین شکل گرفته است (کلوتینگ و پودلاچیکوف^۱، ۲۰۰۰:۱۷۱) پهنه‌های کارستی با دارا بودن ویژگی‌های خاص از قبیل انحلال‌پذیری و واکنش متفاوت آن‌ها در مقابل عوامل مورفودینامیک و مورفوتکتونیک، در پروژه‌های عمرانی نیازمند مطالعه ویژه هستند (باکالوویچ^۲، ۲۰۱۸:۲۴۸). آبخوان‌های کارستی در منطقه شاهو تغذیه‌کننده بسیاری از رودخانه‌ها و تالاب‌های کرمانشاه بوده و علاوه بر آن جوامع محلی اطراف برای مقاصد شرب و کشاورزی از آب این آبخوان‌ها استفاده می‌کنند. از این رو با توجه به این امر تهیه نقشه‌های تعیین‌کننده میزان توسعه‌یافتگی کارست در این مناطق بسیار بااهمیت است. با توجه به اینکه توده کارستی شاهو در تقسیمات زمین‌ساختی در زون زاگرس رورانده واقع شده است و با توجه به خصوصیات تکتونیک و زمین‌شناسی و اقلیمی حاکم بر آن، اشکال کارستی تکامل‌یافته و شاخصی که در آن شکل گرفته است. تکامل اشکال کارست در منطقه با عوارضی مانند غارهای متعدد، دولین‌ها و چشمه‌های متعدد با حجم آبدهی بالا همراه بوده است. در طبیعت مرز مشخصی برای طبقه‌های نوع خاک، انواع کاربری زمین و واحدهای سنگ‌شناسی وجود ندارد و تعیین مرز طبیعی برای عوامل پیوسته نظیر ارتفاع، شیب، فاصله از عناصر خطی، شاخص‌های پستی و بلندی و عناصر تراکمی بسیار مشکل است. به همین دلیل مدل‌های سنتی و آماری در برخورد با این متغیرهای ورودی معایبی دارند. تعیین زیاد بودن درستی در ارزیابی پدیده‌های زمین‌شناسی بسیار مهم است و ساده گرفتن متغیرهای اصلی پدیده زمینی، طبقه‌بندی آن‌ها و تعاملات میان آن‌ها می‌تواند منجر به نتایج نادرست در نقشه نهایی شود. در بیشتر بررسی‌ها، قضاوت‌های کارشناسی نقش مهمی دارد و رویکردهای تجربی گسترده‌ای برای ارزیابی‌های مختلف به کار رفته است. این مشکلات منجر به استفاده از روش‌های داده‌کاوی در مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک شده است (تول^۳، ۱۹۶:۷۶۹) هدف از انجام این پژوهش بررسی نقش و میزان تاثیر هر یک از عوامل مورد بررسی در توسعه‌یافتگی کارست، پهنه‌بندی حوضه از نظر توسعه‌یافتگی با استفاده از مدل جمعی تعمیم‌یافته و همچنین دست‌یابی به میزان کارایی مدل GAM در مطالعات مربوط به کارست است.

منطقه مورد مطالعه

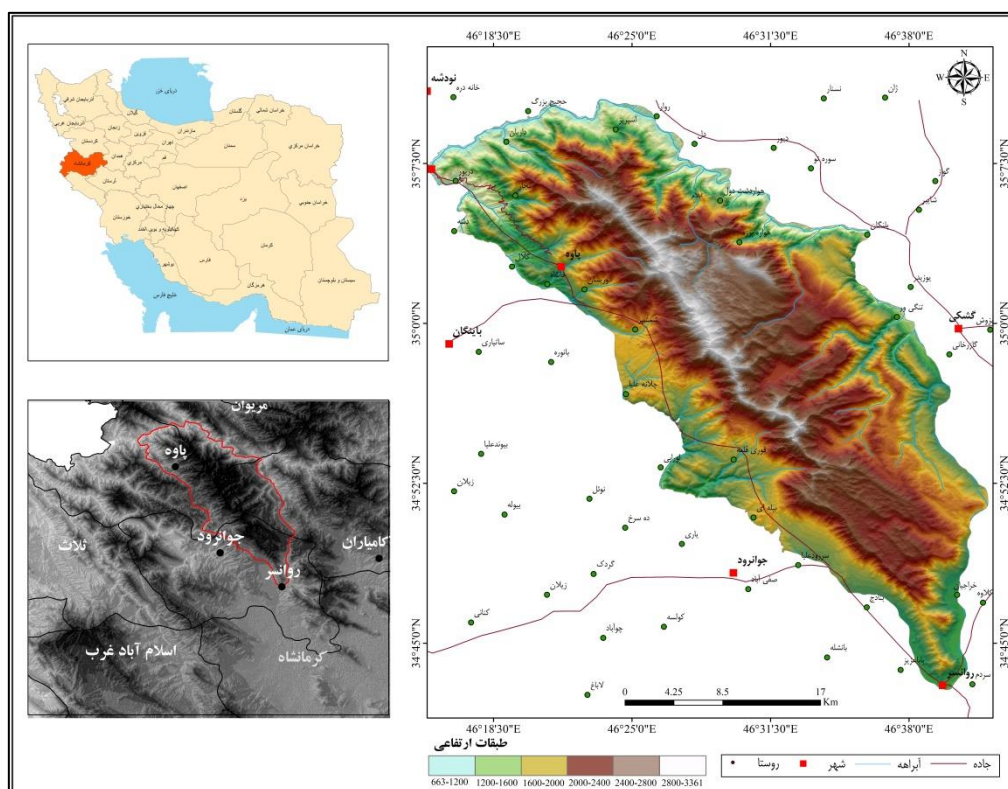
منطقه‌ی کارستی شاهو در زاگرس رورانده واقع شده است. بخش عمده‌ی این منطقه‌ی کارستی، شامل یک توده کوهستانی آهکی با ضخامت زیاد است. اسکلت اصلی ناهمواری شاهو متشکل از آهک‌های ضخیم بیستون است که سن آهک‌های آن به کرتاسه برمی‌گردد و با روند شمالغربی - جنوبشرقی در فاصله‌ی میان استان‌های کردستان و کرمانشاه قرار گرفته است (شکل ۱). آهک‌های ضخیم بیستون با ضخامت تقریبی ۳۰۰۰ متر رسوبات به شدت چین‌خورده‌ای هستند که تکوین آن از تریاس بالایی تا کرتاسه میانی - پایانی به طول انجامیده است (آگارد و همکاران^۴، ۲۰۰۵).

1. Cloetingh & Podlachikov

2. Bakalowicz

3. Toll

4. Agard et al



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

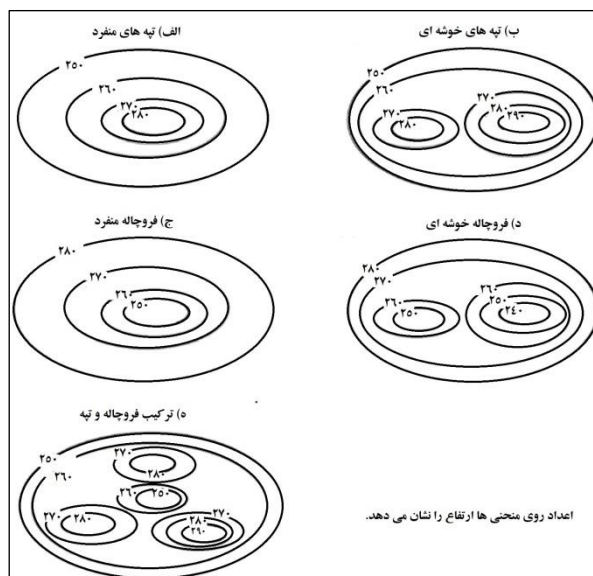
شهرهای پاوه، جوانرود و روانسر در دامنه جنوبی این ناهمواری قرار گرفته‌اند. محدوده مورد مطالعه بین عرض‌های $47^{\circ} 42'$ تا $34^{\circ} 5' 7''$ و طول شرقی $29^{\circ} 23' 46''$ تا $50^{\circ} 40' 46''$ قرار گرفته‌اند. براساس بارش ایستگاه‌های جوانرود و روانسر منطقه مورد مطالعه دارای متوسط بارندگی سالانه 672 میلی‌متر در سال می‌باشد که قطعاً با افزایش ارتفاع مقدار بارندگی نیز افزایش می‌یابد. بخش اعظم بارش در ارتفاعات به صورت برف است و توزیع بارندگی از شرق به غرب افزایش می‌یابد. میانگین سالانه دما در منطقه شاهو $13/6$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق مبتنی بر روش‌های میدانی، ابزاری و کتابخانه‌ای است. در گام نخست با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، محدوده حوضه مورد مطالعه مشخص شد. داده‌های اصلی پژوهش شامل مدل رقومی ارتفاع $12/5$ متر ماهواره ALOS-PALSAR، نقشه‌های زمین‌شناسی $1:100000$ ، نقشه کاربری اراضی از دفتر طرح و برنامه‌ریزی استانداری کرمانشاه و نقشه خاک تهیه‌شده به‌وسیله پژوهشکده خاک می‌شود. در این پژوهش ابتدا دولین‌های کارستی به‌عنوان تحول‌یافته‌ترین لندفرم کارستی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش CCL^1 شناسایی شدند و با استفاده از مطالعات میدانی دقت سنجی شدند. در ادامه نقشه پراکنش دولین‌ها تهیه شد. روش CCL بر این پایه استوار است که دورترین (خارجی‌ترین) منحنی بسته به‌عنوان مرز یک لندفرم مجزا مورد استفاده قرار گرفت. از این رو یک لندفرم خاص به‌وسیله مجموعه‌ای از منحنی‌های بسته فروچاله در دورترین CCL نشان داده می‌شود. پس از آن نوع لندفرم منفرد با مطالعه CCL بیرونی و تغییرات ارتفاعی بین این دو تعیین شد. هر دسته CCL با یک گره خاص به یک گراف مدور تبدیل شد که نشان‌دهنده یک CCL خاص

¹. Closed Contour Line

است. خارجی‌ترین CCL به وسیله یک گره اصلی نشان داده می‌شود. یک گره برگی برای نشان دادن CCL درونی استفاده شده است که هیچ CCL دیگری را در بر نمی‌گیرد اما خود حداقل به وسیله یک CCL محدود شده است. اگر یک CCL حداقل دو CCL دیگر را با ارتفاع یکسان در برگیرد، به عنوان یک شاخه از گراف مدور تعریف شده است. همه CCL‌های دیگر در خارجی‌ترین CCL به وسیله گره‌های میانی نشان داده است (لیانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۴: ۱۰۷۵). با توجه به این موضوع لندفرم‌های منفرد می‌توانند با استفاده از سناریوی ذیل تشریح گردند (شکل ۲).



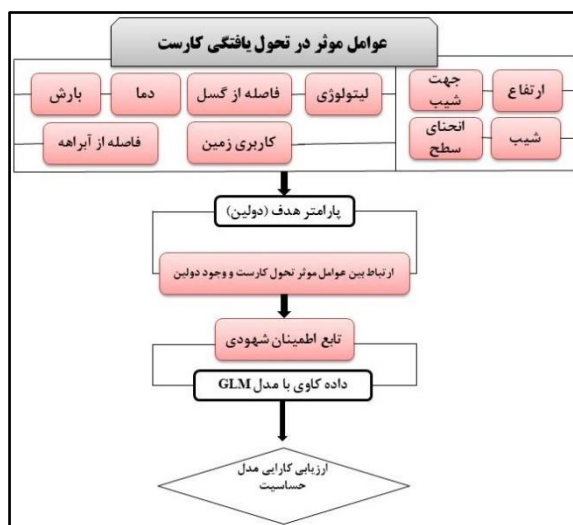
شکل ۲. تفکیک انواع دولین‌ها و تپه‌های کارستی در روش CCL

مراحل انجام تحقیق با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته^۲ در توده کارستی شاهو در شکل ۳ آورده شده است. بازدیدهای میدانی به منظور کنترل لایه‌های اطلاعاتی با داده‌های سطح زمین و همچنین تهیه تصویر و عکس‌برداری از دولین‌ها صورت گرفت. در ادامه با تحلیل ژئومورفولوژی کارست منطقه و بررسی دولین‌ها، پیشینه تحقیق و داده‌های در دسترس منطقه ۱۰ عامل: شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، کاربری زمین و خاک به عنوان عوامل مؤثر در تحول کارست مشخص گردیدند. در ادامه به منظور بررسی ارتباط هر یک از عوامل مؤثر بر تحول کارست در منطقه شاهو نقشه هر یک از عوامل مؤثر با نقشه پراکنش دولین‌ها در نرم‌افزار ARC GIS هم‌پوشانی داده شد و وزن هر طبقه از عوامل مؤثر بر تحول کارست با استفاده از تابع اطمینان شهودی^۳ به دست آمد.

¹ . Liang et al

² . Generalized additive model

³ . Evidential belief function (EBF)



شکل ۳. فلوجارت مدل‌سازی تحول کارست با استفاده از مدل GLM

تابع اطمینان شهودی را دمپستر با نظریه حدود بالا و پایین احتمال پیشنهاد کرد. دمپستر در واقع نوعی عدم قطعیت را در بیان اندازه‌ی احتمال پیشامدها مدل‌سازی کرد (دمپستر^۱، ۱۹۶۷) پس از آن شایفر^۲ (۱۹۶۷) این نظریه را با نام نظریه شواهد که ساختاری برای نمایش اطلاعات در نبود قطعیت پی‌ریزی کرد (شایفر، ۱۹۶۷). مدل آماری تابع اطمینان شهودی بر اساس قانون دمپستر در تعمیم مدل احتمالاتی حد بالا و پایین بیزین برآورد شده است (دمپستر، ۱۹۶۷). فرضیه تابع اطمینان شهودی شامل درجه اطمینان (Bel)، درجه عدم اطمینان (Dis)، درجه نبود قطعیت (Unc) و درجه منطقی (Pls) معرفی می‌شود (کارانزا و هاله، ۲۰۰۳؛ آلتوآینی و همکاران^۳، ۲۰۱۴). به طور کلی Bel و Pls به ترتیب حد بالا و پایین احتمالات است (دمپستر، ۱۹۶۷). براین اساس اختلاف میان Bel و Pls، درجه عدم قطعیت است که بیانگر درجه نبود اطمینان است. براساس رابطه (Pls-1) یا (1-Unc) محاسبه می‌شود (لی و همکاران^۴، ۲۰۱۳؛ کارانزا و همکاران^۵، ۲۰۰۵).

مدل جمعی تعمیم یافته

مدل جمعی تعمیم یافته تحلیلی ناپارامتریک است که بسط مدل‌های خطی تعمیم یافته است و خود نیز از مدل‌های خطی توسعه یافته است (هستی و تیبشیرانی^۶، ۱۹۹۰). در مدل جمعی تعمیم یافته برخلاف مدل رگرسیون خطی اجازه داده می‌شود که داده‌ها شکل منحنی پاسخ را تعیین کنند (هستی و تیبشیرانی، ۱۹۹۰). به‌طور کلی این مدل به‌صورت رابطه تعریف می‌شود

رابطه (۱)

$$g(\mu_i = X_i\beta + \sum_j^m = 1 f_i(x_{ij}))$$

1. Dempster

2. Shafer

3. Althwaynee et al

4. Li et al

5. Caranza et al

6. Hastie & Tibshiranics

که در آن Y_i مجموعه‌ای از توزیع نمایی (مانند توزیع نرمال دوجمله‌ای پواسون)، X_i ردیف i ام ماتریس مدل برای اجزای مدل پارامتریک، f_i تابع هموار متغیر تک کمکی X_i و β ضریب ثابت مدل است (فنگ^۱، ۲۰۰۸). برای مدل‌سازی مکانی دولین‌ها و تحول کارست از بسته GRASP در نرم‌افزار R استفاده شد.

ارزیابی مدل‌سازی مکانی و پهنه‌بندی تحول کارست

از آنجایی که به منظور ارزیابی مدل‌ها نمی‌توان از داده‌های به‌کاررفته شده در مدل‌سازی استفاده کرد از ۴۰ درصد (۴۶) دولین‌های تصادفی انتخاب‌شده استفاده شد. منحنی ROC مشخصه عملکرد نسبی هر مدل و سطح زیر منحنی بیان‌گر دقت مدل است، دلخواه‌ترین مدل بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC^2 از ۰/۵ تا ۱ متغیر است (پرادهان و همکاران^۳، ۲۰۱۴). به‌طور کلی اگر مقادیر AUC ۰/۱-۹، ۰/۰-۸/۹، ۰/۰-۷/۸، ۰/۰-۶/۰، ۰/۰-۶/۰ و ۰/۵-۰/۶ باشند به ترتیب بیانگر ارزیابی تخمین عالی، خیلی خوب، متوسط و ضعیف است (پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۶).

یافته‌های تحقیق

عوامل مؤثر در توسعه کارست

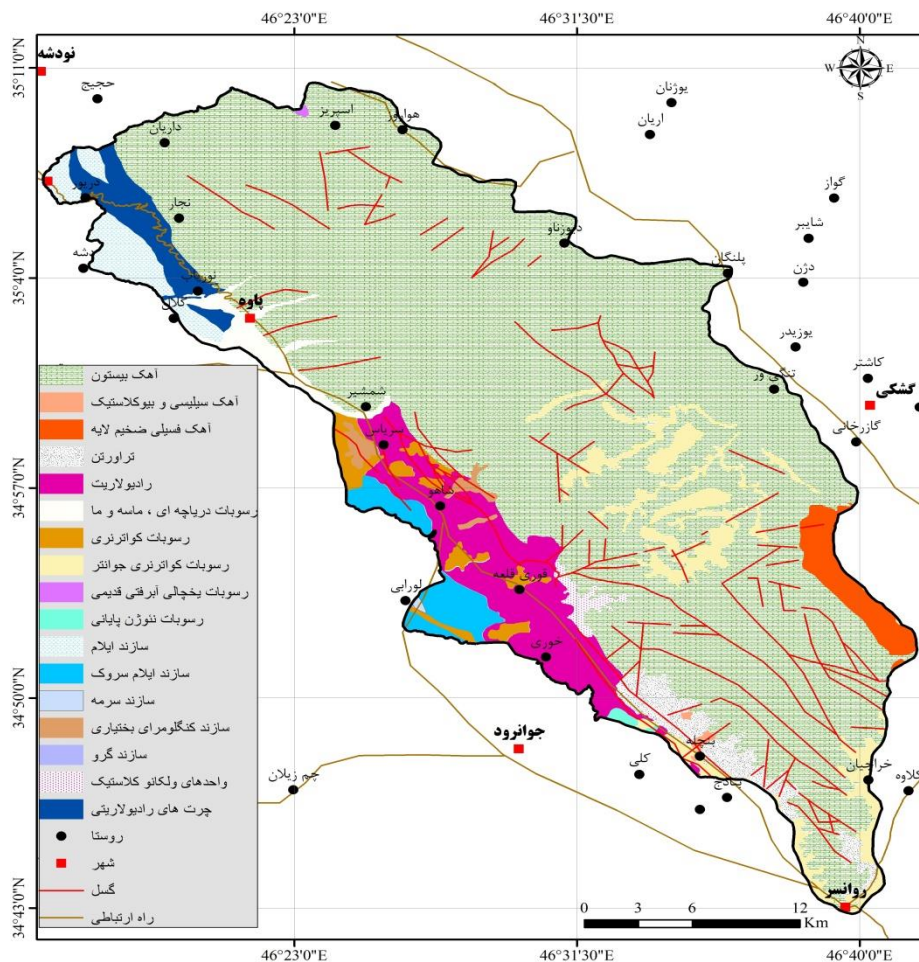
عوامل زمین‌ساختی

دو پارامتر سنگ‌شناسی و فاصله از گسل به‌عنوان عوامل مؤثر در توسعه فرایندهای کارستی انتخاب شدند. لیتولوژی تعیین‌کننده میزان نفوذ آب و همچنین تغییرات لندفرم‌های کارستی است؛ چراکه سازند آهکی بیستون با توجه به قابلیت انحلالی که دارند در توسعه فرایندهای کارستی نقش مهمی ایفا می‌کنند (شکل ۴). از طرف دیگر درز و شکاف‌ها مهم‌ترین عوامل مهم در نفوذ آب به داخل سنگ‌های کربناته محسوب می‌شوند. منطقه مورد مطالعه دارای تراکم بالایی از سیستم‌های گسلی اصلی و فرعی است. امتداد عمومی گسل‌ها هم‌راستا با روند زاگرس رورانده یعنی شمال‌غرب-جنوب-شرق است. گسل‌های فرعی دیگری نیز وجود دارد که با زاویه‌ای با سیستم‌های اصلی گسلی در تماس هستند و یا به موازات آن کشیده شده‌اند (شکل ۵).

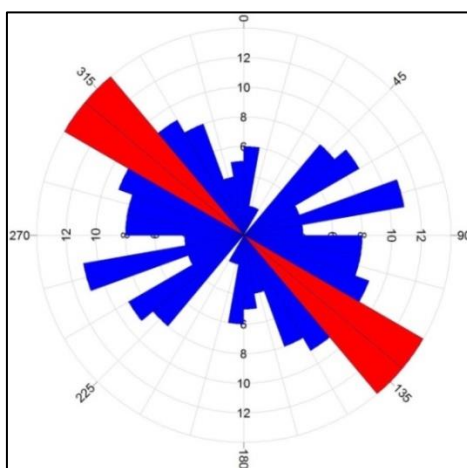
1. Fang

2. Area Under Curve

3. Pradhan et al



شکل ۴. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. رز دیاگرام گسل‌های اصلی و فرعی در توده کارستی شاهو

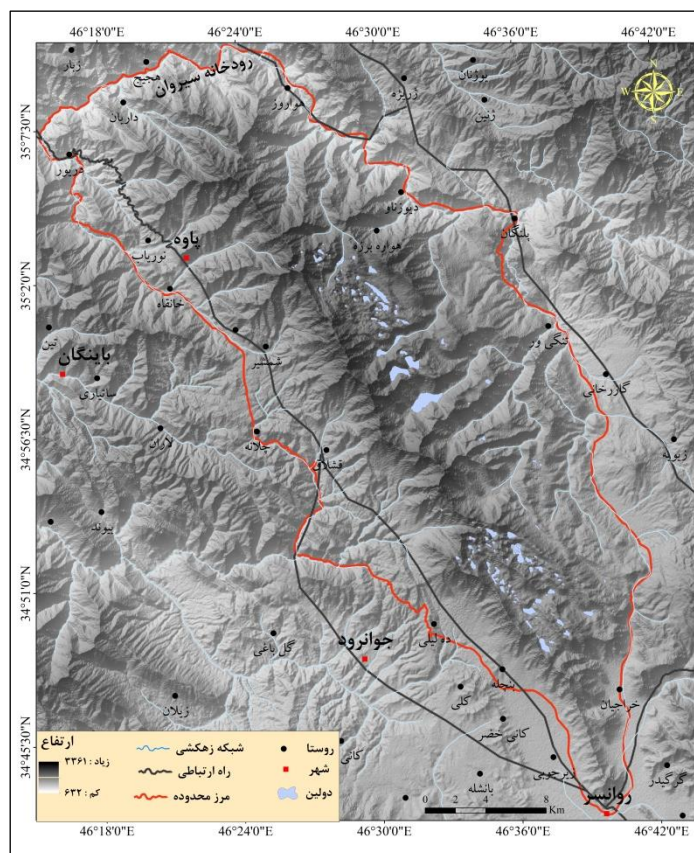
عوامل ژئومورفولوژیکی

عامل ارتفاع به‌عنوان یکی از پارامترهای ژئومورفولوژیکی تأثیرگذار در نوع اقلیم و میزان بارش هست به‌طوری‌که مناطق ارتفاعی بالاتر دارای میزان بارش بیشتر و اقلیم مرطوب‌تری هستند. از این‌رو میزان توسعه‌یافتگی فرایندهای کارستی در

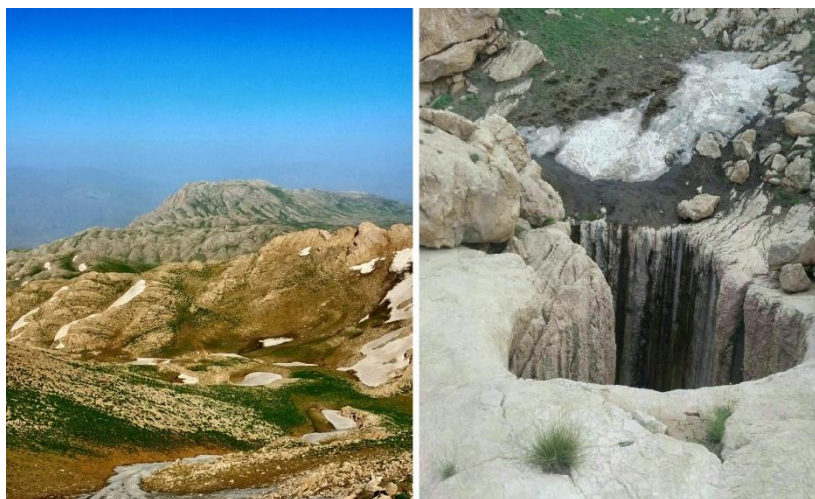
این مناطق نسبت به مناطق پست‌تر بیشتر خواهد بود. افزون بر این ارتفاع از سطح آبخوان، شرایط را برای جریان بیشتر سیال فراهم آورده و انحلال را تشدید می‌کند. دیگر پارامتر ژئومورفولوژیکی دیگر شیب است که نقش اصلی را در سرعت رواناب و نفوذپذیری ایفا می‌کند؛ به طوری که در مناطق پرشیب سرعت رواناب بیشتر و میزان نفوذ کم‌تر خواهد بود؛ بنابراین در مناطق پرشیب توسعه فرایندهای کارستی با سرعت کمتری نسبت به مناطق کم‌شیب صورت می‌گیرد. جهت شیب نیز پارامتر ژئومورفولوژیکی دیگر محسوب می‌شود که در میزان رطوبت و تبخیر تأثیر مستقیم دارد. در واقع در نیمکره شمالی در جهات روبه شمال میزان تابش نور کمتر از جهات رو به جنوب است، بنابراین میزان تبخیر کمتر و همچنین رطوبت بیشتری دارند. این عوامل سبب شده است تا جهات رو به شمال پتانسیل بیشتری جهت توسعه فرایندهای کارستی داشته باشند. پارامتر تأثیرگذار دیگر انحناى سطح دامنه است. در دامنه‌های کاو فرصت برای انحلال سنگ‌های کربناته بیشتر از دامنه‌های کوژ است به گونه‌ای که بیشتر انواع کارن‌های عمیق و تحول‌یافته در این دامنه‌ها شکل می‌گیرند. در مقابل در دامنه‌های کوژ به واسطه پرشیب بودن تحول اشکال کارستی کمتر است. از طرفی دامنه دولین‌های کارستی به صورت مقعر است و با هدایت آب‌های سطحی به درون دولین‌ها موجبات تحول کارست را فراهم می‌آورند.

پارامترهای هیدرواقليمی: منطقه مورد مطالعه در منطقه کوهستانی زاگرس و در مسیر بادهای باران‌زای غربی واقع شده است (معصوم‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین پتانسیل بالایی از منظر منابع آبی دارند. در این پژوهش با توجه به موضوع و هدف تحقیق از پارامترهای بارش، دما و شبکه زهکشی استفاده شده است. از نظر وضعیت بارشی منطقه مورد مطالعه بین منحنی‌های هم‌باران ۳۰۰ تا ۷۸۰ میلی‌متری قرار دارد. مناطق دارای رطوبت بیشتر و مناطقی که دارای بارش بیشتری هستند پتانسیل بیشتری جهت توسعه کارست دارند. دیگر پارامتر اقلیمی دیگر دما است که بر اساس پژوهش‌های پیشین هنگامی که دمای هوا کم است، تغییرات بارش تأثیر اندکی بر میزان انحلال کارست دارد، اما زمانی که دمای هوا به ۱۶ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد با افزایش بارش میزان انحلال کارست به سرعت افزایش می‌یابد. در منطقه مورد مطالعه به واسطه کارستی بودن شبکه زهکشی توسعه‌یافته‌ای را دارا نمی‌باشد چراکه بخش زیادی از بارش در سطح منطقه از طریق نفوذ متمرکز (دولین‌ها) به درون آبخوان‌ها راه می‌یابند.

دولین‌های محدوده مورد مطالعه عمدتاً در قسمت جنوبی و مرکزی منطقه مورد مطالعه تشکیل شده‌اند (شکل ۶). به لحاظ ویژگی‌های مورفومتری، تفاوت‌های زیادی را نشان می‌دهند، به طوری که بزرگ‌ترین دولین منطقه، در بخش مرکزی منطقه با مساحتی برابر با ۱/۴۱ و کوچک‌ترین آن‌ها در بخش شمال غربی منطقه مساحتی در حدود ۱۵۳۵ مترمربع را دارا می‌باشد. دامنه تغییر در مساحت این دولین‌ها زیاد ($R=0.49$) است و واریانس آن‌ها نیز رقمی بیش از ۰/۴ را نشان می‌دهد که درخور توجه است. اکثریت دولین‌های شناسایی شده در منطقه شاهو دارای عمق میانگین ۱۵ است. مورفومتری دولین‌ها عموماً تمایل به اشکال بیضوی یا کشیده دارند (شکل ۷).



شکل ۶. توزیع دولین‌های کارستی در کوهستان شاهو استخراج‌شده با روش CCL



شکل ۷. دولین‌های انحلالی در توده کارستی شاهو

نتایج حاصل از ارتباط مکانی هریک از عوامل مؤثر و دولین‌های کارستی منطقه با استفاده از نظریه تابع اطمینان شهودی در جدول ۱ آورده شده است. نتایج بررسی عامل شیب بیانگر آن است که بیشترین وزن دولین‌های ایجادشده در منطقه شاهو در شیب‌های ۵-۰ درصد می‌باشد به‌گونه‌ای که ۶۱ درصد از دولین‌های کارستی در این طبقه از شیب قرار گرفته است. این یافته‌ها با نتایج قربانی و همکار (۱۳۹۱)، عباسی و همکاران (۱۳۹۱) در زون زاگرس مرتفع همخوانی دارد. بیشترین

میزان دولین‌ها در جهت‌های شیب شمالی ایجاد شده است که با نتایج تحقیقات بسیاری از پژوهشگران از جمله مددی و همکار (۱۳۹۴) مطابقت دارد. نتایج طبقات ارتفاعی نشان داد که بیشترین وزن دولین‌ها (۸۷ درصد) مربوط به ارتفاع ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری است و در ارتفاع‌های پایین‌تر میزان تحول کارست و دولین کمتر است و این با نتایج یمانی و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی دارد. بررسی نتایج حاصل از واحدهای سنگ‌شناسی منطقه نشان داد که بیشترین وزن حاصل از درجه اطمینان ۰/۹۹۶ مربوط به سازند آهک توده‌ای بیستون است که اکثر دولین‌های کارستی را دربر گرفته است. پس‌از آن سازند آبرفت‌های کواترنری جوان با وزن (۰/۰۴) قرار دارد (که حاصل فرسایش سازند آهکی بیستون در ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متری است که در کف پولیه‌ها جمع شده است). در دیگر گروه‌های سازند وزن حاصل از درجه اطمینان صفر بود. نتایج کاربری زمین نشان داد که بیشتر دولین‌های کارستی در زمین‌های دارای کاربری مرتع خوب (۰/۴۵)، مرتع متوسط (۰/۴۸) و کاربری جنگل نیمه انبوه (۰/۷) بود. ارتباط دولین‌ها و فاصله از آبراهه‌ها نشان داد که بیشترین وزن (۰/۶۳) دولین‌ها در فاصله ۱۰۰-۲۰۰ متری از آبراهه دیده شده است.

جدول ۱. همبستگی مکانی میان نقاط دولین و عوامل مؤثر در تحول کارست با استفاده از تابع اطمینان شهودی

پارامتر	طبقه	Bel	Dis	Unc	Pls	تعداد پیکسل	تعداد دولین
درصد شیب	۵-۰	۰/۷۲۳	۰/۱۸	۰/۳۱	۰/۷۳	۳۳۸۳۴۱۶	۷۶
	۱۰-۵	۰/۱۸۹	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۶۴	۱۰۲۶۳۴۰	۴۱
	۲۰-۱۰	۰/۷۶	۰/۵۰۳	۰/۴۷۳	۰/۴۹	۹۸۳۶۵۷	۳
	۲۰<	۰/۱۲	۰/۴۷۸	۰/۴۸۲	۰/۵۱	۱۲۳۴۶۲۸	۱
جهت شیب	هموار	۰/۲۹۵	۰/۰۶۱	۰/۴۳۷	۰/۷۹	۳۸۶۷۴۲	۱۷
	شمال	۰/۴۷۶	۰/۱۹۶	۰/۵۲۳	۰/۹۳	۱۲۴۱۲۲۳	۵۷
	شرق	۰/۲۶	۰/۲۳۶	۰/۶۳۱	۰/۷۱	۷۸۵۱۶۵	۱۰
	جنوب	۰/۰۸۱	۰/۲۸۴	۰/۵۷۷	۰/۶۸	۱۸۷۶۹۳۵	۱۳
	غرب	۰/۱۳۹	۰/۲۵۶	۰/۵۴۰	۰/۷۸	۱۳۷۸۴۹۱	۱۵
ارتفاع	۱۰۰۰>	۰/۰۸	۰/۷۴۶	۰/۱۱۶	۰/۲۶	۳۴۵۶۸۷۹	۰
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۰/۲۷	۰/۱۹۶	۰/۲۰۷	۰/۵۷	۷۶۹۸۵۴	۱
	۲۵۰۰-۲۰۰۰	۰/۳۰	۰/۶۴	۰/۴۱۱	۰/۹۴	۱۴۵۲۳۵۱	۱۴
	۲۵۰۰<	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۳۰۴	۰/۹۰	۱۰۳۶۰۱۸	۱۰۶
فاصله از گسل	۰-۱۰۰۰	۰/۱۵۷	۰/۱۴۶	۰/۴۵۷	۰/۷۸	۷۵۶۴۸۷	۸۸
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۰/۱۹۳	۰/۱۲۸	۰/۴۲۱	۰/۷۶	۸۶۳۰۱۴	۲۴
	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۰/۱۲۶	۰/۲۰۳	۰/۵۱۱	۰/۴۳	۱۲۳۵۸۹۶	۵
	۳۰۰۰-۴۰۰۰	۰/۸۵	۰/۲۱۷	۰/۵۲۴	۰/۳۴	۱۷۴۵۶۳۲۸	۴
	۴۰۰۰<	۰/۷۳	۰/۲۶۴	۰/۵۸۷	۰/۳۸	۱۵۶۸۴۳۲۰	۰
فاصله از آبراهه	۱۰۰-۰	۰/۲۸۹	۰/۲۴۵	۰/۴۶۱	۰/۷۵	۶۹۹۶۵۷	۳۶
	۲۰۰-۱۰۰	۰/۱۸۵	۰/۲۷۱	۰/۵۴۴	۰/۷۲	۱۰۲۹۵۸۶	۶۹
	۲۰۰-۳۰۰	۰/۲۴۶	۰/۲۵۰	۰/۴۹۲	۰/۷۳	۱۸۸۱۷۴۳	۷
	۳۰۰<	۰/۲۶۹	۰/۲۴۸	۰/۵۰۳	۰/۷۶	۱۶۷۹۳۳۶	۱۹
بارش	۳۰۰>	۰	۰/۲۷۳	۰/۷۲۷	۰/۷۳	۱۹۵۶۶۰۸	۰
	۳۰۰_۵۰۰	۰/۸۲	۰/۱۷۴	۰/۵۵۳	۰/۷۱	۱۷۳۵۵۲۷	۲
	۵۰۰_۶۰۰	۰/۴۸	۰/۲۸۲	۰/۴۲۰	۰/۷۵	۸۹۷۵۶۱	۲۶
	۶۰۰<	۰/۴۴۶	۰/۳۶۱	۰/۳۶۳	۰/۷۳	۹۶۳۵۹۲	۹۲
دما	۰-(۲)	۰/۳۷۲	۰/۳۵۲	۰/۴۰۱	۰/۶۹	۲۵۳۰۱۸	۴
	۵-۰	۰/۴۸۲	۰/۳۷۴	۰/۳۷۸	۰/۷۳	۷۱۵۲۶۸	۱۱۶
	۱۵-۵	۰/۱۶۲	۰/۲۶۱	۰/۵۶۸	۰/۶۲	۲۴۵۱۲۶	۱
		۰/۴۴	۰/۱۲۹	۰/۶۷۷	۰/۷۱	۲۱۳۵۰۶۳	۰

۱۵<						
۱۱۱	۲۰۵۸۹۷۴	۰/۷۸	۰/۲۶۰	۰/۶۲۰	۰/۷۹۲	مقعر
۷	۱۱۵۸۶۳۲	۰/۶۹	۰/۵۷۰	۰/۳۳۸	۰/۱۸۷	هموار
۳	۱۶۸۳۵۹۶	۰/۴۳	۰/۱۷۱	۰/۴۲	۰/۲۱	محدب
۱۲۰	۴۴۲۳۶۷۰	۰/۹۸۹	۰/۴۶۲	۰/۱۸۱	۰/۹۹۱	آهک بیستون
.	۳۵۳۶۹۸	۰/۸۵	۰/۴۳۸	۰/۱۵۰	.	آهک ایلام
.	۱۲۵۳۰۱	۰/۸۵	۰/۲۱۶	۰/۱۵۳	.	تراورتن
.	۱۵۲۰۳	۰/۸۵	۰/۲۸۱	۰/۱۵۲	.	آهک فسیلی
۱	۱۴۲۲۳۸	۰/۸۵	۰/۸۴۹	۰/۱۵۴	۰/۰۹	رسوبات کواترنری
.	۴۱۳۸۲۱	۰/۸۵	۰/۸۴۶	۰/۱۵۰	.	رادپولاریت
.	۸۱۳۵۰۴	۰/۸۵	۰/۸۴۹	۰/۱۵۴	.	کنگولمرای
.	۳۵۷۴۴	۰/۸۵	۰/۸۴۵	۰/۱۵۱	.	بختیاری
						واحد ولکانو
۳۴	۱۱۶۵۹۳۲	۰/۸۹۲	۰/۳۶۸	۰/۱۲۶	۰/۴۲۹	مرتع متوسط
۸۶	۱۰۱۱۷۷۳	۰/۹۱۷	۰/۷۶۳	۰/۱۸۶	۰/۵۶۵	مرتع خوب
.	۸۷۰۲۳۴	۰/۸۶۰	۰/۸۴۷	۰/۱۵۳	.	مرتع ضعیف
۱	۲۷۵۳۶۱	۰/۸۶۷	۰/۸۴۲	۰/۱۵۰	۰/۰۲	باغات و زراعت
.	۱۰۴۳۳۵	۰/۸۵۸	۰/۸۵۲	۰/۱۵۱	.	آبی
.	۱۱۲۴۳۵۱	۰/۸۶۱	۰/۶۰۹	۰/۱۵۰	.	جنگل پراکنده
.	۷۵۵۲۶۴	۰/۸۷۲	۰/۸۳۷	۰/۱۳۳	.	اراضی زراعی
.	۴۸۶۱۲	۰/۸۶۰	۰/۵۵۰	۰/۱۵۰	.	اراضی لخت و صخره سطوح شهری

تهیه نقشه مدل‌سازی مکانی تحول کارست با مدل جمعی تعمیم‌یافته

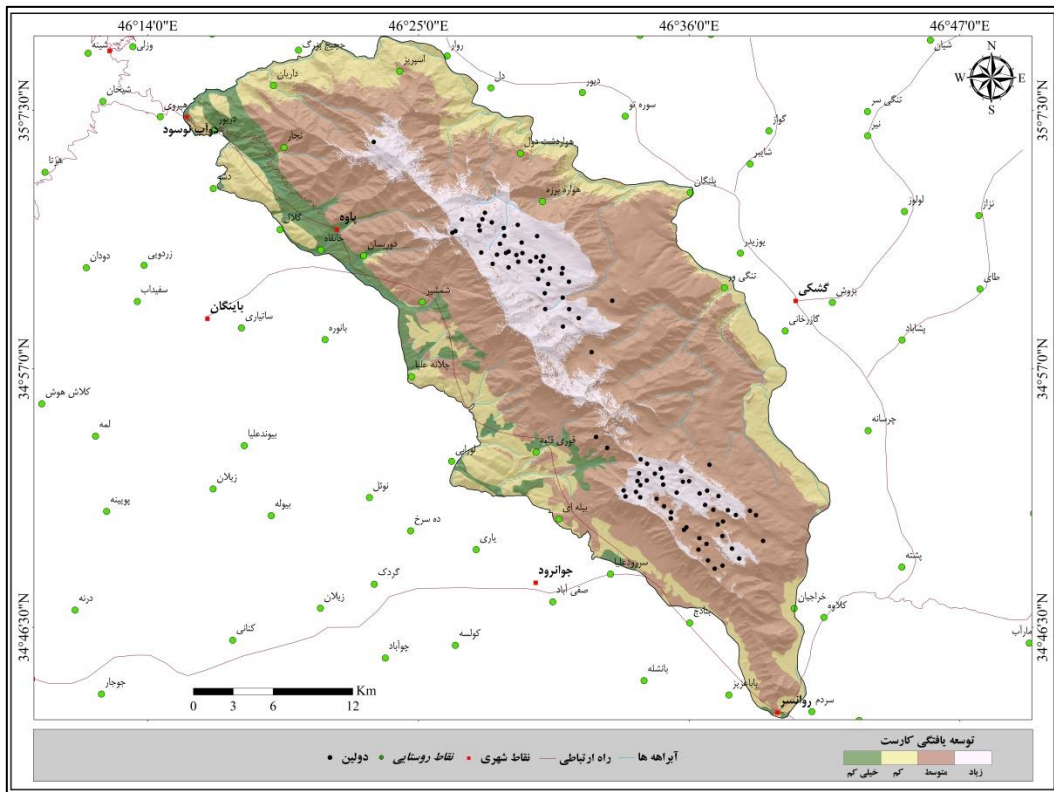
پس از آماده‌سازی عوامل مؤثر و شناسایی مناطق مختلف تحول کارست در منطقه شاهو، ارتباط مکانی هر یک از لایه‌ها و نقاط دولین بررسی و در قالب پرونده اکسل وارد نرم‌افزار R شد. پس از تعیین خروجی مدل در قالب TXT در نرم‌افزار SPSS فراخوانی شده و به نرم‌افزار ARC Gis منتقل شد و نقشه مدل‌سازی شده در سطح پیکسل به پیکسل برای کل منطقه آماده شد. تهیه نقشه نهایی تحول کارست در نرم‌افزار ARC Gis تهیه و بر اساس شکستگی‌های طبیعی (کوماک^۱، ۲۰۰۶) به چهار طبقه تحول خیلی کم، کم، متوسط، زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۸). مساحت طبقات تحول کارست با استفاده از مدل عمومی تجمیع‌یافته در شکل ۹ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که ۲۷ درصد از منطقه در طبقه تحول زیاد است. مدل جمعی تعمیم‌یافته نهایی نشان داد که از میان ۱۰ عامل به کارگرفته شده در مدل، لیتولوژی، شیب، فاصله از گسل، بارش، ارتفاع، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، خاک و جهت شیب به ترتیب اهمیت بسزایی در ایجاد و تحول دولین‌های کارستی دارند. به منظور ارزیابی صحت مدل از روش ارزیابی متقابل استفاده شد. معیارهای گوناگونی برای انجام این کار وجود دارد که می‌توان به ریشه دوم میانگین جذرخطا (RMSE) اشاره نمود که فرمول محاسبه آن به شرح زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (z * (xi) - z(xi))^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

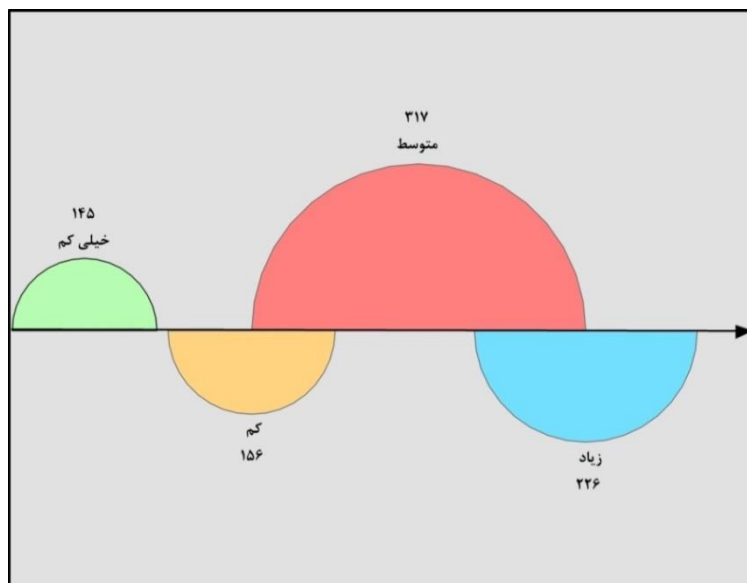
در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای، حذف و با استفاده از سایر نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد شد. این کار برای تمام نقاط مشاهده‌ای تکرار شد، به نحوی که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌شده برآورد وجود خواهد داشت و در ایان

^۱. Comac

با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده می‌توان میزان خطا و انحراف روش را GAM را برآورد کرد. RMSE صحت تخمین را نشان می‌دهد و هر روشی که RMSE آن کوچک باشد صحت آن نیز بیشتر خواهد بود. ضریب تبیین مدل جمعی تعمیم‌یافته برای عامل‌های عملکردی ۰/۷۴ بود (جدول ۲). مهم‌ترین مرحله در تفسیر مدل جمعی تعمیم‌یافته، توصیف منحنی پاسخ جزئی پیش‌بینی کننده است (پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۶).



شکل ۸. نقشه نهایی میزان تحول کارست منطقه شاهو با استفاده از مدل جمعی تعمیم‌یافته

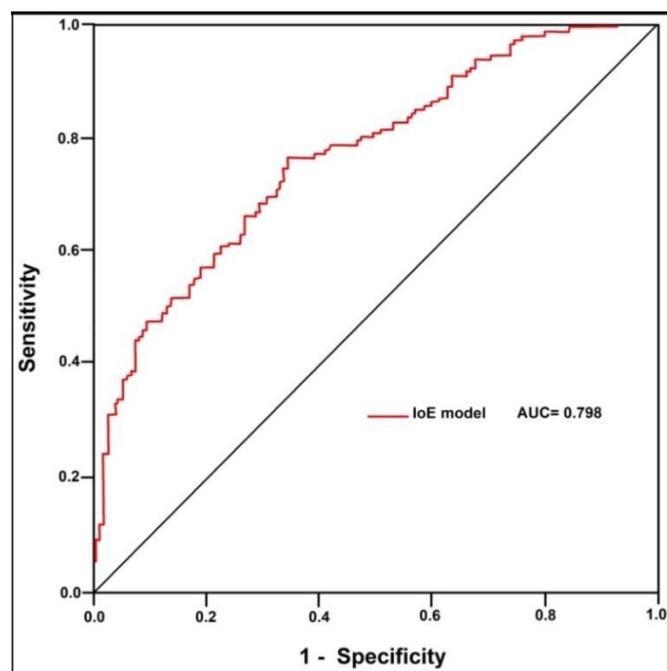


شکل ۹. مساحت (به کیلومتر) پهنه‌های تحول کارست در منطقه شاهو با استفاده از مدل جمعی تعمیم‌یافته

جدول ۲. عملکرد عامل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی جمعی تعمیم‌یافته

عامل	R^2	RMSE	rRMSE
مقدار	۰/۷۴۲	۰/۲۹۸	۶۵/۸۲

در نهایت نقشه پهنه‌بندی تحول کارست در منطقه شاهو با استفاده از منحنی ROC و سطح زیر منحنی آن ارزیابی شد (شکل ۱۰ و جدول ۳). نتایج ارزیابی مدل بیانگر مساحت زیر منحنی ۰/۷۸۹ یا دقت ۷۸/۹۰٪ برای مدل‌سازی تحول کارست است. بنابراین دقت نقشه حساسیت تهیه‌شده با استفاده از مدل، مناسب است. از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل جمعی تعمیم‌یافته مشابه بودن آن با روش‌های ماشین یادگیری و امکان تفسیر آسان این الگوریتم است (فنگ^۱، ۲۰۰۸؛ گویتز و همکاران^۲، ۲۰۱۱؛ پتسچکو و همکاران^۳، ۲۰۱۴؛ پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۷). این مدل توانایی زیادی در تجزیه و تحلیل داده‌ها و مشخص کردن رابطه غیرخطی میان متغیرهای مختلف دارد (هنسپاچ و همکاران^۴، ۲۰۱۰).



شکل ۱۰. منحنی ROC عمومی تجمیع‌یافته در مدل‌سازی تحول کارست در منطقه شاهو

¹. Feng

². Goetz et al

³. Petschko et al

⁴. Hanspach

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل عمومی تجمیع یافته براساس تخمین سطح زیرمنحنی

سطح اطمینان ۹۵ درصد		معناداری	خطای معیار	مساحت زیرمنحنی	شبیه‌سازی عمومی تجمیع یافته
رده بالا	رده پایین				
۰/۸۳۱	۰/۷۲۶	۰	۰/۰۴۶	۰/۷۹۸	GAM

نتیجه‌گیری

در ارتباط با تعیین مناطق تحول کارست مطالعات زیادی صورت گرفته است که بیشتر تحقیقات صورت گرفته یا به صورت توصیفی بوده و یا کاربرمحور بوده و نظرات کارشناسی در تعیین نتایج نهایی نقش بسزایی داشته‌اند. اما در تحقیق حاضر از روش GLM به منظور بررسی تحول‌یافتگی کارست استفاده شده است تا دخالت‌های کارشناسی را به حداقل رسانده و نتایج صرفاً بر مبنای واقعیت‌های مشاهده شده صورت گیرد. برای مدل‌سازی مکانی، ۷۰٪ از کل پهنه‌های تحول کارست آن برای مدل‌سازی و ۳۰٪ دیگر برای ارزیابی مدل به کار گرفته شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که دقت مدل جمعی تعمیم یافته با سطح زیرمنحنی ۰/۷۹۸ بسیار خوب است و نتایج اولویت‌بندی مدل نشان‌دهنده آن بود که در تحول کارست در منطقه شاهو، اهمیت فاکتورهای لیتولوژی، بارش، شیب و تکتونیک بیش از سایر فاکتورها بود. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تحول کارست در شیب‌های کم ۰-۵ درصد، فاصله کم از آبراهه و گسل و جهت شیب‌های شمالی و هموار است. میزان تحول کارست در منطقه شاهو، در زمین‌های مرتعی خوب بیشتر است. از آنجایی که در فرایند کارستی شدن انحلال‌پذیری سنگ‌های آهکی با درجه خلوص آن‌ها افزایش می‌یابد؛ از این رو ضخامت زیاد و خلوص بالای آهک بیستون در منطقه شاهو شرایط مناسبی را از نظر لیتولوژی برای تحول کارست در این منطقه فراهم کرده است. اشکال کارستی موجود در مناطق کم ارتفاع بیشتر از نوع پالئوکارست می‌باشد که مربوط به دوره‌های اقلیمی گذشته هستند که شرایط برای تحول کارست وجود داشته است. شرایط اقلیمی مساعد در حال حاضر برای تحول کارست در کل منطقه دیده نمی‌شود. تنها در ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر می‌توان آثار تحول کارست را مشاهده کرد؛ چنانچه این نتایج با نتایج تحقیقات ملکی و همکاران (۱۳۸۷) در توده کارستی بیستون، قربانی و همکاران (۱۳۸۹) در توده کارستی شاهو مطابقت دارد. پهنه با تحول بالا منطبق بر مناطقی است که در آن‌ها تراکم گسل و آبراهه بالاتر است و در واقع دولین‌ها در این مناطق عمدتاً در فواصل کمتر از ۱۰۰۰ متر از گسل‌ها و فاصله ۲۰۰-۱۰۰ متری آبراهه‌ها قرار گرفته‌اند. با بررسی دقیق‌تر مشاهده می‌شود که مناطقی با میزان تحول کارست زیاد بر مناطقی منطبق هستند که تراکم دولین‌ها در آن‌ها بالا بوده و همچنین دارای شیب اندکی هستند همان‌گونه که نتایج پژوهش مقصودی و همکاران (۱۳۹۴) در حوضه کارستی سیف‌آباد لاغر در زاگرس فارس بیانگر این موضوع نیز هست. برعکس مناطقی که میزان انحلال کارستی پایینی دارند، تراکم گسل و دولین‌ها در آن پایین بوده و فاصله از گسل و آبراهه‌ها نیز در آن‌ها بالاست. با توجه به موارد فوق به نظر می‌رسد که مناطقی با تحول کارست بالا از یکنواختی بیشتری نسبت به مناطق دارای تحول کارست کم برخوردارند. بیشترین درصدهای طبقات تحول کارست در طبقه حساسیت متوسط (۳۷/۵) و طبقه حساسیت زیاد (۲۶/۸) بود. بر مبنای نتایج حاصل از عوامل مؤثر در تحول‌یافتگی کارست منطقه شاهو از این منظر به ۵ طبقه زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم شده است. ارزیابی نقشه‌های نهایی بیانگر

این است که به‌طور کلی جنوب‌غربی و مرکزی منطقه مورد مطالعه دارای توسعه‌یافتگی بیشتری هستند و با توجه به شرایط مساعد اقلیمی، ژئومورفولوژیکی و زمین‌ساختی بخش زیادی از منطقه دارای توسعه‌یافتگی بالایی است و همین امر باعث شده است تا حوضه مورد مطالعه از نظر منابع آب کارست پتانسیل بالایی داشته باشد. تنوع لندفرم‌های کارستی در این منطقه بسیار بالا بوده و از این رو ضروری است که با توجه به ارزش‌های مختلف این منابع، چگونگی بهره‌برداری از آن‌ها به‌طور مشخص تعیین شود و راهکارهای حفاظتی مناسب برای این منابع تدوین شود. با توجه به موارد مذکور و نقش و اهمیت منابع آبی کارستیک در تأمین آب منطقه، لازم است برنامه‌ریزی‌های محیطی متناسب با وضعیت توسعه‌یافتگی کارست در این منطقه صورت گیرد. در واقع به دلیل حساسیت بالای این مناطق نسبت به آلودگی، ضروری است که در این مناطق فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و عمرانی آلوده‌کننده با رعایت دستورالعمل‌های مدیریتی مناسب صورت گیرد. از طرفی با توجه به اینکه محل تغذیه چشمه‌های کارستی در منطقه بیشتر در محدوده تحول کارست زیاد واقع شده است و مهم‌ترین عامل انسانی مداخله‌کننده در این بخش‌ها دامداران، گردشگران و فعالیت‌های نظامی می‌باشد، لازم است برای پیش‌گیری از تخریب و آلودگی آب‌های زیرزمینی راهکارهای حفاظتی مناسب و همچنین چگونگی بهره‌برداری در این مناطق مشخص شود. بنابراین بر اساس نتایج مدل‌سازی مکانی تحول کارست و نیز با توجه به همبستگی میان عوامل مؤثر با پهنه‌های تحول کارست، می‌توان در زمینه مدیریت مناطق کارستی برنامه‌هایی راهبردی را اعمال نمود.

منابع

- بهنیا، ابوالفضل، قنبرزاده، هادی، عباسعلی، فرزانه. (۱۳۸۸). ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی توده کارستی اخمد در دامنه‌های شمالی ارتفاعات بینالود، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱۴، صص ۱۲۱-۱۴۰
- صفاری، امیر، گنجائیان، حمید، حیدری، زهرا، فریدونی کردستانی، مژده. (۱۳۹۷). تعیین مناطق کارست توسعه‌یافته با استفاده از مدل‌های منطق فازی و OWA در حوضه قره‌سو، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۵، صص ۹۵-۱۱۴
- عباسی، محمد، باقری، سجاد، جعفری اقدم، مریم، (۱۳۹۱). پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل آنتروپی نمونه موردی: تاقدیس نوا زاگرس شمال باختری، مجله علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴، صص ۱۶۱-۱۶۸.
- قدیمی، مهرنوش، مقیمی، ابراهیم، ملکیان، آرش. (۱۳۹۴). روش‌های تحقیق در هیدروژئولوژی کارست. انتشارات دانشگاه تهران.
- قربانی، محمدصدیق، محمودی، فرج اله، یمانی، مجتبی، مقیمی، ابراهیم، (۱۳۸۹). نقش تغییرات اقلیمی کوآترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی. مطالعه موردی: ناهمواری شاهو، غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، صص ۱-۱۶.
- قربانی؛ محمدصدیق، اونق، مجید، (۱۳۹۱). پهنه‌بندی تحول و حساسیت کارست با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره در منطقه کارستی شاهو، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۳۳-۱۹.
- مددی، عقیل؛ همتی، طاهر، (۱۳۹۴). پهنه‌بندی قابلیت کارست‌زایی با استفاده از مدل منطق فازی (مطالعه موردی: منطقه نمک آبرود شهرستان چالوس)، فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال سوم، شماره پنجم، صص ۸۹-۱۰۲
- معصوم‌پور ماکوش، جعفر، میری، مرتضی و سجادباقری سیدشکری (۱۳۹۵). اثر تغییر اقلیم بر آبدهی و ویژگی‌های چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه، مجله جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۲۱، صص ۶۵-۵۱.

- مقصودی، مهران، اخوان، هانیه، مهدیان، مجتبی، عشورنژاد، غدیر، (۱۳۹۴) **پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس جنوبی (مطالعه موردی: حوضه سیف آباد لاغر)**، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۱، صص ۱۵۰-۱۲۴.
- ملکی، امجد، شوهانی، داوود، علایی طالقانی، محمود، (۱۳۸۷). **پهنه‌بندی تحول کارست در استان کرمانشاه**، فصلنامه مدرس علوم انسانی، دوره ۱۳، شماره ۱، ۲۹۵-۲۷۱.
- یمانی، مجتبی، شمسی‌پور، علی اکبر، جعفری اقدم، مریم، باقری، سجاد؛ (۱۳۹۲). **بررسی عوامل موثر در توسعه-یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP**، استان کرمانشاه، مجله علوم زمین، سال بیست و دوم، شماره ۸۸، صص ۶۶-۵۷.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., Park, H. J., & Lee, J. H. (2014). **A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping**. *Catena*, 114, 21-36.
- Aureli, A. (2010). **The UNESCO IHP's Shared Aquifer Resources Management Global Project AQUAmundi**, 1, 1-6.
- Bakalowicz, M. (2018). **Coastal Karst Groundwater in the Mediterranean: A Resource to Be Preferably Exploited Onshore, Not from Karst Submarine Springs**. *Geosciences*, 8(7), 258.
- Bansah, K., & Anderson, N. (2017, March). **Factors Contributing to Karst Development in Southwestern Missouri, USA**. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2017* (pp. 219-223). Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society.
- Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2003). **Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines**. *Ore Geology Reviews*, 22(1-2), 117-132.
- Carranza, E. J. M., Woldai, T., & Chikambwe, E. M. (2005). **Application of data-driven evidential belief functions to prospectivity mapping for aquamarine-bearing pegmatites, Lundazi district, Zambia**. *Natural Resources Research*, 14(1), 47-63.
- Cloetingh Yu. Podlachikov Y. 2000. **Perspectives on tectonic modeling**. *Tectonophysics*. 320: 169-173. Dempster AP. 1967. **Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping**. *Annals of Mathematical Statistics*. 38 (2): 325-339.
- Komac, M. (2006). **A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia**. *Geomorphology*, 74(1-4), 17-28.
- Fang, X. (2008). **Generalized additive models with correlated data**. The University of Iowa.
- Frank, E., Mylroie, J., ... J. T.-... of C. and K., & 1998, **Karst development and speleogenesis, Isla de Mona, Puerto Rico**. *Academia.edu*. Retrieved from <http://www.academia.edu/download/5864253/v60n2-frank-karst.pdf>
- Goetz, J. N., Guthrie, R. H., & Brenning, A. (2011). **Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models**. *Geomorphology*, 129(3-4), 376-386.
- Hanspach, J., Kühn, I., Pompe, S., & Klotz, S. (2010). **Predictive performance of plant species distribution models depends on species traits**. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 12(3), 219-225.

- Hastie, T., & Tibshirani, R. (1987). **Non-parametric logistic and proportional odds regression**. *Applied statistics*, 260-276.
- Kukurić, N., Stevanovic, Z., & Kresic, N. (2014). **Karst without Boundaries**. Conference and Field Seminar “Karst Without Boundaries.” <https://doi.org/10.1111/gwat.12487>.
- Kumar, U., Kumar, B., & Mallick, N. (2013). **Groundwater prospects zonation based on RS and GIS using fuzzy algebra in Khoh river watershed, Pauri-Garhwal district, Uttarakhand, India**. *Global Perspectives on Geography (GPG)*, 1(3), 37-45.
- Li, Z. G., Zhou, H. H., & Xu, Y. H. (2013). **Research on Prediction Model of Support Vector Machine Based Land Subsidence Caused by Foundation Pit Dewatering**. In *Advanced Materials Research (Vol. 671, pp. 105-108)*. Trans Tech Publications.
- Liang, F, Yunyan, D U, Yong, G U, CeA, LI. (2014). **quantitative morphometric comparison of cockpit and doline karst landforms** , *Journal of Geographical Sciences*, 24(6), 1069-1082.London.
- Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G., & Ravbar, N. (2018). **Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications**. Geological Society, London, *Special Publications*, 466, SP466-26.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., & Glade, T. (2014). **Assessing the quality of landslide susceptibility maps—case study Lower Austria**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(1), 95-118.
- Pourghasemi HR, Rossi M. (2017). **Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods** *Theoretical and Applied Climatology*. 130 (1-2): 609-633.
- Pourghasemi HR, Yousefi S, Kornejady A, Cerda A. (2016) **Applying different new ensemble data mining techniques for Gully erosion mapping with Geographical Information Systems**. *Science of the Total Environment*. 609 (31): 764–775.
- Pradhan, B., Abokharima, M. H., Jebur, M. N., & Tehrany, M. S. (2014). **Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS**. *Natural hazards*, 73(2), 1019-1042.
- Shafer, G. (1976). **A mathematical theory of evidence (Vol. 42)**. Princeton university press.
- Toll, D. G. (1996). **Artificial intelligence applications in geotechnical engineering**. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1, 767-773.
- Toll, D. G. (1996). **Artificial intelligence applications in geotechnical engineering**. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1, 767-773.
- Zhou, Z., Zhang, S., Xiong, K., Li, B., Tian, Z., Chen, Q., ... & Xiao, S. (2017). **The spatial distribution and factors affecting karst cave development in Guizhou Province**. *Journal of Geographical Sciences*, 27(8), 1011-1024.