

تحلیل توسعه ژئومورفولوژی کارست با استفاده از مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چندمتغیره (توده‌های کارستی دیمه و پیرغار در استان چهارمحال و بختیاری)

فاطمه گراوند- دانشجوی دکترای رشته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران.
مهران مقصودی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران.
سید موسی حسینی- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران.
مجتبی یمانی- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران.
راضیه لک- دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

چکیده

ارزیابی توسعه یافتگی سطحی کارست بر ارتقای آگاهی و شناخت ویژگی‌های کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی توده‌های کارستی، تأثیر بسزایی دارد. در این پژوهش، تحلیل توسعه ژئومورفولوژی کارست توده‌های کارستی دیمه و پیرغار در استان چهارمحال و بختیاری واقع در زون مرتفع زاگرس با استفاده از مدل‌سازی پهنه‌های کارستی با دو رویکرد منطق فازی و رگرسیون خطی چندمتغیره مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی دولین‌های کارستی با روش خطوط کانتور بسته (CCLS) در توده‌های کارستی مورد مطالعه، شامل شناسایی تعداد ۱۸۵ دولین در محدوده توده کارستی پیرغار و ۱۴۰ دولین در توده کارستی دیمه می‌باشد. برای انجام مدل‌سازی احتمال وقوع دولین‌ها، نه فاکتور ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری، خاک، بارش، دما و فاصله از گسل به عنوان متغیرهای مستقل و دولین‌های کارستی به عنوان متغیر وابسته در توسعه ژئومورفولوژی کارست استفاده شده‌اند. نتایج ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی کارست سطحی تهیه شده از مدل منطق فازی با دولین‌های کارستی نشان داد که از ۱۸۵ دولین شناسایی شده در توده کارستی پیرغار تعداد ۱۰۲ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست و در توده کارستی دیمه نیز از ۱۴۰ دولین شناسایی شده ۸۳ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست واقع شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی کارست سطحی با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره با دولین‌های کارستی از ۱۸۵ دولین شناخته شده در محدوده توده کارستی پیرغار تعداد ۹۴ دولین را در پهنه با توسعه زیاد کارست سطحی، تعداد ۶۴ دولین در پهنه متوسط و تعداد ۲۷ دولین در پهنه با توسعه یافتگی کم کارست سطحی نشان داده است. همچنین از ۱۴۰ دولین شناخته شده در محدوده توده کارستی دیمه تعداد ۷۱ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست سطحی، تعداد ۶۲ دولین در پهنه متوسط و تعداد ۷ دولین در پهنه با توسعه یافتگی کم کارست سطحی شناسایی شده است. با توجه به این که مدل منطق فازی میزان تراکم بیشتری از دولین‌ها را در طبقات کارست با توسعه زیاد و متوسط تشخیص داده است و با نتایج صحت‌سنجی ارقام محاسبه‌شده مربوط به مساحت زیر منحنی‌های نام منحنی مشخصه عملکرد (ROC) که نشان داد، مدل منطق فازی برای هر دو توده کارستی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندمتغیره درجه کارایی بالاتری بر اساس سطح زیر منحنی ROC (AUC) داشته است (برای توده کارستی دیمه ۰,۹۷۲ و برای پیرغار ۰,۹۸۵).

واژگان کلیدی: ژئومورفولوژی کارست، مدل منطق فازی، مدل رگرسیون خطی، منحنی ROC، چهارمحال و بختیاری.

مقدمه

کارست معمولاً در سنگ‌های کربناته مانند سنگ آهک و دولومیت (گرووز و میمان^۱، ۲۰۰۵؛ دی‌وائل^۲ و همکاران، ۲۰۰۹) و همچنین در سنگ‌های سولفاته مانند گچ و انیدریت (کالا‌فورا و پولیدو-بوش^۳، ۲۰۰۳) شکل می‌گیرد. وضعیت هیدروژئولوژیکی یکی از عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست است، آب داخل درزها و شکاف‌های سنگ‌های قابل انحلال مانند کربنات کلسیم نفوذ می‌کند و موجب توسعه درزها و شکاف‌ها می‌شود و اشکال کارستی را پدید می‌آورد (مول و همکاران، ۱۹۸۸: ۸). لندفرم‌های خاص نواحی کارست شامل مجاری انحلالی بزرگ (کارن) و همچنین فرورفتگی‌های بسته با منشأ ساختار و ابعاد متفاوت (دولین‌ها، پلیه‌ها) است (فورد و ویلیامز^۴، ۲۰۰۷: ۱۲۳). در زبان انگلیسی، سینک‌هول، دولین و چاله‌های بلعنده، واژه‌های معادل دولین می‌باشند (هاگت^۵، ۲۰۰۳: ۷۸). سیویچ^۶ (۱۸۹۳) دولین‌ها را به عنوان "لندفرم‌های تشخیصی کارست" توصیف کرده است (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷: ۱۲۴). مناظر کارست با سطوح صخره‌ای شیاردار و حفره‌دار، شافت‌ها، دولین‌ها، نهرهای غرق‌شونده، چشمه‌ها، سیستم‌های زهکشی زیرسطحی و غارها مشخص می‌شوند. ویژگی‌های منحصربه‌فرد و ماهیت سه‌بعدی مناظر کارستی نتیجه تعامل پیچیده بین محیط زمین‌شناسی، شرایط آب و هوایی و عوامل بیولوژیکی در مقیاس‌های زمانی طولانی است. مناظر کارستی که در آنها انحلال سنگ بستر توسط آب فرآیند غالب ژئومورفیک است، تقریباً ۲۰ درصد از قاره‌ها را شامل می‌شود و بیش از یک چهارم جمعیت زمین در مناطق کارستی یا نزدیک آن زندگی می‌کنند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷: ۳۴). در سال ۲۰۱۹، برآورد شده است که حدود ۱/۳ میلیارد از جمعیت جهان در مناطق کارستی زندگی می‌کنند (گلشاید^۷ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۶۶۳).

در ایران زمین‌های کارستی حدود ۱۳ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد (رئیزی و کوثر، ۱۹۹۷: ۲۸). زاگرس مهمترین ناحیه رخنمون سازندهای کربناته در کشور بوده که آبخوان‌های کارستی یکی از برجسته‌ترین ویژگی سازندهای کربناته زاگرس می‌باشند و حدود ۵۶ درصد از چشمه‌ها و بیشتر رودخانه‌های بزرگ ایران از این پهنه سرچشمه می‌گیرند (احمدی‌پور، ۱۹۹۹: ۲۱۵) که برای توسعه اقتصادی، (گوا^۸ و همکاران، ۲۰۱۹: ۳) و به‌ویژه توسعه و بهره‌برداری زاگرس-نشینان نقش بسیار مهمی دارند. از آنجایی که اشکال کارستی نقش مهمی در منابع آب، گردشگری و فعالیت‌های عمرانی دارند مطالعه آنها یک ضرورت محسوب می‌شود (مقامی‌مقیم، ۱۳۹۶: ۲۴۵). امروزه در دنیا کارست یک منبع ارزشمند محسوب شده و اعتقاد عمومی بر این است که هر نوع دخل و تصرف به منظور بهره‌برداری از منابع آن باید با مطالعه و برنامه‌ریزی دقیق همراه باشد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۴). با توجه به اینکه خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازندهای سخت به میزان گسترش تخلخل ثانویه (درز و شکاف و انحلال) بستگی دارد و این سیستم شکستگی و شکاف‌ها مسیرهای هیدرولیکی را در توده سنگ ایجاد می‌کنند (جعفریان و همکاران، ۱۳۹۷: ۷۶)، بنابراین پهنه‌های کارستی نقش مهمی را در تغذیه آبخوان‌های کارستی دارند. بر اساس این واقعیت شناخت عوامل مؤثر در تحول کارست و پهنه‌بندی توسعه آن در زمینه مطالعات مربوط به منابع آب کارست دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشد. عوامل و فرایندهای مختلفی تکامل کارست را تحت تأثیر قرار می‌دهند برای نمونه توپوگرافی، لیتولوژی به عنوان عوامل منفعل عمل می‌کنند و فرایندهای دیگری مانند زمین‌ساخت فعال، فرایندهای هیدرولوژیکی، زیستی و ژئومورفولوژی، به طور فعال در توسعه اشکال کارست

^۱ Groves & Meiman^۲ DeWaele^۳ Calaforra & Pulido-Bosch^۴ Ford and Williams^۵ Huggett^۶ Cvijic^۷ Goldscheider^۸ Guo

نقش دارند (کالیک^۱، ۲۰۱۱: ۳۴). میان ژئومورفولوژی کارست و تکامل آن ارتباط نزدیکی وجود دارد؛ به طوری که فراوانی و گسترش پدیده‌های مورفولوژی کارست نشان دهنده گسترش کارست در ناحیه می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۶۵)؛ به بیان دیگر وجود و نبود هریک از اشکال کارستی در یک منطقه، راهنمایی برای شناخت بهتر و بیشتر سیستم کارستی منطقه است (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۰۰). شناسایی و مطالعه دولین‌ها برای احداث و نگهداری سازه‌های مختلف به‌ویژه سازه‌های هیدرولیکی و همچنین مدیریت پایدار آب مهم بوده (کوپر و گوتیرز^۲، ۲۰۱۳: ۱) و تهیه نقشه دولین‌ها، جهت شناخت مسیر جریان آب‌های زیرزمینی و تعیین مرز حوضه آبریز کارستی، یک پیش نیاز اساسی محسوب می‌شود (دسترنج و همکاران، ۱۳۹۸: ۹۳).

تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست، قطعی و صدصدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب می‌باشد؛ زیرا با استفاده از نظریه فازی، می‌توان متغیرهای نادقیق و مبهم را، به شکل ریاضی درآورد (دسترنج و همکاران، ۱۳۹۸: ۹۴). مدل‌های فازی اغلب در مدل‌سازی مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب بوده و در اصل یک روش وزندهی به لایه‌های مورد استفاده می‌باشد که قابل قبول‌ترین روش مکان‌یابی است. این روش، روشی دارای ریسک‌پذیری پایین و نتیجه‌دهی بسیار مناسب و بالایی است (حاتمی‌فرد، ۱۳۹۷: ۹۴). تحلیل رگرسیون می‌تواند برای تعیین روابط علی بین متغیرهای مستقل و وابسته و نشان دادن ارتباط پارامترهای بسیاری از پدیده‌ها در علوم مختلف استفاده شود. نکته مهم این است که رگرسیون‌ها به تنهایی روابط بین یک متغیر وابسته با مجموعه داده‌های ثابت از متغیرهای مختلف را نشان می‌دهند (مولد و عبدالعزیز^۳، ۲۰۲۰: ۱۴۰). مدل رگرسیون خطی چند متغیره چون که بر پایه ارتباط تابعی بین متغیرها بوده، قابلیت پیش‌بینی داشته و می‌تواند به‌طور همزمان میزان تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را ارزیابی کند (قربانی و همکار، ۱۳۹۱: ۲۱).

در زیر به برخی از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با ارزیابی درجه توسعه یافتگی سطحی توده‌های کارستی پرداخته شده است: صفاری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل منطق فازی و لایه‌های سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، بارش و دما، شیب، ارتفاع جهت شیب، شیب و پوشش گیاهی به بررسی عوامل مؤثر در توسعه یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین پرداخته و نقشه توسعه کارست سطحی منطقه را استخراج کردند. مكرم و نگهبان (۱۳۹۸) با استفاده از مدل فازی و سلسله‌مراتبی و داده‌های زمین‌شناسی، فاصله از گسل، بارش، ارتفاع، دما، فاصله از رودخانه و شیب مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن در جنوب شهرستان کازرون را شناسایی کرده‌اند. حیدری و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی دولین‌های آهکی دشت کرمانشاه پارامترهایی مانند تغییرات در سیستم درز و شکاف، میزان بارش، دما، شیب، توپوگرافی را عوامل مؤثر در گسترش و توسعه کارست سطحی می‌دانند. غلام‌حیدری و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل منطق فازی پهنه‌بندی خطر شکل‌گیری دولین‌های گچی در دشت دشت جابر بدره ایلام پرداختند. در این پژوهش نقشه پهنه‌بندی تکامل کارست با استفاده از مدل فازی تهیه شده که جهت تهیه این نقشه از ده عامل محیطی شامل شیب، و جهت شیب، زمین‌شناسی، فاصله از خط کنیک، نقاط تمرکز جریان دامنه‌ای، فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، اقلیم و شاخص پوشش گیاهی استفاده شده است. گراوند و همکاران (۱۴۰۱) به پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی از دیدگاه ژئومورفولوژی با استفاده از مدل منطق فازی در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. صحت‌سنجی نتایج مدل منطق فازی با نقشه توزیع فروچاله‌های کارستی شناسایی شده کارایی مدل منطق فازی برای پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در این منطقه را تأیید کرد. مرادی و همکاران (۲۰۱۶) نیز نقشه پتانسیل تحول و تکامل کارست را با استفاده از مدل‌های فازی و AHP در شمال خوزستان تهیه کردند. آنها عامل تکنیک را مؤثرترین عامل در تکامل کارست این منطقه

^۱ Calic^۲ Cooper and Gutiérrez^۳ Maulud & Abdulazeez

می‌دانند. رجبی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل منطق فازی توده کارستی شیرز را بررسی کردند و با استفاده از لایه‌های زمین‌شناسی، طبقات ارتفاعی، فاصله از گسل، شیب، وجه شیب، بارش، دما و پوشش گیاهی، با بررسی شرایط هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک نقشه مناطق دارای پتانسیل، توسعه کارست را تهیه کردند. انتظاری و آقایی‌پور (۲۰۱۸) در یک مطالعه بر روی توده پراو و بیستون با استفاده از مدل آنتروپی و بررسی پدیده‌های کارستی مانند سینک‌هولها، اووالاها، و غارها و همچنین شرایط هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک به پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی این منطقه پرداختند. نخعی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل منطق فازی و لایه‌های اطلاعاتی سنگ‌شناسی، زمین ساخت، بارش، دما، شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی و کاربری اراضی به شناسایی و پهنه‌بندی توسعه کارست در حوضه باقماچ در استان خراسان رضوی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل منطق فازی می‌تواند به شناسایی و پهنه‌بندی توسعه مناطق کارستی کمک قابل توجهی بکند. حقیری و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و معیارهای زمین شناسی، بارش، دما، شیب، تراکم گسل، ارتفاع، جهت شیب، و تراکم آبراهه به ارزیابی توسعه آبخوان کارستی و پتانسیل منابع آب کارستی در شهر هشتگرد پرداختند. نتایج پژوهش در ارتباط با مشاهدات میدانی دقت مدل فازی را در مقایسه با مدل تحلیل سلسله مراتبی تأیید کرد.

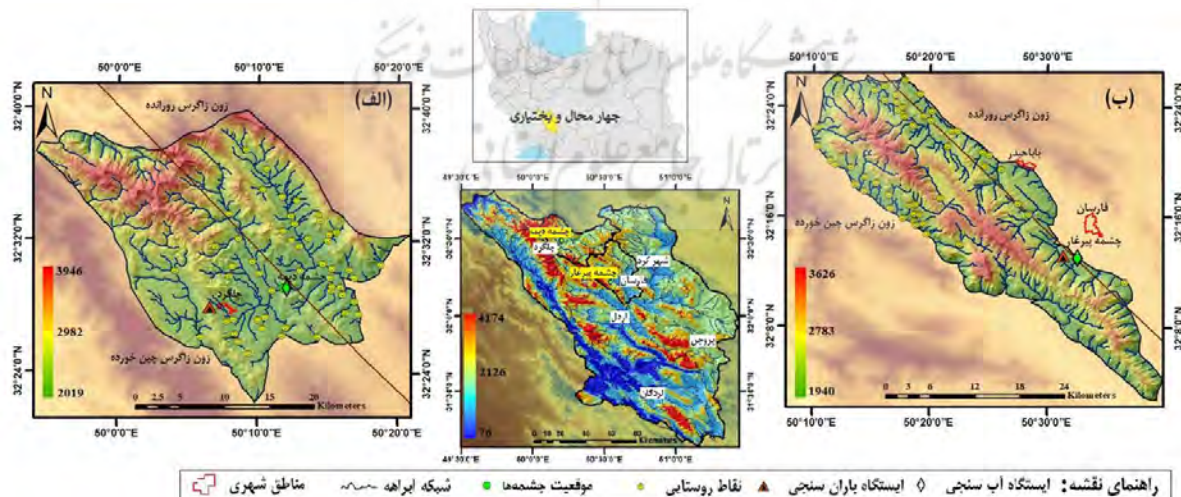
بررسی سوابق پژوهشی انجام شده در توده‌های کارستی مورد در توده‌های کارستی مورد مطالعه شامل مطالعات محمدی و ریاحی‌پور (۱۳۹۰)، ریاحی‌پور و خلیلی (۱۳۹۱)، مالی و محمدی (۱۳۹۲) و گراوند و همکاران (۱۴۰۱) نشان می‌دهد که عمده این پژوهش‌ها به تحلیل هیدروژئولوژی و توسعه‌یافتگی درونی توده‌های کارستی مرتبط با چشمه‌ها پرداخته‌اند. اما در ادبیات فنی انجام شده، تاکنون در مطالعات مربوط به تحلیل‌های توسعه‌یافتگی سطحی کارست در توده‌های کارستی دیمه و پیرغار مباحث ژئومورفولوژی کارست و توسعه‌یافتگی سطحی کمتر مطالعه‌ای صورت گرفته است. از آنجا که مناظر ژئومورفیک کارستی که در نتیجه انحلال ترکیبات سنگ توسط آبهای طبیعی شکل می‌گیرند در نفوذپذیری و تغذیه آب‌های زیرزمینی نقش مهمی دارند و به عنوان یکی از اولویت‌های مدیریتی مطرح می‌باشند. پس این مطالعات باید سهم بسزایی در مدیریت کیفی و کمی و حفاظت از این منابع در برابر آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی داشته باشند. بنابراین شناسایی و تعیین حدود مناطق کارستی ضروری است. براساس این مهم هدف از این پژوهش شناسایی دولین‌ها، بررسی نقش و میزان تأثیر هریک از عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق از نظر توسعه‌یافتگی کارست با استفاده از مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره و همچنین دست‌یابی به میزان کارایی مدل‌های فوق در مطالعات مربوط به ژئومورفولوژی کارست می‌باشد.

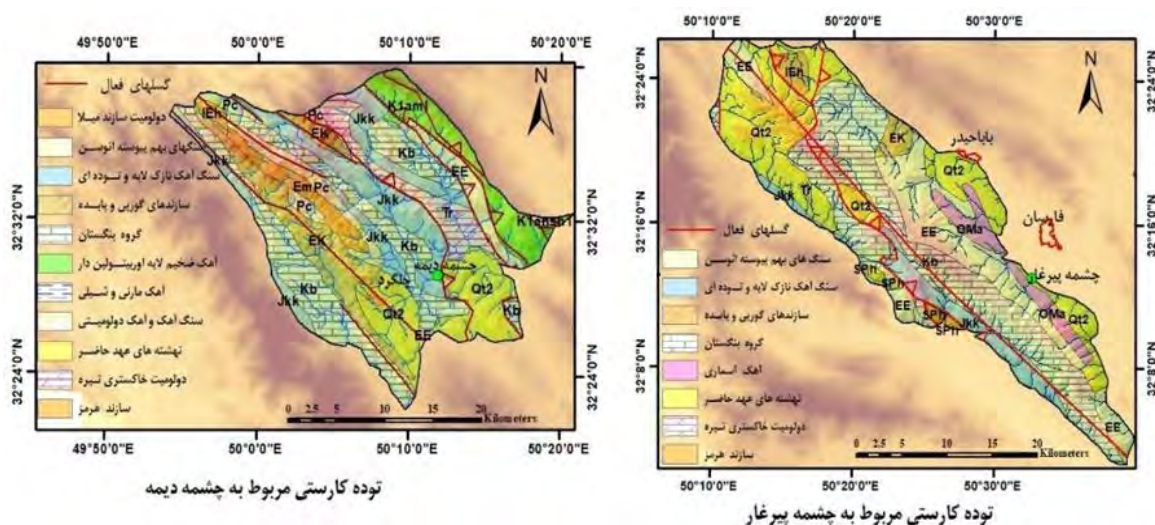
ویژگی‌های طبیعی و زمین‌شناسی توده‌های کارستی مورد مطالعه

استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۵۳۲ کیلومتر مربع در بخش مرکزی کوه‌های زاگرس دارای یک درصد از کل وسعت ایران بوده (شکل ۱) که با وجود مساحت کم، ده درصد از منابع آب کشور را در اختیار دارد. توده کارستی پیرغار به لحاظ موقعیت جغرافیایی در جنوب و غرب شهرستان فارس و در دامنه‌ی شمالی تاقدیس سالدوران با مساحت حوضه‌ی آبگیر ۹۲ کیلومتر مربع، میانگین بارندگی ۵۴۲ میلیمتر (در ایستگاه فارس) و در ارتفاع ۲۱۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است و در قسمت زون رسوبی-ساختاری زاگرس مرتفع قرار دارد. در این منطقه، گسلش بر چین‌خوردگی غلبه دارد و واحدهای رسوبی متعلق به پالئوزئیک و مزوزئیک با کتاکت گسل بیرون‌زدگی دارد. تاقدیس‌ها و ناودیس‌های شکل گرفته نیز به تبعیت از روند رشته‌کوه زاگرس، شمال غرب-جنوب شرق می‌باشند و از نظر زمین ریخت‌شناسی از سمت غرب به طرف شرق از میزان ارتفاعات کاسته شده و به دره‌های باز و دشت فارس-چونقان ختم می‌شود. مرتفع‌ترین قله در منطقه، کوه سالدوران با ارتفاع ۳۶۲۱ متر است. آهک‌های سفید، آهک‌های مارنی و دولومیتی معادل سازند آسماری-جهرم و شهبازان با سن ائوسن-الیگوسن همراه با آهک‌های کرم رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری، آبخوان اصلی

کارستی چشمه‌ی پیرغار را تشکیل داده است (شکل ۱). از نظر تکتونیکی روراندگی زاگرس و تحت فشار بودن این ناحیه، سیستم درزه‌ها، توسعه قابل توجهی یافته و محیط مساعدی برای چرخه‌ی آب در سنگ‌های کربناته را فراهم آورده است. لذا این منطقه برای توسعه کارست مساعد بوده و باعث ایجاد پدیده‌های ژئومورفولوژی کارستی متنوعی نظیر غار، دولین و چشمه شده است. به دلیل مرتفع بودن منطقه درجه حرارت به‌طور معمول پائین بوده و در برخی از نقاط حتی به چندین درجه زیر صفر می‌رسد. میزان نزولات جوی بیش از ۶۰۰ میلی‌متر در سال بوده و اغلب به صورت برف می‌باشد که عامل مؤثری برای پیشرفت کارست است (کرمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۷۱).

چشمه دیمه در تاکدیس زراب سرچشمه اصلی زاینده رود در ۱۲ کیلومتری چلگرد در مجاورت روستای دیمه واقع شده است و ارتفاع قرارگیری این چشمه ۲۱۹۶ متر از سطح دریا می‌باشد، مساحت حوضه‌ی آبرگیر آن ۱۴۰ کیلومتر مربع و میانگین بارندگی ۱۳۲۹ میلی‌متر (در ایستگاه چلگرد) می‌باشد. آهک‌های سفید، آهک‌های مارنی و آهک‌های دولومیتی معادل سازند آسماری-چهرم و شهبازان با سن ائوسن-الیگوسن همراه با آهک‌های کرم رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری به سن الیگوسن و آهک نازک لایه رسی و آهک خاکستری همراه با فسیل اربیتولین و شیل، مارن و ماسه سنگ به سن کرتاسه می‌توانند در تأمین آب چشمه دیمه مؤثر باشند (شکل ۱) (مالی و همکار، ۱۳۹۲: ۳۰۳). در این منطقه گسل‌ها و تراس‌های متعددی با راستای شمال غربی- جنوب شرقی از بین واحدهای چین‌های این منطقه عبور می‌کند. مهم‌ترین آن‌ها شامل تراس اصلی زاگرس با طول بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر بوده که در محدوده مطالعاتی موجب رانده شدن آهک‌های کرتاسه بر روی واحدهای میوسن و کنگلومرای بختیاری شده است. به موازات این گسل تراس-های متعددی از جمله گسل زراب، گسل اردل و گسل زردکوه نیز شکل گرفته است. از لحاظ چینه‌شناسی، قدیمی‌ترین رخنمون‌های کوه زراب را سازندهای سری هرمز (کمپلکس هرمز) تشکیل داده که بیشتر در امتداد راندگی‌های بنیادی به سطح زمین رخنمون یافته‌اند و جدیدترین واحد سنگی منطقه کنگلومرای بختیاری است. سازند اصلی تشکیل دهنده تاکدیس زراب واحد K معادل سازند سروک می‌باشد میانگین ضخامت سازند سروک در محدوده کوه زراب حدود ۵۰۰ متر است (کرمی‌وردجانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۱۸). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای به دست آوردن اطلاعات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شد (شکل ۲).





شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی توده‌های کارستی مورد بررسی که بر روی آن سنگ‌های آهکی کارستی مشخص شده است (بر گرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرکرد تهیه شده سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

مواد و روش‌ها

در مناطق کارستی، تغذیه متمرکز از طریق دولین‌ها صورت گرفته که با توجه به این نقش بسیار مهم آن‌ها در سیستم هیدرولوژیکی و ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی، به عنوان شاخصی برای مدل‌سازی لندفرم-های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در این مطالعه نیز ابتدا مدل‌سازی دولین‌های کارستی در محدوده مورد مطالعه توده‌های کارستی دیمه و پیرغار، ابتدا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS-PALSAR و روش منحنی‌های بسته موسوم به CCLs^۱ (لیانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۰۷۳) به شناسایی و تعیین دولین‌های موجود در مناطق مورد مطالعه اقدام و نتایج با برداشت‌های میدانی دقت‌سنجی گردید. همچنین به منظور بررسی نقش و میزان تأثیر هریک از عوامل مؤثر در توسعه یافتگی توده‌های کارستی مورد مطالعه و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق از نظر توسعه یافتگی کارست از مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است. بدین منظور لایه‌های اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، دما، بارش، جهت شیب، سنگ-شناسی، کاربری اراضی و خاکشناسی (مقامی، مقیم، ۱۳۹۶: ۲۴۸؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۶؛ مکرم و همکار، ۱۳۹۸: ۱۲۵؛ نحی و همکاران، ۲۰۲۳: ۲۳۰؛ حقیری و همکاران، ۲۰۲۴: ۲) به عنوان فاکتورهای مؤثر در فرایند کارست‌زایی و توسعه آن و همچنین شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست در توده‌های کارستی مورد بررسی قرار گرفتند. لازم به ذکر است که نقشه کاربری اراضی براساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ کاربری اراضی استان چهارمحال و بختیاری برداشت گردید. نقشه خاک از لایه تیپ خاک‌های ایران با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه سطوح ارتفاعی بر مبنای مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲،۵ متر مربوط به ماهواره ALOS-PALSAR تهیه و نقشه‌های شیب و جهت شیب نیز از روی آن برداشت گردید. نقشه لیتولوژی بر مبنای نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرکرد و لایه گسل‌ها نیز با استفاده از همین نقشه لیتولوژی و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، به این گونه که ابتدا تحلیل مؤلفه‌های اصلی توسط نرم‌افزار Envi5.6 صورت گرفت و تصویر خروجی آن برای استخراج خطواره وارد نرم افزار PCI Geomatica 2018 گردید و در ادامه خطواره‌های کشیده شده وارد نرم‌افزار Arc GIS 10.8 گردید و مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت لایه گسل‌ها استخراج گردید.

¹ Closed Contour Lines

² Liang

نقشه‌های دما و بارش نیز بر مبنای اطلاعات دما و بارش دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری آماده شده است.

گام بعدی برای پهنه بندی توسعه کارست با مدل منطق فازی ابتدا تک تک لایه‌ها با توجه به هدف مورد نظر بر اساس توابع عضویت، فازی سازی شدند. پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش و دما با توجه به ماهیت رستری آنها با استفاده از توابع موجود در نسخه ۱۰٫۸ نرم افزار ArcGIS و با کدنویسی در تحلیلگر Raster Calculator فازی سازی گردیدند. تابع عضویت لایه‌های رستری بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد، تعیین گردیده است. برای فازی سازی لایه‌های کیفی مانند لیتولوژی، کاربری اراضی و خاک و جهت شیب ابتدا با توجه به طبقات مختلف آنها و عملکردشان در توسعه کارست به آنها امتیاز داده شد، سپس با استفاده از رابطه (۱) مقادیر اختصاص داده شده نرمال سازی فازی می‌شوند.

$$x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

که در آن، x_{norm} : مقدار نرمال شده فاکتور x ؛ x_{min} و x_{max} : به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر فاکتور x می‌باشد. روش فازی با پنج عملگر (اجتماع)، AND (اشتراک)، Product (ضرب جبری)، SUM (جمع جبری) و Gama (گاما) در محیط نرم افزار ArcGIS قابل اجرا می‌باشد. از بین این پنج عملگر، عملگر گاما نقش تعدیلی نسبت به نتیجه جمع و ضرب فازی دارد و حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی کم عملگر جمع فازی را تعدیل کرده و به واقعیت نزدیکتر می‌کند. با توجه به ماهیت این پژوهش از عملگر گامای فازی با ضرایب مختلف استفاده شده است. این عملگر بر حسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس رابطه (۲) تعریف می‌شود.

(۲)

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

در این رابطه $\mu_{combination}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γ را برابر ۱ قرار دهیم ترکیبی که اعمال می‌شود، همان جمع جبری فازی و زمانی که γ برابر صفر باشد ترکیب، برابر با ضرب جبری فازی است. مقدار در نظر گرفته شده برای γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند، که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهش ضرب جبری فازی سازگاری دارد. جهت به کارگیری مدل رگرسیون خطی چند متغیره ابتدا لایه‌های اطلاعاتی لیتولوژی، فاصله از گسل، شیب، ارتفاع، جهت شیب، کاربری اراضی، بارش، دما، طبقات اقلیمی گذشته و خاک به عنوان متغیرهای مستقل (پیشگویی کننده) و لایه اطلاعاتی دولین‌ها به عنوان متغیر وابسته، برای حوضه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند. بنابراین عوامل انتخابی ابتدا در ارتباط با هم و با یک مدل انتزاعی اولیه ارزیابی شدند و در مرحله بعد به جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مربوط به هر کدام پرداخته شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. تحلیل اولیه از این داده‌ها، بصورت پردازش آنها در لایه‌های Arc GIS بوده و یکسان سازی و طبقه بندی آنها برای تولید اطلاعات مورد نظر در تحلیل آماری است. بدین منظور در هر کدام از تاکدیس‌های مورد مطالعه، لایه‌های اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، دما، بارش، جهت شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی (پوشش گیاهی) و خاکشناسی به عنوان متغیرهای مستقل و پیشگویی کننده و لایه دولین‌ها به عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. از میان متغیرهای مستقل، لایه‌های کیفی مربوط به جهت شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی (پوشش گیاهی) و خاک‌شناسی با در نظر گرفتن نوع لایه و تأثیری که در توسعه کارست و تشکیل دولین‌ها دارند به ترتیب میزان اهمیت با اعمال وزن ۵ تا ۱ به یک لایه کمی تبدیل شده‌اند. بدین معنی که مثلاً در مورد لایه سنگ‌شناسی، سازندهایی که بیشترین اهمیت را در توسعه کارست داشته ارزش ۵ و سازندی که کمترین اهمیت را داشته ارزش ۱ گرفته است. اما از آنجاکه لایه‌های دیگر مربوط به متغیرهای

مستقل (ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، دما و بارش) خود دارای ارزش کمی بودند، فقط با در نظر گرفتن میزان ارزش، به ۵ طبقه تقسیم‌بندی شدند. لایه‌ی کیفی متغیر وابسته دولین‌ها نیز با تبدیل به نقشه صفر و یک به یک لایه کمی تبدیل شده است. بنابراین مناطقی که در آنها دولین‌ها تشکیل شده، ارزش ۱ و به نواحی فاقد دولین ارزش صفر (۰) اختصاص یافت. در نهایت تمام لایه‌های اطلاعاتی، شامل لایه‌های مربوط به متغیرهای مستقل و لایه مربوط به متغیر وابسته برای اجرای مدل رگرسیونی، از محیط Arc GIS 10.8 به محیط نرم‌افزار SPSS25 منتقل شدند. برای تحلیل رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS25 از مدل گام‌به‌گام^۱ استفاده می‌شود. در این روش متغیرهای پیشگویی کننده (مستقل) تک‌به‌تک به معادله اضافه می‌شوند و به دنبال آن اگر نقش معناداری در رگرسیون نداشته باشند، از معادله حذف می‌شوند.

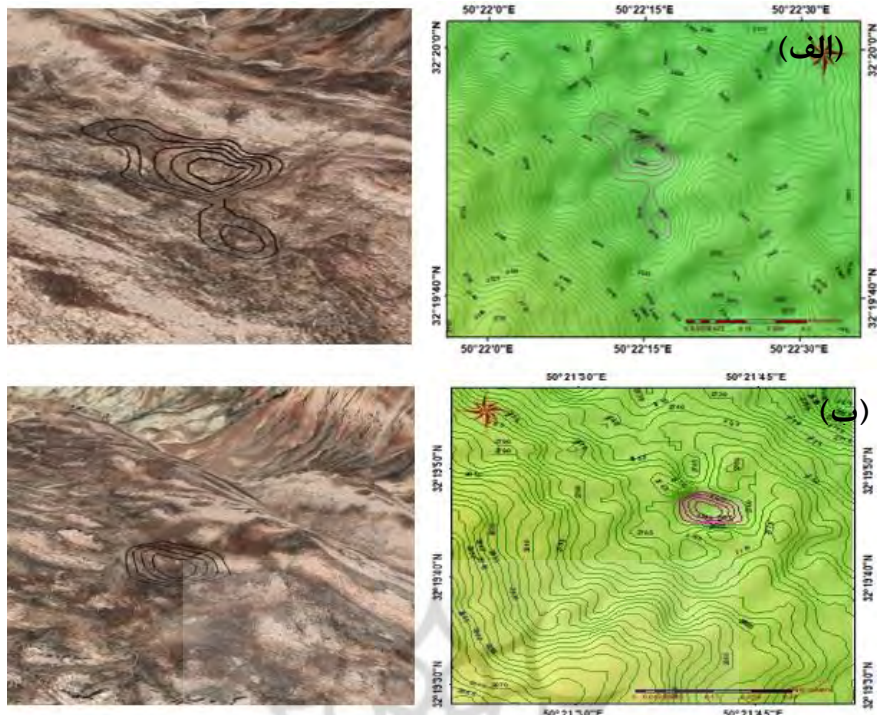
نهایتاً به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی دقت نتایج ارائه شده از مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره در پیش‌بینی پهنه‌بندی مناطق از نظر توسعه یافتگی کارست، روش کمی نمودار مشخصه عملکرد^۲ (ROC) بکار گرفته شده است. استفاده از سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد (ROC) یک ملاک مناسب برای سنجش کیفیت مدل‌های برازش شده و تعیین توان پیش‌بینی صحیح آن‌ها است. منحنی ROC یک تصویر گرافیکی از کارایی مدل برای تعیین کمیت تمایز پدیده‌های دوتایی است (نرخ مثبت واقعی (TPR) در برابر نرخ مثبت کاذب (FPR)؛ یعنی وجود پدیده یا عدم وجود آن) است (ملکی و همکاران، ۲۰۲۳: ۵). این منحنی عبارت است از حساسیت برحسب یک منهای ویژگی و مساحت زیر آن (AUC) عددی بین ۰ و ۱ است که به عنوان ملاکی برای سنجش توانایی پیش‌بینی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه این عدد به ۱ نزدیک باشد، نشانه‌ی توان‌تر بودن مدل برای پیش‌بینی است (سادات‌هاشمی و همکاران، ۱۳۸۲: ۱۴۶). ارزیابی عملکرد منحنی ROC با رسم نرخ مثبت واقعی در برابر نرخ مثبت کاذب در تنظیمات آستانه‌های مختلف (در محور X و Y) ایجاد می‌شود. نرخ مثبت واقعی به‌عنوان حساسیت، بازیابی یا احتمال تشخیص و نرخ مثبت کاذب نیز به عنوان احتمال هشدار کاذب شناخته می‌شود. مقادیر کوچکتر در محور X نمودار، نشان دهنده مثبت کاذب کمتر و منفی صحیح بیشتر است و مقادیر بزرگتر در محور Y نمودار، نشان دهنده مثبت صحیح بیشتر و منفی کاذب کمتر است.

بحث و نتایج

با مدل‌سازی دولین‌های کارستی در توده‌های کارستی دیمه و پیرغار تعداد ۱۸۵ دولین در محدوده توده کارستی پیرغار و همچنین تعداد ۱۴۰ دولین در محدوده مطالعاتی توده کارستی دیمه شناسایی و نقشه پراکندگی آنها تهیه گردید (شکل‌های ۳ و ۴). در مرحله سوم طی پیمایش‌های میدانی، به منظور راستی آزمایی مدل مورد استفاده در تشخیص دولین‌های مدل‌سازی شده موقعیت دقیق مکانی تعدادی از این دولین‌های مذکور با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب (GPS) برداشت گردید.

^۱ Stepwise

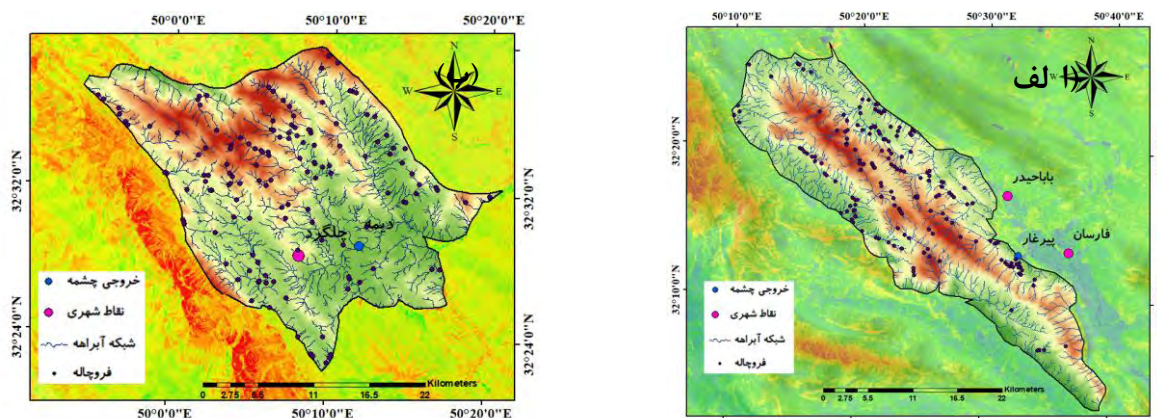
^۲ Receiver Operating Characteristic



شکل ۳: دولین‌های استخراج شده و نمایش آن‌ها روی نقشه‌های توپوگرافی و گوگل ارث. دولین با عمق ۲۵ متر و قطر ۳۴۹ متر در توده کارستی پیرغار (الف) و دولین با عمق ۲۰ متر و قطر ۱۳۳ متر در توده کارستی دیمه (ب).

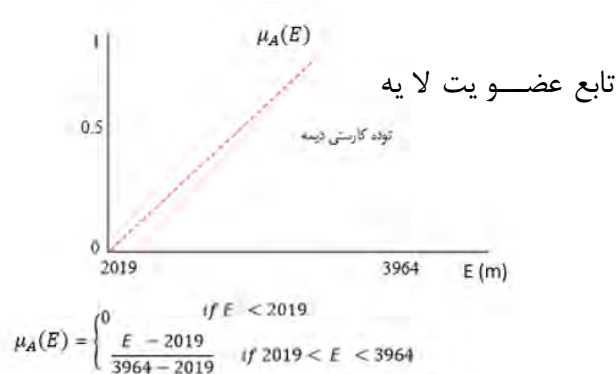
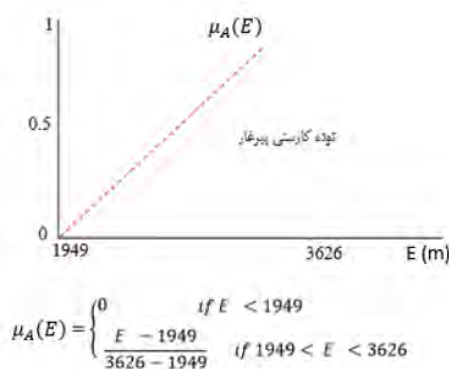


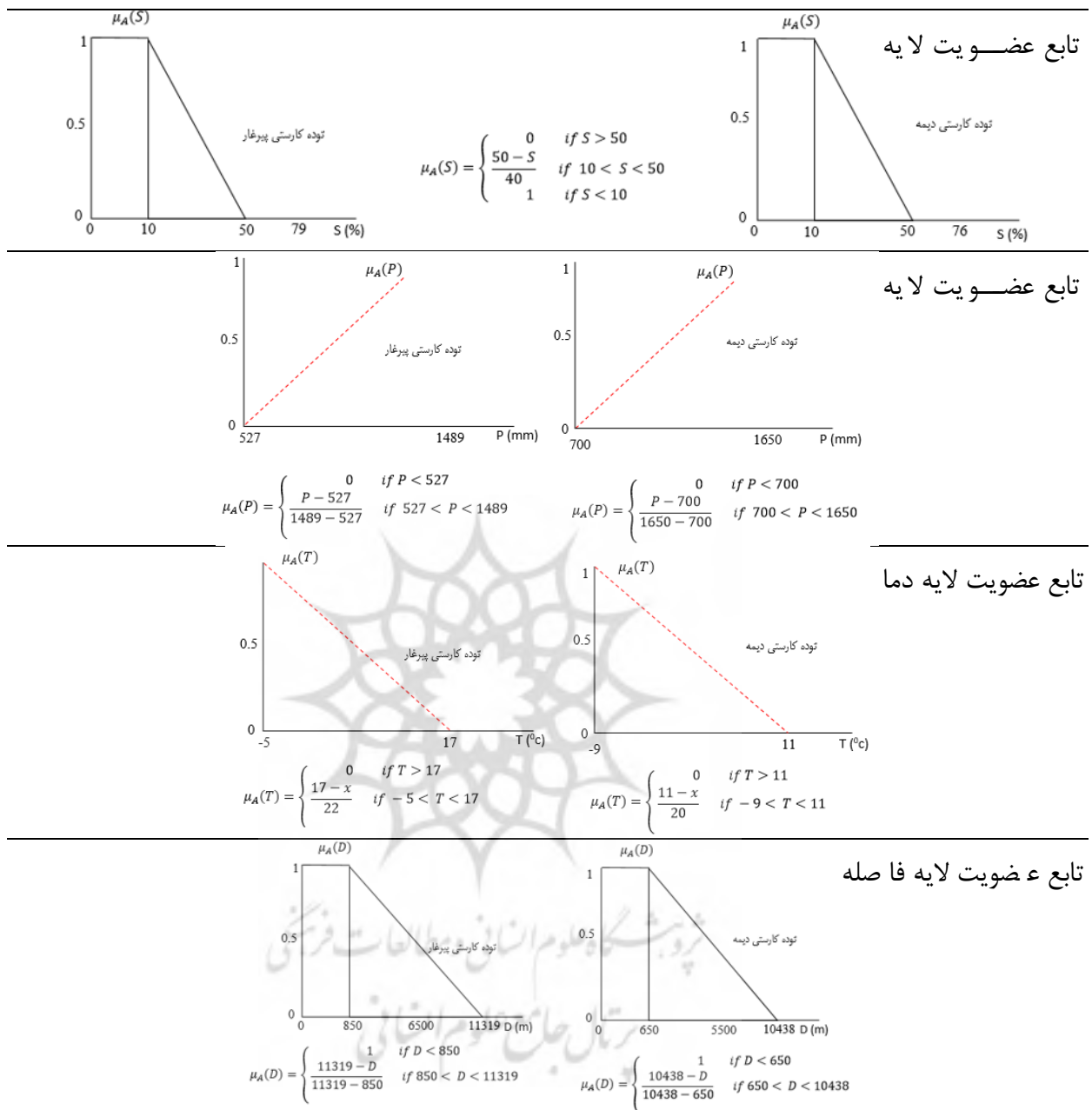
شکل ۴: نمونه‌هایی از دولین‌های شناسایی شده در توده‌های کارستی پیرغار در کوه سالدوران (الف و ب) و دیمه در تاق‌دیس زراب (ج و د).



شکل ۵: نقشه پراکنش فضایی دولین‌های کارستی در توده‌های کارستی پیرغار (الف) و دیمه (ب).

در ادامه تابع عضویت هر یک از لایه‌های رستری براساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد، در مدل منطق فازی جهت پهنه‌بندی توسعه کارست تعیین گردیده است. شکل (۶) تابع عضویت این لایه‌ها را برای توده‌های کارستی پیرغار و دیمه را نشان می‌دهد. لایه‌های ارتفاع و بارش رابطه مستقیمی با توسعه کارست دارند، زیرا که با افزایش این پارامترها، شرایط مساعد جهت توسعه کارست به علت کاهش دما و افزایش بارش فراهم شده و در نتیجه فرایند کارست‌زایی فعال می‌باشد و از یک رابطه خطی افزایشده با استفاده از تابع Linear جهت تعیین عضویت این لایه در مناطق مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۶). پارامترهای شیب، دما و فاصله از گسل رابطه معکوسی با توسعه کارست داشته و در شیب‌های کمتر از ۱۰ درجه بیشترین میزان توسعه کارست ایجاد می‌شود. با کاهش میزان دما قدرت انحلالی آب افزایش یافته و شرایط توسعه کارست مهیا شده و در نهایت میزان کارست‌زایی افزایش می‌یابد، همچنین در مناطق نزدیک به گسل به علت تکنونیزه بودن و وجود درزه و شکاف، میزان نفوذپذیری سنگ‌ها بیشتر شده و با افزایش فاصله از گسل، میزان درزه و شکاف کاهش یافته و در نتیجه میزان نفوذ کاهش می‌یابد. بنابراین از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه‌ها استفاده شده است (شکل ۶). پارامترهای درنظرگرفته شده در مدل با استفاده از عملگر گاما ۰/۸ به عنوان بهترین ضریب تلفیق، همپوشانی شده (حاتمی‌فرد، ۱۳۹۷؛ دسترنج و همکاران، ۱۳۹۸) و نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست مناطق مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۷). نقشه پهنه‌بندی توسعه‌یافتگی کارست سطحی توده‌های پیرغار و دیمه را نشان می‌دهد. این نقشه‌ها با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی (حاتمی‌فرد، ۱۳۹۷؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۸؛ دسترنج و همکاران، ۱۳۹۸) به چهار طبقه فاقد کارست (۰-۰،۱۷۱)، کارست با توسعه کم (۰،۱۷۱-۰،۴۱۳)، کارست با توسعه متوسط (۰،۴۱۳-۰،۵۷۴) و کارست توسعه‌یافته (۰،۵۷۴-۰،۹۴۷) طبقه‌بندی شده است. جدول (۱) مساحت هریک از پهنه‌ها را نشان می‌دهد.





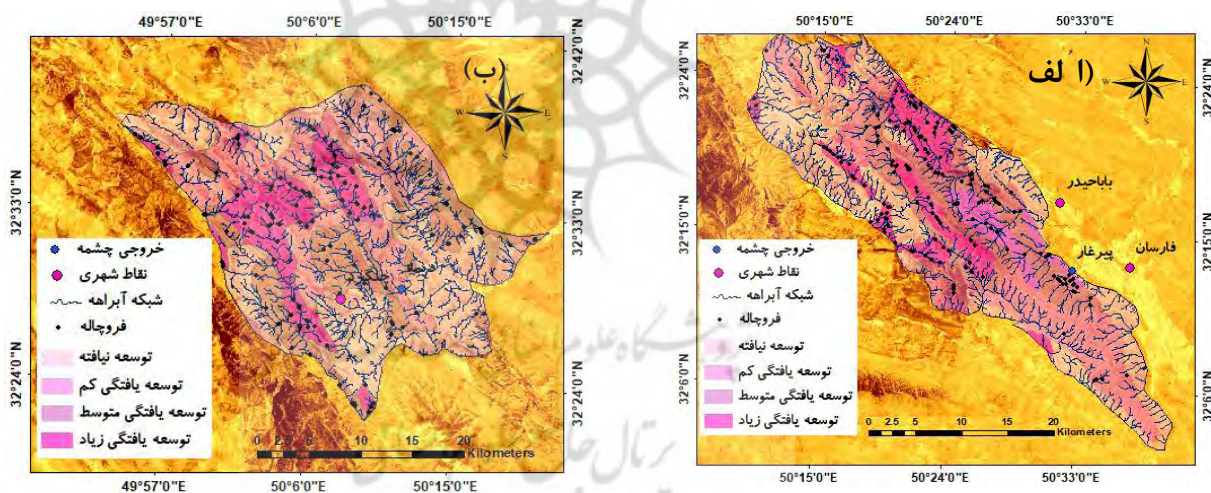
شکل ۶: توابع عضویت لایه‌های رستری در مدل منطق فازی برای توده‌های کارستی پیرغار و دیمه

با توجه به نتایج حاصل شده و مقایسه نقشه پهنه‌های توسعه کارست توده‌های کارستی با نقشه زمین شناسی یک صد هزارم شهر کرد، مناطق با توسعه خیلی کم کارست عمدتاً منطبق بر حواشی ارتفاعات، دشت‌های میانکوهی و کوهپایه‌ای گسترده شده‌اند و مساحت این پهنه برابر با ۲۱۷,۵۶ در توده کارستی پیرغار و ۲۲۸,۵۱ کیلومتر مربع در توده کارستی دیمه می‌باشد، که بیشترین مساحت در بین طبقات کارست متعلق به این طبقه کارست بوده است. لازم به ذکر است که این طبقه عمدتاً منطبق بر سازندهای رادیولاریتی و نهشته‌های کواترنری می‌باشد. طبقه کارست توسعه‌یافته عمدتاً منطبق بر رأس تاقدیس‌ها و در محدوده پلایه‌های کارستی است. بیشتر دولین‌های کارستی در این طبقه جای گرفته‌اند. طبقات دارای کارست با توسعه متوسط و کارست توسعه‌یافته منطبق بر سازند آهک آسماری و سروک می‌باشد. در این پهنه‌ها گسل‌ها از تراکم نسبتاً زیادی برخوردار می‌باشند. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی کارست سطحی در مناطق مورد مطالعه با دولین‌های کارستی (جدول ۱ و شکل ۶) حاکی از دقت بالای این مدل در ارزیابی توسعه کارست سطحی است. از ۱۸۵ دولین‌های

شناسایی شده در توده کارستی پیرغار تعداد ۱۰۲ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست و در توده کارستی دیمه نیز از ۱۴۰ دولین شناسایی شده ۸۳ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست واقع شده است. با توجه به این واقعیت که بیشترین میزان تراکم دولین‌ها در طبقات کارست با توسعه زیاد و متوسط قرار گرفته است، این امر کارایی مطلوب مدل فازی را در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در این مناطق را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مساحت پهنه‌های توسعه کارست مدل فازی و تعداد دولین‌های مدلسازی شده در توده‌های کارستی دیمه و پیرغار

طبقات توسعه یافتگی	توده کارستی پیرغار			توده کارستی دیمه		
	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)	تعداد دولین	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)	تعداد دولین
خیلی کم	۲۱۷/۵۶	۳۰/۳۸	—	۲۲۸/۵۱	۳۵/۲۶	—
کم	۱۹۳/۵۷	۲۷/۱۲	۲۵	۱۷۸/۶۵	۲۷/۵۰	۹
متوسط	۱۶۷/۰۹	۲۳/۳۴	۵۸	۱۳۷/۷۹	۲۱/۲۳	۴۷
زیاد	۱۳۶/۶۰	۱۹/۱۶	۱۰۲	۱۰۳/۱۲	۱۶/۰۱	۸۳
مجموع	۷۱۲/۸۲	۱۰۰	۱۸۵	۶۴۸/۰۷	۱۰۰	۱۴۰



شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی مدل فازی و دولین‌های استخراج شده در توده‌های کارستی پیرغار (الف) و دیمه (ب).

به‌منظور پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی توده کارستی دیمه با مدل رگرسیون چند متغیره پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی توده‌های کارستی پیرغار و دیمه با مدل رگرسیون چند متغیره مراحل نه‌گانه برای بررسی میزان ضریب همبستگی متغیرهای مستقل برای توده‌های کارستی به روش گام به گام انجام شد و نتایج حاصل از تحلیل اولیه از مدل رگرسیون در توده‌های کارستی پیرغار و دیمه در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول متغیرهای وردی و خروجی مدل و نوع مدل استفاده در آن را نشان می‌دهد.

جدول ۲: الگوی حاصل از برونداد رگرسیون خطی چند متغیره در توده‌های کارستی پیرغار و دیمه

مدل	خطای استاندارد		مقدار ضریب تعیین		ضریب تعیین		ضریب همبستگی	
	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه
۱	۰,۲۲۱	۰,۲۱۸	۰,۳۷۵	۰,۳۵۳	۰,۳۷۵	۰,۵۷۱	۰,۵۹۶	a
۲	۰,۲۱۵	۰,۲۰۱	۰,۳۹۸	۰,۳۹۷	۰,۳۹۸	۰,۵۹۸	۰,۶۱۳	b
۳	۰,۲۱۵	۰,۱۹۳	۰,۳۹۸	۰,۴۴۲	۰,۳۹۸	۰,۶۳۵	۰,۶۱۳	c
۴	۰,۲۵۱	۰,۱۸۴	۰,۴۶۳	۰,۵۰۳	۰,۴۶۳	۰,۶۸۷	۰,۷۱۴	d
۵	۰,۲۵۱	۰,۱۸۴	۰,۴۶۳	۰,۵۰۳	۰,۴۶۳	۰,۶۸۷	۰,۷۱۴	e
۶	۰,۱۷۵	۰,۱۷۱	۰,۵۹۸	۰,۵۵۳	۰,۵۹۸	۰,۷۲۴	۰,۷۷۳	f
۷	۰,۱۸	۰,۱۶۴	۰,۶۲۲	۰,۶۲۵	۰,۶۲۲	۰,۷۸۹	۰,۸۰۲	g
۸	۰,۱۷۵	۰,۱۵۷	۰,۶۵۹	۰,۶۶۱	۰,۶۵۹	۰,۸۱۸	۰,۸۳۴	h
۹	۰,۱۸۷	۰,۱۴۹	۰,۶۹۱	۰,۷۱۶	۰,۶۹۱	۰,۸۶۵	۰,۸۸۷	i

a. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما

b. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی

c. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، کاربری اراضی

d. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، جهت شیب

e. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، جهت شیب، خاک

f. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، جهت شیب، ارتفاع

g. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، جهت شیب، ارتفاع، گسل

h. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، جهت شیب، ارتفاع، گسل، شیب

i. پیش‌بینی کننده‌ها: (ثابت)، دما، زمین‌شناسی، جهت شیب، ارتفاع، گسل، شیب، بارش

نحوه‌ی تفسیر ضریب همبستگی بر اساس تخمین قوت که در جدول ۳ ارائه گردیده، انجام شده است. بر این اساس بیشترین ضریب همبستگی مربوط به متغیرهای سنگ‌شناسی، دما، جهات شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، درصد شیب و بارش نسبت به متغیر وابسته (دولین‌ها) بوده که مقدار این ضریب برای توده کارستی پیرغار برابر با ۰,۸۷۸ و برای توده کارستی دیمه برابر با ۰,۸۶۵ بوده است که نشان‌دهنده رابطه بسیار قوی بین این متغیرها می‌باشد. همچنین متغیرهای کاربری اراضی و خاک به دلیل عدم تأثیر یا عدم همبستگی نسبت به متغیرهای دیگر برای هر دو توده کارستی از مدل حذف شدند.

جدول ۳: نحوه‌ی تفسیر ضریب همبستگی بر اساس تخمین قوت (آچدیکن^۱، ۱۹۹۴: ۱۰۱)

ردیف	اندازه ضریب همبستگی	تفسیر کلی
۱	۰ تا ۰,۲	رابطه‌ی بسیار ضعیف یا فاقد رابطه
۲	۰,۲ تا ۰,۴	رابطه‌ی ضعیف
۳	۰,۴ تا ۰,۶	رابطه‌ی متوسط
۴	۰,۶ تا ۰,۸	رابطه‌ی قوی
۵	۰,۸ تا ۱	رابطه‌ی بسیار قوی

^۱ Archdeacon

ازجمله مهم‌ترین خروجی مدل رگرسیون خطی مربوط به معادله‌ی پیش‌بینی متغیر وابسته است که بر اساس مقدار ثابت (Constant) یا a و مقدار b یا (Beta) که مربوط به متغیرهای مستقل بوده، محاسبه می‌شود. ضرایب استاندارد شده یا بتا میزان تأثیر بدون توجه به شاخص است و در آن همه‌ی متغیرها از نظر شاخص آزاد می‌گردند و مقدار آنها پس از تبدیل نمره‌ها به یک نمره‌ی معیار بیان می‌گردند (حاتمی‌فرد، ۱۳۹۷: ۹۳). با ورود متغیرهای کاربری اراضی، زمین‌شناسی، دما، جهات شیب، رده‌های خاک، ارتفاع، فاصله از گسل، شیب و بارش به عنوان متغیرهای مستقل و متغیر دولین به عنوان متغیر وابسته جهت به دست آوردن معادله رگرسیون مشخص شد که تمامی متغیرها به استثناء متغیرهای کاربری اراضی و رده‌های خاک، به دلیل همبستگی بالایی که دارند در تشکیل دولین‌ها دخیل می‌باشند. با توجه به میزان Sig این میزان همبستگی‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد قابل قبول می‌باشد. و متغیرهای کاربری اراضی و رده‌های خاک به دلیل همبستگی پایین و سطح معناداری بیش از ۰,۰۵ از معادله حذف شدند. از طرفی میزان اهمیت هر متغیر در معادله بر اساس ضریب استاندارد β تعیین می‌شود. هر چه میزان این ضریب برای هر متغیر بزرگتر باشد، به مفهوم همبستگی بالاتر و اهمیت بیشتر آن متغیر در تشکیل دولین‌ها می‌باشد. همچنین ضریب منفی β بدین معناست که متغیر مستقل به صورت معکوس بر متغیر وابسته تأثیر دارد (جدول ۴).

جدول ۴: پیش‌بینی تأثیرات متغیرها و انتخاب مقدار ثابت a و مقادیر b در توده‌های کارستی پیرغار و دیمه

مدل	ضریب استاندارد				ضریب استاندارد		مقدار آماره		p-value (Sig.)	
	B		Std. Error		Beta		t			
	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه	پیرغار	دیمه
مقدار ثابت	۰,۲۱۲	۰,۱۷۵-	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	-۰,۲۹۸	-۰,۱۸۹	۱۶,۴۴	۱۲,۰۹	۰,۰۰۲	۰,۰۰۱
کاربری اراضی	۰,۱۴۳	۰,۱۶۷	۰,۰۰۶	۰,۰۰۵	۰,۰۵۴	۰,۰۴۹	۳۲,۸۶	۲۸,۸۷	۰,۰۶۲	۰,۶۲۱
زمین‌شناسی	۰,۸۶۵	۰,۶۵۷	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۲۰۱	۰,۱۹۸	۸۴,۹۴	۷۶,۸۳	...	۰,۰۰۱
دما	۰,۱۹۸	۰,۱۴۳	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	-۰,۱۸۰	-۰,۲۰۱	۳۲,۱۵	۲۹,۰۵	۰,۰۰۵	۰,۰۱۳
جهت شیب	۰,۵۰۸	۰,۴۲۷	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۶۷	۰,۰۴۸	۴۹,۱۲	۳۷,۴۹	...	۰,۰۰۱
رده‌های خاک	۰,۴۸۷	۰,۴۷۹	۰,۰۰۲	۰,۰۰۶	۰,۵۱۳	۰,۵۲۹	۱۱,۸۹	۱۷,۳۲	۰,۰۷۴	۰,۰۷۴
ارتفاع	۰,۶۴۸	۰,۵۹۳	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۲۱	۰,۰۳۹	۵۷,۶۳	۴۸,۵۴	۰,۰۰	۰,۰۱۷
گسل	۰,۵۱۷	۰,۴۷۸	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	-۰,۱۷۶	-۰,۱۹۸	-۲۵,۷	-۱۸,۷	۰,۰۰	۰,۰۰۰
شیب	۰,۳۱۸	۰,۲۸۹	۰,۰۰۳	۰,۰۰۳	۰,۰۶۲	۰,۱۵۹	۱۳,۵	۱۹,۱۸	۰,۰۰۸	۰,۰۷۸
بارش	۰,۳۶۵	۰,۳۴۶	۰,۰۰۴	۰,۰۰۴	-۰,۰۴۳	-۰,۱۰۵	۲۸,۳	۳۴,۹۷	۰,۰۰۵	۰,۰۱۹

با توجه به ضرایب رگرسیونی به دست آمده β (ضریب رگرسیونی ثابت و ضریب رگرسیونی هر متغیر) که با عنوان ضرایب استاندارد شده شناخته می‌شود، معادله‌ی احتمال شکل‌گیری دولین‌ها برای توده‌های کارستی محاسبه شد. ضریب ثابت رگرسیونی برای توده کارستی پیرغار که به معادله اضافه شده است، برابر با -۰,۲۹۸ و برای توده کارستی دیمه -۰,۱۸۹ بوده که ضریب رگرسیونی هر کدام از متغیرهای مستقل در این ضریب ضرب شده است (رابطه‌های ۳ و ۴). احتمال وقوع دولین برای توده‌های کارستی پیرغار (رابطه‌ی ۵) و دیمه (رابطه‌ی ۶) به صورت زیر محاسبه گردیده است:

$$Probability\ of\ Sinkhole\ Occurrence = (-0.298) + (Geology \times 0.865) + (Temperature \times 0.198) + (Aspect \times$$

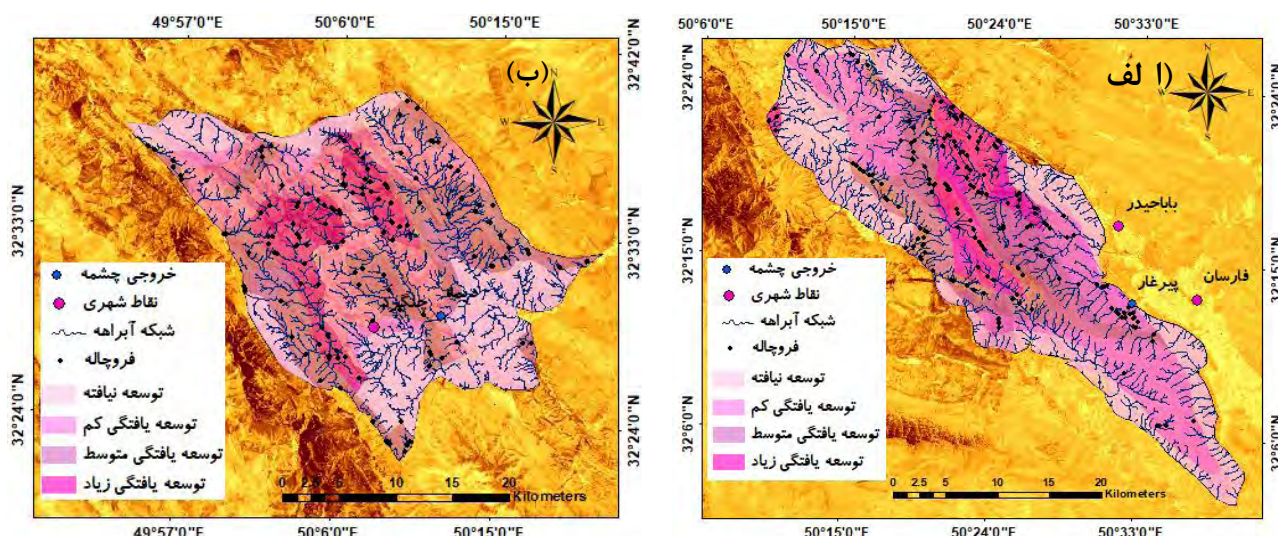
$$0.508) + (Height \times 0.648) + (Fault \times (-0.517)) + (Slope \times 0.318) + (Rain \times 0.365) \quad (3)$$

$$Probability\ of\ Sinkhole\ Occurrence = (-0.189) + (Geology \times 0.657) + (Temperature \times 0.143) + (Aspect \times$$

$$0.427) + (Height \times 0.593) + (Fault \times (-0.478)) + (Slope \times 0.289) + (Rain \times 0.346) \quad (4)$$

با انتقال رابطه فوق در محیط نرم افزار Arc GIS نقشه پهنه بندی توسعه کارست سطحی توده های کارستی با استفاده از رگرسیون چند متغیره تهیه گردید (شکل ۷). محدوده های مربوط به توده های کارستی با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره به لحاظ توسعه کارست سطحی به چهار پهنه شامل نواحی فاقد کارست، نواحی با توسعه کم، نواحی با توسعه متوسط و در نهایت پهنه با توسعه زیاد تقسیم شده است (شکل ۷ و جدول ۵). با توجه به نتایج حاصل شده و مقایسه نقشه پهنه های توسعه کارست توده های کارستی با نقشه زمین شناسی یک صد هزارم شهر کرد، نواحی فاقد کارست حدود ۲۰۳ کیلومترمربع از مساحت محدوده مربوط به توده کارستی پیرغار و ۲۱۴ کیلومترمربع از مساحت محدوده توده کارستی دیمه را در بر گرفته است. این پهنه دارای بیشترین پراکندگی و مساحت بوده که منطبق بر سطح دشت ها و نهشته های کوآترنری می باشد. نواحی کارستی با توسعه یافتگی کم حدود ۱۸۳ کیلومترمربع از مساحت هر دو توده کارستی را به خود اختصاص داده است. نواحی دارای پتانسیل متوسط توسعه کارست، در توده کارستی پیرغار منطبق بر آهک اوریتولین دار و سنگ آهک مرجانی می باشد. این پهنه ۱۷۱ کیلومترمربع از مساحت منطقه را در بر گرفته است. نواحی کارستی با توسعه متوسط در توده کارستی دیمه منطبق بر سازندهای سروک و سازندهای گروه خامی بوده و حدود ۱۶۰ کیلومترمربع از مساحت محدوده توده کارستی را شامل شده است. پهنه کارستی دارای توسعه زیاد در محدوده هر دو توده کارستی در مرتفعترین نواحی تاقدیس ها که دارای تراکم نسبتاً زیادی از گسل ها بوده واقع شده است که در توده کارستی پیرغار منطبق بر سنگ آهک دولومیتی سازند آسماری چهارم با درز و شکاف فراوان می باشد. این پهنه معادل ۱۴۵ کیلومترمربع از محدوده توده کارستی پیرغار و ۹۱ کیلومترمربع از محدوده توده کارستی دیمه را به خود اختصاص داده است. پهنه کارستی دارای توسعه زیاد در محدوده توده کارستی دیمه بر سطح سازند آهکی سروک و سازند گچساران گسترش یافته است.

پهنه بندی توسعه کارست سطحی توده های کارستی با مدل رگرسیون خطی چند متغیره (شکل ۷) و ارزیابی و مقایسه آن با پراکندگی دولین های موجود در توده های کارستی پیرغار و دیمه نشان دهنده دقت بالای مدل رگرسیون خطی چند متغیره در پهنه بندی و ارزیابی توسعه کارست سطحی می باشد. به طوریکه از ۱۸۵ دولین شناخته شده در محدوده توده کارستی پیرغار تعداد ۹۴ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست سطحی، تعداد ۶۴ دولین در پهنه متوسط و همچنین تعداد ۲۷ دولین در پهنه با توسعه یافتگی کم کارست سطحی شکل گرفته اند؛ که مناسب بودن مدل رگرسیون خطی جهت پهنه بندی توسعه کارست سطحی در توده کارستی پیرغار را نشان می دهد (جدول ۵). و از ۱۴۰ دولین شناخته شده در محدوده توده کارستی دیمه تعداد ۷۱ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست سطحی، تعداد ۶۲ دولین در پهنه متوسط و همچنین تعداد ۷ دولین در پهنه با توسعه یافتگی کم کارست سطحی شکل گرفته اند؛ که مناسب بودن مدل رگرسیون خطی جهت پهنه بندی توسعه کارست سطحی در توده کارستی دیمه را نشان می دهد (جدول ۵).



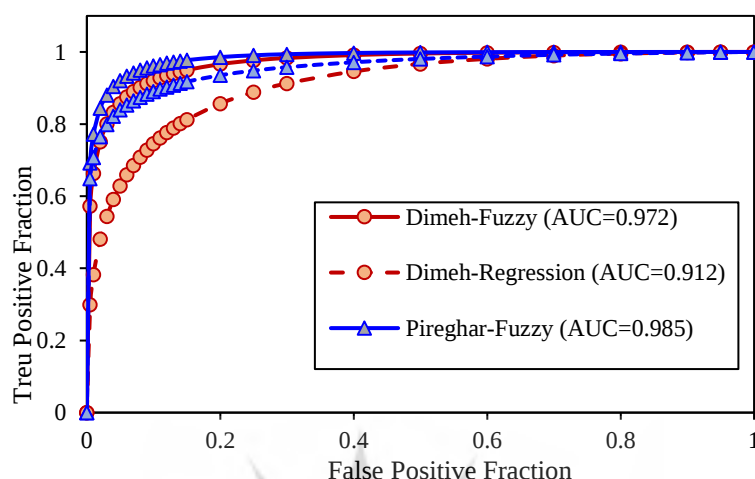
شکل ۷: نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی مدل رگرسیون چند متغیره و دولین‌های استخراج شده در توده‌های کارستی پیرغار (الف) و دیمه (ب).

جدول ۵: مساحت پهنه‌های کارستی در توده‌های کارستی پیرغار و دیمه با مدل رگرسیون چند متغیره همراه با تعداد دولین‌های موجود در هر پهنه

توده کارستی دیمه			توده کارستی پیرغار			طبقات توسعه یافتگی
تعداد دولین	مساحت (درصد)	مساحت (کیلومتر مربع)	تعداد دولین	مساحت (درصد)	مساحت (کیلومتر مربع)	
–	۳۳/۰۵	۲۱۴/۲۱	–	۲۸/۵۲	۲۰۳/۳	فاقد کارست
۷	۲۸/۱۱	۱۸۲/۱۸	۲۷	۲۶/۰۵	۱۸۳/۲	کم
۶۲	۲۴/۷۵	۱۶۰/۴۱	۶۴	۲۴	۱۷۱/۰۹	متوسط
۷۱	۱۴/۰۸	۹۱/۲۷	۹۴	۲۰/۳۷	۱۴۵/۲۱	زیاد
۱۴۰	۱۰۰	۶۴۸/۰۷	۱۸۵	۱۰۰	۷۱۲/۸۲	مجموع

نقشه‌های پهنه‌بندی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار از نظر توسعه یافتگی کارست با لایه تعداد دولین‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) صحت سنجی شدند. این منحنی نشان می‌دهد، هر مدلی که تشخیص بهتری داشته است نمره AUC منحنی ROC آن افزایش می‌یابد. نتایج منحنی ROC برای هر دو مدل رگرسیون خطی چند متغیره و مدل منطق فازی در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار سطح زیر منحنی ROC (AUC) برای مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره برای توده کارستی دیمه به ترتیب برابر با ۰٫۹۷۲ و ۰٫۹۱۲ و برای توده کارستی پیرغار مساوی با ۰٫۹۸۵ و ۰٫۹۵۸ می‌باشد که مدل منطق فازی همچنین ارقام محاسبه شده مربوط به مساحت زیر منحنی‌ها (AUC) نشان داد که این مدل‌ها جهت پیش‌بینی پهنه‌های کارستی دارای قدرت تشخیص بالایی می‌باشند. اما با این وجود مدل منطق فازی برای هر دو توده کارستی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چند متغیره نمره AUC بالاتری دریافت کرده و میزان تراکم بیشتری از دولین‌ها را در طبقات کارست با توسعه زیاد و متوسط تشخیص داده است، که عملکرد بهتر این مدل را نشان می‌دهد (شکل ۸). نتایج این تحقیق از این نظر که نشان داد مدل منطق فازی جهت پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چند متغیره دارای کارایی بالاتری است با نتایج مطالعات مرادی و همکاران (۲۰۱۶)، مکرم و همکار

(۱۳۹۸)، صفاری و همکاران (۱۳۹۸) و دسترنج و همکاران (۱۳۹۸) که با استفاده از مدل منطق فازی به پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در توده‌های مختلف کارستی پرداخته‌اند و نتیجه تحقیقات آنان نیز کارایی بالای مدل منطق فازی را در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی نشان داده است، همسو می‌باشد.



شکل ۸: منحنی ROC نقشه‌های پهنه‌بندی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار از نظر توسعه یافتگی کارست با لایه دولین‌های استخراج شده برای مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره.

نتیجه‌گیری

شناسایی فروچاله با استفاده از مدل‌سازی مدل ارتفاع رقومی علاوه بر کاهش زمان و هزینه‌ها، دارای دقت زیادی بوده و نقشه لندفرم‌های کارستی بدست آمده دارای کاربردهای زیادی همچون شناسایی مناطق تغذیه، بررسی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌ها، بررسی وضعیت بیابان و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های می‌باشند. نتایج ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی کارست سطحی تهیه شده از مدل منطق فازی با دولین‌های کارستی نشان داد که از ۱۸۵ دولین‌های شناسایی شده در توده کارستی پیرغار تعداد ۱۰۲ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست و در توده کارستی دیمه نیز از ۱۴۰ دولین شناسایی شده ۸۳ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست واقع شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی کارست سطحی با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره با دولین‌های کارستی از ۱۸۵ دولین شناخته شده در محدوده توده کارستی پیرغار تعداد ۹۴ دولین را در پهنه با توسعه زیاد کارست سطحی، تعداد ۶۴ دولین در پهنه متوسط و تعداد ۲۷ دولین در پهنه با توسعه یافتگی کم کارست سطحی نشان داده است. همچنین از ۱۴۰ دولین شناخته شده در محدوده توده کارستی دیمه تعداد ۷۱ دولین در پهنه با توسعه زیاد کارست سطحی، تعداد ۶۲ دولین در پهنه متوسط و تعداد ۷ دولین در پهنه با توسعه یافتگی کم کارست سطحی شناسایی شده است. مساحت این پهنه با توجه به نتایج مدل‌های منطق فازی و رگرسیون خطی چند متغیره، بطور میانگین حدود ۲۰ درصد از محدوده توده کارستی پیرغار و ۱۵ درصد از مساحت توده کارستی دیمه را به خود اختصاص داده است، که نشان دهنده توسعه کارستی شدگی بیشتر توده کارستی پیرغار نسبت به توده کارستی دیمه می‌باشد. نتایج صحت‌سنجی ارقام محاسبه شده مربوط به مساحت زیر منحنی‌های ROC مشخص کرد که مدل منطق فازی برای هر دو توده کارستی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چند متغیره نمره AUC بالاتری دریافت کرده است (برای توده کارستی دیمه ۰.۹۷۲ و برای پیرغار ۰.۹۸۵) که قدرت بالای مدل منطق فازی را در پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی نشان می‌دهد. در نهایت با توجه به گستردگی و اهمیت تشکیلات کربناته و منابع آب کارست در ایران و به ویژه قلمرو زاگرس، و در راستای شناخت دقیق‌تر، و مطالعه بهتر و همچنین مدیریت این منابع ارزشمند پیشنهاد می‌شود در جهت ادامه این پژوهش بررسی دقیق‌تر توسعه یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار با استفاده از ردیاب‌ها و مطالعات

ایزوتوبی و روش‌های ژئوفیزیکی جهت مطالعه آسیب‌پذیری آبخوان‌ها و ردیابی آلودگی‌ها در جریان‌های آب زیرزمینی این توده‌های کارستی انجام گردد.

منابع

- جعفریان، ح؛ واعظی‌هیر، ع؛ پیرخراطی، ح (۱۳۹۷). تعیین عوامل مؤثر بر هیدروشیمی منابع آب زیر زمینی در سازندهای سخت و کارستی غرب ارومیه، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۵، صص ۹۴-۷۵.
- حاتمی‌فرد، ر. (۱۳۹۷). اثرات ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های منابع آب کارست در قلمرو تاق‌دیس‌های گرین و کبیرکوه. رساله دکتری رشته ژئومورفولوژی. دانشگاه خوارزمی. اساتید راهنما امیر صفاری و مجتبی یمانی.
- حیدری، ز؛ قدیمی، م؛ رضایی عارفی، م. و حیدری، ز. (۱۳۹۹). شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع دولین‌ها با استفاده از شاخص‌های کمی مورفومتریک، مطالعه موردی (دشت کرمانشاه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، س ۹، ش ۲، صص ۲۱۵-۲۲۶.
- دسترنج، ع؛ نوحه‌گر، احمد و رفیع شریف‌آباد، ج. (۱۳۹۸). پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در توده آهکی بیستون با استفاده از مدل منطق فازی. مجله آمایش جغرافیایی فضا، فصلنامه علمی- پژوهشی دانشگاه گلستان. سال نهم/ شماره ۳۲، تابستان ۱۳۹۸، صص ۸۹-۱۰۶.
- ریاحی‌پور م. و خلیلی خ. (۱۳۹۱). بررسی و مقایسه هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی معرف در استان چهارمحال و بختیاری، شانزدهمین همایش انجمن زمینشناسی ایران، شیراز.
- سادات‌هاشمی س. م. ، قربانی ر. ، کاوه ای ب. (۱۳۸۲). تحلیل منحنی‌های مشخصه عملکرد گیرنده برای مقایسه تست‌های تشخیص پزشکی کومش، مجله سمنان دانشگاه علوم پزشکی، ۱۳۸۲؛ ۲: ۱۴۵-۱۴۹.
- صفاری، ا؛ کیانی، ط. و زنگنه‌تبار، س. (۱۳۹۸). بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، س ۱۹، ش ۵۵، صص ۲۳-۳۶.
- غلام‌حیدری، ح؛ انتظاری، م؛ کریمی، ح؛ (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر شکل‌گیری دولین‌های گچی در سازند گچساران با استفاده از مدل فازی (مطالعه موردی: دشت جابر بدره ایلام). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صص ۲۳۴-۲۱۳.
- قبادی، م. ح، ساعدی، ب، مهدی‌آبادی، ن، احمدزاده، ج، (۱۳۹۲). معرفی پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست توده آهکی بیستون- پراو، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۷ و ۱۸ شهریور ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی مشهد.
- قربانی، م. ص. اونیق، م. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی تحول و حساسیت کارست با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در منطقه کارستی شاهو، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۳۲-۱۹.
- کریمی غ. ح، باقری ر. رحیمی ف. ۱۳۹۷. هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی تاق‌دیس سالدوران، استان چهارمحال و بختیاری. هیدروژئولوژی، سال سوم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۷، صص ۷۹-۶۹.
- کریمی، ح، گرای، پ، توکلی، م، (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر وقوع دولین با استفاده از رگرسیون چندمتغیره؛ مطالعه موردی: دولین‌های ریزشی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، صص ۶۲-۵۳.
- کریمی‌وردنجان‌ج. ح. چیت‌سازان م. فاضلی‌فارسانی ع. صبا ع. کریمی ح. ۱۳۹۴. تعیین حریم حفاظتی چشمه کارستی دیمه با استفاده از ردیابی رنگی. سی و چهارمین، کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین، ایران، تهران.

- گراوندف؛ حسینی، س.م؛ مقصودی، م؛ یمانی، م؛ لک، ر؛ (۱۴۰۱). ارزیابی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه. مجله پژوهش آب ایران جلد ۱۶، شماره ۴، پیاپی ۴۷، زمستان ۱۴۰۱، صص ۵۵-۴۱.
- گراوندف؛ مقصودی، م؛ حسینی، س.م؛ یمانی، م؛ لک، ر؛ (۱۴۰۱). پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی از دیدگاه ژئومورفولوژی با استفاده از مدل منطق فازی (مطالعه موردی توده‌های کارستی پیرغار و دیمه در استان چهارمحال و بختیاری)، نهمین همایش انجمن ایرانی ژئومورفولوژی، تهران.
- مالی س. محمدی ض. (۱۳۹۲). بررسی توسعه کارست با استفاده از تحلیل هیدروگراف و سری زمانی بارندگی و دبی چشمه‌ها. هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، صص ۳۱۰-۳۰۱.
- محمدی ض. و ریاحی‌پور م. (۱۳۹۰). بررسی رفتار هیدرودینامیکی سیستم‌های کارستی با استفاده از آنالیز سریهای زمانی، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، زنجان.
- مکرم، م. و نگهبان، س. (۱۳۹۸). بررسی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل کارستی شدن با استفاده از روش فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، س ۳۰، شماره پیاپی ۷۴، ش ۲، صص ۱۳۴-۱۲۱.
- مقامی‌مقیم، غ. (۱۳۹۶). بررسی عوامل موثر در شکل‌گیری و گسترش کارست‌های حوضه آبریز در پرچین در شمال شرق ایران. جغرافیا و توسعه، دوره ۱۵، شماره ۴۸، صص ۲۶۳-۲۴۵.

- Ahmadi pour M. R. 1999. Karst terraines in Iran- Examples from Lorestan. *Acta carsologica*. 28/2(13): 213-224.
- Archdeacon, T. J. (1994). *Correlation and regression analysis: a historian's guide*. Univ of Wisconsin Press. p374.
- Calaforra, J. M., & Pulido-Bosch, A. (2003). Evolution of the gypsum karst of Sorbas (SE Spain). *Geomorphology*, 50(1-3), 173-180.
- Calic, J., 2011, *Karstic uvula revisited: Toward a redefinition of the term*, *Geomorphology*, Vol.134, No.1, pp.32-42.
- Cooper, A.H., Gutiérrez, F., (2013). *Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning*, In: Shroder, J. (Editor in Chief), Frumkin, A. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, Academic Press, San Diego, CA, Vol. 6, *Karst Geomorphology*.
- Dewaele, M., Asmussen, E., Peutzfeldt, A., Munksgaard, E. C., Benetti, A. R., Finné, G., & Devaux, J. (2009). Influence of curing protocol on selected properties of light-curing polymers: degree of conversion, volume contraction, elastic modulus, and glass transition temperature. *Dental Materials*, 25(12), 1576-1584.
- Entezari, M. and Aghaeipour, Y. (2018). Zonation of Karst development using Entropy Model (Case study: Paraw – Bistoon mountain masses). *Journal of Geography and Environmental Planning*, Vol, 29, No. 2, Ser No. (70)
- Ford D. C. and Williams P. 2007. *Karst Hydrogeology and geomorphology*, John Wiley 8 Sons Ltd 1-562.
- Goldscheider N. Chen Z. Auler A. S. Bakalowicz M. Broda S. Drew D. Hartmann J. Jiang G. Moosdorf N. Stevanovic Z. and Veni G. 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*. 28: 1661-1677.
- Groves CG, Meiman J (2005) *Weathering, geomorphic work, and karst landscape evolution in the Cave City groundwater basin, Mammoth Cave, Kentucky*. *Geomorphology* 67(1):115-126.
- Guo Y, Jim Yeh TC, Hao Y (2019) *Investigation of Karst Spring Flow Cessation Using Grey System Models*. *Water* 11(9), 1927; doi: 10.3390/w11091927.

- Haghiri, M., Raeisi, N., Azizi, R., Shabani, K., & Ghadiri, M. (2024). Evaluation of karst aquifer development and karst water resource potential using fuzzy logic model (FAHP) and analysis hierarchy process (AHP): a case study, North of Iran. *Carbonates and Evaporites*, 39(2), 11.
- Huggett, R. 2003. *Environmental change: the evolving ecosphere*. Rutledge.
- Liang, F., Du, Y., Ge, Y., & Li, C. (2014). A quantitative morphometric comparison of cockpit and doline karst landforms. *Journal of Geographical Sciences*, 24(6), 1069-1082.
- Maleki, M., Salman, M., Sahebi Vayghan, S., & Szabo, S. (2023). GIS-based sinkhole susceptibility mapping using the best worst method. *Spatial Information Research*, 1-9.
- Moradi, S.; Kalantari, N. and Charachi, A. (2016). Karstification Potential mapping in northeast of Khuzestan province, Iran, using FUZZY logic and analytical hierarchy process (AHP) technique, *Geopersia*, (2)6:282-265
- Maulud, D., & Abdulazeez, A. M. (2020). A review on linear regression comprehensive in machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 1(4), 140-147.
- Mull, D.S., Neilsen, D.M., Quinlan, J.F., (1988). *Application of dye – tracing techniques for determine solute transport characteristics of Groundwater in karst terrains*, United States Environmental Protection Agency. 117 pages.
- Nakhaie, A., Zangane Asadi, M. A., Behniafar, A., & Mokhtari, L. (2023). Zoning Karst Development By Using Fuzzy Logic Model_ANP in Baqamch basin of Kashaf Rod. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 230-255.
- Rajabi, M.; Hejazi, A. and Almasi GH (2017). Zonation of Superficial Karst Development Using Fuzzy logic method (Case study: Shirez Karstic masses). *Science Arena publications*, 59-50(1)1.
- Raeisi E. Kowsar N. 1997. Development of Shahpour Cave, Southern Iran- Cave and KarstScience. Nottingham. 24(1): 27-34.