

ارزیابی آسیب‌پذیری کارست سطحی آبخوان‌های کارستی ششپیر و برغان با استفاده از منطق فازی

مهدی کاشفی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
مژگان انتظاری* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
مریم جعفری اقدم - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰

چکیده

حفاظت از منابع آب کارستی قابل شرب در مناطق نیمه‌خشک ایران به‌عنوان یک هدف استراتژیک می‌باشد. آلودگی آبخوان‌های کارستی می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری در توسعه مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی آن ناحیه داشته باشد و هزینه‌های زیادی را به این مناطق تحمیل کند. کارست توسعه‌یافته وجود درزه و شکاف‌های فراوان می‌تواند باعث سهولت در انتشار آلودگی در این آبخوان‌ها بشود. لذا شناخت مناطق در معرض آلودگی و مدیریت این آبخوان‌ها بسیار حیاتی است. هدف از این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری سطحی آبخوان‌های کارستی ششپیر و برغان با تأکید بر فروچاله‌ها با استفاده از مدل فازی می‌باشد. در این مدل از پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش، دما و پارامترهای کیفی (لیتولوژی، کاربری اراضی، خاک و جهت شیب) به‌عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده است. در ابتدا نقشه آسیب‌پذیری سطحی کارست با استفاده از روش شکستگی طبیعی تهیه گردید و چهار کلاس آسیب‌پذیری زیاد، کم، متوسط و فاقد آسیب‌پذیری تشخیص داده شد. همپوشانی لایه فروچاله‌ها و نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سطحی کارست نشان می‌دهد که ۷۵ درصد فروچاله‌ها در طبقه کارستی با آسیب‌پذیری زیاد و ۲۲ درصد فروچاله‌ها در طبقه کارستی با آسیب‌پذیری متوسط قرار دارد. قرار گرفتن حدود ۹۷ درصد فروچاله‌ها در این دو طبقه کارایی مطلوب مدل فازی در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سطحی کارست در این دو آبخوان را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: آبخوان کارستی، آسیب‌پذیری، ششپیر، برغان، منطق فازی.

مقدمه

نیاز به تأمین آب، به‌منظور رفع نیاز جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی به‌طور فزاینده‌ای در سطح جهان به رسمیت شناخته‌شده است (مانش و کنارد^۱، ۲۰۰۷؛ کراوس^۲ و همکاران، ۲۰۰۷؛ گاندوی^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). آب زیرزمینی آبخوان‌های کارستی جزء مهم‌ترین منابع تأمین آب آشامیدنی مردم در سراسر دنیا می‌باشند. تهیه نقشه‌های توسعه و آسیب‌پذیری کارست سطحی می‌تواند در حفاظت از آب‌های زیرزمینی کارست نقش مهمی را ایفا نماید. همچنین این نقشه‌ها می‌توانند در پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریتی منابع آب زیرزمینی برای جلوگیری از تغییر کیفیت این آب‌ها کمک شایانی نماید (میمی^۴ و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۹۸).

حفاظت از منابع آب کارست به دلیل آسیب‌پذیری و حساسیت زیاد به آلودگی، یکی از مهم‌ترین اقدامات در زمینه مدیریت منابع آب کارست می‌باشد (افراسیابیان، ۲۰۰۷، ۶۷۳). منابع آبی آبخوان‌های کارستی اهمیت روزافزونی در سراسر جهان یافته‌اند. سفره‌های آب کارست به علت ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاص خود متمایز از دیگر سفره‌های آبی می‌باشند (وایت^۵، ۱۹۸۸؛ کمیسیون اروپایی^۶، ۱۹۹۵؛ باکالوویچ^۷، ۱۹۹۵ و ۲۰۰۵؛ فورد و ویلیامز^۸، ۲۰۰۷؛ مادارا و آندرو^۹، ۲۰۱۱).

پژوهش‌های زیادی درباره ارزیابی توسعه و آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی با مدل فازی انجام شده است.

گمیتزی^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۶) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی با کمک نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^{۱۱} و منطق فازی و سیستم‌های تصمیم‌گیری در شمال یونان پرداختند در این پژوهش پارامترها جهت محاسبات به سه گروه از فاکتورها دسته‌بندی شدند. گروه اول پارامترهایی مرتبط با ویژگی‌های داخلی آبخوان مانند ویژگی‌های ذاتی آبخوان، گروه دوم شامل پارامترهایی مرتبط با ویژگی‌هایی از خارج سیستم مانند فعالیت‌های انسانی و بارش، گروه سوم شامل پارامترهایی مرتبط با ترکیب شرایط ویژه زمین‌شناسی است مانند نفوذ نمک از زون‌های مجاور. این فاکتورها با کمک منطق فازی استانداردسازی شده و در نهایت پهنه‌بندی با کمک پارامترها انجام شدند.

ایکبال^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی با عنوان توسعه مدل فازی سلسله مراتبی برای ارزیابی آلودگی ناشی از آسیب‌پذیری آب زیرزمینی از نوعی مدل فازی پیشرفته بانام اچ اف اس^{۱۳} استفاده شده است. شاخص‌های این مدل همانند مدل دراستیک^{۱۴} می‌باشد اما در مقایسه با مدل حساسیت بیشتری نسبت به داده‌های ورودی دارد و دقیق‌تر عمل می‌کند.

^۱ Münch and Conrad

^۲ Krause

^۳ Gondwe

^۴ Mimi

^۵ White

^۶ European Commission

^۷ Bakalowicz

^۸ Ford and Williams

^۹ Mudarra and Andreo

^{۱۰} Gemitzi

^{۱۱} GIS

^{۱۲} Iqbal

^{۱۳} HFS

^{۱۴} DRASTIC

آرزومند و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با کمک مدل فازی (مطالعه موردی دشت کوچ اصفهان آستانه) در این روش وزن پارامترها به کمک ضریب لاندا به فازی تبدیل شدند وزن پارامترهای کمی توسط توابع عضویت وزن پارامترهای کیفی توسط توابع گسسته به فازی تبدیل شدند و در نهایت پهنه‌بندی انجام شده است. چاک هو^۱ و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های کارستی ناشی از ورود آب به داخل کانال‌های کارستی با استفاده از مدل فازی انجام دادند که نتایج ارزیابی منتج شده از این روش با مقایسه نتایج واقعی کاملاً منطبق هستند.

خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی پتانسیل استحصال آب از آبخوان از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی دشت نیشابور) با توجه به خصوصیات کمی و کیفی آبخوان و با استفاده از اطلاعات موجود آبخوان، پارامترهای کمی و کیفی مانند ضریب انتقال، هم‌افت سطح ایستابی و هم‌شوری آب آبخوان بررسی شد و تابع عضویت فازی برای هر پارامتر تعیین شد و پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی قابلیت استحصال آب برای هر منطقه مشخص گردید.

یمانی و همکاران (۱۳۹۲) باهدف مشخص نمودن میزان توسعه‌یافتگی کارست و میزان تأثیر عوامل مختلف در نفوذپذیری سازندهای کارستی به بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و مدل ای‌اچ‌پی^۲ در استان کرمانشاه پرداختند.

برزگر و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله‌ای با عنوان استفاده از روش‌های مختلف فازی برای بهینه‌سازی مدل دراستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت تبریز و به این منظور ۷ پارامتر مدل دراستیک به‌عنوان ورودی انتخاب شدند و پس از اعمال توابع و عملگرهای مدل فازی نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان تهیه گردید.

مرادی (۱۳۹۵) در پایان‌نامه دکتری خود با عنوان مقایسه پتانسیل توسعه کارست و تعیین ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان‌های کارستی ایلام، سروک و آسماری شمال شرق خوزستان از دو روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی^۳ همراه با صحت‌سنجی مدل‌های تهیه‌شده با استفاده از داده‌های ژئومورفولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و هیدروشمیایی به بررسی تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارستیفیکاسیون در آبخوان‌های کارستی با اسکلت آهکی سازند آسماری و ایلام و سروک و مقایسه کارست‌شدگی در این آبخوان‌ها با استفاده از این مدل‌ها پرداخته شده است.

مهدوی و زارع ابیانه (۱۳۹۵) در مقاله‌ای با عنوان تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان بر اساس مدل‌های فازی و دراستیک (مطالعه موردی دشت همدان - بهار) دو مدل دراستیک و فازی شامل هفت پارامتر مهم هیدروژئولوژیکی (عمق تا سطح ایستابی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی) است که نقشه‌های تولیدشده مربوط به هر پارامتر بر اساس رتبه‌بندی‌ها وزن‌های مدل دراستیک، طبقه‌بندی و ترکیب شدند و در مدل فازی نیز هفت پارامتر مدل دراستیک به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند و پس از اعمال توابع و ضرایب مدل فازی نقشه نهایی در خصوص آسیب‌پذیری تهیه شد.

امیر صفاری و همکاران (۱۳۹۸) بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی پرداختند. در این پژوهش لایه‌های سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، بارش، دما، شیب، ارتفاع، جهت شیب و پوشش گیاهی با توجه به تابع موردنیاز هر کدام، فازی سازی شده و با استفاده از عملگر گامای $0/9$ تلفیق شده است و در

^۱ Chak Ho

^۲ AHP

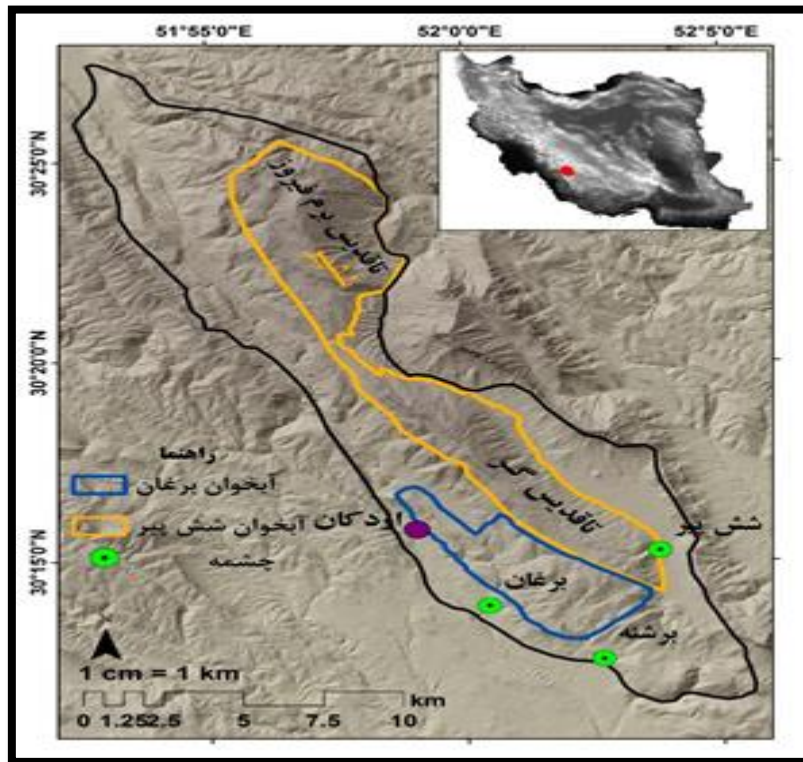
^۳ Fuzzy logic

پایان نقشه پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی منطقه در چهار طبقه فاقد کارست، کارست با توسعه کم، کارست با توسعه متوسط و کارست با توسعه زیاد تهیه شده است.

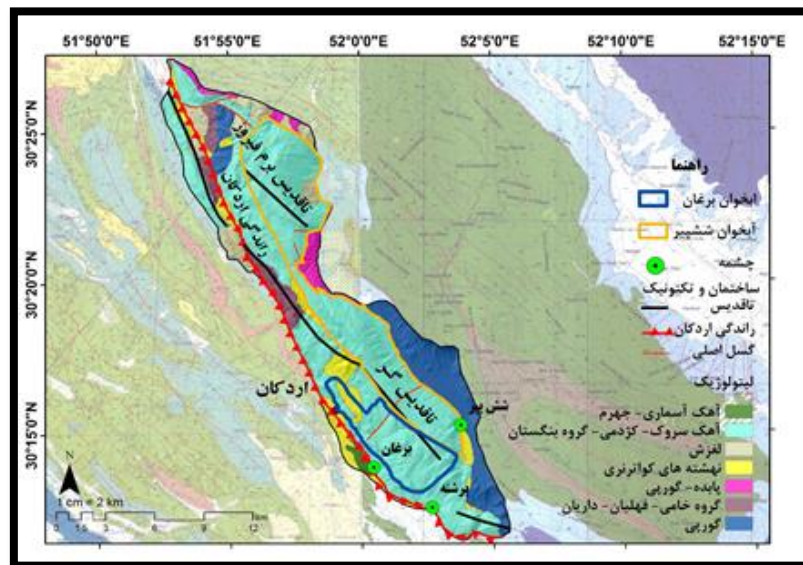
دو آبخوان مهم ششپیر و برغان در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شیراز به دلیل دارا بودن منابع غنی و باکیفیت آب به‌عنوان منابعی ارزشمند جهت تأمین آب آشامیدن منطقه و کلان‌شهر شیراز اهمیت بسیار بالایی دارند. آبدهی آبخوان ششپیر در سال‌های پرآبی بیش از ۳۲۰۰ لیتر در ثانیه است که از یال شمالی کوه گر خارج می‌شود (رئسی و کرمی، ۱۹۹۶). همچنین دبی چشمه برغان در سال‌های پرآبی بیش از ۶۳۰ لیتر در ثانیه است که همین امر مطالعه این دو آبخوان را بیش‌ازپیش مهم می‌سازد. با توجه به توسعه‌یافتگی ژئومورفولوژی کارست، پوشش بسیار نازک خاک، پوشش گیاهی کم، تکنوئیزه بودن منطقه و زمستانه بودن بارش در آبخوان‌های موردبررسی، میزان نفوذ آب در این آبخوان بالا بوده و دارای منابع بارزش آب زیرزمینی می‌باشد.

موقعیت آبخوان‌های مورد مطالعه

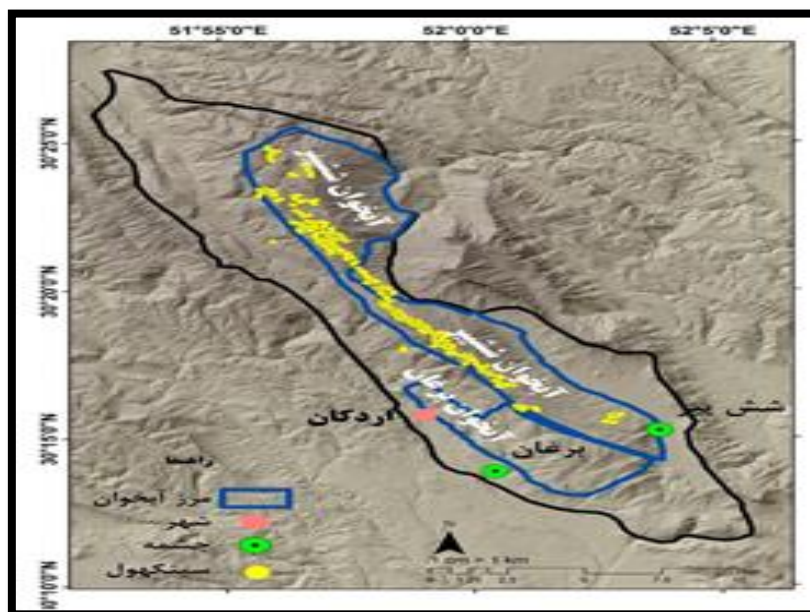
آبخوان‌های ششپیر و برغان (شکل ۱) در نزدیکی شهر اردکان شهرستان سپیدان و در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شیراز و در تقسیم‌بندی‌های ساختمانی- رسوبی کشورمان به عقیده نبوی (۱۳۵۵) جزو ناحیه زاگرس مرتفع می‌باشد. این دو آبخوان شامل کوه‌های گر و برم-فیروز می‌باشد که به شکل یک طاق‌دیس پلانژ دار است (تصویر ۱). محور چین‌خوردگی این طاق‌دیس با امتداد شمال غرب - جنوب شرق یا همان امتداد چین‌خوردگی زاگرس منطبق است. تشکیلات آهکی سروک در این منطقه دارای رخنمون وسیعی است و توده اصلی این دو آبخوان مهم کارستی را ایجاد کرده است. نظر به ضخامت بسیار زیاد سازند آهکی سروک (حدود ۸۰۰ متر) و شکستگی‌ها و لندفرم‌های متعددی که در حوضه آبریز هر آبخوان وجود دارد این دو آبخوان را به‌عنوان دو سفره مهم آب زیرزمینی در منطقه مطرح نموده است. حوضه آبخوان ششپیر شامل کوه برم-فیروز و یال شمالی کوه گر است. از مهم‌ترین اشکال کارستی این حوضه، حضور ۲۸۷ سینک‌هول (تصویر ۲) و اشکال کارستی دیگری از جمله غار و کارن است که عمل تغذیه آبخوان عمدتاً از طریق این لندفرم‌ها صورت می‌پذیرد. عمل تخلیه این آبخوان از چشمه ششپیر انجام می‌شود. کوه گر یک طاق‌دیس برگشته است. ارتباط یال شمالی و جنوبی این طاق‌دیس به علت عملکرد تراست زاگرس و سازند غیرقابل نفوذ کژدمی قطع شده است و باعث ایجاد آبخوان برغان در یال جنوبی این کوه شده است. (زارع و رئسی، ۱۲، ۱۹۹۳). مساحت حوضه آبریز آبخوان برغان حدود ۱۹ کیلومترمربع است (پزشک‌پور، ۱۹۹۱، ۸). در حوضه آبخوان برغان سینک‌هول‌های محدود و کوچکی وجود دارد و به علت وجود تراست زاگرس و عمل چند گسل نرمال آبخوان به‌شدت خرد شده و عمل کارستی شدن بیشتر در زیرزمین و در محل درزه‌ها و شکستگی‌ها ایجاد شده است. عمل تخلیه آبخوان برغان از طریق ۱۱ چشمه انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها چشمه‌های ششپیر و برغان است (شکل ۲).



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی گر و برم فیروز



شکل ۳: نقشه پراکندگی سینک‌هول‌ها و چشمه‌های منطقه



تصویر ۱: صفحه گسلی ایجادکننده چشمه ششپیر



تصویر ۲: نمونه‌ای از سینک‌هول‌های منطقه

مواد و روش ها

این پژوهش یک تحقیق کاربردی - توسعه ای مبتنی بر روش های میدانی، کتابخانه ای و مدل آسیب پذیری کارست سطحی می باشد.

قبل از آنکه به بررسی آسیب پذیری کارست سطحی در توده گر و برم فیروز بپردازیم، لازم است به نقش عواملی که به نحوی در این آسیب پذیری نقش دارند، اشاره نمود. در مجموع نه عامل، در فرایند کارست زایی، توسعه و آسیب پذیری آن در مناطق مورد بررسی دخیل می باشند که از میان آن ها عوامل لیتولوژی و بارش، اصلی ترین عامل ها در شکل گیری و توسعه کارست بوده و عدم وجود هر یک از این دو عامل، باعث عدم شکل گیری ژئومورفولوژی کارست یا شکل گیری بسیار محدود می گردد. از آنجایی که ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی های کمی و کیفی آبخوان های کارستی و بررسی میزان آسیب پذیری آن ها، تأثیر بسزایی دارد، تهیه نقشه توسعه یافتگی و آسیب پذیری سطحی کارست، لازم و ضروری می باشد. به منظور تهیه نقشه پهنه بندی آسیب پذیری سطحی کارست، از مدل منطق فازی و عملگر گاما استفاده می نمایم.

مدل منطق فازی: منطق فازی، شیوه های مرسوم برای طراحی و مدل سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و نسبتاً پیچیده است، با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به عبارتی دانش فرد خبره و باهدف ساده سازی و کارآمد شدن طراحی سیستم، جایگزین و یا تا حد زیادی تکمیل می نماید (سلامی، ۲۰۰۲، ۱۳۸۹). تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست، قطعی و صددرصدی نیست. برای مطالعه چنین شرایط پیچیده و مبهمی، مدل فازی مناسب می باشد، زیرا با استفاده از نظریه فازی، می توان متغیرهای نادقیق و مبهم را، به شکل ریاضی درآورد (مؤمنی، ۱۳۸۹، ۱۸۷).

در مدل فازی، هر فرد هم زمان در مجموعه های مختلف اما به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و یا خود این دو حد را می پذیرد (ون آلفن و همکار، ۲۰۰۰، ۱۷۱۰). در تئوری مجموعه های دقیق، اگر یک مجموعه را در نظر بگیریم، هر عضو مجموعه مرجع یا در مجموع هست و یا نیست و می توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (معادله ۱) (مؤمنی، ۱۳۸۹، ۱۹۷).

$$(I) \quad \mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{If } x \in A \\ 0, & \text{If } x \notin A \end{cases}$$

رابطه

این تابع به هر عضو مجموعه A عدد یک و به هر عضو خارج از مجموعه A عدد صفر نسبت می دهد. روش فازی با پنج عملگر که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم افزار جی آی اس قابل اجرا می باشد (کارتز^۱، ۱۹۹۶، ۲۷۰). اجتماع فازی^۲، اشتراک فازی^۳، ضرب فازی^۴، جمع فازی^۵ و گاما^۶. به دلیل نقش تعدیلی عملگر گاما و نزدیک به واقعیت بودن آن، در ادامه به توضیح آن پرداخته می شود.

گاما: 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 نزدیک تر می کند. مقدار گاما از طریق قضاوت کارشناسی مبتنی بر نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده های مشاهده شده یا تجربیات موجود درباره موضوع مورد بررسی تعیین یا از طریق آزمون سعی و خطا، در تطبیق با شواهد، واقعی می گردد. از این رو، عملگر گاما موجب دستیابی به خروجی هایی می شود

^۱-Carter

^۲-Fuzzy OR

^۳-Fuzzy AND

^۴-Fuzzy Product

^۵-Fuzzy SUM

^۶-Fuzzy Gamma

که مناسب‌ترین مقادیر γ را در تطبیق با واقعیت‌ها و در مقایسه با خروجی‌های حاصل از به‌کارگیری سایر عملگرها، مشخص می‌نماید. این عملگر برحسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس معادله (۲) تعریف می‌شود.

$$\mu_{\text{combination}} = ((\text{Fuzzy Algebraic Sum})(\text{Fuzzy Algebraic Product}))^{1-\gamma} \quad (2) \text{ رابطه}$$

در این رابطه $\mu_{\text{combination}}$ لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γ 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 گرفته‌شده برای γ مقادیری در خروجی ایجاد می‌کند که با اثر افزایشی جمع جبری و اثر کاهشی ضرب جبری فازی، سازگاری دارد (کارتز، ۱۹۹۶، ۲۸۰).

بحث و یافته‌ها

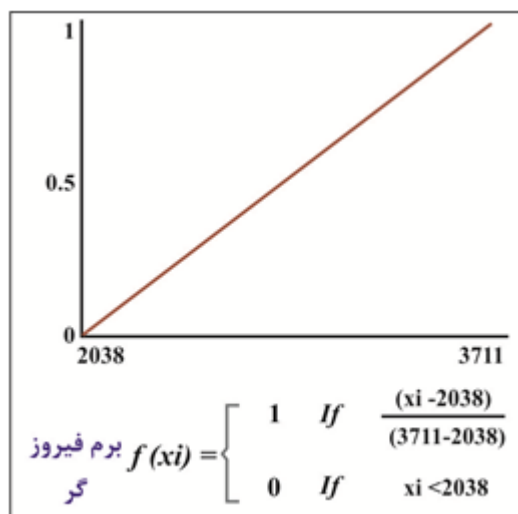
به‌منظور پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی، متغیرهای لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما، کاربری اراضی و خاک به‌عنوان پارامترهای مؤثر انتخاب گردیدند. هر یک از پارامترهای مؤثر انتخابی، به‌عنوان یک مجموعه فازی توسط تابع عضویتی بیان می‌شوند که این تابع عضویت درجه تعلق اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین $[۰, ۱]$ نشان می‌دهد؛ بنابراین اگر عضویت عنصری در مجموعه A در بازه‌ای از $[۰, ۱]$ قرار گیرد، به هر X از X عددی در بازه $[۰, ۱]$ نسبت داده می‌شود که تابع عضویت نامیده می‌شود. تابع عضویت به‌صورت $\mu_{A(x)}$ نشان داده می‌شود که درجه عضویت بین صفر و یک خواهد داشت. تابع عضویت برابر یک نشان‌دهنده عضویت کامل در مجموع و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم عضویت کامل عنصر در مجموع است.

به‌منظور پهنه‌بندی، ابتدا لازم است، تک‌تک لایه‌ها با توجه به هدف موردنظر بر اساس توابع عضویت، فازی‌سازی شوند. پارامترهای فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، بارش و دما، با توجه به ماهیت رستری آن‌ها با استفاده از توابع موجود در نسخه ۱۰.۶ نرم‌افزار جی‌آی‌اس و یا کد نویسی در تحلیلگر رستری^۱ فازی‌سازی گردیدند. تابع عضویت لایه‌های وکتور بر اساس نوع رابطه‌ای که هر پارامتر با پدیده کارست‌زایی دارد، تعیین گردیده است. لازم به ذکر است که تابع عضویت تعریف‌شده برای لایه‌های رستری، تابع خطی^۲ می‌باشد. در ادامه به معرفی تابع عضویت این لایه‌ها، پرداخته شد.

الف. ارتفاع: از آنجائی که با افزایش ارتفاع، شرایط مساعد جهت توسعه کارست به علت کاهش دما و افزایش بارش فراهم‌شده، فرایند کارست‌زایی فعال‌تر می‌باشد، میان پارامتر ارتفاع و توسعه کارست سطحی رابطه مستقیمی برقرار است. به همین دلیل نیز از یک رابطه خطی افزایشنده، جهت تعیین عضویت این لایه در توده موردبررسی، استفاده‌شده است (شکل ۳).

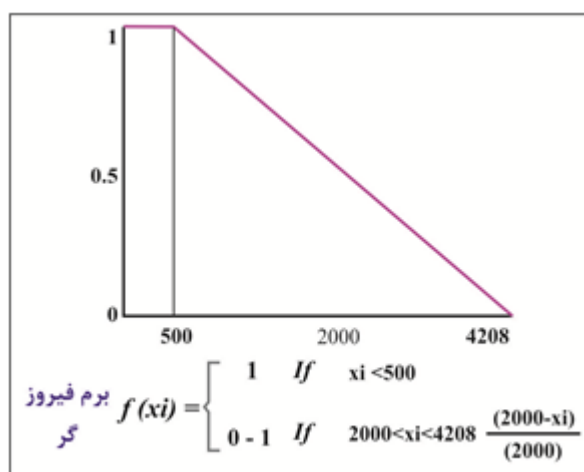
^۱ Raster Calculator

^۲ Linear



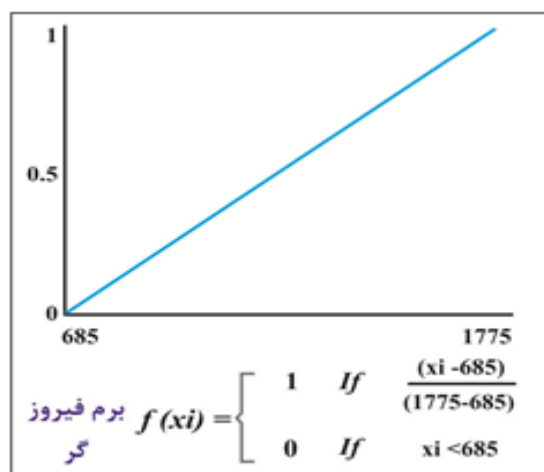
شکل ۳: تابع عضویت عامل ارتفاع

ب. فاصله از گسل: میان فاصله از گسل و توسعه کارست، رابطه معکوسی وجود دارد، زیرا در مناطق نزدیک گسل، به علت تکتونیزه بودن وجود درزه و شکاف، میزان نفوذپذیری سنگها بیشتر بوده در نتیجه عمل نفوذ آب و انحلال بیشتر می باشد. با افزایش فاصله از گسل، میزان درزه و شکافها کاهش یافته در نتیجه نفوذ کمتر شده و میزان کارست زائی کاهش می یابد، از این رو، از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه در توده مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۴).



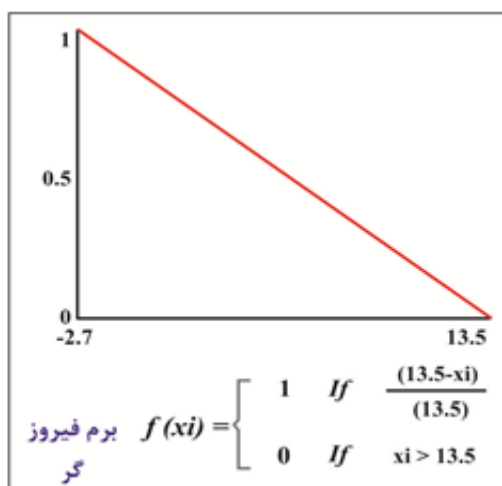
شکل ۴: تابع عضویت عامل گسل

ج. بارش: با افزایش بارش، شرایط توسعه کارست مساعد شده و در نهایت کارست زائی افزایش می یابد. در نتیجه، رابطه میان بارش و توسعه کارست، مستقیم بوده و از یک رابطه خطی افزایشی جهت تعیین عضویت این لایه استفاده شده است. شکل (۵) تابع عضویت پارامتر بارش را در توده گر و برم فیروز نشان داده و این پارامتر با استفاده از تابع خطی، فازی سازی شده است.



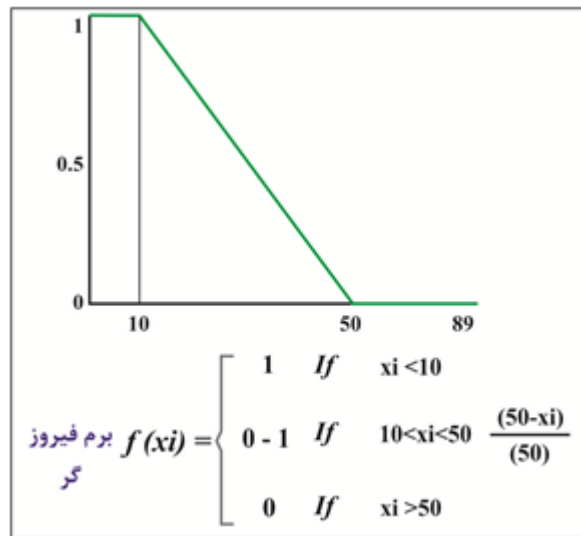
شکل ۵: تابع عضویت عامل بارش

د. دما: میان پارامتر دما و توسعه کارست، رابطه معکوسی برقرار است، زیرا با کاهش دما، قدرت انحلالی آب افزایش یافته در نتیجه شرایط توسعه کارست فراهم گردیده و میزان کارست‌زائی افزایش می‌یابد، از این رو از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه استفاده شده است (شکل ۶). این پارامتر نیز با استفاده از تابع خطی، فازی‌سازی شده است.



شکل ۶: تابع عضویت عامل دما

ر. شیب: رابطه میان شیب و توسعه کارست، معکوس می‌باشد. در شیب‌های کمتر از ۱۰ درجه، بیشترین میزان توسعه کارست را مشاهده می‌نماییم. با افزایش شیب، میزان کارست‌زائی و شرایط توسعه کارست کاهش می‌یابد. از شیب ۵۰ درجه به بالا، توسعه کارست به ندرت انجام می‌گیرد؛ بنابراین تابع عضویت شیب در کارست‌زائی از یک رابطه خطی کاهنده شکسته پیروی می‌کند (شکل ۷). این پارامتر به صورت فرمول نویسی در تحلیل گر رستر، فازی‌سازی شده است.



شکل ۷: تابع عضویت عامل شیب

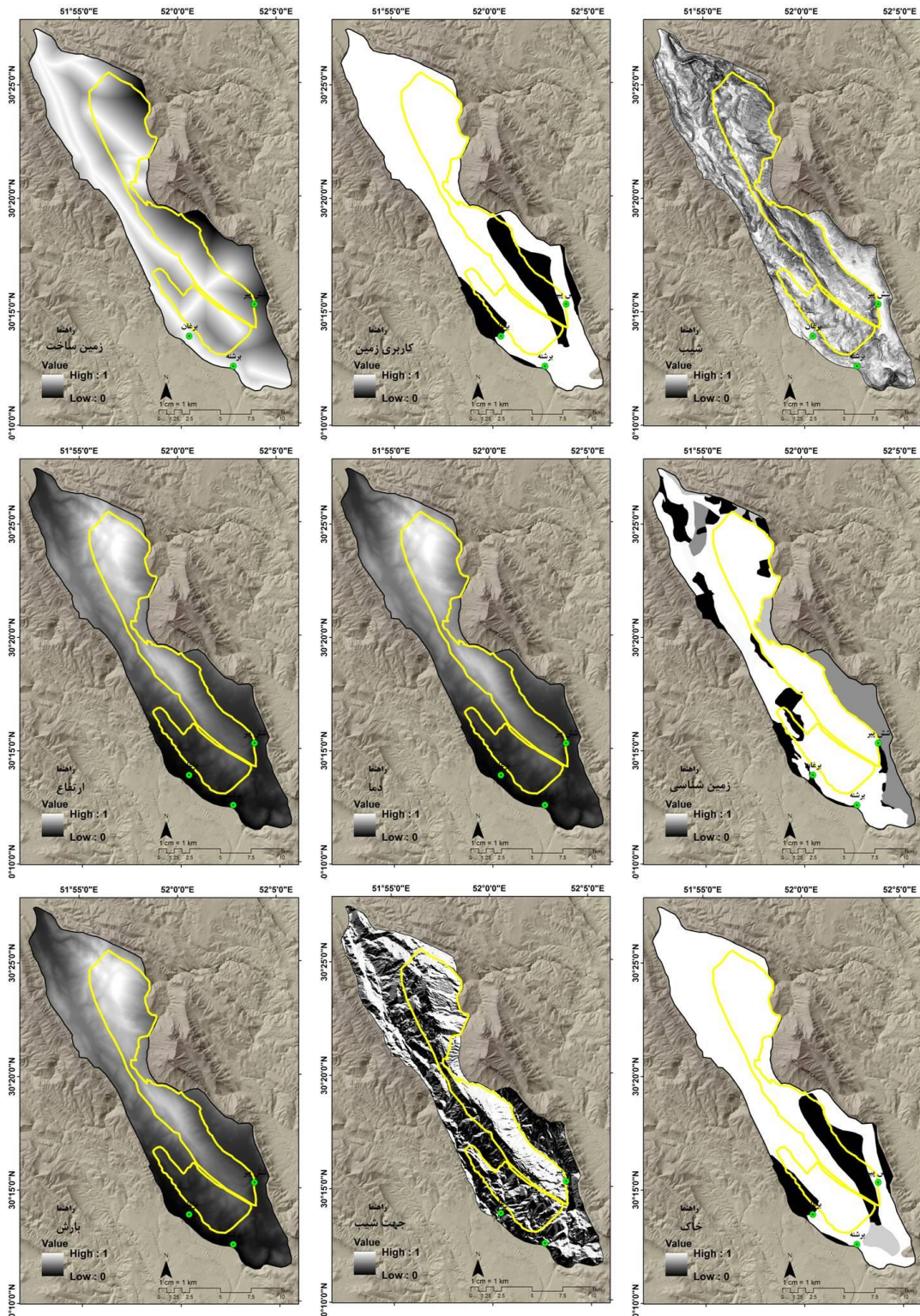
و. پارامترهای کیفی: لایه های لیتولوژی، کاربری اراضی، خاک و جهت شیب، جزء لایه های کیفی می باشند. به منظور فازی نمودن این لایه ها، با توجه به طبقه بندی هر یک از لایه ها و عملکردی که در توسعه کارست دارند، امتیازی بین ۰ تا ۲۵۵ به آن ها داده شده و سپس با استفاده از معادله ۳ مقادیر اختصاص داده شده، نرمال سازی فازی می شوند.

$$\left\{ \left(\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \right\} \quad (3) \text{ رابطه}$$

ی. تلفیق لایه ها و تعیین پهنه های کارست: از میان پنج عملگر فازی که در قسمت قبل به آن ها اشاره گردیده شد، عملگر گاما ۰/۸، به عنوان عنوان بهترین ضریب تلفیق روی هم گذاری شناخته و نقشه پهنه بندی توسعه و آسیب پذیری کارست توده مورد مطالعه تهیه گردید.

نقشه پهنه بندی آسیب پذیری کارست سطحی گر و برم فیروز (شکل ۹) با استفاده از روش شکستگی های طبیعی^۱ به چهار کلاس فاقد آسیب پذیری (۰-۰/۲)، آسیب پذیری کم (۰/۲-۰/۴)، آسیب پذیری متوسط (۰/۴-۰/۶) و آسیب پذیری زیاد (۰/۶-۰/۹۷۵) طبقه بندی شده است. بر این اساس، طبقه فاقد آسیب پذیری، منطبق بر مناطق دارای لغزش و سازند گورپی می باشد. این طبقه کمترین مساحت توده را به خود اختصاص داده است. طبقه با آسیب پذیری کم، بر حواشی تاقدیس گر و نهشته های کواترنری منطبق می باشد. طبقه با آسیب پذیری متوسط، در آهک سروک، گژدمی و گروه بنگستان منطبق می باشد و بخش هایی از آبخوان های برغان و ششپیر نیز در آن واقع شده است. مرتفع ترین قسمت های تاقدیس برم فیروز واقع در آهک سروک و بخش هایی از تاقدیس گر نیز با تراکم بالای درزه و شکاف و گسل ها، در طبقه کارست با توسعه و آسیب پذیری زیاد واقع شده است که ۴۰٪ از مساحت توده را به خود اختصاص داده است (جدول ۱).

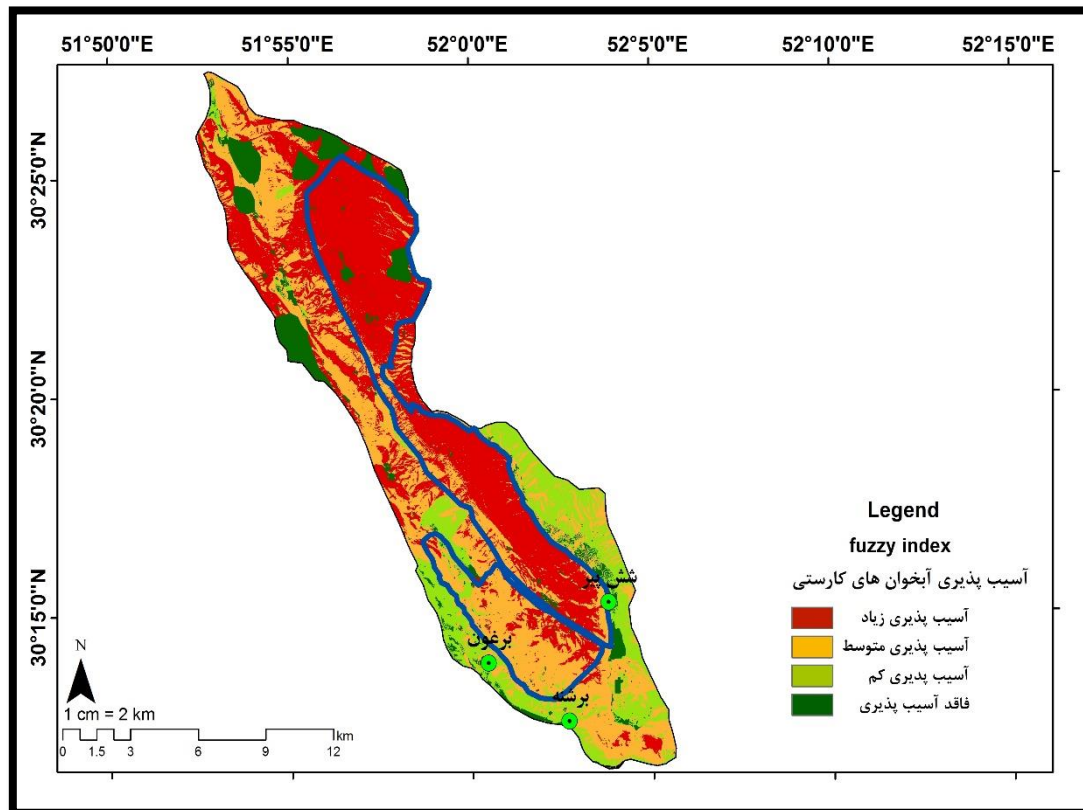
^۱ - Natural Breaks (Jenks)



شکل ۸: اجرای مدل منطق فازی به منظور بررسی آسیب‌پذیری کارست سطحی بر اساس ۹ پارامتر

جدول ۱: مساحت پهنه های آسیب پذیری کارستی مدل فازی در گر و برم فیروز

طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
فاقد آسیب پذیری	۱۷/۹	۸/۹
آسیب پذیری کم	۳۹/۷	۱۴/۸
آسیب پذیری متوسط	۷۲/۶	۳۶/۱
آسیب پذیری زیاد	۸۰/۶	۴۰/۱

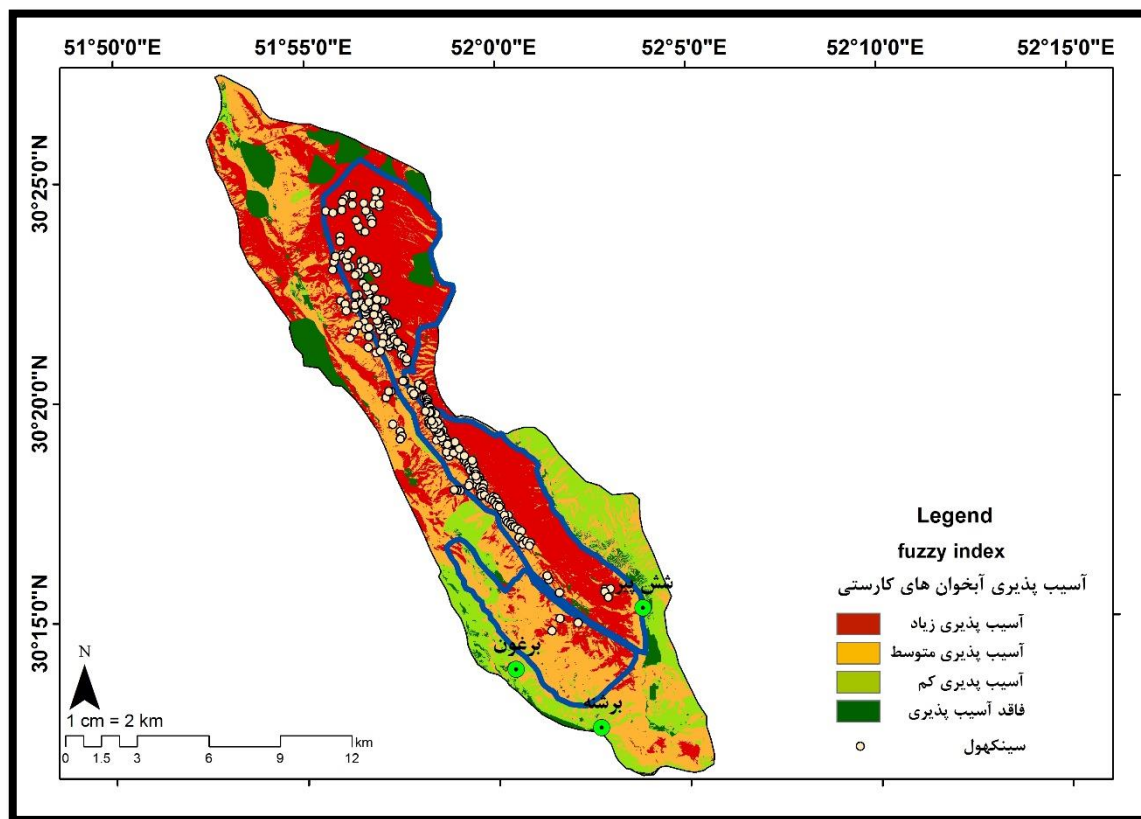


شکل ۹: نقشه پهنه بندی آسیب پذیری کارست سطحی مدل فازی گر و برم فیروز

همپوشانی لایه فروچاله های شناسایی شده در گر و برم فیروز با نقشه پهنه بندی نهایی (شکل ۱۰) نیز نشان می دهد که ۷۵٪ از فروچاله ها در طبقه کارست با آسیب پذیری زیاد و در حدود ۲۲٪ از آن ها در طبقه آسیب پذیری متوسط واقع شده اند. قرار گرفتن در حدود ۹۷٪ فروچاله ها در این دو طبقه، حاکی از کارایی مطلوب مدل فازی در پهنه بندی آسیب پذیری کارست سطحی در این توده می باشد (جدول ۲).

جدول ۲: تعداد و درصد فروچاله ها در طبقات توسعه و آسیب پذیری کارست مدل فازی گر و برم فیروز

طبقه	تعداد	درصد
فاقد آسیب پذیری	۸	۲/۸
آسیب پذیری کم	۰	۰
آسیب پذیری متوسط	۶۳	۲۱/۹
آسیب پذیری زیاد	۲۱۶	۷۵/۲



شکل ۱۰: نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی مدل فازی و فروچاله‌های استخراج‌شده در گر و برم فیروز

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی و تهیه نقشه آسیب‌پذیری سطحی کارست آبخوان کارستی ششپیر و برغان از مدل منطق فازی با عملگر گاما استفاده گردید. بدین منظور متغیرهای لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما، کاربری اراضی و خاک به‌عنوان پارامترهای مؤثر انتخاب گردیده و بر اساس توابع عضویت، فازی سازی شدند. میزان شاخص محاسبه‌شده بین ۰ تا ۰٫۹۷، محاسبه و آسیب‌پذیری کارست به چهار طبقه فاقد آسیب‌پذیری، آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی گردید. مناطق فاقد آسیب‌پذیری شامل بخش‌هایی از نهشته‌های کواترنری و لغزش‌ها که دارای بارش زیر ۱۰۰۰ میلی‌متر و ارتفاع بین ۲۰۳۸ تا ۲۷۰۰ متر می‌باشد. این محدوده بخش‌های بسیار کمی از آبخوان ششپیر را که محدوده‌های لغزشی می‌باشد را دربرمی‌گیرد. محدوده‌های با آسیب‌پذیری کم منطبق بر نهشته‌های کواترنری و سازند گورپی و کوهپایه‌های تاق‌دیس گر می‌باشد که حدود ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ را دربرمی‌گیرد. بیش از ۸۰ درصد آبخوان برغان در محدوده کارست با آسیب‌پذیری متوسط واقع شده است. همچنین بخش‌های محدودی از آبخوان ششپیر نیز در این محدوده واقع گردیده است. آسیب‌پذیری متوسط کارست در حدود ۲۲ درصد از مساحت تاق‌دیس گر و برم فیروز را به خود اختصاص داده است. این محدوده منطبق بر حد ارتفاعی ۲۵۰۰ تا ۳۰۰ متر می‌باشد و بارشی در حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر دریافت می‌دارد. بخش‌هایی در حدود ۲۰ درصد از آبخوان برغان و ۸۰ درصد از آبخوان ششپیر در احاطه مناطق با آسیب‌پذیری سطحی کارست زیاد می‌باشد که منطبق بر بیشترین حد ارتفاعی منطقه در حدود ۳۰۰۰ تا ۳۷۰۰ متر بوده و بارشی در حدود ۱۷۰۰ میلی‌متر دریافت می‌دارند. این منطقه منطبق بر بیشترین میزان شیب و جهات شیب شمالی و نزدیکی به درزه و شکاف‌ها و گسل‌های اصلی و معکوس می‌باشد. همچنین این منطقه منطبق بر سازند آهکی سروک و گروه بنگستان می‌باشد که باخامتی در حدود ۸۰۰ متر نقش مهمی در توسعه و آسیب‌پذیری کارست سطحی تاق‌دیس گر و برم فیروز بر عهده دارد. همان‌طور که

از نقشه شماره ۱۰ مشخص است بیش از ۸۰ درصد سینک هول ها در محدوده با خطر آسیب پذیری بالا قرار گرفته اند که این امر خود حاکی از دقت بالای مدل در ارزیابی آسیب پذیری لندفرم های کارستی می باشد. در نهایت می توان عنوان نمود که این مدل کارایی بسیار مطلوبی در ارزیابی و بررسی توسعه و آسیب پذیری کارست سطحی منطقه که خود زمینه مطالعات دیگر نظیر آسیب پذیری، حفاظت و مدیریت از آبخوان ها را به عهده دارد دارا می باشد.

منابع

- برزگر، رحیم؛ اصغری مقدم، اصغر؛ ندیری، عطاالله؛ فیجانی، الهام، ۱۳۹۴، استفاده از روش های مختلف فازی برای بهینه سازی مدل دراستیک در ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت تبریز، مجله علوم زمین، شماره ۹۵، سال بیست و چهارم، صص ۲۱۱-۲۲۲.
- خاشعی سیوکی، عباس؛ قهرمان، بیژن؛ کوچک زاده، مهدی، ۱۳۹۰، ارزیابی پتانسیل استحصال آب از آبخوان از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت نیشابور)، مجله پژوهش آب ایران، سال پنجم، شماره نهم، صص ۱۷۱-۱۸۰.
- صفاری، امیر؛ کیانی، طیبه؛ زنگنه تبار، ساسان، ۱۳۹۸، بررسی عوامل مؤثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست کوهستان خورین با استفاده از منطق فازی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۵۵، سال نوزدهم، صص ۲۳-۳۶.
- مرادی، صمد، ۱۳۹۵، مقایسه پتانسیل توسعه کارست و تعیین ارتباط هیدرولیکی بین آبخوان های کارستی ایلام، سروک و آسماری شمال شرق خوزستان. پایان نامه دکتری تخصصی (PHD) هیدروژئولوژی، استاد راهنما نصرالله کلانتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین.
- مهدوی، عاطفه؛ زارع ایبانه، حمید، ۱۳۹۵، تعیین پتانسیل آسیب پذیری آبخوان بر اساس مدل های فازی و دراستیک (مطالعه موردی دشت همدان - بهار)، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۱، صص ۱-۱۷.
- یمانی، مجتبی؛ شمسی پور، علی اکبر، جعفری اقدم، مریم؛ باقری سید شکر، سجاده، ۱۳۹۲، بررسی عوامل مؤثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، استان کرمانشاه، مجله علوم زمین، شماره ۸۸، سال بیست و دوم، صص ۵۷-۶۶.
- Afrasiabian, A., 2007. The importance of protection and management of Karst water as drinking water resources in Iran. *Environ Geol*, 52:673-677.
- Arezoomand Omidi Langrudi, M., Khashei Siuki, A., Javadi, S., Hashemi, R., 2016. Evaluation of vulnerability of aquifers by improved fuzzy drastic method: Case study: Aastane Kochesfahan plain in Iran. *Ain Shams Engineering Journal*, 7, 11-20.
- Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology journal*, 13(1), 148-160.
- Chak Ho, H., Mylroie M J., Infante, L., 2017, *Environmental Earth Sciences, Volume 71, Issue 3*, pp 1369-1377, Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on two-class fuzzy comprehensive evaluation method.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley Chichester, United Kingdom.
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tsihrintzis, V., Pisinaras, V., 2006. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques, *Environ Geol*, 49: 653-673.
- Iqbal, j., Pathak, G., Gorai, A., 2014. Development of hierarchical fuzzy model for groundwater vulnerability to pollution assessment, *Arabian Journal of Geosciences*.

- Mimi, Z., Assi, A., (2009), *Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study Ramallah*, *Journal of Hydrology*, Vol. 364, pp. 298–310.
- Pzeshkpoor, P., 1991. *Hydrogeological and hydrochemical evaluation of Kuhe Gar and Barm Firooz Springs*, *Unpublished Master of Science Thesis, Shirz University*: 282 pp.
- Raeisi, E., Karami, G., 1996. *The governing factors of the physicochemics of sheshpir karst spring, Iran*, *Journal Carbonat and Evaporites*. Vol, 11, no. 2, 1996, pp. 162-168.
- White, W. B., 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains* (Vol. 464). New York: Oxford university press.
- Zare, M., Raeisi, E., 1993. *Karst water tracing experiment with uranine in sepidan karst region*. *Iran International Symposium on Water Resources in karst with special emphasis on Arid and Semi Arid Zones, Shiraz, Iran, Oct 23-28*.