پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال هشتم، شماره ۴، بهار ۱۳۹۹
صص. ۶۲-۴۷

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 – دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲ تائید 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 فرو چاله‌ها 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 استفاده‌شده 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 فروچاله-ها 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.

* نویسنده مسئول: E-mail: m.entezari@geo.ui.ac.ir

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 درزمینهٔ 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؛ باکالوییش[۷]، ۱۹۹۵ و ۲۰۰۵؛ فورد ویلیامز[۸]، ۲۰۰۷؛ مادارا و آندرو[۹]، ۲۰۱۱).

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

گمیتزی[۱۰] و همکاران (۲۰۰۶) در مقاله ای 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 درنهایت 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] استفاده‌شده 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

---

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 مقاله ای 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 درنهایت پهنه‌بندی انجام‌شده است.
چاک هو[۱] و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله ای 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 ازاین‌روش با مقایسه نتایج واقعی کاملاً منطبق هستند.
خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله ای 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، هم افت سطح ایستابی و هم شوری 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 ای اچ پی[۲] در استان کرمانشاه پرداختند.
برزگر و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله ای 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 صحت سنجی مدل‌های تهیه‌شده با استفاده از داده‌های ژئومورفولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی به بررسی تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارستیفیکاسیون در آبخوان‌های کارستی با اسکلت آهکی سازند آسماری و ایلام و سروک و مقایسه کارست شدگی در این آبخوان‌ها با استفاده از این مدل‌ها پرداخته‌شده 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) برسی 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 هرکدام، فازی سازی شده و با استفاده از عملگر گامای ۰/۹ تلفیق‌شده است و در

[۱] Chak Ho

[۲] AHP

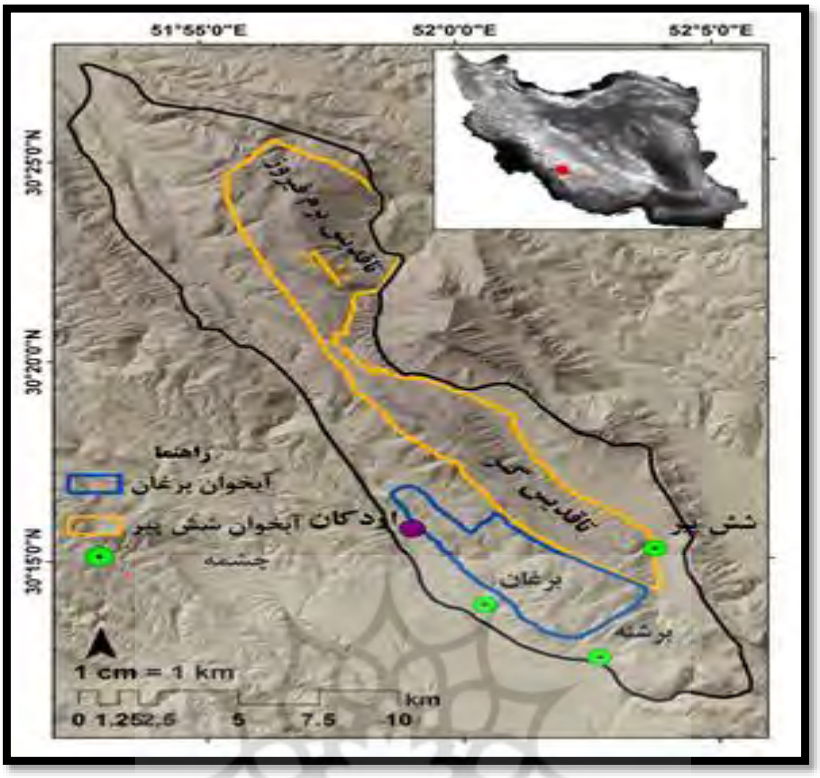
[۳] Fuzzy logic

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 تهیه‌شده است.

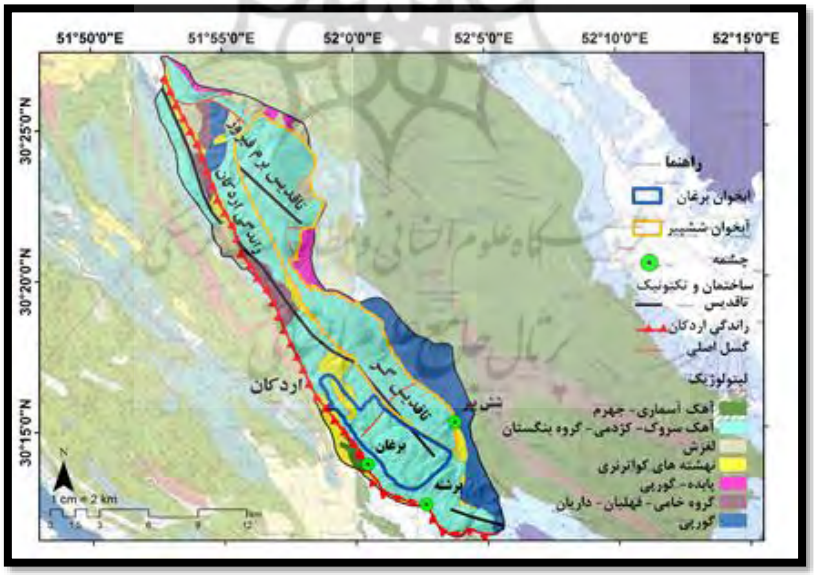
دو آبخوان مهم ششپیر و برغان در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شیراز به دلیل دارا بودن منابع غنی و باکیفیت آب به‌عنوان منابعی ارزشمند جهت تأمین آب آشامیدن منطقه و کلان‌شهر شیراز اهمیت بسیار بالایی دارند. آبدهی آبخوان ششپیر در سال‌های پرآبی بیش از ۳۲۰۰ لیتر در ثانیه است که از یال شمالی کوه گر خارج می‌شود (رئیسی 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، تکتونیزه بودن منطقه و زمستانه بودن بارش در آبخوان‌های موردبررسی، میزان نفوذ آب در این آبخوان بالا بوده و دارای منابع باارزش آب زیرزمینی می‌باشد.

موقعیت آبخوان‌های موردمطالعه

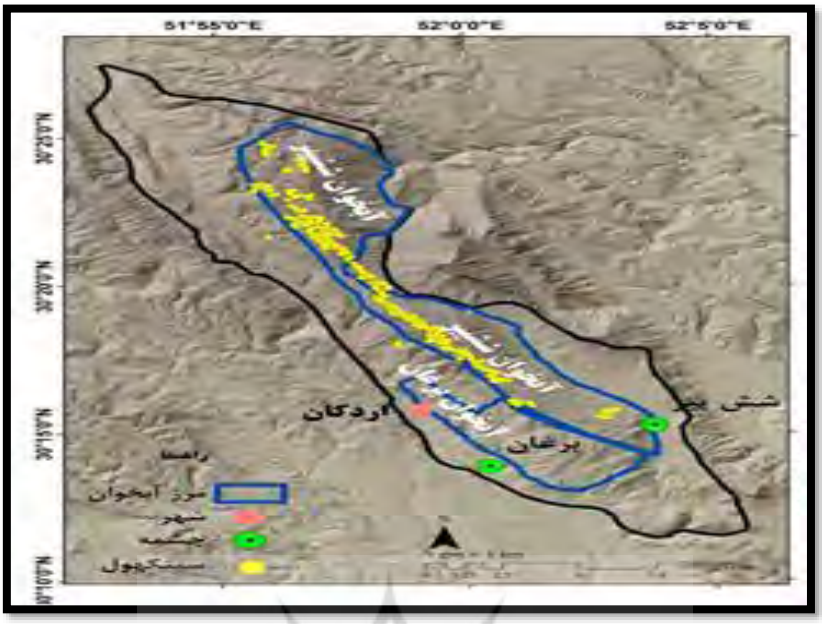
آبخوان‌های ششپیر و برغان (شکل۱) در نزدیکی شهر اردکان شهرستان سپیدان و در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شیراز و در تقسیم‌بندی‌های ساختمانی- رسوبی کشورمان به عقیده نبوی (۱۳۵۵) جزو ناحیه زاگرس مرتفع می‌باشد. این دو آبخوان شامل کوه‌های گر و برم-فیروز می‌باشد که به شکل یک طاقدیس پلانژ دار است (تصویر ۱). محور چین‌خوردگی 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 ازجمله 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 قطع‌شده است و باعث ایجاد آبخوان برغان در یال جنوبی این کوه شده است. (زارع و رئیسی، ۱۹۹۳،۱۲). مساحت حوضه آبریز آبخوان برغان حدود ۱۹ کیلومترمربع است (پزشک‌پور، ۱۹۹۱،۸). در حوضه آبخوان برغان سینکهول های محدود و کوچکی وجود دارد و به علت وجود تراست زاگرس و عمل چند گسل نرمال آبخوان به‌شدت خردشده و عمل کارستی شدن بیشتر در زیرزمین و در محل درزه‌ها و شکستگی‌ها ایجادشده است. عمل تخلیه آبخوان برغان از طریق ۱۱ چشمه انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها چشمه‌های ششپیر و برغان است (شکل۲).



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه موردمطالعه



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی گر و برم فیروز



شکل ۳: نقشه پراکندگی سینکهول‌ها و چشمه‌های منطقه

تصویر ۱: صفحه گسلی ایجادکننده چشمه ششپیر

تصویر۲: نمونه‌ای از سینکهول های منطقه

مواد و روش‌ها

این پژوهش یک تحقیق کاربردی- توسعه‌ای مبتنی بر روش‌های میدانی، کتابخانه‌ای و مدل آسیب‌پذیری کارست سطحی می‌باشد.

قبل از آنکه به بررسی آسیب‌پذیری کارست سطحی در توده گر و برم فیروز بپردازیم، لازم است به نقش عواملی که به نحوی در این آسیب‌پذیری نقش دارند، اشاره نمود. درمجموع نه عامل، در فرایند کارست زایی، توسعه و آسیب‌پذیری آن در مناطق موردبررسی دخیل می‌باشند که از میان آن‌ها عوامل لیتولوژی و بارش، اصلی‌ترین عامل‌ها در شکل‌گیری و توسعه کارست بوده و عدم وجود هر یک از این دو عامل، باعث عدم شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست یا شکل‌گیری بسیار محدود می‌گردد. ازآنجایی‌که ژئومورفولوژی کارست بر ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی و بررسی میزان آسیب‌پذیری آن‌ها، تأثیر بسزایی دارد، تهیه نقشه توسعه‌یافتگی و آسیب‌پذیری سطحی کارست، لازم و ضروری می‌باشد. به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سطحی کارست، از مدل منطق فازی و عملگر گاما استفاده می‌نماییم.

مدل منطق فازی: منطق فازی، شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل‌سازی 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 ساده‌سازی و کارآمد شدن طراحی سیستم، جایگزین و یا تا حد زیادی تکمیل می‌نماید (سلامی،۲۰،۱۳۸۹). تأثیر عوامل مؤثر در توسعه کارست، قطعی و صددرصدی 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 (مؤمنی، ۱۳۸۹،۱۸۷).

در مدل فازی، هر فرد هم‌زمان در مجموعه‌های مختلف اما به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و یا خود این دو حد را می‌پذیرد (ون آلفن و همکار، ۲۰۰۰، ۱۷۱۰). در تئوری مجموعه‌های دقیق، اگر یک مجموعه را در نظر بگیریم، هر عضو مجموعه مرجع یا درمجموع هست و یا نیست و می‌توان برای هر مجموعه A تابع زیر را تعریف کرد (معادله۱) (مؤمنی، ۱۳۸۹: ۱۹۷).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, If\ x \in A \\ 0, If\ x \notin A \end{cases} \qquad (1)$$

رابطه

این تابع به هر عضو مجموعه A عدد یک و به هر عضو خارج از مجموعه A عدد صفر نسبت می‌دهد.

روش فازی با پنج عملگر که هر یک دارای نحوه عمل خاصی هستند، در محیط نرم‌افزار جی‌آی‌اس قابل‌اجرا می‌باشد (کارتر[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 می‌شود.

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 نزدیک‌تر می‌کند. مقدار گاما از طریق قضاوت کارشناسی مبتنی بر نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌های مشاهده‌شده یا تجربیات موجود درباره موضوع موردبررسی تعیین یا از طریق آزمون سعی و خطا، در تطبیق با شواهد، واقعی می‌گردد. ازاین‌رو، عملگر گاما موجب دستیابی به خروجی‌هایی می‌شود

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 حاصل‌ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی بر اساس معادله (۲) تعریف می‌شود.

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

در این رابطه $\mu_{combination}$لایه حاصل از گامای فازی و γ پارامتر تعیین‌شده در محدوده صفر و یک است. زمانی که γرا 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 (کارتر، ۱۹۹۶،۲۸۰).

بحث و یافته‌ها

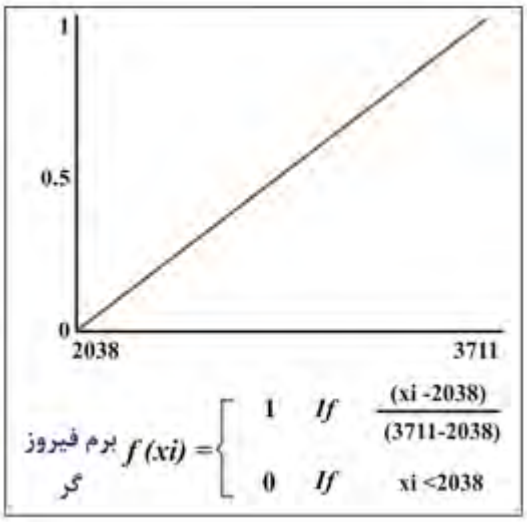
به‌منظور پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی، متغیرهای لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، دما، کاربری اراضی و خاک به‌عنوان پارامترهای مؤثر انتخاب گردیدند. هر یک از پارامترهای مؤثر انتخابی، به‌عنوان یک مجموعه فازی توسط تابع عضویتی بیان می‌شوند که این تابع عضویت درجه تعلق اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین [۰،۱] نشان می‌دهد؛ بنابراین اگر عضویت عنصری درمجموع 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 درمجموع و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم عضویت کامل عنصر درمجموع است.

به‌منظور پهنه‌بندی، ابتدا لازم است، تک‌تک لایه‌ها با توجه به هدف موردنظر بر اساس توابع عضویت، فازی سازی 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 رستر[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 کارست‌زائی فعال‌تر می‌باشد، میان پارامتر ارتفاع و توسعه کارست سطحی رابطه مستقیمی برقرار است. به همین دلیل نیز از یک رابطه خطی افزاینده، جهت تعیین عضویت این لایه در توده موردبررسی، استفاده‌شده است (شکل ۳).

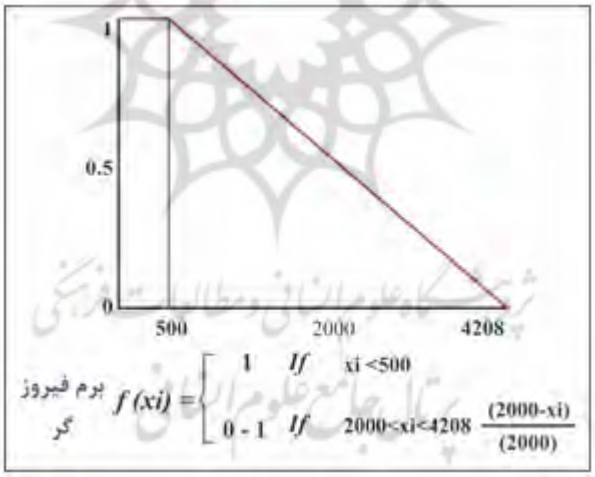
[۱] Raster Calculator

[۲] Linear



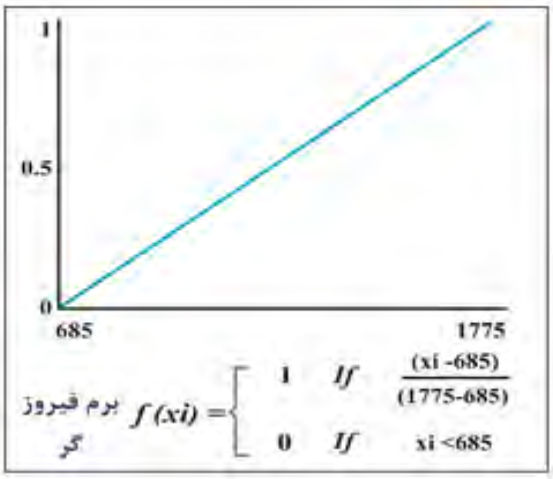
شکل ۳: تابع عضویت عامل ارتفاع

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 درنتیجه عمل نفوذ آب و انحلال بیشتر می‌باشد. با افزایش فاصله از گسل، میزان درزه و شکاف‌ها کاهش‌یافته درنتیجه نفوذ کمتر شده و میزان کارست‌زائی کاهش می‌یابد، ازاین‌رو، از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه در توده موردمطالعه استفاده‌شده است (شکل۴).



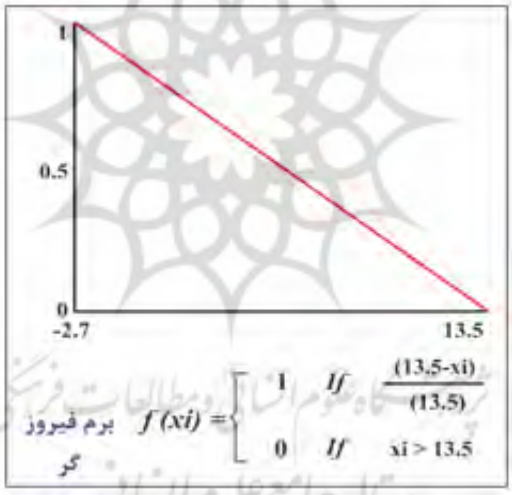
شکل ۴: تابع عضویت عامل گسل

ج. بارش: با افزایش بارش، شرایط توسعه‌کارست مساعد شده و درنهایت کارست‌زائی افزایش می‌یابد. درنتیجه، رابطه میان بارش و توسعه کارست، مستقیم بوده و از یک رابطه خطی افزاینده جهت تعیین عضویت این لایه استفاده‌شده است. شکل (۵) تابع عضویت پارامتر بارش را در توده گر و برم فیروز نشان داده و این پارامتر با استفاده از تابع خطی، فازی‌سازی شده است.



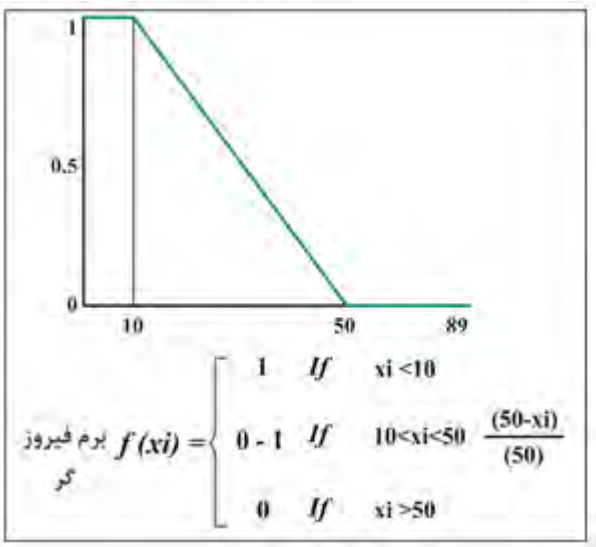
شکل ۵: تابع عضویت عامل بارش

د. دما: میان پارامتر دما و توسعه کارست، رابطه معکوسی برقرار است، زیرا با کاهش دما، قدرت انحلالی آب افزایش‌یافته درنتیجه شرایط توسعه کارست فراهم گردیده و میزان کارست‌زائی افزایش می‌یابد، ازاین‌رو از یک رابطه خطی کاهنده جهت تعیین عضویت این لایه استفاده‌شده است (شکل۶). 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. درشیب‌های 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 به‌ندرت انجام می‌گیرد؛ بنابراین تابع عضویت شیب در کارست‌زایی از یک رابطه خطی کاهنده شکسته پیروی می‌کند (شکل ۷). این پارامتر به‌صورت فرمول نویسی در تحلیل‌گر رستر، فازی‌سازی شده است.



شکل ۷: تابع عضویت عامل شیب

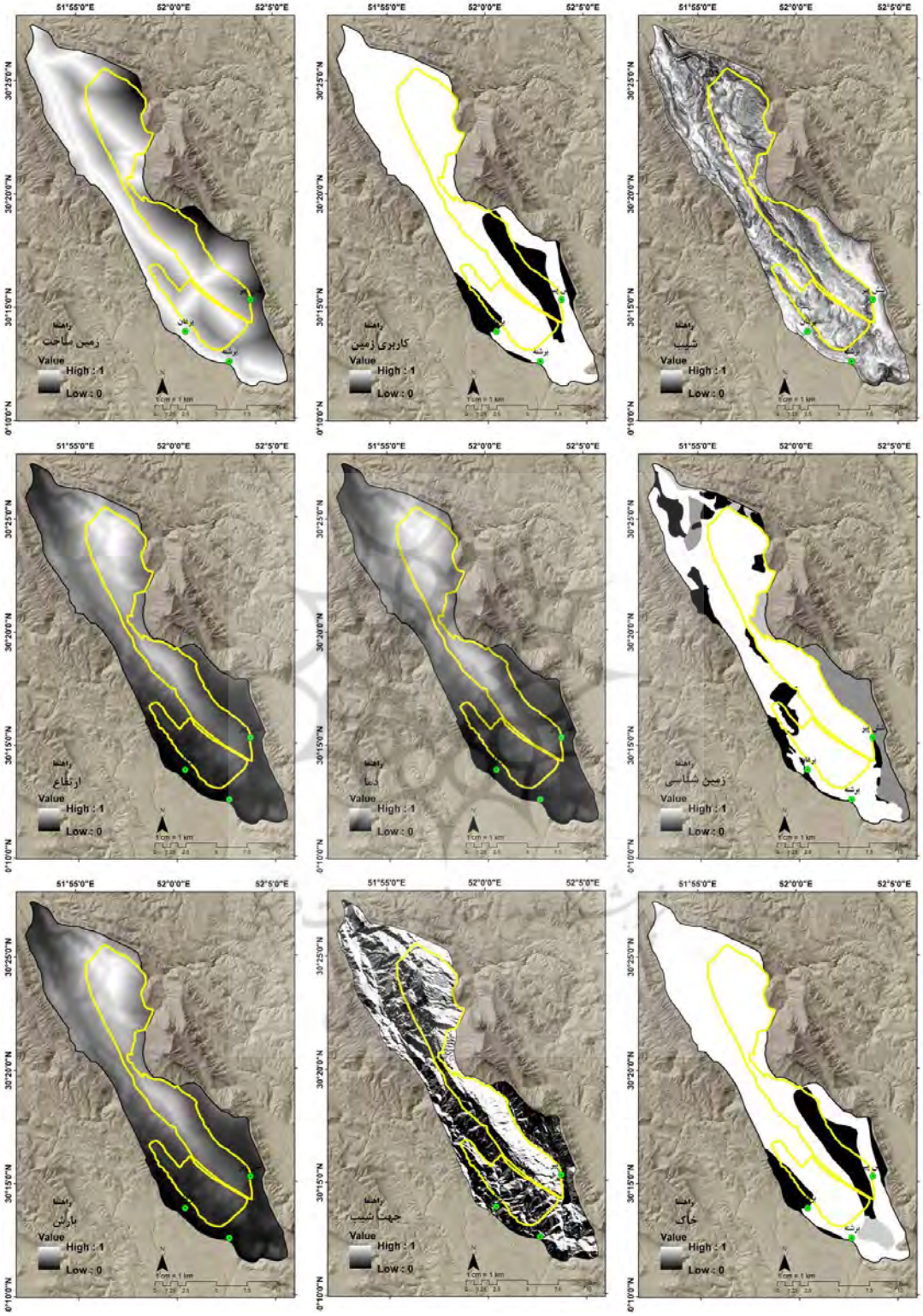
و. پارامترهای کیفی: لایه‌های لیتولوژی، کاربری اراضی، خاک و جهت شیب، جزء لایه‌های کیفی می‌باشند. به‌منظور فازی نمودن این لایه‌ها، با توجه به طبقه‌بندی هر یک از لایه‌ها و عملکردی که در توسعه کارست دارند، امتیازی بین ۰ تا ۲۵۵ به آن‌ها داده‌شده و سپس با استفاده از معادله ۳ مقادیر اختصاص داده‌شده، نرمال‌سازی فازی می‌شوند.

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

ی. تلفیق لایه‌ها و تعیین پهنه‌های کارست: از میان پنج عملگر فازی که در قسمت قبل به آن‌ها اشاره گردیده شد، عملگر گاما ۰/۸، به‌عنوان عنوان بهترین ضریب تلفیق روی‌هم گذاری شناخته و نقشه پهنه‌بندی توسعه و آسیب‌پذیری کارست توده موردمطالعه تهیه گردید.

نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی گر و برم فیروز (شکل۹) با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی[۱] به چهار کلاس فاقد آسیب‌پذیری (۰/۲–۰)، آسیب‌پذیری کم (۰/۴–۰/۲)، آسیب‌پذیری متوسط (۰/۶–۰/۴) و آسیب‌پذیری زیاد (۶/۹۷۵–۰/۰) طبقه‌بندی‌شده است. بر این اساس، طبقه فاقد آسیب‌پذیری، منطبق بر مناطق دارای لغزش و سازند گورپی می‌باشد. این طبقه کمترین مساحت توده را به خود اختصاص داده است. طبقه با آسیب‌پذیری کم، بر حواشی تاقدیس گر و نهشته‌های کواترنری منطبق می‌باشد. طبقه با آسیب‌پذیری متوسط، در آهک سروک، گژدمی و گروه بنگستان منطبق می‌باشد و بخش‌هایی از آبخوان‌های برغان و ششپیر نیز در آن واقع‌شده است. مرتفع‌ترین قسمت‌های تاقدیس برم فیروز واقع در آهک سروک و بخش‌هایی از تاقدیس گر نیز با تراکم بالای درزه و شکاف و گسل‌ها، در طبقه کارست با توسعه و آسیب‌پذیری زیاد واقع‌شده است که ۴۰٪ از مساحت توده را به خود اختصاص داده است (جدول ۱).

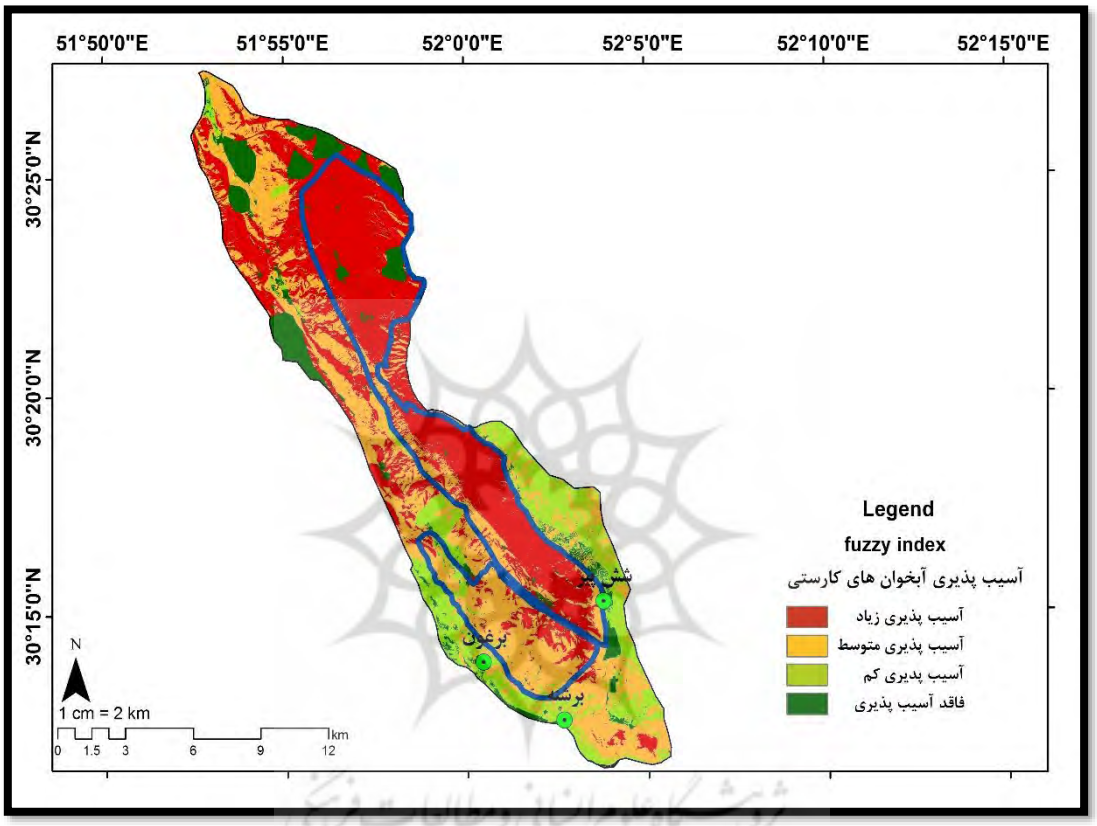
[۱]- Natural Breaks (Jenks)



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

جدول ۱: مساحت پهنه‌های آسیب‌پذیری کارستی مدل فازی در گر و برم فیروز

طبقه	مساحت (کیلومترمربع)	درصد
فاقد آسیب‌پذیری	۱۷/۹	۸/۹
آسیب‌پذیری کم	۲۹/۷	۱۴/۸
آسیب‌پذیری متوسط	۷۲/۶	۳۶/۱
آسیب‌پذیری زیاد	۸۰/۶	۴۰/۱

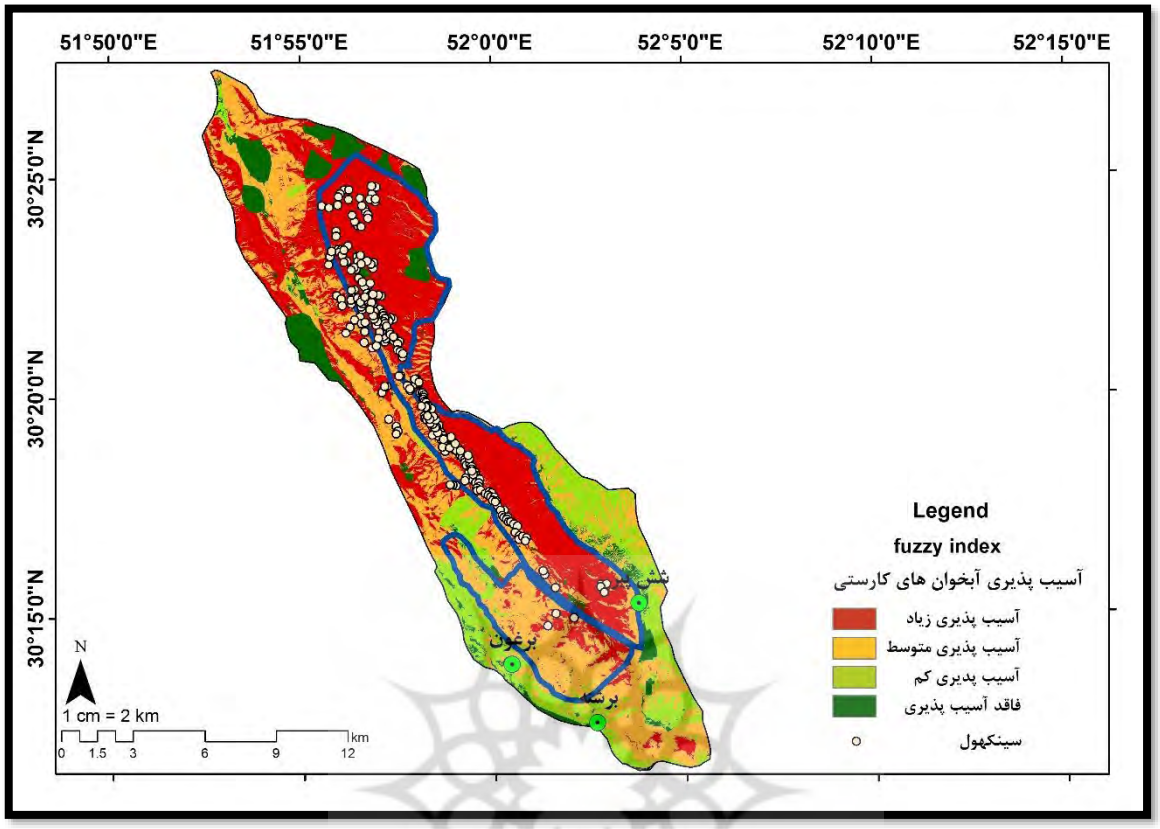


شکل ۹: نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی مدل فازی گر و برم فیروز

همپوشانی لایه فروچاله‌های شناسایی‌شده در گر و برم فیروز با نقشه پهنه‌بندی نهایی (شکل۱۰) نیز نشان می‌دهد که ۷۵٪ از فروچاله ها در طبقه کارست با آسیب‌پذیری زیاد و در حدود ۲۲٪ از آن‌ها در طبقه آسیب‌پذیری متوسط واقع‌شده‌اند. قرار گرفتن در حدود ۹۷٪ فروچاله ها در این دو طبقه، حاکی از کارایی مطلوب مدل فازی در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی در این توده می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲: تعداد و درصد فروچاله‌ها در طبقات توسعه و آسیب‌پذیری کارست مدل فازی گر و برم فیروز

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



شکل ۱۰: نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری کارست سطحی مدل فازی و فروچاله های 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 دربرمی گیرد. محدوده‌های با آسیب‌پذیری کم منطبق بر نهشته‌های کواترنری و سازند گورپی و کوهپایه‌های تاقدیس گر می‌باشد که حدود ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ را دربرمی گیرد. بیش از ۸۰ درصد آبخوان برغان در محدوده کارست با آسیب‌پذیری متوسط واقع‌شده 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 باضخامتی 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 سینکهول ها در محدوده با خطر آسیب‌پذیری بالا قرارگرفته‌اند که این امر خود حاکی از دقت بالای مدل در ارزیابی آسیب‌پذیری لندفرم های کارستی می‌باشد. درنهایت می‌توان عنوان نمود که این مدل کارایی بسیار مطلوبی در ارزیابی و بررسی توسعه و آسیب‌پذیری کارست سطحی منطقه که خود زمینه مطالعات دیگر نظیر آسیب‌پذیری، حفاظت و مدیریت از آبخوان‌ها را به عهده دارد دارا می‌باشد.

منابع

- برزگر، رحیم؛ اصغری مقدم، اصغر؛ ندیری، عطاالله؛ فیجانی، الهام، ۱۳۹۴، استفاده از روش‌های مختلف فازی برای بهینه‌سازی مدل دراستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری 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 توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی 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 آبخوان‌های کارستی ایلام، سروک و آسماری شمال شرق خوزستان. پایان‌نامه دکتری تخصصی (*PHD*)هیدروژئولوژی، استاد راهنما نصرالله کلانتری ،دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین.
- مهدوی، عاطفه؛ زارع ابیانه، حمید، ۱۳۹۵، تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان بر اساس مدل‌های فازی و دراستیک (مطالعه موردی دشت همدان- بهار)، نشریه دانش آب‌وخاک، جلد ۲۶، شماره ۱، صص ۱-۱۷.
- یمانی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر، جعفری اقدم، مریم؛ باقری سید شکری، سجاد، ۱۳۹۲، بررسی عومل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی 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), 148-160a*
- *ChakeHo,Ha,MylroieM Jd,dInfante,Le, 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. Assessmentnof:groundwater vulnerabilityto pollution: a combination of GIS,r fuzzy logicand decision, making techniques,dEnviron Geol, 49:r653–673u*
- *Iqbal, j , Pathak, Ge, Gorai,sAd,d2014dlDevelopmentaofl hierarchicalcfuzzy model foru groundwater vulnerability1to1pollution assessment, Arabian Journal of Geosciences.*

- *Mimi, Zl, 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 govering 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.IranIInternational Symposium on Water Resources in karst with special emphasis on Arid and Semi Arid Zones, Shiraz, Iran, Oct 23-28.*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی