



## Comparison of Fuzzy Inference Systems and Fuzzy Hierarchical Analysis Methods for Study of Karst Development (Case Study: Khuzestan Province, Shirin-Bahar)

Nasroallah Kalantari<sup>1\*</sup>, Ayoob Taghizadeh<sup>2</sup>,  
Fateme Jafari<sup>3</sup>, Hadis Zarei<sup>4</sup>

### Abstract

*Digging and excessive exploitation of alluvial water sources, create bad condition for many alluvial aquifers in the plains of the country. Given these circumstances, the desire to use the karst sources for which less attention has been paid is increasing. In this study, by considering some karst development criteria such as lithology, altitude, slope, rainfall, temperature, vegetation index, drainage density, lineament density, lineament intersection density, distance from lineament and distance from the intersection of lineaments and applying fuzzy inference system and fuzzy hierarchical analysis, modeling of karst development has been done. The results showed that by the method of fuzzy inference system the development zones with high and very high degrees covered 79.1 percent of the total area, while for the fuzzy hierarchical analysis method it was 26 percent. For weights validation used in the fuzzy hierarchical analysis,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$  sensitivity analyses were done.*

**Keywords:** Fuzzy Hierarchical Analysis Method, Fuzzy Inference System, Shirin-Bahar Karst.

Received: 2016/09/25  
Accepted: 2017/02/25

## مقایسه روش‌های سیستم استنتاج فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی برای مطالعه توسعه کارست (مطالعه موردی: استان خوزستان، شیرین بهار)

نصراالله کلانتری<sup>۱\*</sup>، ایوب تقی‌زاده<sup>۲</sup>، فاطمه جعفری<sup>۳</sup>، حدیث زارعی<sup>۴</sup>

### چکیده

حفر چاه و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب آبرفتی، وضعیت بدی برای بسیاری از آبخوان‌های آبرفتی در دشت‌های کشور ایجاد کرده است با توجه به این شرایط، تمایل برای استفاده از منابع آب کارستی که کمتر به آن توجه شده بود، رو به افزایش است. در این پژوهش با در نظر گرفتن برخی معیارهای توسعه کارست مانند لیتولوژی، ارتفاع، شیب، بارش، دما، شاخص پوشش گیاهی، تراکم آبراهه، تراکم خطواره، تراکم تقاطع خطواره، فاصله از خطواره، فاصله از تقاطع خطواره و به‌کارگیری روش‌های سیستم استنتاج فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی، مدل‌سازی توسعه کارست انجام شده است. نتایج نشان داد که در روش سیستم استنتاج فازی پهنه‌های با توسعه زیاد و خیلی زیاد ۷۹/۱ درصد از مساحت منطقه را پوشش می‌دهد در حالی که این عدد در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ۲۶ درصد می‌باشد. برای صحت‌سنجی وزن‌های بکار گرفته شده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، آنالیز حساسیت  $\pm 5\%$  و  $\pm 10\%$  درصد انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل سلسله مراتبی فازی، سیستم استنتاج فازی، کارست شیرین بهار.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴  
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۴

1, 2 - Faculty Member, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran.  
3 - M.Sc. student, hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran.  
4 - Ph.D student, hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahwaz, Ahwaz, Iran  
\* - Corresponding Author: nkalantari@hotmail.com

۱- عضو هیئت علمی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز  
۳- دانشجوی دکتری آب‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز  
۴- نویسنده مسئول

## مقدمه

متغیر سازند کربناته و فاصله از گسل، تحول کارست در منطقه زاگرس را بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیق این دو حاکی از آن است زاگرس دارای مناطقی با طیفی از میزان توسعه کارست، از کارست کامل با بیشترین مساحت و کارست بینابینی و نارس می‌باشد. قبادی و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه خود بر اساس بازدیدهای صحرایی، دریافتند واحدهای کربناته در منطقه مورد مطالعه، گسترش زیادی دارند. نتایج این تحقیق نشان داد، ترکیب مناسب سنگ‌شناسی، ناپیوستگی‌های متعدد، تخلخل ثانویه و فراوانی پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست در واحدهای کربناته، نشان دهنده توسعه کارست می‌باشند. عباسی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهش خود به بررسی و پهنه‌بندی تحول کارست و شناخت میزان تأثیر عوامل مختلف در توسعه کارست پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که منطقه دارای چهار طبقه کارست با تحول بسیار زیاد، زیاد، متوسط و فاقد کارست می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر تعیین میزان توسعه کارست منطقه مورد مطالعه به لحاظ مکانی است.

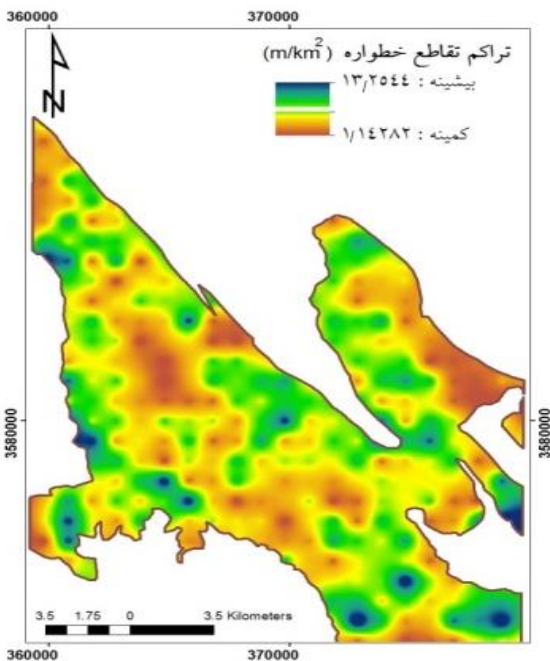
### موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه شیرین‌بهار در بخش شمال‌شرقی استان خوزستان، در فاصله ۶۵ کیلومتری شهر مسجد سلیمان و در محدوده عرض جغرافیایی  $32^{\circ}15'$  تا  $32^{\circ}25'$  شمالی و طول جغرافیایی  $49^{\circ}30'$  تا  $49^{\circ}45'$  شرقی انجام شده است. حداکثر ارتفاع منطقه ۲۱۷۴ متر و مساحت آن نیز ۲۷۰/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. دسترسی به منطقه مورد مطالعه از طریق راه ارتباطی اهواز- مسجد سلیمان و جاده خوزستان به‌طرف شهرکرد امکان‌پذیر می‌باشد. اقلیم محدوده مورد مطالعه با توجه به متوسط درجه حرارت و متوسط بارندگی ۳۰ ساله ایستگاه سد شهید عباس‌پور که به ترتیب،  $23/54$  درجه سلسیوس و  $480/67$  میلی‌متر می‌باشد و بر اساس ضریب خشکی دمارتن، نیمه‌خشک می‌باشد. منطقه مورد مطالعه در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. سازند ایلام سروک (کرتاس بالایی) قدیمی‌ترین سازندی است که در این منطقه رخنمون دارد و بر روی آن به ترتیب سازند سازندهای پابده، تله‌زنگ، کشکان، آسماری، آغاچاری و نهشته‌های کواترنری آهکی قرار می‌گیرند. ولی در محدوده مورد مطالعه، سازند آسماری با پوشش ۸۲ درصدی، بیشترین رخنمون را دارد و سایر سازندها مانند پابده و کشکان و تله‌زنگ، رخنمون به نسبت کمتری دارند.

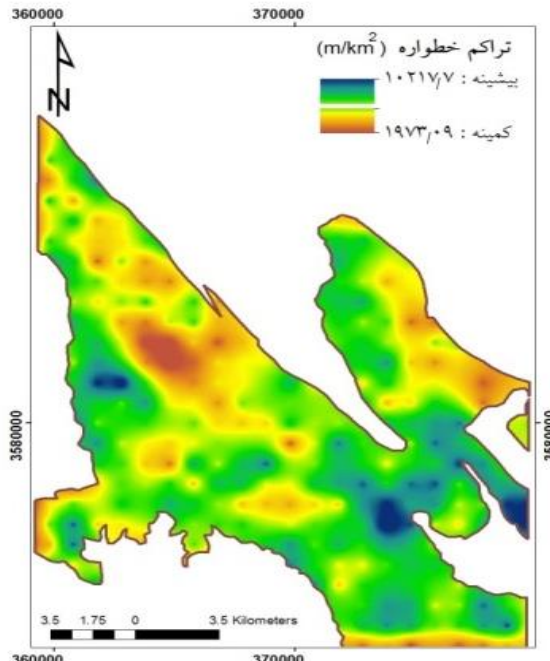
ایران سرزمینی خشک با میانگین بارش کمتر از یک‌سوم متوسط دنیا می‌باشد و به لحاظ اقلیمی در منطقه خشک دنیا قرار دارد (علیزاده، ۱۳۹۱). لذا با توجه به کمبود آب سطحی، مردم این سرزمین از دیرباز منابع آب زیرزمینی را مورد توجه قرار داده‌اند و از سفره‌های آب‌دار آبرفتی بهره‌برداری می‌کرده‌اند. اما یکی دیگر از منابع آب زیرزمینی، منابع آب کارستی می‌باشد که در سال‌های اخیر به دلیل کاهش حجم ذخیره آب در آبخوان‌های آبرفتی، بیشتر از قبل مورد توجه قرار گرفته‌اند. حدود ۱۱ درصد سطح قاره‌ها و بیش از یک‌چهارم جمعیت جهان در نزدیکی یا بر روی مناطق کارستی، زندگی می‌کنند (فور و ویلیام، ۲۰۰۷). وجود سازندهای آهکی وسیع در قسمت‌های زیادی از ایران و استحصال آب شرب و کشاورزی از این منابع، چه به‌صورت چشمه و یا چاه، مؤید اهمیت فوق‌العاده این منابع است (کریمی وردجانی، ۱۳۸۹) و لزوم مطالعه بر آن‌ها را آشکار می‌کند. چشم‌اندازهای سطحی کارست، غالباً به‌صورت زمین‌ریخت‌های انحلالی و در نتیجه تأثیر آب سطحی بر سنگ‌های انحلال‌پذیر، می‌باشد (دوائل و همکاران، ۲۰۰۹) و توسعه کارست را به دنبال دارد. لذا در این پژوهش، هدف بررسی میزان توسعه کارست به کمک برخی از معیارهای سطحی مؤثر بر آن به کمک روش‌های دورسنجی می‌باشد. در جهان و ایران مطالعاتی با روش‌های مختلف برای بررسی توسعه کارست صورت گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

با افزایش مطالعات بر روی نرخ انحلال سنگ آهک در شرایط مختلف زمین‌شناسی و بر اساس تحقیقات پالمر (۱۹۷۸)، و استفاده از این داده‌های موجود، چندین مدل عددی فیزیکی-شیمیایی توسعه کارست مانند تحقیقات وایت (۱۹۷۷) و دریبروت (۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۶) انجام شده است. ایکونومیدس و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از روش‌های سنجش از دور و GIS و تهیه لایه‌های موضوعی و وزن‌دهی به لایه‌ها بر اساس میزان اهمیت هر کدام در پتانسیل آب زیرزمینی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که مناطق آهکی و آبرفتی، بیشترین پتانسیل را به خود اختصاص می‌دهند. صحت نتایج با داده‌های حفاری، سنجیده و تأیید شده است. علایی طالقانی و رحیم زاده، (۱۳۸۹) با در نظر گرفتن دو





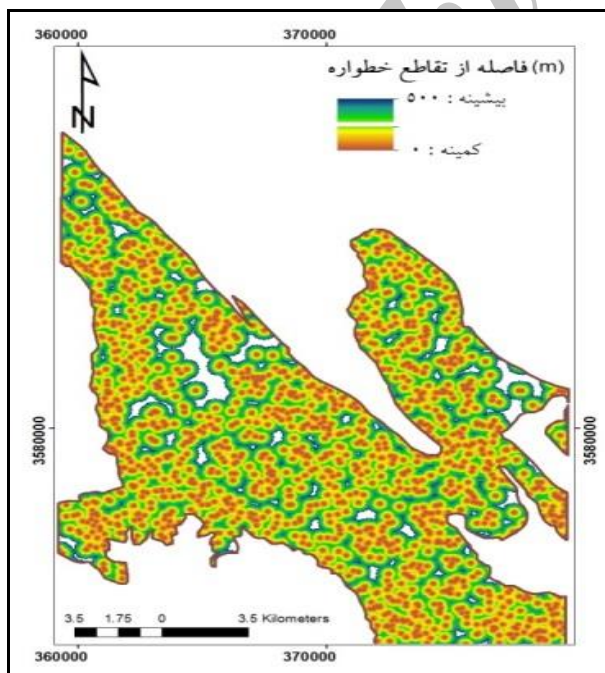
شکل ۳- تراکم تقاطع خطواره در محدوده مورد مطالعه



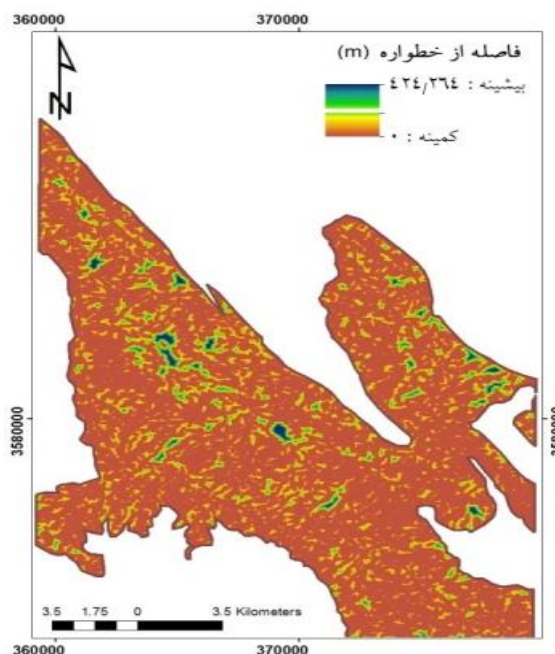
شکل ۲- تراکم خطواره در محدوده مورد مطالعه

بخش آبراه‌ها جدا شد و سپس به همان روش تهیه لایه تراکم خطواره، با استفاده از شبکه‌بندی و تقسیم مجموع طول آبراهه به مساحت در هر سلول شبکه و سپس دورن‌یابی به روش کریجینگ، این لایه نیز تهیه شد (شکل ۶).

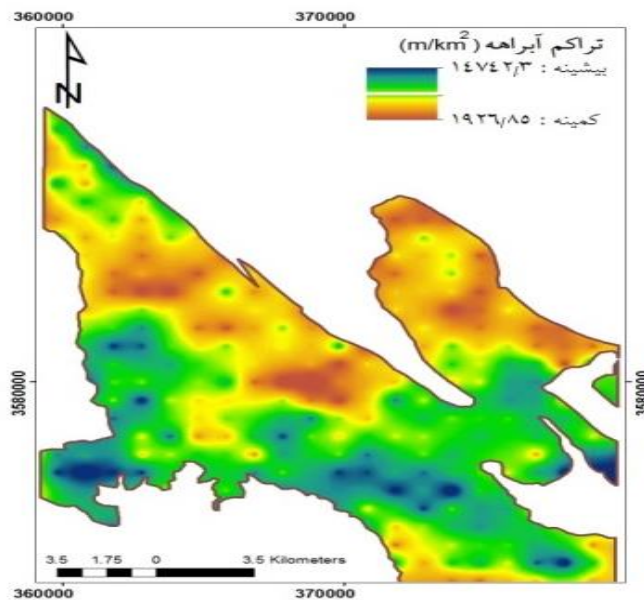
دو نقشه فاصله از خطواره‌ها (شکل ۴) و فاصله از تقاطع خطواره‌ها با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی در همین نرم‌افزار تهیه گردید (شکل ۵). برای تهیه لایه تراکم آبراهه‌ها از DGN مربوط به منطقه مورد مطالعه، در نرم‌افزار Arc GIS 10.2



شکل ۵- فاصله از تقاطع خطواره (m) در محدوده مورد مطالعه

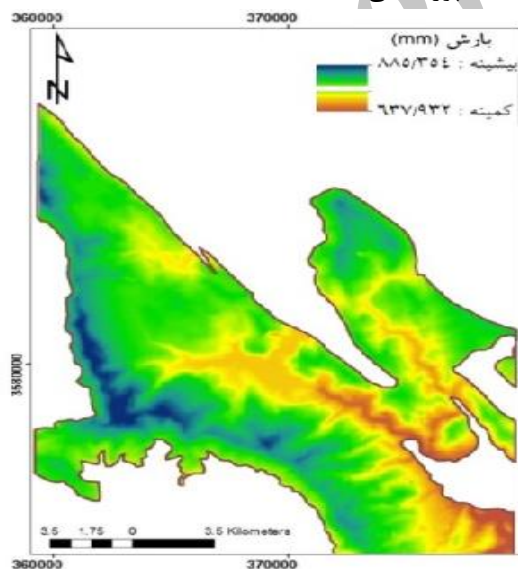


شکل ۴- فاصله از خطواره (m) در محدوده مورد مطالعه



شکل ۶- تراکم آبراهه ( $m/Km^2$ ) در محدوده مورد مطالعه

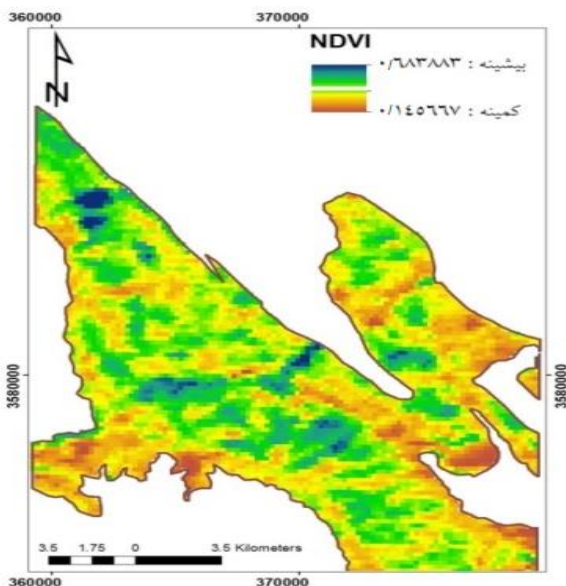
برای تهیه نقشه بارش، از درون‌یابی به روش سرخی، اندیکا، بی بی تلخون و تنگ‌بختیاری در محیط کوکریجینگ روی داده‌های آماری بارش ۱۰ ساله ایستگاه‌های چلو، کاشکل، سوسن، کوه‌رنگ، سد شهید عباسپور، لالی‌بند نرم‌افزار ArcGIS 10.2 استفاده شده است (شکل ۶).



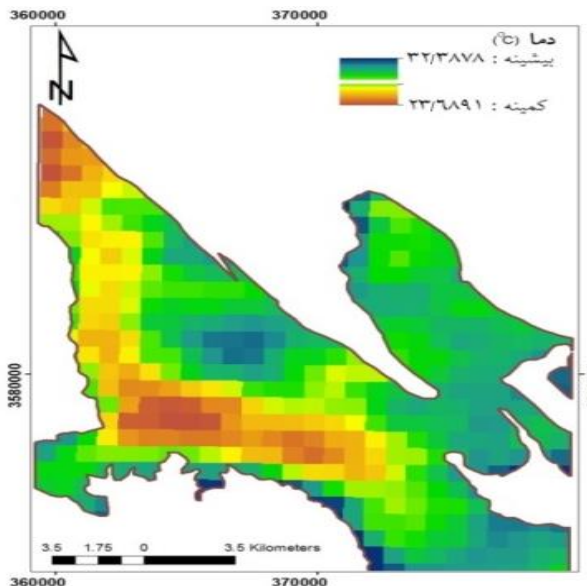
شکل ۷- بارش (mm) در محدوده مورد مطالعه

برای به دست آوردن نقشه دما، از تصاویر ۸ روزه سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر، از سال ۸۳ تا ۹۳ استفاده شد (شکل ۸). و نیز جهت تهیه نقشه پوشش گیاهی از تصاویر ۱۶ روزه سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، تنها از اسفند ۹۲ تا اردیبهشت ۹۳ که بیشترین پوشش گیاهی موجود بود، استفاده شد (شکل ۹).

<sup>1</sup>- NDVI: Normalized Difference Vegetation Index



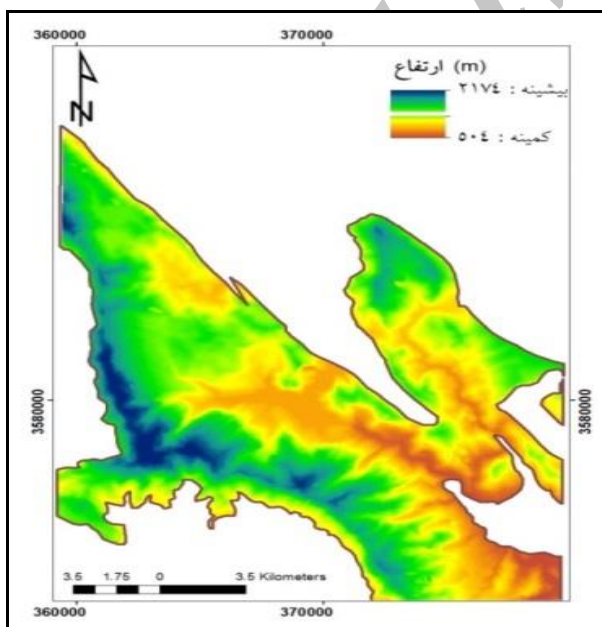
شکل ۹- شاخص پوشش گیاهی در محدوده مورد مطالعه



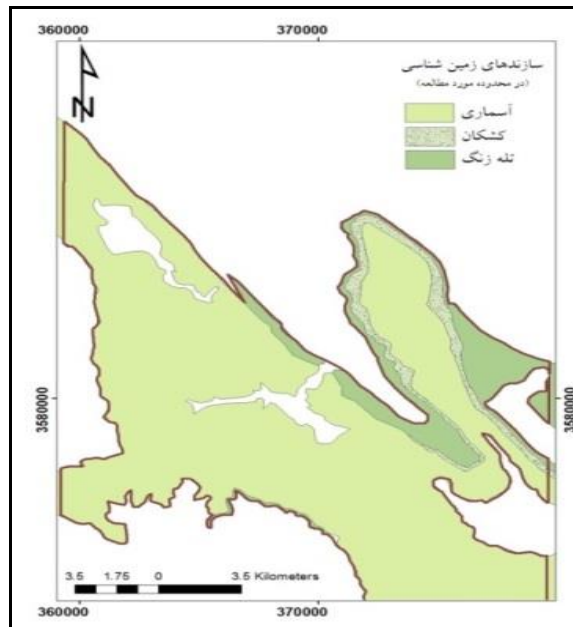
شکل ۸- دما (C) در محدوده مورد مطالعه

ماهواره‌ای ASTER، تهیه شد (شکل ۱۱). سپس با استفاده از مدل ارتفاع رقومی منطقه و به‌کارگیری توابع تحلیل سطح، نقشه شیب به دست آمد که ارزش هر پیکسل در آن نشان دهنده‌ی مقدار شیب آن برحسب درجه می‌باشد (شکل ۱۲). در انتها ذکر این نکته لازم است که تمامی نقشه‌های تهیه شده دارای ابعاد پیکسلی ۵۰×۵۰ متر می‌باشند.

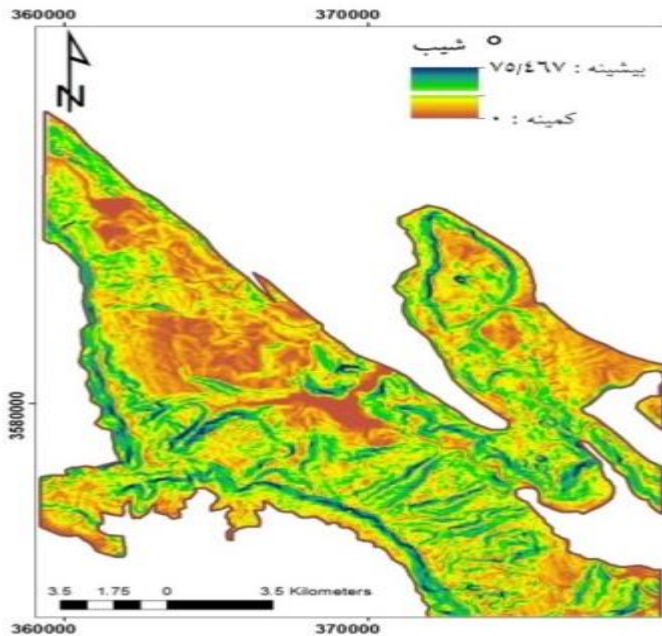
برای تهیه لایه سنگ‌شناسی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کمستان، تهیه شده توسط شرکت ملی نفت ایران، در نرم‌افزار Global Mapper 16 زمین‌مرجع شد، سپس سازندهای مختلف در نرم‌افزار ArcGIS10.2 بر روی نقشه شناسایی و با رقومی کردن مرز سازندها، برای این نقشه یک Geo data base تهیه گردید (شکل ۱۰). برای تهیه لایه ارتفاع ابتدا مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه از تصویر



شکل ۱۱- ارتفاع (m) در محدوده مورد مطالعه



شکل ۱۰- سازندهای زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه



شکل ۱۲- شیب (درجه) در محدوده مورد مطالعه

تراکم شکستگی‌ها نیز زیاد می‌باشد. این فرض، اساس استفاده از خطواره‌ها در اکتشاف آب زیرزمینی به حساب می‌آید، چرا که آب زیرزمینی در زون‌های خرد شده‌ای که در بسیاری از سنگ‌ها وجود دارد، یافت می‌شود (واترز و همکاران، ۱۹۹۰). با توجه به این که منطقه مورد مطالعه به شدت تحت تأثیر تکتونیک قرار گرفته است، شبکه آبراهه آن نیز تا حدود زیادی، منطبق بر خطواره‌های آن می‌باشد و می‌توان آن را نیز جزء معیارهای تحت تأثیر ساختار به حساب آورد. سایر معیار این دسته که شامل تراکم تقاطع خطواره، فاصله از خطواره و فاصله از تقاطع خطواره‌ها می‌باشند، صرفاً جهت افزایش دقت معیارهای ساختاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

#### معیارهای اقلیمی

**بارش:** وجود آب فاکتور اصلی اقلیمی در توسعه کارست می‌باشد. این عامل اصلی‌ترین متغیر در کنترل انحلال و فرسایش می‌باشد. به صورت طبیعی، کارست در مناطقی توسعه می‌یابد که دارای میزان بارندگی بالاتر باشد و مناطق خشک یا بسیار سرد، مانع از توسعه کارست می‌گردند (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹). در منطقه مورد مطالعه طبق آمار بارش ایستگاه‌های مجاور، به دلیل کوهستانی بودن از اواسط پاییز تا اواسط بهار دارای بارندگی است لذا از نظر بارش، وضعیت مناسبی برای توسعه کارست دارد.

پس از تهیه نقشه‌های معیار، نوبت به انتخاب روش مناسب جهت بررسی توسعه کارست منطقه می‌رسد، با توجه به مطالعاتی که اخیراً در سطح جهان و ایران انجام شده است، در این پژوهش از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی که به مراتب بهتر، جدیدتر و کاربردی‌تر از روش تحلیل سلسله مراتبی است جهت تلفیق لایه‌ها، استفاده شده است. جنبه نوآورانه این تحقیق استفاده از روش سیستم استنتاج فازی در محیط نرم‌افزار MATLAB 2012a و مقایسه نتایج دو روش می‌باشد.

## بحث و نتیجه‌گیری

### معیارهای ساختاری

گسل‌ها و درز و شکاف‌ها از یک طرف باعث انتقال آب به درون آبخوان آهکی می‌شود و از طرف دیگر خود به واسطه انحلال گسترش می‌یابند و باعث بالا رفتن هدایت هیدرولیکی می‌شوند. خطواره‌ها نیز از اهمیت خاصی در مسائل هیدروژئولوژیکی برخوردارند. به طور کلی، خطواره عبارت است از یک شکل سطح‌الارضی خطی ساده و یا پیچیده قابل نقشه‌برداری می‌باشد که قسمتی از آن مستقیم و قسمتی از آن کمی انحنا دارد و به طور واضحی با الگوی اشکال پیرامون خود متفاوت است (سابین و فلویید، ۱۹۷۸). لذا، اگر پذیرفته شود که خطواره‌ها معرف شکستگی‌های پوسته می‌باشند، می‌توان چنین استنباط نمود که در مناطقی که خطواره‌ها تراکم بالایی دارند،

**سنگ‌شناسی:** خصوصیات مختلفی از قبیل وسعت رخنمون، ضخامت و خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ‌های کارستی و ارتباط با سنگ‌های دیگر در مقیاس ناحیه‌ای، کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی توسعه کارستی را تشکیل می‌دهند. سنگ‌های انحلال‌پذیر و به دنبال آن کارستی شدن، ارتباط مستقیمی با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های قابل انحلال دارند. از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی، می‌توان به تخلخل، درزه و شکاف، شکستگی‌ها و گسل‌ها و از ویژگی‌های شیمیایی می‌توان به درصد خلوص اشاره کرد که همه این عوامل در ایجاد و گسترش کارستی نقش مهمی را ایفا می‌کنند (کریمی وردجانی، ۱۳۸۹). مهم‌ترین سازند کارستی موجود در منطقه مورد مطالعه، سازند آسماری است که به دلیل تأثیر تکتونیک و وجود درز و شکستگی فراوان، پتانسیل بسیار مناسبی برای توسعه کارستی دارد.

**ارتفاع و شیب:** توپوگرافی سطح زمین با ایجاد تغییرات دما، میزان بارش، نوع پوشش گیاهی و نیز تبخیر نسبت به ارتفاع و همچنین با ایجاد شیب‌های مختلف و تأثیر آن بر میزان رواناب تولید شده، در میزان نفوذپذیری حوضه مؤثر است. در مناطق مرتفع‌تر، آب و هوا سردتر است و در نتیجه، هوازدگی فیزیکی مؤثرتر می‌باشد. همچنین آب دریافتی از طریق بارش‌ها نیز بیشتر می‌باشد. به دلیل سرد بودن، رشد گیاهان انبوه و دارای ریشه‌های عمیق، محدود می‌گردد و در نتیجه تبخیر و تعرق ناشی از گیاهان، کم می‌شود. اگرچه وزش بادهای شدید در ارتفاعات موجب افزایش تبخیر از سطح زمین می‌گردد. در مناطق دارای شیب زیاد، امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و همچنین رشد گیاهان فراهم نمی‌باشد. بنابراین، آب باران به سرعت جاری می‌شود و فرصت نفوذ نخواهد داشت. بخشی از آب نفوذ کرده نیز در امتداد لایه‌بندی حرکت می‌کند و توسعه عمودی کارستی، محدود می‌گردد (شمس‌ایی، ۱۳۸۱). لذا مناطق با ارتفاع بیشتر و شیب کمتر، مانند محور تاقدیس‌ها، پتانسیل بیشتری برای توسعه کارستی دارند.

## سیستم استنتاج فازی<sup>۲</sup>

سیستم استنتاج یک مفهوم تازه نیست، استنتاج فازی به‌جای استفاده از and/or و اعداد، از متغیرهای زبانی استفاده

**پوشش گیاهی:** پوشش گیاهی نیز یکی دیگر از عواملی است که می‌تواند به‌طور مستقیم بر توسعه کارستی مؤثر باشد. چنین می‌توان گفت که گیاهان چندین تأثیر مثبت و یک تأثیر منفی در جذب آب و نفوذ دادن آن در زمین و نهایتاً در توسعه کارستی دارند. عمدتاً تأثیرات مثبت آن‌ها ناشی از داشتن ریشه‌های نفوذکننده در خاک و سنگ و ایجاد یک فضای نفوذپذیر در کنار آن‌ها، افزایش CO<sub>2</sub> در اطراف ریشه‌ها و بالا بردن اسیدیته آب که لازمه انحلال سنگ‌های کربناته است، ایجاد مانع در مقابل تولید رواناب و جلوگیری از فشردن سطح خاک و در نتیجه جلوگیری از کاهش نفوذ، ایجاد سایه و جلوگیری از تابش مستقیم خورشید بر خاک و کم شدن تبخیر از خاک می‌باشد و تنها اثر منفی آن استفاده گیاه از بخشی از آبی است که می‌تواند به سیستم کارستی نفوذ کند ولی توسط گیاه به مصرف می‌رسد (مرادی، ۱۳۸۹). وضعیت پوشش گیاهی، تأثیر تمامی موارد دیگر مانند بارش، رطوبت خاک و فعالیت کشاورزی را نشان می‌دهد (پرویز و همکاران، ۱۳۸۹). بسیاری از مطالعات گویای رابطه میان میزان انرژی انعکاسی در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک با میزان پوشش گیاهی در سطح زمین بوده‌اند (علوی‌پناه، ۱۳۸۵). لذا در این تحقیق برای بررسی پوشش گیاهی از شاخص پوشش گیاهی به دست آمده توسط سنجنده MODIS استفاده شده است.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه بالا NIR مقادیر بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک (۸۵۷ nm) و RED مقادیر بازتاب در باند قرمز (۶۴۵ nm) می‌باشد.

**دما:** عامل درجه حرارت دارای نقش دوگانه در توسعه کارستی دارد (بوگلی، ۱۹۸۰ و وایت ۱۹۸۸). با افزایش درجه حرارت میزان گاز کربنیک محلول در آب و میزان انحلال آهک کاهش می‌یابد. اما از طرف دیگر درجه حرارت فعالیت موجودات ذره‌بینی که مواد آلی موجود در درزه و شکاف سنگ‌های آهکی را تجزیه می‌کنند، افزایش می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد مقدار بارندگی، با دمای منطقه، تأثیر بسیاری در شکل کارستی شدن دارند. به‌طوری که توسعه کارستی در مناطق استوایی با نواحی خشک و کم‌باران بسیار متفاوت است (Samani, 1983).

معیارهای هیدروژئولوژیکی

<sup>1</sup>- Fuzzy Inference System



اعمال آن بر روی ورودی‌ها و قواعد، خروجی مشخص می‌شود و این همان کاری است که انسان در بسیاری از قضاوت‌های خود بکار می‌گیرد. عملکرد موتور استنتاج را می‌توان به چهار قسمت تقسیم نمود:

۱. اعمال ورودی به مقدم‌ها و به دست آوردن درجه عضویت آن‌ها
۲. اعمال عملگرهای فازی
۳. اعمال روش دلالت
۴. اجتماع خروجی‌ها

در سیستم استنتاج فازی در اولین گام می‌بایست متغیرهای زبانی، مقادیر زبانی و محدوده‌های مناسب تعیین گردد. جدول ۱ محدوده‌ها و نوع تابع معیارهای توسعه کارست را نشان می‌دهد. هدف از تعریف تابع عضویت برای معیارها، وزن‌دهی تدریجی و پیوسته به معیارها می‌باشد. قواعد و قوانین بکار گرفته شده در پایگاه قواعد هر سیستم استنتاج فازی با توجه به رابطه منطقی بین معیارها و نظر کارشناسی تعیین شده است.

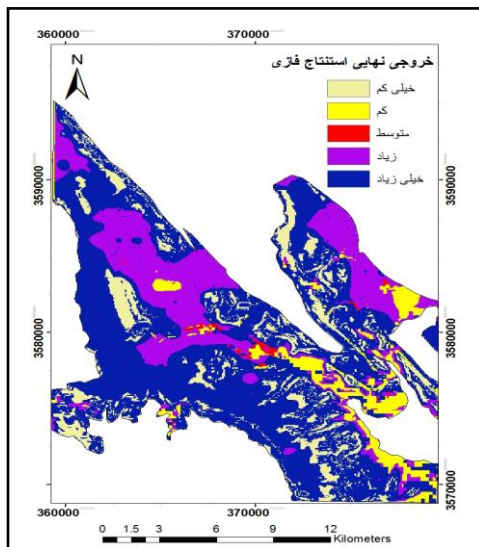
می‌کند. متغیرهای زبانی، متغیرهایی هستند که در آن‌ها مقادیر به‌صورت جمله‌هایی در یک زبان طبیعی یا مصنوعی قرار دارند. سیستم استنتاج یک سیستم تصمیم‌گیری بر اساس قوانینی مانند "اگر... آنگاه... دیگر" می‌باشد. در منطق فازی یک اظهار قطعی می‌تواند با درجه‌ای از قطعیت توابع عضویت هر کلاس، به‌صورت "درست" یا "غلط" شبیه‌سازی شود در حالی که در منطق کلاسیک هر گزاره باید "درست" یا "غلط" باشد (مک برانتی و آده، ۱۹۹۷). یک سیستم استنتاج فازی دارای اجزای زیر است (فونگ و همکاران، ۲۰۱۰):

۱. یک فازی سازی در ورودی که مقدار عددی متغیرها را به یک مجموعه فازی تبدیل می‌کند.
  ۲. پایگاه قواعد فازی که مجموعه از قواعد اگر-آنگاه است.
  ۳. موتور استنتاج فازی که ورودی را با یک سری اعمال به خروجی تبدیل می‌کند.
  ۴. غیر فازی‌سازی که خروجی فازی را به یک عدد قطعی تبدیل می‌کند.
- قلب هر سیستم استنتاج فازی، موتور استنتاج فازی می‌باشد. عملکرد آن شبیه فرایند استدلال آدمی است. به‌طوری که با

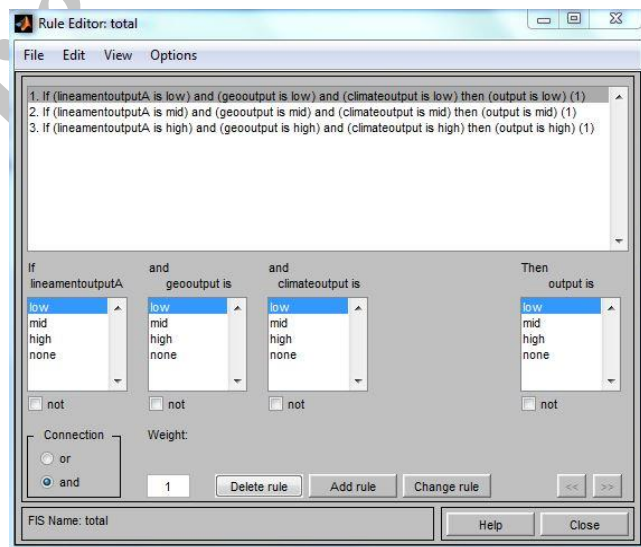
جدول ۱- توابع عضویت و بازه معیارها برای مدل‌سازی توسعه کارست

معیار	نوع تابع	بازه مناسب	بازه متوسط	بازه نامناسب	واحد
بارش	مثلثی	۷۸۷-۸۸۵/۳۵	۷۳۳-۷۸۷	۶۳۷/۹-۷۳۳	میلی‌متر
شاخص پوشش گیاهی	مثلثی	۰/۶۸-۰/۴۲	۰/۴۲-۰/۳۴	۰/۳۴-۰/۱۴	-
دما	گوسی	۲۳/۶-۲۶/۸	۲۶/۸-۲۸/۴	۲۸/۴-۳۲/۳	درجه سانتی‌گراد
لیتولوژی	مثلثی	آسماری	آبرفت آسماری	تله‌زنگ-کشکان پول‌ه‌ها(پابده)	-
ارتفاع	مثلثی	۲۱۷۴-۱۴۸۶	۱۴۸۶-۱۰۷۶	۱۰۷۶-۵۰۴	متر
شیب	گوسی	۱۸-۰	۱۸-۳۳/۴	۳۳/۴-۷۵/۱	درجه
تراکم خطواره	مثلثی	۱۰۱۸۵-۶۵۳۱	۶۵۳۱-۵۳۰۳	۵۳۰۳-۱۹۷۳	متر در کیلومتر مربع
تراکم تقاطع خطواره	مثلثی	۸/۷-۵/۹	۵/۹-۴/۷	۴/۷-۲/۵	تقاطع در کیلومتر مربع
تراکم آبراهه	مثلثی	۹۴۱۵-۱۴۷۴۲	۹۴۱۵-۷۲۰۳	۷۲۰۳-۱۹۲۶	متر در کیلومتر مربع
فاصله از خطواره	مثلثی	۲۵-۰	۲۵-۶۹/۸	۶۹/۸-۴۲۴/۲۶	متر
فاصله از تقاطع خطواره	مثلثی	۲۵-۰	۱۰۰-۲۵	۱۰۰-۵۰۰	متر

- در مجموع، جهت مدل‌سازی توسعه کارست منطقه مورد مطالعه، ۳۳ قانون در پایگاه قوانین اعمال گردید که اصلی‌ترین آن‌ها شامل:
- اگر لیتولوژی آسماری باشد و ارتفاع و بارش و دما و تراکم خطواره و تراکم آبراهه و تراکم تقاطع خطواره نامناسب و فاصله از خطواره و فاصله از تقاطع خطواره و پوشش گیاهی متوسط، آن‌گاه توسعه کارست کم خواهد بود.
- اگر خروجی سیستم استنتاج فازی اقلیمی و هیدروژئولوژی و ساختاری زیاد باشد، توسعه کارست زیاد خواهد بود.
- اگر خروجی سیستم استنتاج فازی اقلیمی و هیدروژئولوژی و ساختاری متوسط باشد، توسعه کارست متوسط خواهد بود.
- اگر خروجی سیستم استنتاج فازی اقلیمی و هیدروژئولوژی و ساختاری کم باشد، توسعه کارست کم خواهد بود.
- بعد از معرفی پارامترهای ورودی و خروجی و طراحی توابع عضویت آن‌ها، در این مرحله از عملگر فازی ممدانی استفاده شده است.
- عملگر ممدانی کارایی فرآیند غیر فازی سازی را با کاهش محاسبات مورد نیاز، افزایش می‌دهد. در ادامه از روش دلالت Min و برای اجتماع خروجی‌ها از Max و جهت غیر فازی سازی خروجی‌ها از روش مرکز ثقلی استفاده شده است.
- شکل ۱۴ نقشه توسعه کارست به روش سیستم استنتاج فازی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- خروجی نهایی روش استنتاج فازی



شکل ۱۳- پایگاه قواعد در نرم‌افزار MATLAB 2012a

به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مسئله دارد و گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد (قدسی پور ۱۳۸۴). هرچند هدف از به کارگیری روش تحلیل سلسله

روش تحلیل سلسله مراتبی فازی فرایند تحلیل سلسله مراتبی که توسط توماس ساعتی در دهه ۱۹۷۰ بنا نهاده شده است، یکی از جامع‌ترین سامانه‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، چرا که این روش امکان فرموله کردن مسئله را

وزن اختصاص داده شده به هر یک از معیارها مشخص شده است. پس از اعمال توابع فازی، با توجه به اینکه هر کدام از معیارها چه میزان تأثیر و ارزشی دارند، وزن‌دهی معیارها انجام شده است. برای معین کردن وزن هر معیار و میزان اهمیت هر یک در توسعه کارست، از نظر کارشناسان آب زیرزمینی استفاده شد. برای محاسبه وزن معیارها به دلیل عدم وجود چارچوب خاصی در این زمینه از روش سلسله مراتبی فازی که یکی از روش‌های دانش مینا می‌باشد استفاده شده است. با توجه به اینکه معیارهای مؤثر دارای وزن‌های مختلفی می‌باشند و بایستی همه آن‌ها در، هم‌پوشانی شرکت کنند، ابتدا هر نقشه معیار با استفاده از توابع فازی، استانداردسازی و در وزن مربوط به خود ضرب شد سپس از روش هم‌پوشانی فازی به کمک عملگر گاما ۰٫۵ که مناسب‌ترین مقدار گاما است، برای تلفیق نهایی و به دست آمدن نقشه توسعه کارست استفاده شده است. شکل ۱۵ نقشه خروجی نهایی روش تحلیل سلسله مراتبی را نشان می‌دهد.

مراتبی به دست آوردن نظر کارشناسان و متخصصین است، با این وجود روش تحلیل سلسله مراتبی معمولی به درستی نحوه تفکر انسانی را منعکس نمی‌کند، زیرا در مقایسه‌های زوجی به این روش از اعداد دقیق استفاده می‌شود. تصمیم‌گیرندگان اغلب به علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری اعلام کنند، به همین دلیل در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند (عطایی، ۱۳۸۹). لذا در این پژوهش از روش فازی استفاده شده است. ابتدا با توجه به رابطه هر معیار با هدف، نوع تابع عضویت آن مشخص و بعد از آن، ماتریس مقایسه زوجی تهیه و وزن هر کدام از معیارها تعیین شد. با ضرب هر معیار در وزن محاسبه شده مربوط به خود و هم‌پوشانی تمامی معیارها به روش فازی، مدل‌سازی به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی انجام گرفته شد. نقشه‌های معیار در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، با استفاده از توابع فازی موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 استانداردسازی شده‌اند. در جدول ۲ نوع تابع و

جدول ۲- توابع فازی و وزن معیارها

ردیف	معیار	کمینه	بیشینه	نوع تابع فازی	وزن معیارها
۱	تراکم آبراهه	۱۹۲۶	۱۴۷۴۲	خطی مثبت	۰٫۱۱۱
۲	فاصله از خطواره‌ها	۰	۴۲۴	خطی منفی	۰٫۰۵۵
۳	تراکم طول خطواره‌ها	۱۹۷۳	۱۰۲۱۷	خطی مثبت	۰٫۱۰۷
۴	فاصله از تقاطع خطواره‌ها	۰	۵۰۰	خطی منفی	۰٫۰۵۷
۵	تراکم تقاطع خطواره‌ها	۲/۵	۸/۷	خطی مثبت	۰٫۱۰۹
۶	شیب	۰	۷۵٫۴	فازی کوچک	۰٫۰۶۸
۷	لیتولوژی	۰	۳	خطی مثبت	۰٫۱۵۹
۸	ارتفاع	۵۰۴	۲۱۷۳	خطی مثبت	۰٫۰۵۳
۹	پوشش گیاهی	۰/۱۴۵۶	۰/۶۸۳۸	خطی مثبت	۰٫۰۷۹
۱۰	دما	۲۳/۶	۳۲/۳۸	فازی کوچک	۰٫۰۴۵
۱۱	بارش	۶۳۷/۹۳	۸۸۵/۳۵	خطی مثبت	۰٫۱۵۱

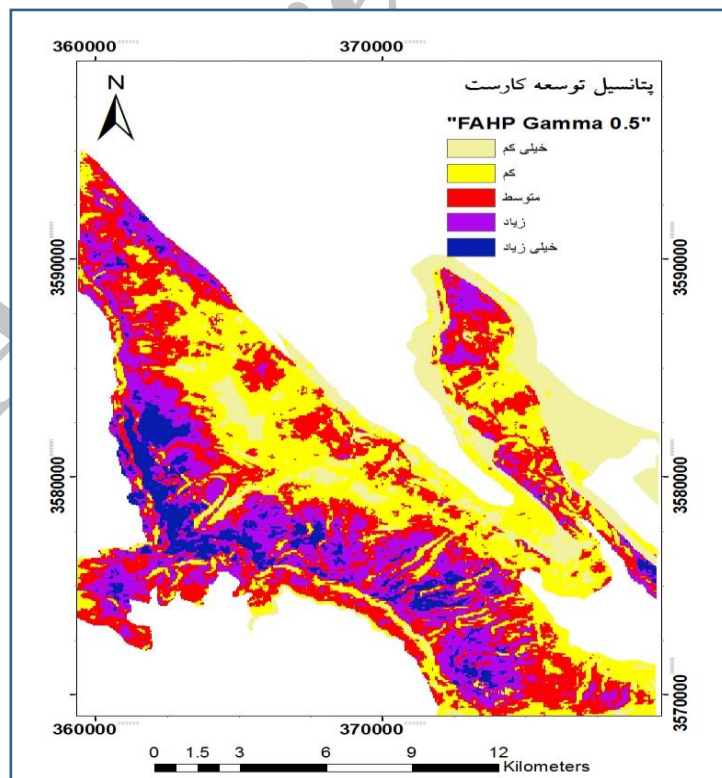
#### صحت‌سنجی

ایجاد پیچیدگی‌های زمین‌شناسی ساختمانی و چینه‌شناسی محدوده مورد مطالعه ایفا نموده است. شواهد سینماتیکی، وجود این زون برشی را اثبات می‌کنند. در نتیجه عملکرد زون برشی بالارود دو دسته شکستگی شکل گرفته است: شکستگی‌هایی با رده اول مانند مجموعه رانندگی‌های اندیکا، پابده، شیرگون، شلار، چاله‌منار، مافارون و گسل‌های عرضی و

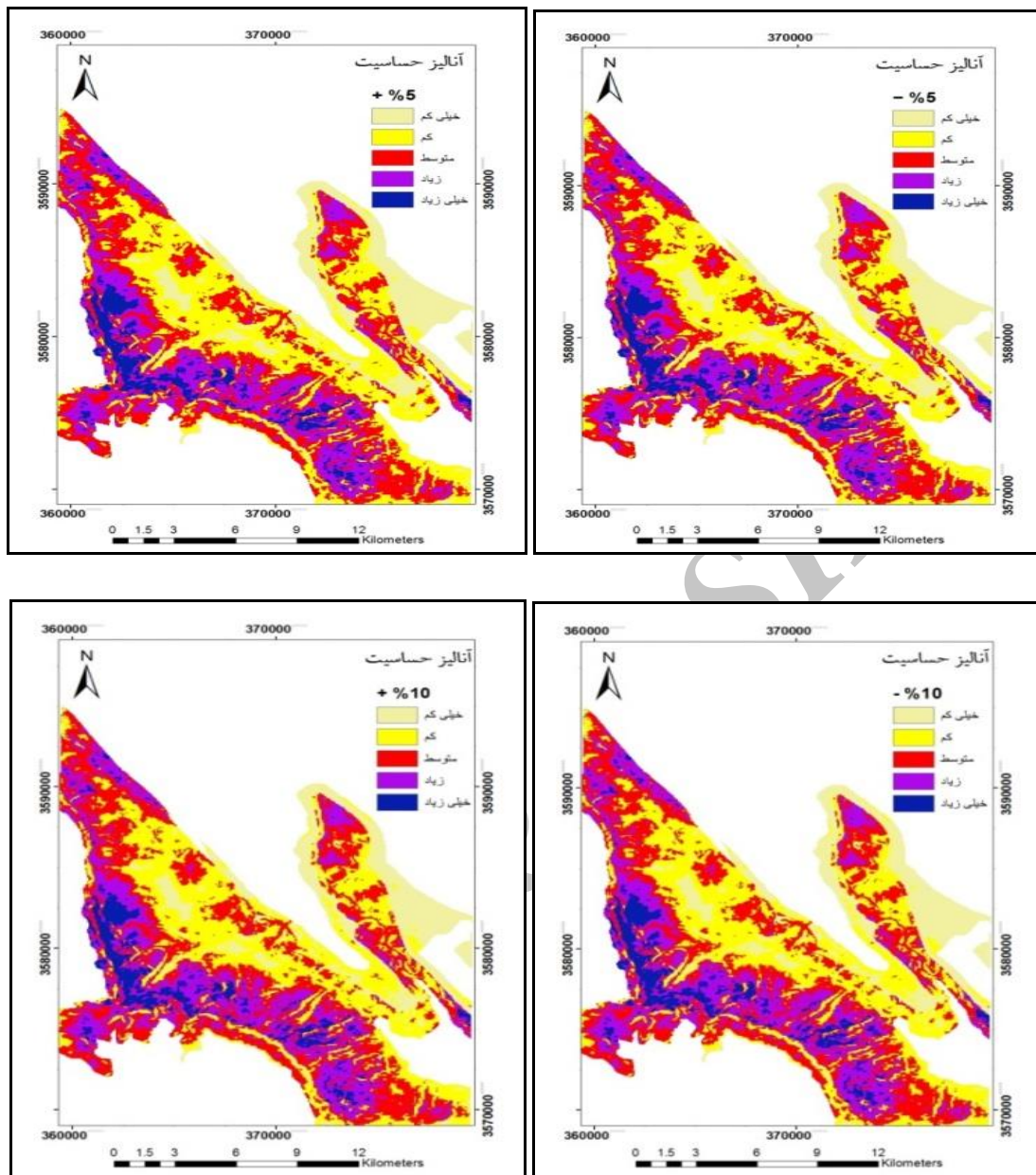
توسعه کارست منطقه شیرین‌بهار توسط تکتونیک منطقه کنترل می‌گردد (غفاری، ۱۳۸۹). طبق پژوهش شبان در سال ۱۳۹۰، مهم‌ترین شکستگی منطقه، گسل راستا لغز چپ‌بر بالارود یکی از گسل‌های اصلی و بنیادین در کمربند زاگرس چین‌خورده ایران است. این سامانه گسلی، نقش اساسی در

آب به سمت چشمه، که موجب می‌شود زمان ماندگاری آب در سنگ مخزن چشمه بیشتر بوده و لذا نسبت به چشمه دره‌اناری املاح بیشتری داشته باشد چشمه سرحونی چشمه فصلی بوده و با آبدهی نسبتاً بالا در مجاورت راندگی چاله‌منار تشکیل شده و این راندگی در تشکیل چشمه نقش بسزایی دارد. چشمه سرحونی در مرز سازند آسماری و پابده- گورپی تشکیل شده که نشان دهنده توسعه زیاد فرایند کارستی شدن در سنگ مخزن چشمه می‌باشد. (صاحبدل، ۱۳۸۹). علاوه بر موارد اشاره شده، سیمای کارستی نظیر پولزّه‌های چاله‌منار، شلار، دره- های خشک تالوگ، تینا، شاهزاده عبدالله و...، تنگه‌های باباحمد، کمارون و ... غارچه‌ها، دولین‌ها، شافت‌های پنهان، کارن‌ها، شکاف‌های انحلالی، رودخانه‌های کارستی تالوگ، کارون، چشمه‌های کارستی دره اناری، سرحونی، آبشکالو، سبزاب، بی‌بی‌تلخون و... در سازندهای آهکی و گچی نشان از توسعه کارستیفیکاسیون در محدوده مورد مطالعه می‌باشند (شبان، ۱۳۹۰) که نتایج تحقیق حاضر را مورد تأیید قرار می‌دهند. علاوه بر این برای اطمینان از صحت اوزان بکارگرفته شده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، از آنالیز حساسیت استفاده شده است (شکل ۱۶).

مورب امتدادلغز، و شکستگی‌های رده دوم شامل شکستگی‌های عرضی، طولی و مورب. لذا سازندهای کارستی منطقه مورد مطالعه، به شدت تحت تأثیر تکتونیک منطقه می‌باشند. محور تاقدیس‌ها به دلیل داشتن تراکم شکستگی‌های عرضی بیشتر، ارتفاع بالاتر و شرایط مناسب بارش، پوشش گیاهی و دما و نیز شیب کم و در کل شرایط مساعد جهت توسعه کارست، مکان مناسبی تلقی می‌شود که نتایج دو روش استفاده شده در این پژوهش نیز این موضوع را تأیید می‌نمایند. بررسی تأثیر نوع شکستگی‌ها بر رفتار هیدرولیکی آبخوان در محدوده اطراف سه چشمه دره‌اناری و سرحونی و آبشکالو نشان می‌دهد که در لحظه شروع تخلیه رفتار چشمه کاملاً توسط نوع شکستگی غالب (عرضی یا طولی بودن) کنترل می‌شود. به صورتی که در محدوده حوضه آبرگیر چشمه دره‌اناری بالا بودن تراکم شکستگی‌های عرضی سرعت انتقال را بیشتر کرده و زمان ماندگاری آب در سنگ مخزن چشمه نیز کمتر بوده که کاهش املاح را در زمان شروع تخلیه این چشمه نسبت به چشمه‌های آبشکالو و سرحونی دارد. در چشمه آبشکالو روند غالب شکستگی‌ها با شکستگی‌های طولی بوده که این شکستگی‌ها در زمان شروع تخلیه در نفوذ آب بیشتر نقش دارند تا در هدایت



شکل ۱۵- خروجی نهایی روش تحلیل سلسله مراتبی فازی



شکل ۱۶- آنالیز حساسیت  $\pm 5\%$  و  $\pm 10\%$  درصد برای روش تحلیل سلسله مراتبی

### نتیجه گیری

کل مساحت منطقه مورد مطالعه نشان داده‌اند. این پهنا در هر دو روش منطبق بر ارتفاعات تاقدیس چاله منار و بخش‌هایی از تاقدیس شلار است که دارای بارش زیاد و شاخص پوشش گیاهی بالا و تراکم بالای خطواره می‌باشند. علاوه بر آن، مناطق فاقد توسعه و یا توسعه بسیار کم نیز در هر دو روش منطبق بر سازندهای کشکان و پابده-گورپی (کف پولژه) می‌باشد. برای تعیین صحت اوزان بکار رفته در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی آنالیز حساسیت  $\pm 5\%$  و  $\pm 10\%$  درصد استفاده شده است. با

در این پژوهش مناطق دارای پتانسیل توسعه کارست با استفاده از دو روش سیستم استنتاج فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی و کمک برخی معیارها نظیر تراکم خطواره، تراکم تقاطع خطواره، تراکم آبراهه، فاصله از خطواره، فاصله از تقاطع خطواره، دما، بارش، پوشش گیاهی، لیتولوژی، ارتفاع و شیب شناسایی شد. روش استنتاج فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی مناطق با توسعه خیلی زیاد و زیاد را به ترتیب  $79/1\%$  و  $27\%$  از

یاسوج با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات  
جغرافیایی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه  
تربیت مدرس تهران. ص ۲۴.

- Bögli, A., 1980. Karst hydrology and physical speleology. Springer Science & Business Media.
- De Waele, J., Plan, L., Audra, P., 2009. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: an introduction. *Geomorphology*, 106(1): p. 1-8.
- Dreybrodt, W., 1990. Processes in karst systems: physics, chemistry, and geology. Springer-Verlag, New York.
- Dreybrodt, W., 1996. Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models. *Water Resources Research*, 32(9): p. 2923-2935.
- Dreybrodt, W., 1998. The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestone: a model simulation of karst evolution. *The Journal of Geology*, p. 639-655.
- Foong Kwong, c., Chuah T., Lee W., 2010. Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS) Handoff Algorithm. *International Journal of Network and Mobile Technologies*, 2: p. 54-59.
- Ford, D., Williams, P.D., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, Wiley.
- Leondes, C.T., 1999. Fuzzy theory systems: techniques and applications. Academic Press, Inc.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O., 1997. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, 77(2): p. 85-113.
- Milojevic, N., 1967. Hydrology. Beograd, Yugoslavia.
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., Voudouris, K., 2015. A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology* 525: 197-208.
- Palmer, A.N., Wigley, T.L.M., Parkhurst, D. L., 1978. The kinetic of calcitic dissolution in CO<sub>2</sub> – water system at 5 °C to 60 °C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub>. *AM. Journal of Science.*, 278, 537-573.
- Sabins, Jr., Floyd, F., 1978. Remote sensing principles and interpretation. Second Edition ed. Remote sensing, New York: Freeman and company.
- Samani, N., 1983. Evaluation and Development of tropical, subtropical, semi arid and arid karst. in International symposium on water Resources in karst with special Emphasis in arid and semi arid zones, shiraz, Iran, p. 827-836.
- Waters, P., Greenbaum, D., Smart, P. L., Osmaston, H., 1990. Applications of remote sensing to groundwater hydrology. *Remote Sensing Reviews*, 4(2): p. 223-264.
- White, W.B., 1977. Role of solution kinetics in the development of karst aquifers. *Karst hydrogeology. International Association of Hydrogeologists*, 12th Memoirs, p. 503-517.
- White, W.B., 1988. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. Oxford University Press.

توجه به عدم تغییر موقعیت مکان پهنه‌ها، صحت اوزان استفاده شده را تأیید می‌گردد.

## منابع

- پرویز، ل.، خلقی، م.، ولی زاده، خ.، عراقی نژاد، ش.، ایران نژاد، پ.، ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) از طریق پایش وضعیت پوشش گیاهی. همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران. شبان، م.، ۱۳۹۰. تعیین حوضه آبریز و منابع تأمین آب چشمه سبزآب (شمال شرق مسجد سلیمان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز. شمسایی، ا.، ۱۳۸۱. هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- صاحب‌دل، م.، ۱۳۸۸. بررسی هیدروشیمیایی کارست منطقه شیرین بهار، (کارشناسی ارشد آب‌شناسی)، شهید چمران اهواز.
- عباسی، م.، و باقری سیدشکری، س.، جعفری اقدم، م.، ۱۳۹۳. پهنه‌بندی تحول کارست با استفاده از مدل آنتروپی نمونه موردی: تاق‌دیس نوا زاگرس شمال باختری. مجله علوم زمین، شماره ۹۴، ۱۶۱-۱۶۸.
- عطایی، م.، ۱۳۸۹. تصمیم‌گیری چند معیاره. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- علائی طالقانی، م.، رحیم زاده، ز.، ۱۳۸۹. بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس. مقاله‌ی ارائه شده در نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.
- علوی پناه، ک.، ۱۳۸۵. کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران، ۴۵-۴۶.
- علیزاده، ا.، ۱۳۹۱. اصول هیدروژئولوژی کاربردی. دانشگاه امام رضا (ع). چاپ (۳۵). ص ۱۳.
- غفاری، ح.، ۱۳۸۹. تأثیر ساختارهای تکتونیکی در توسعه چشمه‌های کارستی منطقه شیمبار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- قبادی، م.ح.، عبدی لری، ی.، و محبی، ی.، ۱۳۹۰. اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های کربناته، جهت ارزیابی توسعه کارست در منطقه نهاوند. فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی، ۴، ۳۱۰-۲۹۹.
- قدسی‌پور، ح.، ۱۳۸۴. فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP. نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران).
- کریمی وردنجانی، ح.، ۱۳۸۹. هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها). انتشارات ارم شیراز. ص ۲۸ و ۳۶.
- مرادی، ص.، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر پدیده‌های ساختاری بر روی هیدروگراف چشمه‌های کارستی انتخابی در محدوده شیراز-