

## بررسی قابلیت منابع آب زیرزمینی در سازند کارستی کوه خورین کرمانشاه با تکنیک GIS و روش‌های ژئوفیزیکی

امجد ملکی<sup>\*</sup>: دانشیار گروه جغرافیای دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران  
محسن اویسی مؤخر: استادیار گروه ژئوفیزیک دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران  
آرزو باقری: کارشناس ارشد هیدروژئومورفولوژی دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۰۲/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۱۳، صص ۱۵۰-۱۳۵

### چکیده

با توجه به ضرورت و اهمیت وجود آب به‌عنوان یک منبع حیاتی و به دلیل افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به این منبع، تأمین آب مورد نیاز برای مصرف شرب، کشاورزی و صنعت یکی از دغدغه‌های جهان امروز محسوب می‌شود. کارست را می‌توان منبع مناسبی برای تأمین آب در نظر گرفت. مطالعات و پژوهش‌های منابع آب کارستیک، به‌علت محدودیت منابع آبرفتی از نظر کیفی و کمی و به‌علت گسترش وسیع سازندهای کارستی در سطح کشور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. منطقه آهکی خورین، در شمال‌غرب شهر کرمانشاه قرار دارد. عمده آب سکونتگاه‌های اطراف این منطقه و تالاب هشیلان را چشمه‌ها، سراب‌ها و آبخوان‌های کارستی این کوهستان تأمین می‌کنند. در این پژوهش، با استفاده از الگوی Fuzzy Logic/AHP و به‌کارگیری هشت معیار مؤثر، نقشه پهنه‌بندی پتانسیل منابع آب کارست منطقه تهیه شده است. سپس برای حصول اطمینان از پهنه‌های به دست آمده، این پهنه‌ها با عملیات میدانی و روش‌های ژئوفیزیکی ارزیابی شده‌اند. نتایج نقشه تهیه‌شده با الگوی منطق فازی نشان داد که دامنه جنوبی کوه خورین و اطراف تالاب هشیلان، نسبت به دامنه شمالی آن دارای قابلیت نفوذ و پتانسیل منابع آب کارستی بیشتری است. برای صحت‌سنجی این امر، عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها به روش سونداژ الکتریکی قائم در دو پروفیل جداگانه، در دامنه جنوبی و شمالی کوه خورین انجام شد. وجود منبع آبی غنی، با کیفیت مناسب در بخش میانی مقطع دامنه جنوبی و نبود منابع آب، با کمیت و کیفیت مناسب در دامنه شمالی، صحت نتایج پهنه‌بندی الگوی Fuzzy Logic/AHP را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی کارست، الگوی Fuzzy Logic/AHP، ژئوفیزیک، کرمانشاه، GIS.

## مقدمه

آب کارست در جهان، ایران و به‌خصوص زاگرس انجام گرفته است:

سریوستاوا و بهاتاچاریا<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) در مقاله‌ای با استفاده از سنجش از دور، GIS و روش مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه Bargarh هند، به بررسی آب‌های زیرزمینی پرداختند. در این مطالعه از عوامل سطحی، هیدرولوژیکی و مطالعات ژئوالکتریک به‌طور هم‌زمان استفاده شد. نتایج نشان داد پهنه‌های دارای آب زیرزمینی با مناطق مشخص شده به‌روش مقاومت ویژه الکتریکی تطابق خوبی دارند.

میشرا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی و مشخصات ژئومورفیک، پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه رودخانه Bahama در چین را تعیین کردند.

رادر و اندرابی<sup>۳</sup> (۲۰۱۲) به‌منظور پژوهش بر روی آب‌های زیرزمینی در منطقه Allahabad از تلفیق الگوی منطق فازی و تکنیک GIS استفاده کردند و با ایجاد ده نقشه موضوعی و ترکیب آن‌ها، مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی را مشخص کردند.

کمار و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای، محدوده‌های بالقوه دارای آب زیرزمینی در حوضه رودخانه Khoh را با استفاده از سنجش از دور، GIS و الگوی منطق فازی تعیین کردند. در این پژوهش از داده‌های زمین‌شناسی، زه‌کشی، خطواره‌ها، شیب، کاربری اراضی و ژئومورفولوژی استفاده شده است. نتایج نشان داد که ۴۰ درصد از منطقه، دارای ظرفیت عالی منابع آب زیرزمینی است.

وایکار و نیلاوار<sup>۵</sup> (۲۰۱۴) در مقاله‌ای، با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک GIS، مناطق بالقوه آب

واژه کارست، مجموعه‌ای از فرآیندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از انحلال سنگ‌هاست که با تشکیل بازشدگی‌ها، تخریب و تجزیه ساختمان و وضعیت سنگ‌ها، ایجاد نوع ویژه‌ای از رژیم گردش آب، نوع خاص توپوگرافی منطقه و بلاخره رژیم خاص شبکه زه‌کشی عیان می‌شود (آغاسی، ۱۳۷۸). تقریباً ۲۵ درصد از جمعیت جهان، آب مورد نیاز خود را از آبخوان‌های کارست تأمین می‌کنند. بسیاری از شهرها و روستاهای کشور، به‌شدت به منابع آب کارست وابسته‌اند. به‌طوری که ۸۰ درصد از منابع آب غرب کشور از منابع آب کارست تأمین می‌شود (افراسیاییان، ۱۳۷۲).

سفره‌های آب کارستی کوه خورین، واقع در ۳۶ کیلومتری شمال‌غرب شهر کرمانشاه نقش مهمی در تأمین تالاب هشیلان و آب روستاهای اطراف برای مصرف شرب و کشاورزی دارد؛ بنابراین این ویژگی، ضرورت پژوهش حاضر یعنی شناسایی مناطق مستعد تغذیه سفره‌های کارستی و مکان‌های دارای پتانسیل این منابع با الگوی Fuzzy Logic/AHP را توجیه می‌کند. در بیشتر پهنه‌بندی‌ها با موضوعات مختلف از جمله پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی کارست، به نقشه‌های حاصل از الگوهای فوق اکتفا شده است؛ این نقشه‌ها کمتر با مطالعات میدانی و روش‌های ژئوفیزیکی صحت‌سنجی شده‌اند؛ اما در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت موضوع، نقشه خروجی به‌وسیله عملیات صحرایی و روش‌های ژئوفیزیکی ارزیابی شده‌اند که این امر سبب اعتماد بیشتر به نقشه حاصل و دسترسی به منابع آب زیرزمینی کارستی است.

## پیشینه پژوهش

با توجه به اهمیت مناطق کارستی در تغذیه منابع آب زیرزمینی، تحقیقات نسبتاً جامعی در رابطه با منابع

<sup>1</sup> Srivastava and Bhattacharya

<sup>2</sup> Mishra et al

<sup>3</sup> Rather and Andrabi

<sup>4</sup> Kumar et al

<sup>5</sup> Waikar and Nilawar

عادلی و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای، با استفاده از Gis و الگوی Fuzzy Logic/AHP، به بررسی منابع آب زیرزمینی شهرستان گرگان پرداخته‌اند. در این پژوهش از داده‌های زمین‌شناسی، کاربری و پوشش اراضی، شیب، خاک، خطواره‌ها، پیژومترها و ژئومورفولوژی استفاده شد. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی، نتایج حاصل با لایه مستقل مربوط به داده‌های پیژومتری ارزیابی شدند.

علاوه بر موارد ذکر شده، محمدی و همکاران (۱۳۸۵)، رحیمی (۱۳۸۹)، حسینی و طباطبایی (۱۳۹۱) و یوسفی سنگانی و همکاران (۱۳۹۳) نیز به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی، در زمینه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، مطالعاتی انجام داده‌اند.

با توجه به مطالعات فوق، در ارتباط با شناسایی منابع آب کارست با استفاده از تکنیک GIS و روش‌های ژئوفیزیکی، پژوهش‌های متعددی به صورت جداگانه صورت گرفته است. اما تاکنون در ایران، از تلفیق این دو روش به منظور پتانسیل‌یابی سفره‌های آب کارستی استفاده نشده است. بنابراین در این پژوهش، در مرحله اول به کمک الگوی Fuzzy Logic/AHP، نقشه پهنه‌بندی گنجایش منابع آب کارست منطقه تهیه و پهنه‌های مساعد و نامساعد آب کارست شناسایی شد.

در نهایت با عملیات صحرایی و روش مقاومت ویژه الکتریکی، مناطق مساعد و نامساعد از لحاظ قابلیت منابع آب کارست ارزیابی شد.

#### معرفی منطقه پژوهش

منطقه در دست مطالعه، توده آهکی خورین که بخشی از زاگرس رورانده در مغرب ایران است که در ۳۶ کیلومتری شمال غرب شهر کرمانشاه با مساحت ۹۴۱۷۳۹۶۲ متر مربع با روند شمال غربی - جنوب شرقی قرار گرفته است. (شکل ۱)

زیرزمینی در منطقه Charthana در هند را بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که محدوده با پتانسیل عالی منطبق بر مناطق پست مرکزی و محدوده با پتانسیل ضعیف منطبق بر ارتفاعات، حاشیه منطقه هستند. سنتیل کمار و شانکار<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای با استفاده از تکنیک GIS و داده‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی، خاک، کاربری اراضی و زه‌کشی، گنجایش منابع آب زیرزمینی در منطقه Tamil Nadu در هند را تعیین کرده‌اند.

سجاد و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) در مقاله‌ای مناطق بالقوه آب زیرزمینی در حوضه آبریز Dudhganga در هند را با استفاده از اطلاعات سنگ‌شناسی و توپوگرافی، خصوصیات ژئوفیزیکی و روابط متقابل آن‌ها را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مناطق دشتی حوضه آبریز می‌توانند در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، مفیدتر باشند.

علاوه بر موارد فوق، سنر و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵) در ترکیه، دیبی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۰)، گوپتا و سریوستاوا<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) و پریجا و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۱) در هند در زمینه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی مطالعات دیگری انجام داده‌اند؛ این مطالعات با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گرفته است.

محمودی و ملکی (۱۳۸۰) در مقاله‌ای تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون - پراو را بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که تکنونیک، زمین‌شناسی و اقلیم گذشته، باعث تحول و توسعه اشکال کارست در منطقه مذکور شده است و این اشکال نقش زیادی در تأمین منابع آب زیرزمینی منطقه دارند.

<sup>1</sup> Senthil Kumar and Shankar

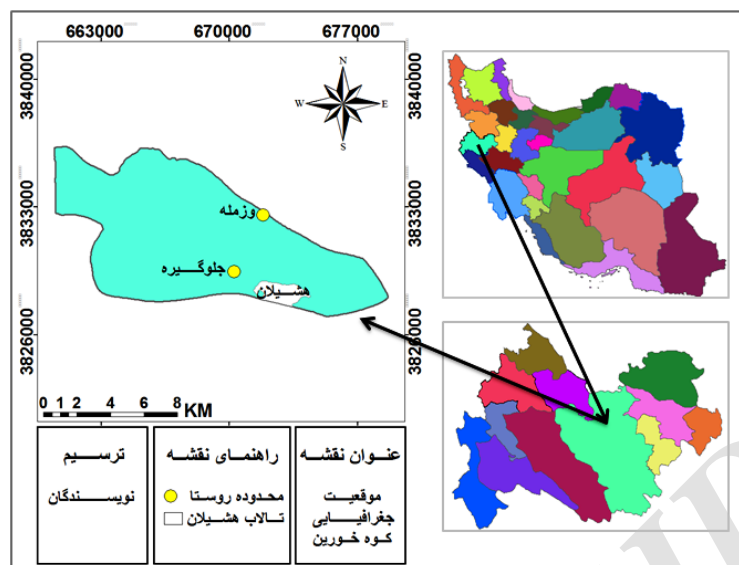
<sup>2</sup> Sajjad et al

<sup>3</sup> Sener et al

<sup>4</sup> Dibi et al

<sup>5</sup> Gupta and Srivastava

<sup>6</sup> Preeja et al



شکل ۱. موقعیت منطقه خورین در استان کرمانشاه

مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه الگوی رقومی ارتفاع منطقه (DEM)، برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده است. همچنین از GPS برای تعیین موقعیت ریاضی اشکال کارست و تعیین دقیق موقعیت سونداژها در روش ژئوالکترونیک و از دستگاه Axon برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی منطقه و ارزیابی نقشه‌های حاصل، استفاده شده است.

#### نرم‌افزارها

۱. Arc Gis9.3: به منظور رقومی کردن و تهیه لایه‌های مورد نیاز، تجزیه و تحلیل و در نهایت تهیه نقشه پهنه‌بندی

۲. Expert Choice: برای مقایسه زوجی معیارها و

استخراج وزن نهایی آنها در الگوی AHP

۳. Google Earth: به منظور مشاهده کلی منطقه،

ترسیم لایه‌ها و تعیین محل پروفیل‌ها در عملیات صحرائی

۴. نرم‌افزار VES: به منظور تفسیر داده‌های

برداشت شده با روش ژئوفیزیکی (سونداژ الکتریکی قائم<sup>۱</sup>)

این محدوده از نظر موقعیت جغرافیایی، بین عرض‌های ۳۴° ۳۴' تا ۳۴° ۳۹' درجه شمالی و طول‌های ۴۶° ۴۵' تا ۴۶° ۵۸' درجه شرقی واقع شده است که حداقل و حداکثر ارتفاع آن به ترتیب ۱۳۰۲ و ۲۵۰۳ متر و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۹۰۲ متر است. منطقه خورین، بخشی از حوضه آبریز قره‌سو است که از شمال به حوضه رازآور و از جنوب به حوضه مرگ محدود می‌شود. از نظر توپوگرافی نیز، از سه واحد کوهستان، پای‌کوه و دشت تشکیل شده است. از لحاظ زمین‌شناسی، واحدهای لیتولوژی منطقه شامل آهک بیستون، آهک سیلیسی، سنگ آهک کرمانشاه، نهشته‌های رسوبی و آهک سفید تراورتن می‌باشد. این منطقه از نظر اقلیمی، دارای آب و هوای معتدل مدیترانه‌ای است که متوسط بارش سالانه آن ۴۴۷ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت آن ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

#### مواد و روش‌های پژوهش

##### مواد پژوهش

در این پژوهش، از نقشه توپوگرافی قلعه‌شاخانی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی کامیاران با

<sup>۱</sup> Vertical Electric Sounding (V.E.S)

پردازش و ارزیابی قرار گرفت. پیش از اجرای الگوی منطق فازی، باید برای هر یک از لایه‌های اشاره شده در بالا، تابع عضویت تعیین شود. بدین منظور ابتدا رابطه هر یک از پارامترها با گنجایش منابع آب کارست منطقه، بررسی شد که توابع مربوط به آن‌ها در شکل (۲) ارائه شده است. به‌عنوان نمونه، عامل تحول اشکال کارست با منابع آب زیرزمینی رابطه مستقیم دارد؛ زیرا با افزایش درجه تحول اشکال کارستی، تغذیه آبخوان‌ها و به تبع آن گنجایش منابع آب کارست منطقه افزایش می‌یابد. در نتیجه، تابع مربوط به این عامل، یک تابع خطی افزایشی است. عامل فاصله از گسل‌ها، از دیگر پارامترهای مؤثر در تغذیه آبخوان‌های کارستی منطقه است که با افزایش فاصله از آن‌ها، ظرفیت منابع آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. بنابراین تابع مربوط به این عامل، یک تابع خطی کاهشی است. سپس با توجه به توابع مشخص شده برای معیارها، با استفاده از فرمول‌نویسی در محیط Arc Gis 9/3، هر کدام از لایه‌ها فازی شده و بر اساس روابط زیر، در طیف عددی صفر تا یک قرار گرفتند.

$$u(x) = \begin{cases} x = a & 0 \\ a < x < b & \frac{x-a}{b-a} \\ x = b & 1 \end{cases} \quad \text{تابع خطی افزایشی}$$

$$u(x) = \begin{cases} x = a & 1 \\ a < x < b & \frac{b-x}{b-a} \\ x = b & 0 \end{cases} \quad \text{تابع خطی کاهشی}$$

در این رابطه  $u(x)$  درجه عضویت فازی،  $a$  کوچک‌ترین عضو مجموعه و  $b$  بزرگ‌ترین عضو مجموعه است.

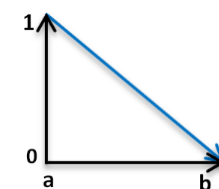
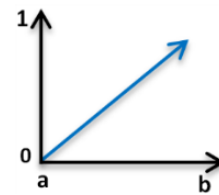
۵. نرم‌افزار Auto Cad: برای ترسیم نتایج حاصل از منحنی‌های سونداژ الکتریکی قائم

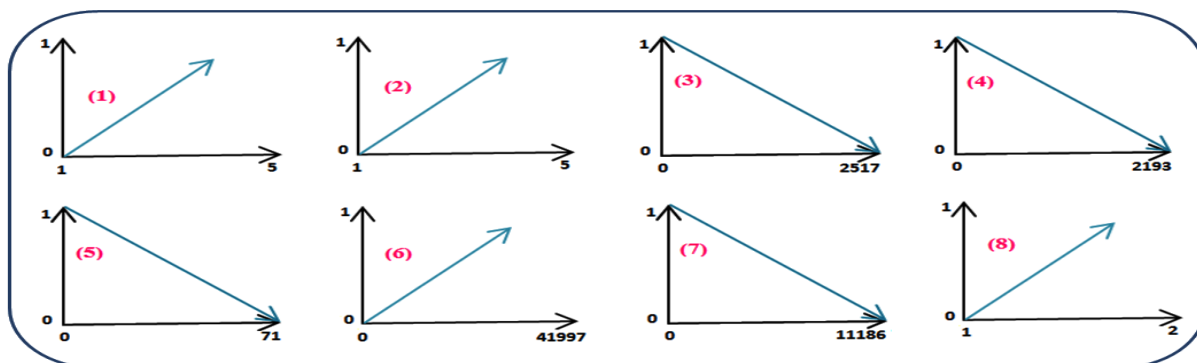
#### روش پژوهش

پژوهش حاضر در دو مرحله، به شرح زیر انجام شده است:

۳-۱- مرحله اول: تهیه نقشه پهنه‌بندی گنجایش منابع آب کارست منطقه با استفاده از الگوی Fuzzy Logic/AHP  
 ۳-۲- مرحله دوم: ارزیابی پهنه‌های مشخص شده حاصل از الگوی منطق فازی، به کمک عملیات صحرایی و روش سونداژ الکتریکی قائم در مدت یک ماه کار میدانی

در مرحله اول، برای تهیه نقشه پهنه‌بندی ظرفیت منابع آب کارست منطقه خورین، با استفاده از پارامترهای محیطی، ابتدا هشت عامل مرتبط شامل: تحول اشکال کارست، لیتولوژی، فاصله از محل برخورد گسل‌ها، فاصله از گسل‌ها، شیب توپوگرافی منطقه، تراکم طول گسل‌ها، فاصله از محل چشمه‌ها و جهت شیب ساختمانی لایه‌ها شناسایی شدند. تمامی لایه‌ها با سیستم زمین مرجع یکسان (UTM:WGS1984,ZONE 38N) با مقیاس مشترک و Cellsize یکسان (۵۰×۵۰) در محیط Arc Gis آماده





شکل ۲. الگوی توابع فازی هر یک از معیارهای مؤثر (۱. اشکال کارست؛ ۲. لیتولوژی؛ ۳. فاصله از محل برخورد گسل‌ها؛ ۴. فاصله از محل گسل‌ها؛ ۵. شیب توپوگرافی؛ ۶. تراکم طول گسل‌ها؛ ۷. فاصله از محل چشمه‌ها؛ ۸. جهت شیب ساختمانی لایه‌ها

دقت ارزش‌گذاری‌ها در مقایسه‌های زوجی است. چنانچه نرخ مذکور برابر یا کمتر از ۱/ باشد، می‌توان ارزش‌گذاری‌ها و مقایسه‌ها را صحیح دانست. در غیراین‌صورت، باید در مقایسه‌ها تجدید نظر به عمل آورد (قدسی‌پور، ۱۳۹۰).

در ادامه با تلفیق الگوی AHP و Fuzzy Logic، تمامی لایه‌های استاندارد شده در هر یک از وزن‌های حاصل از الگوی تحلیل سلسله‌مراتبی ضرب شد.

$$f(x) = w_i u_{i(x)}$$

$f(x)$  لایه وزن‌دار فازی،  $w_i$  وزن هر یک از معیارها در الگوی AHP و  $u_{i(x)}$  تابع فازی هر یک از لایه‌هاست (شکل ۳).

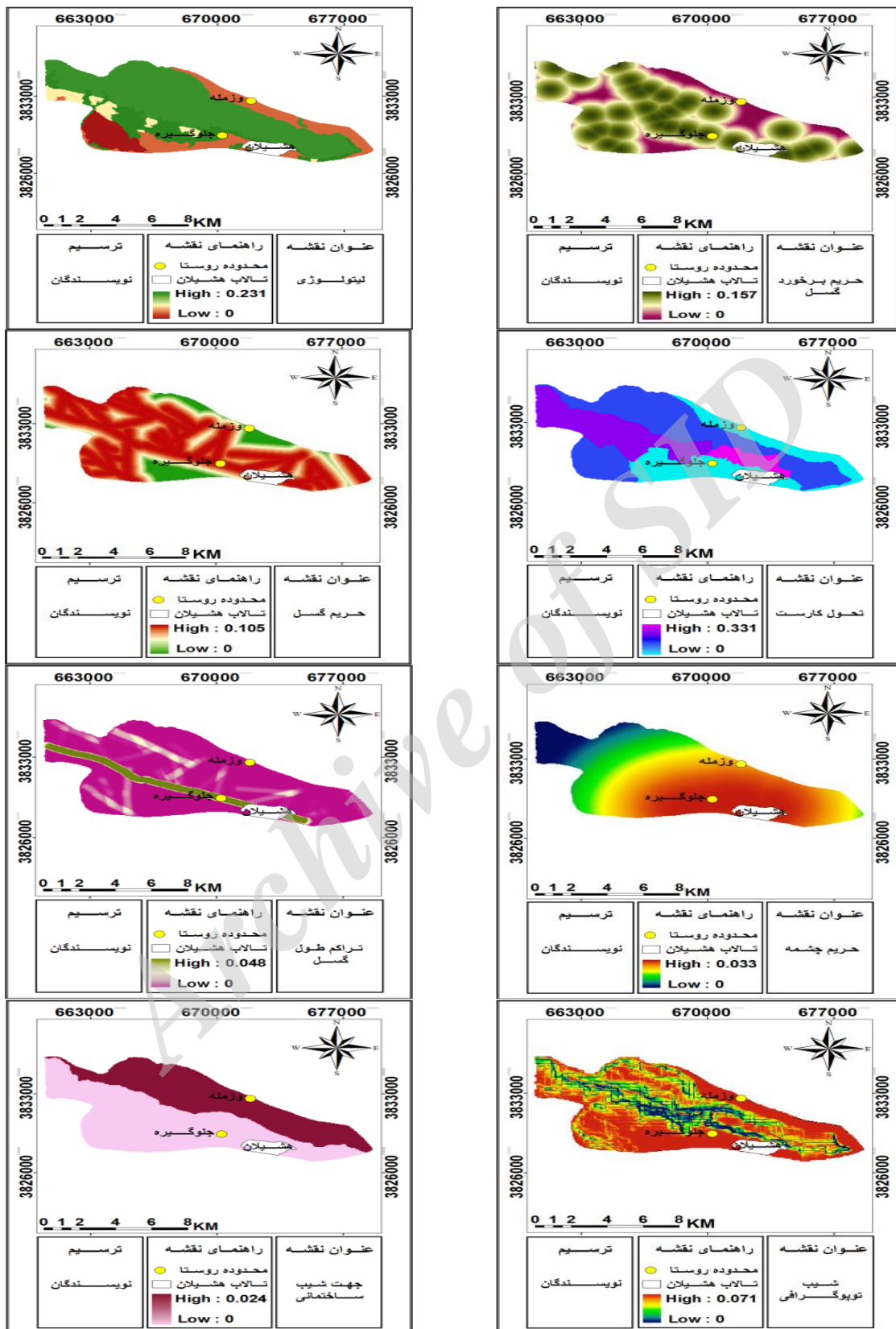
در این مرحله از پژوهش، از میان الگوهای تصمیم‌گیری چند معیاره، روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌عنوان الگوی قابل استفاده برای وزن‌دهی معیارها انتخاب شد. با جمع‌آوری نظرات کارشناسی، ارزش و اهمیت هر کدام از معیارها به‌منظور ارزیابی ظرفیت منابع آب کارست منطقه، نسبت به هم مشخص و ماتریس مقایسه زوجی معیارها تشکیل شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice که اصول آن بر اساس الگوی AHP استوار است، وزن هر کدام از معیارها و نرخ ناسازگاری به‌دست آمد.

نرخ ناسازگاری در روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، شاخصی است که سازگاری مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. این نرخ، نشان‌دهنده میزان صحت و

جدول ۱. ماتریس ارزش‌گذاری معیارها در الگوی AHP و نرخ ناسازگاری

معیارها	اشکال کارست	لیتولوژی	حریم برخورد گسل	حریم گسل	شیب توپوگرافی	تراکم طول گسل	حریم چشمه ساختمانی	جهت شیب
وزن معیارها	۰/۳۳۱	۰/۲۳۱	۰/۱۵۷	۰/۱۰۵	۰/۰۷۱	۰/۰۴۸	۰/۰۳۳	۰/۰۲۴

نرخ ناسازگاری ۰/۰۳

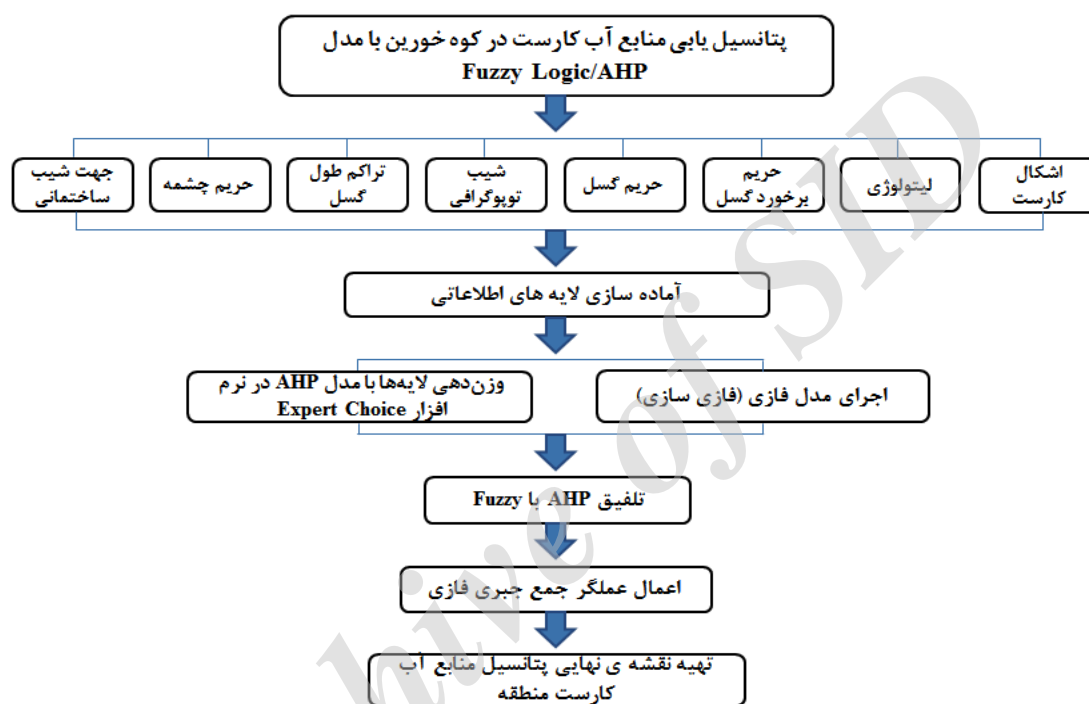


شکل ۳. لایه‌های وزن دار فازی (۱). اشکال کارست؛ ۲. لیتولوژی؛ ۳. فاصله از محل برخورد گسل‌ها؛ ۴. فاصله از محل گسل‌ها؛ ۵. شیب توپوگرافی؛ ۶. تراکم طول گسل‌ها؛ ۷. فاصله از محل چشمه‌ها؛ ۸. جهت شیب ساختمانی لایه‌ها

$$\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i)$$

در این فرمول  $\mu_{combination}$  لایه حاصل از حداکثرسازی،  $u_i$  لایه وزن دار فازی و  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  تعداد لایه‌های ترکیب‌شونده را نشان می‌دهد.

سپس عملگرهای ضرب جبری<sup>۱</sup>، جمع جبری<sup>۲</sup> و گامای فازی<sup>۳</sup> بر روی لایه‌ها اجرا شد و در نهایت با عملگر جمع جبری فازی، بر اساس رابطه زیر، هم‌پوشانی لایه‌ها صورت گرفت و نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه و ظرفیت منابع آب کارستی منطقه تهیه شد. (شکل ۴)



شکل ۴. فرآیند انجام مراحل ارزیابی قابلیت منابع آب کارست با الگوی Fuzzy Logic/AHP

#### روش مقاومت ویژه الکتریکی

این روش یکی از متداول‌ترین روش‌های ژئوالکتریکی است که به علت حجم اطلاعات و قابلیت کاربرد آن در اکتشاف منابع آب زیرزمینی، بسیار استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه ظاهری، معمولاً از ۴ الکتروود استفاده می‌شود (مقیاتی، ۱۳۸۴). (شکل ۵)

#### مرحله دوم: عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها

#### به روش مقاومت ویژه الکتریکی

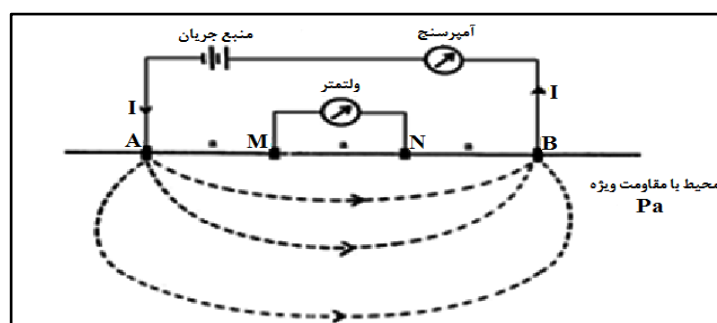
پس از تهیه نقشه پهنه‌های دارای قابلیت منابع آب زیرزمینی کارستی کوه خورین، به کمک نرم‌افزار GIS و الگوی Fuzzy Logic/AHP، در عملیات صحرائی برای ارزیابی پهنه‌های مساعد و نامساعد مشخص شده، از روش مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شد.

<sup>1</sup> Fuzzy Product

<sup>2</sup> Fuzzy Sum

<sup>3</sup> Fuzzy Gama





شکل ۵. شارش جریان الکتریکی درون زمین

K را فاکتور هندسی گویند که مقدار آن بستگی به فواصل الکترودهای پتانسیل و جریان دارد و از رابطه (۲) به دست می‌آید (Telford, 1990).

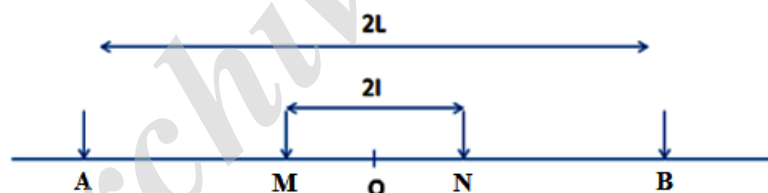
$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)} \quad (2)$$

دو شیوه اصلی در مطالعات، به روش مقاومت ویژه الکتریکی وجود دارد که در این تحقیق، از روش سونداژ الکتریکی قائم با آرایش شلومبرگر متقارن استفاده شد. (شکل ۶)

به این صورت که جریانی با شدت I به وسیله دو الکترود A و B به زمین ارسال می‌شود و اختلاف پتانسیلی را که در اثر عبور این جریان بین دو نقطه M و N حاصل شده، اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۱) مقدار مقاومت ویژه ظاهری به دست می‌آید.

$$p_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta V$  اختلاف پتانسیل بین الکترودهای M و N، و I شدت جریان مدار می‌باشد.



شکل ۶. آرایش الکترودی شلومبرگر متقارن

#### موقعیت برداشت داده‌ها

داده‌های پروفیل شماره ۱، در ۴ سونداژ عمود بر امتداد دامنه جنوبی در محل مخروط افکنه روستای جلوگیره برداشت شد. داده‌های پروفیل شماره ۲ نیز، در ۴ سونداژ در دامنه شمالی کوه خورین عمود بر امتداد دامنه و به موازات راه فرعی منتهی به روستای وزمله برداشت شد. موقعیت پروفیل‌ها بر روی Google Earth در شکل ۷ و جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

#### برداشت داده‌ها

در این مرحله از پژوهش، با توجه به پهنه‌های مشخص شده منابع آب زیرزمینی کارستی منطقه در الگوی Fuzzy Logic/AHP، در عملیات صحرائی، داده‌های سونداژ الکتریکی قائم در دو پروفیل جداگانه در دامنه جنوبی (مناطق مساعد) و شمالی (مناطق نامساعد) کوه خورین برداشت شد. در این پروفیل‌ها از آرایش شلومبرگر متقارن با فاصله الکترودی ۲۰۰ متر و حداکثر طول خط جریان ۶۰۰ متر استفاده شد.



شکل ۷. موقعیت پروفیل‌ها در دامنه جنوبی و شمالی کوه خورین به منظور بررسی‌های ژئوفیزیکی و صحت‌سنجی

جدول ۲. موقعیت پروفیل شماره ۱ در دامنه جنوبی خورین

نام سونداژ	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	محل سونداژها
S <sub>1</sub>	۶۶۹۸۴۱	۳۸۲۹۲۷۰	محل مخروط افکنه - بالاتر از روستای جلوگیره
S <sub>2</sub>	۶۶۹۸۹۰	۳۸۲۹۰۳۱	محل مخروط افکنه - پایین‌تر از روستای جلوگیره
S <sub>3</sub>	۶۶۹۹۲۶	۳۸۲۸۸۱۰	محل مخروط افکنه - دشت محل مزرعه گندم
S <sub>4</sub>	۶۶۹۹۶۷	۳۸۲۸۶۰۸	محل مخروط افکنه - دشت محل زمین شخم‌خورده

جدول ۳. موقعیت پروفیل شماره ۲ در دامنه شمالی خورین

نام سونداژ	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	محل سونداژها
N <sub>1</sub>	۶۷۱۳۹۱	۳۸۳۲۲۱۲	دامنه کوه
N <sub>2</sub>	۶۷۱۴۸۳	۳۸۳۲۲۵۳	دشت - راه فرعی منتهی به روستای وزمله
N <sub>3</sub>	۶۷۱۵۷۷	۳۸۳۲۲۵۹	دشت - راه فرعی منتهی به روستای وزمله
N <sub>4</sub>	۶۷۱۶۶۸	۳۸۳۲۳۳۹	دشت - راه فرعی منتهی به روستای وزمله



شکل ۸. عملیات ژئوفیزیکی برداشت داده‌ها در طول یک ماه کار صحرایی در منطقه مورد مطالعه

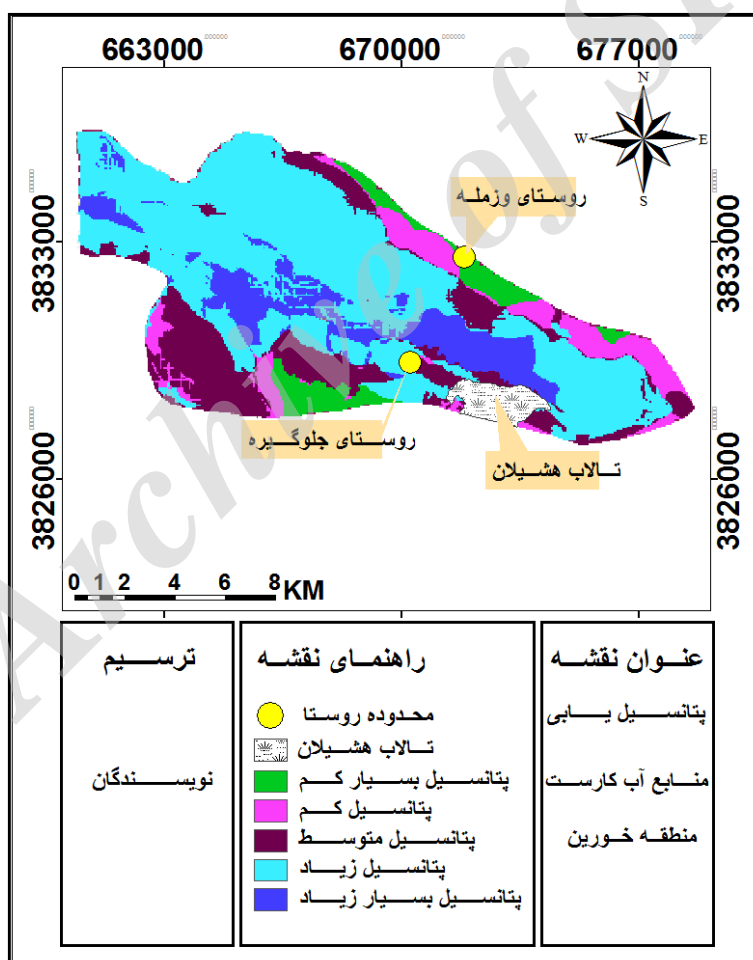
## یافته‌ها

به‌منظور مکان‌یابی مناسب، نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب کارست منطقه با استفاده از عملگر جمع جبری فازی در پنج طبقه پتانسیل بسیار زیاد، پتانسیل زیاد، پتانسیل متوسط، پتانسیل کم و پتانسیل بسیار کم تهیه شد (شکل ۹).

درصد و مساحت زیر پوشش هر یک از پهنه‌ها در جدول (۴) آمده است.

بررسی نقشه مکان‌یابی با الگوی منطق فازی نشان می‌دهد که مناسب‌ترین پهنه‌های نفوذ منابع آب

کارست منطقه در ارتفاعات کوه خورین در جنس آهک بیستون منطبق بر محدوده چاله‌های بسته هموار، جاماها، غارها، لایه‌ها و مکان‌های برخورد گسل‌ها در محل گسل سراسری منطقه است. همچنین مساعدترین پهنه‌های با قابلیت بسیار بالای منابع آب کارستی، در بخش‌های شمال‌غربی و جنوب‌غربی منطقه واقع‌اند که شامل رخنمون آهک سفید تراورتن در محل برونزد سراب سبز علی و چشمه‌های کارستی اطراف آن و محل مخروط‌افکنه‌ها و دشت‌سرای دامنه جنوبی است.



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی قابلیت منابع آب کارست منطقه با الگوی منطق فازی

جدول ۴. توزیع مساحت پهنه‌های دارای پتانسیل آب در منطقه مورد مطالعه

تناسب زمین برای پتانسیل‌یابی منابع آب کارست		طبقات پتانسیل‌یابی
درصد مساحت	مساحت به متر مربع	
۱۲/۸۹	۱۲۱۳۹۸۴۲	پتانسیل بسیار بالا
۵۲/۶۸	۴۹۶۱۰۶۵۸	پتانسیل بالا
۱۸/۲۴	۱۷۱۷۳۹۴۰	پتانسیل متوسط
۹/۹۴	۹۳۵۸۵۴۵	پتانسیل کم
۶/۲۵	۵۸۹۰۹۷۷	پتانسیل بسیار کم
۱۰۰	۹۴۱۷۳۹۶۲	مجموع

ارزیابی پهنه‌های مشخص شده به کمک تکنیک **Gis** و الگوی **Fuzzy Logic/ AHP** با استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیکی (روش سونداژ الکتریکی قائم) تفسیر پروفیل ۱ در دامنه جنوبی کوه خورین:

این پروفیل منطبق بر محل مخروط‌افکنه دامنه جنوبی و دربرگیرنده سونداژهای  $S_1$  تا  $S_4$  است که مقطع مقاومت ویژه لایه‌ها و مقطع زمین‌شناسی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

سونداژ  $S_1$  از پروفیل ۱

مقاومت الکتریکی این سونداژ تا عمق کاوش شده برابر با  $(m\Omega)$  ۱۰ است که نشان‌دهنده جنس‌هایی مانند رس و مارن می‌باشد. این مکان تا عمق ۱۵۰ متری کاوش شده و تا این عمق، سنگ کف آشکار نشده است. همچنین با توجه به تفسیر داده‌های برداشت‌شده، احتمال وجود منابع آب زیاد در محل این سونداژ بسیار کم است.

سونداژ  $S_2$  از پروفیل ۱

منحنی‌های مقاومت ویژه، از سونداژ ۱ به سونداژ ۲ به تدریج افزایش پیدا می‌کنند و میزان مقاومت بیشتر از  $(m\Omega)$  ۱۰۰ را نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به میزان مقاومت‌ها سه احتمال وجود دارد:

نتایج حاصل از انطباق معیارهای اصلی با نقشه پهنه‌بندی نشان داد که از کل مناطق واقع در محدوده با پتانسیل بسیار بالا، ۹۷/۲۹ درصد آن بر روی گسل‌ها واقع هستند. در ارتباط با عامل لیتولوژی پهنه‌های با پتانسیل بسیار بالا، عموماً بر رخنمون آهک سفید تراورتن و آهک بیستون قرار گرفته‌اند. در ارتباط با عامل ژئومورفولوژی نیز تطابق واحد مخروط‌افکنه‌ها، دشت‌سرها، سراب سبز علی و چشمه‌های با آب‌دهی بالا با مناطق دارای پتانسیل بسیار بالا و بالای منابع آب زیرزمینی کارستی مشاهده می‌شود.

در نهایت با توجه به نتایج حاصل از مکان‌یابی با الگوی منطق فازی، برای ارزیابی منابع آب کارستی کوه خورین، دو منطقه به منظور انجام عملیات تکمیلی ژئوالکتریک انتخاب شده است:

- ۱- محل مخروط‌افکنه روستای جلوگیره واقع در دامنه جنوبی کوه خورین، به‌عنوان منطقه مساعد (دارای پتانسیل بسیار بالا و بالای منابع آب کارستی).
- ۲- در نزدیکی روستای وزمله و در دامنه شمالی کوه خورین، به‌عنوان منطقه نامساعد (دارای پتانسیل کم و بسیار کم ذخیره آب کارستی).

عاری از رس و مارن است در محل این سونداژ وجود دارد. علاوه بر این، حاشیه گسل می‌تواند مسیرهای جریان آب زیرزمینی باشد. روستای جلوگیره علیا واقع در این موقعیت، دارای یک چشمه کارستی و چاه آب غنی است که صحت نتایج به دست آمده از این سونداژ را در بازدیدهای میدانی تأیید می‌کند.

#### سونداژ S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> از پروفیل ۱

تفسیر داده‌های برداشت شده از این دو سونداژ، حدود ۱۰۰ متر ضخامت آبرفت با مقاومت (mΩ) ۱۰-۱۵ را، روی یک سنگ کف مقاوم آهکی نشان می‌دهند. مقاومت این تشکیلات، نشان‌دهنده وجود یک لایه آبدار ضعیف با جنس‌هایی مانند رس و مارن ریزدانه است. با توجه به وجود رس و نبود تخلخل مؤثر آن، انتقال آب در این تشکیلات بسیار کند انجام می‌شود و در صورت حفر چاه، دبی زیادی از آن مشاهده نمی‌شود.

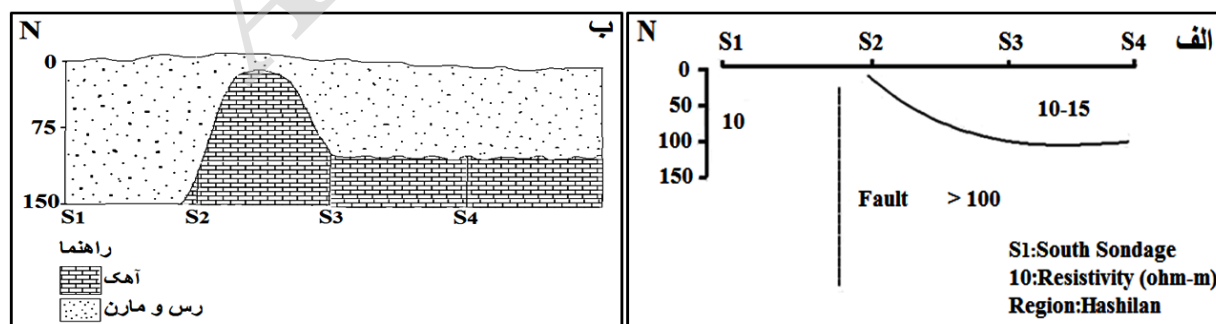
در نهایت، تفسیر داده‌های پروفیل شماره ۱ در دامنه جنوبی خورین، نشان از شرایط مناسب تغذیه و وجود سفره‌های آب کارستی غنی در بخش میانی این مقطع است که این موضوع، صحت نقشه پهنه‌بندی را تأیید می‌کند.

۱- در محل این سونداژ یک گسل یا شکست اتفاق افتاده است که بررسی‌های میدانی، نقشه زمین‌شناسی و عبور گسل سراسری از نزدیکی این منطقه، تأثیر تکتونیک (شکست) در محل این سونداژ را تأیید می‌کند.

۲- این گسل ممکن است به صورت یک سد، کار هدایت آب‌های زیرزمینی کارستی منطقه را به سمت سراب سبز علی و تالاب هشیلان انجام دهد.

۳- میزان مقاومت‌ها و افزایش تدریجی آن، وجود یک بلوک آهکی خردشده با منبع آبی غنی در محل این سونداژ را تأیید می‌کند.

بر اساس عملکرد شدید تکتونیک در توده کوهستانی خورین به خصوص راندگی دامنه جنوبی، عملکرد گسل‌ها و با توجه به این که دشت هشیلان یک دشت تکتونیک است، احتمال جابه‌جایی و بالا و پایین شدن بلوک آهکی محل این سونداژ بر اثر شکست، بسیار زیاد است. داده‌های مقاومت ویژه در این مکان، ضخامت بسیار کم آبرفت (۲ تا ۳/۵ متر) را نشان می‌دهند. حداکثر ضخامت آهک کارستیک در محل این سونداژ مشاهده می‌شود که با توجه به میزان مقاومت‌ها، احتمال یک سفره غنی آب کارستی که



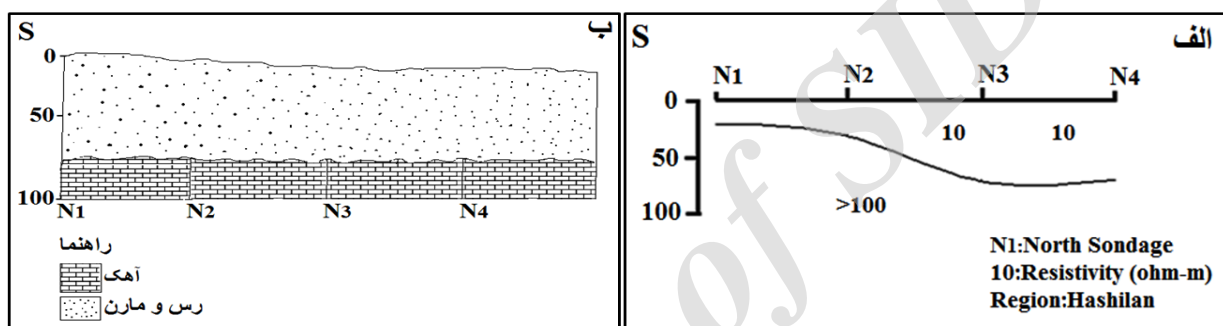
شکل ۱۰. الف: مقطع مقاومت ویژه حقیقی لایه‌ها؛ ب: مقطع زمین‌شناسی لایه‌ها؛ پروفیل ۱ دامنه جنوبی خورین داده‌های به دست آمده از بررسی‌های ژئوفیزیکی

## تفسیر پروفیل شماره ۲ در دامنه شمالی خورین

این پروفیل به موازات راه فرعی منتهی به روستای وزمله و دربرگیرنده سونداژهای  $N_1$  تا  $N_4$  است که مقطع مقاومت ویژه لایه‌ها و مقطع زمین‌شناسی آن، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

این دامنه تا عمق حدود ۱۰۰ متری کاوش شده است. در این پروفیل اثری از شکست و گسل دیده نمی‌شود و مقاومت تا عمق ۷۰ متری حدود ( $m\Omega$ )

۱۰ است که این عامل نشان از وجود لایه آب‌دار رسی و مارنی است. در این پروفیل به دلیل نبود تخلخل مؤثر رس، این آب قابلیت انتقال پیدا نمی‌کند و محدوده آن دارای پتانسیل آبی بسیار کمی است. از عمق حدود ۷۰ متری به پایین، منحنی‌ها مقاومت بیشتر از ( $m\Omega$ ) ۱۰۰ را نشان می‌دهند که نشان از وجود سنگ کف آهکی است که آب‌دهی بالایی ندارد.



شکل ۱۱. الف: مقطع مقاومت ویژه حقیقی لایه‌ها؛ ب: مقطع زمین‌شناسی لایه‌ها؛ پروفیل؛ ۲ دامنه شمالی خورین حاصل از داده‌های به دست آمده از بررسی‌های ژئوفیزیکی

## نتیجه‌گیری

نتایج پهنه‌های مشخص شده از لحاظ ظرفیت منابع آب کارست با تکنیک Gis و الگوی Fuzzy Logic/AHP حاکی از آن است که دامنه جنوبی کوه خورین به دلیل عملکرد شدید تکتونیک، وجود گسل‌ها و سیستم درز و شکاف بیشتر، لیتولوژی و اشکال کارست، شرایط مناسبی را برای تغذیه آبخوان‌های کارستی فراهم آورده و نسبت به دامنه شمالی، دارای پهنه‌های آب کارستی با پتانسیل بیشتری است که با عملیات ژئوالکتربیک و نتایج به دست آمده از پروفیل ۱ در دامنه جنوبی، صحت این امر تأیید شد. همچنین وجود گسل و آهک آب‌دار

خردشده در محل سونداژ ۲، احتمال وجود منابع آب کارست، با کیفیت بهتر و دبی بیشتر در این دامنه را فراهم کرده است. اما دامنه شمالی به دلیل شرایط تغذیه کمتر، دارای پهنه‌هایی با پتانسیل کم از لحاظ منابع آب کارست است که عملیات صحرائی، برداشت و تفسیر داده‌ها در پروفیل ۲ در این دامنه، صحت این موضوع را نیز اثبات کرد. در خاتمه، محل سونداژ ۲ در دامنه جنوبی، بر روی مخروط افکنه روستای جلوگیره برای حفاری، کنترل وجود پدیده کارست‌شدگی و ذخیره‌سازی احتمالی منابع آب کارستیک به کارشناسان پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- محمودی، فرج اله، ملکی، امجد (۱۳۸۰)، تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون - پراو (کرمانشاه)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۰، صص ۹۳-۱۰۵.
- میقاتی، موسی رضا (۱۳۸۴)، شناسایی محل و راستای شکستگی‌ها با آرایه مربعی در اکتشافات ژئوالکترونیک، استاد راهنما: میرستار مشین‌چی اصل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، گروه ژئوفیزیک.
- نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ قلعہ شاخانی، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، چاپ دوم، ۱۳۷۴.
- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کامیاران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، وزارت صنایع و معادن.
- یوسفی سنگانی، کیوان، محمدزاده، حسین، اکبری، مرتضی (۱۳۹۳)، ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با روش تلفیق فازی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، مطالعه موردی: شمال خاوری رشته‌کوه‌های هزار مسجد، استان خراسان رضوی، فصلنامه بین‌المللی پژوهشی منابع آب و توسعه، سال دوم، شماره ۴، پاییز ۱۳۹۳، صص ۱۲۷-۱۴۱.
- Dibi, D., I. Doumouya. A. Brice konan. (2010). Assessment of the Groundwater Potential Zone in the Hard Rock Through the Application of GIS, the case of Aboisso Area (South-East of Cote d'Ivoire), Journal of Applied Science, Vol. 10: 2058-2067.
- Gupta, M., P. k. Srivastava. (2010). Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India. Water International, 35(2): 233-245.
- Kumar, U., B. Kumar and M. Neha. ( 2013). Groundwater Prospects Zonation Based on RS and GIS Using Fuzzy Algebra in Khoh River Watershed, Pauri-Garhwal District,
- افراسیابیان، احمد (۱۳۷۲)، مطالعات هیدرولوژی کارست در حوضه آهکی مهارلو، دومین سمینار علمی مطالعات منابع آب، مجموعه مقالات، صص ۱۳۷-۱۲۶.
- آغاسی، عبدالوحید، افراسیابیان، احمد (۱۳۷۸)، هیدرولوژی کارست، مرکز تحقیقات کارست کشور، تهران.
- حسینی، فاطمه‌سادات، طباطبایی، سیدحامد (۱۳۹۱)، پتانسیل منابع آب زیرزمینی جدید با استفاده از الگوی calculation و منطق فازی، مطالعه موردی: طبس، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی، صص ۹-۱.
- رحیمی، داریوش (۱۳۸۹)، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت شهرکرد)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۰، صص ۱۴۲-۱۲۷.
- عادلی، محسن، ضیائی‌ان، پرویز، شکیبا، علیرضا (۱۳۹۱)، شناسایی منابع آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور و (Gis مطالعه موردی: شهرستان گرگان)، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی، صص ۳۱-۲۰.
- قدسی‌پور، سیدحسن (۱۳۹۰)، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- محمودی، ذکیه، رنگرن، کاظم، علیجانی، فرشاد (۱۳۸۵)، ارائه مدل جدید DEFLOGIC جهت پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی کارستی در محیط GIS، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.

- Sener, E., A. Davraz and M. Ozcelik. (2005). An intergration of GIS and remote sensing in groundwater investigations, A case study in Burdur, Turkey. *J. Hydrogeology*, Vol.13: 826-834.
- Senthil Kumar, G.R., K. Shankar. (2014). Assessment of Groundwater Potential Zones Using GIS, American V-King Scientific Publishing, Vol. 2:1-10.
- Srivastava, P.K., A. Bhattacharya. (2006). Groundwater assessment through an integrated approach using remote sensing, GIS and resistivity techniques: a case study from a hard rock terrain. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27: 4599 – 4620.
- Telford, W. M., L. P. Geldart and E. Sherifer. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University press, Pp. 1- 760
- Waikar, M.L., A. P. Nilawar. (2014). Identification of Groundwater Potential Zone using Remote Sensing and GIS Technique, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 3:12163-12174.
- Uttarakhand, India. *Global Perspectives on Geography (GPG)*, Vol. 1: 37-45.
- Mishra, R.C., Ch. Biju and R.D. Naik. (2010) *Remote Sensing and GIS for Groundwater Mapping and Identification of Artificial Recharge Sites, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics: Progress in Modeling and Applications, Proceedings of Sessions of GeoShanghai, China*, Vol.14: 216-223.
- Preeja, K. R., J. Sabu. T. Jobin and H. Vijith. (2011). Identification of a Tropical River Basin (Kerala, India) Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 39(1): 83-94.
- Rather, J. A., Z.R. Andrabi. (2012) *Fuzzy Logic Based GIS Modeling for Identification of Ground Water Potential Zones in the Jhagrabaria Watershed of Allahabad District, Uttar Pradesh, India*, *Journal of Advances in Remote Sensing and GIS*, Vol. 1: 217-233.
- Sajjad, H., M. Iqbal and F.A. Bhat. (2014) *Integrating Geospatial and Geophysical Information for Deciphering Groundwater Potential Zones in Dudhganga Catchment, Kashmir Valley, India*, *American Journal of Water Resources*, Vol. 2: 18-24.