

## پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شاهرود- بسطام)

داریوش رحیمی<sup>۱</sup>  
سیدحجت موسوی<sup>۲</sup>

### چکیده

روند روبه‌رشد شهرستان شاهرود در سال‌های اخیر، راهبرد مدیریت منابع آب در این منطقه را بیش از پیش ایجاب می‌کند. یکی از راهکارهای مدیریتی منابع آب، شناسایی مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف و بهره‌برداری از آنها با توجه با ظرفیتشان می‌باشد. هدف از این پژوهش پهنه‌بندی مناطق پتانسیل آبی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام با استفاده از عوامل موثر در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، از طریق مدل AHP و تکنیک GIS است. جهت نیل به اهداف از معیارهای زمین‌شناسی، اقلیمی، ژئومورفولوژی و هیدرولوژی بهره‌گیری شد و در مجموع پنج منطقه پتانسیلی بالا، خوب، متوسط، کم و بدون پتانسیل شناسایی گردید. در پایان برای اطمینان از نتیجه نهایی، لایه پتانسیلی منطقه مطالعاتی به سه روش Raster Weighed Overlay, Calculator و Weighted Sum تهیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بین پنج منطقه پتانسیلی معرفی شده حداکثر مساحت پهنه پتانسیل بالا در روش نخست و حداقل مساحت آن در روش دوم مشخص شده است. اما روش سومی حداقل بین دو روش قبلی بوده و نتایج آن از اطمینان بالاتری برخوردار است. پهنه پتانسیل بالا بیشتر منطبق بر رسوبات آبرفتی درشت دانه دوران چهارم و مخروطه افکنه‌های پایکوهی است. پهنه بدون پتانسیل یکی منطبق بر حداکثر ارتفاعات و دیگری منطبق بر مناطق کم ارتفاع رسی و ماری می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در طرح‌های مدیریت محیط منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از بهره‌کشی بیش از توان آنها سازنده باشد.

**واژگان کلیدی:** شاهرود- بسطام، پتانسیل‌یابی، منابع آب زیرزمینی، مدل AHP، تکنیک GIS.

۱- استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه اصفهان.

۲- دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان.

## مقدمه

منابع آب زیرزمینی از یکسو به دلیل شیرین بودن، ترکیبات ثابت شیمیایی، دمای ثابت، ضریب آلودگی کمتر و سطح اطمینان بالاتر در تأمین آب به عنوان یک منبع قابل اتکا به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب شده و از سوی دیگر با تأثیر بر توان اکولوژیکی منطقه یک پدیده مهم و موثر در توسعه اقتصادی، تنوع اکولوژیکی و سلامت جامعه به حساب می‌آیند. آب‌های زیرزمینی فقط حدود ۰.۴٪ از مجموعه آب‌هائی را که فعالانه در چرخه آب‌شناختی دخالت دارند، تشکیل می‌دهند. با این وجود حدود ۵۰٪ جمعیت دنیا از نظر آب شرب متکی به این آب‌ها هستند (طاهری تیزرو، ۱۳۸۴: ۳).

کشور ایران سرزمینی است خشک و نیمه‌خشک با نزولات جوی بسیار اندک، به طوری که میانگین بارش سالیانه آن کمتر از یک سوم متوسط بارندگی سالیانه جهان است. این گستره بزرگ جغرافیایی با مشخصات هیدرولوژیکی خاص نظیر حجم نزولات جوی ۴۱۳، تبخیر و تعرق ۲۹۶ و حجم آب قابل دسترس ۱۱۷ میلیارد، سرانه آب تجدید شونده ۱۹۰۰ و مصرف ۳/۴ میلیارد مترمکعب که حدود ۶۵٪ آن از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌گردد، با شرایط سخت و بفرنجی در زمینه تأمین آب روبرو است (علیزاده، ۱۳۸۹: ۳۳). در سال‌های اخیر با افزایش روز افزون جمعیت، توسعه صنعت، رشد شهرنشینی و به تبع آن افزایش تقاضا به مواد غذایی و تولیدی، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی چندین برابر شده به طوری که میزان بهره‌کشی از آبخوان‌های زیرزمینی بیشتر از میزان تغذیه این منابع است، به عبارت دیگر ورودی سیستم آب زیرزمینی از خروجی آن کمتر شده و سیستم با بیلان منفی و پسخوراند مثبت در حال اضمحلال و نابودی است. با تداوم این عمل، سطح آب‌های زیرزمینی روز به روز افت کرده و سرانجام به جایی خواهد رسید که دیگر آبی برای استخراج وجود نخواهد داشت. بنابراین شناسایی این منابع و استفاده بهینه از آن به معنای برداشت پایدار و همیشگی از این ثروت خدادادی طبیعی است.

شهرستان شاهرود با مساحت ۵۱۷۶۲ کیلومترمربع و جمعیت ۲۳۴۷۳۸ نفری (درگاه ملی آمار ایران، سرشماری ۱۳۸۵) یکی از بزرگ‌ترین کانون جمعیتی استان سمنان است که در

طی سال‌های اخیر روند توسعه چشم‌گیری داشته است. بیش از ۵۰٪ از منابع آب مورد نیاز این شهرستان از آبهای زیرزمینی دشت شاهرود- بسطام با مساحت ۷۶۰۳/۲۵ کیلومترمربع تامین می‌شود. با توجه به اینکه دشت شاهرود- بسطام در بردارنده سه کانون جمعیتی شاهرود، بسطام و مجن و ۸۵٪ جمعیت کل شهرستان شاهرود است، بنابراین شناسایی، پتانسیل‌یابی و پهنه‌بندی منابع آب زیرزمینی در این دشت از اهمیت بالایی برخوردار است.

مطالعاتی متعددی توسط فاروق<sup>۱</sup> (۱۹۹۲) (۱۹۹۸) (۲۰۰۶) در کشورهای مصر، عمان و امارات متحده عربی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور بر روی منابع آب زیرزمینی صورت گرفته است. خان و شارما<sup>۲</sup> (۲۰۰۳: ۴۰۳) با ترکیب داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه‌های آبخیز کشور هند را تهیه نموده‌اند. چینی و بن‌ماممو<sup>۳</sup> (۲۰۱۰: ۸۰۱) به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های عددی توان بازیابی منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. میشرا و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۰: ۲۱۶) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، لایه‌های زمین‌شناسی، کاربری ارضی و مشخصات ژئومورفیک، پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوضه رودخانه باهاما را تعیین نموده‌اند. مطالعات رنگزن و آبشیرینی (۱۳۸۳) و آبشیرینی و همکاران (۱۳۸۷) در زمینه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به کمک GIS در محدوده تاقدیس پایده در همین راستا صورت گرفته است.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته لزوم مطالعه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام مشخص می‌گردد. بنابراین این پژوهش سعی دارد تا با استفاده از تحلیل پارامترهای تأثیرگذار در نفوذپذیری خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، تهیه لایه‌برداری و رستری آنها، وزن‌دهی به مولفه‌ها از طریق روش تحلیل سلسله‌مراتبی و ترکیب لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3، بهترین منابع آبی منطقه را جهت بهره‌برداری بهینه و جلوگیری از بهره‌کشی بیش از توان آنها، تعیین و پهنه‌بندی کند. نتایج به دست

---

1- Farouk

2- Khan & Sharma

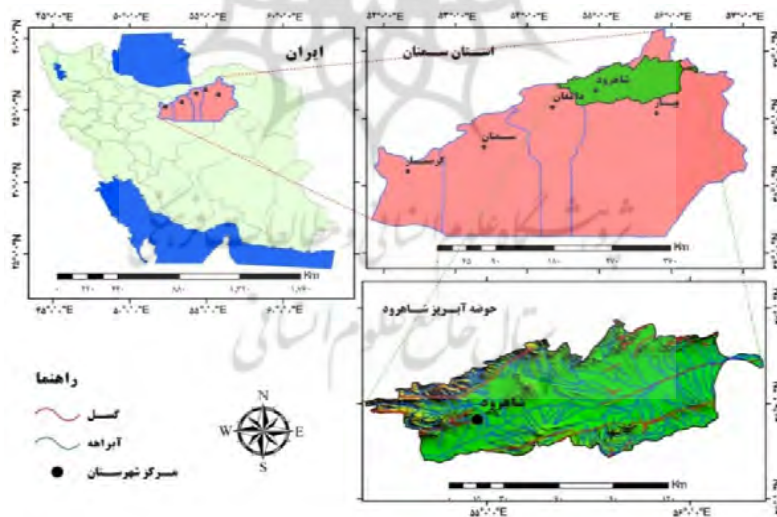
3- Chenini & Ben Mammou

4- Mishra et al.

آمده از این پژوهش در مدیریت محیط منابع و مناطق آبی محدوده مطالعاتی از اهمیت قابل توجهی برخوردار خواهد بود.

### منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه آبخیز شاهرود- بسطام می‌باشد که در شمال شهرستان شاهرود در استان سمنان و دامنه‌های جنوبی و جنوب شرقی البرز شرقی واقع شده است. حوضه آبخیز شاهرود- بسطام زیر حوضه کویر نمک (h<sup>۴</sup>/۷) است. کویر نمک نیز با مساحت ۲۲۴۳۷۰ کیلومتر مربع زیر حوضه ایران مرکزی (h<sup>۴</sup>) می‌باشد. حوضه ایران مرکزی سرزمین وسیعی با وسعت ۸۳۱۰۰۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که از ویژگی‌های این حوضه گسترش حداقل شبکه‌های آبراهه‌ای به علت خشکی بالا است (موحد دانش، ۱۳۸۳: ۱۸۳). حوضه آبخیز شاهرود - بسطام با مساحت ۷۶۰۳/۲۵ کیلومتر مربع در محدوده‌ای به عرض ۳۶ درجه تا ۳۷ درجه شمالی و طول ۵۴ درجه تا ۵۷ درجه شرقی گسترده شده است (شکل ۱).



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

## مواد و روش ها

ابتدا به کمک تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث محدوده مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت و تعیین حدود شد. سپس جهت پهنه‌بندی حوضه آبخیز شاهرود - بسطام از نظر پتانسیل منابع آب زیرزمینی مراحل زیر طی گردید:

### پارامترهای موثر و روش تهیه لایه‌های اطلاعاتی آنها

منابع آب زیرزمینی به صورت مستقیم و غیرمستقیم از نزولات آسمانی و جریان‌های سطحی پایدار تغذیه می‌شوند. بنابراین در این پژوهش جهت پی‌جویی مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف از معیارهای زمین‌شناسی (لیتولوژی، تراکم گسل و فاصله از گسل)؛ ژئومورفولوژی (طبقات ارتفاعی، شیب و جهت شیب)؛ اقلیمی (بارش، دما و ماندگاری برف) و هیدرولوژیکی (تراکم شبکه زهکشی و فاصله از آن) استفاده شده‌است (رنگزن و آبشیرینی، ۱۳۸۳؛ آبشیرینی و همکاران، ۱۳۸۷). در پایان نتیجه نهایی را به صورت نقشه پهنه‌بندی پتانسیل‌های آبی منطقه ارائه گردید. تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای پی‌جویی منابع آب زیرزمینی، در محیط نرم افزار ArcGIS 9.3 به صورت زیر انجام گرفت: لایه‌های برداری سنگ‌شناسی و گسل منطقه از طریق رقومی کردن نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی شاهرود تهیه شد. لایه‌های طبقات ارتفاعی، شیب و جهت شیب از روی مدل ارتفاعی رقومی منطقه تهیه گردید. لایه زهکشی از طریق رقومی کردن لایه آبراهه‌های اصلی و فرعی از روی نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی منطقه تهیه شد. لایه‌های هم‌دما و هم‌باران از طریق درون‌یابی به روش کریجینگ و رابطه خطی بین دما، ارتفاع و باران، ارتفاع تهیه گردید. لایه‌های رستری معیار و زیرمعیارها از طریق ابزار 3D Analysis و Special Analysis و تبدیل لایه‌های برداری منطقه به رستری صورت گرفت. داده‌های رستری امکان ضرب لایه‌های مختلف در وزنشان را برای کاربر فراهم می‌سازد. این عملیات از طریق ابزار Raster Calculator انجام شد.

### نحوه اجرای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است

که اولین بار توسط تی.ال. ساعتی<sup>۱</sup> (۱۹۸۰) مطرح شد. این روش بر اساس مقایسه زوجی عوامل بنا نهاده شده و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به مدیران می‌دهد. این تکنیک یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است و امکان تدوین مسأله را به صورت سلسله‌مراتبی فراهم می‌کند. همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی در مسأله را دارد (ساعتی، ۱۹۸۶؛ ۸۴۱؛ ۱۹۹۴؛ ۴۲۶). جهت نیل به اهداف مراحل زیر طی شد:

#### الف) تدوین ساختار سلسله‌مراتبی

ساختار سلسله‌مراتبی یک نمایش گرافیکی از مساله پیچیده واقعی می‌باشد که در راس آن هدف کلی مساله و در سطوح بعدی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها قرار دارند در این قسمت با تجزیه مسائل پیچیده، می‌توان آنها را به شکلی ساده که با ذهن و طبیعت انسان مطابقت داشته باشد، تبدیل نمود (کیمرن و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷: ۳۶۳). به طور کلی ساختار سلسله‌مراتبی ممکن است به صورت یکی از حالت‌های زیر طرح گردد (بوون<sup>۳</sup>، ۱۹۹۰: ۱۳۳؛ دایر و فورمن<sup>۴</sup>، ۱۹۹۱؛ مائو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۵: ۵۹۱):

۱- هدف - معیارها - زیرمعیارها - گزینه‌ها.

۲- هدف - معیارها - عوامل - زیر عوامل - گزینه‌ها.

در این پژوهش برای تدوین ساختار سلسله‌مراتبی از حالت اول استفاده شده که شامل سطوح زیر است (شکل ۲):

سطح ۱: که در راس سلسله‌مراتب قرار گرفته و هدف کلی یعنی پی‌جویی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام را شامل می‌شود.

1- Saaty, T.I.

2- Cimren et al.

3- Bowen

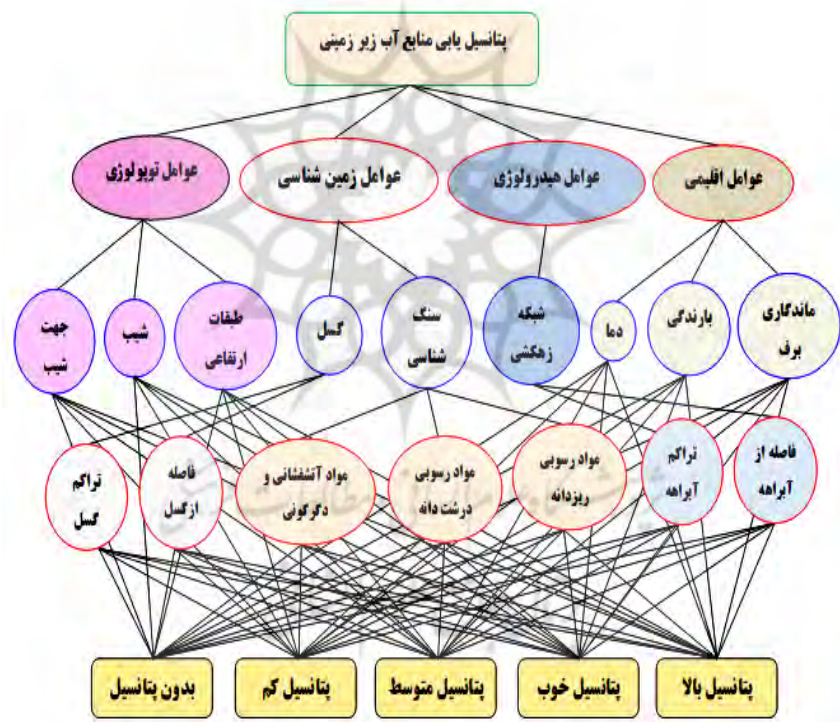
4- Dyer & Forman

5- Mauet al.

سطح ۲: این سطح معیارها را در بر گرفته و شامل عوامل موثر نظیر عوامل زمین شناسی، اقلیمی، ژئومورفولوژی و هیدرولوژی است.

سطح ۳: این سطح زیرمعیارها را در بر گرفته و شامل پارامترهای سنگ شناسی، تراکم و فاصله از گسل، بارش، دما، ماندگاری برف، طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، تراکم و فاصله از شبکه زهکشی است.

سطح ۴: این سطح گزینه‌ها، یعنی مناطق آب زیرزمینی از لحاظ پتانسیل را شامل می‌شود.



شکل (۲) ساختار سلسله‌مراتبی پتانسیل یابی منابع آب حوضه آبخیز شاهرود - بسطام

**ب) ارجحیت‌بندی پارامترها**

در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی عوامل به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه شده و بالاترین ارجحیت به لایه‌ای تعلق می‌گیرد که حداکثر تأثیر را در تعیین هدف دارد (لویز و زینک<sup>۱</sup>، ۱۹۹۱: ۲۰۲). در ارجحیت‌بندی معیارها از قضاوت‌های شفاهی که به صورت مقایسه‌ای بین فاکتورها صورت می‌گیرد، استفاده می‌شود. این قضاوت‌ها توسط ساعتی (۱۹۸۰) به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل شده که در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مقادیر ترجیحات برای مقایسه زوجی عوامل (قدسی‌پور، ۱۳۸۷: ۱۴)

| مقدار عددی | ترجیحات (قضاوت شفاهی)   |   |
|------------|-------------------------|---|
| ۹          | Extremely preferred     | کاملاً مرجح یا کاملاً مهم یا کاملاً مطلوب |
| ۷          | Very strongly preferred | ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی        |
| ۵          | Strongly preferred      | ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت قوی             |
| ۳          | Moderately preferred    | کمی مرجح یا کمی مهم تر یا کمی مطلوب       |
| ۱          | Equally preferred       | ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان           |
| ۸،۴،۲      | ترجیحات بین فواصل قوی   |   |

**ج) تهیه ماتریس نرمالیزه و بردار وزن پارامترها**

جهت محاسبه وزن نسبی پارامترها ابتدا باید مقادیر هر یک از ستون‌های ماتریس مقایسه زوجی را با هم جمع و هر عنصر در ماتریس مقایسه زوجی را به جمع ستون خودش تقسیم گردید تا ماتریس مقایسه زوجی نرمالیزه شود (رابطه ۱). سپس میانگین عناصر در هر سطر از ماتریس نرمالیزه را محاسبه نموده که در نتیجه آن بردار وزن ایجاد می‌شود (رابطه ۲). در این روابط  $m$ : تعداد ستون،  $n$ : تعداد سطر،  $a_{ij}$ : درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی و  $r_{ij}$ : درایه‌های ماتریس نرمالیزه به ازای گزینه  $i$  ام و شاخص  $j$  ام، و  $W_i$ : وزن گزینه  $i$  ام می‌باشد.



$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \text{رابطه (۱):}$$

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ij}}{n} \quad \text{رابطه (۲):}$$

#### د) تعیین امتیاز نهایی پارامترها

برای این کار از اصل ترکیب سلسله‌مراتبی که منجر به بردار اولویت با در نظر گرفتن همه قضاوت‌ها در تمامی سطوح سلسله‌مراتبی می‌شود، استفاده می‌گردد (مورینیو جیمز و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵: ۸۹؛ برتولینی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶: ۴۲۲). به عبارت دیگر امتیاز نهایی هر یک از گزینه‌ها از حاصل جمع تلفیق ضرایب لایه‌های معیارها و زیرمعیارها تعیین می‌شود (رابطه ۳). در این رابطه  $V_H$ : امتیاز نهایی گزینه  $Z$ ،  $W_K$ : وزن هر معیار و  $g_{ij}$ : وزن گزینه‌ها در ارتباط با معیارها می‌باشد.

$$V_H = \sum_{k=1}^n W_k (g_{ij}) \quad \text{رابطه (۳):}$$

#### و) محاسبه نرخ ناسازگاری

برای محاسبه نرخ ناسازگاری، ابتدا باید ماتریس مقایسه زوجی (A) در بردار وزن (W) ضرب گردد تا تخمین مناسبی از  $\lambda \max W$  به دست آید، به عبارتی  $A \times W = \lambda \max W$  باشد. با تقسیم مقدار  $\lambda \max W$  بر W مربوطه، مقدار  $\lambda \max$  محاسبه می‌شود. سپس مقدار شاخص ناسازگاری (I.I.) از طریق رابطه (۴) و نرخ ناسازگاری (I.R.) نیز با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد که در آن مقدار I.I.R (شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی) بر اساس تعداد درایه‌های ماتریس (n) نیز از جدول (۲) استخراج می‌شود (قدسی‌پور، ۱۳۸۸: ۷۲). اگر مقادیر نرخ ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد سازگاری ماتریس تصمیم‌گیری قابل

1- Moreno - Jimenez et al.

2- Bertolini et al.

قبول است و اگر بیشتر از ۰/۱ باشد بهتر است تصمیم‌گیرنده در قضاوت‌های خود تجدیدنظر کند (دی و رامچاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰: ۱۳۸۴).

$$I.I. = \frac{\lambda \max - n}{n - 1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$I.R. = \frac{I.I.}{I.I.R} \quad \text{رابطه (۵)}$$

جدول (۲) مقادیر *I.I.R* ماتریس‌های تصادفی

|              |   |   |      |     |      |      |      |      |      |      |
|--------------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| n            | ۱ | ۲ | ۳    | ۴   | ۵    | ۶    | ۷    | ۸    | ۹    | ۱۰   |
| <i>I.I.R</i> | ۰ | ۰ | ۰/۵۸ | ۰/۹ | ۱/۱۲ | ۱/۲۴ | ۱/۳۲ | ۱/۴۱ | ۱/۴۵ | ۱/۴۹ |

### یافته‌های تحقیق

از طریق ارجحیت‌بندی عوامل موثر در تغذیه آبخوان‌ها و پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز شاهرود- بسطام، ماتریس مقایسه زوجی و نرمالیزه با مرتبه ۱۶ برای معیارها و مرتبه ۱۶۹ برای زیرمعیارها شکل گرفت. در پایان با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری حسابی، وزن نسبی پارامترها محاسبه شد. نتایج حاصل از ارجحیت‌بندی، ماتریس‌های مقایسه زوجی و محاسبه بردار وزن عوامل موثر به صورت جداول (۳) و (۴) می‌باشد.

جدول (۳) ماتریس مقایسه زوجی و بردار وزن معیارها جهت پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز شاهرود- بسطام

| معیارها      | زمین‌شناسی | هیدرولوژی | اقلیم‌شناسی | ژئومورفولوژی | بردار وزن |
|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|-----------|
| زمین‌شناسی   | ۱          | ۴         | ۵           | ۸            | ۰/۵۹۲۰    |
| هیدرولوژی    | ۰/۲۵۰      | ۱         | ۳           | ۵            | ۰/۲۳۸۸    |
| اقلیم‌شناسی  | ۰/۲۰۰      | ۱/۳۳۳۳    | ۱           | ۳            | ۰/۱۱۷۷    |
| ژئومورفولوژی | ۰/۱۲۵۰     | ۰/۲۰۰     | ۰/۳۳۳       | ۱            | ۰/۰۵۲۵    |
| جمع          | ۱/۵۷۵۰     | ۵/۵۳۳۳    | ۹/۳۳۳       | ۱۷           | ۱         |

جدول (۴) ماتریس مقایسه زوجی و بردار وزن زیرمعیارها جهت پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز شاهرود- بسطام

| زیرمعیارها         | رسوبات درشت دانه | رسوبات ریزدانه | مواد آتشفشانی و دگرگونی | تراکم گسل | فاصله از گسل | تراکم زهکش | فاصله از زهکش | بارندگی | ماندگاری برف | دما   | طبقات ارتفاعی | شیب   | جهت شیب | بردار وزن |
|--------------------|------------------|----------------|-------------------------|-----------|--------------|------------|---------------|---------|--------------|-------|---------------|-------|---------|-----------|
| رسوبات درشت دانه   | ۱                | ۵              | ۷                       | ۴         | ۶            | ۲          | ۳             | ۰/۲۰۰   | ۰/۳۳۳        | ۰/۵۰۰ | ۵             | ۶     | ۸       | ۰/۱۱۴۳    |
| رسوبات ریزدانه     | ۰/۲۰۰            | ۱              | ۳                       | ۰/۳۳۳     | ۰/۵۰۰        | ۰/۱۶۶      | ۰/۲۰۰         | ۰/۱۱۱   | ۰/۱۲۵        | ۰/۲۰۰ | ۲             | ۳     | ۵       | ۰/۰۳۳۴    |
| آتشفشانی و دگرگونی | ۰/۱۴۲            | ۰/۳۳۳          | ۱                       | ۰/۲۰۰     | ۰/۵۰۰        | ۰/۱۲۵      | ۰/۱۶۶         | ۰/۱۱۱   | ۰/۱۲۵        | ۰/۱۶۶ | ۰/۵۰۰         | ۰/۵۰۰ | ۰/۳۳۳   | ۰/۰۱۲۸    |
| تراکم گسل          | ۰/۲۵۰            | ۳              | ۵                       | ۱         | ۳            | ۰/۲۰۰      | ۰/۳۳۳         | ۰/۱۴۲   | ۰/۲۰۰        | ۰/۲۵۰ | ۴             | ۳     | ۲       | ۰/۰۴۸۳    |
| فاصله از گسل       | ۰/۱۶۶            | ۲              | ۲                       | ۰/۳۳۳     | ۱            | ۰/۵۰۰      | ۰/۳۳۳         | ۰/۱۲۵   | ۰/۱۶۶        | ۰/۲۰۰ | ۰/۲۵۰         | ۰/۳۳۳ | ۰/۵۰۰   | ۰/۰۲۱۹    |
| تراکم زهکش         | ۰/۵۰۰            | ۶              | ۸                       | ۵         | ۲            | ۱          | ۵             | ۰/۵۰۰   | ۰/۳۳۳        | ۴     | ۵             | ۶     | ۷       | ۰/۱۲۸۴    |
| فاصله از زهکش      | ۰/۳۳۳            | ۵              | ۶                       | ۳         | ۳            | ۰/۲۰۰      | ۱             | ۰/۲۰۰   | ۰/۲۵۰        | ۰/۳۳۳ | ۳             | ۴     | ۶       | ۰/۰۶۷۴    |
| بارندگی            | ۵                | ۹              | ۹                       | ۷         | ۸            | ۲          | ۵             | ۱       | ۳            | ۵     | ۳             | ۵     | ۷       | ۰/۲۲۵۰    |
| ماندگاری برف       | ۳                | ۸              | ۸                       | ۵         | ۶            | ۳          | ۴             | ۰/۳۳۳   | ۱            | ۴     | ۵             | ۷     | ۸       | ۰/۱۷۳۴    |
| دما                | ۲                | ۵              | ۶                       | ۴         | ۵            | ۰/۲۵۰      | ۳             | ۰/۲۰۰   | ۰/۲۵۰        | ۱     | ۰/۵۰۰         | ۲     | ۳       | ۰/۰۷۸۹    |
| طبقات ارتفاعی      | ۰/۲۰۰            | ۰/۵۰۰          | ۲                       | ۰/۲۵۰     | ۴            | ۰/۲۰۰      | ۰/۳۳۳         | ۰/۳۳۳   | ۰/۲۰۰        | ۲     | ۱             | ۴     | ۶       | ۰/۰۵۰۷    |
| شیب                | ۰/۱۶۶            | ۰/۳۳۳          | ۲                       | ۰/۳۳۳     | ۳            | ۰/۱۶۶      | ۰/۲۵۰         | ۰/۲۰۰   | ۰/۱۴۲        | ۰/۵۰۰ | ۰/۲۵۰         | ۱     | ۳       | ۰/۰۲۶۹    |
| جهت شیب            | ۰/۱۲۵            | ۰/۲۰۰          | ۳                       | ۰/۵۰۰     | ۲            | ۰/۱۴۲      | ۰/۱۶۶         | ۰/۱۴۲   | ۰/۱۲۵        | ۰/۳۳۳ | ۰/۱۶۶         | ۰/۳۳۳ | ۱       | ۰/۰۱۹۶    |
| جمع                | ۱۳/۰۸            | ۴۵/۳۶          | ۶۲/۰۰                   | ۳۰/۹۵     | ۴۴/۰۰        | ۹/۹۵۱      | ۲۲/۷۸         | ۳/۵۹۹   | ۶/۲۵۱        | ۱۸/۴۸ | ۲۹/۶۶         | ۴۲/۱۶ | ۵۶/۸۳   | ۱         |

وزن نهایی پهنه‌های پتانسیلی در منطقه مطالعاتی از مجموع حاصلضرب لایه معیارها در وزنشان و همچنین وزن لایه معیارها از مجموع حاصلضرب لایه زیرمعیارها در وزنشان بدست می‌آید. نتایج حاصل از محاسبه وزن نهایی مناطق پتانسیلی به صورت روابط (۶) تا (۱۱) می‌باشد. در این روابط GI: عامل زمین‌شناسی؛ Hy: عامل هیدرولوژی؛ Cl: عامل اقلیمی؛ Gml: عامل ژئومورفولوژی؛ Li: سنگ‌شناسی؛ Sc: مواد رسوبی درشت دانه؛ Sf: مواد رسوبی ریزدانه؛ Im: مواد آتشفشانی و دگرگونی؛ Fdis: فاصله از گسل؛ Fden: تراکم

گسل؛ Sdis: فاصله از آبراهه؛ Sden: تراکم آبراهه؛ T: هم‌دما؛ P: هم‌بارش؛ Sp: ماندگاری بارش؛ SI: شیب؛ As: جهت شیب؛ EI: طبقات ارتفاعی؛ WgP: لایه نهایی پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی از نظر پتانسیل منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

$$\text{Li} = (0/1144 \text{ Sc}) + (0/324 \text{ Sf}) + (0/128 \text{ IM}) \quad \text{رابطه (۶):}$$

$$\text{Gl} = (\text{Li}) + (0/219 \text{ Fdis}) + (0/483 \text{ Fden}) \quad \text{رابطه (۷):}$$

$$\text{Hy} = (0/674 \text{ Sdis}) + (0/1284 \text{ Sden}) \quad \text{رابطه (۸):}$$

$$\text{Cl} = (0/789 \text{ T}) + (0/225 \text{ P}) + (0/1734 \text{ Sp}) \quad \text{رابطه (۹):}$$

$$\text{GML} = (0/507 \text{ EI}) + (0/269 \text{ SI}) + (0/196 \text{ As}) \quad \text{رابطه (۱۰):}$$

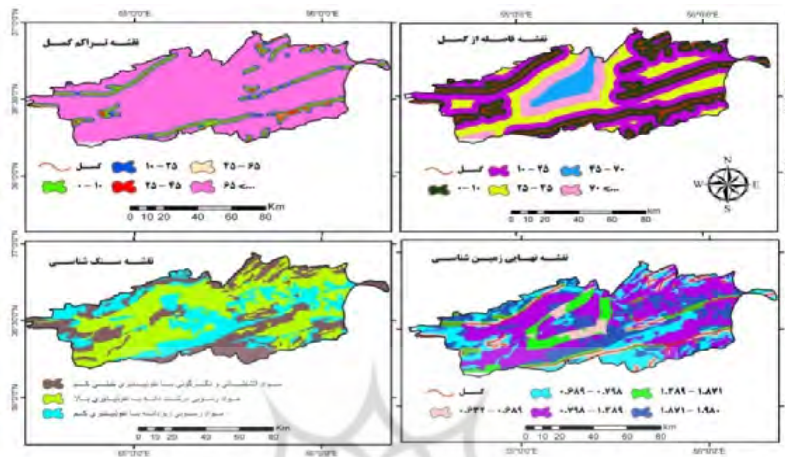
$$\text{WgP} = (0/591 \text{ Gl}) + (0/2388 \text{ Hy}) + (0/1177 \text{ Cl}) + (0/525 \text{ Gml}) \quad \text{رابطه (۱۱):}$$

نرخ ناسازگاری برای ماتریس پارامترهای موثر با استفاده از روش تقریبی میانگین‌گیری حسابی محاسبه گردید که به صورت جدول (۵) می‌باشد. نتایج جدول مزبور سازگاری ماتریس‌های عوامل موثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام را تأیید می‌کند.

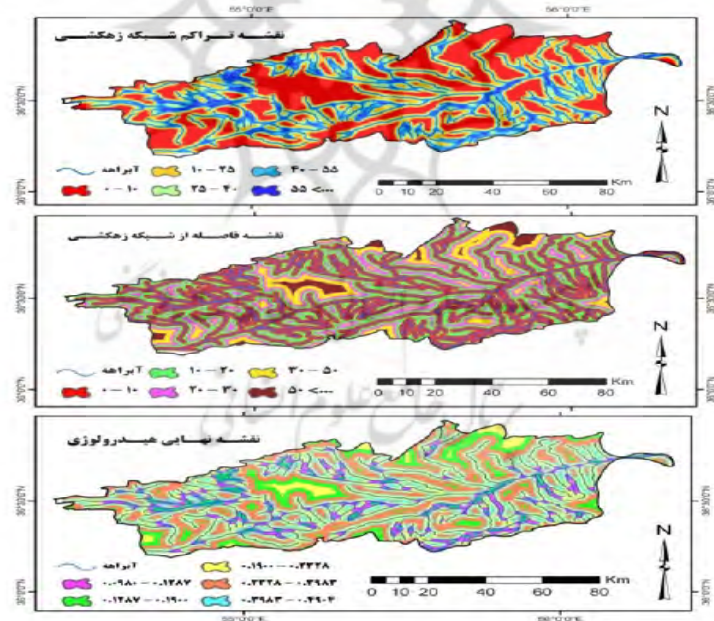
جدول (۵) مقادیر نرخ ناسازگاری ماتریس‌های پارامترهای موثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام

| نوع ماتریس        | مقدار نرخ ناسازگاری | وضعیت ماتریس |
|-------------------|---------------------|--------------|
| ماتریس معیارها    | ۰/۰۰۵۳              | سازگار       |
| ماتریس زیرمعیارها | ۰/۰۱۲۹              | سازگار       |

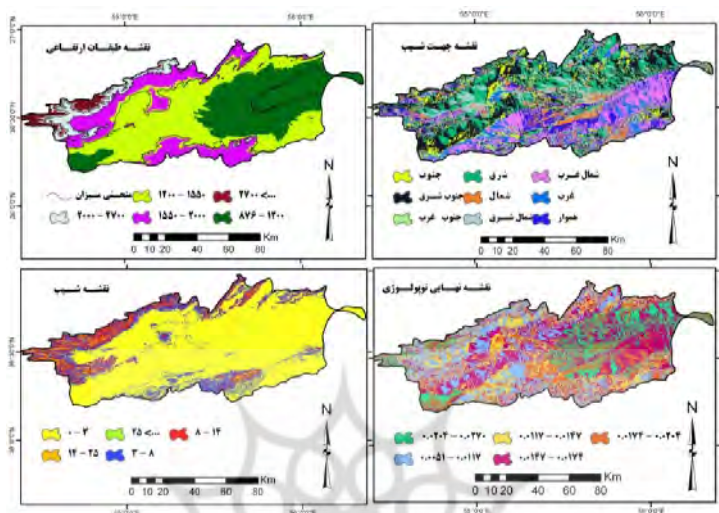
نتایج حاصل از ترسیم لایه‌های رستری عوامل موثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و اعمال وزن آنها در لایه‌های متناظرشان به صورت اشکال (۳) تا (۷) می‌باشد.



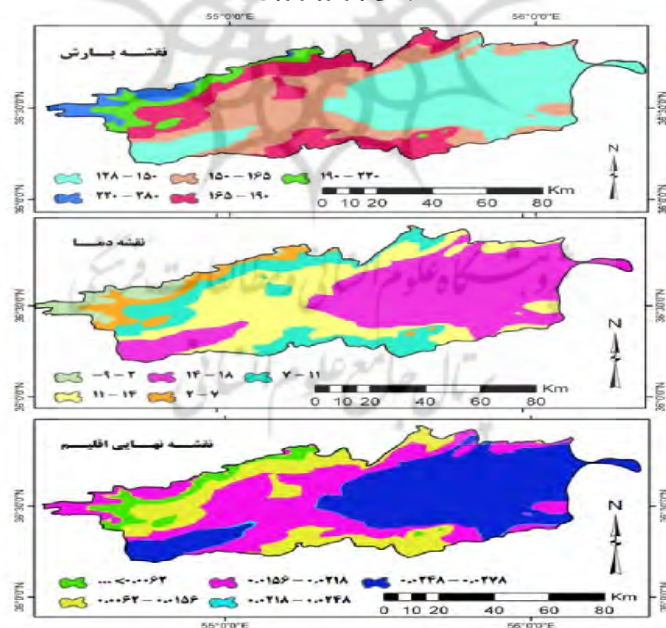
شکل (۳) نقشه‌های حاصل از ضرب لایه‌های تراکم گسل، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی در وزن‌شان و تهیه نقشه نهایی زمین‌شناسی



شکل (۴) نقشه‌های حاصل از ضرب لایه‌های تراکم شبکه زهکشی و فاصله از شبکه زهکشی در وزن‌شان و تهیه نقشه نهایی هیدرولوژی

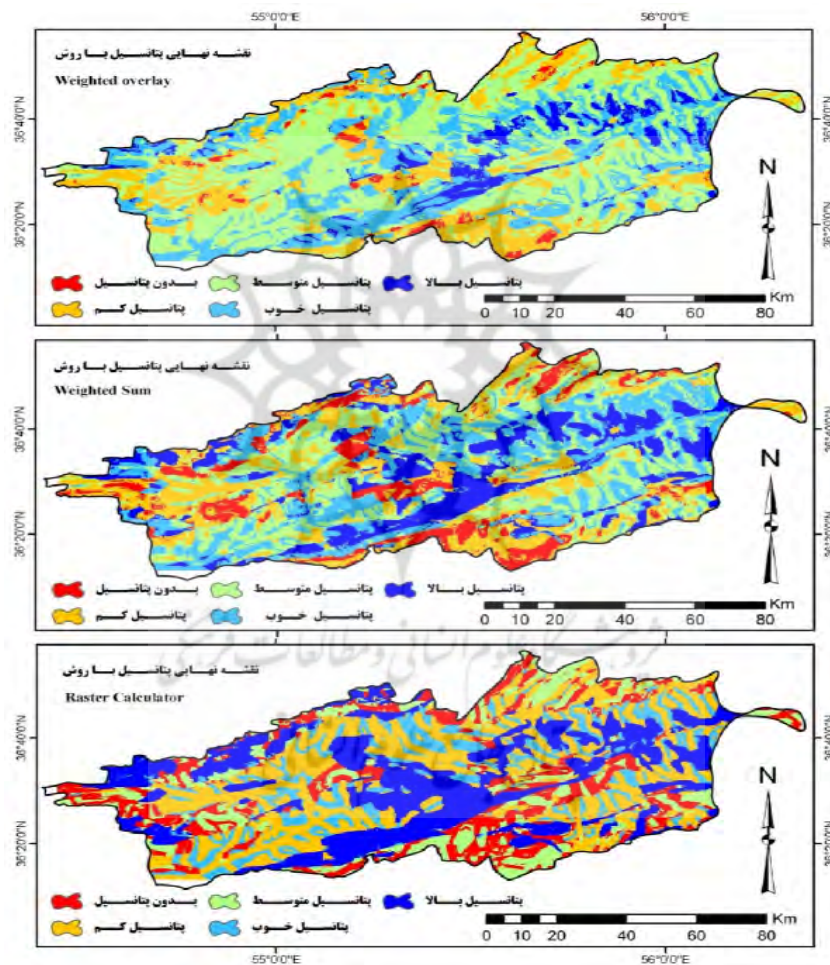


شکل (۵) نقشه‌های حاصل از ضرب لایه‌های طبقات ارتفاعی، شیب و جهت شیب در وزن‌شان و تهیه نقشه نهایی ژئومورفولوژی



شکل (۶) نقشه‌های حاصل از ضرب لایه‌های باران و دما در وزن‌شان و تهیه نقشه نهایی اقلیم‌شناسی

وزن نهایی لایه پی‌جویی منابع آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی از طریق ضرب لایه‌های معیار و زیرمعیارها در وزنشان و حاصل جمع نهایی آنها صورت گرفته است. برای اطمینان از جواب نهایی، لایه هدف به سه روش Raster Calculator، Weighed Overlay و Weighed Sum تهیه و نتایج آن نیز گزارش شده است (شکل ۷).



شکل (۷) نقش‌های نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه شاهرود- بسطام به سه روش جداگانه

## بحث و نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر با افزایش جمعیت، نیاز به آب سالم و قابل شرب روند صعودی داشته و منابع آب سطحی نیز با مسئله آلودگی و تغییرات حجمی روبرو هستند، در نتیجه نگاه برنامه‌ریزان به سوی منابع آب زیرزمینی که منابع حیاتی آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند، سوق یافته است. راه‌های مقابله با کم‌آبی در دو راهبرد مدیریت صحیح منابع آب و استحصال از منابع جدید خلاصه شده است (خیرخواه زرکش و همکاران، ۱۳۸۷: ۹۴). در منطقه مطالعاتی به دلایل خاص جغرافیایی و اقلیمی، راهکار مدیریت منابع آبی موجود نتایج مطلوب‌تری دربرخواهد داشت. به عبارت دیگر برای مقابله با کم‌آبی در منطقه، به علت کمبود ریزش‌های جوی و توزیع نابرابر زمانی و مکانی بارش، مدیریت منابع آب زیرزمینی از اولویت بالایی برخوردار است. از موارد مدیریتی منابع آب زیرزمینی پذیرفتن محدودیت و تجدیدپذیری طولانی مدت آن، بهره‌برداری بهینه و فرهنگ‌سازی در جهت استفاده بجا از منابع آب می‌باشد.

هدف از این پژوهش شناسایی و پهنه‌بندی بهترین پتانسیل مناطق آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام با استفاده از عوامل موثر در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، از طریق روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تکنیک GIS می‌باشد. تکنیک GIS، به علت توانایی بالای آن در مدیریت حجم عظیمی از اطلاعات فضایی، ابزاری نیرومند برای این نوع مطالعات اولیه به شمار می‌رود. علاوه بر این، مدل AHP توسط برنامه‌ریزان برای حل معضلات پیچیده‌ای که در امر مدیریت با آن روبرو هستند، به کار گرفته می‌شود. بنابراین تلفیق تکنیک GIS و مدل AHP می‌تواند به عنوان روشی قدرتمند جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به یافته‌های تحقیق می‌توان گفت که کاربرد توأمان سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل تحلیل سلسله‌مراتبی در برنامه‌ریزی محیطی از اهمیت بسزایی برخوردار است. استفاده از این روش، علوم برنامه‌ریزی محیطی را به صورت کاربردی‌تر و موفق‌تر از همیشه در زمینه مدیریت بحران‌های محیطی مطرح می‌سازد. در نتیجه بهره‌گیری از این روش در مدیریت محیط به ژئومورفولوژیست‌ها و دیگر برنامه‌ریزان محیطی توصیه می‌گردد.



با توجه به ویژگی‌های هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، اقلیمی و ژئومورفولوژیکی هر منطقه و اهداف پژوهش، می‌توان گفت که پارامترهای موثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی متنوع و متفاوت هستند. این پژوهش سعی نموده تا مهمترین عوامل موثر بر نفوذپذیری و تغذیه سفره‌های زیرزمینی را مدنظر قرار دهد. نتیجه حاصله به صورت معرفی مهم‌ترین عوامل به صورت معیارها، زیرمعیارها در ساختار سلسله‌مراتبی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه شاهرود- بسطام در شکل (۲) و جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

نتایج حاصل از پی‌جویی منابع آب در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام نشان می‌دهد که می‌توان این حوضه را به پنج پهنه پتانسیلی تقسیم نمود که هر پهنه از لحاظ عوامل مورد بررسی در مساحت و دامنه‌های مختلفی قرار دارد (جدول ۶). به طوری که منطقه پتانسیلی بالا بیشتر منطبق بر ارتفاعات ۹۰۰ تا ۱۶۰۰ متر، به علت شیب کمتر نسبت به ارتفاعات، موارد رسوبی درشت‌دانه و گسترش مخروطه افکنه‌های پایکوهی، شبکه زهکشی متراکم‌تر، تبخیر کمتر و در نهایت امکان نفوذ بیشتر آب‌های سطحی می‌باشد. منطقه آبی بدون پتانسیل دارای وضعیت متناقضی نسبت به منطقه پتانسیل بالا می‌باشد به طوری که این پهنه با وجود اینکه در اکثر مواقع دارای حداکثر بارش در ارتفاعات است اما پتانسیل آب زیرزمینی آن کم است. این به دلیل قرار گرفتن آن در حداکثر ارتفاعات و نفوذ کم آب‌های سطحی به دلیل مواد نفوذناپذیر، حداکثر شیب و خروج آب نفوذی می‌باشد.

جدول (۶) مساحت پهنه‌های پتانسیلی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز شاهرود- بسطام به کیلومتر مربع

| پهنه بندی حوضه از لحاظ پتانسیل | مساحت پهنه در روش Raster Calculator | مساحت پهنه در روش Weighed sum | مساحت پهنه در روش Weighed Overlay |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| پتانسیل بالا                   | ۲۰۷۶/۷۶                             | ۱۲۷۵/۴۶                       | ۵۰۷/۳۷                            |
| پتانسیل خوب                    | ۱۰۴۲/۹۵                             | ۱۹۳۲/۳۹                       | ۲۰۰۳/۳                            |
| پتانسیل متوسط                  | ۹۹۱/۶۵                              | ۱۹۷۱/۷۳                       | ۳۳۷۵/۱                            |
| پتانسیل کم                     | ۲۲۴۴/۷                              | ۱۶۶۶/۵۱                       | ۱۵۷۸/۳                            |
| بدون پتانسیل                   | ۱۲۴۶/۵۹                             | ۷۵۷/۶                         | ۱۳۸/۵۸                            |

در بین مناطق پتانسیلی فوق، حداکثر مساحت پهنه پتانسیل بالا در روش Raster Calculator و در مقابل حداقل مساحت آن در روش Weighed Overlay مشخص شده است. اما روش Weighted Sum حداقل مساحت بین دو روش قبلی است و نتایج حاصل از آن از اطمینان بالاتری برخوردار است. در پایان می‌توان گفت که برداشت از آبخوان‌های زیرزمینی واقع در مناطق پایکوهی و میانکوهی حوضه آبخیز شاهرود- بسطام (مناطق پتانسیل بالا در شکل ۷) امکان‌پذیر می‌باشد اما این بهره‌برداری باید بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی، سطح ایستابی، ظرفیت و میزان ورود و خروجی سیستم آبی سفره‌ها صورت گیرد.



## منابع

- ۱- آبشیرینی، احسان؛ کاظم، رنگزن و سعدی خورشیدی (۱۳۸۷)، «پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش همپوشانی شاخص وزنی در محیط GIS»، همایش ژئوماتیک ۸۷ و چهارمین همایش یکسان سازی نام‌های جغرافیایی، ۲۲ و ۲۳ اردیبهشت، تهران.
- ۲- خیرخواه زرکش و همکاران (۱۳۸۷)، «استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی در اولویت‌بندی مکان‌های مناسب احداث سد زیرزمینی (مطالعه موردی: دامنه شمالی کوه کرکس-نطنز)»، *مجله منابع طبیعی پژوهش و سازندگی*، شماره ۷۹، صص ۹۳-۱۰۱.
- ۳- رنگزن، کاظم، احسان آبشیرینی، (۱۳۸۳)، «استفاده از سنجش از دور و GIS در بررسی ارتباط عوامل ساختاری، لیتولوژیکی و توپوگرافی در برنزود چشمه‌های طاقدیسی پابده دشت لالی»، بیست و سومین همایش علوم زمین، ۲۶ تا ۲۸ بهمن، تهران.
- ۴- طاهری تیزرو، عبد...، ۱۳۸۴، «*آب‌های زیرزمینی*»، کرمانشاه، دانشگاه رازی، انتشارات فن آوران، چاپ اول.
- ۵- علیزاده، امین (۱۳۸۹)، «*اصول هیدرولوژی کاربردی*»، مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ سی و یکم.
- ۶- قدسی پور، حسن (۱۳۸۷)، «*فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، تهران*»، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ پنجم.
- ۷- موحد دانش، علی اصغر (۱۳۸۳)، «*هیدرولوژی آب‌های سطحی*»، تهران، انتشارات سمت.
- 8- Bertolini, M., Braglia, M., & Carmignani, G., (2006), "Application of the AHP Methodology in Making a Proposal for a Public Work Contract", *International Journal of Project Management*: 24, Pp. 422-430.
- 9- Bowen, W.M., (1990), "Subjective Judgments and Data Environment Analysis in Site Selection, Computer", *Environment and Urban Systems*, Vol. 14, Pp.133-144.

- 10- Chenini, I. and Ben Mammou, A., (2010) "Groundwater Recharge Study in Arid Region: An Approach Using GIS Techniques and Numerical Modeling", *Computers & Geosciences*, 36, Pp. 801-817.
- 11- Cimren, E., Catay, B., Budak, E., (2007), "Development of a Machine Tool Selection System Using AHP", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35, 363-376.
- 12- Dey, P.K., & Ramcharan, E.K., (2000), "Analytic Hierarchy Process Helps Select Site for limestone Quarry Expansion in Barbados", *Journal of Environmental Management*: 88, Pp. 1384-1395.
- 13- Dyer, R.F., Forman, E.H., (1991), "*An Analytical Approach to Marketing Decisions*", Prentice Hall, USA.
- 14- Farouk El-Baz, Lynne Fielding (1992), "*Groundwater Potential of the Sinai Peninsula, Egypt, Boston University*", Center for Remote Sensing Boston University.
- 15- Farouk, E.B., Ozdogan, M., (2006), "Use of Space Images for Groundwater Exploration in the Northern United Arab", Center for Remote Sensing Boston University.
- 16- Farouk, E.B., Ledwith, M., (2000), "Using Satellite Images for Groundwater Exploration in the Sultanate of Oman", Center for Remote Sensing Boston University.
- 17- Khan, MA; Sharma, M., (2003), "Estimation of Groundwater Potential in Indian arid Environment Using Isopach Mapping Technique", *Journal Geol. Soc. India*, V. 61, Pp. 403-410.
- 18- Lopez, H.J., & Zink, J.A., (1991), "GIS-assisted Modelling of Soil-induced Mass Movement Hazards: A Case Study of the Upper Coello river Basin", Tolima, Colombia, *ITC Journal*: 4, Pp. 202-220.
- 19- Mau, J., and et al, (2005), "Siting Analysis of Farm-based Centralized Anaerobic Digester Systems for Distributed Generation Using GIS, *Biomass and Bio Energy*, 28, pp. 591-600.
- 20- Mishra, R.C.; Biju Chandrasekhar; Naik, R.D., (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, Pp. 216-223.
- 21- Moreno-Jiminez, J.M., Joven, J.A., Pirla, A.R., & Lanuza, A.T., (2005), "A Spreadsheet Module for Consistent Consensus Building in AHP Decision Making", *Journal of Group Decision and Negotiation*, Vol. 14, Pp. 89-108.
- 22- Saaty, T.L., (1980), "*The Analytical Hierarchy Process, Pining Priority, Resource Allocation*", RWS Publication, USA.
- 23- Saaty, T.L., (1986), "Axiomatic Foundation of Analytical Hierarchy Process", *Management Science*, Vol. 31, No. 7, Pp. 841-855.
- 24- Saaty, T.L., (1994), "Highlights and Critical Points in the Theory and Application of the Analytical Hierarchy Process", *European Journal of Operational Research*, Vol. 74, Pp. 426-447.