



## پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد تلفیقی AHP و Fuzzy Topsis

### مطالعه‌ی موردی: دشت سیلاخور

محمد سعیدی<sup>۱</sup>، مهدی کماسی<sup>۲\*</sup>، شهاب حسن پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیتاله العظمی بروجردی(ره)، بروجرد، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیتاله العظمی بروجردی(ره)، بروجرد، ایران

۳- مربی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیتاله العظمی بروجردی(ره)، بروجرد، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۶

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸

### چکیده

طی چند دهه‌ی گذشته، در نتیجه افزایش جمعیت، صنعتی شدن، شهرنشینی و ... تقاضا برای آب افزایش یافته که عمده‌ی این نیاز با بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تأمین گردیده است. از این رو، بایستی عدم قطعیت موجود در تقاضا و تأمین آب را با مدیریت صحیح آب‌های زیرزمینی، با تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی به حداقل رساند. در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از روش ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس فازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقاط دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی در دشت سیلاخور را تعیین نمود. در این راستا، یازده لایه‌ی موضوعی شامل لایه‌های لیتولوژی، بارش، پوشش گیاهی، تراکم و فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، دما، کاربری اراضی، تراکم و فاصله از آبراهه براساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آماری تهیه و در ایجاد نقشه‌ی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شد. نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در پنج طبقه شامل پتانسیل زیاد، خوب، متوسط، کم و خیلی کم پهنه‌بندی گردید. بر این اساس نقاط دارای پتانسیل زیاد تا متوسط بیشتر در مرکز و جنوب غربی دشت قرار گرفته و منطبق بر نواحی آبرفت‌های کواترنری و سازندهای سخت کربناته می‌باشد. اعتبار سنجی توسط تعداد چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه انجام شد که نتایج بدست آمده بیانگر آن است که، استفاده از رویکرد تلفیقی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس فازی در پتانسیل‌یابی با موقعیت چاه‌ها همخوانی خوبی دارد، به طوری که حدود ۸۷٪ از چاه‌های بهره‌برداری در مناطقی با پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا زیاد قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** پتانسیل‌یابی، آب زیرزمینی، تاپسیس فازی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، دشت سیلاخور

## ۱- مقدمه

آب زیرزمینی یک منبع طبیعی و حیاتی برای تأمین نیاز شرب در محیط‌های شهری و روستایی است. در حال حاضر، آب‌های زیرزمینی حدود ۳۴٪ کل مصرف سالانه آب را تأمین می‌کنند و یکی از منابع مهم آب شیرین به شمار می‌آید (ماگیش و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲: ۱۸۹). در ایران، رشد سریع جمعیت، وقوع خشکسالی‌های متناوب و توسعه کشاورزی، موجب کاهش آب‌های سطحی شده و تقاضا برای منابع آب زیرزمینی را افزایش داده است. در سال‌های اخیر نیاز به منابع آب زیرزمینی در دشت سیلاخور موجب افزایش حفر چاه‌های برداشت و کاهش تراز و افت کیفیت آب زیرزمینی را به همراه داشته است. شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی یکی از ضروری‌ترین فرآیندهای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی است. مطالعات آب‌های زیرزمینی نه تنها با هدف شناسایی مناطق مستعد از آب‌های زیرزمینی، بلکه برای نظارت و حفاظت از این منابع حیاتی بسیار مهم است. به منظور تعیین محل آبخوان‌ها، کیفیت آب‌های زیرزمینی، ویژگی‌های فیزیکی آبخوان‌ها و ...، در هر حوضه از آزمایش‌های حفاری و تحلیل چینه‌شناسی به عنوان روش‌های قابل اطمینان و استاندارد استفاده می‌شود (چودهاری و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۸: ۲۳۲). پتانسیل آب‌های زیرزمینی را دقیقاً می‌توان با استفاده از تلفیق روش‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوفیزیکی و بررسی گمانه‌ها شناسایی کرد. با این حال، این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند (مندال و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶: ۴۲۹۴). برخی از پژوهش‌ها برای تهیه نقشه‌ی پتانسیل آب‌های زیرزمینی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده کرده‌اند. چودهاری و همکاران (۲۰۰۸)، در پژوهشی به بررسی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه‌ای در غرب بنگال هند، با استفاده از روش‌های سنجش از راه دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۴</sup>، مطالعاتی را انجام دادند. همچنین آدیات و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲)، یمانی و علی‌زاده (۱۳۹۳)، فتحی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) و سنیق و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۸) نیز با استفاده از تلفیق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی پرداختند. آگراول و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۳)، در پژوهشی به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در ناحیه اوتار پرادش هند، با استفاده از دو روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای<sup>۸</sup> در سیستم اطلاعات جغرافیایی، مطالعاتی را انجام دادند. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۵) و رحیمی و سلیمانی (۱۳۹۵) نیز از روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای در تهیه نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی استفاده نموده‌اند. واعظی هیر و

1. Magesh et al.

2. Chowdhury et al.

3. Mandal et al.

4. Analytical Hierarchy Process

5. Adiat et al.

6. Singh et al.

7. Agarwal et al.

8. Analytical Network Process

همکاران (۱۳۹۷)، در پژوهشی، به مقایسه‌ی سه روش وزن‌دهی تجمعی ساده، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و روش فازی-تحلیل سلسله مراتبی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحدهای کارستی و سازند سخت کوه مورو- صوفیان، پرداختند. شعبانی و همکاران (۱۳۹۹)، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس، به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز زنجانرود پرداختند. در سال‌های اخیر، تکنیک‌های محاسباتی نوین مانند منطق فازی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شده است. شهید و همکاران (۲۰۰۲)، براساس رویکرد مبتنی بر منطق فازی برای ادغام نقشه‌های موضوعی در GIS، برای ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در زمین‌هایی از جنس سازندهای نرم در منطقه‌ای در غرب بنگال هند، مطالعاتی را انجام دادند. پژوهش آن‌ها نشان داد که، عملیات فازی با استفاده از GIS بر روی نقشه‌های موضوعی موجب می‌شود که میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، کاهش یابد. محمد و المهدی (۲۰۱۷)، در پژوهشی با تلفیق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی در محیط GIS، نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه‌ی الفوعه، در امارات متحده عربی را تصحیح نمودند. شنر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸)، در پژوهش خود با استفاده از شاخص پتانسیل آب زیرزمینی به مطالعه و نقشه‌ی برداری مناطق مستعد از آب‌های زیرزمینی در حوضه‌ی دریاچه‌ی بیشه‌ی ترکیه پرداخته‌اند. این شاخص از تلفیق روش تحلیل سلسله مراتبی فازی با GIS به دست می‌آید. مالیک و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹)، نیز از همپوشانی وزنی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در محیط GIS، مطالعاتی را به منظور کشف مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی در حوضه اتواد-خامیس انجام دادند.

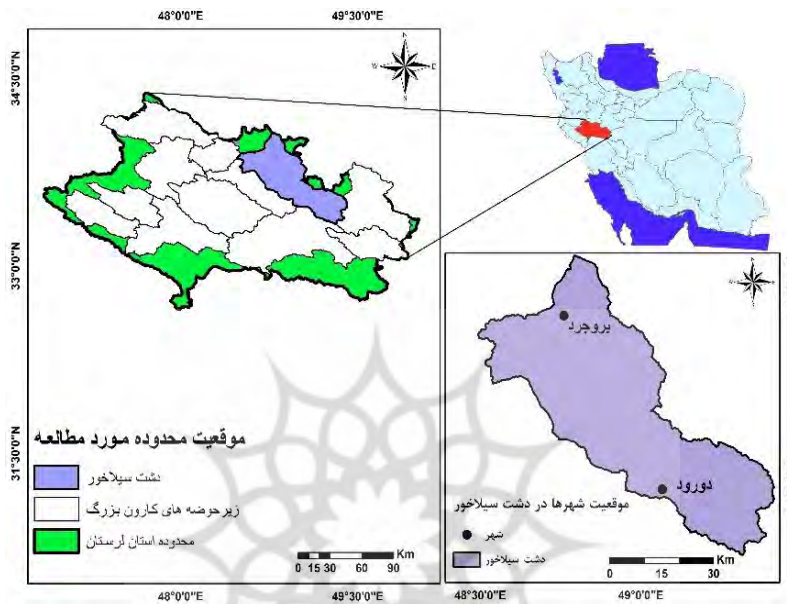
## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- محدوده‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه مشتمل بر حوضه‌ی دشت سیلاخور که در بخشی از شهرستان‌های دورود و بروجرد، که واقع در شمال شرق استان لرستان می‌باشد و بین طول‌های ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۳ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱).

1. Şener et al.

2. Mallick et al.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی دشت سیلاخور  
Fig (1): Geographical location of Silakhor Plain

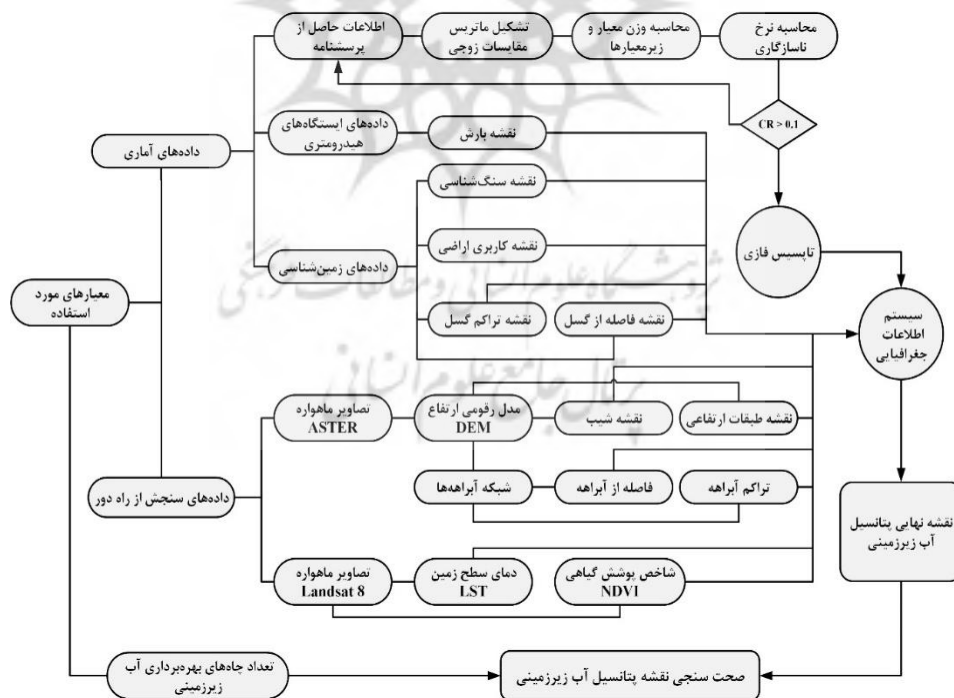
این محدوده که جزء حوضه آبریز رودخانه دز از زیرحوضه‌های کارون بزرگ می‌باشد و دارای وسعتی حدود ۲۵۴۶ کیلومترمربع است. مساحت این محدوده ۸۱۹ کیلومتر و ارتفاعات مجاور این دشت ۱۷۲۷ کیلومترمربع است. کمترین ارتفاع محدوده ۱۴۲۵ متر، مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده ۴۰۷۱ متر از سطح دریا، مربوط به جنوب شرقی محدوده می‌باشد.

هدف از این مطالعه، تعیین مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی است. در این پژوهش، یازده پارامتر شامل سنگ‌شناسی، تراکم و فاصله از گسل، پوشش گیاهی، تراکم و فاصله از آبراهه، کاربری زمین، شیب، ارتفاع، دما و بارش مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نقشه‌های ارتفاع، شیب، آبراهه‌ها، پوشش گیاهی و دمای سطح زمین تهیه شده است. لایه‌ی ارتفاع، شیب و همچنین نقشه‌ی آبراهه‌ها از پردازش تصاویر ماهواره ASTER<sup>۱</sup> تهیه شده است. لایه لیتولوژی و نقشه‌ی گسل‌ها با رقومی کردن گسل‌ها طبق نقشه‌ی زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که از اداره کل زمین‌شناسی استان لرستان تهیه گردیده، ایجاد می‌شود. لایه‌ی بارش از میانگین بارش ۲۰ ساله (از سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ تا سال آبی ۹۶-۱۳۹۵) از ۱۰ ایستگاه هیدرومتری موجود در

1. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

محدود دشت به روش IDW<sup>۱</sup> تهیه شد. میانگین بارش سالانه در دشت سیلاخور بین ۳۳۸ تا ۶۰۴ میلی‌متر می‌باشد. لایه‌ی پوشش گیاهی و دما، براساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و استفاده از شاخص NDVI<sup>۲</sup> و LST<sup>۳</sup> تهیه می‌شود. نقشه‌ی کاربری اراضی دشت سیلاخور براساس نقشه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی استان لرستان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد.

همچنین از روش فرآیند سلسله مراتبی برای تعیین درجه‌بندی اهمیت، وزن معیار و زیرمعیارها استفاده شده است. با به کارگیری اعداد فازی مثلثی برای قضاوت‌های کارشناسی، ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود. در نهایت اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش تاپسیس فازی انجام شده و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.6 با نقشه‌ها ترکیب، و نقشه‌ی نهایی پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی تهیه می‌شود. با توجه کاربرد عملی نقشه، نتیجه مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی حاصل شده توسط تعداد چاه‌های موجود در منطقه تأیید شده است (شکل ۲).



شکل (۲): مراحل تهیه نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی

Fig (2): Steps to prepare the groundwater resource potential map

## ۲-۲- روش تاپسیس فازی (TOPSIS)

تکنیک رتبه‌بندی بر مبنای نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل، یکی از روش‌های کلاسیک تصمیم‌گیری چندمعیاره، توسط هوانگ و یون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. این روش یک راه‌حل سازگارپذیر با توجه به ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. گزینه انتخاب شده باید کمترین فاصله را از ایده‌آل مثبت و دورترین فاصله از ایده‌آل منفی داشته باشد (سانچز و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۴۷). روش تاپسیس فازی براساس روش قطعی تاپسیس توسعه پیدا کرده است، با این تفاوت که به جای استفاده از داده‌های قطعی از اعداد فازی استفاده می‌شود. بنابراین برای تصمیم‌گیری در محیط‌هایی که با عدم اطمینان بالا همراه است، روش فازی می‌تواند نتایج بهتری را ارائه دهد. روش تاپسیس فازی براساس مراحل زیر تعیین می‌شود:

تشکیل ماتریس تصمیم: با توجه به تعداد معیارها، تعداد گزینه‌ها و ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود که  $\tilde{x}_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij})$  که به صورت اعداد فازی مثلثی بیان می‌شود و ارجحیت طبقه‌ی  $i$ ام، در رابطه با معیار  $j$ ام، نشان می‌دهد.

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

تعیین ماتریس وزن معیارها: در این مرحله ضریب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری، به صورت ذیل تعریف می‌شود. در این روش وزن‌ها براساس وزن نرمالی که از روش AHP به دست آمده و بایستی رابطه‌ی  $\sum_{i=1}^m W_i=1$  بین اوزان برقرار باشد.

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (2)$$

بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم فازی: اعداد مثلثی فازی  $\tilde{x}_{ij}$  بایستی به صورت،  $\Gamma_{ij}$  یا اعداد مثلثی بی‌مقیاس تبدیل نمود. بی‌مقیاس کردن به ترتیب براساس تقسیم اعداد فازی بر حداکثر و حداقل درآیه‌های ماتریس فازی بدست می‌آید.

تعیین ماتریس تصمیم فازی وزن‌دار: با توجه به وزن معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم فازی وزن‌دار از ضرب کردن ضریب اهمیت مربوط به هر معیار در ماتریس بی‌مقیاس شده فازی دست می‌آید (رابطه‌ی ۳).

$$\tilde{V}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot W_i \quad (3)$$

یافتن ایده‌آل فازی مثبت و ایده‌آل فازی منفی: بردار گزینه‌های ایده‌آل‌های مثبت و منفی فازی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+\} \quad (4)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-\} \quad (5)$$

که  $v_j^+$  حداکثر مقدار معیار  $z$  از هر ستون ماتریس و  $v_j^-$  حداقل مقدار معیار  $z$  در هر ستون ماتریس می‌باشد. گزینه‌هایی که در  $A^+$  و  $A^-$  قرار می‌گیرند، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی گزینه‌های کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند.

محاسبه‌ی فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی: با تفریق بزرگ‌ترین مؤلفه هر ستون یا  $v_j^+$ ، از هر کدام از مؤلفه‌های ماتریس وزن دار  $v$ ، ماتریس فاصله از ایده‌آل مثبت بدست می‌آید (رابطه‌ی ۶). همچنین، حاصل تفریق هر کدام از مؤلفه‌های ماتریس وزن دار  $v$  از کوچک‌ترین مؤلفه هر ستون از ماتریس یا  $v_j^-$  نیز برابر ماتریس فاصله از ایده‌آل منفی خواهد بود (رابطه‌ی ۷).

$$\tilde{d}_{ij}^+ = \tilde{v}_j^+ - \tilde{v}_{ij} \quad (6)$$

$$\tilde{d}_{ij}^- = \tilde{v}_{ij} - \tilde{v}_j^- \quad (7)$$

در این رابطه‌ها  $\tilde{d}_{ij}^+$  و  $\tilde{d}_{ij}^-$  به ترتیب ماتریس‌های فاصله از ایده‌آل‌های مثبت و منفی از طبقه  $i$  ام معیار  $z$  ام هستند. با استفاده از میانگین هر سطر می‌توان فاصله از ایده‌آل‌های مثبت و منفی را بدست آورد رابطه‌های ۸ و ۹.

$$d_{ij}^+ = \frac{\tilde{d}_{ij1}^+ + \tilde{d}_{ij2}^+ + \tilde{d}_{ij3}^+}{3} \quad (8)$$

$$d_{ij}^- = \frac{\tilde{d}_{ij1}^- + \tilde{d}_{ij2}^- + \tilde{d}_{ij3}^-}{3} \quad (9)$$

محاسبه‌ی شاخص شباهت: شاخص شباهت یا نزدیکی نسبی هرگزینه نسبت به راه‌حل ایده‌آل  $RC_i$  با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$RC_i = \frac{\sum_{j=1}^m d_{ij}^+}{\sum_{j=1}^m d_{ij}^+ + \sum_{j=1}^m d_{ij}^-} \quad , \quad i=1,2,\dots,m \quad (10)$$

در این رابطه،  $d_{ij}^+$  و  $d_{ij}^-$  بردارهای فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی هستند که از میانگین هر سطر از ماتریس فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی بدست می‌آید. در بهترین حالت، مقدار این شاخص (گزینه مورد نظر کاملاً برابر با ایده‌آل مثبت است) برابر یک و در بدترین حالت (گزینه مورد نظر برابر با ایده‌آل منفی) معادل با صفر است (مهریان و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۲).

### ۳- یافته‌ها و بحث

برای این پژوهش، از یک پرسشنامه طی دو مرحله بر مبنای تکنیک دلفی از نظرات ۴۳ نفر از کارشناسان و متخصصان فعال در زمینه‌ی زمین‌شناسی، مدیریت منابع آب درخواست شد که قضاوت خود را در مورد میزان اهمیت هر یک از معیارها، بیان کنند. نتیجه‌ی ایتن پرسشنامه در محاسبه‌ی وزن AHP به کار رفته است. در جدول ۱ مشخصات پاسخ‌دهندگان آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات پاسخ‌دهندگان پرسشنامه پژوهش

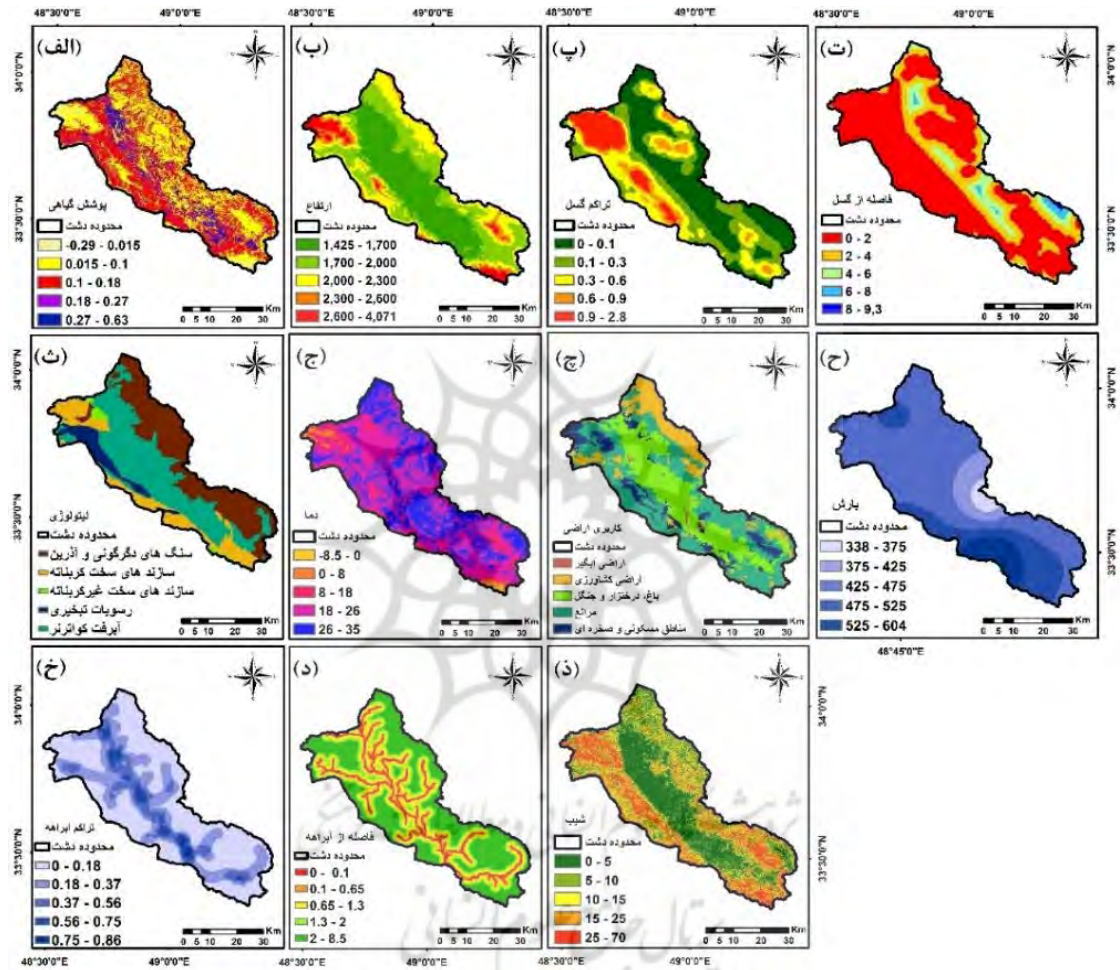
Table (2): Profile of the respondents of the research questionnaire

مشخصات تحصیلی	جنسیت	تخصص مربوطه	محل فعالیت و یا تجربه‌ی کاری
کارشناسی (۱۷)	مرد (۳۴)	زمین‌شناسی (۳)	شرکت‌های آب منطقه ای (۱۱)
کارشناسی ارشد (۲۱)	زن (۹)	مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی (۱۴)	اداره آب و فاضلاب (۷)
دکتری (۵)	—	مهندسی مدیریت منابع آب (۹)	اداره کل زمین‌شناسی (۳)
—	—	مهندسی عمران (۱۱)	شرکت‌های مهندسی مشاور آب (۱۵)
—	—	مهندسی معدن (۱)	دانشکده مهندسی عمران (۴)
—	—	هیات علمی دانشگاه (۳)	اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری (۳)
—	—	مهندسی منابع طبیعی (۲)	—

### ۳-۱- عوامل مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی

یازده لایه‌ی مؤثر در پتانسیل یابی براساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آماری تهیه شدند. این عوامل جریان، بارش و ذخیره‌ی آب در منطقه را کنترل می‌کنند و از این رو بر پتانسیل آب‌های زیرزمینی منطقه نیز تأثیر می‌گذارند. تمام لایه‌ها در ۵ طبقه تقسیم‌بندی شده است (شکل ۳).





شکل (۳): طبقه‌بندی لایه‌ها در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی (الف) پوشش گیاهی، (ب) ارتفاع، (پ) تراکم گسل، (ت) فاصله از گسل، (ث) لیتولوژی، (ج) دما، (چ) کاربری اراضی، (ح) بارش، (خ) تراکم آبراهه، (د) فاصله از آبراهه و (ذ) شیب  
**Fig (3):** Classification of layers in groundwater potential (a) Vegetation cover, (b) Elevation, (c) Fault density, (d) Fault distance, (e) Lithology, (f) Temperature, (g) Land use, (h) Rainfall, (I) Drainage density, (j) Drainage distance and (k) Slope

لایه‌ی ارتفاع و شیب: بیانگر توپوگرافی و ارتفاع سطح زمین به عنوان عوامل تأثیرگذار در نفوذ آب به درون زمین محسوب می‌شوند. به عبارت دیگر، در مناطق پست و کم ارتفاع، سرعت حرکت رواناب کم است که میزان نفوذ آب به درون زمین را افزایش می‌دهد. در ارتفاعات بالا و نقاط دارای شیب زیاد، نفوذ آب به درون زمین کمتر و سرعت حرکت رواناب بیشتر است. لایه‌ی تراکم و فاصله از آبراهه: به طور کلی عمل تخلیه جریان‌های سطحی توسط آبراهه‌های موجود در دشت انجام می‌شود. معمولاً مکان آبراهه‌ها، دارای مواد سطحی با نفوذپذیری پایین

می‌باشند. آبراهه‌ها دارای رابطه‌ی معکوس با نفوذپذیری سفره‌های آب زیرزمینی و نقش مهمی در توزیع رواناب دارند (پراساد و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷: ۴۶۹). لایه تراکم و فاصله از گسل: عوامل ساختمانی و تکتونیکی، نظیر درزها و گسل‌ها به عنوان نقاط ضعف واحدهای زمین‌شناسی به شمار رفته و راهی آسان برای عبور آب و محلی برای تجمع آب به صورت مخازن زیرزمینی می‌باشند. افزایش درزها و گسل‌ها به طور کلی نقش مؤثری در نفوذ و انتقال آب زیرزمینی دارند. لایه بارش: بارندگی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مطالعات آب‌های زیرزمینی است و منبع اصلی تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی به شمار می‌آید (آگراول و همکاران، ۲۰۱۳: ۸۹۳). بنابراین، بارش بیشتر در هر منطقه، امکان نفوذ و تغذیه‌ی منابع آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. لایه دما: دمای سطحی به عنوان یکی از ورودی‌های چرخه آب و تعیین‌کننده‌ی اقلیم یک منطقه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اثر مستقیم تغییرات دما، افزایش و یا کاهش میزان تبخیر، تعرق و در نتیجه تغییر در میزان رطوبت در دسترس گیاهان می‌باشد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۴). همچنین هر چه دما بیشتر شود، میزان تبخیر بیشتر شده و بنابراین میزان نفوذپذیری خاک کمتر می‌شود.

**لایه‌ی لیتولوژی:** با توجه به تفاوت مشهود سازندهای سخت در محدوده‌ی مورد مطالعه و تأثیر آن‌ها در منابع آب‌های زیرزمینی، کلیه‌ی سازندها برحسب اهمیت و نقش آن‌ها در نفوذپذیری و انحلال‌پذیری در ۵ طبقه تقسیم‌بندی شدند که عبارتند از: آبرفت‌های کواترنری: با توجه به اهمیت واحدهای رسوبی کواترنری از منظر شرایط مناسب نفوذپذیری و تشکیل منابع آب، کلیه‌ی واحدهای رسوبی کواترنری، شامل آبرفت‌ها، نهشته‌های پادگانه و مخروط افکنه‌های جوان و قدیم، در یک واحد، تحت عنوان آبرفت‌های کواترنری جمع‌بندی شد. سازندهای سخت کربناته: نظر به اهمیت سنگ‌های آهکی از دیدگاه تشکیل منابع آب و ویژگی انحلال‌پذیری آن‌ها، از منظر امکان ایجاد پدیده کارست‌شدگی، کلیه واحدهای سنگ‌شناسی آهکی، تحت نام سنگ‌های کربناته، تفکیک و به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود. سازندهای غیرکربناته: سایر سنگ‌های رسوبی از جمله سنگ‌های سیلیسی، تخریبی که دارای نفوذپذیری متوسط بوده را شامل می‌شود. تشکیل آبخوان در سازندهای سخت غیرکربناته عموماً از طریق نفوذ آب از درز و شکاف‌های موجود در سنگ‌های پدید می‌آید. سنگ‌های آذرین و دگرگونی: آبخوان‌های زیرزمینی می‌توانند در انواع مختلف سنگ‌ها آذرین و دگرگونی تشکیل شوند، ولی چون در سنگ‌های آذرین و دگرگونی، فضای خالی بین ذرات آن‌ها وجود ندارد، تشکیل لایه‌های آبدار منحصر به مناطقی است که سنگ‌ها دچار هوازدگی شده‌اند یا در نتیجه حرکات زمین در آن محل‌ها، شکستگی و شکاف به وجود می‌آید (حسامی، ۱۳۸۰: ۲۳). رسوبات تبخیری: این رسوبات عموماً نقش منفی در منابع آب ایفا می‌کنند و دارای نفوذپذیری بسیار کمی هستند. این رسوبات شامل کانی‌هایی اعم از مارنی و گچی می‌باشند.

1. Prasad et al.

لایه پوشش گیاهی: مناطق با پوشش گیاهی متراکم دارای نفوذپذیری زیادی هستند، بنابراین در کاهش رواناب مؤثراند و بیشتر آب‌ها به داخل زمین نفوذ خواهد کرد. اراضی فاقد پوشش گیاهی موجب افزایش رواناب و کاهش نفوذپذیری خواهد شد (شعبان و همکاران، ۲۰۰۶: ۴۳۶). لایه‌ی کاربری اراضی: نقشه‌ی کاربری اراضی نشان می‌دهد که وجود پوشش گیاهی متراکم نظیر باغ‌ها و جنگل‌ها موجب کاهش رواناب و افزایش نفوذ آب می‌گردد. اراضی کشاورزی و مراتع به دلیل وجود پوشش گیاهی کم تراکم نظیر گیاهان و محصولات کشاورزی، موجب افزایش فضاهای خالی در خاک و افزایش نفوذ آب می‌شود. همچنین تمام مناطقی که فاقد پوشش گیاهی، اراضی مسکونی و صخره‌ای، با توجه به تراکم شکستگی‌ها و نیز سنگ‌شناسی آن‌ها میزان نفوذ به داخل زمین از کم تا غیرقابل نفوذ متغیر است.

### ۳-۲- تهیه نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی

به منظور تهیه نقشه‌ی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، پس از محاسبه‌ی وزن هر یک از معیارها با استفاده از نرم‌افزار Super Decisions، میزان نرخ ناسازگاری برابر ۰/۰۹۳۸ شد که این مقدار کمتر از ۰/۱ می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی سازگارپذیر بودن وزن حاصل از مقایسات زوجی می‌باشد (شکل ۴).

ارتفاع	0.05293
بارش	0.20012
تراکم آبراهه	0.05939
تراکم گسل	0.12220
دما	0.02535
شیب	0.07284
فاصله از آبراهه	0.02761
فاصله از گسل	0.05370
لینئولوژی	0.22474
پوشش گیاهی	0.14717
کاربری اراضی	0.01394

شکل (۴): وزن نرمال معیارها بدست آمده در نرم‌افزار Super Decisions  
Fig (4): Normal weight of the criteria obtained in Super Decisions software

از وزن بدست‌آمده برای زیرمعیارها، به منظور رتبه‌بندی طبقات نقشه استفاده شد به گونه‌ای که وزن بیشتر مربوط به طبقه اول و کمترین وزن به طبقه پنجم اختصاص داده شد. پس از اختصاص دادن اعداد فازی مثلثی براساس رتبه‌ی هر طبقه، محاسبات براساس رابطه‌ی تاپسیس فازی انجام شد و فاصله از ایده‌آل‌های مثبت و

منفی بدست آمد. این اعداد به دلیل فازی بودن، فاقد بعد می‌باشند که با اعمال آن‌ها به عنوان یک ضریب به هریک از معیارها، دو نقشه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی ایجاد می‌شود (جدول ۲). پس از آن، با استفاده از رابطه‌ی شاخص شباهت رابطه‌ی ۱۰، تمام لایه‌ها را با یکدیگر ترکیب و می‌توان نقشه‌ی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت سیلاخور را مطابق با شکل ۵ تهیه نمود.

مطابق جدول ۲ با افزایش فاصله از نواحی دارای اهمیت، فاصله از ایده‌آل مثبت نیز افزایش یافته و باعث کاهش فاصله نسبت به ایده‌آل منفی می‌شود. نتایج حاصل از وزن زیرمعیارها برای هر لایه، بیانگر ویژگی‌های طبقات هر نقشه است. به عبارت دیگر، در لایه‌ی لیتولوژی بیشترین وزن AHP مربوط به آبرفت‌های کواترنری برابر ۰/۵۲۷ می‌باشد. همچنین این لایه دارای ضریب فاصله از ایده‌آل مثبت ۰ است که نشان‌دهنده‌ی مستعد بودن این نواحی از آب‌های زیرزمینی است و با ضریب فاصله از ایده‌آل منفی ۰/۱۶۶۵، در دورترین فاصله از نقاط فاقد منابع آب زیرزمینی قرار دارد.

جدول (۲): تعیین فواصل ایده‌آل مثبت و منفی هر معیار

Table (2): Determine the ideal positive and negative distances of each criterion

فاصله از ایده‌آل منفی	فاصله از ایده‌آل مثبت	طبقه	وزن AHP	اعداد فازی مثلثی	معیار و زیرمعیارها
			۰/۲۲۵		<b>لیتولوژی</b>
۰/۱۶۶۵	۰	۱	۰/۵۲۷	(۷،۹،۹)	آبرفت‌های کواترنری
۰/۱۳۳۲	۰/۰۳۳۳	۲	۰/۲۵۱	(۵،۷،۹)	سازندهای سخت کربناته
۰/۰۸۳۲	۰/۰۸۳۲	۳	۰/۱۱۴	(۳،۵،۷)	سازندهای سخت غیرکربناته
۰/۰۳۳۳	۰/۱۳۳۲	۴	۰/۰۷۲	(۱،۳،۵)	سنگ‌های دگرگونی و آذرین
۰	۰/۱۶۶۵	۵	۰/۰۳۶	(۱،۱،۳)	رسوبات تبخیری
			۰/۲۰۰		<b>بارش (mm)</b>
۰/۱۴۸۲	۰	۱	۰/۴۸۳	(۷،۹،۹)	۶۰۴-۵۲۵
۰/۱۱۸۶	۰/۰۲۹۶	۲	۰/۲۹۴	(۵،۷،۹)	۵۲۵-۴۵۷
۰/۰۷۴۱	۰/۰۷۴۱	۳	۰/۱۲۵	(۳،۵،۷)	۴۷۵-۴۲۵
۰/۰۲۹۶	۰/۱۱۸۶	۴	۰/۰۶۲	(۱،۳،۵)	۴۲۵-۳۷۵
۰	۰/۱۴۸۲	۵	۰/۰۳۶	(۱،۱،۳)	۳۷۵-۳۳۸
			۰/۱۴۷		<b>پوشش گیاهی</b>
۰/۱۰۹	۰	۱	۰/۴۴۵	(۷،۹،۹)	۰/۰-۲۷/۶۲
۰/۰۸۷۲	۰/۰۲۱۸	۲	۰/۲۸۲	(۵،۷،۹)	۰/۰-۱۸/۲۷
۰/۰۵۴۵	۰/۰۵۴۵	۳	۰/۱۴۶	(۳،۵،۷)	۰/۰-۱۰/۱۸
۰/۰۲۱۸	۰/۰۸۷۲	۴	۰/۰۸۳	(۱،۳،۵)	۰/۰-۰۱۵/۱۰
۰	۰/۱۰۹	۵	۰/۰۴۳	(۱،۱،۳)	-۰/۰-۲۹/۰۱۵

ادامه‌ی جدول (۲): تعیین فواصل ایده‌آل مثبت و منفی هر معیار

Continuation of Table (2): Determine the ideal positive and negative distances of each criterion

فاصله از ایده‌آل منفی	فاصله از ایده‌آل مثبت	طبقه	وزن AHP	اعداد فازی مثلثی	معیار و زیرمعیارها
			۰/۱۲۲		تراکم گسل ( $Km/Km^2$ )
۰/۰۹۰۵	۰	۱	۰/۵۲۶	(۷.۹.۹)	۰/۲-۹/۸
۰/۰۷۲۴	۰/۰۱۸۱	۲	۰/۲۵۵	(۵.۷.۹)	۰/۰-۶/۹
۰/۰۴۵۳	۰/۰۴۵۳	۳	۰/۱۲۲	(۳.۵.۷)	۰/۰-۳/۶
۰/۰۱۸۱	۰/۰۷۲۴	۴	۰/۰۶۱	(۱.۳.۵)	۰/۰-۱/۳
۰	۰/۰۹۰۵	۵	۰/۰۳۶	(۱.۱.۳)	۰-۰/۱
			۰/۰۷۳		شیب (درجه)
۰/۰۵۴۰	۰	۱	۰/۴۶۷	(۷.۹.۹)	۵-۰
۰/۰۴۳۲	۰/۰۱۰۸	۲	۰/۲۹۵	(۵.۷.۹)	۱۰-۵
۰/۰۲۷۰	۰/۰۲۷۰	۳	۰/۱۳۶	(۳.۵.۷)	۱۵-۱۰
۰/۰۱۰۸	۰/۰۴۳۲	۴	۰/۰۶۴	(۱.۳.۵)	۲۵-۱۵
۰	۰/۰۵۴۰	۵	۰/۰۳۷	(۱.۱.۳)	۷۰-۲۵
			۰/۰۵۹		تراکم آبراهه ( $Km/Km^2$ )
۰/۰۴۴۰	۰	۱	۰/۵۰۲	(۷.۹.۹)	۰-۰/۱۸
۰/۰۳۵۲	۰/۰۰۸۸	۲	۰/۲۶۳	(۵.۷.۹)	۰/۰-۱۸/۳۷
۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۲۰	۳	۰/۱۲۶	(۳.۵.۷)	۰/۰-۳۷/۵۶
۰/۰۰۸۸	۰/۰۳۵۲	۴	۰/۰۶۹	(۱.۳.۵)	۰/۰-۵۶/۷۵
۰	۰/۰۴۴۰	۵	۰/۰۲۹	(۱.۱.۳)	۰/۰-۷۵/۸۶
			۰/۰۵۴		فاصله از گسل (Km)
۰/۰۳۹۸	۰	۱	۰/۴۷۳	(۷.۹.۹)	۲-۰
۰/۰۳۱۸	۰/۰۰۸	۲	۰/۲۸۴	(۵.۷.۹)	۴-۲
۰/۰۱۹۹	۰/۰۱۹۹	۳	۰/۱۳۶	(۳.۵.۷)	۶-۴
۰/۰۰۸	۰/۰۳۱۸	۴	۰/۰۶۹	(۱.۳.۵)	۸-۶
۰	۰/۰۳۹۸	۵	۰/۰۲۸	(۱.۱.۳)	۹-۸/۳
			۰/۰۵۳		ارتفاع (m)
۰/۰۳۹۲	۰	۱	۰/۵۰۲	(۷.۹.۹)	۱۷۰۰-۱۴۲۵
۰/۰۳۱۴	۰/۰۰۷۸	۲	۰/۲۷۶	(۵.۷.۹)	۲۰۰۰-۱۷۰۰
۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۹۶	۳	۰/۱۲۹	(۳.۵.۷)	۲۳۰۰-۲۰۰۰
۰/۰۰۷۸	۰/۰۳۱۴	۴	۰/۰۵۷	(۱.۳.۵)	۲۶۰۰-۲۳۰۰
۰	۰/۰۳۹۲	۵	۰/۰۳۷	(۱.۱.۳)	۴۰۷۱-۲۶۰۰
			۰/۰۲۸		فاصله از آبراهه (Km)

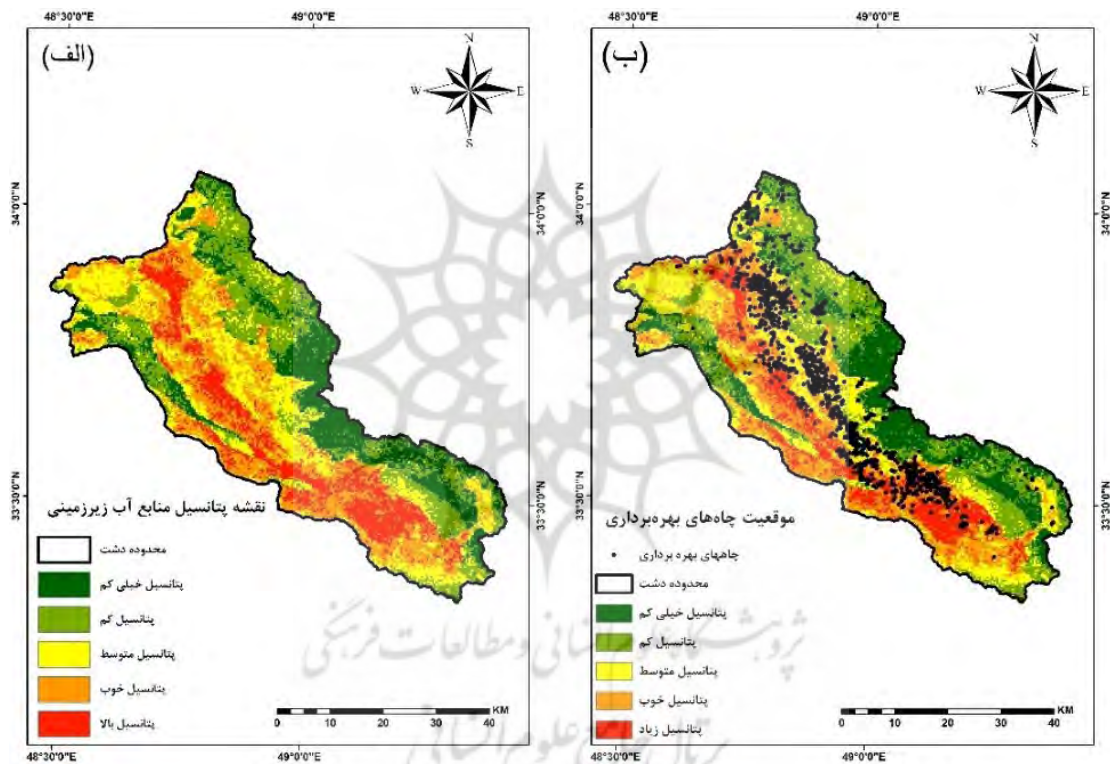
ادامه‌ی جدول (۲): تعیین فواصل ایده‌آل مثبت و منفی هر معیار  
Continuation of Table (2): Determine the ideal positive and negative distances of each criterion

معیار و زیرمعیارها	اعداد فازی مثلی	وزن AHP	طبقه	فاصله از ایده‌آل مثبت	فاصله از ایده‌آل منفی
۸-۲/۵	(۷.۹.۹)	۰/۴۷۶	۱	۰	۰/۰۲۰۴
۱/۲-۳	(۵.۷.۹)	۰/۲۷۲	۲	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۶۴
۰/۱-۶۵/۳	(۳.۵.۷)	۰/۱۴۹	۳	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۰۲
۰/۰-۱/۶۵	(۱.۳.۵)	۰/۰۶۷	۴	۰/۰۱۶۴	۰/۰۰۴۱
۰-۰/۱	(۱.۰.۳)	۰/۰۳۸	۵	۰/۰۲۰۴	۰
دما (°C)		۰/۰۲۵			
۱۸-۸	(۷.۹.۹)	۰/۴۹۴	۱	۰	۰/۰۱۸۸
۸-۰	(۵.۷.۹)	۰/۲۸۳	۲	۰/۰۰۳۸	۰/۰۱۵۰
۲۶-۱۸	(۳.۵.۷)	۰/۱۲۵	۳	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۹۴
-۸/۰-۵	(۱.۳.۵)	۰/۰۶۱	۴	۰/۰۱۵۰	۰/۰۰۳۸
۳۵-۲۶	(۱.۰.۳)	۰/۰۳۶	۵	۰/۰۱۸۸	۰
کاربری اراضی		۰/۰۱۴			
اراضی آبگیر	(۷.۹.۹)	۰/۵۱۴	۱	۰	۰/۰۱۰۳
باغ و جنگل	(۵.۷.۹)	۰/۲۱۳	۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۸۳
اراضی کشاورزی	(۳.۵.۷)	۰/۱۳۳	۳	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۲
مراتع	(۱.۳.۵)	۰/۰۹۶	۴	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۲۱
اراضی مسکونی و صخره‌ای	(۱.۰.۳)	۰/۰۳۸	۵	۰/۰۱۰۳	۰

برای لایه‌های شیب و ارتفاع نیز، نواحی دارای پتانسیل بیشتر در مناطقی با ارتفاع و شیب کم رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده برای گسل‌ها و آبراهه‌ها نشان می‌دهد که نواحی نزدیک به گسل و همچنین کاهش تراکم آبراهه و افزایش فاصله از آبراهه‌ها، سبب افزایش پتانسیل آب زیرزمینی شده است. همچنین برای شاخص پوشش گیاهی و همچنین کاربری اراضی نیز نشان می‌دهد که مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم بیشترین وزن و نواحی مسکونی و اراضی صخره‌ای کمترین وزن را دارند. برای دمای سطح زمین نیز کاهش دما، سبب افزایش نفوذ و موجب افزایش پتانسیل آب زیرزمینی می‌شود.

با مقایسه‌ی نتایج نقشه‌ی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شکل ۵، با لایه‌های موضوعی شکل ۳، نشان می‌دهد که مناطق دارای پتانسیل بیشتر منطبق بر نواحی آبرفتی کواترنری و سازندهای سخت کربناته است. همچنین این نواحی دارای تطبیق‌پذیری خوبی نسبت به مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و درخت‌زار و جنگل دارد.

نتایج نقشه‌ی پتانسیل‌یابی، نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی در نواحی پست و کم ارتفاع و در فاصله کم نسبت به آبراهه‌ها و گسل‌ها و در تراکم بالای از آبراهه‌ها قرار دارد اما تراکم گسل‌ها و دما تأثیری محدودی بر نواحی مستعد از آب‌های زیرزمینی در دشت دارند.



شکل (۵): (الف) نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و (ب) موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در دشت سیلاخور

Fig (5): (a) Potential map of groundwater resources and (b) Location of wells in Silakhor plain

### ۳-۳- اعتبارسنجی نقشه‌ی پتانسیل‌یابی منابع آب‌های زیرزمینی

از آنجایی که چاه‌های بهره‌برداری بزرگ‌ترین منابع برداشت آب در دشت سیلاخور می‌باشند، موقعیت آن‌ها نشان‌دهنده‌ی پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده‌ی حوضه‌ی آبریز دشت سیلاخور است (شکل ۵). بنابراین جهت صحت‌سنجی از موقعیت چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه برای میزان دقت مدل ارائه شده، استفاده و مشخص شد که استفاده از روش پتانسیل‌یابی با استفاده از تاپسیس فازی با موقعیت چاه‌ها همخوانی خوبی دارد، به طوری که حدود ۸۷٪ از چاه‌های بهره‌برداری در مناطقی با پتانسیل آب زیرزمینی متوسط به بالا قرار گرفته‌اند (جدول ۳).

جدول (۳): مساحت پهنه‌بندی و وضعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری

Table (3): Zoning Area and Location of the Wells

پهنه‌بندی	مساحت (Km <sup>2</sup> )	مساحت (\$) (\$)	تعداد چاه‌های بهره‌برداری	چاه‌های بهره‌برداری (\$) (\$)
پتانسیل خیلی کم	۴۴۵	۱۷/۷	۴۲	۳/۵
پتانسیل کم	۵۸۱	۲۳/۱	۱۱۷	۹/۷
پتانسیل متوسط	۵۷۴	۲۲/۸	۳۷۵	۳۱
پتانسیل خوب	۵۸۶	۲۳/۳	۴۳۵	۳۶
پتانسیل زیاد	۳۳۰	۱۳/۱	۲۴۰	۱۹/۹

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی عملکرد روش تلفیقی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس فازی در تهیه نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت سیلاخور، پرداخته شد. یازده لایه از عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی، پس از اعمال فواصل ایده‌آل مثبت و منفی فازی در محیط GIS، با یکدیگر تلفیق شدند. نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در پنج طبقه که شامل پتانسیل زیاد، خوب، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب دارای مساحت ۳۳۰ کیلومترمربع (۰/۱۳/۱)، ۵۸۶ کیلومترمربع (۰/۲۳/۳)، ۵۷۴ کیلومترمربع (۰/۲۲/۸)، ۵۸۱ کیلومترمربع (۰/۲۳/۱) و ۴۴۵ کیلومترمربع (۰/۱۷/۷) است و به عبارت دیگر حدود ۶۰٪ مناطق دشت از پتانسیل خوبی برخوردار می‌باشد. همچنین، اعتبارسنجی توسط تعداد چاه‌های بهره‌برداری موجود در دشت انجام شد که عملکرد نقشه‌ی پتانسیل‌یابی با محل استقرار چاه‌ها از مطابقت خوبی برخوردار است. نقشه‌ی پتانسیل آب زیرزمینی منطقه برای برنامه‌ریزی‌های بعدی در زمینه‌ی آبیاری و برای ایجاد برنامه‌های توسعه پایدار آب‌های زیرزمینی مفید است. مهم‌ترین یافته‌ی مطالعه حاضر، تعیین مکان احتمالی چاه برای استخراج آب زیرزمینی براساس استفاده پایدار در منطقه است. چندین روش برای شناسایی مناطق پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های جغرافیایی و تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره وجود دارد. با این حال، روش‌های مقرون به صرفه، ساده‌تر اما علمی و قابل اعتماد برای اتخاذ آن‌ها توسط مهندسين و مدیران آب مورد نیاز است. در این مطالعه، رویکرد تلفیقی از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تاپسیس فازی در محیط GIS، قابلیت پیش‌بینی بیشتری را پیدا کرده و کاربرد آن بسیار آسان و مقرون به صرفه است. در سالیان اخیر، پژوهش‌های پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده روش‌های تصمیم‌گیری فازی به دلیل اینکه نتایج هر معیار را به صورت احتمالی و نه قطعی بیان می‌کند، گسترش یافته است. به عنوان مثال: مهرابی و همکاران (۱۳۹۹)، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی به منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز سیرجان استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که پتانسیل منابع آب زیرزمینی در محدوده‌های کوهپایه‌ای و درون سنگ‌های آهکی و آبرفتی واقع شده است. سنیک و همکاران (۲۰۲۱)، به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در اوتارپرادش هند پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان



داد که استفاده از منطق فازی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی ممکن است میزان موفقیت در حفاری را افزایش داده و هزینه‌های اکتشاف را کاهش دهد. همچنین عامل زمان، هزینه و خطر زندگی انسان در فرآوری مربوط به آب زیرزمینی را کاهش می‌یابد.



#### ۵-منابع

- Adiat, A. N. K., Nawawi, M. N. M., & Abdullah, K. (2012). Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool – A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 440, 75–89.
- Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R. D., & Garg, P. K. (2013). Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. *Journal of Earth System Science*, 122(3), 887-898.
- Chowdhury, A., Jha, M. K., Chowdary, V. M., & Mal, B. C. (2008). Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 231-250.
- Ebrahimi, H., Gandomkar, A., Almodarresi, A., & Ramesht, M. H. (2016). Estimation of land surface temperature and vegetation effects on surface temperature by using bands of MODIS images (case study: toysercan basin). *Geography (Regional Planning)*. 6(4), 23-32.
- Fathizan, H., Alipoor, H., Hasheminasab, S. N., & Karimi, H. (2016). Groundwater Potentiality Assessment through Analytical Hierarchy Process (AHP), Remote Sensing and GIS in Mahdishahr Area. *Hydrogeomorphology*, 2(8), 1-20.
- Hesami, M. R. (2001). *Study on Hydrogeochemical and Hydrogeological of water Resources in igneous and metamorphic rocks, koh safaid area, bavanat, fars*. (Master thesis), Shiraz university, p. 301.
- Mallick, J., Khan, R. A., Ahmed, M., Alqadhi, S. D., Alsubih, M., Falqi, I., & Hasan, M. A. (2019). Modeling Groundwater Potential Zone in a Semi-Arid Region of Aseer Using Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques. *Water*, 11(12), 1-29.
- Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S. B., Dhar, A., Panda, S. N., Kar, A., & Mishra, P. K. (2016). Delineation of Groundwater Potential Zones of Coastal Groundwater Basin Using Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Water Resources Management*, 30(12), 4293-4310.
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189-196.
- Mehrabi, A., karimi, s., & safipour, m. (2020). Groundwater Potential Assessment Using Sentinel 1 Radar Data Processing and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Technique (Case Study: the Sirjan Catchment) %J Geography and Environmental Planning. 31(2), 1-24.
- Mohamed, M. M., & Elmahdy, S. I. (2017). Fuzzy logic and multi-criteria methods for groundwater potentiality mapping at Al Fo'ah area, the United Arab Emirates (UAE): an integrated approach. *Geocarto International*, 32(10), 1120-1138.
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M. V., & Singh, V. S. (2007). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55(3), 467-475.

- Rahimi, M., & Solaimani, K. (2017). Remote Sensing and GIS Based Assessment Groundwater Potential Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering*, 10(35), 27-38.
- Ramezani Mehrian, M., Malekmohammadi, B., & Rarjee, Y. (2012). Application of Fuzzy Logic in Site Selection of Artificial Groundwater Recharge Using Integrated Method of AHP and FTOPSIS. *Journal of Environmental Studies*, 38(3), 99-108.
- Rezaei Moghaddam, M. H., Rahimpour, T., & Nakhostinrouhi, M. (2016). Potential Detection of the Groundwater Resources Using Analytic Network Process in Geographic Information System (Case Study: Basins Leading to Tabriz Plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(3), 379-389.
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544-556.
- Şener, E., Şener, Ş., & Davraz, A. (2018). Groundwater potential mapping by combining fuzzy-analytic hierarchy process and GIS in Beyşehir Lake Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 1-21.
- Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, C., 2006. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: The case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14(4), 433-443.
- Shabani, M., Rezaei, A., & Masoumi, Z. (2020). Assessment of Groundwater Potential in Zanjanrood Catchment area using Spatial Analysis and Geoelectrical Investigations. *Journal of Geoscience*, 29(2), 287-294.
- Shahid, S., Nath, S. K., & Maksud Kamal, A. S. M. (2002). GIS Integration of Remote Sensing and Topographic Data Using Fuzzy Logic for Ground Water Assessment in Midnapur District, India. *Geocarto International*, 17(3), 69-74.
- Singh, L. K., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2018). Assessing the accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis approaches for mapping groundwater potential. *Ecological Indicators*, 91, 24-37.
- Singh, P., Hasnat, M., Rao, M. N., & Singh, P. (2021). Fuzzy analytical hierarchy process-based GIS modelling for groundwater prospective zones in Prayagraj, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100530.
- Vaezi hir, A., Vafadar, m., & Aghaie, V. (2019). Evaluation of Groundwater Potential in the Karstic and Hard rock formations of Moro Mountain using AHP, SAW and F-AHP methods. *Journal of Geographic space*, 18(64), 215-234.
- Yamani, M., & Alizade, Sh. (2015). Finding potential Ground Water Sources by Using Analytical Hierarchy Processes (AHP), Case Study: Abadeh - Eghlid basin of Fars. *Hydrogeomorphology*, 1(1), 131-144.