

# مکان‌یابی مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی به کمک روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

سیده ساره دبیری<sup>۱</sup>

محمد طالعی<sup>۲</sup>

قاسم جوادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۳/۲۳

\*\*\*\*\*

## چکیده

تعیین مناطق دارای پتانسیل انرژی زمین گرمایی جهت اکتشاف و بهره‌برداری انرژی‌های پاک و سازگار با محیط زیست، دارای اهمیت ویژه است. هدف از این مطالعه کاوش مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی مناطق شمال غربی کشور، با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد. در این مطالعه از بسته تحلیل چند معیاره مکانی نرم افزار ILWIS و همچنین روش تصمیم‌گیری مبتنی بر وزن‌های ترتیبی در نرم افزار TerrSet استفاده شده است. پنج استان شمال غربی ایران شامل آذربایجان غربی و شرقی، اردبیل، کردستان و زنجان، که دارای تعداد زیاد چشمه‌های آب گرم بوده و از لحاظ زمین گرمایی از اهمیت بالایی برخوردارند به عنوان منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب گردید. از میان چشمه‌های آب گرم منطقه، تعداد ۹ چشمه در مرحله پتانسیل سنجی و ۳۰ چشمه نیز به منظور ارزیابی نتایج حاصل از سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری، به کار گرفته شدند. به منظور اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته، ۸ سناریوی مختلف تصمیم‌گیری حاصل از ترکیب معیارهای مورد ارزیابی، مشخص گردید و نقشه تناسب زمین گرمایی حاصل از مدل‌سازی سناریوها با موقعیت چشمه‌های آب گرم موجود مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا با توجه به محل چشمه‌های آب گرم موجود که نشان از وجود پتانسیل زمین گرمایی هستند، تعداد این چشمه‌ها در هر کلاس تناسب برای سناریوهای مختلف مشخص شد. نتایج حاصل از سناریوهای مختلف و همپوشانی با چشمه‌های آب گرم در منطقه که نشانگر وجود منابع زمین گرمایی هستند، نشان دهنده سازگاری نتایج مطالعه با واقعیت زمینی است. در اغلب سناریوها، چشمه‌های آب گرم در کلاس‌های متناسب یا خیلی متناسب قرار گرفته‌اند. این بدان معناست که نتایج حاصل از این مطالعه قابل قبول بوده و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مربوطه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انرژی زمین گرمایی، سیستم‌های اطلاعات مکانی، تصمیم‌گیری چند معیاره، AHP-OWA، ILWIS-SMCE

\*\*\*\*\*

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول)

Sareh.mehr3@gmail.com

۲-دانشیار گروه سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی Taleai@kntu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران-نقشه‌برداری، دانشکده فنی

و مهندسی، دانشگاه بجنورد Ghjavadi@ub.ac.ir

## ۱- مقدمه

معیارهای چندگانه، پیچیده و مشکل است و از این رو، مطالعه انرژی زمین گرمایی به کمک سیستم‌های اطلاعات مکانی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. نوراللهی و همکاران نقشه تناسب زمین گرمایی را برای Akita و Iwate در کره شمالی تهیه کرده‌اند. در این مطالعه، سه منطقه ژئولوژیکی، گرمایی و ژئوشیمیایی تعریف شده است. برای تعریف مناطق مناسب ژئولوژیکی، پارامترهای سنگ‌های آتش‌فشانی کوآترنر، گسل‌ها، سنگ‌های آتش‌فشانی فعال، برای تعریف مناطق مناسب گرمایی، گرادیان دما و جریان گرما و برای تعریف مناطق مناسب ژئوشیمیایی، چشمه‌های آب گرم، دودخان و زون‌های دگرسان استفاده شده‌اند. مدل‌سازی برای تعریف مناطق اولیه اکتشاف زمین گرمایی، در محیط ArcGIS توسعه داده شده و مناطق دارای پتانسیل با استفاده از مدل همپوشانی وزن دار تعیین شده‌اند. در نتیجه کار، ۹۷٪ چشمه‌های زمین گرمایی حاضر در مناطق با اولویت اول قرار گرفتند (Noorollahi, 2007). یوسفی و همکاران، نقشه تناسب زمین گرمایی را با استفاده از ArcGIS برای توسعه منابع زمین گرمایی در ایران به دست آورده‌اند. در این مطالعه، گسل‌ها، سنگ‌های آتش‌فشانی و گنبد‌های آتش‌فشانی به عنوان معیارهای ژئولوژیکی و چشمه‌های آب گرم، نشانه‌های ژئوشیمیایی و سنگ‌های نفوذی سطحی به عنوان معیار ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با ترکیب لایه‌ها در نهایت ۱۸ منطقه محتمل در ایران پیشنهاد شده است (Yousefi, 2010). احمدی‌زاده و همکاران مطالعه‌ای مشابه را در منطقه خراسان جنوبی با استفاده از سنجش از دور حرارتی انجام داده‌اند. در این مطالعه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۷، سنجنده‌ی ETM<sup>+</sup>، نقشه‌ی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین، تهیه و شش منطقه‌ی مستعد زمین‌گرمایی در استان شناسایی شده است. هم چنین مشاهدات نشان دادند که این مناطق در ارتباط بسیار نزدیک با سایر شواهد حضور این انرژی، به‌خصوص گسل‌ها و چشمه‌های آب گرم هستند. این امر، نشان‌دهنده‌ی نقش بارز گسل‌ها به‌عنوان

تهیه نقشه مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی در جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار، نقش مؤثری دارد. مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی از لحاظ کاربرد به عنوان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، جاذبه توریستی، ساخت و ساز گلخانه‌ها و غیره، اهمیت بسیاری یافته‌اند (میرآبادی، ۱۳۹۶). این مناطق دارای جلوه‌هایی بر روی زمین هستند که می‌توان چشمه‌های آب گرم، گازفشان‌ها، گل فشان‌ها، سنگ‌های دگرسان اسیدی و غیره را نام برد (یوسفی، ۱۳۸۵). بیشتر حوزه‌های زمین گرمایی در جهان، بوسیله چشمه‌های آب گرم که وابسته به آتش فشان‌ها است، پوشیده شده‌اند. با این وجود، برخی مناطق زمین گرمایی در هیچ سطح مشخصی، تجلی نکرده‌اند و این مناطق به کمک اعمال روش‌های ژئولوژی و ژئوفیزیکی کشف می‌شوند. (Yalcin, 2017)

انرژی زمین گرمایی، انرژی حرارتی قابل استحصال از پوسته جامد زمین است. این انرژی بر خلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، منشاء یک انرژی پایدار به حساب می‌آید به گونه‌ای که بطور شبانه روزی در طول سال قابل بهره‌برداری است. از انرژی زمین گرمایی در دو بخش کاربردهای نیروگاهی (غیرمستقیم) و غیر نیروگاهی (مستقیم) استفاده می‌شود. تولید برق از منابع زمین گرمایی هم اکنون در ۲۲ کشور جهان صورت می‌گیرد که مجموع ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های تولید برق از این انرژی بیش از ۸،۰۰۰ مگاوات می‌باشد. این در حالی است که بیش از ۵۰ کشور جهان نیز با مجموع ظرفیت نصب شده بیش از ۱۵۰۰۰ مگاوات حرارتی، از این منبع انرژی در کاربردهای غیر نیروگاهی بهره‌برداری می‌نمایند (لعیا، ۱۳۸۵).

معمولاً در پروژه‌های اکتشافات زمین گرمایی، ابتدا مطالعات با توجه به شاخص‌های موجود انجام شده و حاصل مکان‌یابی اولیه، جهت مطالعات دقیق تر در ارزیابی میزان انرژی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی که فاز نخست اکتشاف انرژی زمین گرمایی است، با توجه به لزوم لحاظ نمودن همزمان

اند و ۳۰ چشمه دیگر نیز به منظور ارزیابی نتایج در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه روش انجام پژوهش، منطقه مورد مطالعه، لایه‌های ورودی، روش‌های تلفیق داده‌ها و نتیجه سناریوهای مختلف و ارزیابی آنها، ارائه شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

مناطق زمین گرمایی فعال جلوه‌های طبیعی مختلفی روی سطح زمین دارند. کاشفان زمین گرمایی از این گونه جلوه‌ها و روش‌های نوین اندازه‌گیری برای تعیین منابع زمین گرمایی استفاده می‌کنند (یوسفی، ۱۳۸۵). استفاده از روش‌های MCDM مبتنی بر GIS امروزه به صورت کارآمدی به این گونه مطالعات کمک می‌کند. از این رو در مطالعه پیش رو سعی شده تا با به کارگیری برخی از این روش‌ها، پتانسیل سنجی مناطق زمین گرمایی به شکل مؤثرتری انجام شود. در این مطالعه معیارهای تصمیم‌گیری با جست و جو در متون مختلف، ارزیابی و انتخاب شده‌اند. همچنین ضمن بیان روش‌های وزن دهی و تلفیق به کار گرفته شده، در نهایت ۸ سناریو به دست آمده با محل چشمه‌های آب گرم کنونی که جلوه‌ای از پتانسیل زمین گرمایی است، مقایسه شده‌اند. هم چنین وزن معیارها، به کمک جست و جوی متون و نیز پرسشنامه‌های مربوطه و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> محاسبه شده‌اند. وزن‌های ترتیبی مربوط به لایه‌ها در روش OWA به کمک سناریوهای بیان شده توسط مالکوفسکی<sup>۲</sup> به دست آمده‌اند. در نگاه ۱ مراحل انجام مطالعه ارائه شده است.

### ۲-۱- روش وزن دهی و تلفیق

#### ۲-۱-۱- فرایند تحلیل سلسله مراتبی

طی دهه گذشته تعدادی از قوانین تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله ترکیب خطی وزن‌دار<sup>۳</sup>، روش‌های نقطه ایده‌آل و AHP به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار

یک مسیر حرارتی برای انتقال گرما از بخش‌های داخلی به سطح زمین و چشمه‌های آب گرم به‌عنوان مهم‌ترین جلوه‌های سطحی وجود این انرژی است. نتیجه این مطالعه نشان داد که استان خراسان جنوبی به دلیل قرارگیری در موقعیت خاص زمین‌شناسی و جغرافیایی، از سطح مناسب و مستعدی برای تولید انرژی زمین گرمایی برخوردار است (احمدی زاده، ۱۳۹۳). سجادیان و همکاران مطالعه مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی را با به کارگیری سیستم‌های حامی تصمیم‌گیری و تصاویر حرارتی ماهواره‌ای در تلفیق با GIS انجام داده‌اند. در این مطالعه داده‌های سنجش از دور حرارتی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای به کار گرفته شده است (سجادیان، ۱۳۸۸). همان طور که ذکر شد این نوع مطالعات در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته اند و اغلب از روش‌های سنجش از دوری استفاده شده است.

علاوه بر جدید بودن موضوع بررسی مناطق زمین گرمایی در کشور، در تحقیقات گذشته کمتر به موضوع مدل‌سازی سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری از جنبه تصمیم‌گیری خوش بینانه (با ریسک بالا) تا بدبینانه (با ریسک پایین) پرداخته شده است. لذا در مطالعه پیش رو به کمک داده‌های مکان مینا و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی شناسایی و مقایسه شده‌اند. برای نیل به این هدف ابتدا داده‌های مکانی جمع‌آوری و شاخص‌های مورد نظر که عبارتند از فاصله از گسل، چشمه‌های آب گرم و مناطق ژئولوژیکی خاص، تراکم زهکشی و شیب، برای مکان‌یابی مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی به دست آمده‌اند. تلفیق این شاخص‌ها در ۸ سناریو و با استفاده از دو نرم‌افزار ILWIS و IDRISI انجام شده است. نتایج حاصل در ۵ کلاس طبقه‌بندی و با موقعیت چشمه‌های آب گرم موجود مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که تعداد چشمه‌های آب گرم موجود در این منطقه زیاد می‌باشد که خود بر اهمیت منطقه از لحاظ زمین گرمایی می‌افزاید. از میان چشمه‌های آب گرم منطقه، تعداد ۹ چشمه در مرحله پتانسیل سنجی به کار گرفته شده

۱- AHP

۲- Malczewski

۳- WLC

بندی و  $n$  مرتبه ماتریس است. اگر نسبت استحکام از مقدار  $0/1$  تجاوز کند، نیاز به بازنگری در ماتریس مقایسه است. آخرین گام AHP بدست آوردن اولویت کلی برای هر گزینه است که از رابطه زیر استفاده می شود (فتاحی، ۱۳۹۱):

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (\text{رابطه ۴})$$

### ۲-۱-۲- میانگین گیری وزن دار ترتیبی

روش OWA به عنوان یکی از روش های تصمیم گیری که قابلیت در نظر گرفتن اولویت ها و ارزیابی های ذهنی تصمیم گیر را داراست، معرفی می گردد. این روش توانایی در نظر گرفتن ریسک پذیری و ریسک گریزی تصمیم گیر را در فرآیند تصمیم گیری دارا بوده و قادر است تصمیم نهایی را بر اساس ریسک پذیری یا ریسک گریزی تصمیم گیر اتخاذ نماید. در یک مسأله تصمیم گیری، افراد ریسک پذیر بر روی خواص خوب یک گزینه و افراد ریسک گریز بر روی خواص بد یک گزینه تأکید می کنند و آن را ملاک انتخاب خود قرار می دهند. روش میانگین گیری وزنی مرتب شده قادر است میزان ریسک پذیری و ریسک گریزی افراد را محاسبه و آن را در انتخاب گزینه نهایی وارد نماید (رودگری، ۱۳۸۶). عملگر OWA شامل دو مشخصه اصلی است که بیانگر رفتار این عملگر می باشد: درجه ریسک پذیری ORness و میزان مصالحه<sup>۴</sup> بین شاخص ها، درجه ریسک پذیری، موقعیت عملگر OWA را بین روابط AND و OR نشان می دهد. این درجه بیانگر میزان تأکید تصمیم گیر بر روی مقادیر بهتر و یا بدتر یک مجموعه از شاخص ها و یا همان ریسک پذیری و ریسک گریزی تصمیم گیر است و به صورت زیر تعریف می شود:

(رابطه ۵)

$$ORness = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i)w_i \quad . \quad 0 \leq ORness \leq 1$$

هرچه مقدار ORness بیشتر باشد، میزان خوش بینی و یا ریسک پذیری تصمیم گیر بیشتر خواهد بود و برعکس.

گرفته اند. در آغاز AHP به عنوان یک روش ساده در حل تصمیم گیری های پیچیده کمک می کرد اما بعدها قدرت و سادگی این روش باعث پذیرش و کاربرد گسترده آن شد. در این روش از مقایسه زوجی استفاده می شود. روش مقایسه زوجی یک مقیاس اصولی با مقادیر فرد از ۱ تا ۹ را برای اولویت دهی نسبی دو عنصر سلسله مراتب به کار می گیرد. در صورت نیاز مقادیر میانه (۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸) بین دو شدت معیار می تواند استفاده شود. ماتریس مقایسه زوجی به صورت زیر است:

$$A = [a_{pq}]_{n \times n} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که  $a_{pq}$  درجه (رتبه) مقایسه زوجی بین خصوصیت  $p$  و خصوصیت  $q$  است. هنگامی که ماتریس مقایسه زوجی حاصل شد، اولویت ها خلاصه می شوند به طوری که هر عنصر از ساختار سلسله مراتب می تواند یک اهمیت نسبی را تعیین کند. این می تواند بوسیله محاسبه یک مجموعه از وزن ها حاصل شود:

$$W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n] \quad (\text{رابطه ۲})$$

محاسبه وزن ها شامل دو گام است: ۱) ورودی ها در ماتریس  $A$  که استاندارد شده اند (به عبارت دیگر، هر عنصر از ماتریس بر مجموع ستون آن تقسیم می شود)، ۲) مقدار میانگین وزن های نرمال شده بوسیله تقسیم مجموع ورودی ها در هر سطر از ماتریس نرمال شده بر تعداد عناصر در آن سطر محاسبه می شود. بعد از تعیین اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر نباید نرخ سازگاری معیارها<sup>۱</sup> از  $0/1$  بیشتر باشد، که CR از تقسیم شاخص سازگاری<sup>۲</sup> بر متوسط شاخص سازگاری<sup>۳</sup> محاسبه می شود. CI از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (\text{رابطه ۳})$$

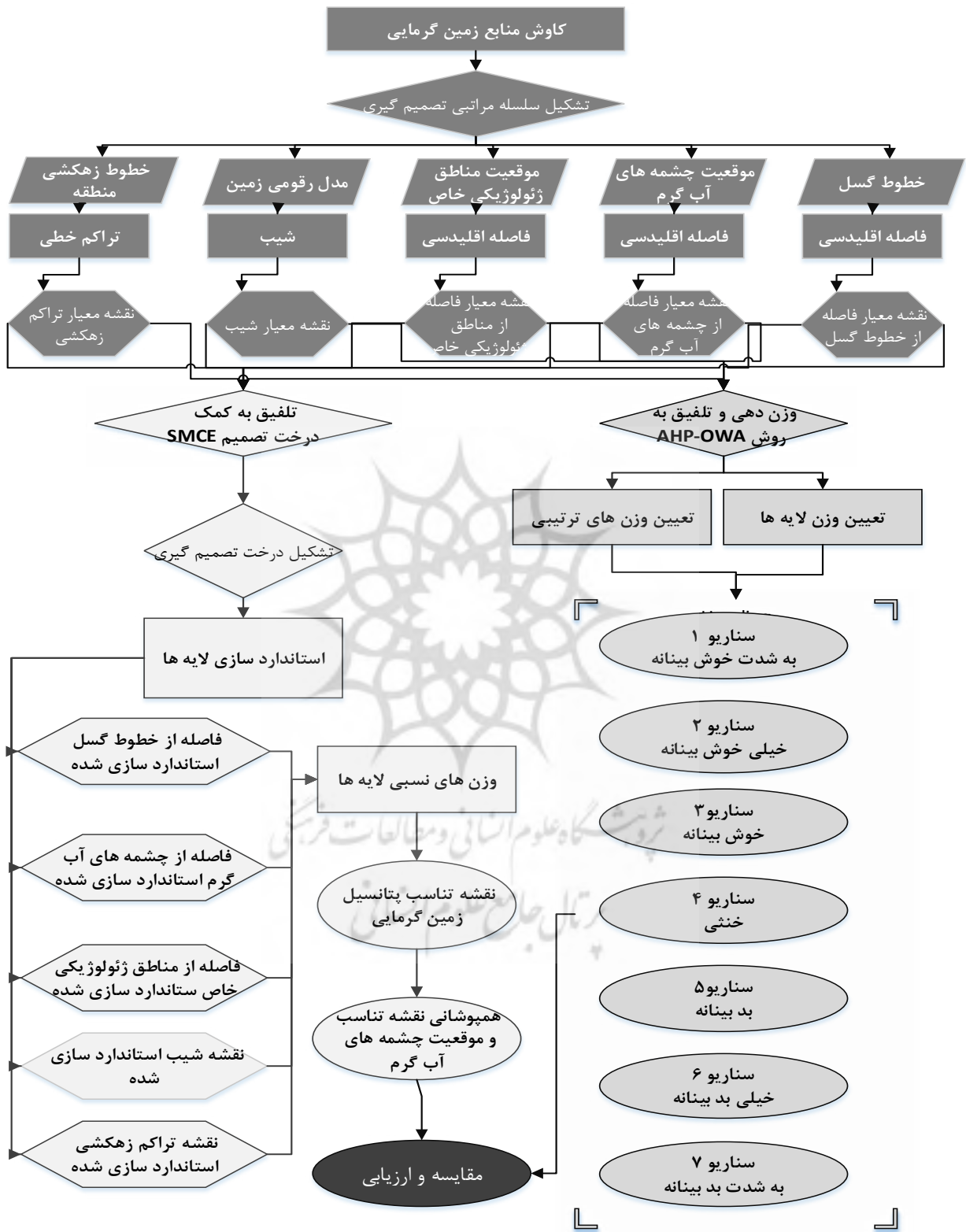
که در آن  $\lambda_{max}$  بزرگترین مقدار ویژه ماتریس اولویت

<sup>۱</sup>- CR

<sup>۲</sup>- CI

<sup>۳</sup>- RI

<sup>۴</sup>- Trade-off



نگاره ۱: روند اجرایی مطالعه

برای حل هر نوع مسئله‌ای در نهایت منجر به ایجاد شرایطی ثابت با جبران کنندگی بالا و ریسک‌پذیری پایین می‌شود. اما از این لحاظ که AHP امکان استفاده مستقیم از نظرات کارشناسان را فراهم می‌آورد، می‌توان برای محاسبه وزن‌های معیار  $W_j$  از این روش استفاده کرد. بعلاوه برای حل مشکل عدم توانایی AHP برای مدل‌سازی روابط، هنگامی که تعداد معیارها زیاد باشد می‌توان از روش‌های فازی استفاده کرد چرا که در بسیاری از موارد، تعریف یک رابطه دقیق برای تعداد زیاد معیارها غیرممکن است. بنابراین fuzzy OWA\_ AHP می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری ساختار مبنای شود که در آن علاوه بر تحت تأثیر قراردادن آرا مستقیم و مبهم کارشناسان، امکان پوشش ریسک‌پذیری‌های مختلف و میزان جبران کنندگی معیارها فراهم شده است (رجبی، ۱۳۹۰)

## ۲-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان‌های شمال غربی ایران را در برمی‌گیرد (نگاره ۲). پنج استان آذربایجان غربی و شرقی، اردبیل، کردستان و زنجان از جهات مختلف بررسی شده‌اند. این استان‌ها به لحاظ موقعیت خاص جغرافیایی دارای پتانسیل بالایی از نظر دارا بودن انرژی زمین‌گرمایی می‌باشند. هم‌چنین این منطقه به جهت داشتن چشمه‌های آب گرم مورد توجه قرار گرفته است. برخی چشمه‌های آب گرم این منطقه جزء جاذبه‌های توریستی و درمانی می‌باشند. چشمه‌های آب گرم ارومیه، کلیبر، تکاب، میاندوآب، سلماس، خوی، باکو، مهاباد، چالدران، اردهال، بستان آباد، عجب شیر، سبلان، لیقوان، جلفا، ایلانلو، خلخال، ابدال، گرماب و ... از جمله چشمه‌های ممتاز این مناطق هستند. از ۳۹ چشمه‌ی آب گرم موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، تعداد ۹ چشمه شامل چشمه‌های آب گرم ارومیه، کلیبر، تکاب، میاندوآب، سلماس، خوی، ماکو، مهاباد و چالدران، در مرحله پتانسیل‌سنجی به کار گرفته شده‌اند و ۳۰ چشمه دیگر نیز به منظور ارزیابی نتایج در نظر گرفته شده‌اند.

مشخصه دوم، میزان مصالحه یا trade-off است که میزان تأثیرپذیری یا تبادل یک شاخص از سایر شاخص‌ها را نشان می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود:  
(رابطه ۶)

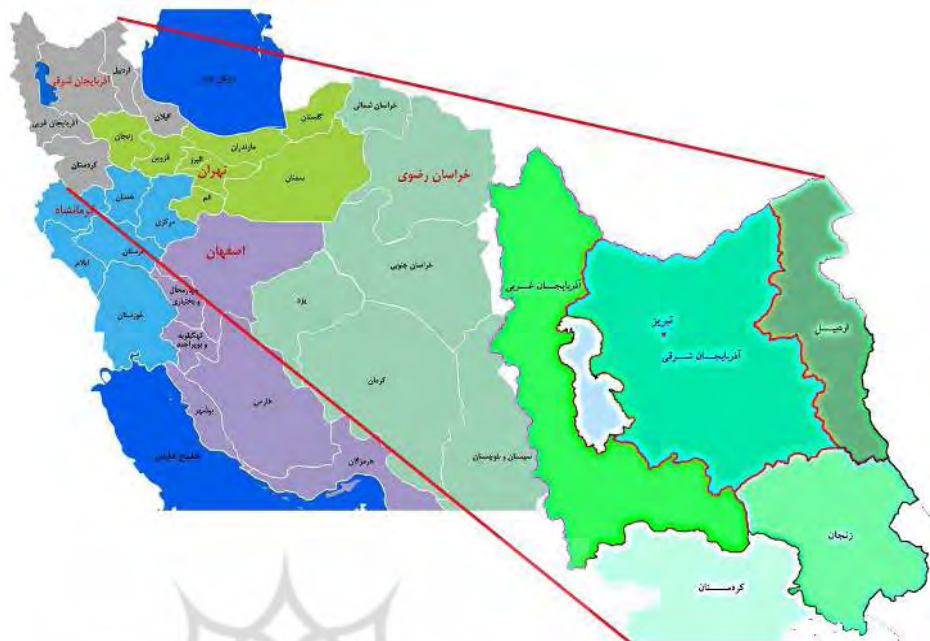
$$\text{trade-off} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \frac{1}{n})^2}{n-1}} \quad 0 \leq \text{trade-off} \leq 1$$

در نهایت به کمک روش‌های موجود از جمله روش neat OWA یا روش پیشنهادی توسط Yager وزن‌ها محاسبه می‌شوند (میان‌آبادی، ۱۳۸۵).

## ۳-۱-۲ روش AHP-OWA

بیشتر دو روش ارزیابی چندمعیاره AHP و OWA معرفی شدند، اما توجه به این نکته حائز اهمیت است که این دو روش در یک سطح اجرا نمی‌شوند. AHP ابزاری کلی برای ایجاد مدل سلسله‌مراتبی مسائل تصمیم‌گیری مکانی، پردازش کلی فرایند و ارزیابی هر کدام از فرایندهاست. فرایند ارزیابی در AHP از ترکیب خطی وزن‌دار ساده برای محاسبه مقادیر هرکدام از سلول‌های رسترها استفاده می‌کند. عملگرهای OWA نیز چارچوبی کلی برای انجام پردازش‌هایی مانند AHP فراهم می‌آورند. ماهیت و ساختار این دو الگوریتم به گونه‌ای است که از ترکیب آنها می‌توان برای ایجاد ابزار تصمیم‌گیری مکانی قدرتمندتر بهره برد. از آنجا که تصمیم‌گیرندگان مختلف سلیقه‌های متفاوت دارند و ریسک‌پذیری آنها نیز متفاوت است با استفاده از OWA می‌توان یک تعادل میان ریسک تصمیم و جبران‌پذیری آن ایجاد کرد و برنامه‌ای در نظر گرفت که تعداد مشخصی از معیارها که به ترتیب دارای بیشترین مقدار هستند، در فرایند جبرانی وارد شوند. اما AHP این ویژگی عملگرهای OWA را ندارد و فرایندی کاملاً جبرانی با مقدار trade-off نزدیک به یک است که همه معیارها را براساس وزن آن‌ها دخالت می‌دهد.

از طرف دیگر AHP دارای میزان ریسک‌پذیری ثابت و پایین (ORNESS نزدیک به صفر) است. بنابراین دخالت آن



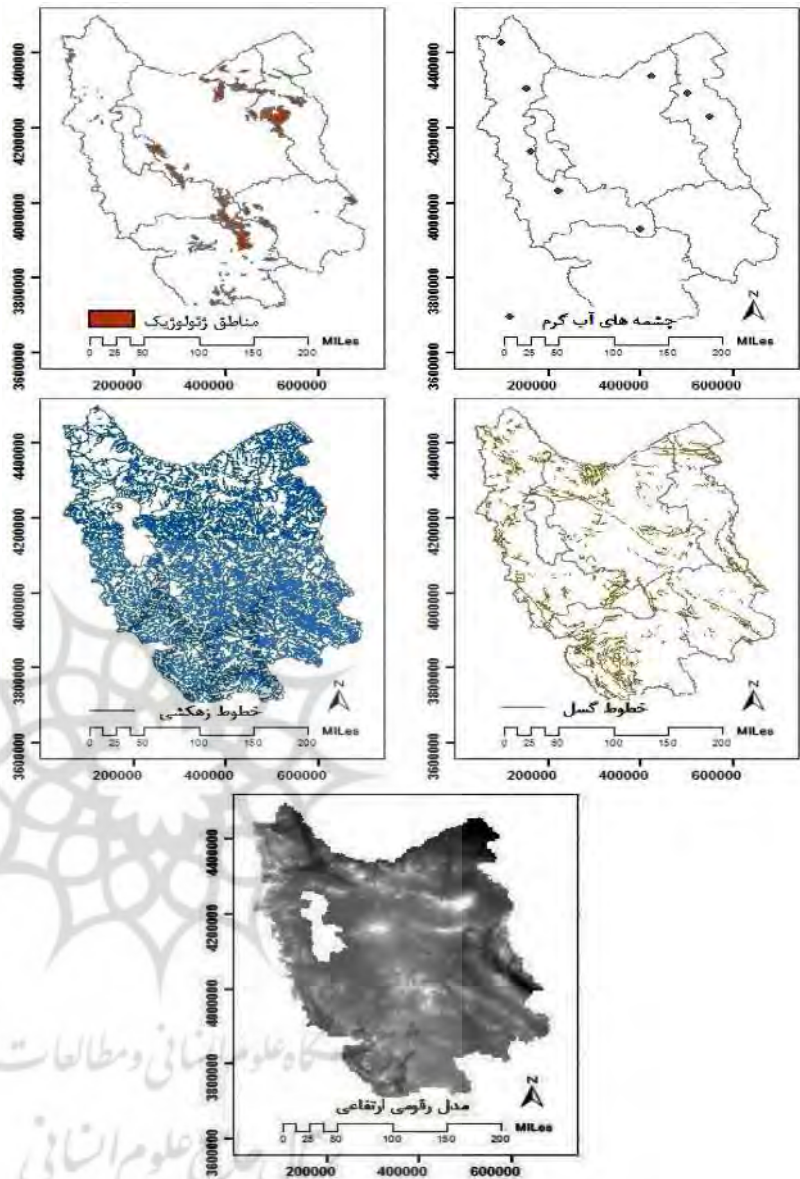
نگاره ۲: منطقه مورد مطالعه

### ۳-۲- معیارهای ارزیابی

زمین راه پیدا کنند و برخی خیر. لایه نزدیکی به چشمه‌های آب گرم کنونی، براساس موقعیت چشمه‌های ارومیه، کلبر، تکاب، میان‌دوآب، سلماس، خوی، ماکو، مهاباد و چالدران و با استفاده از روش فاصله اقلیدسی ایجاد شد. نزدیکی به تشکیلات نشان دهنده ژئولوژیکی: در اکتشافات زمین گرمایی، باید سطوحی که نشان دهنده منابع زمین گرمایی هستند تخمین زده شوند. وجود خاکستر سیلیکن و ته‌نشین‌های تراورتن، ثابت می‌کند که در منطقه مورد مطالعه سیستم زمین گرمایی وجود دارد. زمانی که این ته‌نشین‌ها با جزئیات نقشه‌های ژئولوژیک مقایسه می‌شوند، نشانگرهای پتانسیل زمین گرمایی به عنوان سنگ‌ها و یا زون‌های ساختار یافته تعیین می‌شوند. معیار نزدیکی به نشانگرهای تشکیلات ژئولوژیکی با استفاده از نقشه رقومی ژئولوژیک ساخته شده است. تشکیلات ژئولوژیک که تعیین کننده مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی هستند، با مطالعات متون و با استفاده از موجودی منابع زمین گرمایی در منطقه مورد مطالعه جست و جو شد. از روش فاصله اقلیدسی برای ایجاد این لایه معیار استفاده شده است. نزدیکی به خطوط گسل: مهمترین نشانگر اکتشاف منابع

معیارهای ارزیابی می‌توانند با بررسی تحقیقات گذشته و مطالعات تحلیلی تعیین شوند. هر معیار باید جامع و قابل اندازه‌گیری باشد. در این مطالعه ابتدا مطالعات متون و مقالات انجام شد و معیارها متناسب با مجموعه مطالعات انتخاب شدند. در نتیجه مطالعه متون، معیارها با عنوان تراکم زهکشی، توپوگرافی سطح زمین، نزدیکی به حوزه‌های زمین گرمایی کنونی، نزدیکی به مناطق تشکیلات ژئولوژیکی که جلوه‌ای از پتانسیل زمین گرمایی است و نزدیکی به گسل‌های فعال، تعیین شدند. لذا مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، خطوط زهکشی (جریان‌ات آب، رودخانه، مسیل)، گسل‌های فعال، نقشه ژئولوژیکی، محل مناطق چشمه‌های آب گرم موجود، برای ایجاد لایه‌های معیار جمع‌آوری شدند و در GIS برای هر معیار یک نقشه در پایگاه داده ایجاد گردید (نگاره ۳).

نزدیکی به چشمه‌های آب گرم: چشمه‌های آب گرم از جمله شواهد سطحی هستند که وجود یک منبع گرمای زیر سطحی را تأیید می‌نمایند (کم‌نژاد، ۱۳۹۱). یک منبع گرمایی می‌تواند چندین مخزن را گرم کند. برخی از آن‌ها می‌توانند به سطح



نگاره ۳: نقشه های معیار مورد استفاده از منطقه مطالعه موردی

مهمی در انتخاب مکان و تحلیل های محیطی است. بنابراین، در تحقیقات زمین گرمایی می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. معیار تراکم زهکشی از خطوط زهکشی که شامل جریان های آب، رودخانه و مسیل در منطقه مورد مطالعه می شود، به دست می آید. تراکم زهکشی از تقسیم مجموع طول خطوط زهکشی در واحد سطح (کیلومتر مربع) تعیین می شود. توپوگرافی: شیب زمین یک پارامتر سطحی مهم در برنامه ریزی های کاربری زمین و تحلیل زیست محیطی است. توپوگرافی منطقه زمین گرمایی شاخص مهمی در طراحی و ساخت جاده های دسترسی و تأسیسات سطحی

زمین گرمایی، خطوط گسل ها هستند. سیال زمین گرمایی در سیستم زمین گرمایی بوسیله گسل ها به سطح راه پیدا می کند. بنابراین منابع زمین گرمایی در تمام جهان در نزدیکی گسل ها یافت می شوند. علاوه بر این، گسل ها، حجم منابع را با ناپیوستگی خود در سیستم فشار سطحی تخمین می زنند. این پارامتر مهم نشان دهنده تولید انرژی زمین گرمایی در منطقه است. معیار نزدیکی به خطوط گسل، از لایه گسل های فعال به دست می آید. تراکم زهکشی: در سیستم زمین گرمایی ۹۵-۹۰٪ جریان های زودگذر و ۱۰-۵٪ آن ها جوان هستند. تراکم زهکشی معیار



جدول ۱: ماتریس مقایسه زوجی و وزن‌های AHP

مقایسه زوجی	فاصله از گسل	فاصله از مناطق ژئولوژیکی خاص	فاصله از چشمه‌های آب گرم	تراکم زهکشی	توپوگرافی	وزن
فاصله از گسل	۱	۳	۳	۹	۵	۰/۴۴۷
فاصله از مناطق ژئولوژیکی	۱/۳	۱	۳	۷	۵	۰/۲۷۹
فاصله از چشمه‌های آب گرم	۱/۳	۱/۳	۱	۷	۳	۰/۱۶۹
تراکم زهکشی	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱	۱/۲	۰/۰۷۴
توپوگرافی	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۲	۱	۰/۰۳۱

جدول ۲: وزن‌های ترتیبی و اطلاعات مربوط به روش (Malczewski 2006) OWA

$\alpha$	Tarde-off	Orness	Andness	وزن‌های ترتیبی					استراتژی تصمیم‌گیری
				۱	۲	۳	۴	۵	
$\alpha \rightarrow 0$	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	به شدت خوش بینانه
$\alpha = 0.1$	۰/۱۸۵	۰/۰۹	۰/۹۱	۰/۸۵۱	۰/۶۱۱۰	۰/۰۳۷۸	۰/۰۲۷۷	۰/۰۲۲۱	خیلی خوش بینانه
$\alpha = 0.5$	۰/۶۸۳	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۴۴۷	۰/۱۸۵۲	۰/۱۴۲۱	۰/۱۱۹۸	۰/۱۰۵۶	خوش بینانه
$\alpha = 1$	۱	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	خنثی
$\alpha = 2$	۰/۷۱۷	۰/۶۷	۰/۳۳	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۲	۰/۲۸	۰/۳۶	بدبینانه
$\alpha = 10$	۰/۱۲۸	۰/۹۱	۰/۰۹	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵۹	۰/۱۰۱۳	۰/۸۹۲۶	خیلی بد بینانه
$\alpha \rightarrow \infty$	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	به شدت بدبینانه

است. مدل داده‌های ارتفاعی رقومی زمین<sup>۱</sup> برای محاسبه کمی و کیفی و امکان بررسی سناریوهای مختلف در مسئله شیب در واحد درصد استفاده شد.

## ۲-۴- وزن دهی

روش‌های وزن دهی بسیاری مبتنی بر فنون رتبه‌بندی، درجه‌بندی و مقایسه زوجی وجود دارد. فرایند تحلیل سلسله مراتبی که اولین بار توسط توماس ال ساعتی<sup>۲</sup> در دهه ۱۹۸۰ مطرح شد، یکی از جامع‌ترین روش‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. این روش امکان حل مسئله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌کند. همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف

بنا شده است (جعفری، ۱۳۹۲). در مطالعه حاضر، این روش جهت محاسبه وزن‌ها به کار گرفته شده است. هر معیار در دو گروه با روش مقایسه زوجی با نظر کارشناس مقایسه شد (جدول ۱).

<sup>۱</sup>- Digital Elevation Model (DEM)

<sup>۲</sup>- SAATY

وارد کند (رجبی، ۱۳۹۹). با وجود این قابلیت‌ها مطالعه حاضر سعی نموده در مکان‌یابی تناسب زمین گرمایی از امکانات این بسته در نرم‌افزار ILWIS بهره برده شود (نگاره ۴). ماهیت و ساختار دو روش AHP و OWA به گونه‌ای است که از ترکیب آنها می‌توان برای ایجاد یک ابزار تصمیم‌گیری مکانی قدرتمند بهره برد (رجبی، ۱۳۹۰). برای رسیدن به این چارچوب در مرحله اول AHP وزن‌دهی نسبی معیارها را با مقایسه زوجی اجرا کرده و سپس به کمک کمیت سنج‌های هدایت شده OWA نتایج، تلفیق می‌شوند. راستای این هدف از نرم‌افزار IDRISI کمک گرفته شده است. این نرم‌افزار ابزارها و امکانات نمایشی و نیز تجزیه و تحلیل چند معیاره قدرتمندی را در اختیار قرار می‌دهد.

Criteria Tree	
exploring geothermal resources..	result
0.45 proximity to fault lines ...	R_fault
0.17 proximity to hot spring...	R_hotspring
0.28 proximity to geological...	R_geology
0.07 drainage density -- Std...	R_drainage
0.03 topology -- Std:Goal(-0...	R_slope

نگاره ۴: نمایشی از درخت تصمیم‌گیری در SMCE

در اجرای مطالعه به منظور تلفیق در نرم‌افزارهای نام برده، لایه‌های ورودی مطابق فرمت قابل قبول برای هر نرم‌افزار وارد و تلفیق شده‌اند. پیش از تلفیق، لایه‌ها نیازمند استانداردسازی و وزن‌دهی هستند. در این مطالعه از روش‌های فازی برای استانداردسازی و از روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن‌دهی استفاده شده است. در نهایت فاکتورهای ورودی طبق سناریوهای مختلف تلفیق شده‌اند. نتایج حاصل در نگاره ۵ نشان داده شده است.

به منظور اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی صورت گرفته، نقشه تناسب زمین گرمایی حاصل از مدل‌سازی این تحقیق با موقعیت ۳۰ چشمه‌ی آب گرم موجود مقایسه و مورد

نهایت با به کارگیری نرم‌افزار Expert Choice وزن مربوط به معیارها به کمک روش AHP به دست آمده است. شاخص ناسازگاری وزن‌ها برای بررسی سازگاری مقایسات محاسبه شد. در این مطالعه ضریب سازگاری ۰/۰۴۳ برای ۵ معیار بوده که قابل قبول است.

در ادامه برای اجرای روش OWA، وزن‌های ترتیبی با در نظر گرفتن ORness و trade-off بدست آمده‌اند. برای اجرای این روش ۷ سناریو مابین حالت‌های خوش بینانه و بدبینانه ارائه شده است. در جدول ۲ مقادیر وزن‌های ترتیبی و پارامترهای مرتبط این روش مشاهده می‌شود.

### ۳- پیاده‌سازی و اجرا

در مطالعه انجام شده جهت ترکیب لایه‌ها از دو نرم افزار ILWIS، ماژول SMCE و نرم افزار TerrSet و استفاده از روش AHP-OWA کمک گرفته شده است. این دو نرم‌افزار ابزار قدرتمندی در ارتباط با روش‌های مورد نظر در تصمیم‌گیری چند معیاره، در هر یک از بخش‌های استانداردسازی، وزن‌دهی و تلفیق ارائه می‌کنند.

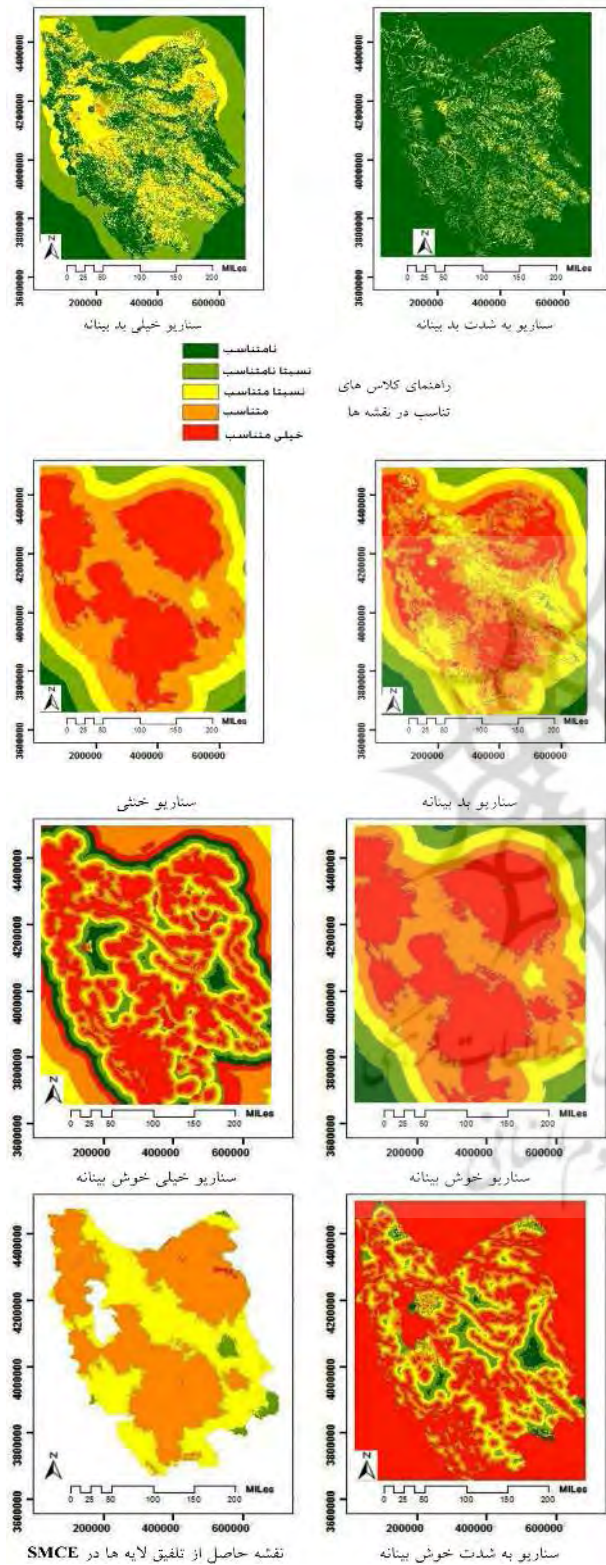
SMCE مدل تصمیم‌گیری چند معیاره داده‌های مکانی می‌باشد. این برنامه، نوع مکان‌مند روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی را قادر می‌سازد تا عمل تجزیه و تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری را انجام دهد. ورودی برای این برنامه تعدادی نقشه‌های رستری<sup>۱</sup> از منطقه مورد مطالعه و جداول توصیفی می‌باشد. بخش مهم این برنامه یک درخت معیارها<sup>۲</sup> است که قسمتی برای استاندارد کردن، وزن‌دهی و تجمیع معیارها می‌باشد. در درخت معیارها نقشه‌های متعدد ورودی و یا اطلاعات توصیفی مطابق با قوانین و معیارهای تعریف شده ترکیب می‌شوند. خروجی یک یا چند نقشه از همان منطقه است. نقشه‌های خروجی شاخص ترکیبی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. کاربر به طور گسترده قادر است لایه‌های مختلف اطلاعاتی را در برنامه

<sup>۱</sup>- Criteria re Effect

<sup>۲</sup>- Criteria tree

<sup>۳</sup>- Composite Index

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سمر)  
 مکان‌یابی مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی ... / ۱۰۳



نگاره ۵: نتایج سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری

ارزیابی قرار گرفت. از میان این ۳۰ چشمه‌ی آب گرم، می‌توان به چشمه‌های آب گرم اردهال، بستان‌آباد، عجب شیر، شاه‌آباد، سبلان، لیقوان، جلفا، ایلانلو، خلخال، ابدال و گرماب اشاره کرد. در این راستا با توجه به محل چشمه‌های آب گرم موجود که نشان از وجود پتانسیل زمین گرمایی هستند، تعداد این چشمه‌ها در هر کلاس تناسب برای سناریوهای مختلف مشخص شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود و در نگاره ۶ مشاهده می‌شود، محل چشمه‌های آب گرم در کلاس‌های با پتانسیل زمین گرمایی بالا قرار گرفته‌اند.

این بدان معناست که نتایج حاصل از این مطالعه قابل قبول بوده و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مربوطه مورد استفاده قرار گیرد.

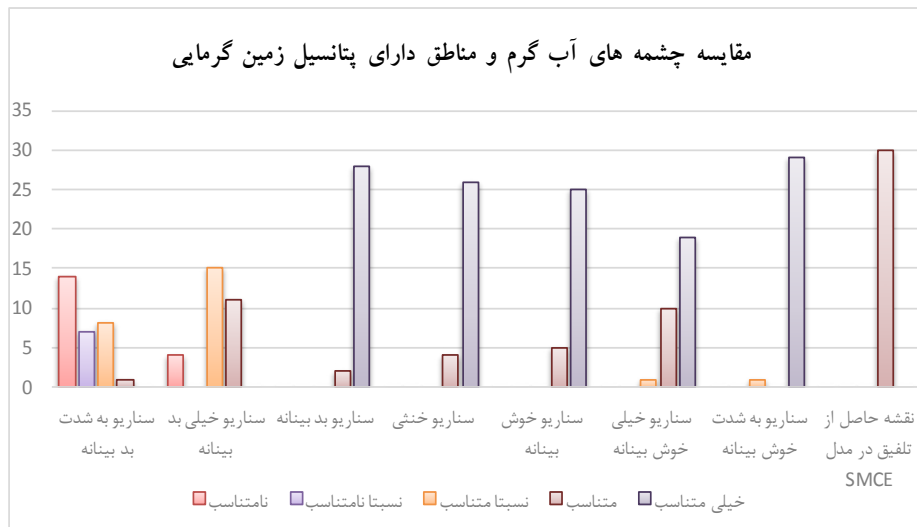
همان‌طور که در نگاره ۶ دیده می‌شود، دو سناریوی به شدت بدبینانه و خیلی بدبینانه تطابق مناسبی با وضعیت موجود چشمه‌های آب گرم ندارند. البته روند مشابهی در سناریوهای خوش‌بینانه و خیلی خوش‌بینانه نیز مشاهده می‌شود با این تفاوت که در این سناریو چشمه‌ها در کلاس‌هایی با تناسب بالاتر توزیع شده‌اند اما توزیع متراکم نیست.

نتایج اغلب سناریوها نشان می‌دهد که چشمه‌های آب گرم در دو کلاس بالاتر از نقشه تناسب قرار گرفته‌اند و این خود گویای تأیید نتایج این مطالعه می‌باشد.

با توجه به سازگاری موجود میان نقشه‌های تناسب زمین گرمایی به دست آمده و وضع موجود، می‌توان نتایج حاصل را در مطالعات اولیه در زمینه اکتشافات به کار برد. در نگاره ۷ ترکیب نتایج ۸ سناریو نشان داده شده است. در این نقشه، مجموع مقادیر در ۸ سناریو به دست آمده و در ۵ کلاس طبقه‌بندی شده است.

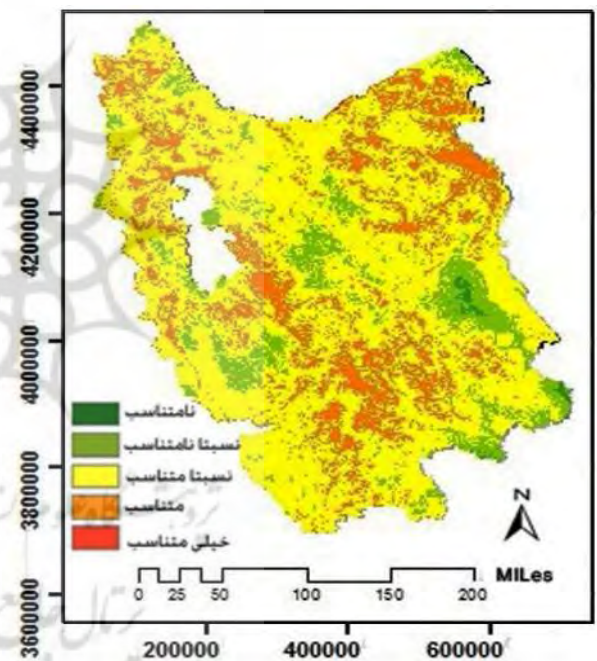
با مقایسه این نقشه و وضعیت موجود که با موقعیت چشمه‌های آب گرم بیان می‌شود، مشاهده می‌شود که موقعیت تمامی چشمه‌ها در دو کلاس بالا (متناسب و خیلی متناسب) قرار دارد.

نگاره ۶: بررسی تناسب نقشه زمین گرمایی و وضعیت موجود چشمه‌های آب گرم



زمین گرمایی، مطالعه و جمع‌آوری شوند. لایه‌ها مورد پردازش قرار گرفته و با استفاده از روش‌های تلفیقی در ۸ سناریو تلفیق شده و نتایج حاصل، بررسی و مقایسه شد. نتایج حاصل از سناریوهای مختلف و همپوشانی با چشمه‌های آب گرم در منطقه که نشانگر وجود منابع زمین گرمایی هستند، نشان دهنده سازگاری نتایج مطالعه با وضع کنونی است. در اغلب سناریوها، چشمه‌های آب گرم در کلاس‌های متناسب یا خیلی متناسب قرار گرفته‌اند و این موضوع، نشانگر نتایج قابل قبول حاصل از مدل‌سازی این تحقیق، است.

بررسی نتایج به دست آمده از جهتی حاکی از این است که نقشه‌های تناسب سازگاری قابل قبولی دارند. اما در سه سناریو نتایج حاکی از توزیع پراکنده مناطق است. این اختلاف می‌تواند ناشی از لزوم توجه به معیارهای مؤثر دیگری همچون دمای سطح زمین باشد. مطابق با تحقیق احمدی‌زاده و همکاران در منطقه خراسان جنوبی، با استفاده از داده باند حرارتی تصاویر ماهواره‌ی لندست می‌توان اطلاعات ناهنجاری‌های دمای سطح زمین را کسب نمود. لذا گرادیان دمای سطح زمین یکی از شاخص‌هایی است که پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی به کار گرفته شود. بررسی‌های بیشتر زمین‌شناسی و ویژگی‌های زیست محیطی نیز می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل‌سازی شود.



نگاره ۷: نقشه تناسب زمین گرمایی حاصل از تلفیق ۸ سناریوی تصمیم‌گیری

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر استفاده از ابزار GIS به عنوان مطالعه امکان‌سنجی در فاز اول اکتشاف زمین گرمایی استفاده شد. در این مطالعه سعی شد تا با به کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات مکانی، لایه‌های اطلاعاتی نشانگر انرژی

## منابع و مأخذ

- ۱- احمدی زاده، س.س.، دیگران، شناسایی پتانسیل‌های زمین‌گرمایی با استفاده از روش سنجش از دور حرارتی در خراسان جنوبی، پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱۳۹۳، ص ۱۳۵-۱۴۴.
- ۲- جعفری، ح.، دیگران، تحلیل تناسب اراضی جهت استقرار نیروگاه‌های بادی در استان اردبیل با استفاده از مدل SAW و AHP در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۹۲، دوره ۱۵، شماره ۲، ص ۲۳-۴۱.
- ۳- رجبی، م.ر.، دیگران، تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP و OWA با کمیت سنج‌های مفهومی fuzzy برای مکان‌یابی در GIS، همایش ژئوماتیک، ۱۳۸۹، تهران.
- ۴- رجبی، م.، منصوریان، ع.، طالعی، م.، مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره AHP، OWA و Fuzzy AHP\_OWA برای مکان‌یابی مجتمع‌های مسکونی در شهر تبریز، محیط شناسی، ۱۳۹۰، ص ۷۷-۹۲.
- ۵- رودگرمی، پ.، خراسانی، ن.، منوری، م.، نوری، ج.، ارزشیابی گزینه‌های توسعه در ارزیابی اثرات زیست محیطی به روش ارزشیابی چند معیاره مکانمند، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۸۶، دوره ۹، شماره ۴، ص ۷۳-۸۴.
- ۶- سجادیان، م.، سجادیان، ن.، سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری در فاز شناسایی مناطق دارای پتانسیل انرژی زمین گرمایی توسط تصاویر حرارتی ماهواره‌ای در تلفیق با GIS، نخستین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، ۱۳۸۸، بیرجند.
- ۷- فتاحی، م.، آفاجانی، ح.، الگوهای توسعه مجتمع‌های مسکونی با روش تصمیم‌گیری چند معیاره (Fuzzy AHP\_OWA) مبتنی بر GIS مطالعه موردی: شهر مشهد، فصل نامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس، ۱۳۹۱، ص ۵۹-۷۹.
- ۸- کی‌نژاد، ص.، دیگران، پتانسیل‌یابی منابع زمین گرمایی استان آذربایجان شرقی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ با استفاده
- از داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در محیط GIS، زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۳۹۱، ص ۱۰۵-۱۱۶.
- ۹- لعیا، ا.، ترکستانی، م.ص.، بکارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای پشتیبانی تصمیم‌گیری متخصصین در خصوص اولویت دهی به منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی، ۱۳۸۵، تهران.
- ۱۰- میان‌آبادی، ح.، افشار، ع.، کاربرد روش میانگین وزنی مرتب شده (OWA) در تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک، کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه، ۱۳۸۵.
- ۱۱- میرآبادی، ا.ح.، نوراللهی، ی.، الماسی، م.، شناسایی منابع آب‌های گرم زیرزمینی برای تأمین گرمایش و آبیاری گلخانه‌های کشاورزی در استان آذربایجان شرقی، اکوهیدرولوژی، ۲۰۱۷، ص ۲۵۹-۲۷۴.
- ۱۲- یوسفی، ح.، نوراللهی، ی.، مکان‌یابی مناطق دارای پتانسیل انرژی زمین گرمایی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در ایران، گردهمایی علوم زمین، ۱۳۸۵، تهران.
- 13- Malczewski J., Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006. 8(4): p. 270-277.
- 14- Noorollahi, Y., et al., GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan. *Computers & Geosciences*, 2007. 33(8): p. 1008-1021.
- 15- Yalcin, M. and F.K. Gul, A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar). *Geothermics*, 2017. 67: p. 18-28.
- 16- Yousefi, H., et al., Developing the geothermal resources map of Iran. *Geothermics*, 2010. 39(2): p. 140-151.



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی  
پرتال جامع علوم انسانی