



پتانسیل یابی و اولویت‌بندی منابع انرژی زمین‌گرمایی استان زنجان، با استفاده از روش‌های همپوشانی شاخص و روش ترکیب اطلاعات سلسله مراتبی فازی - دمپستر شفر

شکوه ریاحی^۱، علی مرادزاده^{۲*}، پرهام پهلوانی^۳ و علی کشت‌دار^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: a_moradzadeh@ut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>انرژی زمین‌گرمایی یکی از منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر و کم هزینه است. بنابراین کشف و شناسایی منابع آن برای بهره‌برداری و استفاده بسیار با اهمیت می‌باشد. در ایران با توجه به وجود چشمه‌های آب‌گرم فراوان در بسیاری از نقاط و وجود شواهد مبنی بر وجود منبع زمین‌گرمایی نسبت به کشف و شناسایی مناطق با پتانسیل زمین‌گرمایی اقدامات زیادی تاکنون صورت گرفته است. استان زنجان یکی از مناطقی است که در آنها شواهد مبنی بر وجود منابع زمین‌گرمایی وجود دارد. در این مطالعه از لایه‌های اطلاعاتی مختلف مربوط به اکتشاف منابع زمین‌گرمایی مانند لایه ژئوفیزیکی (که از تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی، نقشه عمق نقطه کوری، گرادیان و جریان حرارتی بدست آمد) و وزن‌دهی به آنها با روش سلسله مراتبی فازی استفاده شد. سپس با استفاده از روش همپوشانی لایه‌های اطلاعات اکتشافی با یکدیگر تلفیق شده و مناطق دارای پتانسیل منابع زمین‌گرمایی بدست آمد. پس از آن مناطق شناسایی شده با استفاده از روش ترکیب اطلاعات سلسله مراتبی فازی با روش دمپستر شفر اولویت‌بندی شدند و بهترین مناطق با پتانسیل زمین‌گرمایی با این روش مشخص شد. با استفاده از پیاده‌سازی این روش، مناطق ۱۱، ۱۶ و ۱۳ و ۱ که بر روی نقشه‌ی استان زنجان نشان داده شده‌اند، با مقادیر به ترتیب ۰/۷۰۲، ۰/۶۲۱ و ۰/۵۹۲ به عنوان بهترین مناطق معرفی شدند. با بررسی نتایج نهایی با شواهد موجود مانند چشمه‌های آب گرم و سایر شواهد می‌توان گفت که ترکیب و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی با استفاده از روش دمپستر شفر و اوزان بدست آمده با روش سلسله مراتبی فازی، می‌تواند قابل قبول باشند.</p>	<p>پتانسیل زمین‌گرمایی استان زنجان لایه‌های اطلاعاتی ژئوفیزیکی ترکیب اطلاعات تلفیق لایه‌های اطلاعات اکتشافی همپوشانی شاخص دمپستر شفر سلسله مراتبی فازی</p>

۱- مقدمه

جنوب‌شرق شهر زنجان و جنوب‌غرب استان زنجان نشان می‌دهد. اگر چه نتایج این دو مطالعه در بعضی از موارد در تطابق هستند؛ ولی در مواردی هم مغایرت دارند. به همین جهت، در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از توانمندی‌های روش تحلیل سلسله مراتبی فازی^۱ (FAHP) و همپوشانی شاخص^۲ و با بهره‌گیری از لایه‌های اکتشافی بیشتر (نسبت به مطالعه اول) مرتبط با منابع زمین‌گرمایی که شامل گسل‌ها و خطواره‌ها، لیتولوژی (توده‌های نفوذی جوان)، آلتراسیون‌ها و انواع لایه اطلاعاتی ژئوفیزیکی می‌باشند؛ مناطق مستعد زمین‌گرمایی در سطح استان شناسایی و در مرحله بعد با توجه به قابلیت بالای روش ترکیب اطلاعات سلسله مراتبی فازی-دمپسترشفر^۳ (DS-FAHP) مناطق شناسایی شده؛ رتبه‌بندی شوند.

۲- روش‌شناسی مطالعه

در این مطالعه از روش‌های ترکیب اطلاعات، که در ادامه ذکر می‌شود برای بدست آوردن لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی و نتایج نهایی استفاده شده است.

مبانی نظری روش FAHP

با وجود مزایای بسیار AHP، بارگیری این روش دارای کمبودهایی است: این روش برای تصمیم‌گیری‌های غیر فازی طراحی شده است و عدم-اطمینان موجود در قضاوت‌های فردی را در نظر نمی‌گیرد. قضاوت‌های فردی، انتخاب و عملکرد تصمیم‌گیران، تاثیر بسیاری در نتایج نهایی دارد (Andrić and Lu, 2016). به منظور مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان در ترجیحات افراد، تئوری مجموعه‌های فازی با مقایسه‌های زوجی در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی ترکیب می‌شوند. به این ترتیب درک دقیق‌تری از فرایند تصمیم‌گیری ارائه شده؛ حاصل می‌شود. به منظور استفاده از مزایای هر دو روش فازی و AHP و غلبه بر نقاط ضعف روش‌ها، دو پژوهشگر هلندی به نام فان لارهوفن و پدریک به سال ۱۹۸۳ برای نخستین بار روشی را برای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد نمودند. این روش با جایگزینی اعداد فازی مثلثی در ماتریس مقایسه‌های زوجی و بر مبنای حداقل مجذورات لگاریتمی بنا نهاده شده است. پیچیدگی مراحل این روش باعث شده این روش چندان مورد استفاده قرار نگیرد (Van Laarhoven and Pedrycz, 1983). در سال ۱۹۹۲ روشی با عنوان روش تحلیل توسعه‌ای توسط چانگ ارائه شد. بعدها در سال ۱۹۹۶ این روش توسط خود وی بهبود بخشیده شد. روش گسترش یافته چانگ^۴ (EA)، بیش از همه روش‌های دیگر برای محاسبات تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مورد استفاده قرار گرفته است. اعداد مورد استفاده در این روش، اعداد مثلثی فازی هستند. چانگ به منظور تعمیم روش AHP به فضای فازی، از مفهوم درجه امکان‌پذیری استفاده کرد. درجه امکان‌پذیری یعنی این که چقدر

اکتشاف، بهره‌برداری و استفاده از انرژی زمین‌گرمایی ایده‌ی جدیدی نیست و از ابتدای قرن حاضر تلاش‌های زیادی به منظور تبدیل این انرژی به برق صورت گرفته است؛ اما انگیزه واقعی بهره‌برداری از این نوع انرژی به بعد از سال‌های ۱۹۷۳-۱۹۷۴ برمی‌گردد. با توجه به میزان حرارت قابل استخراج، از ذخایر انرژی زمین‌گرمایی به عنوان منبع گرمایش در بخش خانگی یا صنایع، گلخانه‌ها، پرورش آبزیان و در تولید الکتریسیته استفاده می‌شود (Erdogdu, 2009). یافتن مناطق امیدبخش از نقطه‌نظر زمین‌گرمایی در ایران از سال ۱۳۵۴ آغاز شد و تا سال ۱۳۷۸، چهارده منطقه امیدبخش در رابطه با نقاط آتشفشانی کشف شد. پس از مطالعات دقیق‌تر در سال ۱۳۸۷، جمعاً ۱۸ نقطه در شمال‌غرب، مرکز، جنوب، شرق و جنوب‌شرقی ایران به عنوان مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی، برای انجام مطالعات و بررسی‌های بیشتر به ثبت رسیدند (Yousefi, 2010). همچنین اولین نیروگاه زمین‌گرمایی ایران در استان اردبیل و در دامنه کوه سبلان با ظرفیت نهایی ۲۵ مگاوات در حال ساخت است. با توجه به تحقیقات انجام شده امکان ساخت این دست نیروگاه‌ها در مناطق مستعد دیگر، مانند دامنه کوه تفتان و مناطق سه‌هند و سبلان نیز وجود دارد (Yousefi, 2010). یافتن این گونه مناطق مستعد، پس از یک ارزیابی کلی و با حذف نواحی کم اهمیت در مراحل اکتشافی پی‌درپی صورت می‌گیرد. در حقیقت عملیات اکتشاف منابع زمین‌گرمایی همانند اکتشاف منابع معدنی، فرآیندی گام به گام است؛ که با اتمام هر مرحله‌ی اکتشافی، محدوده‌ی مورد اکتشاف کوچکتر شده و عملیات مرحله‌ی بعد در مناطق با پتانسیل بالاتر و با استفاده از روش‌ها و ابزارهای دقیق‌تر انجام می‌پذیرد. استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، یکی از سودمندترین ابزارهای تصمیم‌گیری در پتانسیل‌یابی میدانی زمین‌گرمایی است. این ابزار براساس همراهی و همبستگی مکانی و نیز اهمیت عوامل کلیدی در تشکیل یک ذخیره زمین‌گرمایی، همراه با تجربیات کارشناسی مناطق امیدبخش را در هر مرحله از عملیات اکتشافی محدودتر می‌کند؛ تا در نهایت نقاط مناسب حفاری چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری مشخص شوند (Yalcin, 2017; Kiavarz, 2017).

در بین مناطقی در ایران که پتانسیل زمین‌گرمایی دارند؛ استان زنجان یکی از استان‌هایی است که به دلیل وجود چشمه‌های آب گرم و شواهد زمین‌شناسی و دیگر شواهد مستعد وجود منابع زمین‌گرمایی می‌باشد. با این وجود مطالعه چندان در این مورد صورت نگرفته است و در این مورد فقط می‌توان به دو مورد مطالعه نه چندان جامع که اخیراً صورت گرفته؛ اشاره نمود. در مطالعه اول (کشت‌دار، ۱۳۹۶) که به کمک تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف با روش‌های فازی و همپوشانی شاخص انجام شد؛ نشان داده شده است که در چهار محدوده استان (در جنوب شرق طارم، شمال غرب ماهنشان، جنوب زنجان و غرب خرم‌دره) پتانسیل وجود منابع زمین‌گرمایی وجود دارد. این در حالی است که نتایج مطالعه دوم (فردوسی و مرادزاده، ۱۳۹۷) صرفاً دو بی‌هنجاری شاخص حرارتی را در شمال‌غرب تا

1-Fuzzy Analytical Hierarchy Process

2-indexed overlay

3-Dempster Shafer-Fuzzy AHP

4-Extended Analytic

که در آن hgt بلندترین نقطه تقاطع^۱ میان دو تابع عضویت فازی است. میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از k عدد فازی دیگر نیز از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$V(M_1 \geq M_2, M_k) = \min[V(M_1 \geq M_2), \dots, V(M_2 \geq M_k)] \quad (10)$$

محاسبه وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسه زوجی به کمک رابطه زیر بدست می‌آید (Chang, 1996):

$$W'(x_i) = \min\{V(S_i \geq S_j)\}, \quad k=1,2,\dots,n, \quad k \neq i \quad (11)$$

بردار وزن شاخص‌ها به صورت زیر خواهد بود:

$$W' = [W'(c_1), W'(c_2), \dots, W'(c_n)]^T \quad (12)$$

که همان بردار ضرایب غیر نرمال AHP فازی است.

روش همپوشانی شاخص

در روش همپوشانی شاخص، هر فاکتور دارای وزن مشخصی است، که وزن نقشه‌ها می‌تواند توسط کارشناسان تعیین شود. در این روش مقادیر هر نقشه در وزن فاکتور مربوطه ضرب می‌گردد. آنگاه تمام مقادیر نقشه‌های وزن‌دهی شده با یکدیگر جمع می‌شوند و در نهایت مقادیر نقشه خروجی بر مجموع وزن‌ها تقسیم می‌شود. رابطه (۱۳) نحوه تلفیق نقشه‌ها به روش همپوشانی شاخص را نشان می‌دهد (Bonham-Carter, 1991).

$$\bar{S} = \frac{\sum_i^n S_{ij} \times W_i}{\sum_i^n W_i} \quad (13)$$

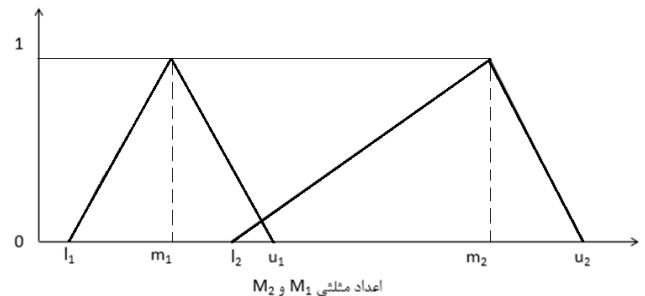
که در آن W وزن نهایی هر لایه اطلاعاتی بدست آمده از روش Fuzzy AHP، S_{ij} مقدار پیکسل شماره j در نقشه i و وزن مربوط به نقشه نام می‌باشد.

روش دمپستر شفر

نظریه شواهد دمپستر شفر به زعم بسیاری از مراجع معتبر، نیرومندترین روش در تلفیق داده‌هاست. این روش در واقع به تلفیق داده‌ها در سطح تصمیم می‌پردازد. این روش توانایی تلفیق هرگونه داده عددی، سیگنالی و چند بعدی را دارد. افزایش تعداد حسگرها و فضای ورودی اگر چه محاسبات را افزایش می‌دهد؛ به آشفته‌گی در نتایج منجر نشده و معمولاً به افزایش دقت منجر خواهد شد. در حالی که افزایش فضای ورودی در روش‌های تلفیق ویژگی و مانند آن ممکن است به راحتی کاهش دقت را در پی داشته باشد و باعث سردرگمی شواهد و تصمیم‌گیرها شود. نظریه شواهد ابتدا با انتشار نظریه حدود احتمالی بالا و پایین توسط دمپستر در سال ۱۹۶۷ متولد شد. شفر نیز در سال ۱۹۷۶ به تکمیل این نظریه و رفع نواقص آن پرداخته و این نظریه را برای آنالیز اطلاعات غیرشفاف و ناکامل بسط داد. از آن پس این نظریه به نظریه شواهد دمپستر-شفر مشهور شده است. همان گونه که از نام آن پیداست، نظریه دمپستر-شفر بر پایه مقادیر اعتقادی تعدادی شاهد از یک سوژه و تلفیق انتخاب‌های این شواهد بنا شده است.

احتمال دارد یک عدد فازی بزرگتر از یک عدد فازی دیگر باشد. پیش از بیان الگوریتم پیشنهادی چنانگ باید مفهوم درجه امکان‌پذیری یا درجه احتمال بزرگتر بودن تشریح شود (Chang, 1996).

برای فهم این موضوع، دو عدد مثلثی $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ در شکل ۱ رسم شده‌اند (l حد پایین، m مقدار میانی و u حد بالا می‌باشد).



شکل ۱. اعداد مثلثی

عملگرهای ریاضی این روش به صورت روابط زیر می‌باشند (منظور از M تابع عضویت است) (Chang, 1996):

$$M_1 = (l_1, m_1, u_1) \quad (1)$$

$$M_2 = (l_2, m_2, u_2) \quad (2)$$

$$M_1 + M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3)$$

$$M_1 \times M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (4)$$

$$M_1^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}\right) \quad (5)$$

$$M_2^{-1} = \left(\frac{1}{u_2}, \frac{1}{m_2}, \frac{1}{l_2}\right) \quad (6)$$

در روش EA، برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسات زوجی، مقدار S_i که خود یک عدد مثلثی است، به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Chang, 1996):

$$S_i = \left[\sum_{j=1}^n M_{ij} \times \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} \right]^{-1} \right]^{-1} \quad (7)$$

که در آن M_{ij} مولفه‌ی ij مربوط به معیار m_j می‌باشد. به طور مثال $\sum \sum M_{11}$ از مجموع تمام مولفه‌های اول (l) مربوط به ماتریس معیار اول بدست می‌آید. M_j نیز مجموع هر سطر مربوط به هر ماتریس مقایسه زوجی می‌باشد. به طور مثال M_1 از مجموع مولفه‌های سطر اول ماتریس مقایسه زوجی معیار اول بدست می‌آید. در روش EA، پس از محاسبه S_i ، باید درجه بزرگی آنان را نسبت به هم بدست آورد. به طور کلی اگر M_1 و M_2 دو عدد فازی مثلثی باشند، درجه بزرگی M_1 بر M_2 که با $V(M_1 \geq M_2)$ نشان داده می‌شود، به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود (Chang, 1996):

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_2) = 1 & \text{if } m_1 \geq m_2 \\ V(M_1 \geq M_2) = hgt(M_1 \text{ I } M_2) & \text{if } m_1 < m_2 \end{cases} \quad (8)$$

همچنین:

$$hgt(M_1 \text{ I } M_2) = \frac{u_2 - l_2}{(u_1 - l_1) + (m_2 - m_1)} \quad (9)$$

بهبود روش دمپستر شفر، دانش-محور

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه بهبود روش دانش-مبنای روش دمپستر شفر انجام شده است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیق اوستی و چائوان در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد؛ که از ترکیب روش *AHP* و دمپستر شفر به منظور بررسی اثر حمل و نقل بر توسعه شهری استفاده کردند (*Awasthi and Chauhan, 2011*). در تحقیقی که توسط پهلوانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ انجام شد؛ نخست با استفاده از نظرات کارشناسان، میزان اثر هر آلاینده در آلودگی هوا به صورت فازی تعیین شده است. سپس از روش دمپستر شفر برای تلفیق نظرات مختلف و استخراج وزن نهایی هر فاکتور در آلودگی هوا استفاده شده است (*Pahlavani et al., 2017*). در مطالعه‌ای دیگر، از روش *FAHP* به همراه *GIS* برای شناسایی پتانسیل تولید متان در چین استفاده شده است (*Meng et al., 2014*). همچنین در تحقیقی دو روش *EBF*^۱ و *Fuzzy* برای تعیین مناطق زلزله‌خیز با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ابتدا ۱۱۸ منطقه وقوع زلزله در ۱۰ سال گذشته به کمک منابع مختلف استخراج شده‌اند و سپس هر مدل بر روی داده‌ها پیاده شده است. مقایسه نتایج دو مدل نشان‌دهنده عملکرد بهتر روش *EBF* در شناسایی مناطق زلزله‌خیز می‌باشد (*Bui et al., 2012*).

روش مورد استفاده در این مطالعه توسط امیری در ۲۰۰۸ انجام شده است؛ که از این روش برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای شهر تهران و رتبه‌بندی حوزه‌های شهری از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای به کمک تئوری شهود استفاده کرده است (*Amiri, 2008*). بررسی منابع گوناگون نشان داد که تا کنون مطالعه‌ای در زمینه ترکیب روش *AHP-Fuzzy* با روش دمپستر شفر در زمینه اکتشاف پتانسیل مواد معدنی و یا منابع زمین‌گرمایی صورت نگرفته است. تئوری فازی ابزاری قوی برای مواجهه با عدم قطعیت ناشی از ابهام است و موجب افزایش دقت نتایج می‌گردد (*Wang, 1999*). همچنین روش *AHP* یکی از موفق‌ترین روش‌های دانش-مبنا می‌باشد (*Hosseinali and Alesheikh, 2008*). بنابراین تلفیق این دو روش می‌تواند موجب بهبود نتایج گردد. بر این اساس، در این مطالعه سعی شده تا از تلفیق این دو روش به منظور بهبود نتایج حاصل از روش دانش-محور دمپستر شفر در رتبه‌بندی مناطق مستعد زمین‌گرمایی به عنوان یکی از موارد استفاده جدید از روش دمپستر شفر مورد استفاده قرار گیرد. روش تحلیل سلسه مراتبی فازی روشی قوی در تصمیم‌گیری چند معیاری است. با ترکیب این روش با سیستم اطلاعات جغرافیایی و تئوری شهود دمپستر شفر، امر تصمیم‌گیری چندمعیاره در رتبه‌بندی و اولویت‌بندی در سطوح وسیع و با دقت بالا امکان‌پذیر خواهد بود.

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

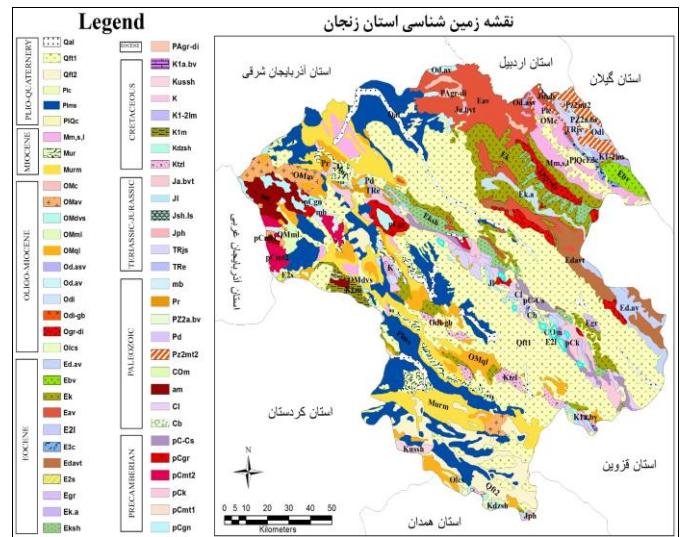
کهن‌ترین تشکیلات آشکار در استان عبارت است از سنگ‌هایی که دگرگون شده‌اند. همچنین شیل‌های غیر دگرگونی و متعلق به تشکیلات کهر و

گرانیت (گرانیت دوران) در هم تنیده این سنگ‌ها یک مجموعه‌ی زیرین به قدمت پراکامبرین را می‌سازند. بر روی این مجموعه در کوه‌ها و ارتفاعات سلطانیه (شرق زنجان) تقریباً ۲۰۰ متر سنگ‌های ماسه‌ای یا شیلی و دولومیتی بنام گروه آنفراکامبرین قرار دارد. این گروه را به ترتیب تشکیلات بایندر (جنوب زنجان) سلطانیه، باروت و زاگون تقسیم کرده‌اند. از نظر ساختمانی ناحیه به چندین رشته کوه‌های موازی که روند شمال غربی-جنوب شرقی دارند تقسیم شده؛ که مابین آنها قسمت‌های پست قرار دارند. این مجموعه بسوی جنوب، روی لایه‌ی دوران سوم رانده شده است. حوضچه‌ی منجیل (نئوژن) این کوه‌ها را از کوه‌های طارم جدا می‌کند. کوه‌های طارم به طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌هایی که بیشتر از نوع آتشفشانی هستند (اوسن) که به طور غیر عادی دستخوش تغییر شکل تکتونیکی کمی قرار گرفته‌اند. بخش بیشتر رخنمون‌های شمال استان زنجان مجموعه‌های آذرآواری اوسن (سازند کرج) است؛ که به دو عضو امند و کرد کند تقسیم شده‌اند. لیتولوژی چیره ردیف‌های آذرین آواری بخش شمالی استان، همانند سایر نواحی البرز، از نوع توف‌های سبز به همراه میان لایه‌های شیلی و گاهی آهکی است؛ که سیمای یک کمر بند خمیده به سمت راست را دارد. جدا از ردیف‌های آذرین آواری، در این مجموعه همراهانی از گدازه‌های آندزیتی، آندزی - بازالتی، ریو داسیت پورفیری و غیر پورفیری وجود دارد؛ که هم به صورت زیردریایی و هم در سطح خشکی تشکیل شده‌اند. از ویژگی‌های بارز زمین‌شناسی ارتفاعات ماگمایی شمال استان زنجان توده‌های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی درشت‌دانه است؛ که داخل مجموعه‌های آذرآواری اوسن (سازند کرج) تزریق شده‌اند به همین لحاظ این توده‌ها سن بعد از اوسن دارند. یکی از مشخصات توده‌های نفوذی پس از اوسن ایجاد هاله‌های دگرسان در آواری‌های آتشفشانی اوسن است. در استان زنجان، نواحی واقع در جنوب کوه‌های طارم، بخشی از ورق ایران مرکزی هستند که در نتیجه عملکرد گسل‌های شمال شرقی - جنوب غربی به چند بلوک تکتونیکی محدود به زون‌های گسلی تبدیل شده‌اند (آقانباتی، ۱۳۹۰). با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی در مناطق کوهستانی این استان که مرتبط با توده‌های آتشفشانی جوان و گسل‌ها، وجود تراورتن و چشمه‌های آب گرم که با توجه به نقشه بیشتر در نواحی شمالی و شمال شرقی استان هستند؛ احتمال وجود منابع زمین‌گرمایی زیاد است. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی یکپارچه شده مربوط به استان زنجان به همراه سازندها و سن آنها نشان داده شده است.

لایه لیتولوژی: در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی یکی از معیارهای مهم بررسی شواهد موجود از قبیل وجود چشمه‌های آب گرم و وجود سنگ‌های از جنس تراورتن در اطراف می‌باشد، همچنین بررسی مطالعات و گزارش‌های قبلی موجود از منطقه مورد بررسی اهمیت زیادی دارد. با بررسی این نکات وجود سنگ‌های ولکانیک جوان مربوط به پلیئوکواترن یکی از معیارهای مهم سنگ‌شناسی در پتانسیل‌یابی منابع زمین‌گرمایی است. بنابراین لایه اطلاعاتی لیتولوژی، با لحاظ موارد ذکر شده و مشخص کردن توده‌های نفوذی جوان و همچنین تراورتن‌های موجود در منطقه تهیه

1-Evidential Belief Function

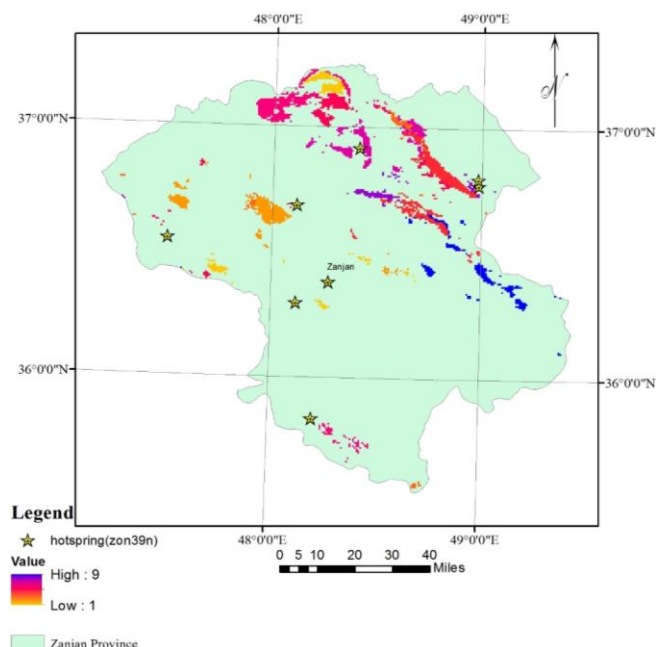
لایه گسل‌ها و خطواره‌ها: یکی دیگر از معیارهای مهم در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی گسل‌ها هستند. اکثراً در مناطقی که منابع زمین‌گرمایی وجود دارد سنگ‌ها ناتراوا بوده و گسل‌ها و شکستگی‌ها هستند؛ که نقش مهمی را در انتفال و یا حتی شکل‌گیری مخازن آب‌های گرم ایفا می‌کنند. آب گرم تحت فشار بسته به ترکیب شیمیایی آن از داخل زون‌های شکسته به سمت بالا می‌آیند. پس یکی از نشانه‌های قطعی منابع زمین‌گرمایی گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌باشد (Vidal, 2018). این لایه اطلاعاتی با استفاده از ترکیب گسل‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی، مرزها و ساختارهای خطی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی هوابرد و خطواره‌های بدست آمده از داده‌های ماهواره‌ای ETM، با تهیه نقشه چگالی گسل‌ها و همچنین نقشه مربوط به خطواره‌های حاصل از داده‌های ماهواری و تلفیق آنها با برهم نهی فازی^۱ و عملگر AND بدست آمد (شکل ۴).



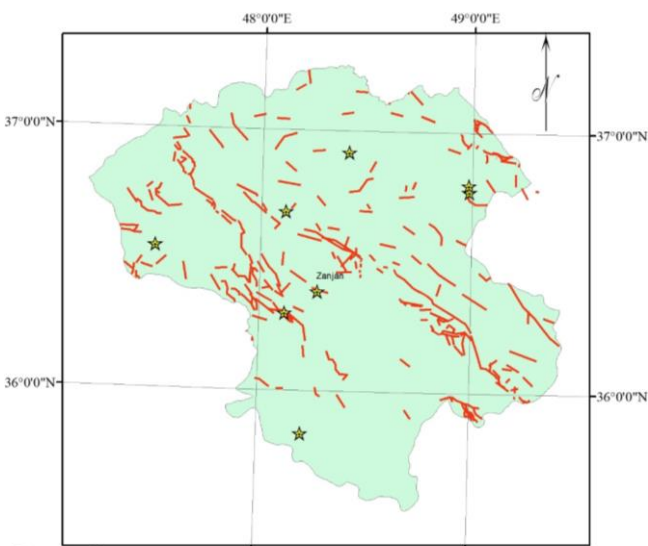
شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی یکپارچه شده استان زنجان (سهندی و سهیلی، ۱۳۹۰)

۴- لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده

در شکل ۳ لایه لیتولوژی مربوط به منابع زمین‌گرمایی استان زنجان نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشخص است، تنها سازندهای مرتبط با منابع زمین‌گرمایی (به ترتیب اهمیت) برای این لایه در نظر گرفته شده‌اند؛ که بر اساس اهمیت هر سازند به آنها امتیاز داده شده است.



شکل ۳: لایه‌ی اطلاعاتی لیتولوژی مربوط به استان، همان‌طور که در شکل مشخص است، تنها سازندهای مرتبط با منابع زمین‌گرمایی در نظر گرفته شده و بر اساس اهمیت کلاسه بندی شده‌اند.



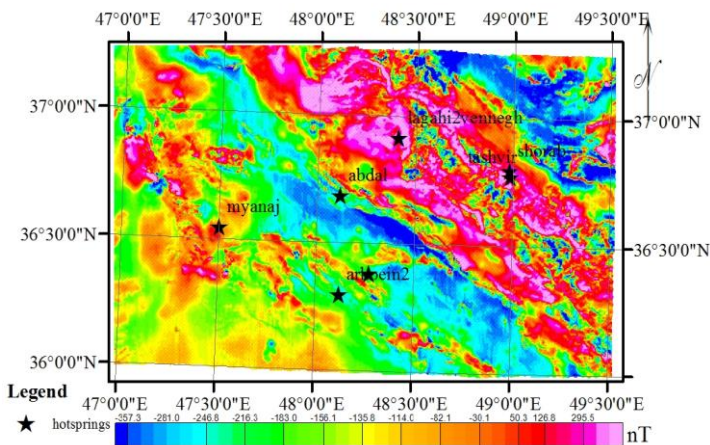
شکل ۴: گسل‌ها و ساختارهای موجود در محدوده استان همراه با محل چشمه‌های آب گرم که با علامت ستاره مشخص شده‌اند.

لایه آلتراسیون‌ها: آلتراسیون‌های گرمایی نیز یکی از معیارهای وجود منابع زمین‌گرمایی می‌باشند؛ که با استفاده از مطالعه و پردازش داده‌های ماهواره‌ای بدست می‌آیند (Calvin, 2005) در این مطالعه با استفاده از انواع داده‌های ماهواره‌ای استر مربوط به منطقه، در نرم‌افزار Envi آلتراسیون‌های موجود شناسایی شدند و مجموع آن‌ها به عنوان یک لایه اطلاعاتی اکتشافی در نظر گرفته شد. در شکل ۵ آلتراسیون‌های موجود در منطقه مورد مطالعه همراه با محل چشمه‌های آبگرم نشان داده شده است.

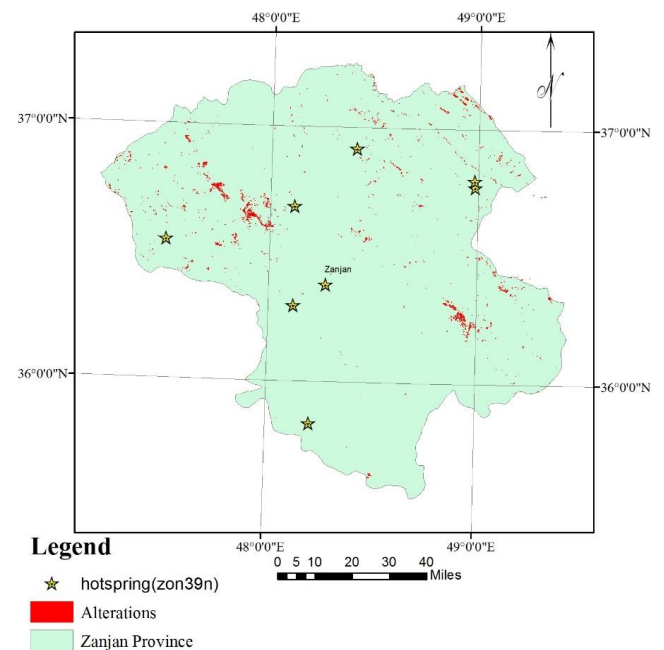
لایه ژئوفیزیکی: در بررسی داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی برای شناسایی منابع زمین‌گرمایی در مناطقی که توده‌ی نفوذی وجود داشته

مگنتیت مهمترین کانی مغناطیسی در سنگ های آذرین بوده و دمای کوری حدود ۵۸۰ درجه دارد (Stacey, 1977). بنابراین می توان از داده های مغناطیس برای تخمین عمق کوری برای شناسایی مناطق زمین گرمایی استفاده کرد. با توجه به این که هر چقدر عمق کوری در منطقه ای کمتر باشد، نشان دهنده گرادیان حرارتی بالای آن منطقه و در نتیجه پتانسیل وجود منابع زمین گرمایی است؛ نقشه ی مربوط به عمق کوری نیز تهیه شد و با نقشه داده های مغناطیسی تلفیق شد؛ تا نقشه بدست آمده از ترکیب این دو نقشه به عنوان لایه ی اطلاعاتی ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گیرد (Elbarbary, 2018). مطابق شکل ۷ عمق کوری استان زنجان بین ۷/۵ تا ۳۸ کیلومتر محاسبه شده است. در شکل ۷، در مرکز نقشه و در شمال شهر زنجان یک بی هنجاری نقطه کوری با عمق کمتر از ۸ کیلومتر قابل مشاهده است؛ که بر روی توف و آگلومرا و آندزیت های سازند کرج با سن ائوسن واقع شده و رخنمون هایی از توده های نفوذی گرانیت و گرانودیوریت ترشیری نیز در این محدوده به چشم می خورد. وجود این توده های نفوذی می تواند دلیلی بر فعالیت های زمین گرمایی گذشته یا حال محدوده مزبور باشد. همچنین در اطراف این بی هنجاری چند چشمه آبگرم شامل چشمه آبگرم ونتق در شمال، چشمه آبگرم قینرجه در جنوب و چشمه آبگرم ابدال در غرب و آبگرم های شوراب و تشویر در شرق آن واقع شده اند که می تواند معرف خوبی برای فعالیت های زمین گرمایی در محدوده مورد بحث باشد. در این نقشه دو بی هنجاری دیگر با عمق نقطه کوری کم در مرز شرقی و یک بی هنجاری در قسمت جنوب غربی استان قابل رویت است که وجود دو چشمه آبگرم میاناج در شمال و چشمه آرکونین در غرب بی هنجاری جنوب غرب محدوده نیز آن موید فعالیت های زمین گرمایی این بخش استان است (فردوسی و مرادزاده، ۱۳۹۷).

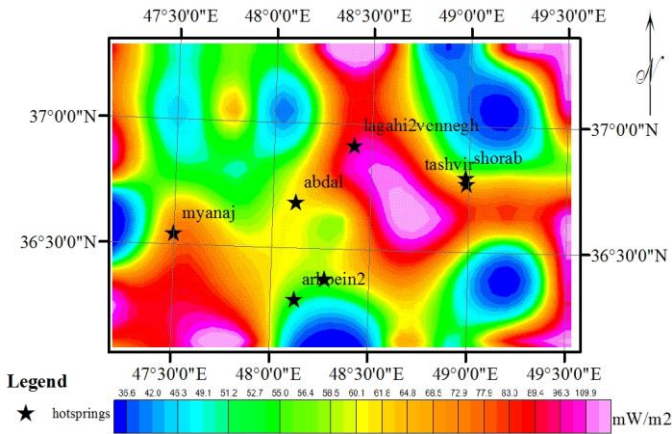
باشد؛ ولی نقشه های گرانی سنجی و یا مغناطیس سنجی مقادیر کمی (بی-هنجاری منفی) را نمایش دهند؛ نشان دهنده این است که ممکن است در آن مناطق منبع زمین گرمایی وجود داشته باشد. در نتیجه این مورد می تواند به عنوان یک معیار برای شناسایی منابع زمین گرمایی استفاده شود (Abdel Zaher, 2018). در مطالعه حاضر از داده های مغناطیس هواپرد با فواصل خطوط پرواز ۵۰۰ متر و ارتفاع پرواز ۱۲۰ متر برای نیل به هدف استفاده شد. این داده ها در سال ۱۹۷۶ تا ۱۹۷۸ برداشت شده اند. داده های مذکور وارد نرم افزار Oasis Montaj شدند. برای پردازش داده ها نقشه مغناطیس بازماند و نقشه برگردان به قطب مغناطیسی تهیه شدند. در نقشه برگردان به قطب داده های مغناطیس سنجی (شکل ۶) مناطقی که شدت میدان مغناطیسی مقادیر پایین دارند (یعنی قسمت هایی که در شکل با رنگ آبی مشخص است و مقادیر تقریباً کمتر از $300 nT$ دارند)، به عنوان مناطق مورد نظر در نظر گرفته شدند. یکی دیگر از موارد کاربرد داده های مغناطیس سنجی در اکتشاف منابع زمین گرمایی، بدست آوردن عمق کوری یعنی عمقی که مگنتیت خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهد، است. در دمای کوری کانی های فرومغناطیس به پارامغناطیس تبدیل می شوند (Nwankwo and Sunday, 2017) و عمق کوری عمقی است که در آن به دمای کوری می رسیم و می تواند به عنوان نشانگری از عمق کف منابع مغناطیسی باشد. این عمق می تواند از روی بی هنجاری های مغناطیسی محاسبه شود (Bansal et al., 2011).



شکل ۶. نقشه میدان مغناطیسی برگردان شده به قطب استان زنجان به همراه موقعیت چشمه های آب گرم بر روی آن

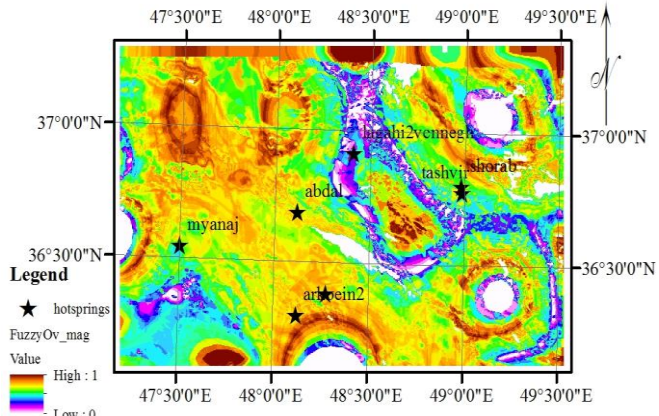


شکل ۵. نقشه آلتراسیون های حاصل از داده های ماهواره ای استر همراه با محل چشمه های آب گرم استان که با علامت ستاره مشخص شده اند.



شکل ۹. نقشه مربوط به جریان حرارتی استان زنجان به همراه موقعیت چشمه‌های آب گرم بر روی آن

پس از تهیه نقشه‌های ذکر شده، بر اساس نشانه‌های مربوط به منابع زمین‌گرایی نقشه‌های بدست آمده با استفاده از منطق فازی در نرم‌افزار Arc GIS با یکدیگر ترکیب شده و نقشه‌ی نهایی به عنوان لایه‌ی اطلاعاتی ژئوفیزیکی بدست آمد. دز شکل ۱۰ نتیجه حاصل از همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی ژئوفیزیکی نشان داده شده است.

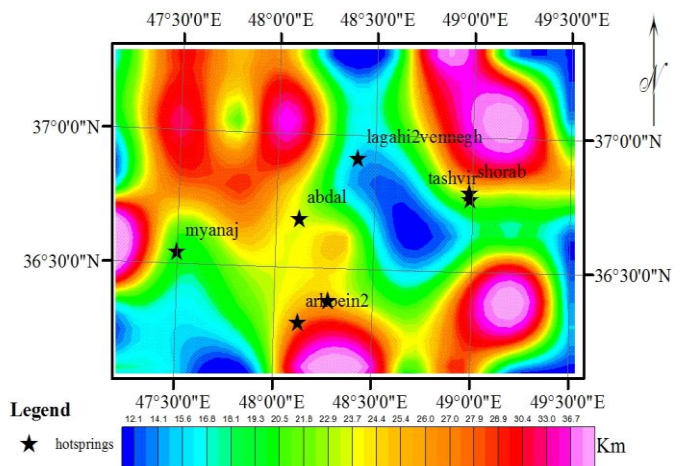


شکل ۱۰. لایه‌ی اطلاعاتی ژئوفیزیکی به همراه موقعیت چشمه‌های آب گرم بر روی آن

۵- پیاده‌سازی

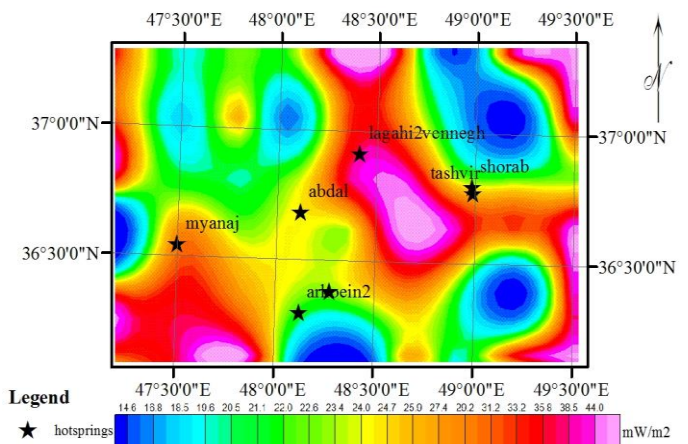
در این قسمت ابتدا لایه‌های اطلاعاتی با تغییرات مقادیر ارزش‌های پیکسل‌های آن در بازه ۰ تا ۱ و با دقت اندازه پیکسل‌های ۱۰۰ متری، با یکدیگر یکسان شدند. سپس با استفاده از روش‌های تلفیق منطق فازی و همپوشانی شاخص، به هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی بر اساس اهمیت و نقش آنها در شناسایی منابع زمین‌گرایی وزن خاصی داده شد و توسط روش‌های تلفیقی مناطق مستعد منابع زمین‌گرایی شناسایی شدند.

با بررسی لایه‌های اطلاعاتی و محاسبه ماتریس همبستگی در نرم‌افزار Arc GIS بین لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده، همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده، با توجه به این موضوع که در صورتی که همبستگی بین لایه‌های اطلاعاتی کمتر از مقدار ۰/۶ باشد، می‌توان آنها را مستقل از هم در نظر



شکل ۷. نقشه عمق کوری محاسبه شده برای استان زنجان به همراه موقعیت چشمه‌های آب گرم بر روی آن

شکل ۸ نقشه گرادبان گرمایی برآورد شده استان را به کمک نقشه عمق کوری نشان می‌دهد؛ که از کمینه ۱۳ تا ۴۶ درجه سانتیگراد به ازای هر کیلومتر تغییر می‌کند. همان طوری که در شکل مشخص است، مناطق بالای گرادبان حرارتی عمدتاً در یک زون با روند جنوب‌غرب تا شمال‌غرب استان و جایی که عمده چشمه‌های آبگرم وجود دارند، قرار می‌گیرند. شکل ۹ نقشه جریان حرارتی استان را که با داده‌های شکل ۷ و ۸ تهیه شده است را نمایش می‌دهد؛ که از یک مقدار کمینه ۳۱/۲ تا بیشینه ۱۶۷ میلی‌وات بر مترمربع در تغییر است. مقایسه شکل‌های ۷ و ۹ نشان می‌دهد که مناطق با عمق کوری کم دارای جریان حرارتی بالا می‌باشند. مطالعات قبلی بیانگر آن است که مناطق با جریان حرارتی ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌وات بر مترمربع پتانسیل زمین‌گرایی آن منطقه است (Jessop et al., 1976). این نقشه خود یکی از معیارهای مربوط به شناسایی و کشف منابع زمین‌گرایی است. در این نقشه مناطقی که جریان حرارتی بالایی دارند مناطق مستعد وجود منابع زمین‌گرایی می‌باشند.

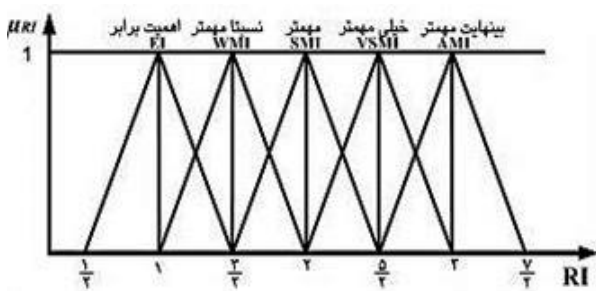


شکل ۸. نقشه گرادبان گرمایی برآورد شده در استان زنجان به همراه موقعیت چشمه‌های آب گرم بر روی آن

دسته بندی شده؛ که کلاس پنجم فواصل بیش از ۱۵۰۰ متر را در بر می گیرد. همچنین چگالی مربوط به گسل ها در فاصله ۱۰۰۰ متری اطراف گسل محاسبه شده و در پنج کلاس دسته بندی شده است. مقادیر لایه های دگرسانی نیز به چهار کلاس تقسیم شده اند و کلاس پنجم این لایه ها نیز مناطقی را نشان می دهد که در آنها دگرسانی وجود ندارد. لایه لیتولوژی بر اساس نوع سنگ مرتبط با منابع زمین گرمایی به پنج کلاس دسته بندی شده و لایه اطلاعاتی ژئوفیزیکی نیز به پنج کلاس تقسیم شده اند.

۵-۱- پیاده سازی روش Fuzzy AHP و محاسبه وزن ها

برای محاسبه وزن ها به روش Fuzzy AHP، ماتریس ارجحیت کلاس ها با در نظر گرفتن ارجحیت های مختلف برای لایه های اطلاعاتی به عنوان نظر کارشناسان (ه البته در این جا به جای استفاده از کارشناسان مختلف از اطلاعات پیشین مربوط به اهمیت هر کدام از معیارها در اکتشاف منابع زمین گرمایی استفاده شد (کی نژاد ۱۳۹۱؛ Yousefi, 2007))، با استفاده از شکل ۱۱ به اعداد فازی مثلثی تبدیل شده و سپس وزن مربوط به هر کلاس برای هر کارشناس محاسبه شده است.



شکل ۱۱. مقیاس های زبانی برای بیان درجه اهمیت، محور افقی اعداد مربوط به هر کدام از متغیرهای زبانی را نشان می دهد (مالچفسکی، ۱۳۸۵)

با توجه به معیارهای مرتبط با منابع زمین گرمایی و اهمیت هر یک از آنها در اکتشاف این منابع، سه ماتریس برای نظر کارشناس در نظر گرفته شد؛ وزن های فازی بدست آمد و با بررسی سازگاری وزن های داده شده، اوزان نهایی برای هر یک از معیارها مشخص شد. در جدول ۲ وزن های نهایی مربوط به هر یک از معیارهای بدست آمده از روش Fuzzy AHP آمده است.

جدول ۲. وزن نهایی مربوط به هر لایه تعیین شده با توجه به نظرات

کارشناسی	
نام لایه	وزن
لیتولوژی	۰/۳۱۶۵
دگرسانی	۰/۱۷۲
خطواره	۰/۲۳۰۴
ژئوفیزیک	۰/۲۸۲۱

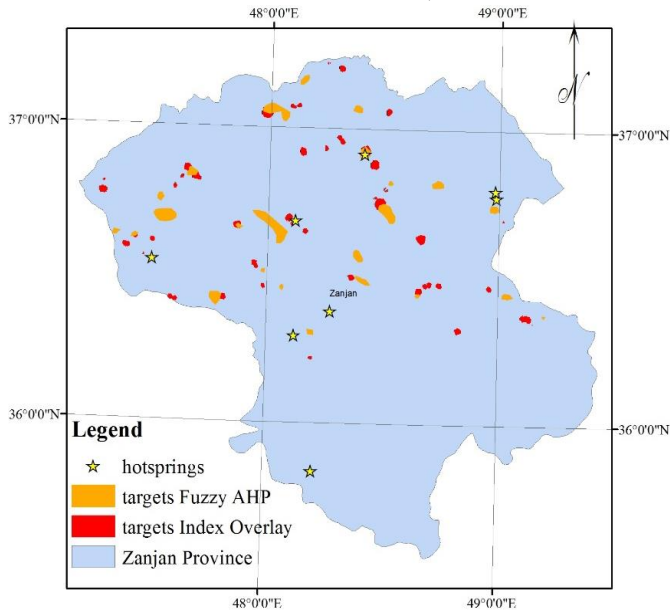
گرفت (راعی و همکاران، ۱۳۹۴)؛ مشخص شد که هر کدام از لایه های مربوط به اطلاعات زمین شناسی، سنگ شناسی منطقه، گسل ها و خطواره های موجود، لایه مربوط به آلتراسیون ها و لایه اطلاعاتی ژئوفیزیکی از یکدیگر مستقل بوده و با یکدیگر همبستگی ندارند. البته در مورد لایه اطلاعاتی ژئوفیزیکی، لایه های عمق کوری و گرادیان گرمایی و جریان حرارتی با همدیگر همبستگی دارند و تنها نقشه برگردان به قطب میدان مغناطیسی مستقل از آنها می باشد. پس در تلفیق لایه های اطلاعاتی ژئوفیزیکی و بدست آوردن لایه نهایی اطلاعات ژئوفیزیکی ابتدا لایه های اطلاعاتی مربوط به عمق کوری و جریان حرارتی و گرادیان حرارتی با استفاده از همپوشانی منطق فازی گامی ۰/۹ در نرم افزار Arc GIS با یکدیگر تلفیق شده و در نتیجه لایه بدست آمده از این همپوشانی که مستقل از سایر لایه های اطلاعاتی است؛ در بررسی های بعدی استفاده شد. در نهایت با استفاده از ترکیب روش های دمپستر شفر و Fuzzy AHP مناطق مستعد پتانسیل زمین گرمایی اولویت بندی شدند. جهت وزن دهی به لایه ها با توجه به اهمیت آن ها و ارتباط آن ها با منابع زمین گرمایی سه جدول متفاوت برای وزن های در نظر گرفته برای معیارها تهیه شد.

جدول ۱. ماتریس همبستگی بین لایه های اطلاعاتی استفاده شده، همان طور که مشخص است، همبستگی بین لایه ها کمتر از ۰/۶ می باشد.

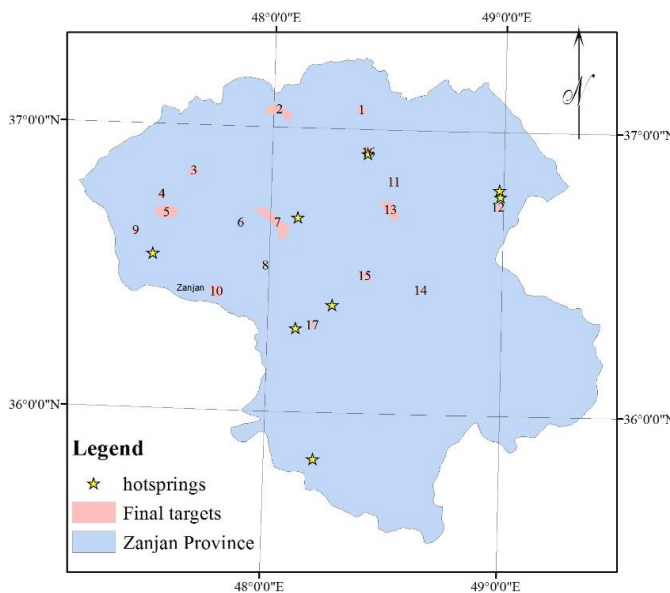
لایه ها	زمین شناسی	آلتراسیون ها	خطواره ها	ژئوفیزیک
زمین شناسی	۱	۰/۵۱۱۰۸	۰/۵۱۹۶۲	۰/۴۳۹۹۷
آلتراسیون ها	۰/۵۱۱۰۸	۱	۰/۲۴۷۶۴	۰/۳۹۶۱۸
خطواره ها	۰/۵۱۹۶۲	۰/۲۴۷۶۴	۱	۰/۲۶۶۶۸
ژئوفیزیک	۰/۴۳۹۹۷	۰/۳۹۶۱۸	۰/۲۶۶۶۸	۱

برای پیاده سازی روش های ترکیب اطلاعات نخست باید اهمیت هر کدام از معیارهای اکتشافی و اولویت آنها در پتانسیل یابی منابع زمین گرمایی بررسی شود. برای این منظور با بررسی مطالعات مربوط به پتانسیل منابع گرمایی و استفاده از معیارهای اکتشافی در شناسایی این منابع با توجه به معیارهای موجود اهمیت و اولویت لایه های اکتشافی به این صورت می باشد؛ که لایه ای اطلاعات زمین شناسی، با توجه به این که چشمه های آب گرم و سایر شواهد مربوط به منابع زمین گرمایی بیشترین ارتباط با این لایه را دارند؛ بیشترین اهمیت را دارد. اهمیت لایه ای اطلاعاتی آلتراسیون ها پس از لایه ای زمین شناسی است و و پس از آن لایه ای گسل ها و شکستگی ها و در نهایت لایه ای اطلاعاتی ژئوفیزیکی (داده های مغناطیس سنجی) به عنوان آخرین لایه اطلاعاتی قرار می گیرد. در این مطالعه از نقشه مربوط به مکان های چشمه های آب گرم به عنوان یکی از مهم ترین نشانه های وجود منابع زمین گرمایی و دیگر شواهد مربوط به منابع زمین گرمایی در اعتبارسنجی نتایج؛ استفاده شده است.

به منظور بررسی لایه های اطلاعاتی، در اطراف گسل های موجود چهار بافر به فواصل ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری زده شده و در پنج کلاس



شکل ۱۳. مناطق مستعد منبع زمین‌گرمایی با استفاده از روش Fuzzy Overlay همراه با محل چشمه‌های آبگرم



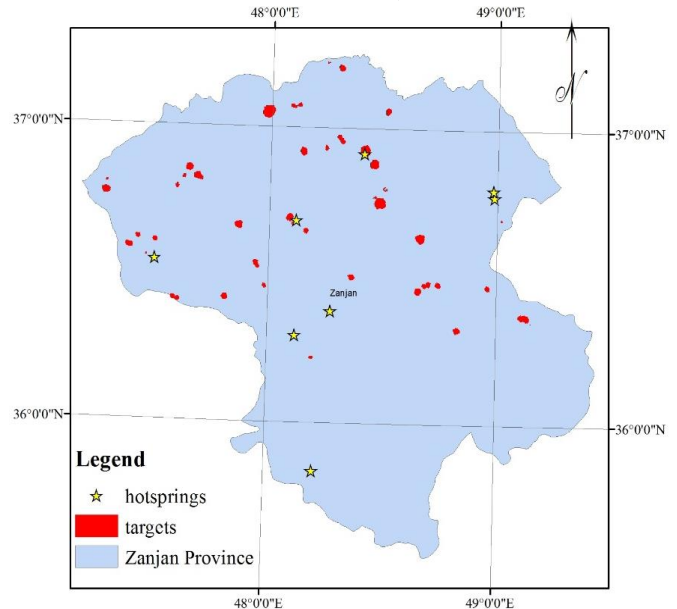
شکل ۱۴. مناطق نهایی مستعد پتانسیل زمین‌گرمایی انتخاب شده استان زنجان همراه با محل چشمه‌های آبگرم

۳-۵- روش دمپستر شفر در رتبه‌بندی مناطق مستعد زمین‌گرمایی

پس از بدست آوردن مناطق مربوط به منابع زمین‌گرمایی که شامل ۱۷ منطقه می‌باشد، مقدار هر کدام از معیارها در هر کدام از این مناطق به شرح جدول ۳ بدست آمد. در مرحله بعد گروه‌بندی گزینه‌ها بر اساس تک تک معیارها انجام شد. با توجه به مقادیر بدست آمده برای هر یک از معیارها که در جدول ۳ آمده است؛ برای هر کدام از مناطقی که در شکل ۱۴ مشخص شدند، درخت تصمیم‌گیری مربوط به مقادیر مشترک معیارها به صورت

۲-۵- پیاده‌سازی روش همپوشانی شاخص و Fuzzy AHP برای یافتن مناطق مستعد

برای یافتن مکان‌های مستعد پتانسیل زمین‌گرمایی از روش همپوشانی شاخص برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی استفاده شد. لایه‌های اطلاعاتی به ترتیب اهمیت و ارتباط با منابع زمین‌گرمایی قرار گرفتند و پس از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی با انجام روش همپوشانی شاخص مناطق مستعد همراه با محل چشمه‌های آبگرم (شکل ۱۲) بدست آمد.



شکل ۱۲. مناطق با پتانسیل زمین‌گرمایی بدست آمده از روش همپوشانی شاخص همراه با محل چشمه‌های آبگرم

با توجه به پلیگون‌های مناطق بدست آمده، با توجه به این که هر کدام از معیارها در هر پیکسل یک مقدار دارند؛ با میانگین‌گیری از مقادیر پیکسل‌های موجود در هر پلیگون، می‌توان مقادیر هر یک از معیارها را در هر کدام از مناطق بدست آورد و با استفاده از اوزان بدست آمده به کمک روش *Fuzzy AHP*، از روش دمپستر شفر بهبود یافته برای اولویت‌بندی مناطق مستعد زمین‌گرمایی استفاده نمود. البته از آنجا که تعداد مناطق بدست آمده زیاد است و بررسی همه آنها مشکل می‌باشد؛ با استفاده از روش *Fuzzy AHP* و به کار بردن وزن‌های بدست آمده از این روش برای هر کدام از لایه‌های اکتشافی و انجام روش همپوشانی فازی، لایه‌های اطلاعات اکتشافی نیز مناطق مستعد زمین‌گرمایی فرض شدند. سپس مناطقی که در هر دو روش مشترک بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. مناطق مستعد بدست آمده حاصل از انجام روش *Fuzzy AHP* در شکل ۱۳ آمده است.

در نهایت مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی، با بررسی روش‌های همپوشانی ذکر شده به صورت شکل ۱۴ بدست آمدند. این مناطق که در نهایت شامل ۱۷ پلی‌گون هستند و به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری در رتبه‌بندی استفاده می‌شوند؛ برای سهولت در بررسی، شماره‌گذاری شدند.

جدول ۴ تهیه شد.

جدول ۳. مقادیر هریک از معیارها در هر کدام از مناطق مستعد (گزینه‌ها)

Attributes	Lithology	Alteration	Structures	Geophysics
1	0.5	0.9	0.8	0.5
2	0.6	0.5	0.6	0.4
3	0.3	0.9	0.9	0.3
4	0.2	0.6	0.4	0.4
5	0.2	0.5	0.7	0.3
6	0.3	0.9	0.4	0.6
7	0.3	0.7	0.7	0.4
8	0.1	0.4	0.2	0.7
9	0.6	0.5	0.5	0.5
10	0.1	0.6	0.9	0.3
11	0.2	0.4	0.9	0.8
12	0.4	0.3	0.5	0.5
13	0.4	0.5	0.7	0.6
14	0.2	0.4	0.5	0.4
15	0.1	0.6	0.8	0.5
16	0.8	0.3	0.1	0.7
17	0.2	0.5	0.9	0.4

جدول ۵. مقادیر حاصل از ترکیب به روش *DS-Fuzzy AHP* و

اولویت‌بندی گزینه‌های مستعد زمین‌گرمایی

Attributes	Value	Rank
11	0.702984698	1
16	0.621764126	2
13	0.591804611	3
1	0.56178742	4
15	0.541010562	5
3	0.497339954	6
17	0.486202247	7
7	0.46519496	8
8	0.460952972	9
6	0.455512083	10
10	0.447143344	11
9	0.439396646	12
2	0.401091978	13
12	0.38540998	14
5	0.367891785	15
4	0.31296057	16
14	0.3095178	17

به این ترتیب در آخرین مرحله‌ی ترکیب دوبه‌دویی معیارها برای هر کدام از گزینه‌ها مقداری بدست می‌آید که هر چقدر این مقدار برای هر گزینه بالاتر باشد نشان‌دهنده اولویت پتانسیل زمین‌گرمایی می‌باشد، و به این ترتیب با توجه به مقادیر هریک از گزینه‌ها می‌توان آن‌ها را به ترتیب اهمیت پتانسیل زمین‌گرمایی مرتب نمود. مقادیر بدست آمده برای هر کدام از گزینه‌ها توسط روش *Dempster Shafer (DS)-Fuzzy AHP* در جدول ۴ آمده است. با توجه به نقشه‌های شاهد مربوط به وجود پتانسیل زمین‌گرمایی مانند نقشه‌های تراورتن‌های موجود در منطقه و همچنین وجود چشمه‌های آبگرم در محدوده مورد بررسی، صحت مناطق بدست آمده در جدول ۵ بررسی شد.

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج بدست آمده و ارزیابی آنها با شواهد مربوط به منابع زمین‌گرمایی، که مهمترین آنها چشمه‌های آب گرم موجود در منطقه می‌باشند؛ مشخص شد که تلفیق با استفاده از روش‌های دمپستر شفر و *Fuzzy AHP* نتایج قابل قبولی ارائه نموده و مناطق مستعد بدست آمده در ارتباط نزدیکی با یکدیگر و چشمه‌های آب گرم هستند. همچنین اولویت‌بندی که با این روش ترکیب اطلاعات انجام شد، نشان دهنده‌ی این است که مناطق شماره ۱۱، ۱۶، ۱۳ و ۱ در اولویت پتانسیل زمین‌گرمایی قرار دارند؛ که با بررسی محل چشمه‌های آب گرم و شواهدی نظیر وجود سنگ‌های تراورتن این موضوع تایید شد.

با توجه به وزن‌های بدست آمده از روش *Fuzzy AHP*، که برای هر کدام از معیارهای زمین‌شناسی، آلتراسیون، ساختارها و ژئوفیزیک به ترتیب برابر ۰/۳۱۶۵، ۰/۱۷۲، ۰/۲۳۰۴ و ۰/۲۸۲۱ است؛ مقادیر مربوط به تابع جرم روش دمپستر شفر از رابطه‌ی (۱۴) بدست آمد (Beynon, 2006).

$$m(s_i) = \frac{a_i \times P}{\sum_{j=1}^d a_j} \quad i=1,2,\dots,d \quad (14)$$

که در آن P وزن معیارها بدست آمده از روش *Fuzzy AHP*، a_1, a_2, \dots, a_d مقادیر مربوط به هر معیار در هر کدام از گزینه‌ها و S_1, S_2, \dots, S_d نیز نشان‌دهنده‌ی گروه‌های گزینه‌ها می‌باشند.

پس از محاسبه مقادیر تابع جرم برای هر یک گروه‌های مربوط به گزینه‌ها، معیارها را به ترتیب اهمیت مرتب کرده و دو به دو مقادیر اشتراک و عدم اشتراک هر کدام از گزینه‌ها بررسی شد و با کمک رابطه‌ی دمپستر شفر با یکدیگر ترکیب شدند. از آنجایی که در روش ترکیب اطلاعات دمپستر شفر با اوزان بدست آمده از روش *Fuzzy AHP* استفاده می‌شود، در مخرج کسر (یعنی جایی که حاصل تفریق میزان عدم اشتراک گزینه‌ها از مقدار یک قرار می‌گیرد)، ضرب وزن‌های مربوط به دو معیار مورد بررسی به جای مقدار یک استفاده شد.

جدول ۴. درخت تصمیم‌گیری روش DS-Fuzzy AHP

	Lithology		Alteration		Structures		Geophysics	
	attributes	Value	attributes	Value	attributes	Value	attributes	Value
S ₁	1	0.5	1,3,6	0.9	1,15	0.8	1,9,12,15	0.5
S ₂	2,9	0.6	2,5,9,13,17	0.5	2	0.6	2,4,7,14	0.4
S ₃	3,6,7	0.3	4,10,15	0.6	3,10,11,17	0.9	3,5,10	0.3
S ₄	4,5,11,14,17	0.2	7	0.7	4,6	0.4	6,13	0.6
S ₅	8,10,15	0.1	8,11,14	0.4	5,7,13	0.7	8,16	0.7
S ₆	12,13	0.4	12,16	0.3	8	0.2	11	0.8
S ₇	16	0.8			12,9,14	0.5		
S ₈					16	0.1		

GIS. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱، جلد ۳، صفحه ۱۱۶-۱۰۵.

مالچفسکی، ی. ۱۳۸۵. سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چندمعیاری. تهران، انتشارات سمت تهران.

Abdel Zaher, M., Saibi H., Mansour, Kh. Khalil, A., Soliman, M. 2018. Geothermal exploration using airborne gravity and magnetic data at Siwa Oasis, Western Desert, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3824–3832.

Amiri, A., 2008- Assessment of seismic risk in Tehran using uncertainty theories, *MSC thesis, University of Tehran, faculty of engineering.*

Andrić, J. M., & Lu, D.-G. 2016. Risk assessment of bridges under multiple hazards in operation period. *Safety Science*, 83(Supplement C), 80-92.

Awasthi, A., & Chauhan, S. S. 2011. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluating sustainable transport solutions. *Environmental Modelling & Software*, 26(6), 787-796.

Bansal, A. R., Gabriel, G., Dimri, V. P., and Krawczyk, C. M. 2011. Estimation of depth to the bottom of magnetic sources by a modified centroid method for fractal distribution of sources: An application to aeromagnetic data in Germany: *Geophysics*, 76, L11–L22.

Beynon, M., M. Munday, A. Robert, 2006, Using DS/AHP to Rank of Sectors on Their Potential to Strengthen Regional Economic Development. *Cardiff Business School, UK.*

Bonham-Carter, G. F., 1991. *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS*, Pergamon, Ontario, PP 319-470.

Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. B. 2012. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): a comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *Catena*, 96, 28-40.

Calvin, W.M., Coolbaugh, M., Kratt, C., Vaughan, R.G.

پس می‌توان گفت که استفاده از روش Fuzzy AHP در وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی باعث لحاظ شدن عدم قطعیت در تصمیم‌گیری شده و با ترکیب این اوزان با روش دمپستر شفر شواهد مختلف با یکدیگر ترکیب گردیده و این امر باعث رسیدن به نتایجی قابل اعتمادتر شده است. البته اگر تعداد لایه‌های اکتشافی و شواهد بیشتری مورد بررسی قرار گیرند؛ می‌توان به نتایج بهتری با این روش رسید.

۷- منابع

آقانباتی، ع.، ۱۳۹۰. زمین‌شناسی و توان معدنی استان زنجان. فصل‌نامه رشد آموزش زمین‌شناسی، شماره ۶۷، صفحه ۱۸ تا ۲۵.

راعی، ا.، پهلوانی، پ.، حسنلو، م. ۱۳۹۴. تعیین فاکتورهای موثر بر آتش-سوزی جنگل با استفاده از ترکیب رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی و الگوریتم ژنتیک، مطالعه موردی: جنگل‌های استان گلستان، نشریه علمی پژوهشی فناوری اطلاعات مکانی، سال سوم شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۴.

سهندی، م. ر.، سهیلی، م.، ۱۳۹۰. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

فردوسی، ح.، مرادزاده، ع. ۱۳۹۷. تخمین عمق کوری و جریان حرارتی استان زنجان جهت شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی به کمک داده‌های مغناطیس‌هوابرد با قدرت تفکیک بالا. مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اردیبهشت ۱۳۹۷، صفحه ۴-۱.

کشت‌دار، ع. ۱۳۹۶. پتانسیل‌یابی منابع زمین‌گرمایی در استان زنجان با استفاده از تلفیق لایه‌های مختلف اکتشافی. پایان‌نامه کارشناسی-ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ۱۶۰ ص.

کی‌نژاد، ص.، مختاری، ا.، فتحیان‌پور، ن.، ایران‌نژادی، م.، ۱۳۹۱. پتانسیل‌یابی منابع زمین‌گرمایی استان آذربایجان شرقی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در محیط

- Pahlavani, P., Sheikhan, H., & Bigdeli, B. 2017. Assessment of an air pollution monitoring network to generate urban air pollution maps using Shannon information index, fuzzy overlay, and Dempster-Shafer theory, A case study: Tehran, Iran. *Atmospheric Environment*, 167(Supplement C), 254-269.
- Stacey, F. O., 1977, *Physics of the Earth*, John Wiley and Sons, New York.
- Van Laarhoven, P., & Pedrycz, W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy sets and Systems*, 11(1-3), 229-241.
- Vidal, J., Genter, A., 2018. Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells. *Geothermics*, 74, 57-73
- Wang, L.-X. 1999. *A course in fuzzy systems: Prentice-Hall press, USA*.
- Yalcin, M., Kilic Gul, F. 2017. A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar). *Geothermics* 67, 18-28.
- Yousefi, H.; Noorollahi, Y.; Ehara, S.; Itoi, R.; Yousefi, A. Fujimitsu, Y.; Nishijima, J.; Sasaki, K. 2010. Developing the geothermal resources map of Iran, *Geothermics*, Vol. 39, No.2 pp.140-151 ref.34.
- Yousefi, H.; Ehara, S., Noorollahi, Y. 2007. *Geothermal Potential Site Selection Using GIS in IRAN. Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 2007 SGP-TR-183*.
- Yousefi, M., & Carranza, E. J. M. 2016. Data-driven index overlay and Boolean logic mineral prospectivity modeling in greenfields exploration. *Natural Resources Research*, 25 (1), 3-18
- and Calvin, W., 2005, *Application of remote sensing technology to geothermal exploration*, *Geological Survey of Nevada*, pp. 1083-1089.
- Chang, D.-Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655.
- Elbarbarya, S., Abdel Zahera, M., Mesbaha, H., El-Shahatb, A., Embabyc, A. Curie point depth, heat flow and geothermal gradient maps of Egypt deduced from aeromagnetic data. 2018. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 620-629.
- Erdogdu, E. 2009. A snapshot of geothermal energy potential and utilization in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(9): p. 2535-2543.
- Hosseinali, F., & Alesheikh, A. A. 2008. Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration. *American Journal of Applied Sciences*, 5(9), 1187-1198.
- Jessop, A. M., Habart, M. A., and Sclater, J. G., 1976. *The world heat flow data collection 1975. Geothermal Services of Canada, Geotherm. Ser.*, 50, 55-77.
- Kiavarz, M., Jelokhani-Niaraki, M. 2017. Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan's Akita and Iwate provinces. *Geothermics*, 70, 295-304.
- Meng, Y., Tang, D., Xu, H., Li, C., Li, L., & Meng, S. 2014. Geological controls and coalbed methane production potential evaluation: A case study in Liulin area, eastern Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21(Supplement C), 95-111.
- Nwankwo L.I., Sunday, A., 2017, *Regional estimation of Curie-point depths and succeeding geothermal parameters from recently acquired high-resolution aeromagnetic data of the entire: Geoth. Energ. Sci.*, 5, 1-9.



Application of data fusion methods of index overlay, Dempster Shafer and fuzzy AHP in geothermal resources potential mapping and their prioritization in Zanjan Province

Shokouh Riahi¹, Ali Moradzadeh^{*2}, Parham Pahlavani³ and Ali Keshtdar⁴

1. PhD Student, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

2. Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, School of Surveying and Geomatics Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

4. Postgraduate student, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

Received:8 December 2018; Accepted:28 September 2019

Corresponding author:a_moradzadeh@ut.ac.ir

Keywords	Extended Abstract
Geothermal resources potential Zanjan Province Geophysical information Layers Data fusion Exploration information layers Overlay Index overlay Dempster Shafer (DS) Fuzzy AHP	Summary Geothermal energy is a clean, renewable and economic energy resource, therefore its exploration is very important. In Iran there are many hot springs and there are so much evidences in many areas that show geothermal resources. So far, many exploration operations have been carried out to discover this resources. Considering the evidences of geothermal resources in Zanjan Province, it is tried in this study to recognize and prioritize the areas having geothermal resource potential using several information layers such as geophysical layers obtained from airborne magnetic data; Curie depth, thermal gradient and thermal flow maps, which have been weighted using Fuzzy AHP method. Then, these layers were fused by index overlay method and the regions with geothermal potential were obtained. These regions were then prioritized and defined as the best regions that have geothermal potential by using Fuzzy AHP/Dempster-Shafer (DS) method. As a result, regions 11, 16 and 13, with scores values of 0.702, 0.621 and 0.592 were recognized as the best regions for having geothermal potential. Final results have shown that overlay and fusion data by means of DS method is acceptable and reliable, once the weights of the layers are obtained using Fuzzy AHP scheme. Using existing evidences such as hot springs and other information related to the geothermal resources, we validated the obtained results and concluded that the results were sufficiently accurate.

Introduction

In spite of the occurrence many evidences that indicate several rich regions of the geothermal resource in Iran, very few exploration studies have been carried out so far specially in Zanjan province that have a lot of hot springs and other relevant evidences. Geothermal heat flux is one of the main parameters to be investigated in geothermal exploration programs but few direct heat flux measurements are available in Iran. We can get reliable and better result by using all exploration criteria related to the geothermal resources such as lithological, remote sensing, structural and geophysical information layers, if we use a suitable method to overlaying and fusion these layers. In this study we firstly use index overlay and fuzzy methods for overlaying these data and the DS-fuzzy AHP technique is then used for data fusion and prioritizing of the results.

Methodology and Approaches

In the first step, relevant digital information layers were prepared. They comprised of lithology layer, alteration layer obtained from ASTER data, structural layer acquired from lithology, ASTER and airborne magnetic data. Then, Curie depth, thermal gradient and thermal flow maps were obtained using a set of high resolution airborne magnetic data. All of these layers were then integrated by fuzzy logic and index overlay methods to determine the promise regions of geothermal resources. Finally, the favorable geothermal areas, obtained in the previous stage, were prioritized using DS-FAHP fusion method.

Results and Conclusions

By examining and evaluating the results and considering the existing evidences such as hot water springs, it is found

that the data fusion DS-fuzzy AHP methods can provide an acceptable and reliable results. Moreover, the prioritization of the results using these data fusion methods indicates that high potential geothermal regions are related to all the evidences of geothermal resources. The obtained results also show that by applying fuzzy AHP for weighting exploration layers, one can consider uncertainty in decision making, and then, by using DS method for data fusion more reliable results can be acquired.
