



تلفیق داده‌های گرانی و مغناطیس‌سنجی منطقه آجی‌چای در شمال غرب ایران به منظور

اکتشاف پتاس

سارا نصری^{۱*}، علی نجاتی کلاته^۲، امین روشندل کاهو^۳، حمیدرضا حسین‌پور^۴

۱- کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Nasri.sara5377@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، nejati@shahroodut.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، roshandel@shahroodut.ac.ir

۴- کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، Alamut2547@gmail.com

چکیده

تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی برای کاهش مخارج سنگین حفاری، اطلاعات نسبتاً کاملی از ساختارهای زیرسطحی نظیر شکل و عمق توده‌های معدنی، میزان گسترش سطحی و کشیدگی عمقی توده‌ها بدست می‌دهد. از آنجایی که ایران به لحاظ معدنی کشوری دارای پتانسیل است؛ بکارگیری روش‌های کارآمد به منظور بهینه‌سازی و بررسی ارتباط بی‌هنجاری‌های موجود بر روی نقشه‌های میدان پتانسیل با توده‌های معدنی در کمترین زمان با بیشترین کیفیت، اهمیت دارد. در این مطالعه از داده‌های گرانی و مغناطیس زمینی منطقه آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی استفاده شد. در ابتدا داده‌های گرانی و مغناطیس با استفاده از نرم‌افزار Oasis Montaj پردازش و سپس با اعمال الگوریتم تلفیق تصویر، نقشه‌های گرانی و مغناطیس منطقه مورد تلفیق قرار گرفت. نتایج تلفیق تصویر نشان می‌دهد که این روش می‌تواند یک دید جامع از منطقه مورد مطالعه به منظور اکتشاف پتاس با تطابق مناسب با واقعیات زمین‌شناسی منطقه ایجاد کند.

کلمات کلیدی

- تلفیق داده‌ها
- تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی
- گرانی‌سنجی
- مغناطیس‌سنجی
- آجی‌چای
- پتاس

Fusion gravity and magnetic data for Aji-Chai area in northwestern Iran to explore potash

Sara Nasri¹, Ali Nejati Kalateh², Amin Roshandel Kahoo³, Hamidreza Hoseinpour⁴

1- Master of Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Nasri.sara5377@gmail.com

2- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, nejati@shahroodut.ac.ir

3- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, roshandel@shahroodut.ac.ir

4- Master of Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Alamut2547@gmail.com

KEYWORDS

- Data Fusion
- Interpretation of Geophysical Data
- Gravity
- Magnetic
- Aji-Chai
- Potash

ABSTRACT

Fusing geophysical data to reduce heavy drilling costs provides relatively complete information on subsurface structures such as the shape and depth of mineral masses, the extent of surface expansion, and elongation of the depth of the masses. Since Iran minerally a country has potential, it is important to employ efficient methods to optimize and evaluate the relationship of anomalies to potential field maps with the highest quality in the shortest time it is important. In this study,

terrestrial gravity and magnetic data of the Aji-Chai area in East Azarbaijan province were used. Initially, gravity and magnetic data were processed using Oasis Montaj software and then fused with image fusion algorithm, gravity maps and area magnetic. The image fusion results show that this method can provide a comprehensive view of the study area in order to explore the potash in accordance with the geological facts of the area.

1 مقدمه

مفهوم تلفیق داده با کاوش برای یافتن روش‌های کاربردی ترکیب تصاویر از منابع مختلف برای ایجاد یک تصویر ترکیب‌شده، به دهه‌های 1950 تا 1960 برمی‌گردد. در واقع، تلفیق داده یک بحث داغ در پردازش تصویر بوده و اهداف ویژه آن شامل بهبود کیفیت فضایی، بهبود دقت طبقه‌بندی، افزایش قابلیت نمایش ویژگی‌ها، بهبود دقت هندسی و... است. به طور کلی تلفیق تصویر شامل ترکیب دو یا چند تصویر با حداکثر اطلاعات و کمترین جزئیات ناخواسته برای تولید یک تصویر واحد است. با این وجود، در علوم زمین‌شناسی یکپارچه‌سازی داده‌ها برای تولید یک تصویر منحصر به فرد شامل تمام اطلاعات مورد نیاز برای بررسی اهداف انتخاب شده در مدل تصاویر نیست. بنابراین، نگرانی در مورد کاربرد طولانی مدت تکنیک‌های تلفیق داده‌ها یا تصاویر در تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیک به منظور به‌دست آوردن یک مدل مناسب برای تفسیر بیشتر است.

استفاده از روش تلفیق تصویر در سایر علوم این نوید را می‌دهد که می‌توان به طور موثر برای افزایش اطلاعات در یک مدل ژئوفیزیکی با ترکیب تصاویری که از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی حاصل می‌شود، مثل تشخیص لبه، تقسیم تصویر و تشخیص هدف را در تصویربرداری پزشکی، چشم انداز ماشین و برنامه‌های نظامی، تفسیر جامع‌تری ارائه داد [1, 2, 3, 4, 5, 6]. در میان الگوریتم‌های تلفیق تصویر مختلف، تلفیق روی تصاویر خام تنها در سطح پیکسل اعمال می‌شود [7]. در این الگوریتم، با هدف ایجاد بیشترین اطلاعات از تصاویر تلفیق‌شده، اطلاعات اصلی تصاویر منبع مستقیماً ترکیب می‌شود [8]. این تکنیک بطور گسترده، در علوم سنجش از دور، تصویربرداری پزشکی، هوش مصنوعی، هماهنگ‌سازی دوربین‌های عکسبرداری، نظارت بر فرایند تولید، طراحی مدارهای الکترونیکی و عیب‌یابی ابزار و ماشین‌آلات پیچیده بکاررفته است. در تلفیق تصاویر ژئوفیزیکی، ویژگی‌های متمایز اشیاء زمین‌شناسی عمدتاً بافت، شکل و عمق منطقه، هدف در تصویر است. در روش ارائه شده انتخاب یک قاعده تلفیق مناسب خود یک مسئله مهم دیگر است که به طور مستقیم بر کیفیت تصویر نهایی و محتوای اطلاعاتی آن تأثیر می‌گذارد. قاعده تلفیق، فرایند تشکیل تصویر تلفیق‌شده با استفاده از پیکسل‌هاست که به کمک تصویر منبع انتخاب می‌شود.

در این راستا، لی و همکاران^۱، 1995، پجارز و کروز^۲، 2004 نشان دادند که تلفیق دوبعدی با استفاده از تبدیل موجک گسسته (DWT^۳) بسیار ساده و سریع است [9, 10]. اصول اولیه تلفیق آنها این گونه است که چندین تصویر را با استفاده از DWT در دوبعد تجزیه می‌کنند و سپس تصاویر تجزیه شده براساس یکسری قوانین خاص با هم ترکیب می‌شوند و تبدیل موجک گسسته وارون (IDWT^۴) را برای بدست آوردن تصویر تلفیق شده‌ی نهایی انجام می‌دهند. حسن و پی‌یرس^۵، 2008 با استفاده از روش تلفیق تصویر مبتنی بر موجک دوبعدی روی تصاویر گرانی و مغناطیس هوابرد به بهبود تشخیص کنترل ساختاری در منطقه آلبرتا کانادا پرداختند [11]. نتایج حاصل کار آنها نشان داد که تلفیق تصاویر گرانی و مغناطیسی که در طول برداشت مشابه با هواپیما به‌دست آمده است، پرمحتواتر است. علاوه بر این، تصویر تلفیق‌شده دارای رزولوشن طیفی و فضایی بهتر از تصاویر اصلی است. لی و همکاران^۶، 2006 بطور گسترده از تلفیق اطلاعات در حوزه علوم کامپیوتر، مهندسی و پزشکی استفاده کردند [12]. لبلانک و همکاران^۷، 2012 یک روش ساده و تطبیقی تلفیق داده‌ها را با استفاده از شبکه‌های

¹ Li et al

² Pajares and Cruz

³ Discrete wavelet transform

⁴ Inverse Discrete wavelet Transform

⁵ Hassan and Peirce

⁶ Li

⁷ Leblanc et al

مقیاس خاکستری برای اکتشاف ژئوفیزیکی ارائه دادند. این روش بر دو اصل است: (1) درک تغییرات خواص فیزیکی که ممکن است با هدف اکتشاف مواد معدنی همراه باشد؛ و (2) استفاده از مقیاس خاکستری مناسب برای هر یک از داده‌های ورودی. این روش برای داده‌های فرکانس بسیار پایین، داده‌های هواشناسی و رادیومتری که در طول دهه 1980 بر میزان رسوب ذخایر طلای Hemlo شمال اونتاریو کانادا اندازه‌گیری شده است، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به وضوح نشان‌دهنده یک بی‌هنجاری قوی و منحصر به فرد در ناحیه کانی‌سازی سطحی است [13]. نصری و همکاران، 2019 روش جدیدی با استفاده از روش تلفیق تصویر مبتنی بر موجک سه‌بعدی روی تصاویر گرانی و مغناطیس ماهواره‌ای برای تفسیر مدل‌های ساختاری منطقه مکران به کمک تلفیق سه‌بعدی مدل‌های وارون‌شده ژئوفیزیکی ارائه دادند. در استراتژی تلفیق آنها، یک مدل منحصر به فرد مناسب برای تفسیر دقیق‌تر ساختار منطقه مکران با جزئیات بیشتری از موقعیت منطقه فرورانش و گسل‌ها، بدون هیچگونه تغییری در محل بی‌هنجاری‌ها نشان داد [14].

از طرفی، پتاسیم به لحاظ فراوانی هفتمین عنصر حائز اهمیت پسته زمین است. ترکیبات محلول پتاسیم را که بیشتر در کشاورزی و صنعت به کار می‌رود پتاس می‌نامند. هدف از انجام مطالعات گرانی‌سنجی در منطقه تعیین محدوده‌های با چگالی کم است. از آنجایی که گنبد‌های نمکی دارای چگالی کمی می‌باشند، با این روش می‌توان حتی حضور یک گنبد نمکی را در عمق نیز تشخیص داد. همچنین هدف از انجام مطالعات مغناطیس‌سنجی در منطقه پیدا کردن محدوده‌های با مقادیر مغناطیس کمتر نسبت به سازندهای اطراف و تکمیل برداشت‌های گرانی‌سنجی که در واقع روش اصلی جهت شناسایی گنبد‌های حاوی پتاس است، می‌باشد. به این ترتیب می‌توان یک گنبد نمکی را که در اثر بالابردگی، سازندهای جدیدتر که در روی آن قرار گرفته‌اند را به اطراف رانده است، جدا نمود. از طرفی روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی هستند که در پی‌جویی و اکتشاف ذخایر معدنی کارایی بالایی دارند و اگر به درستی انتخاب شوند، اطلاعات ارزشمندی از کانی‌سازی در سطح و عمق منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند. این روش‌ها اگر به تنهایی مورد استفاده قرار گیرند دقت لازم را نخواهد داشت. از این رو لازم است از روش‌هایی که بطور هم‌زمان داده‌ها را مورد تفسیر قرار می‌دهد استفاده شود که نیاز به یک رابطه منطقی بین کمیت‌های مدل دارد. همچنین در بحث اعتبارسنجی نقشه ترکیب‌شده از مطالعات زمین‌شناسی منطقه استفاده می‌شود.

2 روش کار

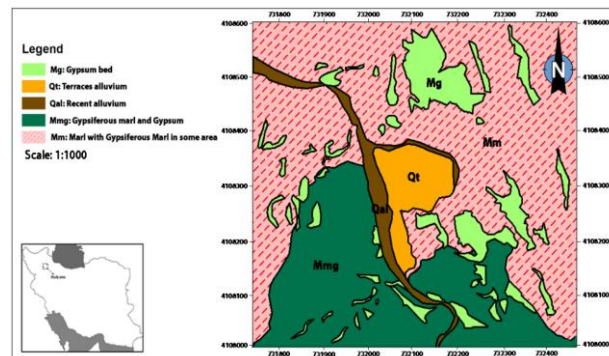
یکی از روش‌های تلفیق تصویر متداول، استفاده از تبدیل موجک گسسته دوبعدی است. از این تبدیل برای تلفیق داده‌های مغناطیس و گرانی در این مقاله استفاده شده است. تبدیل موجک یک ابزار تجزیه و تحلیل داده است که امکان تجزیه یک مجموعه داده را به چند مجموعه داده فراهم می‌کند. داده‌های ورودی به مجموعه‌ای از سطوح موجک تجزیه می‌شود [15]. همچنین موجک‌ها را می‌توان با استفاده از دوتابع تعریف کرد؛ تابع مقیاس و تابع موجک. با توجه به نظریه موجک، تابع مقیاس به عنوان فیلتر پایین‌گذر و تابع موجک به عنوان فیلتر بالاگذر استفاده می‌شود. می‌دانیم که اولین و ساده‌ترین موجک توسط آلفرد هار⁸ در سال 1909 مطرح شد. موجک هار متعلق به گروه موجک شناخته شده‌ای بنام موجک Daubechies است. وجود خانواده‌های موجک که توابعی مقیاس‌بندی‌شده و دارای خواص مفید شامل پشتیبانی فشرده بر روی یک فاصله در حداقل یک لحظه و تفسیر متعامد هستند را ثابت کرده است.

بنابراین روش تبدیل موجک گسسته، یک تصویر را با عبور از طریق یکسری فیلترها مورد محاسبه قرار می‌دهد. این تبدیل، ابتدا تصاویر ورودی را از فیلتر پایین‌گذر عبور داده و بطور هم‌زمان توسط یک فیلتر بالاگذر تجزیه می‌کند. خروجی‌ها شامل یکسری ضرایب جزئیات (از فیلتر پایین‌گذر) و یکسری ضرایب تقریب (از فیلتر بالاگذر) می‌شود. این تجزیه تا جایی تکرار می‌شود که رزولوشن فرکانسی افزایش یابد و ضرایب تقریب با فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر تجزیه و سپس نمونه‌برداری شوند. در این مرحله مولفات دوتصویر ورودی با استفاده از قاعده تلفیق ویژه‌ای با هم ترکیب می‌شوند. در نهایت نیز برای بازسازی داده، تبدیل موجک گسسته وارون در سطوح تجزیه تصاویر تلفیق‌شده اعمال می‌شوند [16, 17].

ما این الگوریتم را بر روی داده‌های منطقه آجی‌چای پیاده کردیم. منطقه آجی‌چای در جنوب میانه در استان آذربایجان شرقی و در زون ساختاری ایران مرکزی قرار دارد. این محدوده شامل رسوبات ماری، ماسه سنگی و کنگلومرایی به همراه رسوبات تبخیری است که به علت داشتن رخساره‌های سست در معرض فرسایش شدیدی قرار گرفته و مورفولوژی پست با دره‌های کم‌عمق همراه شیب ملایم را ساخته است.

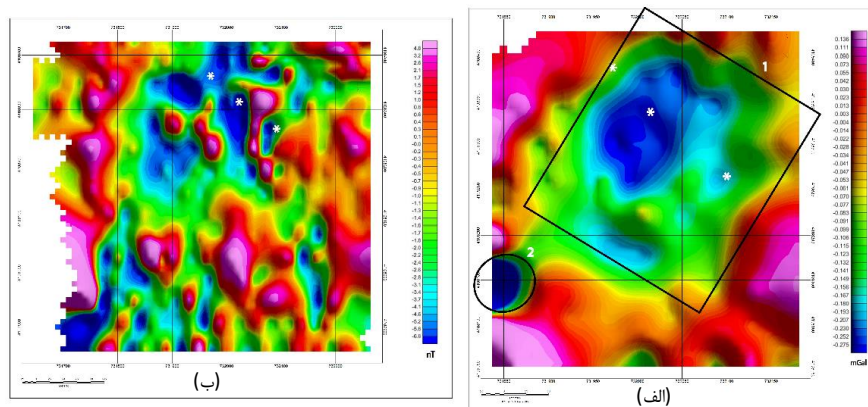
⁸ Haar

واحدهای زمین‌شناسی محدوده آجی‌چای شامل ژئوپس، کنگلومرا، مارن و واحد مارن ژئوپس‌دار است. واحد ژئوپس شامل رسوبات گچی است که ژئوپس و مارن‌ها غالباً به صورت متناوب قرار گرفته‌اند. در واحد کنگلومرا، این سنگ‌ها بصورت قطعات کاملاً گردشده با ابعاد مختلف از چند سانتی‌متر به چند دسی‌متر متغیرند. جنس قطعات، بیشتر ژئوپس و ماسه‌ای است. واحد مارنی شامل مارن خاکستری و قرمز همراه با لایه‌هایی از ماسه سنگ و ژئوپس است. افزون بر گچ آثاری از نفوذ نمک نیز در این مارن‌ها دیده می‌شود. سرانجام در جنوب محدوده آجی‌چای، در واحد مارن ژئوپس‌دار تناوبی از مارن‌ها با رنگ‌های متنوع از قرمز-خاکستری تا کرم روشن و همچنین لایه‌هایی از ژئوپس به چشم می‌خورد [18]. شکل (1) نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه را با توجه به ساختارهای متنوع نشان می‌دهد.



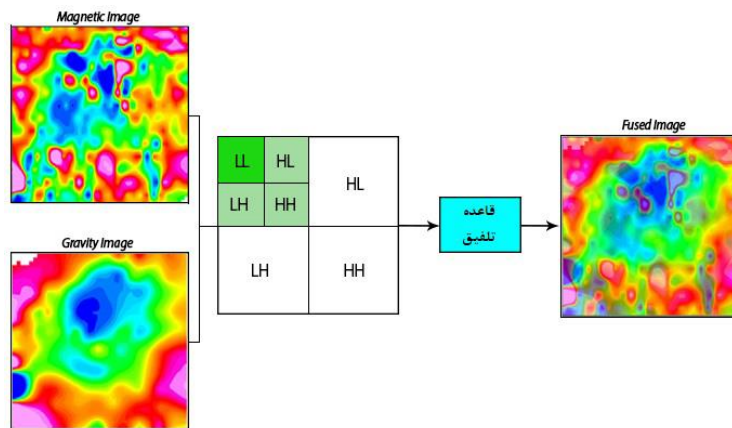
شکل 1: نقشه زمین‌شناسی محدوده آجی‌چای [18].

در این منطقه داده‌های گرانی و مغناطیس‌سنجی به همراه مختصات نقاط برداشت در نرم‌افزار Oasis Montaj مورد پردازش قرار گرفت. برای هردوی این داده‌ها به منظور تفکیک بی‌هنجاری‌ها و از بین بردن روند واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌ها، فیلتر روند سطحی اعمال شد. شکل (2-الف) نقشه باقیمانده با برازش منحنی درجه یک بر داده‌های بی‌هنجاری بوگر را نشان می‌دهد. در نقشه اخیر، ناحیه‌ای حدوداً به ابعاد 240×200m (مستطیل شماره 1) با مقدار عددی کم که با رنگ آبی تا سبز دیده می‌شود و دارای روند شمال شرقی-جنوب غربی است به دلیل دارابودن چگالی پایین گنبد نمکی نسبت به زمینه که خود را در نقشه داده‌های گرانی‌سنجی به صورت نواحی با مقدار عددی پایین نشان می‌دهد، وجود دارد. البته اثر حفره‌ها در نقشه، مشابه گنبد نمکی است اما احتمال وجود گنبد نمکی در این ناحیه بسیار قوی است. یک ناحیه دیگر که با شماره 2 مشخص شده است نیز دارای مقدار عددی کم می‌باشد. از نقشه شدت کل میدان مغناطیسی منطقه، نقشه باقیمانده تهیه گردید (شکل 2-ب) که در این نقشه اثر روند با تقریب درجه 2 از روی داده‌ها برداشته شده است. همچنین به منظور تفسیر بهتر و دقیق‌تر محل واقعی توده‌ها، تصحیح برگردان به قطب (RTP) با زاویه میل و انحراف بترتیب 55.5° و 4.2° روی نقشه شدت میدان مغناطیسی باقیمانده اعمال شد. از مقایسه نقشه اخیر با توپوگرافی منطقه مشاهده می‌شود که بخش‌های رس و مارن که غالباً در مناطق مرتفع قرار گرفته‌اند، دارای مقادیر مغناطیسی بیشتری هستند.



شکل 2: (الف) نقشه باقیمانده بوگر، (ب) نقشه مغناطیس باقیمانده RTP شده منطقه آجی‌چای.

در این مرحله دو نقشه اخیر با اعمال الگوریتم ارائه شده بصورت شکل 3 نمایش داده می‌شوند. در ابتدا تصاویر گرانی و مغناطیس وارد الگوریتم تلفیق شده و به کمک موجک 'Haar' در دوسطح تجزیه می‌شوند. این تصاویر در هر مرحله تجزیه، یک مولفه تقریب (LL) و هفت مولفه جزئیات تولید می‌کنند. این چرخه تا هنگامی که به رزولوشن مدنظر برسیم تکرار می‌شود. در ادامه، خروجی‌های تجزیه شده از دو تصویر ورودی وارد قاعده تلفیق شده و با اعمال وزن یکسان روی مولفات تقریب دو تصویر و متفاوت روی مولفات جزئیات، تصویر تلفیق شده نهایی ایجاد می‌شود.



شکل 3: مدل تلفیق شده از دو داده مغناطیس و گرانی در منطقه آجی چای.

با توجه به تصویر تلفیق شده نهایی که شامل اطلاعات هر دو تصویر ورودی است، در مستطیل شماره 1 شکل (2- الف) گنبد نمکی درست بر روی مقادیر منفی از نقشه مغناطیس باقیمانده قرار گرفته است که می‌تواند معرف بخشی از گنبد نمکی منطقه با فاصله کم از سطح زمین باشد (علامت ستاره در شکل 2 نقاط حفاری پیشنهادی را نشان می‌دهند).

3 نتیجه‌گیری

تلفیق تصویر هر داده موجود برای ساخت یک تصویر ژئوفیزیکی جامع می‌تواند برخی از ابهامات احتمالی در زمینه تفسیر داده‌های پیچیده زمین‌شناسی را حل کند. ترکیب داده‌های مغناطیس و گرانی در اینجا نشان داد که تکنیک تلفیق می‌تواند یک خروجی منحصر به فرد مناسب برای تفسیر زمین‌شناسی باشد. تفسیر مدل تلفیق شده نهایی می‌تواند جزئیات بیشتری در مورد ساختار منطقه نشان دهد چرا که نتایج هر دو مدل را به طور هم‌زمان ارائه می‌کند. در این محدوده روش استفاده شده جهت تعیین دقیق محل وجود گنبد نمکی موفقیت‌آمیز بوده و از نقشه‌های بدست آمده احتمال وجود گنبد نمکی در منطقه تایید و محدوده آن با مستطیلی در نقشه تلفیق شده مشخص شده است. واحدهای رس و مارن در نقشه‌های مغناطیس و گرانی سنجی خود را با مقادیر عددی بالا (طیف رنگی قرمز) نشان داده‌اند و نواحی مارن ژئوپس‌دار که چگالی کمتری دارند در نقشه‌های گرانی و مغناطیس با مقادیر عددی پایین (طیف رنگی آبی) از دیگر واحدها جدا شده‌اند. بنابر اطلاعات نقشه مغناطیس محدوده‌ای که دارای مغناطیس باقیمانده منفی است و در نقشه با طیف رنگی آبی مشاهده می‌شود را می‌توان معرف بخشی از گنبد نمکی مورد مطالعه در نظر گرفت. این محدوده در نقشه گرانی نیز تایید شده ولی از وسعت آن کاسته شده است. مرکز تقریبی گنبد نمکی بنابر نقشه تلفیقی تعیین شده و احتمالاً دارای شیبی به طرف شرق و امتداد شمال شرقی-جنوب غربی می‌باشد. وسعت احتمالی محدوده گنبد نمکی 220×140m می‌باشد. ویژگی مهم این الگوریتم، توانایی استفاده از آن برای هر تعداد داده با اعمال هرگونه اطلاعات اضافی اعم از توپوگرافی و زمین‌شناسی است.

4 سپاس‌گزاری

داده‌های گرانی و مغناطیس مورد مطالعه در این مقاله از سوی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در اختیار قرار گرفت. از این‌رو جا دارد تا از مساعدت و همکاری آقایان مهندس رضوی و جعفری از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی و همچنین جناب آقای دکتر ابراهیم‌زاده اردستانی از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صمیمانه تشکر و قدردانی شود.

5 مراجع

5-1 مراجع لاتین

- [1] Li, T., Wang, Y., Chang, C., Hu, N. and Zheng, Y., 2014. Color-appearance-model based fusion of gray and pseudo-color images for medical applications. *Information Fusion*, 19, pp.103-114.
- [2] Liu, Y., Chen, X., Wang, Z., Wang, Z.J., Ward, R.K. and Wang, X., 2018. Deep learning for pixel-level image fusion: Recent advances and future prospects. *Information Fusion*, 42, pp.158-173.
- [3] Dong, H. and Evans, D., 2007, August. Data-fusion techniques and its application. In *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007)* (Vol. 2, pp. 442-445). IEEE.
- [4] Goshtasby, A.A. and Nikolov, S., 2007. Image fusion: advances in the state of the art. *Information fusion*, 2(8), pp.114-118.
- [5] Vivone, G., Alparone, L., Chanussot, J., Dalla Mura, M., Garzelli, A., Licciardi, G.A., Restaino, R. and Wald, L., 2014. A critical comparison among pansharpening algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), pp.2565-2586.
- [6] James, A.P. and Dasarthy, B.V., 2014. Medical image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 19, pp.4-19.
- [7] Ghassemian, H., 2016. A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32, pp.75-89.
- [8] Li, S., Kang, X., Fang, L., Hu, J. and Yin, H., 2017. Pixel-level image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 33, pp.100-112.
- [9] Li, H., Manjunath, B.S. and Mitra, S.K., 1995. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graphical models and image processing*, 57(3), pp.235-245.
- [10] Pajares, G. and De La Cruz, J.M., 2004. A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern recognition*, 37(9), pp.1855-1872.
- [11] Hassan, H. and Peirce, J., 2008. Fusion of airborne gravity and magnetic images for improved detection of structural control. In *2008 CSPG CSEG CWLS Convention Expanded Abstracts* (pp. 692-696).
- [12] Li, X., Tian, X., Sun, Y. and Tang, Z., 2006. Medical image fusion by multi-resolution analysis of wavelets transform. In *Wavelet Analysis and Applications* (pp. 389-396). Birkhäuser Basel.
- [13] Leblanc, G., Lee, M. and Morris, W., 2012. A simple adaptable data fusion methodology for geophysical exploration. *Exploration Geophysics*, 43(3), pp.190-197.
- [14] Nasri, S., Kalate, A.N., Kahoo, A.R. and Monfared, M.S., 2019. New insights into the structural model of the Makran subduction zone by fusion of 3D inverted geophysical models. *Journal of Asian Earth Sciences*, p.104075.
- [15] Hariharan, H., Gribok, A., Abidi, M.A. and Koschan, A., 2006. Image fusion and enhancement via empirical mode decomposition. *Journal of Pattern Recognition Research*, 1(1), pp.16-32.
- [16] Amolins, K., Zhang, Y. and Dare, P., 2007. Wavelet based image fusion techniques-An introduction, review and comparison. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 62(4), pp.249-263.
- [17] Bleiholder, J. and Naumann, F., 2009. Data fusion. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41(1), p.1.

5-2 مراجع فارسی

- [18] رضوی، ا. و جعفری، ف.، 1387. اکتشاف پتاس با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی در منطقه آجی‌چای. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.