

تفسیر داده‌های مغناطیسی براساس محاسبه زاویه تیلت و بهبود گرادیان افقی، مطالعه موردی: فروافتادگی زنجان

محبوبه شاهوردی^۱، لقمان نمکی^۲، منصوره منتهایی^{۳*}، فاطمه مصباحی^۴ و مهدی بساوند^۵

۱. کارشناس ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنجان، ایران

۳. استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۴. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، ایران

۵. کارشناس ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۱۱/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

چکیده

جهت‌گیری متفاوت مغناطیدگی‌های القایی و بازماند در یک توده بی‌هنجار مغناطیسی و همچنین اثر تداخلی بی‌هنجاری‌های مختلفی که با خصوصیات هندسی و فیزیکی متفاوت در اعماق مختلف قرار گرفته‌اند، تفسیر نقشه‌های مغناطیسی به منظور شناسایی گسل‌ها، مرزهای بین لایه‌ای و بی‌هنجارهای مغناطیسی پراکنده در پوسته زمین را پیچیده و دشوار ساخته‌اند. با اعمال فیلترهایی نظیر فیلترهای فاز محلی می‌توان این پیچیدگی‌ها را برطرف کرد. در این مقاله برای تشخیص لبه‌های بی‌هنجاری از دو فیلتر فاز محلی، زاویه تیلت (TDR) و زاویه تیلت گرادیان افقی (TAHG)، استفاده شده است. این فیلترها در واقع ترکیبی از گرادیان افقی و قائم میدان پتانسیل هستند. کارایی این روش‌ها بر روی مدل مصنوعی H شکل در دو حالت، نوفه‌دار و عاری از نوفه، آزموده شده است. نتایج از توانایی بالای این روش‌ها در تعیین مرز توده‌های مغناطیسی در مقایسه با روش‌های معمول گرادیان افقی، سیگنال تحلیلی و ... حکایت دارد. علاوه بر این، روش TAHG تفکیک‌پذیری عمقی بهتری در مقایسه با روش TDR دارد. اعمال روش TAHG بر یک مجموعه داده مغناطیسی هوابرد مربوط به ناحیه فروافتاده زنجان، نشان داد که این روش قادر است تا گسل‌های پی‌سنکی و پی‌سنگ این ناحیه را توصیف و لبه‌های آن‌ها را با دقت بالایی ترسیم کند. مدل‌های مصنوعی و الگوریتم روش‌های مورد بررسی، در محیط متلب تهیه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری مغناطیسی، تشخیص مرز، زاویه تیلت، مشتق افقی، مشتق قائم، میدان پتانسیل.

۱. مقدمه

برای تعیین مرز ساختارهای زمین‌شناسی و گسترش عمقی آن‌ها، روش‌های متفاوتی وجود دارد که اکثر آن‌ها بر پایه مشتق‌های میدان مغناطیسی عمل می‌کنند (سالم و همکاران، ۲۰۰۷). در چندین سال گذشته پیشرفت‌های زیادی در متوازن کردن دامنه‌های بزرگ و کوچک بی‌هنجاری‌ها انجام گرفته است که در تمام این روش‌ها تغییرات یک کمیت در سرتاسر نقشه و به‌خصوص در محدوده بی‌هنجاری بررسی می‌شود. از جمله روش‌های اولیه پرکاربرد در این حوزه می‌توان به دامنه سیگنال تحلیلی

شناسایی نوع منابع مغناطیسی زیرسطحی و مکان‌یابی آن‌ها، اصلی‌ترین اهداف تفسیر نقشه‌های مغناطیسی محسوب می‌شوند. این موضوع به دلیل کاربردهای زمین‌شناسی از اهمیت فراوانی برخوردار است. منابع مغناطیسی دارای خصوصیات هندسی و فیزیکی مختلفی هستند که در عمق‌های متفاوتی قرار دارند. همچنین شکل بی‌هنجاری‌های ناشی از این منابع نیز به جهت مغناطیدگی بازماند و القایی بستگی دارد که در مجموع تمام این عوامل باعث پیچیدگی و دشوار شدن تفسیر این نقشه‌ها می‌شود.

سطح زمین برابر است با (بلیکلی، ۱۹۹۶):

$$VDR = \frac{\partial T}{\partial z} \quad (۱)$$

یکی دیگر از روش های تعیین مرز بی هنجاری ها، مشتق افقی داده های منتقل شده به قطب است. مشتق افقی (THDR) یکی از ابتدایی ترین روش ها برای تعیین مرز بی هنجاری های مغناطیسی است که از آن برای ارزیابی روش های بهبود یافته استفاده می شود و همچنین پایه بیشتر روش های ارتقایافته تشخیص مرز است.

مشتق افقی داده ها در امتداد یک پروفیل در راستای x

برابر است با (بلیکلی، ۱۹۹۶):

$$THDR = \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right| \quad (۲)$$

همچنین بر سطح افق و در طی یک شبکه، مشتق افقی کل به صورت رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (۳)$$

بیشینه گرادیان افقی در صورتی که لبه ها قائم باشند، دقیقاً بر روی لبه های ساختار قرار می گیرند و در صورت شیب دار بودن لبه ها یا حضور مغناطیدگی بازماند، این گونه نمی شود. این روش، توانایی تشخیص مرز ساختارهای عمیق را هم دارد و البته به زاویه میل میدان وابسته است و برای آنکه بیشینه مقدار حاصل دقیقاً بر لبه های ساختار قرار گیرد، باید این فیلتر را بر داده های برگردان به قطب اعمال کرد. یکی از مشکلات این روش تضعیف این سیگنال با افزایش عمق است.

از مفهوم زاویه تیل (TDR) برای مکان یابی مرکز و لبه بی هنجاری ها استفاده می شود. بدین صورت که مقدار بیشینه دامنه زاویه تیل بر روی ساختار و مقدار صفر دامنه بر روی مرز بی هنجاری قرار می گیرد. در محاسبات عددی، تانژانت زاویه تیل برابر با نسبت گرادیان قائم به مقدار مطلق دامنه گرادیان افقی تعریف شده است (میلر و سینگ، ۱۹۹۴).

$$TDR = \arctan\left(\frac{VDR}{THDR}\right) \quad (۴)$$

از آنجایی که زاویه تیل از نسبت مشتق قائم به افقی

(ASA) و گرادیان افقی کل (THDR) اشاره کرد، اما همواره این روش ها جواب دقیق و کاملی برای همه مسائل اکتشافی ارائه نمی کنند و در مواردی مانند چشمه های عمیق، خطاهایی در تعیین دقیق لبه های بی هنجاری از خود نشان می دهند. با اعمال تغییرات جزئی در معادلات مربوط به این روش ها و نرمال سازی دامنه آن ها می توان فیلترهای جدیدی با کارایی بیشتر ایجاد کرد. از میان انواع متداول این روش ها می توان به زاویه تیل (TDR) (میلر و سینگ، ۱۹۹۴)، نقشه تتا (وینز و همکاران، ۲۰۰۵)، زاویه تیل افقی (TDX) (کوپر و کوان، ۲۰۰۶)، روش بلیکلی سیمپسون (بلیکلی و سیمپسون، ۱۹۸۶)، سیگنال تحلیلی متعادل شده (کوپر و کوان، ۲۰۰۸) و روش زاویه تیل مشتق افقی (TAHG) (فریرا و همکاران، ۲۰۱۳) اشاره کرد. با بررسی این روش ها بهترین نتایج برای توده های عمیق با استفاده از روش های زاویه تیل و بهبود گرادیان های افقی حاصل می شود (شاهوردی، ۱۳۹۲). در سالان اخیر، روش های ذکر شده به نحو فزاینده ای در تفسیر داده های مغناطیس سنجی در مقیاس کوچک (اکتشاف کانی ها، مطالعات مهندسی و محیط زیستی، دیرینه شناسی) و در مقیاس بزرگ (مطالعات تکتونیک) به کار گرفته شده اند (ما، ۲۰۱۳؛ کاسترو و همکاران، ۲۰۱۴؛ باروز و همکاران، ۲۰۱۲).

۲. روش پژوهش

در این پژوهش روش های زاویه تیل و زاویه تیل گرادیان افقی با اتکا بر مفاهیم اولیه مشتق افقی و قائم میدان مغناطیسی، بررسی شده اند. چنانچه یک توده مغناطیسی در عمق z گسترده شده باشد، در سطح زمین میدان مغناطیسی T را تولید می کند. مشتق قائم میدان، نقش بسیار مهم و کلیدی در تفسیر داده های مغناطیسی دارد و پارامتر اصلی در روش های ارتقایافته است. همچنین یکی از روش های تعیین لبه بی هنجاری های مغناطیسی و گرانی است.

مشتق قائم میدان در دستگاه مختصات کارتزین در

بی‌هنجاری مغناطیسی با عمق‌های مختلف، مدل مصنوعی H شکل، متشکل از ۳ منشور با خصوصیت مغناطیسی یکسان و هندسی متفاوت در محیط متلب ایجاد کردیم (شکل ۱). مشخصات فیزیکی و مغناطیسی این مدل در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین شبکه برداشت، مربعی ۷۰۰۰ متر در ۷۰۰۰ متر با ۳۵۰ نقطه برداشت با فاصله ایستگاه‌های ۲۰ متر در نظر گرفته شده است.

میدان مغناطیسی حاصل از این مدل در شکل ۲ (الف) و میدان مغناطیسی منتقل شده به قطب در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. هر سه فیلتر گرادیان افقی، زاویه تیلت و زاویه تیلت گرادیان افقی را بر روی مدل مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و در حضور نوفه اعمال کردیم (شکل‌های ۲ و ۳). نتایج اعمال فیلتر گرادیان افقی در قسمت‌های ج و د نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه دامنه بر روی مرز توده تشکیل شده‌اند و تعیین دقیق مرز پس از منتقل شدن به قطب حاصل می‌شود که نشان‌دهنده وابستگی این فیلتر به زاویه میل است. همچنین با افزایش عمق منشورها، از وضوح نتایج کم شده و بیشینه مقدار دامنه پهن تر و مرزها با دقت کمتری تعیین می‌شوند، ولی با افزایش عمق می‌توانیم تخمینی از مرز توده داشته باشیم.

محاسبه می‌شود، نتایج بر حسب رادیان یا درجه است و از روی این نتایج نمی‌توان اطلاعاتی در باره شدت میدان ژئومغناطیسی یا خودپذیری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به دست آورد. همچنین نتایج زاویه تیلت، در بازه $-\frac{\pi}{2}$ و $\frac{\pi}{2}$ محدود می‌شود. از آنجایی که این فیلتر وابستگی شدیدی به زاویه میل دارد، بهتر است که روی میدان منتقل شده به قطب، اعمال و نتایج بررسی شود.

براساس مطالعات فریرا و همکاران (۲۰۱۳) در محاسبه زاویه تیلت، چنانچه مشتق‌گیری از مقادیر مشتق افقی میدان صورت پذیرد، فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی از رابطه زیر محاسبه می‌شود و می‌تواند مرز بی‌هنجاری توده را مشخص کند.

$$TAHG = \arctan\left(\frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}}\right) \quad (5)$$

نتایج حاصل از این فیلتر نیز در بازه $-\frac{\pi}{2}$ و $\frac{\pi}{2}$ قرار دارند. از خصوصیت قابل توجه این فیلتر، یکسان کردن سیگنال‌های حاصل از منابع کم عمق و عمیق و همچنین قرارگیری بیشینه دامنه بر روی لبه‌های ساختار است.

الف. مدل‌های مصنوعی

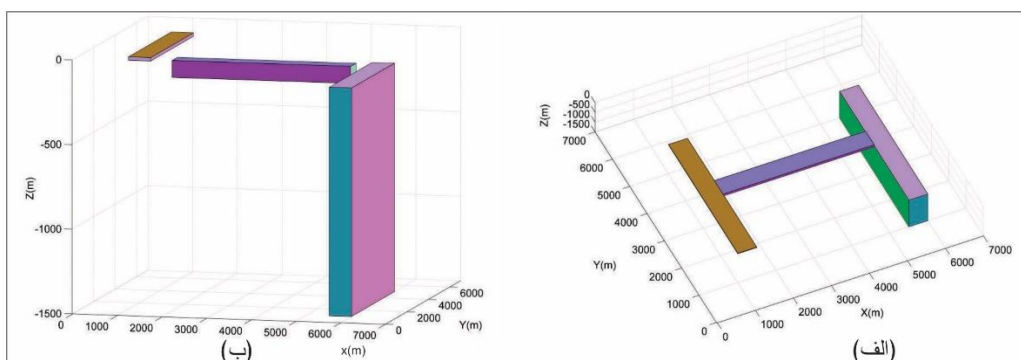
در این قسمت برای آزمودن کارایی روش زاویه تیلت و زاویه تیلت گرادیان افقی، جهت تشخیص مرز توده‌های

جدول ۱. مشخصات فیزیکی منشورهای مغناطیسی تشکیل‌دهنده مدل مصنوعی H شکل

منشور	طول (m)	عرض (m)	ضخامت (m)	عمق سطح بالایی (m)
منشور ۱	۴۰۰۰	۵۰۰	۲۰	۱۰
منشور ۲	۴۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۱۰۰
منشور ۳	۴۰۰۰	۵۰۰	۱۳۵۰	۱۵۰

جدول ۲. مشخصات مغناطیسی مدل H

شدت میدان مغناطیسی (nT)	زاویه انحراف میدان مغناطیسی زمین	زاویه میل میدان مغناطیسی زمین	زاویه انحراف مغناطیسی توده	زاویه میل مغناطیسی توده	خودپذیری مغناطیسی (SI)
۴۸۰۰۰	۳°	۵۰°	۳°	۵۰°	۰/۰۲



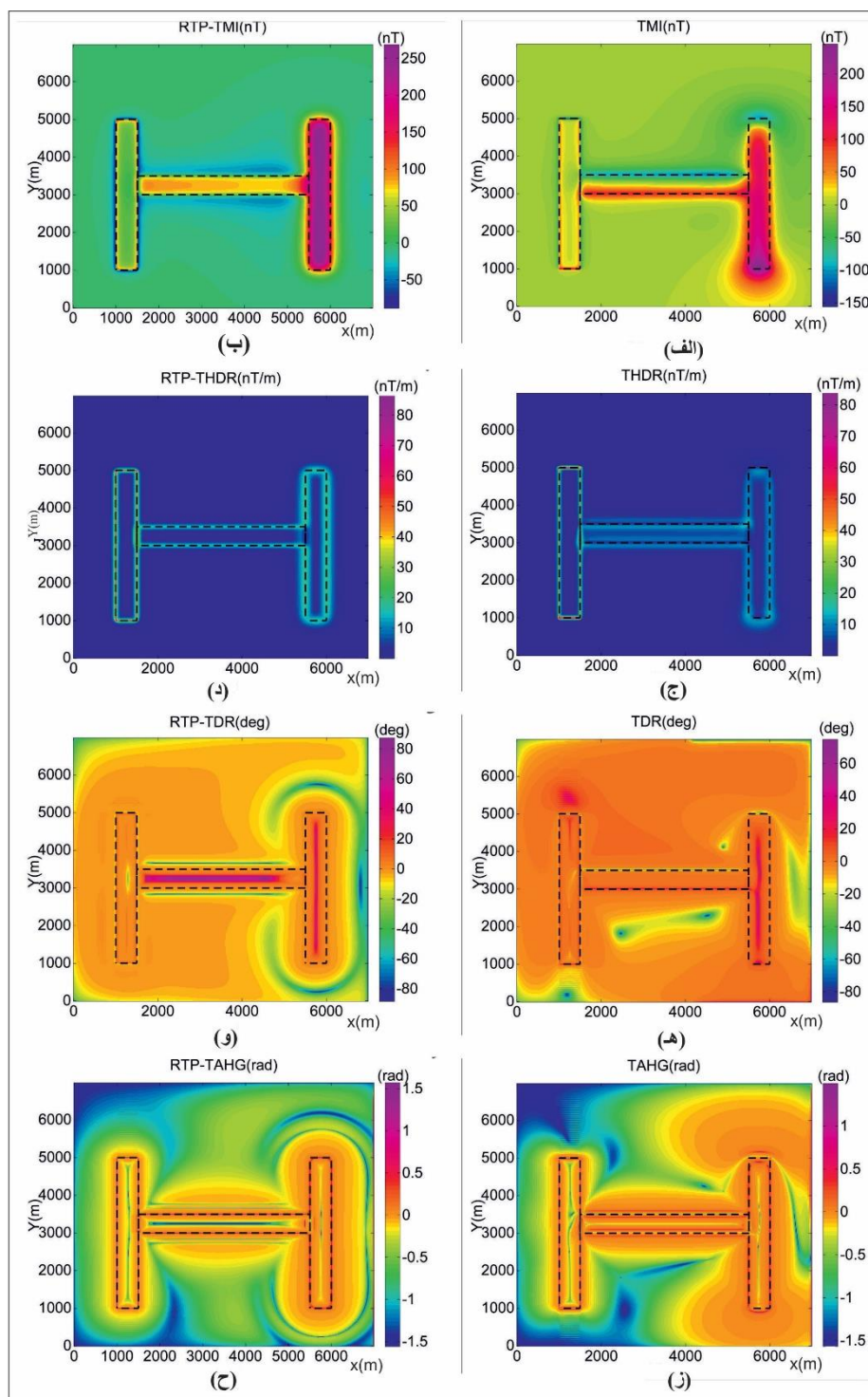
شکل ۱. مدل مصنوعی H شکل تولیدشده برای آزمون روش‌های مورد بررسی. این مدل شامل سه توده مغناطیسی منشوری شکل با عمق‌های متفاوت است. الف و ب نمایانگر این مدل از دو زاویه دید متفاوت است.

داده شده‌اند. براساس این شکل‌ها مقادیر بیشینه دامنه این فیلتر، بر روی لبه‌های بی‌هنجاری قرار می‌گیرد و یکی از روش‌های مناسب برای تعیین مرز بی‌هنجاری است. یکی از ویژگی‌های مهم این روش مستقل بودن آن از عمق منبع است، به گونه‌ای که با افزایش عمق توده، تشخیص مرزهای بی‌هنجاری به آسانی امکان‌پذیر است و مرز منشور ضخیم‌تر و عمیق‌تر، به خوبی مشخص شده است. نتایج بر روی داده‌های منتقل‌شده به قطب دقیق‌تر هستند که می‌توان گفت تنها مشکل این فیلتر، وابستگی آن به زاویه میل میدان مغناطیسی است. همچنین همان‌گونه که در شکل ۳ (ز و ح) نشان داده شده است، با اعمال این فیلتر در حضور نوفه (۵ درصد نوفه گوسی)، وضوح نتایج بالاست و مرزهای بی‌هنجاری در عمق‌های متفاوت به خوبی مشخص شده‌اند که نشان‌دهنده حساسیت کم این فیلتر به نوفه است. پس در شرایطی که محیط آغشته به نوفه باشد، می‌توان پاسخ‌های مناسبی از اعمال این فیلتر به دست آورد. در مجموع برای تشخیص مرز ساختارها فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی به دلیل مستقل بودن آن از عمق توده و همچنین عملکرد مطلوب آن در حضور نوفه‌ها، از فیلترهای مشابه مناسب‌تر است. در ادامه نتایج حاصل از اعمال این فیلتر روی داده‌های واقعی بررسی می‌شود.

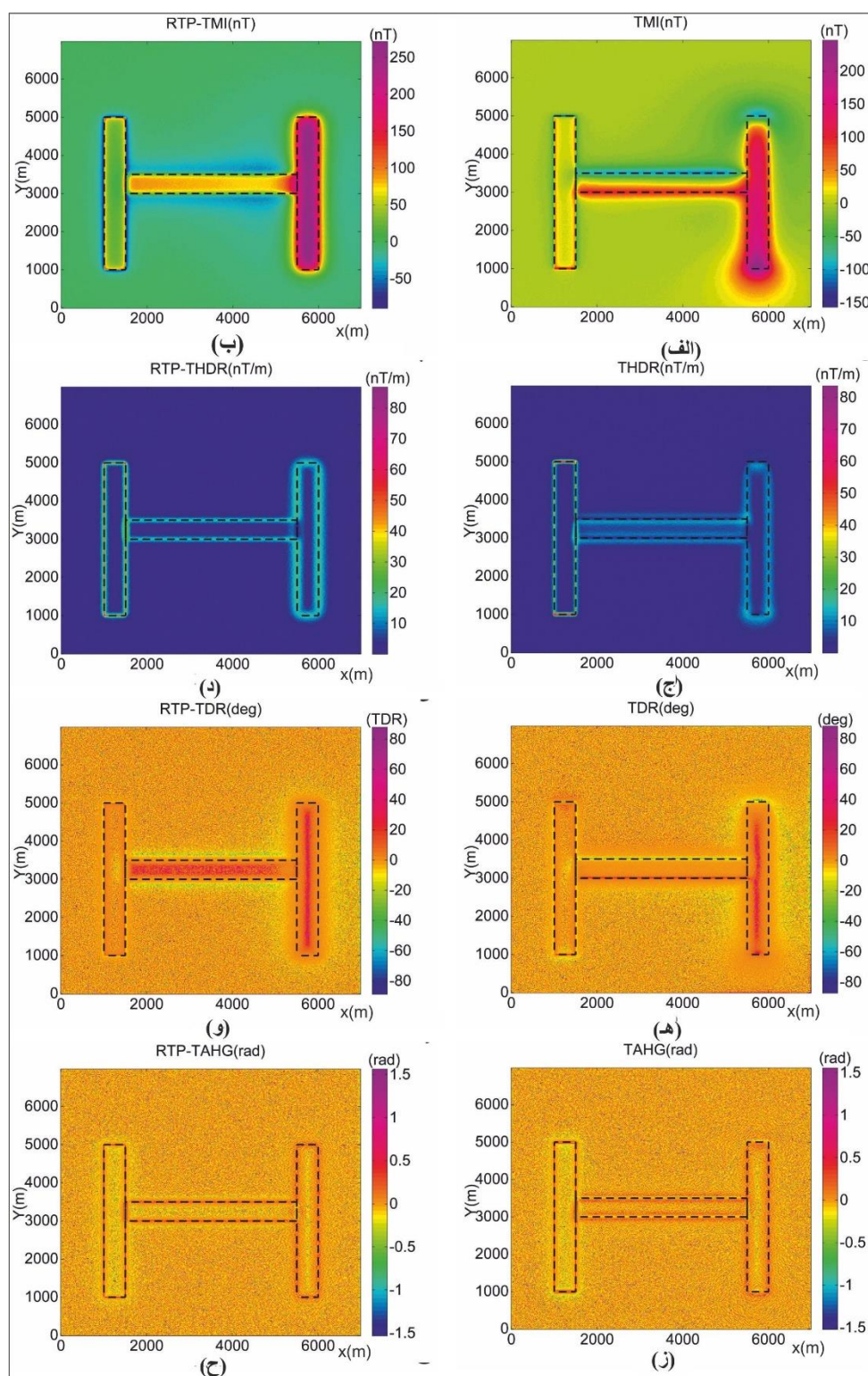
شکل ۳ (ج و د) نمایانگر کارایی خوب این روش برای داده‌های آغشته به نوفه می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، مشکل این روش پهن نشان دادن مرزهای توده است.

نتیجه اعمال فیلتر زاویه تیلت بر روی مدل در محیط بدون نوفه و همراه با نوفه در قسمت‌های «ه و و» شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، مقادیر صفر زاویه تیلت نشان‌دهنده مرز توده‌هاست و زمانی که فیلتر بر روی داده‌های منتقل‌شده به قطب اعمال می‌شود، مقادیر صفر دقیقاً مرز ساختار را نشان می‌دهد و این نتیجه ناشی از وابستگی شدید این فیلتر به زاویه میل میدان مغناطیسی زمین است. همچنین دامنه زاویه تیلت مستقل از دامنه میدان مغناطیسی کل است. نکته قابل توجه در این فیلتر پاسخگوبودن آن برای منابع عمیق است، اما تفکیک‌پذیری آن در منابع مذکور کم است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج مربوط بر روی منشورهای عمیق ضخیم، کیفیت بهتری در مقایسه با توده‌های سطحی دارد. این فیلتر در حضور نوفه نیز جوابگو است اما در مقایسه با زاویه تیلت گرادیان افقی وضوح کمتری دارد.

نتایج حاصل از فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی بر روی داده‌های مدل مصنوعی در شکل‌های ۲ و ۳ (ز و ح) نشان



شکل ۲. (الف) میدان مغناطیسی کل حاصل از منشورهای شکل ۱؛ (ب) میدان مغناطیسی کل منتقل شده به قطب؛ (ج) و (د) اعمال فیلتر گرادیان افقی روی داده‌های شکل (الف)، (ب)، (ه) و (و)؛ اعمال فیلتر زاویه تیلت بر داده‌های شکل (الف)، (ب)، (ز) و (ح)؛ اعمال فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی روی داده‌های شکل (الف) و (ب).



شکل ۳. (الف) میدان مغناطیسی کل حاصل از منشور شکل ۱ در حضور نوفه گوسی؛ (ب) میدان مغناطیسی کل منتقل شده به قطب؛ (ج) و (د) اعمال فیلتر گرادیان افقی بر داده‌های شکل (الف)، (ب)، (د) و (و)؛ اعمال فیلتر زاویه تیلت روی داده‌های شکل (الف)، (ب)، (ز) و (ح)؛ اعمال فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی بر داده‌های شکل (الف) و (ب).

مطالعه به‌طور محلی در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۹۰ کیلومتر مربع مشاهده می‌شود که با توجه به تنوع رنگی و افقی بودن لایه‌ها ساختار بسیار زیبا و مشخصی از گسلش نرمال را نشان می‌دهد.

بررسی داده‌های مغناطیس هوابرد این منطقه گسل‌های پی‌سنگی در بخش‌های میانی فرونشست را نشان می‌دهد. این گسل پی‌سنگی در امتداد گسل تبریز، به سمت جنوب خاوری قابل ردیابی است.

۴. تحلیل نقشه‌های مغناطیس‌سنجی منطقه

گستره مورد پژوهش منطقه‌ای کشیده دارای طول ۵۰ کیلومتر و عرض ۵ کیلومتر است. نقشه مغناطیس هوابرد منطقه در شکل ۵ نشان داده شده است. این داده‌ها با فاصله خطوط برداشت ۱ کیلومتر و فاصله نقاط ۲۰۰ متر توسط سازمان انرژی اتمی برداشت شده است (مصباحی، ۱۳۸۶). در تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی می‌توان بدون محاسبات، اطلاعاتی را از نقشه‌های مغناطیسی منطقه مورد نظر به دست آورد. از جمله می‌توان به تغییر طول موج، روند بی‌هنجاری‌ها، خطواره‌ها و ناحیه‌های مختلف اشاره کرد. خطواره‌های مغناطیسی خطوطی هستند که روند بی‌هنجاری‌ها، شکستگی‌ها، قطع‌شدگی‌ها و تغییرات ناگهانی ساخت و بافت بی‌هنجاری‌ها را نشان می‌دهند. در این نقشه روندها و بی‌هنجاری‌هایی با طول موج‌های متفاوت دیده می‌شوند که نشان‌دهنده پیچیدگی منطقه از نظر تکتونیکی و مغناطیسی می‌باشد. در نقشه برگردان به قطب (شکل ۵)، بین طول‌موج‌های بی‌هنجاری‌ها اختلاف زیادی دیده می‌شود. وضعیت بی‌هنجاری‌ها از جنوب به شمال سه روند متفاوت دارد؛ در جنوب طول موج کم، در میانه طول موج بلند و در شمال مجدد طول موج کم می‌شود. کوتاه‌بودن طول موج نشان‌دهنده عمق کم و طول موج بلند نمایانگر عمق زیاد و بزرگ‌بودن توده است. با توجه به بی‌هنجاری‌ها با طول موج بلند در نقشه مغناطیس

ب. اعمال روش زاویه تیلت گرادیان افقی بر داده‌های واقعی فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی در فرونشست زنجان واقع در همین استان اعمال شد. این منطقه ناحیه‌ای پست، باریک و ممتد است که در شمال باختری شهرستان زنجان با راستای شمال باختر-جنوب خاور کشیده شده است. شمال باختر این محدوده تا شهرستان میانه ادامه دارد و جنوب خاور محدوده به شهرستان زنجان و فرونشست ابهر ختم می‌شود. از نظر ریخت‌شناسی این محدوده، منطقه‌ای پست و هموار است که در میانه ارتفاعات طارم و سلطانیه قرار دارد.

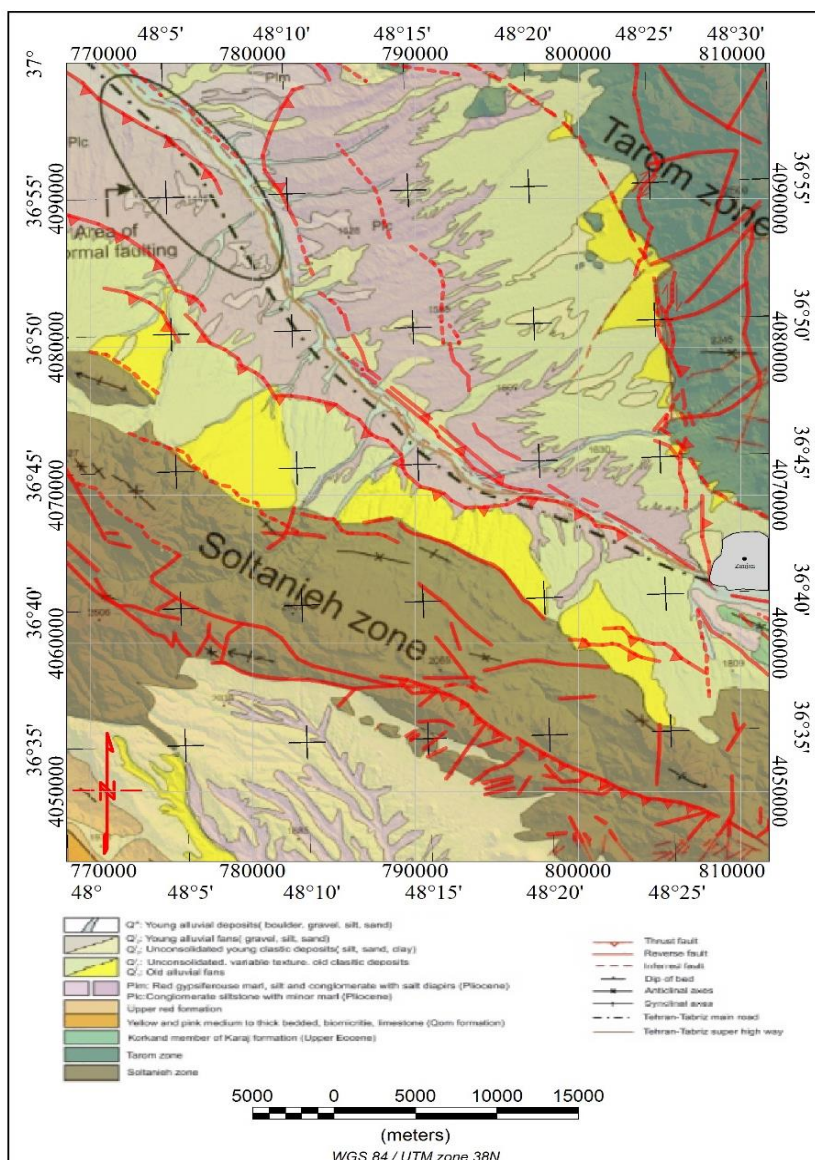
۳. مشخصات جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

از نظر چینه‌شناسی منطقه زنجان آمیزه‌ای از سنگ‌های کهن تا عهد حاضر است. قدیمی‌ترین سنگ موجود در منطقه مربوط به پرکامبرین است که در جنوب باختر زنجان همراه با گرانیت دوران رخمون دارد. جوان‌ترین نهشته‌های منطقه نیز در فرونشست زنجان مشاهده می‌شوند که شامل بادبزنی‌های قدیمی، پادگانه‌های قدیمی آبرفتی، پادگانه‌های جوان آبرفتی و بادبزنی‌های آبرفتی جوان به سن کواترنری هستند و ترکیب آن‌ها به صورت عمده شامل سیلت، رس و کنگلومرا می‌باشد (شکل ۴) (حاجیان و زاهدی، ۲۰۰۴). در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زنجان (حاجیان و زاهدی، ۲۰۰۴) در داخل فرونشست زنجان، مسیر عبور رودخانه زنجان‌رود به صورت گسل احتمالی در نظر گرفته شده است که می‌تواند امتداد گسل تبریز باشد. همچنین در بررسی‌های سلیمانی‌آزاد و همکاران (۲۰۱۱) نشان داده شده است که در حال حاضر شبکه‌ای فعال از گسل‌های راست‌بر در منطقه وجود دارد. نقشه ترسیم‌شده توسط ایشان چند ناحیه گسلی همگرا به سمت جنوب خاور (به طرف شهر زنجان) را نشان می‌دهد. این ساختارها، گسل‌های مایل تراستی و گسل‌های منطقه دوم آن‌ها ساختارهای امتدادلغز راست‌بر هستند که در شکل ۴ روی نقشه زمین‌شناسی منطبق شده‌اند. از نظر ساختاری، گسلش نرمال در گستره مورد

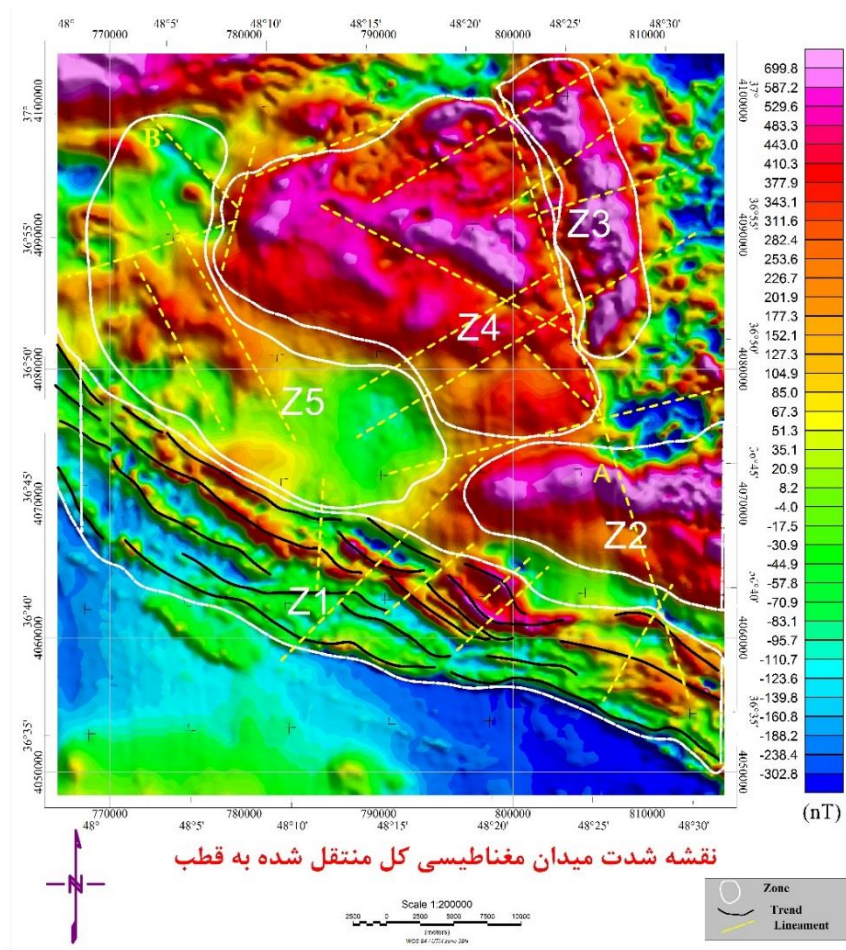
که در شکل ۵ نشان داده شده است. حوزه ۴ بزرگ‌ترین محدوده منطقه است که بی‌هنجاری این حوزه دامنه بالا و طول موج بلند دارد. طول موج بلند آن نشانگر عمق زیاد توده است و در نقشه زمین‌شناسی رخنمونی از واحدهای دارای خاصیت مغناطیسی دیده نمی‌شود.

هواپرد، می‌توان وجود توده‌های پی‌سنگی با ترکیب سنگ‌شناسی آذرین حدواسط تا مافیک را در این منطقه محتمل دانست.

همچنین این منطقه با توجه به روند، بافت، ساخت و قطع شدگی بی‌هنجاری‌ها، به پنج حوزه دسته‌بندی می‌شود



شکل ۴. گسل‌های فعال محدوده زنجان (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). بر روی نقشه زمین‌شناسی فرونشست زنجان، برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زنجان (حاجیان و زاهدی، ۲۰۰۴). محدوده رخداد گسل‌های نرمال روی نقشه مشخص شده است. نقشه نمایانگر چهار ناحیه گسلی همگرا به سمت شهر زنجان است. عموماً این گسل‌ها، گسل‌های تراستی و امتداد لغز راست‌بر هستند.



شکل ۵. نقشه مغناطیس هوابرد برگردان به قطب گستره فروافتادگی زنجان. خطوط ممتد مشکی نشان‌دهنده روندهای موجود در منطقه و خط‌چین زردرنگ نمایانگر خطواره‌های شناسایی شده است. همچنین نواحی مختلف با خطوط سفید مشخص شده‌اند. خطواره A یک گسل طولانی شمال-جنوب خاور را نشان می‌دهد که در نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۴) مشخص شده است. همچنین خطواره B احتمال وجود گسلی عمیق را نشان می‌دهد که پس از اعمال فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی مشخص شده است و در نقشه زمین‌شناسی منطقه ترسیم نشده است.

مغناطیس هوابرد برگردان به قطب منطقه زنجان را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، مقادیر بیشینه این فیلتر مرزهای بی‌هنجاری‌ها را نشان می‌دهد. در این صورت با انطباق مقادیر بیشینه دامنه این فیلتر بر روی نقشه مغناطیسی هوابرد (شکل ۷) می‌توان مرز بی‌هنجاری‌های درون پی‌سنگ را تشخیص داد که در نقشه مغناطیسی مشخص نیست. همچنین برای شناسایی مرز اصلی پی‌سنگ، می‌توان این فیلتر را بر روی داده‌های ادامه فرا سو اعمال کرد. با اعمال فیلتر ادامه فرا سو بر روی نقشه

به طور کلی هدف این پژوهش تعیین مرز بی‌هنجاری‌های پی‌سنگ منطقه با استفاده از فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی است که در داده‌های زمین‌شناسی به طور دقیق ترسیم نشده‌اند. چنانچه فیلتر مذکور را بر داده‌های منطقه اعمال کنیم، بیشینه دامنه نتایج، نشان‌دهنده مرزهای بی‌هنجاری می‌باشد (شکل ۷).

۵. تخمین مرز ساختارهای منطقه

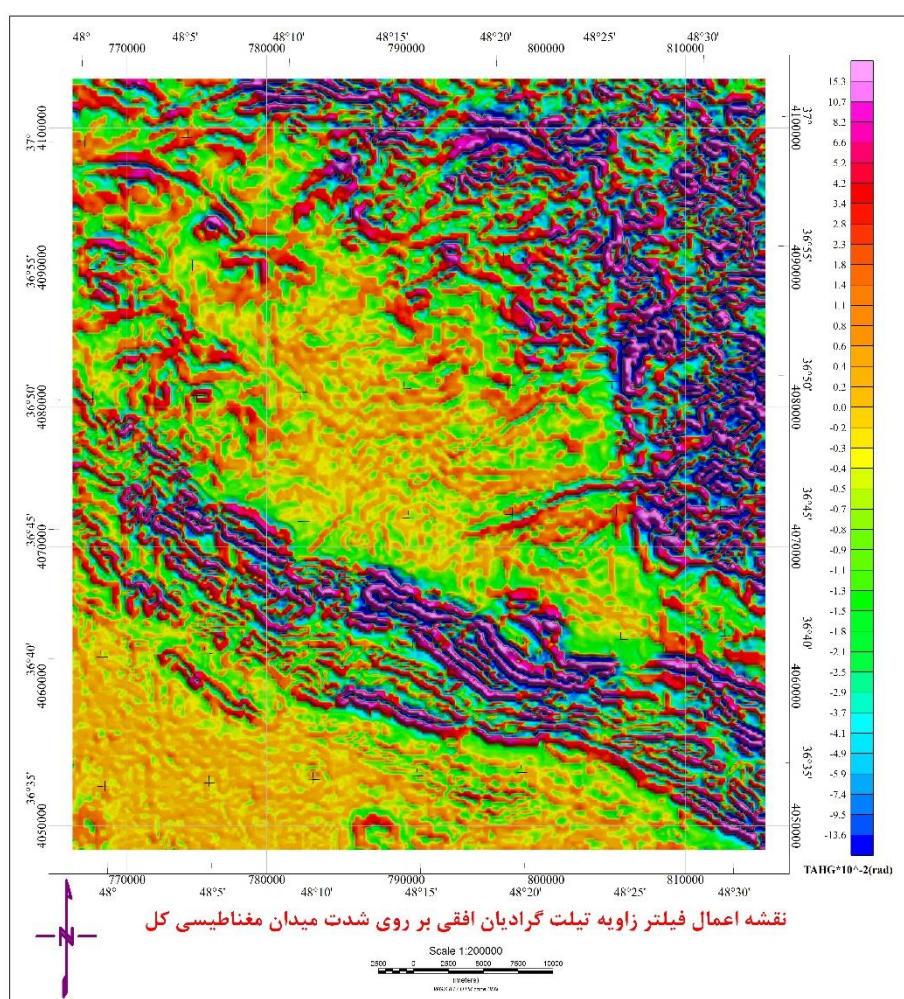
شکل ۶ اعمال روش زاویه تیلت گرادیان افقی بر نقشه

بی‌هنجاری هاست و روند ساختارها و خطواره‌های ساختاری با استفاده از نقشه مغناطیسی تهیه شده‌اند. همچنین مرز پی‌سنگ و ناهمواری‌های درون آن، حاصل از اعمال فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی بر نقشه مغناطیسی، در این شکل نمایش داده شده‌اند.

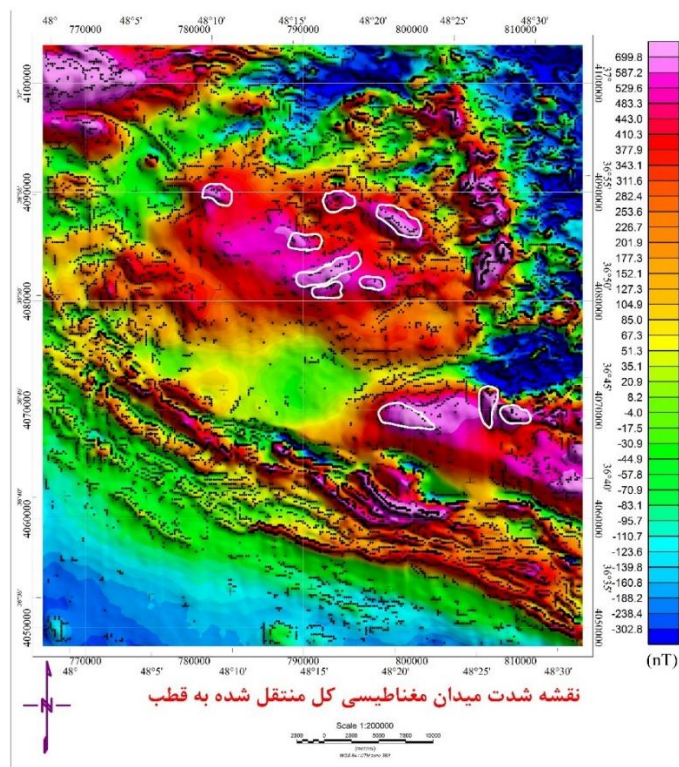
خطوط سفید مقادیر بیشینه‌ای را که مرز ناهمواری‌های درون پی‌سنگ را مشخص می‌کنند، نشان می‌دهد.

مغناطیسی، اثر ساختارهای سطحی تضعیف شده و توده‌های عمیق مشخص می‌شوند. در این صورت با اعمال فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی بر روی این نقشه، مرز اصلی پی‌سنگ تعیین می‌شود. با توجه به شکل ۸ دو توده عمیق پی‌سنگی در مرکز و جنوب‌خاور محدوده قابل شناسایی است.

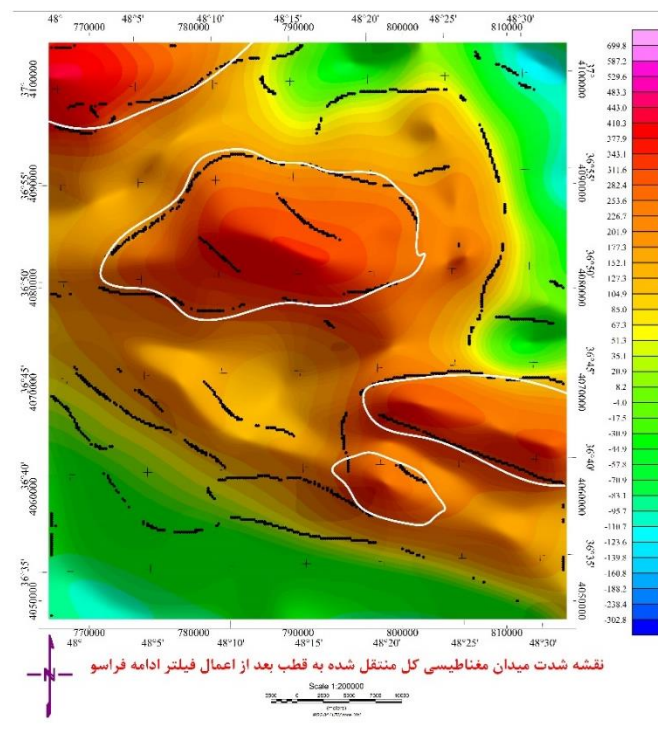
شکل ۹ نتیجه نهایی تفسیر کیفی انجام گرفته در این منطقه را نشان می‌دهد. ناحیه‌بندی منطقه برحسب طول‌موج



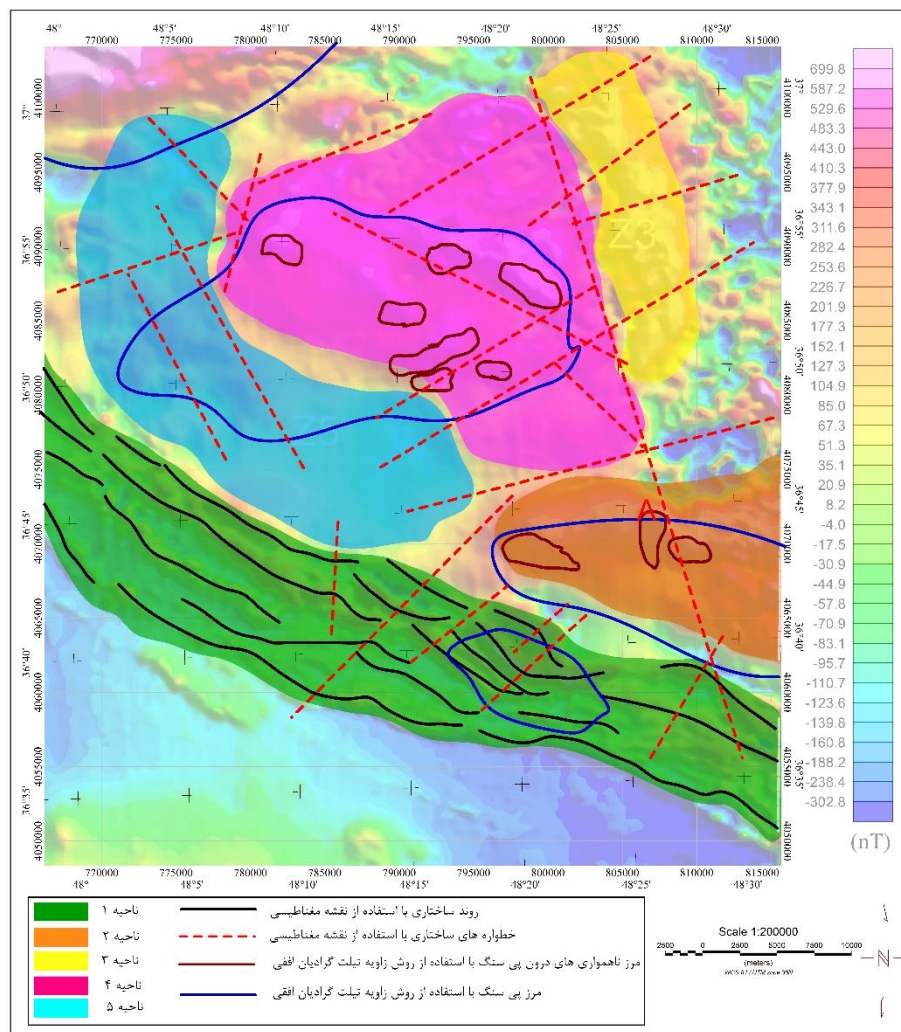
شکل ۶. نقشه مغناطیسی پس از اعمال فیلتر زاویه تیلت گرادیان افقی بر نقشه مغناطیس هوابرد برگردان به قطب



شکل ۷. نقاط سیاه‌رنگ، مکان‌هایی از نقشه مغناطیس هوابرد برگردان به قطب منطقه است که در آن زاویه تیلت گرادیان افقی بیشینه است.



شکل ۸. نقاط سیاه‌رنگ، مکان‌هایی از نقشه مغناطیس هوابرد برگردان به قطب منطقه پس از اعمال فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۳ کیلومتر است که در آن زاویه تیلت گرادیان افقی بیشینه است. خطوط سفید مقادیر بیشینه‌ای که مرز پی‌سنگ را مشخص می‌کند، نشان می‌دهد.



شکل ۹. نقشه تحلیل کیفی مغناطیسی محدوده مورد مطالعه. در این نقشه روندها، خطواره‌ها، ناحیه‌های تعیین شده و همچنین مرز پی سنگ و بی‌هنجاری‌های درون آن مشخص شده است. ناحیه ۲ و ۴ دو پی سنگ محدوده مورد بررسی هستند که مرز آن‌ها با خط آبی نشان داده شده است. مرز ناهموازی‌های درون پی سنگ نیز با خط قرمز نشان داده شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد دو روش زاویه تیلت و زاویه تیلت گرادیان افقی برای تعیین مرز بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، بررسی و نتایج مقایسه شدند. اگرچه مقادیر بیشینه و صفر دامنه زاویه تیلت میدان مغناطیسی منتقل شده به قطب، به ترتیب بر روی مرکز و مرز بی‌هنجاری قرار می‌گیرند، اما در روش زاویه تیلت گرادیان افقی، مقادیر بیشینه دامنه بر مرز بی‌هنجاری قرار می‌گیرند و از این نظر شناسایی مرز

ساختارها بر نقشه‌های مغناطیسی که با این فیلتر پردازش شده‌اند، آسان‌تر می‌شود. اگرچه هردوی این روش‌ها عملکرد قابل قبولی روی داده‌های آلوده به نوفه دارند اما در شناسایی مرز توده‌های عمیق، روش زاویه تیلت گرادیان افقی تفکیک‌پذیری بهتری در مقایسه با روش زاویه تیلت دارد.

برای بررسی عملکرد این دو روش در مکان‌یابی مرز توده‌ها، مدل مصنوعی H شکل در محیط متلب ساخته شد.

مشخص شدند.

مراجع

شاهوردی، م.، ۱۳۹۲، مقایسه روش‌های مختلف برای تعیین موقعیت لبه ساختارهای بی‌هنجاری مغناطیسی، سمینار کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

مصباحی، ف.، ۱۳۸۶، تحلیل هندسی و جنبشی سیستم گسل‌های نرمال در نهشته‌های افقی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

دانشگاه تهران.

- Blakely, R. J., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press.
- Blakely, R. J. and Simpson, R. W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006, Enhancing potential field data using filters based on the local phase: *Computers Geosciences*, 32(10), 1585-1591, doi: 10.1016/j.cageo.2006.02.016.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential field data using normalized statistics, *Geophysics*, 73(3), H1-H4, doi: 10.1190/1.2837309.
- De Barros, A., Bongiolo, S. and Ferreira, F. J. F., 2012, Evaluation of enhancement techniques of magnetic anomalies applied to structural interpretation of the Itauba Region, State of Para, Brazil, *Revista Brasileira de Geofísica*, 30(3).
- De Castro, D. L., Fuck, R. A., Phillips, J. D., Vidotti, R. M., Bezerra, F. H. and Dantas, E. L., 2014, Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, 614, 128-145.
- Ferreira, F. J., de Souza, J., de B. e S. Bongiolo, A. and de Castro, L. G., 2013, Enhancement of the

این مدل از سه منشور راست گوشه با خصوصیات مغناطیسی یکسان و هندسی متفاوت تشکیل شده است. نتایج حاصل از اعمال این روش‌ها بر روی مدل مصنوعی در دو حالت، پاسخ‌های مدل آغشته به نوفه و عاری از نوفه، تأییدی بر نتایج گفته شده در بالاست. همچنین کارایی روش برای داده‌های مغناطیسی فروافتادگی زنجان آزموده شد. این منطقه در شمال باختر شهرستان زنجان واقع شده است و هدف یافتن مرزهای منطقه پی‌سنگ و ناهموازی‌های آن در مرکز این محدوده است که در داده‌های زمین‌شناسی هیچ نمودی ندارند. با بهره‌بردن از روش زاویه تیلت گرادیان افقی این مرزها به خوبی

- total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle, *Geophysics*, 78(3), J33-J41.
- Hajian, J. and Zahedi, M., 2004, Geological map of Zanjan, 1:100000, Tehran, GSI.
- Ma, G., 2013, Edge detection of potential field data using improved local phase filter, *Exploration Geophysics*, 44(1), 36-41.
- Miller, H. G. and Singh, V., 1994, Potential field tilt -A new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D. and Smith, R., 2007, Tilt-depth method, a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives, *The Leading Edge* 26(12), 1502-1505.
- Solaymani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Shahpasan Zadeh, M. and Ritz, J. F., 2011, The Zandjan fault system: morphological and tectonic evidences of a new active fault network in the NW of Iran, *Tectonophysics*, 506(1), 73-85.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data, *Geophysics*, 70(4), L39-L43, doi: 10.1190/1.1988184.

Interpretation of magnetic data based on Tilt derivative methods and enhancement of total horizontal gradient, a case study: Zanjan Depression

Shahverdi, M.¹, Namaki, L.², Montahaei, M.^{3*}, Mesbahi, F.⁴ and Basavand, M.⁵

1. M.Sc. of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Science, Azad University, Sanandaj Branch, Iran

3. Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Geology department, Tabriz University, Iran

5. Postgraduated, Research Institute of Earth Science, GSI, Iran

(Received: 01 Feb 2016, Accepted: 18 Oct 2016)

Summary

Magnetic survey data are generally used to map faults, geologic contacts and magnetic ore bodies. The spatial distribution of magnetic sources is usually determined during the mapping process. Variation in depth, magnetization and geometrical parameters generate magnetic anomaly waveform. Direction of the remanent and induced magnetization vector also affect the shape of these waveform. A magnetic anomaly waveform, includes amplitude, phase and wavelength. Putting these parameters altogether makes the interpretation of the magnetic data a difficult task. There are different useful methods for interpretation of a magnetic map. Generally, these methods are based on reduction of data to a simpler form, so that the edges and center of the causative bodies are determined easily. In the recent years many methods have been used to balance the difference between various anomaly amplitudes. Each method is designed to determine a specific parameter of the magnetic anomalies. Using local phase filters are being common in potential field data interpretation. They are high-pass filters based on horizontal and vertical derivatives, such as total horizontal derivative, tilt angle, theta map, etc. Edge detection of a magnetic structure is one of the most important task in the interpretation of magnetic data. For this purpose, in this research we have used two local phase filters: Tilt angle (TDR) and Total Gradient of Tilt angle (TAHG). As stated, tilt angle filter is used in determining the boundary of source anomaly. It is relatively less sensitive to the depth of the source, so, it can resolve shallow and deep sources as well. As tilt derivative is a function of the ratio of the vertical and horizontal derivatives of field intensity, it does not contain information on the strength of the geomagnetic field nor the susceptibility of the causative bodies. The peaks of tilt angle amplitude should be located over the center and its zeros over the edges of the source body. It strongly depends on the inclination of magnetic field. Another enhanced method we have used in this study for determining the boundaries of the structures is the horizontal gradient of tilt angle (the TAHG). It is defined by taking the arctangent of the vertical derivative of the horizontal gradient, divided by the modulus of the horizontal gradient. TAHG equalizes the signals obtained from the shallow and deep sources. Its notable features are that it produces amplitude maxima over the source's edges, gives suitable resolution and is less dependent on the depth of structures. Like the TDR, this method depends on the inclination of magnetic field. We applied these methods for synthetic noise-free and noisy data. Preparing the total magnetic responses of synthetic models as well as edge detection calculations have all been done in MATLAB. In comparison with common methods like horizontal gradient and analytic signal, it delineates the edges of source bodies more efficiently and accurately. Furthermore the TAHG method has better resolution in determining the boundaries of deeper sources than the TDR method. We applied the stated algorithm, on real data. The aeromagnetic dataset from Zanjan region was selected to be used in the TAHG method. The Zanjan depression is a narrow and continuous igneous basin, located in the north western Zanjan province. There are many young active and basement faults in the study area. Total magnetic anomaly map of the region, shows two major structural trends in NW-SE and NE-SW, respectively. By applying the two different edge detection algorithms we obtained the hidden boundaries of the basement which is not detectable in the geological maps because of the thick sedimentary covers. The results show that TAHG method is suitable for determining the basement faults and boundaries, as well as mapping the contacts of magnetic units.

Keywords: Potential field, Magnetic anomaly, Tilt angle, Horizontal gradient, Vertical gradient, Edge detection.