

# تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی به‌منظور تخمین عمق پی‌سنگ مغناطیسی و گسل‌های پنهان در منطقه بصیران، خراسان جنوبی

محمد محمدزاده مقدم<sup>(۱)</sup>، غلامعباس فنائی خیرآباد<sup>(۲)</sup>، سعید میرزائی<sup>(۳)</sup> و میثم عابدی<sup>(۴)</sup>

۱. دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی تهران

۲. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند

۳. استاد پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی تهران

۴. استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۱۹

## چکیده

منطقه بصیران واقع در جنوب شهر بیرجند در یک محیط آتش‌فشانی واقع شده و از نظر کانی‌سازی‌های معدنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال ۱۳۸۳ عملیات مغناطیس‌سنجی هوابرد با وضوح بالا (فواصل خطوط ۲۵۰ متر) در محدوده‌ای به وسعت حدود ۸۵۰ کیلومتر مربع توسط سازمان زمین‌شناسی کشور اجرا شد. هدف از اجرای این عملیات علاوه بر شناسایی مستقیم کانی‌زایی‌های معدنی جدید، تولید یک پایگاه داده ژئوفیزیکی مطلوب برای مطالعات و اکتشافات زمینی در آینده بوده است. روش مغناطیس‌سنجی هوابرد ابزاری موثر در شناسایی پی‌سنگ مغناطیسی و شناسایی خطواره‌های مغناطیسی پنهان در مناطق مختلف بخصوص محیط‌های آتش‌فشانی است. به‌منظور تهیه نقشه‌های مغناطیسی مورد نیاز برای تفسیر زمین‌شناسی، تصحیحات و پردازش‌های لازم از جمله تصحیح تغییرات روزانه، دورافت، حرکات مانور بالگرد و هم‌ترازسازی بر روی داده‌های خام شدت میدان مغناطیسی صورت گرفت. در این مقاله با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد به دو موضوع اساسی در اکتشافات پرداخته شده است: ۱- برآورد عمق پی‌سنگ مغناطیسی و ۲- شناسایی فابریک‌ها و گسل‌های مغناطیسی. به‌منظور برآورد ضخامت رسوبات غیرمغناطیسی از تلفیق روش‌های اویلر و ورنر استفاده شده است. با در نظر گرفتن شواهد زمین‌شناسی نتایج هر کدام از این روش‌ها مورد تحلیل قرار گرفت و سپس مطلوب‌ترین عمق مربوط به پی‌سنگ مغناطیسی در هر نقطه تعیین شد. در نهایت نقشه خطوط هم‌تراز پی‌سنگی مغناطیسی ارائه شد. در بسیاری از بخش‌های منطقه که توسط واحدهای آذرین پی‌سنگی پوشیده شده است، عمق صفر و دیگر بخش‌ها عمق چند متر تا حدود ۱۲۰۰ متر برآورد شده است. بیشترین عمق پی‌سنگ مغناطیسی مربوط به حوضه رسوبی شرق منطقه است. به‌منظور شناسایی خطواره‌های مغناطیسی از فیلتر مشتق زاویه تیلت در ارتفاع فراسوی ۵۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر استفاده شد. آن دسته از گسل‌های مغناطیسی که در نقشه‌های تیلت فراسوی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر قابل ردیابی هستند، به‌عنوان گسل‌های اصلی یا پی‌سنگی و دیگر گسل‌های شناسایی شده در نقشه تیلت به‌عنوان گسل‌های فرعی در نظر گرفته شد. در مجموع بیش از ۲۰ گسل پنهان درجه یک و دو شناسایی و به نقشه درآمد.

واژه‌های کلیدی: بصیران، خراسان جنوبی، خطواره مغناطیسی، پی‌سنگ مغناطیسی، مغناطیس‌سنجی هوابرد.

## مقدمه

با رخنمون اندک ایفا کنند. این در حالی است که در بیشتر موارد، خطر لرزه‌های گسل‌های مدفون یا پوشیده تا زمان ایجاد گسیختگی در پی رخداد زمین لرزه همچنان ناشناخته باقی می‌مانند. استفاده از روش مغناطیس‌سنجی برای شناسایی گسل‌ها در بسیاری از مناطق جهان نتایج بسیار سودمندی ارائه کرده است (Philips, 2002; Mbraga et al., 2012). در ایران نیز مطالعه گسل‌های مغناطیسی با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد با فاصله خطوط ۷/۵ کیلومتر در کل پهنه ایران انجام شده است (امیرپور اصل و سهرابی، ۱۳۹۴؛ فروتن و خیرالهی، ۱۳۹۳). از آنجایی که داده‌های مورد استفاده در این دو پژوهش اخیر از وضوح کمی برخوردار بوده است، بنابراین گسل‌های معرفی شده عمدتاً مربوط به گسل‌ها اصلی ایران می‌باشد.

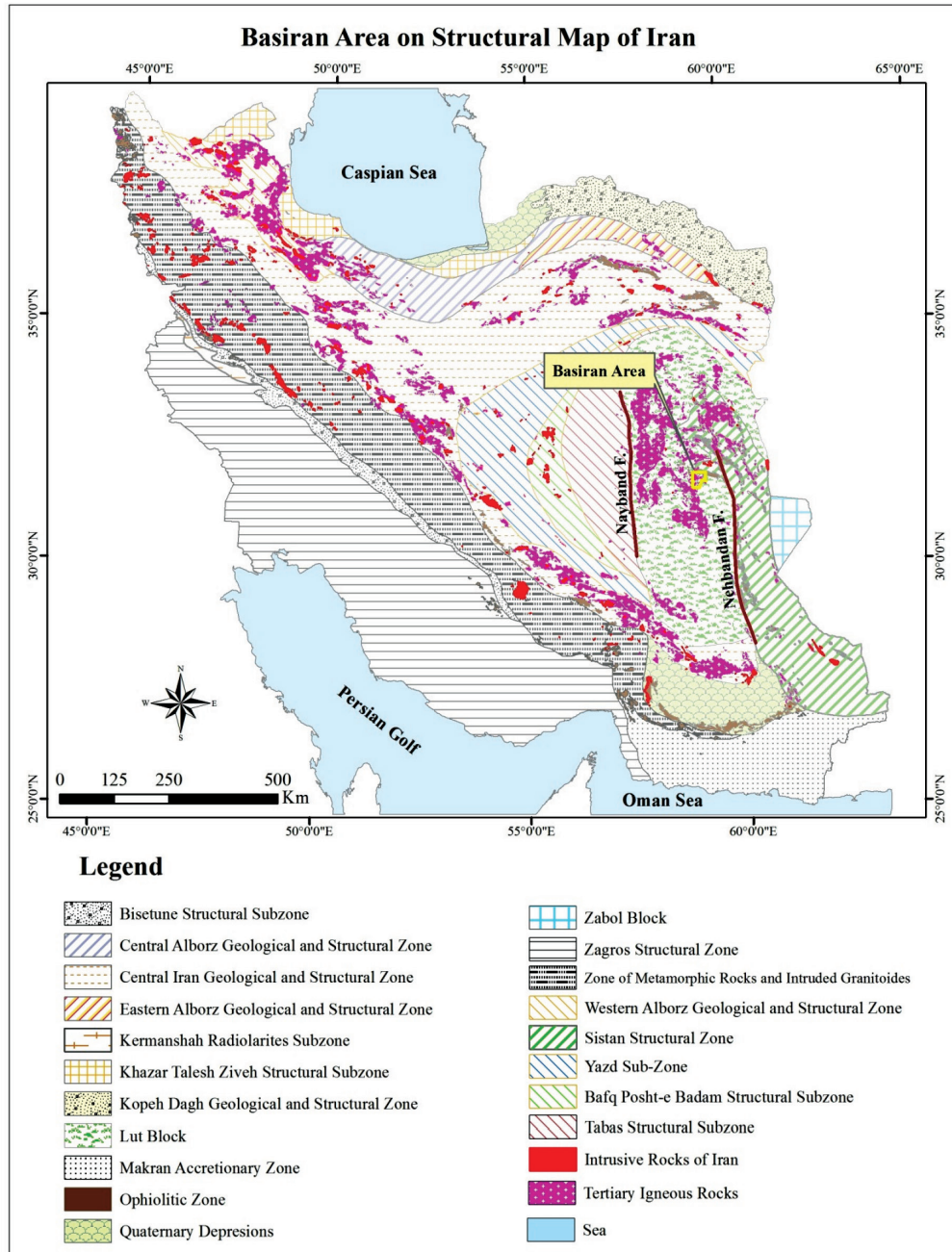
در این مقاله بر پایه داده‌های مغناطیس هوابرد با وضوح بالا، با استفاده از روش‌های اوپلر و ورنر و تلفیق آن‌ها با پدیده‌های زمین‌شناسی به شناسایی و مطالعه بستر مغناطیسی پرداخته شده است. همچنین بر اساس نتایج نقشه‌های مشتقات میدان به‌ویژه نقشه مشتق تیلت، خطواره‌های مغناطیسی پنهان شناسایی و به نقشه درآمده است. در نهایت کلیه لایه‌ها جهت تفسیر، با یکدیگر تلفیق و در قالب یک نقشه ژئوفیزیکی-زمین‌شناسی ارائه شده است.

## زمین‌شناسی عمومی

از نظر تقسیمات ساختاری ایران، این منطقه در حاشیه خاوری بلوک لوت قرار می‌گیرد (شکل ۱). بلوک لوت با طول و عرض حدود ۹۰۰ و ۲۰۰ کیلومتر در شرق ایران قرار دارد و توسط گسل نهبندان و بلوک سیستان از سمت خاور و گسل نایبند و زیربلوک طبس از سمت باختر محدود می‌شود. از نظر سنگ‌شناسی این بلوک عمدتاً توسط سنگ‌های آتش‌فشانی، پیروکلاستیک و ساب‌ولکانیک مربوط به دوره الیگومیوسن پوشیده شده است (Karimpour et al., 2011). به‌طور کلی واحدهای آتش‌فشانی در شرق ایران به‌صورت پراکنده قابل مشاهده هستند، زیرا این واحدها عمدتاً در مرحله فرورانش تا مراحل پس از برخورد صفحات قاره‌ای آسیا و عربستان شکل گرفته‌اند (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1999). این واحدها بخش زیادی

منطقه بصیران در فاصله هوایی ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان بیرجند واقع شده است. مساحت منطقه مورد بررسی در حدود ۸۵۰ کیلومتر مربع است. کانسارهای قلعه‌زری، بیشه، بصیران و دیگر اندیس‌های مشخص شده در نقشه زمین‌شناسی و گزارش‌های منتشر شده نشان‌دهنده پتانسیل معدنی بسیار بالای این منطقه است (www.ngdir.ir). بر همین اساس سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۸۳ عملیات مغناطیس‌سنجی هوابرد با وضوح بالا در این منطقه اجرا نموده است. پردازش‌ها و تصحیحات اولیه در واحد ژئوفیزیک هوایی این سازمان انجام و نتایج آن در مقاله فنایی و همکاران (۱۳۸۷) منتشر شده است. پس از پردازش داده‌ها و تهیه نقشه‌های مغناطیسی، به تفسیر داده‌ها و ارتباط ناهنجاری‌ها با پدیده‌های زمین‌شناسی پرداخته شده است. با صرف‌نظر کردن از کاربرد مستقیم روش مغناطیس‌سنجی در شناسایی توده‌های آهن، می‌توان بیان نمود که این روش به‌طور غیرمستقیم در بحث اکتشافات سایر مواد معدنی و هیدروکربوری کاربرد دارد. داده‌های مغناطیس‌سنجی دربرگیرنده اطلاعات زمین‌شناسی و ساختاری زیرسطحی بسیار سودمندی است که برای آشکار شدن آن‌ها نیاز به تفسیر صحیح داده‌ها و درک درست از نحوه پاسخ مواد و پدیده‌های زمین‌شناسی دارد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه بصیران، اطلاعات بسیار مهم و پایه‌ای در زمینه اکتشافات معدنی و هیدروکربوری ارائه شده است. در این پژوهش به تخمین عمق پی سنگ مغناطیسی و شناسایی خطواره‌های مغناطیسی پرداخته شده است. بستر مغناطیسی عبارت است از سنگ‌های با ترکیب گرانیتی و دگرگونی که در زیر واحدهای رسوبی واقع شده و برای اکتشافات هیدروکربوری و معدنی حائز اهمیت هستند (Kumar et al., 2018). روش‌های متعددی برای شناسایی بستر مغناطیسی وجود دارد که از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به واهمامیخت اوپلر و ورنر اشاره نمود (Nabighian et al., 2005). همچنین داده‌های مغناطیس هوایی می‌توانند نقش مهمی در شناسایی گسل‌های پنهان یا

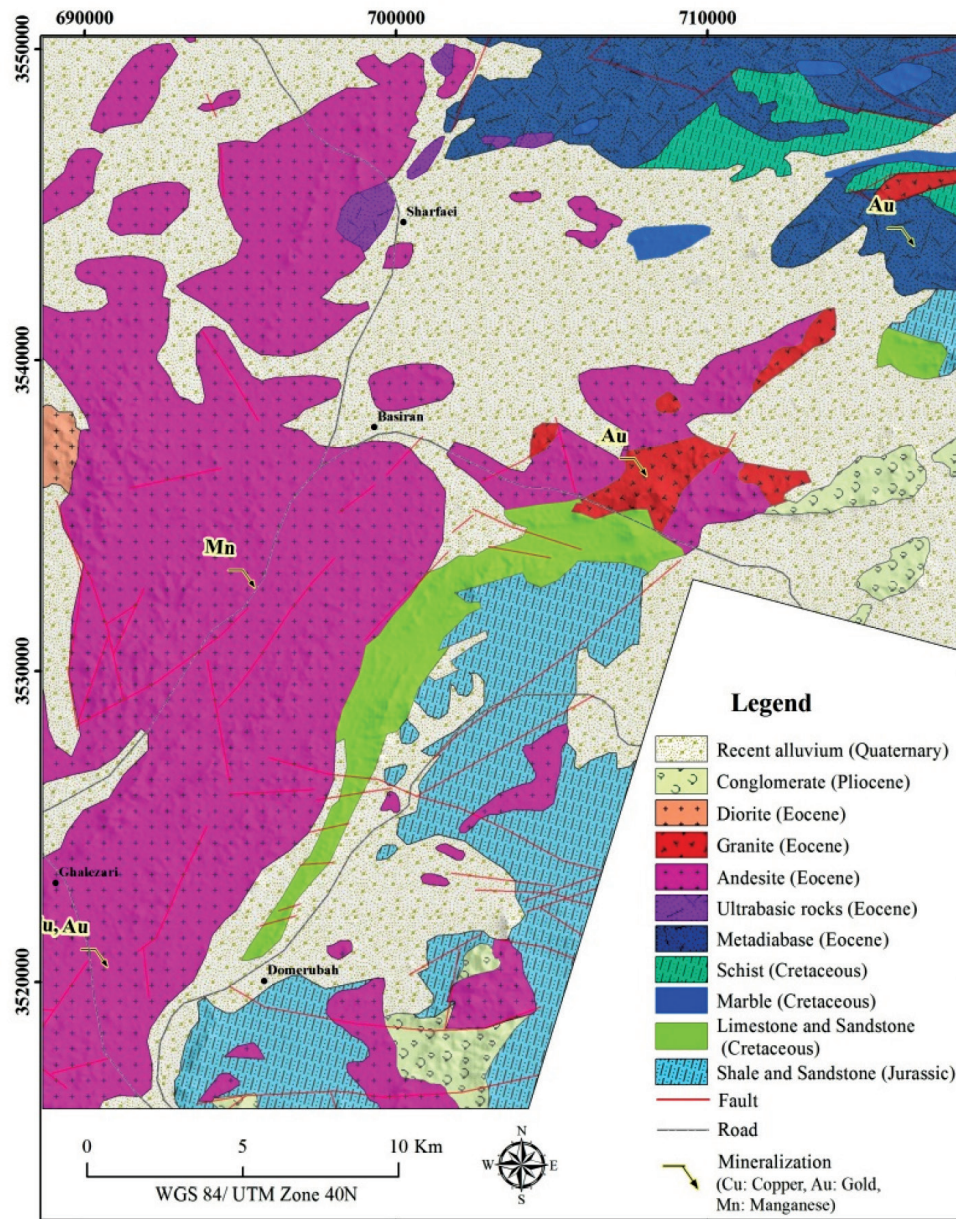
از مساحت شرق ایران را پوشانده‌اند (Pang et al., 2013). پدیده آتشفشانی در شرق ایران عمدتاً بین بلوک سیستان از سمت خاور و طبرستان از سمت باختر محدود می‌شود (Walker et al., 2009). تشکیل این نوع از واحدهای آذرین حاصل از زون‌های برخوردی و فرورانش، شرایط لازم برای ایجاد انواع مختلفی از کانی‌سازی‌های معدنی را فراهم می‌آورد. از مهم‌ترین این نوع کانی‌سازی‌ها می‌توان به مس، طلا، آهن و منگنز اشاره کرد (Lofli, 1982; Tarkian et al., 1983; Jung et al., 1983; Saadat et al., 2008 and 2009; Arjmandzadeh et al., 2011; Arjmandzadeh, and Santos, 2014, Barghi, et al., 2018).



شکل ۱. موقعیت منطقه بصیران بر روی نقشه بلوک‌های ساختاری ایران (Aghanabati, 1998).

شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این منطقه انواع کانی‌سازی‌های اقتصادی حضور داشته و معادن مهمی همچون قلعه‌زری، بصیران، بیشه و دیگر اندیس‌های معدنی کوچک و متوسط در حال فعالیت هستند. در این منطقه حضور واحدهای رسوبی و آذرین در مجاورت یکدیگر شرایط ایجاد کانی‌سازی بزرگ اسکارنی را نیز بوجود آورده است.

قدیمی‌ترین واحدهای این منطقه مربوط به رسوبات شیل و ماسه‌سنگ شمشک بوده که عمدتاً در سمت شرق منطقه رخنمون دارند. اجرای عملیات مغناطیس‌سنجی هوابرد با وضوح بالا، گام مهمی در شناخت بهتر زمین‌شناسی سطحی و زیرسطحی ایفا نموده و نقش مهمی در توسعه اکتشافات معدنی و همچنین هیدروکربوری در این منطقه خواهد داشت.

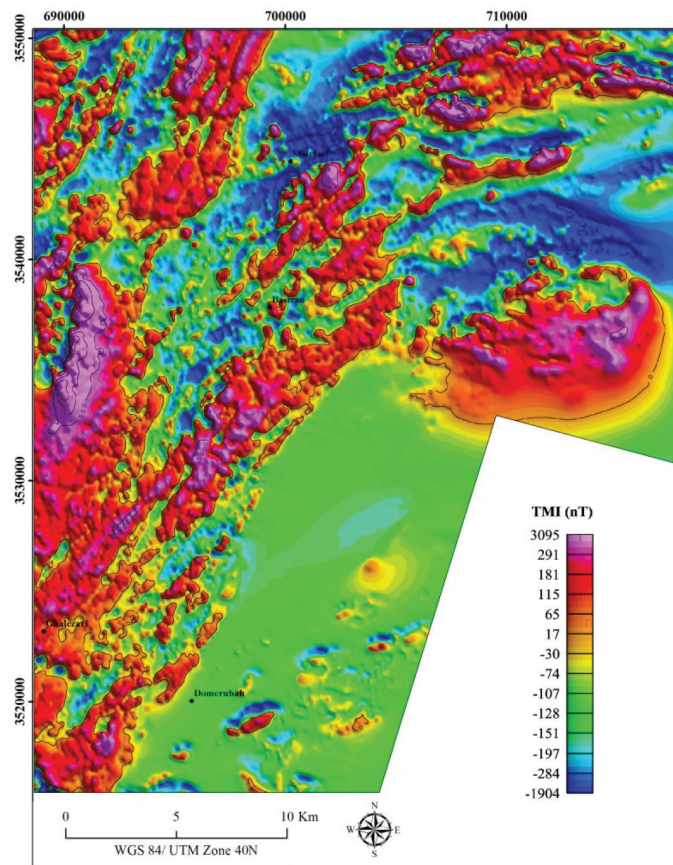


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه بصیران. برگرفته از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ بیرجند و ده‌سلم (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ بیرجند و بصیران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

## داده‌های مغناطیس هوابرد

به روند زمین‌شناسی عمومی در این منطقه، آزمون خطوط پرواز ۱۰۵ درجه انتخاب و اجرا شد. پس از برداشت داده کلیه تصحیحات و پردازش‌های اولیه (از جمله تصحیح تغییرات روزانه (Diurnal)، دورافت (Lag)، حرکات بالگرد (Heading)، هم‌سطح‌سازی داده‌ها (Leveling) و تصحیح زمینگان (IGRF) توسط فنایی و همکاران (۱۳۸۷) انجام شد.

عملیات ژئوفیزیک هوابرد به روش مغناطیس‌سنجی در منطقه بصیران توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور توسط یک بالگرد مجهز به دو مغناطیس‌سنج بخار سزیم به همراه دیگر تجهیزات جانبی انجام شد. فاصله خطوط پرواز از یکدیگر ۲۵۰ متر، فواصل برداشت داده ۱۰ متر و ارتفاع بالگرد ۴۰ متر از سطح زمین می‌باشد. با توجه



شکل ۳. نقشه داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه بصیران (فاصله خطوط پرواز ۲۵۰ متر و ارتفاع بالگرد ۴۰ متر می‌باشد)

آدرین منطقه است. در نقشه‌های میدان مغناطیسی منطقه بافت نامنظم و سیگنال‌های با دامنه قوی و فرکانس بالا وجود دارد که از ویژگی‌های محیط آتش‌فشانی است. عمده منطقه مورد مطالعه به جز بخش‌های جنوب شرقی منطقه توسط این واحدهای مغناطیسی پوشیده شده است.

به‌منظور تولید نقشه‌های مورد نیاز این پژوهش، کلیه داده‌های مذکور توسط الگوریتم کمترین انحنای (موجود در نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj) با ابعاد شبکه ۶۰<sup>۲</sup> متر شبکه‌بندی شد. شکل ۳ نقشه میدان مغناطیسی (TMA) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت تغییرات میدان مغناطیسی به حدود ۵۰۰۰ نانوتسلا می‌رسد که نشان‌دهنده وجود کانی‌های فری مغناطیس در سنگ‌های

1. Minimum curvature
2. Grid cell size

باشد. با توجه به شکل ۴ و وجود پاسخ مغناطیسی آرام در بخش شرق و جنوب شرق منطقه، به نظر می‌رسد در این بخش واحدهای آتش‌فشانی حتی در اعماق نیز فعالیت چندانی نداشته و بنابراین واحدهای رسوبی ضخامت قابل توجهی را ایجاد کرده‌اند. بررسی ضخامت واحدهای رسوبی و همچنین شناسایی دقیق ساختارهای مغناطیسی خطی در منطقه بصیران از مهم‌ترین اهداف این مقاله است که در ادامه شرح داده می‌شود. در ادامه به‌منظور اعمال روش‌های پردازش و تخمین عمق از داده‌های انتقال به قطب (RTP) به‌عنوان داده مبنا استفاده شده است.

### برآورد عمق پی‌سنگ مغناطیسی

یکی از اساسی‌ترین اهداف در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی تخمین عمق ناهنجاری‌های مغناطیسی است. روش اویلر (Euler) روشی است که برای تخمین عمق بسیار کاربرد دارد اما در این روش میزان سطح اعتماد جواب‌ها، به انتخاب صحیح شاخص ساختاری و پنجره تخمین عمق بستگی دارد. روش ورنر (Werner) روش دیگری برای محاسبه عمق می‌باشد که به ویژگی‌های مغناطیس‌شوندگی توده بستگی ندارد. این دو روش بر روی داده‌های مغناطیس‌هوای منطقه بصیران اعمال شد و نتایج آن به‌منظور بررسی عمق پی‌سنگ مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است.

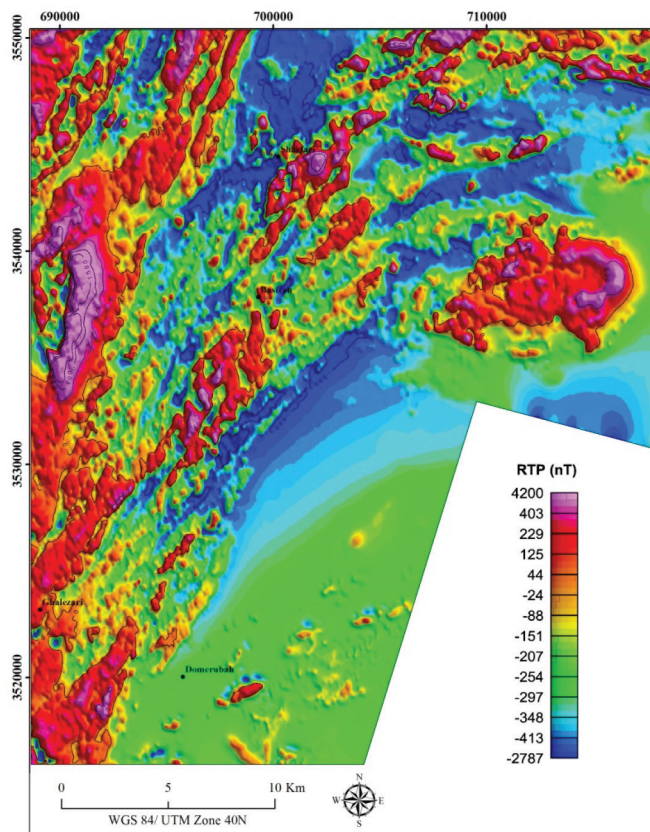
#### ۱- روش واهمامیخت اویلر (Euler Deconvolution)

روش اویلر از گرادین‌های قائم میدان مغناطیسی به‌منظور برآورد مکان افقی و عمق منشاء‌های مغناطیسی استفاده می‌کند. معادله اویلر در حالت سه‌بعدی به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Reid et al., 1990):

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (1)$$

که در آن  $(x_0, y_0, z_0)$  مختصات منبع زیرسطحی ایجادکننده ناهنجاری مغناطیسی،  $\frac{\partial T}{\partial x}$ ،  $\frac{\partial T}{\partial y}$  و  $\frac{\partial T}{\partial z}$  مشتقات میدان مغناطیسی در سه جهت  $x, y, z, N$  شاخص ساختاری است و مربوط می‌شود به نرخ تغییرات میدان با فاصله از منشاء و  $B$  میدان مغناطیسی منطقه‌ای درون پنجره اویلر می‌باشد. معادله اویلر با استفاده از یک روش خطی

به‌منظور امکان انجام بررسی بهتر ناهنجاری‌های مغناطیسی و حذف اثر زاویه میل مغناطیسی باید از فیلتر انتقال به قطب (RTP) استفاده شود. با اعمال این فیلتر، مقادیر بیشینه و کمینه ناهنجاری‌ها دقیقاً بر روی توده‌های ایجادکننده آن قرار می‌گیرد و لذا تفسیر آن‌ها آسان‌تر می‌شود. در این مقاله به‌منظور اعمال این فیلتر از روش کاهش به قطب دیفرانسیلی (Arkani-Hamed, 2007) استفاده شده است. در این روش برخلاف روش مرسوم و قدیمی که کل داده‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس زاویه میل و انحراف یک نقطه ثابت به قطب منتقل می‌شود (Barnov, 1957)، هر داده مغناطیسی بر اساس مختصات زاویه میل و انحراف مخصوص به خود، به قطب مغناطیسی منتقل می‌شود. بنابراین در مواردی مشابه منطقه بصیران که منطقه مورد مطالعه از وسعت بالایی برخوردار است، دقت روش انتقال به قطب دیفرانسیلی بسیار بالاتر از روش‌های قدیمی خواهد بود. شکل ۴ نتایج اعمال این فیلتر بر روی داده‌های شدت میدان مغناطیسی باقیمانده (TMA) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود وضعیت ناهنجاری‌ها کمی تغییر کرده و در موقعیت بالای توده قرار گرفته‌اند. پاسخ‌های مغناطیسی با شدت بالا، فرکانس بالا، گرادین شدید و شکل نامنظم از مهم‌ترین ویژگی‌های مناطق آتش‌فشانی است. وجود واحدهای آندزیتی و بازالتی با ضخامت قابل توجه، ترکیب متفاوت و احتمالاً مربوط به دوره‌های فورانی متفاوت از دلیل ایجاد این بافت مغناطیسی در منطقه بصیران است. این واحدهای سنگی در برخی موارد ساختارهای باریک، حلقوی و یا شبه حلقوی ایجاد می‌کنند. وجود برخی ساختارهای خطی با امتداد شمال‌شرق-جنوب غرب در بسیاری از بخش‌های منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که با افزایش مواد فرومنیزین در ترکیب واحدهای آتش‌فشانی، دامنه پاسخ مغناطیسی نیز افزایش می‌یابد. در بخش شرقی منطقه نیز یک ناهنجاری مغناطیسی مثبت مشاهده می‌شود که یک ساختار شبه حلقوی را ایجاد کرده است. این ناهنجاری می‌تواند ناشی از فعالیت یک مخزن ماگمایی و متعاقباً تفریق ماگمایی و احتمالاً یک کالدرای آتش‌فشانی در این مکان



شکل ۴. نقشه میدان مغناطیسی RTP

داده می‌شود و شاخص ساختاری صحیح‌تر شاخصی در نظر گرفته می‌شود که اولاً بیشترین خوشه‌بندی را در پاسخ‌ها داشته باشد، یعنی پاسخ‌های با عمق یکسان مجاور هم باشند و ثانیاً در مناطقی که از لحاظ آماری بی‌هنجاری وجود ندارد، تعداد نقاط حل اویلر کمینه باشد (Beiki, 2010). از آنجاکه هیچ دید مناسبی از ساختارها در اعماق زمین وجود ندارد برای رسیدن به شاخص ساختاری مناسب، باید اعداد مختلف شاخص ساختاری، مورد آزمایش قرار گیرند. در این مطالعه از مقدار ۰/۵ تا ۳ با افزودن مقادیر ۰/۱ تخمین این اندیس صورت گرفت. با توجه به مطالب مذکور، بهترین شاخص ساختاری که برای شکل بی‌هنجاری اصلی موجود در منطقه برآورد شد، دامنه عددی بین ۰/۸ تا ۱/۲ است که به‌طور میانگین شاخص ساختاری ۱/۲ به‌عنوان شاخص ساختاری میانگین در منطقه مورد بررسی انتخاب شد. این موضوع

کمترین مربعات قابل حل است (Reid et al., 1990). مقدار شاخص ساختاری به هندسه و شکل منشاء بی‌هنجاری مغناطیسی وابسته است و مقدار آن از صفر تا سه (در مغناطیس) می‌باشد؛ به‌طوری‌که مقدار صفر مربوط به یک ساختار صفحه‌ای مانند مرز لایه‌های مختلف زمین‌شناسی، مقدار یک مربوط به دایک، مقدار ۲ مربوط به استوانه و مقدار ۳ به کره مغناطیسی مربوط می‌شود.

به‌منظور اعمال روش اویلر بر روی داده‌های منطقه مورد بررسی از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj استفاده شده است. پس از آماده‌سازی نقشه میدان باقیمانده، نقشه‌های مشتقات میدان مغناطیسی در سه جهت  $X, Y, Z$  که تهیه آن لازمه اجرای فرایند واهمامیخت اویلر است، تهیه شدند. همچنین برای اعمال فرایند اویلر نیاز به شاخص ساختاری<sup>۱</sup> و اندازه پنجره<sup>۲</sup> حل اویلر می‌باشد. برای دستیابی به پاسخ‌های مناسب، شاخص‌های ساختاری به‌صورت پیش‌فرض به مسئله

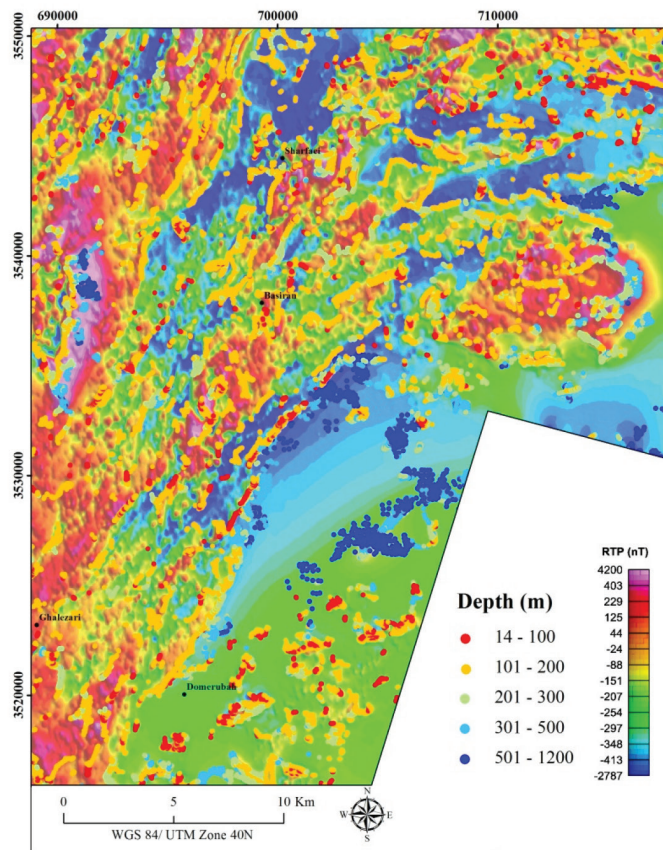
1. Structural index  
2. Window size

۲- روش واهمامیخت ورنر (Werner Deconvolution) روش واهمامیخت ورنر یک روش خودکار برای تحلیل عمق و موقعیت افقی داده‌های مغناطیسی بوده که در امتداد پروفیل‌های برداشت داده به کار می‌رود. این روش تا حد زیادی مشابه روش اوپلر می‌باشد. روش ورنر مبتنی بر این فرض می‌باشد که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌توانند توسط توده‌های صفحه‌ای نازک و ورقه‌ای مشابه دایک، سیل و یا همبری‌های زمین‌شناسی با گسترش عمق نامحدود، تخمین زده شوند (Werner, 1953). معادله میدان مغناطیسی ناشی از دایک نازک با امتداد طولی و عمقی نامحدود به صورت زیر است (Hartman et al., 1971):

$$\Delta T(x) = \frac{A(x-x_0)+Bd}{(x-x_0)^2+d^2} \quad (2)$$

که در آن،  $d$  عمق دایک،  $A$  و  $B$  ثابت‌هایی هستند که تابعی از میدان مغناطیسی، خودپذیری مغناطیسی و شکل هندسی منبع می‌باشند.  $x_0$  نیز فاصله افقی نقطه سطحی

نشان‌دهنده غالب بودن ساختارهای مغناطیسی خطی در منطقه است. با به نقشه درآوردن نقاط حل اوپلر پس از اعمال پنجره‌سازی، بهترین مجموعه نقاط حل مربوط به روش اوپلر با اندیس ساختاری  $1/2$  و اندازه پنجره  $750$  متر مربع ( $27 \times 27$  متر) تعیین شدند؛ که در شکل ۵، نقاط مذکور روی نقشه شدت میدان باقی‌مانده، تصویر شده و نتایج این تخمین عمق در نقاط مختلف نقشه با دایر رنگی توپر مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش اوپلر بر روی بی‌هنجاری منطقه مورد بررسی، اعماق متفاوتی را برای ساختارها نشان می‌دهد؛ به طوری که عمق سقف بی‌هنجاری‌های منطقه در حدود نزدیک به صفر تا  $1200$  متر برآورد می‌شود. در بسیاری از نقاط منطقه که عمدتاً منطبق بر واحدهای آتشفشانی است، عمق کمتر از  $200$  متر برآورد شده است؛ اما در مناطق پوشیده از آبرفت به خصوص نقاط شرقی منطقه مورد بررسی، عمق منشاء مغناطیسی به حدود  $1200$  متر می‌رسد.



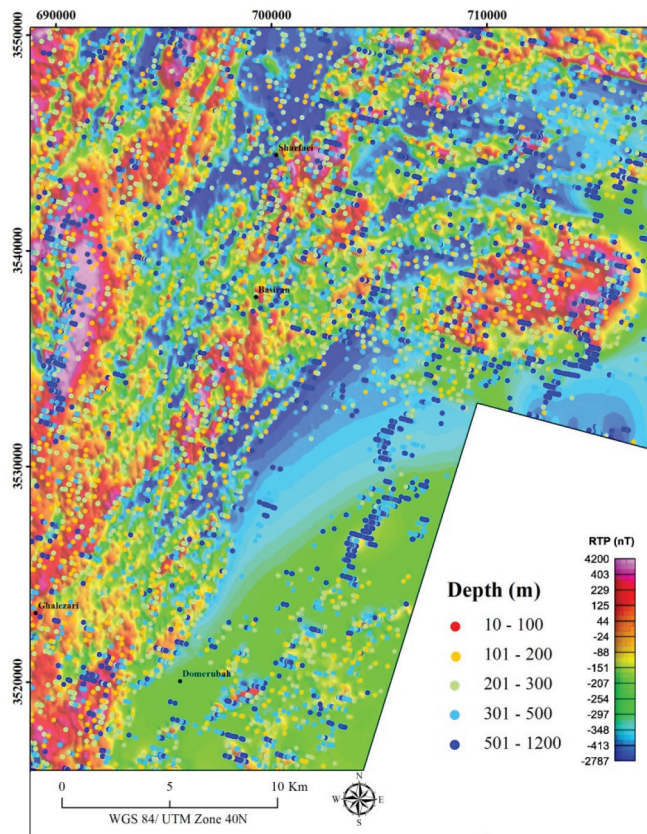
شکل ۵. تخمین عمق به روش واهمامیخت اوپلر. دایر توپر رنگی بیانگر میزان عمق برآورد شده در منطقه بصیران هستند



توپر در شکل ۶ نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر نتایج حاصل از این روش با روش اویلر سعی شده است که بازه‌های عمقی و رنگ‌های مورد استفاده در هر دو روش مشابه باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش ورنر عمق‌های نسبتاً بالاتری را در اکثر ناهنجاری‌ها برآورد می‌کند. همچنین بیشینه عمق به دست آمده نیز به ۱۵۰۰ متر می‌رسد. اما به‌طور کلی تغییرات عمقی برآورد شده مشابه روش اویلر بوده به‌گونه‌ای که در نقاط رخنمون واحدهای آتشفشانی عمق برآورد شده به حدود ۲۰۰ متر و در مناطق پوشیده آبرفتی به عمق حدود ۱۵۰۰ متر می‌رسد.

دایک از ابتدای پروفیل می‌باشد. واهمامیخت ورنر مشتق افقی میدان مغناطیسی را محاسبه می‌کند و ساختارهای منبع مغناطیسی را به صورت دایک و یا مرزهایی با عمق نامحدود در نظر می‌گیرد و با کمینه‌سازی تابع به روش کمترین مربعات، عمق منابع مغناطیسی را با بکار بردن یک سری پنجره‌های در حال حرکت و در حال گسترش در امتداد پروفیل داده‌ها برآورد می‌نماید.

به منظور اعمال روش ورنر بر روی داده‌های منطقه مورد بررسی نیز از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj استفاده شد. نتایج این روش مشابه روش اویلر به صورت دایر رنگی



شکل ۶. تخمین عمق به روش واهمامیخت ورنر. دایر توپر رنگی بیانگر میزان عمق برآورد شده در منطقه بصیران هستند

و فیلترسازی نیز دارای پراکندگی فراوانی هستند. بنابراین شناخت و تجربه مفسر برای محاسبه و برآورد مناسب‌ترین عمق ضروری می‌باشد. از آنجایی که نتایج تخمین عمق در هر نقطه می‌تواند شامل توده‌های کم عمق (طول موج کوتاه) و عمیق (طول موج بلند) باشد، زمانی که هدف مفسر شناسایی عمق پی‌سنگ مغناطیسی است می‌بایست بیشترین

### ۳- تلفیق روش‌های تخمین عمق اویلر و ورنر

روش‌های اویلر و ورنر پاسخ‌های عمقی نسبتاً متفاوتی را برای یک ناهنجاری مغناطیسی ایجاد می‌کنند که یافتن عمق واقعی منشاء ایجادکننده ناهنجاری را دشوار می‌سازد. بعلاوه استفاده از روش‌های مختلف تخمین عمق سبب تولید پاسخ‌های انبوهی می‌شود که حتی پس از خوشه‌بندی

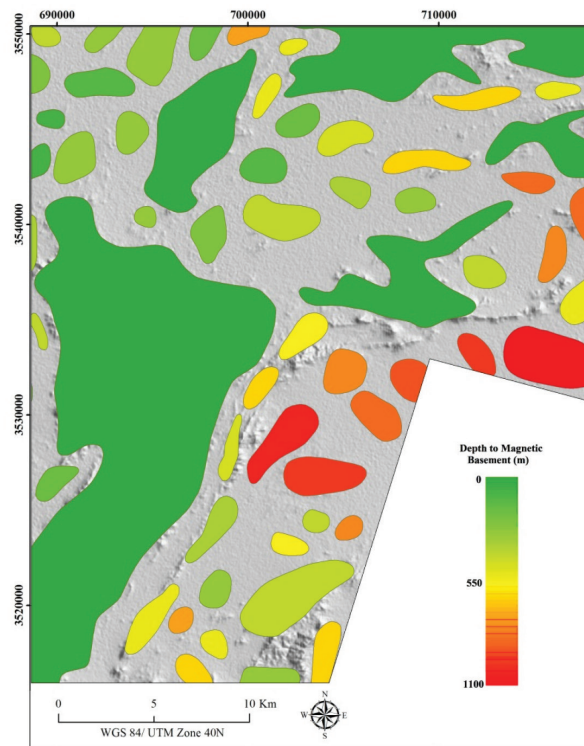
است. برای روش ورنر نیز این رویه اجرا شده است. در نقاطی که هر دو روش اویلر و ورنر از نظر خوشه‌بندی حل‌ها، نتایجی نسبتاً مشابهی نشان می‌دهند از میانگین عمق این دو روش استفاده شده است. در نهایت بیش از ۵۰ چند ضلعی عمقی به دست آمد که پس از تبدیل آن‌ها به یک گرید، خطوط هم‌تراز عمقی تولید و بر روی نقشه مدل ارتفاعی منطقه نشان داده شد (شکل ۸). در این شکل عمق پی‌سنگ مغناطیسی در هر مکان با استفاده از خطوط هم‌تراز عمقی قابل مشاهده است. عمق محاسبه شده در هر نقطه نسبت به سطح زمین برآورد شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود بیشترین عمق پی‌سنگی مربوط به حوضه رسوبی شرق منطقه است که ضخامت آن به بیش از ۱۲۰۰ متر نیز می‌رسد. همچنین در بخش شمال شرقی منطقه و روستای بصیران، یک حوضه رسوبی محصور شده، مشاهده می‌گردد که توسط واحدهای آتش‌فشانی شمال و جنوب محدود شده و بیشینه عمق آن به حدود ۶۰۰ متر می‌رسد. پی‌سنگ مغناطیسی در دیگر نقاط منطقه مورد بررسی یا نزدیک به سطح زمین بوده و یا در سطح زمین رخنمون دارد. نقشه عمق پی‌سنگ مغناطیسی اطلاعات بسیار خوبی از وضعیت ساختار پی‌سنگی منطقه به دست می‌دهد به‌طوری‌که استفاده از آن در مطالعات و کاوش‌های زمینی در آینده بسیار ارزشمند است.

### شناسایی خطواره‌های مغناطیسی

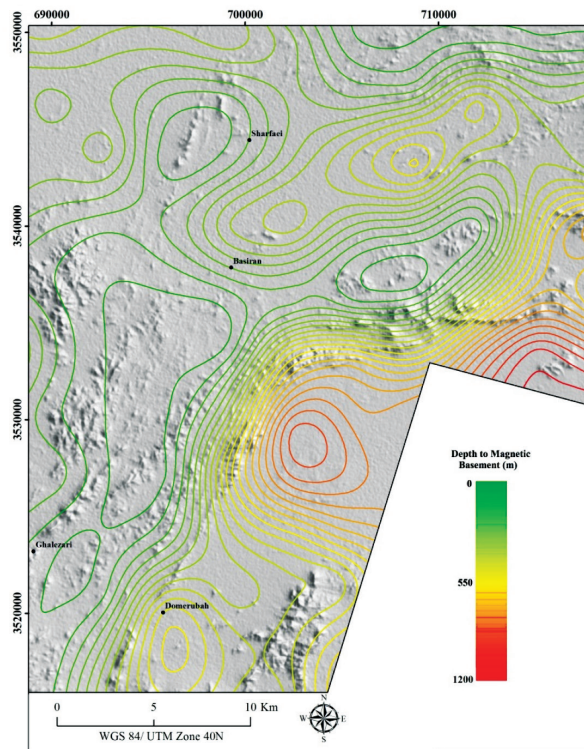
شناسایی ساختارهای خطی به‌خصوص سیستم‌های گسل و درزه به دلیل ارتباط با سیالات گرمایی، از نظر اکتشافات معدنی حائز اهمیت می‌باشند. در منطقه بصیران به دلیل حضور سنگ‌های آذرین با تباین خودپذیری مغناطیسی بالا، استفاده از روش مغناطیس‌سنجی برای شناسایی خطواره‌های پنهان ابزاری مفید و کارآمد محسوب می‌شود. روش‌های متعددی برای شناسایی و برجسته‌سازی خطواره‌ها استفاده می‌شود که در این میان یکی از متداول‌ترین و کارآمدترین این روش‌ها استفاده از فیلتر مشتق زاویه تیلت است. با استفاده از این فیلتر می‌توان انواع خطواره‌های مغناطیسی (فابریک‌ها و گسل‌ها) را شناسایی کرد.

عمق‌های برآورد شده را مدنظر قرار دهد. همچنین در این موارد، شناخت مفسر از ویژگی‌های سنگ‌شناسی پی‌سنگ مغناطیسی دارای اهمیت بالایی است، زیرا در برخی مناطق پی‌سنگ مغناطیسی در سطح زمین رخنمون دارد. در مورد منطقه بصیران، کلیه نتایج پاسخ‌های عمقی به محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 منتقل شد و به همراه نقشه‌های زمین‌شناسی، ماهواره‌ای و مغناطیسی مورد تحلیل قرار گرفت. بدین‌صورت که در مرحله اول با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و ماهواره‌ای رخنمون‌های مغناطیسی پی‌سنگی (واحدهای آتش‌فشانی و توده‌های نفوذی ریشه‌دار و ضخیم) شناسایی و تفکیک شد و به آن‌ها عمق صفر نسبت داده شد. در مرحله بعد با استفاده از نتایج تخمین عمق حاصل از روش‌های اویلر و ورنر و همچنین بررسی سایر نقشه‌های مغناطیسی و زمین‌شناسی، برای هر ساختار و یا زون خاص که نتایج عمقی مناسب و قابل قبولی ارائه می‌دهند، یک چند ضلعی رسم و مناسب‌ترین عمق متوسط به آن نسبت داده شد (شکل ۷). برای دستیابی به بهترین نتایج برآورد عمق بستر مغناطیسی از معیارهای زیر استفاده شده است:

۱. با افزایش عمق، خطای برآورد عمق منبع مغناطیسی افزایش می‌یابد. بنابراین حل‌های با آستانه انحراف استاندارد تخمین عمق بالاتر از ۱۰ درصد نادیده گرفته شد.
۲. علاوه بر خطای عمقی، خطای افقی نیز در هنگام محاسبات تخمین عمق وجود دارد، بنابراین آن دسته از حل‌هایی که موقعیت افقی آن‌ها خارج از پنجره حل اویلر و ورنر قرار گرفته نادیده گرفته شد.
۳. با توجه به عدم امکان عمق بیشتر از ۱ الی ۲ کیلومتر در منطقه مورد مطالعه، به‌صورت پیش‌فرض آستانه بالایی حل‌های عمقی، تعریف و قبل از شروع محاسبات در نظر گرفته شد.
۴. مقایسه نتایج عمقی حل‌های اویلر و ورنر در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه روش مفیدی برای رسیدن به نتایج واقعی است. بنابراین خوشه‌بندی مناسب‌ها حل‌ها می‌تواند معیاری خوبی برای این مقایسه باشد. در نقاطی که روش اویلر از خوشه‌بندی بهتری برخوردار باشد، عمدتاً از نتایج این روش برای تعیین عمق استفاده شده



شکل ۷. نقشه چند ضلعی های عمقی حاصل از تلفیق اطلاعات زمین شناسی و نتایج اعمال روش های اویلر و ورنر، رنگ های هر چند ضلعی بیانگر میزان عمق تفسیر شده در آن موقعیت است



شکل ۸. نقشه خطوط هم تراز تخمین عمق پی سنگ مغناطیسی در منطقه بصیران با استفاده از تفسیر داده های مغناطیسی

### ۱- فیلتر مشتق زاویه تیلت

به ترتیب برای ادامه فراسوهای ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد (شکل ۹-ب، ج و د). با افزایش ارتفاع ادامه فراسو، خطواره‌های عمیق‌تر در نقشه نمایان‌تر می‌شوند.

### ۲- فابریک‌ها و گسل‌های مغناطیسی پنهان

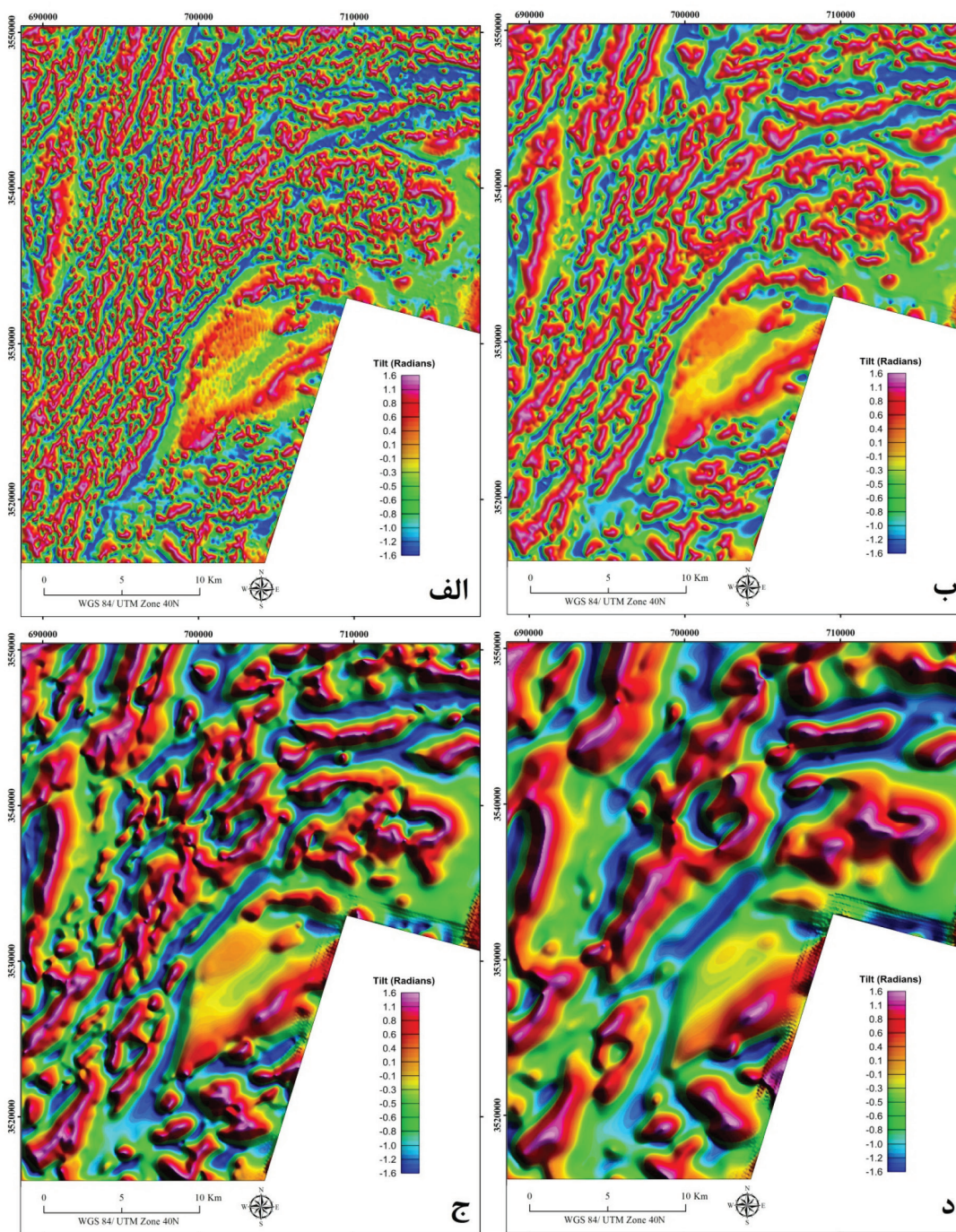
فیلتر تیلت ابزار مناسبی برای شناسایی فابریک‌ها و گسل‌ها است. در این پژوهش از این فیلتر به منظور شناسایی فابریک‌ها و گسل‌های زمین‌شناسی پنهان در منطقه بصیران استفاده شد. به کلیه اثرات خطی کوچک مقیاس در نقشه مغناطیسی، فابریک گفته می‌شود. برای شناسایی دقیق آنها، از نقشه زاویه تیلت استفاده می‌شود به نحوی که خط‌الراس پیک‌های مغناطیسی در این نقشه را می‌توان به عنوان فابریک در نظر گرفت (شکل ۱۰). فابریک‌های مغناطیسی جزئیات بسیار کوچک ساختارها و حوزه‌های مغناطیسی را نشان می‌دهند. در مجموع بیش از ۱۲۵۰ فابریک مغناطیسی در منطقه بصیران شناسایی شد. میانگین طول هر کدام از این فابریک‌ها در این منطقه در حدود ۳۰۰ متر است. قطع‌شدگی و تغییر جهت فابریک‌ها می‌تواند از شواهد وجود گسل‌ها و یا ساختارهای اصلی تکتونیکی در این منطقه باشد.

مهم‌ترین کاربرد فیلتر مشتق تیلت برجسته‌سازی گسل‌های مغناطیسی است. در این پژوهش از داده‌های مغناطیس با وضوح بالا (فاصله خطوط ۲۵۰ متر) استفاده شده است. بنابراین امکان بررسی دقیق گسل‌های مغناطیسی اصلی و فرعی در منطقه بصیران امکان‌پذیر است. به‌طور کلی برای شناسایی گسل‌های مغناطیسی می‌بایست مرز بین دو قطب منفی و مثبت در نقشه تیلت (مقادیر صفر) مورد توجه قرار گیرد. همچنین باید به هر گونه نواحی خطی و باریک، قطع ناگهانی، پله‌ها و ناپیوستگی‌ها و همچنین جابجایی‌های تند در نقشه تیلت توجه کرد (Korhonen et al., 2004). فابریک‌های شناسایی شده، نقش مهمی در شناسایی گسل‌های مورد نظر دارند. در مبحث شناسایی گسل‌ها اگرچه نقشه پایه، مشتق تیلت است اما توجه هم‌زمان به دیگر نقشه‌های مغناطیسی به‌خصوص نقشه‌های مشتق قائم و افقی و همچنین RTP و TMA مفید است. در کنار همه نقشه‌های مغناطیسی، تجربه و شناخت مفسر و داشتن اطلاعات زمین‌شناسی (توجه کافی به نقشه زمین‌شناسی)

به‌طور کلی برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها از فیلترهای بالاگذر مانند مشتق افقی و قائم استفاده می‌شود. داده‌های میدان پتانسیل به‌طور کلی شامل ناهنجاری‌های متعددی هستند که ناشی از توده‌های متفاوت‌اند. گاهی چند توده در مجاور هم هستند و منجر به تداخل بی‌هنجاری‌ها می‌شوند. همچنین ممکن است دو توده با ویژگی‌های یکسان در عمق‌های متفاوت قرار داشته باشند که این منجر به ایجاد یک بی‌هنجاری ضعیف در کنار یک بی‌هنجاری قوی می‌شود. در سال‌های اخیر به منظور برجسته‌سازی هم‌زمان بی‌هنجاری‌های ضعیف در کنار بی‌هنجاری‌های قوی، از نسبت‌های بین مشتق قائم و افقی استفاده شده است. میلر و سینگ (۱۹۹۴) زاویه تیلت را برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها معرفی کردند. این فیلتر برابر با معکوس تانژانت نسبت مشتق قائم به مشتق افقی است. زاویه تیلت یک فیلتر مناسب برای متعادل‌سازی دامنه بی‌هنجاری‌های قوی و ضعیف است. این فیلتر به صورت رابطه زیر معرفی می‌شود (Miller and Singh, 1994):

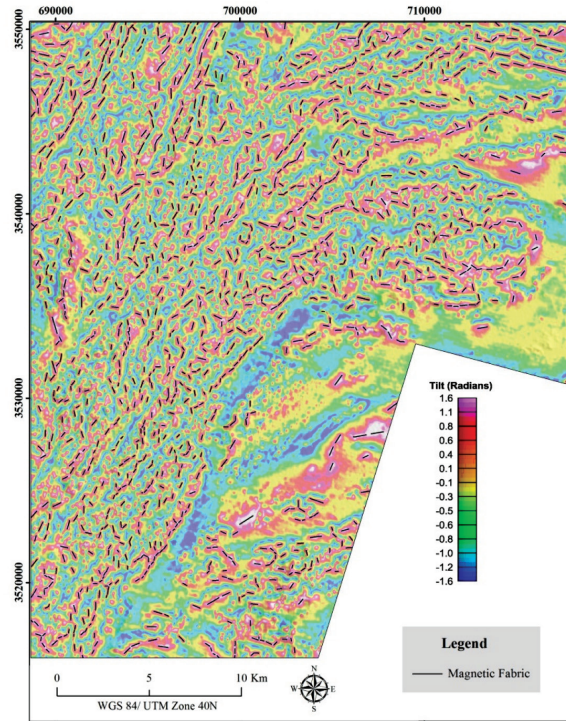
$$Tilt = \frac{\partial T / \partial z}{\sqrt{(\partial T / \partial x)^2 + (\partial T / \partial y)^2}} \quad (3)$$

نقشه مشتق زاویه تیلت بر مبنای داده‌های انتقال به قطب محاسبه و نشان داده شده است (شکل ۹-الف). همان‌طور که مشاهده می‌شود ناهنجاری‌های مغناطیسی خطی به‌خوبی برجسته گردیده است. این مسئله در مورد منطقه بصیران که در یک محیط با مغناطیس بالا واقع شده و در اثر فعالیت‌های تکتونیکی و وقوع فرآیندهای آتش‌فشانی مختلف سبب بروز گسل‌ها و شکستگی‌های زیادی شده، دارای پیچیدگی زیادی است. علی‌رغم توانایی این فیلتر در برجسته‌سازی هم‌زمان خطواره‌های سطحی و عمقی، به دلیل وجود ناهنجاری‌های سطحی فراوان در منطقه بصیران، به نظر می‌رسد تفکیک گسل‌های کم‌عمق و عمیق از یکدیگر به راحتی امکان‌پذیر نیست. برای رفع این مشکل از فیلتر ادامه فراسو قبل از اعمال فیلتر مشتق تیلت استفاده شد. بدین منظور که ابتدا فیلتر فراسوی مورد نظر بر روی نقشه RTP اعمال و سپس فیلتر مشتق تیلت محاسبه شد. نتایج اعمال این روش را

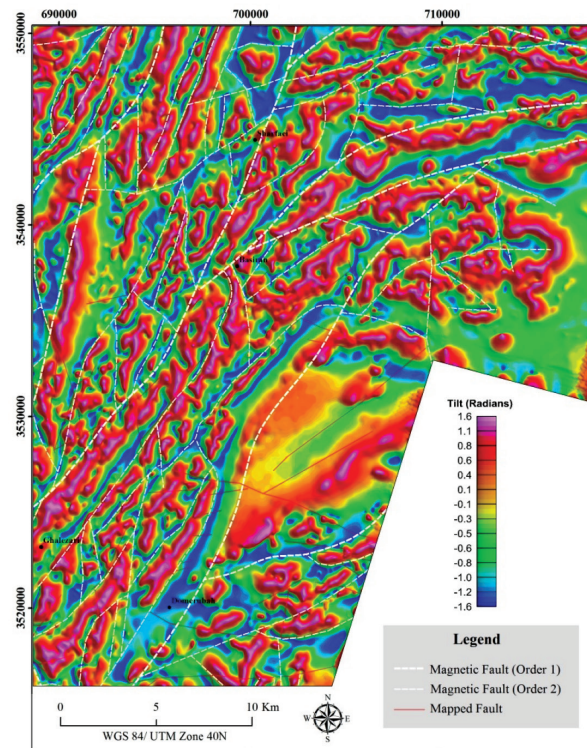


شکل ۹. نقشه‌های مشتق زاویه تیلت حاصل از داده‌های RTP پس از اعمال فیلتر فراسو. (الف صفر، ب ۲۰۰ متر، ج ۵۰۰ متر، د ۱۰۰۰ متر

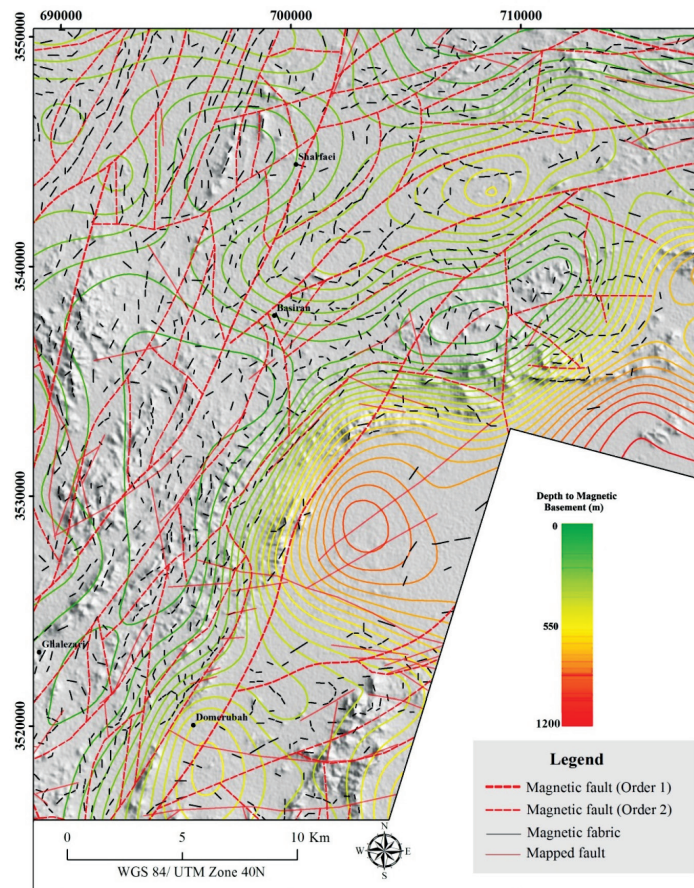
برای شناسایی گسل‌ها و برخورداری از دانش تکتونیکی برای برقراری ارتباط منطقی گسل‌ها و ساختارها نسبت به هم، امری ضروری است. بدین ترتیب با در نظر گرفتن موارد بالا، گسل‌های منطقه مورد بررسی شناسایی و در شکل ۱۱ ارائه شده است. در مجموع بیش از ۸۰ گسل مغناطیسی ناشناخته شناسایی و به نقشه درآمد است. از آنجایی که گسل‌ها از نظر گستردگی عملکرد عمق و میزان اهمیت با هم تفاوت دارند، به همین منظور سعی شده است که از این



شکل ۱۰. نقشه مشتق زاویه تیلت به همراه فابریک‌های مغناطیسی شناسایی شده، بیش از ۱۲۰۰ فابریک مغناطیسی شناسایی شده و با رنگ مشکی نمایش داده شده است



شکل ۱۱. نمایش گسل‌های مغناطیسی شناسایی شده به همراه گسل‌های نقشه زمین‌شناسی در منطقه بصیران، کلیه این گسل‌ها بر روی نقشه زاویه تیلت با ارتفاع ادامه فراسو ۲۰۰ متر نمایش داده شده‌اند



شکل ۱۲. نقشه نتایج نهایی حاصل از تلفیق و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه بصیران

از مغناطیس‌سنجی هوابرد با فاصله خطوط پرواز ۲۵۰ متر و ارتفاع پرواز ۴۰ متر مورد مطالعه قرار گرفت. پس از اعمال تصحیحات و پردازش‌های لازم بر روی داده‌ها، نقشه‌های میدان مغناطیسی تهیه شد. سپس بر اساس اصول تفسیر کیفی و کمی، نتایج بسیار مهمی به لحاظ ساختار زمین‌شناسی و تکتونیکی در منطقه آشکار شد. در این پژوهش با هدف تولید اطلاعات پایه برای مطالعات بعدی در آینده، به تفسیر این داده‌ها پرداخته شده است. برآورد ضخامت رسوبات غیرمغناطیسی و شناسایی خطواره‌های مغناطیسی در کل منطقه از نتایج این پژوهش است. نقشه تلفیق نتایج تفسیر داده‌ها را بر روی نقشه DEM-90m را در شکل ۱۲ مشاهده می‌کنید. خطوط هم‌تراز عمق پی‌سنگ مغناطیسی به‌خوبی ضخامت رسوبات غیرمغناطیسی را در این منطقه نشان می‌دهد. بیشترین ضخامت رسوبات مربوط

نظر مورد تفکیک قرار گیرند. انتظار می‌رود گسل‌های اصلی (Order 1) علاوه بر ایجاد تغییرات مغناطیسی سطحی، سبب ایجاد تغییراتی در بستر مغناطیسی نیز شوند. این امر سبب می‌شود که اثر آن‌ها حتی در نقشه‌های تیلت فراسوی بالا نیز قابل مشاهده باشد. بنابراین در این پژوهش آن دسته از گسل‌هایی که در نقشه‌های تیلت فراسوی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر قابل ردیابی هستند به‌عنوان گسل‌های اصلی یا مرتبه اول (Order 1) و آن دسته از گسل‌هایی که صرفاً در نقشه‌های تیلت فراسوی کمتر از ۵۰۰ متر قابل ردیابی هستند به‌عنوان گسل‌های فرعی یا مرتبه دو (Order 2) دسته‌بندی شده‌اند.

### نتیجه‌گیری

منطقه مورد مطالعه در جنوب شهرستان بیرجند (بصیران) با وسعت بیش از ۸۵۰ کیلومتر مربع با استفاده

- سایت پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور به نشانی [www.ngdir.ir](http://www.ngdir.ir).
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ بیرجند و بصیران.
- Aghanabati, A., 1998. Major sedimentary and structural units of Iran (map). Geological Survey of Iran.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, S. A. J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 283-296.
- Arjmandzadeh, R. and Santos, J. F., 2014. Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 103, 123-140.
- Arkani-Hamed J., 2007. Differential reduction to the pole: Revisited: *Geophysical Journal International*, 72, 1, L13-L20.
- Barghi, B., Calagari, A., Zarrinkoub, M., Simmonds, V., 2018. Geologic and geochemical investigation on the Mn veins in Jonub-E Sehchangi, SW Birjand, Southern Khorasan province (east Iran), *Geosciences*, 27, 106, 3-12.
- Barnov V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies: *Geophysics*, 22, 359-383.
- Beiki M., 2010. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. *Geophysics*, 75, 6, I59-I74.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestley, K., Talebien, M., Ghafuri Ashtiani, M., 1999. The 1997 May 10 به حوضه رسوبی شرق منطقه است که بخش‌هایی از آن توسط واحدهای رسوبی سازند شمشک پوشیده شده است. بر این اساس، ضخامت این واحدها به حدود ۱۲۰۰ متر نیز می‌رسد. فابریک‌ها و گسل‌های مغناطیسی شناسایی شده، نشان‌دهنده پیچیدگی تکتونیکی در منطقه است. گسل‌های اصلی کنترل‌کننده‌های تکتونیکی اصلی در این منطقه هستند و به دلیل گسترش عمقی زیاد می‌توانند نقش مهمی در چرخش سیالات و انتقال محلول‌های کانه‌ساز از عمق به سطح یا نزدیک سطح زمین داشته باشند. این گسل‌ها همچنین کنترل‌کننده گسل‌های فرعی نیز هستند به طوری که کلیه گسل‌های فرعی توسط گسل‌های اصلی محدود و محصور شده‌اند. نکته قابل توجه دیگر این است که گسل‌های اصلی از روند ساختارهای عمومی منطقه طبیعت می‌کنند. به نظر می‌رسد کلیه ساختارهای زمین‌شناسی در امتداد روند NE-SW شکل گرفته‌اند اما فعالیت‌های ایجاد شده در خرد قاره ایران مرکزی سبب چرخش این ساختارها به خصوص در بخش شمال شرق منطقه شده است. نقشه توپوگرافی بستر مغناطیسی و خطواره‌های ارائه شده در شکل ۱۲ می‌تواند به‌تنهایی و یا به‌عنوان لایه‌ای مهم در تلفیق با سایر اطلاعات اکتشافی در منطقه بصیران مورد استفاده قرار گیرد.
- ### منابع
- امیرپور اصل، ا. و سهرابی، ق.، ۱۳۹۴. پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی برای تعیین مرز ساختارهای مغناطیسی و محل گسل‌های مدفون ایران، فصلنامه علوم زمین، ۹۷، ۱۱۵-۱۲۲.
- فنایی خیرآباد، غ.، ۱۳۸۵. پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی منطقه بصیران با استفاده از اسپلاین‌های مکعبی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۹۶.
- فنایی خیرآباد، غ.، حسین‌زاده، ن.، نمکی، ل. و صداقت، ب.، ۱۳۸۷. پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی منطقه بصیران با استفاده از اسپلاین‌های مکعبی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۴، ۲، ۴۳-۵۱.
- فروتن، م. و خیرالهی، ح.، ۱۳۹۳. گسل‌های مغناطیسی بنیادی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.



- Zirkuh (Qaenat) earthquake (M.W7.2): Faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 136, 671-694.
- Camp, V. E., and Griffis, R. J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 15,3, 221-239.
  - Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, C. H. R., Baumann, A. and Horn, P., 1983. Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran, Ministry of mines and metals. Geological Survey of Iran, Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran 51, 285-336.
  - Hartman, R. R., Teskey, D. J. and Friedberg, J. L., 1971. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. *Geophysics*, 36, 891-918.
  - Karimpour, M. H. Stern, C. R. Farmer, L. Saadat, S. and Malekezadeh, A., 2011. A Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran. *Journal GeoPetroleum*, 1, 19-36.
  - Korhonen, K., Paanaen, M. and Paulamaki, S., 2004. Interpretation of lineaments from airborne geophysical and topographic data, Geological Survey of Finland.
  - Kumar, R., Bansal, A., Anand, S., Roa, V. and Singh, K., 2018. Mapping of magnetic basement in Central India from aeromagnetic data for scaling geology, *Geophysical Prospecting*, 66, 226-239.
  - Lotfi, M., 1982. Geological and geochemical investigations on the volcanogenic Cu, Pb, Zn, Sb ore-mineralizations in the Shurab-GaleChah and northwest of Khur (Lut, east of Iran). Unpublished Ph.D thesis, der Naturwissenschaften der Universitat Hamburg, 151.
  - Mbarga, T.N., Feumoe, A.N.S., Dicoum, E. M. and Fairhead, J. M., 2012. Aeromagnetic data interpretation to locate buried faults in south-east Cameron: *Geophysica*, 48,1-2, 49-63.
  - Miller, H. and Singh, V. 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
  - Nabighian, M., V. Grauch, R. Hansen, T. Lafehr and Y. Li et al., 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70, 33ND-61ND.
  - Pang, K. N., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y., Chu, CH. H., Lee, H. Y. and Lo, CH. H., 2013. Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180, 234-251.
  - Phillips, J. D., 2002. Processing and Interpretation of Aeromagnetic Data for the Santa Cruz Basin-Patagonia Mountains Area, South-Central Arizona, U.S. Geological Survey Open-File Report.
  - Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J. and Somerton, I. W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, 55, 80-91.
  - Saadat, S., Stern, C. R. and Karimpour, M. H., 2008. Geochemistry of Quaternary Olivine Basalts from the Lut Block, Eastern Iran. American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract #T21A-1933.
  - Saadat, S., Stern, C. R. and Karimpour, M. H., 2009. Quaternary mafic volcanic rocks along the Nayband fault, lut block, eastern Iran. Geological Society of America Annual Meeting,

18-21 October.

- Tarkian, M., Lotfi, M. and Baumann, A., 1983. Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of mines and metals. Geological Survey of Iran, Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran 51, 357-383. Geological Survey of Iran. Tehran, Iran.

- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, J. R. and Camp, V. E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. Geological Society of America Bul-

letin, 94, 134-150.

- Walker, R. T., Gans, P., Allen, M. B., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, N. and Zarrinkoub, M., 2009. Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. Geophysical Journal International. 177, 783-805.

- Werner, S., 1953. Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies: Geophysics, 47, 118-123.